KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI BÜYÜKLÜKLERE SAHİP AŞINDIRICI PARTİKÜL KARIŞIMLARININ Ti6Al4V ALAŞIMININ EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS

Makina Müh. Egemen AVCU

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK

KOCAELİ, 2011

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI BÜYÜKLÜKLERE SAHİP AŞINDIRICI PARTİKÜL KARIŞIMLARININ Ti6Al4V ALAŞIMININ EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EGEMEN AVCU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 ARALIK 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 13 OCAK 2011

Tez Danışmanı
Doç.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
(.....)

Üye
Doç.Dr. Sedat KARABAY
(.....)

Üye
Prof.Dr. Ahmet ÜNAL
(.....)

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ

Titanyum ve alaşımları yüksek mukavemet, korozyon direnci ve düşük yoğunluk gibi özellikleri bünyesinde barındıran önemli mühendislik malzemelerindendir. En çok kullanılan titanyum alaşımı, Ti6Al4V sembolü ile anılan % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren alfa-beta alaşımıdır. Titanyum alaşımlarının endüstriyel uygulamalarının % 45'inde Ti6Al4V alaşımları kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımlarının en önemli özellikleri; korozyona karşı yüksek dirençleri, sertlikleri ve yüksek dayanımlarıdır. Bu üstün özellikleri sayesinde Ti6Al4V alaşımları, tıbbi uygulamalarda, havacılık endüstrisinde, kimyasal tesislerde, denizcilik uygulamalarında ve savunma sanayinde birçok uygulama alanı bulmaktadır. Tüm bu olumlu özelliklerine karşılık titanyum ve alaşımları, zayıf aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın meydana geldiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Titanyum ve alaşımlarında, sürtünme ve aşınma sonucunda malzeme ve enerji kaybı yaşanmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan oksit yapı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir.

Katı partikül erozyonunda malzemeler, yüzeylerine çarpan aşındırıcı partiküllerin etkisiyle hasara uğramaktadır. Uzay ve havacılık uygulamalarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, jet motorlarında, helikopter rotor kanatlarında, türbinlerde ve kömür dönüştürme santrallerinde bu aşınma tipini yoğun olarak görmek mümkündür. Aşındırıcı partiküller hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantılarına, boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarparak şiddetli aşınmalar meydana getirmektedir. Titanyum ve alaşımlarının yoğun olarak kullanıldığı bu uygulama alanlarında, katı partikül erozyonu neticesinde malzemede hasar meydana geleceği açıktır. Bu durumda katı partikül erozyonu nedeniyle oluşabilecek hasarların önüne geçilebilmesi ve bu hasarların en aza indirgendiği konstrüksiyonların yapılabilmesi için titanyum ve alaşımlarının katı partikül erozyonu karakteristiğinin bilinmesi gerekmektedir.

Diğer yandan implant uygulamalarında kemik oluşumunun ve tutunmasının sağlanması, yapıştırma uygulamalarında ise bir miktar mekanik bağlanma etkisi yaratılması amacıyla titanyum ve alaşımlarının yüzeylerinin pürüzlendirilmesi gerekmektedir. Bu uygulamalarda istenilen yüzey alanı ve temas yüzeyi, malzeme yüzeyinin katı partikül erozyonu ile pürüzlendirilmesi ile elde edilebilir. Bu açıdan bakıldığında katı partikül erozyonu bir yüzey işleme yöntemidir ve bu yöntem ile istenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesi için malzemenin hangi parametreler altında aşındırılması gerektiği bilinmelidir.

Bu çalışmada katı partikül erozyonu ayrıntılı bir şekilde incelenirken, hedef malzeme (aşınan malzeme) olarak düşük aşınma direncine sahip Ti6Al4V alaşımı seçilmiştir. Böylece Ti6Al4V alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışları karakterize edilmiştir. Katı partikül erozyonu testlerinde hedef malzeme, farklı boyutlarda aşındırıcı partiküller ve bu aşındırıcı partiküllerin farklı oranlarda karıştırılmaları ile hazırlanan partikül karışımları kullanılarak aşındırılmıştır.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bilgi birikimi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, teorik ve deneysel çalışmalar süresince yardımlarını esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK' e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.
Sivil Havacılık ve Meslek Yüksekokulu'nda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Öğretim Görevlisi Sinan FİDAN ve Yrd. Doç. Dr. İsa TAŞKIRAN' a teşekkür ederim.

Bu çalışma "110M064" nolu "Farklı Büyüklüklere Sahip Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Sünek, Yarı-Sünek ve Gevrek Malzemelerin Katı Partikül Erozyonu Davranışına Etkileri" başlıklı "TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı" tarafından desteklenen araştırma projesi kapsamında yapılmıştır. Bu vesile ile bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan TÜBİTAK' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. TÜBİTAK MAM, Malzeme Enstitüsü gerçekleştirilen çalışmalarım süresince vermiş oldukları destek nedeniyle Enstitü Müdür Yardımcısı Doç. Dr. Volkan GÜNAY başta olmak üzere, arkadaşım Yüksek Makine Mühendisi Zafer YÜCEL ve tüm enstitü çalışanlarına teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım süresince maddi manevi her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen, beni cesaretlendiren aileme teşekkür eder saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER iii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ ix
SİMGELER VE KISALTMALAR xi
ÖZET xii
İNGİLİZCE ÖZET xiii
1. GİRİŞ 1
2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI 3
2.1. Titanyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi 4
2.2. Titanyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri 5
2.3. Titanyum ve Alaşımlarının Kimyasal İçeriği 8
2.4. Titanyum ve Alaşımlarının İçyapı Özellikleri 10
2.5. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması 11
2.5.1. Saf titanyum 11
2.5.2. α titanyum alaşımları 13
2.5.3. α-yakın titanyum alaşımları 13
2.5.4. α+β titanyum alaşımları 14
2.5.5. β titanyum alaşımları 16
2.6. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları 16
2.6.1. Biyomedikal uygulamalarda titanyum ve alaşımlarının kullanımı 18
2.6.2. Titanyum ve alaşımlarının havacılık uygulamaları 21
2.6.3. Titanyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisi uygulamaları 24
2.6.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer kullanım alanları 25
2.7. Titanyum ve Alaşımlarının Aşınma Davranışları 26
3. AŞINMA 28
3.1. Adhezif (Yapışma) Aşınma 29
3.2. Abrasif Aşınma 30
3.3. Korozif Aşınma 31
3.4. Yorulma Aşınması 32
3.5. Oksidasyon Aşınması 32
3.6. Erozif Aşınma 33
4. KATI PARTİKÜL EROZYONU 35
4.1. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Faktörler 35
4.1.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı 36
4.1.2. Aşındırıcı partiküllerin hızı 38
4.1.3. Aşındırıcı partiküllerin kütlesel debisi 39
4.1.4. Aşındırıcı partiküllerin boyutu 40
4.1.5. Aşındırıcı partiküllerin karışım oranı 43
4.1.6. Aşınan malzeme özellikleri 43
5. TEKNİK BİLGİLER 44

5.1. Kumlama 44
5.1.1. Basınçlı kumlama 44
5.1.2. Vakumlu kumlama 48
5.2. Alüminyum Oksit 51
6. MALZEME VE YÖNTEM 55
6.1. Kullanılan Malzemeler 55
6.2. Uygulanan Deneysel Yöntem 58
7. DENEYSEL BULGULAR 60
7.1. Kütlesel Debilerin Hesaplanması 60
7.2. Katı Partikül Erozyonunun Zamana Bağlı Değişimi 65
7.3. Katı Partikül Erozyonunun Partikül Çarpma Açısına Bağlı Değişimi 70
7.4. Katı Partikül Erozyonunun Püskürtme Basıncına Bağlı Değişimi 74
7.5. Katı Partikül Erozyonunun Aşındırıcı Partikül Boyutuna Bağlı Değişimi 76
7.6. Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Katı Partikül Erozyonuna Etkileri 79
7.7. Elementsel Analizler 90
7.8. Morfolojik Analizler 95
7.8.1. Aşınan yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı incelenmesi 95
7.8.2. Aşınan yüzey morfolojisinin püskürtme basıncına bağlı incelenmesi 103
7.8.3. Aşınan yüzey morfolojisinin katı partikül boyutuna bağlı incelenmesi 107
7.8.4. Aşınan yüzey morfolojisinin partikül karışımlarına bağlı incelenmesi 109
8. SONUÇ 113
KAYNAKLAR 118
ÖZGEÇMİŞ 122

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Farklı metallerde spesifik mukavemetin (mukavemet/yoğunluk) sıcaklığa bağlı değişimi [2, 3] 7
Şekil 2.2: Ti6AlV ‘un a) 1050 °C ‘den, c) 800 °C ‘den, e) 650 °C ‘den yavaş soğutma sonucunda, b) 1050 °C ‘den, d) 800 °C ‘den, f) 650 °C ‘den hızlı soğutma sonucunda oluşan mikro yapı görüntüler [1] 15
Şekil 2.3: Dünyadaki titanyum tüketim oranları [2, 3] 17
Şekil 2.4: Dokuların titanyum alaşımları ile uyumu [2] 19
Şekil 2.5: F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranları görülmektedir [2, 3] 23
Şekil 3.1: Tribolojik sistemik şematik gösterimi [25] 29
Şekil 3.2: Adhezif aşınma sonrasında malzeme yüzeyinin görünümü [23] 30
Şekil 3.3: İki ve üç cisimli abrasif aşınmanın şematik gösterimi [25]. 31
Şekil 3.4: Erozif aşınmanın şematik görünümü [25] 33
Şekil 3.5: Erozif aşınma örnekleri [25] 34
Şekil 4.1: Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [36]. 37
Şekil 4.2: Partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi [44]. 38
Şekil 4.3: Epoksi ve kompozitlerinin aşınma oranının partikül hızına bağlı olarak değişimi [45]. 39
Şekil 4.4: Erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi [51]. 40
Şekil 4.5: Farklı boyutlardaki aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde oluşturdukları hasarın şematik gösterimi [53] 41
Şekil 4.6: Erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi [44]. 42
Şekil 5.1: Basınçlı kumlama işlemi akış şeması 44
Şekil 5.2: Basınçlı hava etkisiyle vakum yapılarak kumlama yapılan sistemin akış şeması 49
Şekil 5.3: Alüminyum oksit çeşitleri [59] 51
Şekil 6.1: Ti6Al4V numunelerin boyutları 55
Şekil 6.2: 60 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı 56
Şekil 6.3: 80 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı 57
Şekil 6.4: 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı 57
Şekil 6.5: Katı partikül erozyonu test düzeneği 59
Şekil 7.1: Aşındırıcı partiküllerin kütlesel debilerinin aşındırıcı partikül boyutu ve basınca bağlı değişimi 61
Şekil 7.2: 60 mesh – 120 meshlik karışımın kütlesel debisinin karışım konsantrasyonuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 ve 4 bar) 63
Şekil 7.3: 60 mesh – 80 meshlik karışımın kütlesel debisinin karışım konsantrasyonuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 ve 4 bar) 64
Şekil 7.4: 80 mesh – 120 meshlik karışımın kütlesel debisinin karışım konsantrasyonuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 ve 4 bar) 64

Şekil 7.5: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)... 66
Şekil 7.6: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)..... 66
Şekil 7.7: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)..... 67
Şekil 7.8: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)... 67
Şekil 7.9: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)..... 68
Şekil 7.10: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)..... 68
Şekil 7.11: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh). 69
Şekil 7.12: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh).... 69
Şekil 7.13: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh).... 70
Şekil 7.14: Aşınma miktarının farklı basınçlar altında, partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 72
Şekil 7.15: Aşınma miktarının farklı basınçlar altında, partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh) 73
Şekil 7.16: Aşınma miktarının farklı basınçlar altında, partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)..... 74
Şekil 7.17: Katı partikül erozyonunda aşınma miktarının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi..... 75
Şekil 7.18: Katı partikül erozyonunda aşınma miktarının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 Bar, aşınma süresi: 20 s)..... 77
Şekil 7.19: Katı partikül erozyonunda aşınma miktarının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 3 Bar, aşınma süresi: 20 s)..... 77
Şekil 7.20: Katı partikül erozyonunda aşınma miktarının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 4 Bar, aşınma süresi: 20 s)..... 78
Şekil 7.21: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımlar için, aşınma oranının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s) 81
Şekil 7.22: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s)..... 83
Şekil 7.23: 60 – 80 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s)..... 84
Şekil 7.24: 80 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s)..... 85
Şekil 7.25: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 1,5 bar, aşınma süresi: 20 s)..... 87

Şekil 7.26: 60 – 80 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 1,5 bar, aşınma süresi: 20 s)..... 88
Şekil 7.27: 80 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 1,5 bar, aşınma süresi: 20 s)..... 89
Şekil 7.28: Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 4 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi: 20 s)..... 90
Şekil 7.29: SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi 91
Şekil 7.30: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x100 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 95
Şekil 7.31: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 96
Şekil 7.32: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh..... 96
Şekil 7.33: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede compo modunda SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 97
Şekil 7.34: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x800 büyütmede compo modunda SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 98
Şekil 7.35: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x100 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 99
Şekil 7.36: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 99
Şekil 7.37: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x3000 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 100
Şekil 7.38: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x3000 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 100
Şekil 7.39: Aşınma miktarının partikül çarpma açısına bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi: 20s) 101
Şekil 7.40: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x3000 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 102
Şekil 7.41: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x3000 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh) 102
Şekil 7.42: 1,5 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh).....104
Şekil 7.43: 1,5 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh).....104
Şekil 7.44: 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh).....105
Şekil 7.45: 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh).....105
Şekil 7.46: 1,5 ve 4 bar püskürtme basınçları ile aşındırılmış numunelerin aşınma iz uzunluğu ölçümleri (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh) 106

Şekil 7.47: Aşınma miktarının püskürtme basıncına bağlı değişimi (partikül çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi: 20s).....106
Şekil 7.48: 120 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s).....107
Şekil 7.49: 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s).....108
Şekil 7.50: Aşınma miktarının partikül boyutuna bağlı değişimi (partikül çarpma açısı: 15°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s).....108
Şekil 7.51: %75 60 mesh - % 25 120 mesh ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s).....109
Şekil 7.52: %50 60 mesh - % 50 120 mesh ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s).....110
Şekil 7.53: % 25 60 mesh - % 75 120 mesh ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s).....110
Şekil 7.54: % 100 60 mesh'lik partiküller ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s).111
Şekil 7.55: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma miktarlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s).....112

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Titanyum, Alüminyum ve Demir' in bazı fiziksel özellikleri 6
Tablo 2.2: Ti6Al4V alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği [14] 9
Tablo 2.3: Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri [4].....12
Tablo 4.1: Partikül erozyonuna etki eden faktörler 36
Tablo 5.1: Kumlama yöntemlerinin karşılaştırılması [58] 49
Tablo 5.2: Farklı malzemeler için önerilen kumlama malzemeleri [58].....50
Tablo 5.3: Alüminyum Oksit mineralinin fiziksel özellikleri [59] 52
Tablo 5.4: Alüminyum Oksit mineralinin kimyasal özellikleri.....53
Tablo 5.5: Alüminyum Oksit Aşındırıcıların Kullanımı [59].....54
Tablo 6.1: Çalışmalarda kullanılan titanyum alaşımının (Ti6Al4V) elementsel analizi.....55
Tablo 6.2: Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları.....56
Tablo 6.3: Kumlama deneylerinde kullanılan parametreler.....58
Tablo 6.4: Deneylerde kullanılacak 9 farklı partikül konsantrasyonu 59
Tablo 7.1: 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutlarına sahip aşındırıcıların kütlesel debilerinin hesaplanması için gerçekleştirilen deneylerin sonuçları 60
Tablo 7.2: 60, 80, 120 mesh partikül boyutlarındaki aşındırıcıların farklı oranlarda karıştırılmaları ile hazırlanan karışımların 4 bar püskürme basıncında kütlesel debileri.....62
Tablo 7.3: 60, 80, 120 mesh partikül boyutlarındaki aşındırıcıların farklı oranlarda karıştırılmaları ile hazırlanan karışımların 1,5 bar püskürme basıncında kütlesel debileri.....63
Tablo 7.4: 60 meshlik aşındırıcı kumlar ile yapılan deneylerin sonuçları 71
Tablo 7.5: 80 meshlik aşındırıcı kumlar ile yapılan deneylerin sonuçları 72
Tablo 7.6: 120 meshlik aşındırıcı kumlar ile yapılan deneylerin sonuçları 73
Tablo 7.7:. Aşınma miktarının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi (aşındırma süresi: 20 s).....75
Tablo 7.8: Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları.....76
Tablo 7.9: Katı partikül karışımları.....79
Tablo 7.10: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller ile hazırlanan karışımların katı partikül erozyon deneyi sonuçları (deney süresi: 20 s).....80
Tablo 7.11: 60 – 120 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması 82
Tablo 7.12: 60 – 80 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması 83
Tablo 7.13: 80 – 120 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması 85
Tablo 7.14: 60 – 120 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması 86

Tablo 7.15: 60 – 80 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması 87
Tablo 7.16: 80 – 120 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması 88
Tablo 7.17: Spektrum 1 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları 91
Tablo 7.18: Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış yüzeyin EDS analizi.....92
Tablo 7.19: Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış yüzeyin EDS analizi.....93
Tablo 7.20: Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış yüzeyin EDS analizi.....94

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

m : Metre
cm : Santimetre
μm : Mikrometre
nm : Nanometre
Kg : Kilogram
gr : Gram
mg : Miligram
s : Saniye
dk : Dakika
Pa : Pascal
MPa : Megapascal
Gpa : Gigapascal
W : Watt
J : Joule

Kısaltmalar

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
SPH : Sıkı Paket Hekzagonal
YMK : Yüzey Merkez Kübik
HMK : Hacim Merkez Kübik
CP : Saf Titanyum
ASTM : American Society of Testing Materials
MR : Manyetik Rezonans
XRF : X-Işını Floresan Spektrometresi
EDS : Enerji Dağılım Spektrometresi
ppm : Parts per million

FARKLI BÜYÜKLÜKLERE SAHİP AŞINDIRICI PARTİKÜL KARIŞIMLARININ Ti6Al4V ALAŞIMININ EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ

Egemen AVCU

Anahtar kelimeler: Katı partikül erozyonu, Ti6Al4V alaşımı, aşındırıcı partikül karışımları

Bu çalışmada ilk olarak Ti6Al4V alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışının ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Ti6Al4V numuneler özel olarak hazırlanan kumlama düzeneğinde farklı parametreler altında aşındırılmış ve aşınma miktarının değişimi incelenmiştir. Aşınan yüzeylerin morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve olası aşınma mekanizmaları tartışılmıştır.

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, Ti6Al4V malzeme farklı aşınma süreleri (2, 5, 10, 15 ve 20 s), farklı püskürtme basınçları (1,5, 3 ve 4 bar), farklı partikül çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) altında farklı boyutlarda aşındırıcı partiküller (60, 80 ve 120 mesh) kullanılarak aşındırılmıştır. En yüksek aşınma miktarı, Ti6Al4V malzemenin 30° çarpma açısı ve 4 bar püskürtme basıncı altında 120 mesh boyutunda partiküller ile 20 saniye aşındırılması ile elde edilmiştir.

Tez çalışmasının diğer amacı, farklı boyutlara sahip aşındırıcı partiküllerin birbirleri içerisinde farklı oranlarda karıştırılmaları ile hazırlanan aşındırıcı partikül karışımlarının, katı partikül erozyonu üzerindeki etkinliğinin araştırılması ve bu konu ile ilgili literatürdeki boşluğun doldurulmasıdır. Deneysel çalışmalar sonucunda, aşındırıcı partikül karışımlarının aşındırma oranlarının, karışım içerisindeki partiküllerin bireysel aşındırma oranlarından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan karışım yüzdeleri ile erozif aşınma oranları, karışım içerisindeki partiküllerin birbirleri ile etkileşimleri ve bu etkileşimlerin katı partikül erozyonu üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

EFFECTS OF ERODENT PARTICLE MIXTURES CONSIST OF DIFFERENT SIZES ON EROSIVE WEAR BEHAVIOUR OF TI6AL4V

Egemen AVCU

Keywords: Solid particle erosion, Ti6Al4V alloy, erodent particle mixtures

In this study, initial objective is to characterize solid particle erosive wear behavior of Ti6Al4V alloys in detail. With this purpose, Ti6Al4V samples were eroded in specially designed sandblasting system at various parameters and variation of wear amount was investigated. Morphology of eroded surfaces was examined by using scanning electron microscope (SEM) and possible wear mechanisms were discussed.

In the first stage of experimental studies, Ti6Al4V material was eroded in various wear times (2, 5, 10, 15 and 20 s), under various pressures (1,5, 3 and 4 bar) with various particle impingement angles (15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°) by using different size erodent particles (60, 80 and 120 mesh). Maximum wear amount was obtained when the material was eroded 20 seconds in 30° impingement angle and 4 bar pressure by using 120 mesh size erodent particles .

Another aim of the thesis is to investigate effectiveness of erodent particle mixtures (which consist various size of erodent particle in various rates) on solid particle erosion and filling the gap in literature on this subject. As a result of experimental studies, it is determined that wear rates of erodent particle mixtures are less than singular sized erodent particles. Wear rates of various particle mixtures, the interactions of particles with each other and the effects of these interactions on solid particle erosion are discussed.

1. GİRİŞ

Katı partikül erozyonunda, malzeme yüzeyine belirli bir hızla hareket eden sert partiküllerin çarpması sonucunda malzeme kaybı gerçekleşir. Uzay ve havacılık uygulamalarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, jet motorlarında, helikopter rotor kanatlarında ve türbinlerde bu aşınma tipini yoğun olarak görmek mümkündür. Katı partikül erozyonu nedeniyle uygulamada malzemeler hesaplanan ömürlerinden daha kısa sürelerde hasara uğramaktadırlar. Bu da beraberinde büyük maddi kayıplara, hatta önlem alınmaması durumunda can kayıplarına yol açabilmektedir.

Partikül erozyonu literatürde çok çalışılan popüler konulardan biridir. Erozif aşınmaya ilişkin çalışmalar iki temel nedenle yürütülmektedir. Birincisi erozif aşınmaya maruz kalacak makine parçaları ya da malzemelerin aşınma karakteristiklerinin belirlenmesi, mevcut aşınma riskleri göz önünde bulundurularak malzeme ve parça tasarımlarının yapılmasıdır. İkincisi ise malzeme yüzeyinde istenilen pürüzlülüğün elde edilebilmesi için malzemenin hangi parametreler altında aşındırılması gerektiğinin belirlenmesidir. Erozif aşınma, bir anlamda sistemlere zarar veren, onları aşındırıp kullanılmaz hale getiren bir faktör iken diğer yandan bir makine parçasına istediğimiz yüzey özelliklerini kazandırmak adına etkilerini bilerek kontrollü bir şekilde kullanmayı istediğimiz bir yöntemdir.

Titanyum ve alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranı ve yüksek sıcaklık özellikleri ile uçak endüstrisinde çok büyük öneme sahiptir. Titanyumun mükemmel korozyon direnci bu metali kimya, yiyecek endüstrileri ve biyomedikal alanda kullanışlı hale getirmiştir. Bu malzemeler için yeni kullanım alanları sürekli araştırılmakta ve keşfedilmektedir. Tüm bu olumlu özelliklerine karşın titanyum, zayıf aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın gerçekleştiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Aşınma sonucunda titanyum kullanılan uygulamalarda enerji ve malzeme kaybı olmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan oksit yapı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Titanyum ve alaşımlarının katı partikül erozyonu karakteristikleri, kullanım emniyetleri ve ömürleri açısından çok önemlidir. Bu tez çalışmasında Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyon davranışı detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Diğer tribolojik süreçler gibi katı partikül erozyonu da çok kompleks bir süreçtir. Katı partikül erozyonu, aşındırıcı partiküllerin çarpma açılarına ve boyutlarına, püskürtme basıncına ve erozyon süresine bağlı olarak gerçekleşen bir süreçtir. Tez çalışmasında ilk aşamada Ti6Al4V alaşımı, katı partikül erozyonunda etkin olan bu parametrelerin çeşitli kombinasyonları altında aşındırılmıştır. Her bir parametrenin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkisi irdelenmiştir. Literatür incelendiğinde, bugüne kadar Ti6Al4V alaşımlarının aşınma davranışının bu kadar geniş kapsamlı incelenmediği görülmektedir.

Gerçek hayatta erozif aşınmanın eşit boyutlara sahip partiküllerin etkisi altında gerçekleşmeyeceği açıktır. Ancak katı partikül erozyonu ile ilgili literatür çalışmalarının büyük bir kısmında, eleklerden geçirilerek partikül boyut dağılımı mümkün olduğunca homojen hale getirilmiş aşındırıcılar kullanılmıştır. Katı partikül erozyonunun anlaşılabilmesi için bu yaklaşımın çok yanlış olmadığı düşünülebilir. Ancak çölde esen bir rüzgar neticesinde katı partikül erozyonu ile aşınan bir helikopter pervanesi düşünüldüğünde, katı partikül erozyonunun tam olarak anlaşılabilmesi için farklı boyutlarda partiküllerden oluşan karışımların erozif aşınmaya olan etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla tez çalışmasının ikinci aşamasında farklı boyutlarda partiküllerden oluşan aşındırıcı partikül karışımları hazırlanmış ve bu karışımların Ti6Al4V malzemenin erozif aşınma davranışına etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmasının 2. bölümünde titanyum ve alaşımlarının tarihçesi, dünyadaki önemi, özellikleri, sınıflandırılması, kullanım alanları ve aşınma davranışları anlatılmıştır. Çalışmanın 3. bölümünde kısaca aşınma ve aşınma çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. Çalışmanın 4. Bölümünde geniş bir literatür taraması yapılarak katı partikül erozyonu ve katı partikül erozyonunda etkin olan parametreler detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Tez çalışmasının 5. bölümünde teknik bilgiler başlığı altında, deneysel çalışmalarda numunelerin aşındırılması için kullanılan kumlama yöntemi uygulamaya yönelik bir anlatımla verilmiştir. 6. Bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme ve yöntem açıklanmıştır. Tez çalışmasının 7. Bölümünde ilk olarak katı partikül erozyonunda etkin olan tüm parametreler incelenmiş, sonrasında ise aşındırıcı partikül karışımlarının etkileri incelenmiştir. Tez çalışmasının son bölümünde deneysel çalışmalar sonrasında çıkarılan sonuçlar özetlenmiştir.

2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi korozyon direncini bir arada bulunduran ender mühendislik malzemelerindendir. Bir arada bulundurduğu bu özelliklerden dolayı günümüzde birçok endüstriyel uygulamalarda titanyum metali veya alaşımları kullanılmaktadır.

Titanyum, hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle özellikle havacılık alanında tercih edilen bir metaldir. Titanyum yüksek sıcaklıkta ergiyen bir metal olmasından ve yüksek sıcaklılıklardaki dayanımından dolayı nikel ve kobalt içerikli alaşımlara, özellikle askeri alanda alternatif bir malzeme olmuştur. Korozyona olan direnci ile de kimya endüstrisi ve denizcilik uygulamalarının vazgeçilmez bir parçasıdır. Ayrıca son yıllarda ortopedik ve dental uygulama alanlarında da kullanılmaya başlamıştır [1].

Titanyum 4.54 gr/cm^3 yoğunluğa sahip hafif bir metaldir. Bu yoğunluk alüminyum (2.71 gr/cm^3) ile demirin (7.87 gr/cm^3) arasındadır. Titanyum demirden daha yüksek bir ergime noktasına (1668 °C>1536 °C), demir ile alüminyumun arasında ortalama bir elastikiyet modülüne sahiptir. Hafif bir metal olarak bilinen alüminyumun iki katı, demir veya nikelin ise yarı özgül ağırlığına sahiptir [2].

Tüm olumlu özelliklerine karşılık titanyum, sürtünme ve aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın meydana geldiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Titanyum kullanılan uygulamalarda, sürtünme ve şiddetli aşınma sonucu malzeme ve enerji kaybı yaşanmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan oksit yapı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Zayıf olan bu özellikleri gidermek için günümüzde çok çeşitli yüzey işlemleri uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir [3].

2.1. Titanyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi

Titanyumu, 1791 yılında İngiliz araştırmacı ve mineralojist William Gregor keşfetti. Günümüzde ilmenit olarak bilinen ve titanyum metalinin elementi olan, kara tuz olarak adlandırdığı maddeyi Helford bölgesindeki bir nehirden elde etmeyi başardı. Bu tuzu manyetik etki altında demirden ayrıştırmayı ve HCl ile dağlayarak yeni bir elementin oksidini elde etmeyi başaran Gregor, buna mekanit ismini verdi. Bundan 4 yıl sonra, Alman kimyager Martin Heinrich Klaproth, titanyum oksidi rutil (titanyum oksiti) adı verilen bir mineralden tamamen bağımsız hale getirmiş ve adını Yunan Mitolojisi'nden esinlenerek titanyum koymuştur [4].

Titanyum, dünyada yapısal olarak kullanılan metaller arasında alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer alırken; en çok rezervi olan metaller sıralamasında da dokuzuncu sırada yer almaktadır. Ancak doğada titanyum saf olarak bulunmamakla beraber saf hale getirme işlemleri bu metali pahalı kılmaktadır [4]. Oksijen ve azota olan ilgisinden dolayı titanyumun saf olarak elde edilmesi yüksek bir teknoloji gerektirmiştir ve bu sorun ancak 1938–1940 yılları arasında Dr. Kroll'un geliştirdiği ve "Kroll Yöntemi" adı verilen işlemle çözülebilmiştir. Bu işlem, titanyum tetra klorürün koruyucu atmosfer ortamında magnezyum ile indirgemesine dayanır. Bu yöntemle elde edilen titanyumun yapısı sünger gibi gözenekli olduğundan bu metale "titanyum süngeri" de denilmektedir.

Titanyumun ilk uygulamaya yönelik üretimi, ilk uçuşunu 1952'de yapan DC-7 tipi uçağın motorundaki yanma odası ve uçağın kanatlarındaki motor bağlantı yeri için yapılmıştır. İlerleyen zamanlarda geliştirilen titanyum alaşımları; kompresör disklerinde, askeri ya da ticari uçaklardaki jet motorlarının pervane kanatları ile bu uçakların iskeletinde kullanılmıştır.

1960'larda kimyasal madde pompaları ve vanaları için ilk kez dökme titanyum kullanılmıştır. Yaklaşık on yıl sonra bazı uzay uygulamaları için dökme titanyum eşsiz bir malzeme olmuştur. 1970'lerin sonunda dökme titanyum satışları titanyum endüstrisi ile paralel olarak büyümüştür.

1979 yılında, üretilen titanyum miktarının % 35'i ticari uçaklar için, % 28'i korozyona yönelik uygulamalar için, % 37'si de askeri uçak ve füzeler için kullanılmıştır. Titanyum uçak uygulamalarında hem uçağın iskeletinde hem de jet motorlarındaki

parçalarda kullanılmıştır. Boeing 747, Douglas DC-10, A 300 Airbus ve Lockheed L-1011 gibi ticari yolcu uçaklarının jet motorlarındaki bazı parçalar için, yüksek özgül dayanıma sahip malzemelerin dışında başka bir malzemenin kullanılmasının uygun olmadığı saptanmıştır.

Genel olarak titanyum kullanımı uzay uçak ve deniz sanayi alanlarında yoğunlaşmış olsa da, son otuz yılda bu metalin işleme yöntemlerindeki gelişmelere paralel olarak biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı da artmıştır [1].

Titanyum ve alaşımlarının en büyük kullanımı şüphesiz ki uzay sanayinde gerçekleşmektedir. Bunun yanında son on yıllık dönemde; kimyasal makine imalatında, gemi yapımında, otomotiv endüstrisinde, yağ ve gaz endüstrisi ekipmanlarının imalatında, gıda sanayinde, tıp uygulamalarında ve sivil mühendislik uygulamalarında titanyum ve alaşımlarının kullanım oranı hızla artmaktadır [4].

Titanyum alaşımlarının ticari uygulamalar bazında en büyük dezavantajı yüksek yarı mamul maliyetidir. Bu maliyet yüksekliğinin nedenleri arasında; çıkarılma ve ayrıştırılma sırasında karmaşık proseslere ihtiyaç duyulması, yoğun olarak bulunmama ve bu nedenle tesis yatırımlarını yeteri kadar karşılayamaması, son olarak da işleme maliyetlerinin yüksekliği sıralanabilir [4].

Titanyum rezervlerinin önemli bir kısmını Avustralya'nın doğu ve batı kıyılarındaki sahiller oluşturmaktadır. Avustralya'yı ABD, Mozambik ve Yeni Zelenda izlemektedir [1]. Titanyum ve alaşımlarının günden güne üretimi artmaktadır [5]. Metalik titanyumu Rusya % 36, Japonya % 36, Kazakistan % 25 ve diğer devletler % 3 oranında dünya piyasalarına arz etmektedirler [5].

2.2. Titanyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

Mühendislikte kullanılan metaller arasında doğadaki yaygınlığı bakımından alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer alan titanyum, kömür küllerinde ve volkanik kayalarda yoğun olarak bulunan bir metaldir [6].

Titanyum, periyodik cetvelin 4. grubunda yer alan, çok sert, gümüşi beyaz, parlak bir elementtir. Ergime noktası 1668 °C, kaynama noktası 3287 °C, özgül ağırlığı 4.54

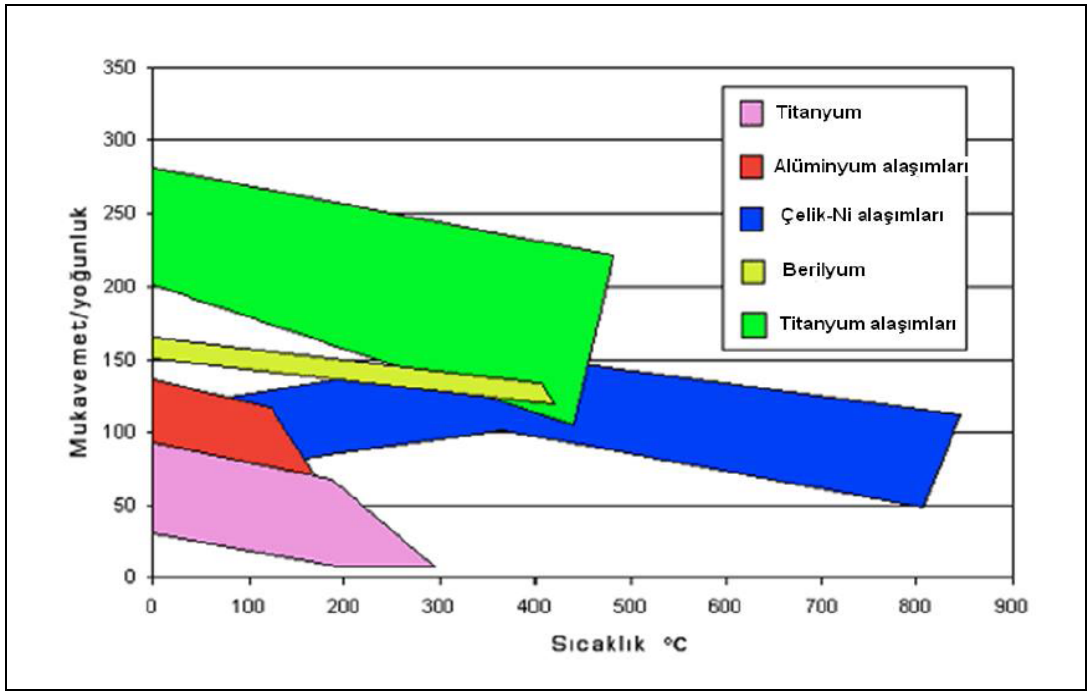
gr/cm^3'tür. Metalik halde kuvarsı çizecek kadar serttir [7]. Tablo 2.1'de titanyum, alüminyum ve demirin bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1: Titanyum, Alüminyum ve Demir' in bazı fiziksel özellikleri

Özellikler	**Titanyum**	**Alüminyum**	**Demir**
Yoğunluk (gr/cm^3)	4.54	2.7	7.87
Elastiklik Modülü (GPa)	115	62	194
Ergime Noktası (°C)	1668	660	1536
Oda sıcaklığında kristal yapısı	SPH	YMK	HMK

Titanyum; çelik kadar dayanıklıdır ve çelikten % 45 daha hafiftir. Alüminyumdan ise % 60 daha ağır olmasına karşın dayanımı 2 kat daha fazladır (Tablo 2.1). Dayanımı ve asitlere karşı direnci nedeniyle, çeşitli alaşımların yapısına katılır. Deniz suyuna karşı üstün bir dayanım göstermesi nedeniyle deniz suyundan tatlı su elde edilen tesislerde ve tuzlu suya temas eden gemi donanım parçalarının yapımında kullanılır [8, 9, 10]. Aşağıda titanyumun üstünlükleri özetlenmiştir.

- Oksitlenmeye, ter asidine, korozyona, kimyasal maddelere karşı diğer alaşımlara göre 20 kat daha dayanıklıdır.
- Her biçimde mevcuttur. (Kütük, yuvarlak, altıgen, lama, çubuk, plaka, sac, tel vb).
- Kolaylıkla kaynak edilir.
- Yangına ve darbelere dayanıklıdır.
- Biyolojik uyumluluğa sahiptir ve toksit değildir.
- Fiyatı diğer yüksek performans malzemelerine yakındır.
- Uygun kriyojenik özellikleri (-150 °C'nin altındaki ortamlardaki davranışları) vardır [5].



Şekil 2.1: Farklı metallerde spesifik mukavemetin (mukavemet/yoğunluk) sıcaklığa bağlı değişimi [2, 3]

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, korozyon direnci ve düşük ağırlık gibi özellikleri bünyesinde bir arada barındıran önemli mühendislik malzemeleridir. Titanyum ve alaşımlarının spesifik mukavemetlerinin sıcaklığa bağlı değişimi ve farklı metaller ve alaşımlar ile karşılaştırması Şekil 2.1'de gösterilmiştir [3].

Endüstriyel olarak kullanımlarına 1952'li yıllarda başlanan titanyum ve alaşımları, nispeten yeni mühendislik malzemeleridir. Bu malzemeler, yüksek bir spesifik dayanıma (dayanım/yoğunluk oranı), yaklaşık 550°C'ye kadar yüksek sıcaklık özelliklerine, oksitleyici asitlere ve klotritli (ClO_2) ortamlara karşı yüksek korozyon direncine sahiptirler [8].

En önemli titanyum mineralleri rutil, ilmenit ve anatastır. Rutil, tetragonal sistemde kristallerin sertlik derecesi 6-6.5, özgül ağırlığı 4.2-4.4 gr/cm^3'tür. Rengi sarımsı kırmızı, siyah ve kızıl kahvedir ve kimyasal bileşimi "TiO_2"dir [3]. İlmenit trigonal sistemde kristallerin sertlik derecesi 5-6, özgül ağırlığı 4-4.5 gr/cm^3'tür. Rengi siyahtır ve kimyasal bileşimi $FeTiO_3$'dir [7].

Titanyum kimyasal yönden kuvvetli bir indirgeyicidir. Bu özelliği bazen olumlu bazen de olumsuz sonuçlar vermektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda kimyasal ortamlara

direnci oldukça yüksektir. Oksitleyici asitlere ve deniz suyuna karşı çok dayanıklı iken, göreceli olarak asitlere karşı direnci biraz daha düşüktür. Uygulamada asetik asit, sülfürik asit ve tartarın asit ortamlarında kullanılabilmektedir. Diğer yandan klor gazı, hidroklorik asit, triklora asetik asit ve fosforik asit içeren ortamlarda kullanılmamalıdır. Yükselen sıcaklıkla birlikte titanyumun yüzeyindeki koruyucu asit tabakası parçalanmaya başlar ve kullanılabilirliliğini düşürecek derecede oksijen, azot ve hidrojen malzeme içerisine nüfuz eder. Metale nüfuz eden bu yabancı maddeler gevrekleşmeye ve çatlak oluşumuna sebebiyet verir [7].

Titanyum alaşımları iki belirgin özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Yüksek mukavemetleri ve üstün korozyon dayanımları, bu metal ve alaşımlarının havacılık sektörünün, kimya endüstrisinin ve medikal mühendisliğin vazgeçilmezi haline getirmiştir. Bu olumlu özelliklerine karşın titanyum, sürtünme ve aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın gerçekleştiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Titanyumun zayıf tribolojik özellikleri, yüksek ve değişken sürtünme katsayısı titanyum ve alaşımlarının kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Sürtünme ve aşınma sonucu titanyum kullanılan uygulamalarda enerji ve malzeme kaybı olmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan koruyucu oksit yapı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Titanyumun sürtünme ve aşınma özeliklerini geliştirmek için yüzey modifikasyon tekniklerinin uygulanması gerekliliği açıkça ortaya konmuştur. Zayıf olan bu özelliklerin geliştirilebilmesi için günümüzde çok çeşitli yüzey işlemleri uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir [11, 12].

2.3. Titanyum ve Alaşımlarının Kimyasal İçeriği

Saf titanyum, büyük oranda kullanıldığı çevrelerin gözüyle bakılırsa, çok değerli bir malzeme değildir. Tercih edilmesini sağlayan asıl özelliklerini düşük oranlarda eklenen alaşım elemanları ile kazanır [13].

Ticari saflıktaki titanyum içinde % 0,5-0,8 arasında yabancı madde bulunmaktadır. Titanyumu alaşımlandırmadaki esas amaç genellikle, korozyon dayanımın arttırmaktan çok mekanik nitelikleri yükseltmektir. Alaşımlandırma ile titanyumun çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri yükseltilir.

Alüminyum, oksijen, azot, karbon, kalay gibi elementler α-stabilizatör; hidrojen, gümüş, altın, krom, demir, vanadyum, magnezyum, molibden gibi elementler ise β-stabilizatör alaşım elementleri olarak adlandırılırlar. Katılan alaşım elementlerine bağlı olarak titanyumun mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri de değişmektedir [7].

En çok kullanılan titanyum alaşım tipi Ti6Al4V sembolü ile anılan % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren alfa-beta alaşımıdır. Bu alaşımın endüstriyel uygulamalardaki oranı % 45'tir. Ti6Al4V alaşımların en önemli özellikleri; korozyona karşı yüksek direnci, sertliği ve dayanıklılığıdır. Bunların yanı sıra bu alaşımlar işlenebilirlik, fabrikasyon, üretim deneyimi ve ticari olarak elde edilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı ekonomik olarak kullanışlı bir hale gelmişlerdir. Bu özelliklerinden dolayı tıbbi uygulamalar başta olmak üzere, hava araçlarında ve basınç tankları yapımında çok fazla tercih edilmektedirler. Ti6Al4V alaşımlarının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir [6].

Tablo 2.2: Ti6Al4V alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği [14]

Fiziksel Özellikler		**Kimyasal İçerik**	
	Değer		**Ti6Al4V**
Yoğunluk gr/cm^3	4.42	Alüminyum, Al	6.00%
Erime Sıcaklığı °C ± 15°C	1649	Vanadyum, V	4.00%
Özgül Isısı J/Kg °C	560	Demir, Fe	0.10%
Hacimsel Elektrik direnci ohm.cm	170	Oksijen, O	0.15%
Isıl İletkenlik W/m.K	7.2	Nitrojen, N	0.01%
Isıl Yayılma Katsayısı 0-100 °C/°C	$8.6x10^{-5}$	Hidrojen, H	<0.003%
Isıl Yayılma Katsayısı 0-100 °C/°C	$9.2x10^{-5}$	Karbon, C	0.03%
Beta Dönüşüm Sıcaklığı °C ± 15°C	999	Titanyum, Ti	Denge Miktarı

Günümüzde 100'den fazla titanyum alaşımı bilinmektedir. Bunların ancak 20-30 tanesi ticari kullanım sahasına sahiptir. Klasikleşmiş alaşımlar arasında Ti6Al4V tek başına, kullanılan toplam titanyum alaşımı miktarının yarısını oluşturmaktadır. Alaşımlandırılmamış titanyum ise kullanılan toplam miktarın % 20 ila % 30'unu teşkil eder [14].

2.4. Titanyum ve Alaşımlarının İçyapı Özellikleri

Titanyum allotropik karakterde bir malzeme olup, oda sıcaklığındaki sıkı paket hekzagonal (SPH) kristal yapıdaki α fazı, saf titanyum için yaklaşık 885 °C'de hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazına dönüşmektedir. Bu sıcaklık "β dönüşüm sıcaklığı" adını almaktadır. Oksijen, azot ve karbon gibi α fazını kararlı kılan elementlerin etkisiyle bu sıcaklık yükselirken; metalik kalıntılar veya alaşım elementlerinin etkisiyle düşmekte ya da yükselebilmektedir [4].

Alaşım elementlerinin ilavesi bu dönüşüm sıcaklığını ikiye bölmektedir. Tüm alaşımın α fazında olduğu sıcaklığa "α dönüşüm sıcaklığı"; üstündeki sıcaklıklarda tüm alaşımın β fazında olduğu sıcaklığa "β dönüşüm sıcaklığı" denilmektedir. Bu iki dönüşüm sıcaklığı arasında malzemenin mikro yapısında hem α hem de β fazı bulunmaktadır [4].

Alüminyum, α fazını kararlı hale getiren ve dönüşüm sıcaklığını yükselten en önemli alaşım elementidir. Ara yer elementlerden olan oksijen, azot ve karbon da α fazını kararlı hale getiren diğer elementlerdendir. Dönüşüm sıcaklığını düşürerek β fazını kararlı hale getiren iki grup element vardır. Bunlar β izomorf ve β ötektik elementleri olarak adlandırılırlar. İzomorf grup β fazı içinde tamamen çözünebilen molibden, tantal, vanadyum ve kolombiyum elementlerinden oluşmaktadır. Diğer grup olan β ötektik elementleri ise titanyumla ötektoid alaşımlar yapan elementlerdir. Bunlar manganez, demir, krom, silisyum, nikel, bakır ve kobalttır. Bu elementler α fazında düşük çözünürlüğe sahiptirler ve dönüşüm sıcaklığını düşürmektedirler. Gerek β fazını kararlı hale getirmek gerekse yüksek sıcaklıktaki kullanımlarda görülen metaller arası bileşiklerin oluşumunu azaltmak için, bu β izomorf grup elementleri alaşım içerisine katılmalıdır [1].

Titanyum alaşımlarının özellikleri genel olarak , α ve β fazlarının yapıdaki hacimsel oranlarına ve dağılımlarına bağlılık göstermektedir. HMK β ile kıyaslandığında, HSP α daha yoğun paketlenmiştir ve anizotropik bir kristal yapıya sahiptir. α fazı β fazı ile karşılaştırıldığında, plastik deformasyona daha yüksek dayanım gösterdiği, sünekliğinin daha düşük olduğu, mekanik ve fiziksel özelliklerinin anizotropik olduğu, difüzyon hızının yaklaşık β difüzyon hızının iki katı olduğu ve daha yüksek sürünme dayanımı sergilediği söylenebilir. En önemli α kararlaştırıcı elementi olan alüminyumun yoğunluğu titanyumun yaklaşık yarısıdır. Bu sebeple α alaşımlarında

vanadyum ve molibden gibi daha ağır elementler kullanılsa da, α alaşımlarından daha hafiftirler. α alaşımları genelde orta derece mukavemete sahiptir. α+β alaşımları ve yarı kararlı β alaşımları ise, sırasıyla yüksek ve çok yüksek mukavemete sahip olabilirler. Ancak çok yüksek mukavemet değerlerine erişebilen β alaşımları bu özellik için sünekliklerinden taviz vermek durumundadırlar. Süneklik büyük ölçüde mikro yapıya bağlı olsa da, β alaşımlarına yaşlandırma sertleştirmesi uygulanmadığı zaman sünekliği α ve α+β alaşımlarınınkine yakın olabilir [2].
Titanyumun yüksek oksijen afinitesi, oda sıcaklığında dahi yüzeyinde çok ince (nm mertebesinde) bir oksit tabakası oluşmasına sebep olur. Titanyum esaslı malzemelerin yüksek korozyon dayanımlarının sebebi yüzeyde oluşan bu oksit tabakasıdır. α alaşımlarının korozyon dayanımları, β alaşımlarından daha yüksektir [2].

2.5. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları yapısında bulundurdukları fazlara göre; α , α + β alaşımları ve β alaşımları olmak üzere başlıca üç gruba ayrılmaktadır. α alaşımının tüm yapısında α fazı bulunurken, β alaşımlarının yapısında büyük ölçüde β fazı bulunmaktadır. α + β alaşımları ise oda sıcaklığında yapılarında hem α hem de β fazı bulundururlar. Yapısında β fazından daha fazla α fazı içeren alaşımlara alfaya yakın alaşımlar denilmektedir [1].

Titanyum ve alaşımları;

• Alaşımlandırılmamış (Saf) Titanyum

• α alaşımları

• α-yakın alaşımları

• α+β alaşımları

• β alaşımları olarak da gruplandırılırlar [15].

2.5.1. Saf titanyum

Ticari saflıktaki titanyum (CP Ti), % 98.635 - % 99.5 oranında titanyum içermektedir. CP Ti mikro yapısında oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal yapıdaki α fazında bulunmakta olup 885 °C'de hacim merkezli kübik yapıdaki β fazına dönüşür. Ayrıca

bu dönüşüm sırasında her iki fazın da bir arada bulunduğu küçük bir sıcaklık aralığı da vardır.

CP Ti, genellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen ancak korozyon direncinin ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilir. Oda sıcaklığındaki alaşımsız titanyumun mikro yapısı % 100 oranında α fazındadır. Katkı elementlerinin, özellikle demirin, miktarı arttıkça mikro yapıda tane sınırlarında küçük fakat artan oranlarda β fazına rastlanır [8,13].

Yaklaşık % 98-99.5 oranında Ti içeren alaşımsız ürünler, özellikle yüksek dayanımın gerekmediği uygulamalarda, genellikle yüksek korozyon dirençlerinden dolayı tercih edilirler. Bu malzemeler, aynı zamanda yüksek şekillendirilebilirlik ve kaynak edilebilirliklerinden dolayı kullanılırlar. Saf titanyum alaşımlarının akma dayanımları ara yer ve empürite atomlarının oranına bağlı olarak 170-480 MPa arasında değişir. Tablo 2.3'te alaşımsız Ti'nin farklı ara yer elementi oranlarına sahip tipleri ve mekanik özellikleri görülmektedir [5].

Tablo 2.3: Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri [4]

ASTM standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Katışkı Elementleri (ağırlıkça max %)				
			α	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
Grade 7	280	340	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25

Ticari saflıktaki titanyum, genellikle yüksek dayanım gerektirmeyen ancak korozyon dayanımının ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilir. Tablo 2.1'de görüldüğü gibi kimyasal içeriğine bağlı olarak akma dayanımı 170 MPa ile 480 MPa arasında değişen birçok saf titanyum malzeme vardır. Oksijen ve demir, bu malzemelerde

öncelikli olarak bulunan katışkı elementleridir. Tablodan da görülebileceği gibi demir ve oksijen içeriği arttıkça malzemenin dayanımı da artmaktadır [4].

2.5.2. α titanyum alaşımları

Alüminyum, kalay veya zirkonyum içeren α alaşımları daha çok yüksek sıcaklık ya da çok düşük sıcaklıklarda tercih edilmektedir. α fazı zengin olan alaşımlar, β alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı genellikle daha dayanıklıdır. Çok düşük miktarda ara yer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedir [2].

α alaşımları, α+β alaşımları ve β alaşımlarının aksine kararlı α fazına sahip olduklarından ısıl işlem ile sertleştirilememektedir. Fakat soğuk işlem sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri yok etmek için yeniden kristalleşme tavlaması veya sadece tavlama işlemi yapılabilmektedir.

Bu alaşımların dövülebilme kabiliyeti çok düşüktür ve dövme sıcaklığı aralığı α+β alaşımları veya β alaşımlarından daha dardır. Dövme sırasında oluşan yüzey ve/veya göbek çatlakları bunu açıkça göstermektedir. Böyle bir oluşumu önlemek için de dövme işleminde deformasyon miktarının daha küçük seçilmesi ve malzemenin sık sık tavlanması gerekmektedir. Tek fazlı yapıya sahip α alaşımına Ti5A12.5Sn alaşımı örnek olarak gösterilebilir [8,13].

α alaşımları en çok kimya sanayi ve proses mühendisliğince kullanılır. Bu uygulamalarda gerekli olan çok yüksek korozyon dayanımı ve deformasyon kabiliyetine sahiptirler. CP-Titanyumun mukavemet gereksinimini karşılayamadığı yerlerde, en eski titanyum alaşımı olan ve uzun zaman önce kabul görmüş Ti5A12.5Sn alaşımı tercih edilir. Düşük sıcaklıklı uygulamalar olan hidrojen depolama ve basınçlı araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

2.5.3. α-yakın titanyum alaşımları

α fazı sabitleyicileri olarak bilinen Al, O gibi elementleri fazla miktarda; Mo, V gibi β fazı sabitleyicilerini ise düşük miktarda içerirler. "Süper α" ya da “α-yakın alaşımlar” olarak bilinen bu alaşımların mikro yapısındaki α fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda ß fazını kararlı kılan elementler içermektedir [8,13].

Klasikleşmiş biçimde, α-yakın alaşımlar yüksek sıcaklık gerektirecek uygulamalarda kullanılırlar. α alaşımlarının üstün sürünme dayanımı ve α+β alaşımlarının yüksek mukavemeti α-yakın alaşımlarda bir arada bulunur. Günümüzde çalışma sıcaklıkları 500-550 °C'ye kadar çıkmıştır. Ti8Al1Mo1V, yüksek sıcaklık için geliştirilmiş ilk titanyum alaşımıdır. Ancak yüksek alüminyum içeriği zayıf gerilmeli korozyon dayanımına sebep olur. Bu sebeple sonradan geliştirilen bütün titanyum alaşımları en fazla %6'ya kadar alüminyum içeriğine sahiptirler. 1970'lerde yapılan bir çalışma içerikte en fazla %0,1'e kadar olan silisyumun, Ti6Al2Sn4Zr2Mo'nin sürünme dayanımını çok arttırdığını ortaya koymuştur. Bugün en gelişmiş yüksek sıcaklık titanyum alaşımı Amerikan TIMETAL 834 olarak bilinir. Kullanım sıcaklığı üst limiti olan 600°C'de uzun süre kararlı davranmakta ve oksidasyona karşı koruma sağlamaktadır [17].

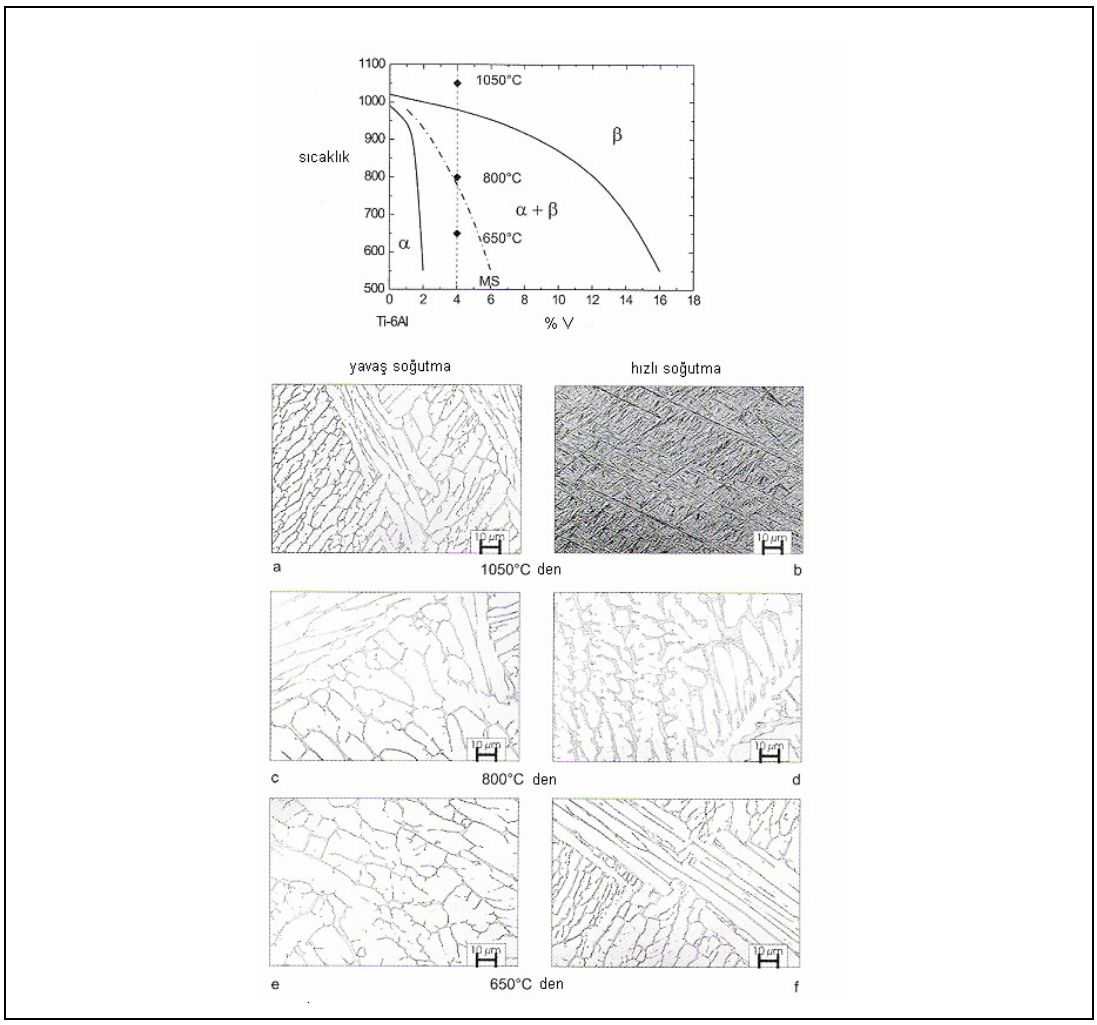
Ti-8-1-1 yüksek sıcaklıktaki kullanım alanları için geliştirilmiş ilk titanyum alaşımıdır. Bu alaşımda yüksek miktarda bulunun alüminyum gerilmeli korozyon problemlerine sebep olduğundan günümüzde kullanılan alüminyum alaşımlı titanyumlarda alüminyum miktarı %6'yı aşmamaktadır [1].

2.5.4. α+β titanyum alaşımları

Bu alaşımlar bileşimlerinde % 4-6 miktarı arasında β fazını kararlı hale getirecek alaşım elementleri içerirler. Bu alaşımların en önemlileri Ti6Al4V ve Ti6Al6V2Sn'dir [1]. Bileşimlerinde α ve β fazlarının kararlılığını arttıran bir ya da daha fazla kararlaştırıcı alaşım elementleri içerirler. α ve β fazını kararlaştırıcı elementlerin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla oda sıcaklığında α ve β fazlarının karışımı olan bir mikro yapı elde edilebilmektedir. Tavlama sonrasında da yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır [13]. Şekil 2.2 Ti6AlV alaşımında farklı sıcaklıklarda yavaş soğutma ve su vererek soğutma sonucunda oluşan mikro yapıları göstermektedir [1].

En yaygın kullanılan α+β alaşımı Ti6Al4V'dur. 1950'lerde geliştirilmiştir ve bilinen ilk titanyum alaşımları arasında gösterilmektedir. Ti6Al4V'un üstünlüğü sadece dengeli özellikleri değil, kullanılmış ve kullanılmakta olan titanyum malzemeler arasında en yaygın olarak kullanılanı olmasıdır. Yaygın kullanımı özellikle havacılık sanayinde önemli bir kriter olan en çok test edilmiş, denenmiş ve geliştirilmiş titanyum alaşımı

olmasını sağlamıştır. Diğer yaygın kullanıma sahip α+β alaşımları; yüksek mukavemet amaçlı geliştirilmiş Ti6Al6V2Sn,yüksek mukavemet ve yüksek tokluğa sahip Ti6Al2Sn4Zr6Mo, gaz türbin motorlarında 400 °C'a kadar olan sıcaklıklarda kullanılmak için geliştirilmiş Ti6Al2Sn2Zr2Mo2Cr alaşımlarıdır [8].



Şekil 2.2: Ti6AlV ‘un a) 1050 °C ‘den, c) 800 °C ‘den, e) 650 °C ‘den yavaş soğutma sonucunda, b) 1050 °C ‘den, d) 800 °C ‘den, f) 650 °C ‘den hızlı soğutma sonucunda oluşan mikro yapı görüntüler [1]

Toplam titanyum üretiminin % 50'sinden fazlasını oluşturan Ti6Al4V alaşımından yüksek mukavemet değerleri elde etmek için ısıl işlem uygulanabilmektedir. Bu yüzden α+β alaşımları 350-400 °C arasındaki sıcaklıklarda ve özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılabilmektedir [2].

Mukavemet artışı için, alaşım ilk olarak yarı kararlı doymuş hale getirilmek üzere çözeltiye alma sıcaklığından hızla soğutulmakta ve daha sonra yaklaşık 500 °C'de yaşlandırılmaktadır. Bu sırada mikro yapıdaki aşırı doymuş α ve β fazları çözünerek yapıya homojen bir şekilde dağılmakta ve sertlik artmaktadır [18].

2.5.5. β titanyum alaşımları

Bu alaşımlar bileşimlerinde önemli miktarda β fazını kararlaştırıcı alaşım elementleri içermektedir. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekillendirilebilme ve de yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından farklılık arz etmektedir. Bu alaşımlar oda sıcaklığında α+β alaşımları ile aynı mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda bu değerler α+β alaşımlarından sonra gelmektedir [1].

β alaşımları kararsız alaşımlardır ve α fazının β matrisi içinde çökeltilmesi ile sertleştirilirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahip olup molibden içermeleri bu alaşımların korozyona karşı direncini arttırmaktadır. α+β alaşımlarına göre daha iyi işlenebilirken ısıl işleme daha yatkın olduğu bilinmektedir [17].

β alaşımları yüksek mukavemet, yüksek tokluk direnci, bazı alaşımlarda soğuk şekillendirilebilme, kolay ısıl işlem, bazı alaşımlarda yüksek korozyon direnci gibi avantajlara sahip olmasına rağmen; yüksek yoğunluk, zayıf düşük ve yüksek sıcaklık özellikleri, segregasyon problemleri, bazı alaşımlarda düşük korozyon direnci gibi dezavantajlara da sahiptir [1].

β alaşımlarının sahip olduğu kırılma tokluğu karakteristiği, son yıllarda, uzay araçlarında kullanılması açısından önemini artırmıştır. Ayrıca Mo içeriğine sahip bazı β alaşımları iyi korozyon karakteristiğine de sahiptir.

Metastabil β alaşımları aynı zamanda;

• Oda sıcaklığında α+ β alaşımlarından daha iyi şekillendirilebilirlik karakteristiği,

•Akma dayanımının kriter olarak alındığı sıcaklıklarda α+β alaşımlarından daha yüksek dayanımı,

• Kalın kesitli parçalarda ısıl işleme α+ β alaşımlarından daha iyi cevap vermesi gibi özelliklere sahiptirler.

2.6. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

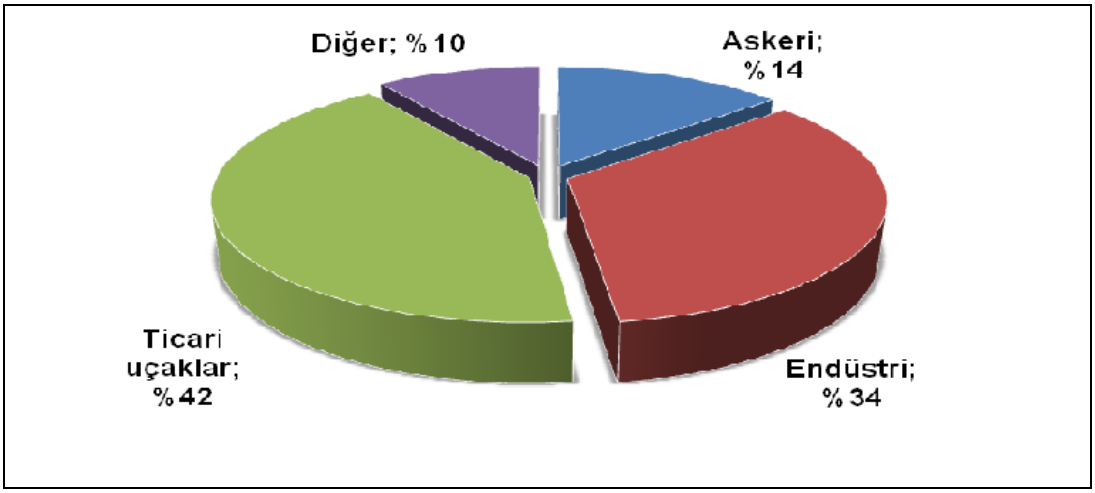
Titanyum kullanımını iki ayrı bölümde değerlendirmek gerekir:

A- Metal ve alaşımları

B- Oksit ve diğer bileşikleri

Metalik titanyum üstün fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir. Bu nedenle; uzay aracı, uçak ve füze yapımında yeri doldurulamaz bir metaldir. Yüksek hız, titreşim ve yüksek ısının söz konusu olduğu araç kısımlarında, motor türbin kanatlarında ve benzeri aşırı yüklenen diğer araç bölümlerinde çok kullanılır. Kimyasal dayanıklılığı nedeniyle korozif kimyasal madde üreten fabrikalarda sıkça kullanılır. Titanyum oksit şu anda bilinen en beyaz boya maddesidir. Titanyum beyazı adı altında boya endüstrisinde geniş çapta kullanılır. Bunun dışında; kozmetik endüstrisi, linolyum (muşamba), yapay ipek, beyaz mürekkep, renkli cam, seramik sırı, deri ve kumaş boyanması, kaynak elektrotları yapımı ve kâğıt endüstrisi gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır. Bu kadar çok kullanım alanı olmasına karşın; üretilen tüm titanoksidin % 60'ı boya endüstrisi tarafından tüketilir. Diğer bileşiklerinden titanklorit, kumaşların rengini ağartmada; tetraklorit yapay sis elde edilmesinde; titanyum karpit aşındırıcı olarak kullanılır [7].

Titanyum kullanımı ilk olarak havacılık ve uzay endüstrisiyle başlarken zamanla söz konusu üstün özellikleri nedeniyle birçok alana yayılmaya başlamıştır. Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılık uygulamalarında kullanılırken, iyi korozyon direnci göstermesi ile kimya endüstrisinde ve denizcilik uygulamalarında vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Diğer yandan biyomedikal uygulamalarda (ortopedi ve dişçilik) her üç özelliği nedeniyle kabul görmüştür [19]. Şekil 2.3'te dünyadaki titanyum tüketiminin oranları görülmektedir.



Şekil 2.3: Dünyadaki titanyum tüketim oranları [2, 3]

Uzay roketlerinin en önemli parçalarını titanyum alaşımlar oluşturmaktadır. Sürtünme yüzünden yüksek sıcaklıklara ulaşan roket uçlarında, yakıtın yandığı motor bölümünde ve gazların egzoz çıkışlarında aşırı ısınma sorunu titanyum

alaşımların yüksek erime sıcaklıkları (1677 °C) sayesinde ortadan kaldırılmıştır. Titanyum alaşımların kullanımı geçmiş yıllarda yüksek maliyetleri açısından sadece yarış otomobillerinde ve özel üretim otomobillerde sınırlı kalırken, günümüzde üretim tekniklerindeki gelişmeler sayesinde otomotiv endüstrisinde kullanımı giderek artmıştır. Titanyum alaşımların otomotiv endüstrisinde kullanım amaçlarından en önemlisi; otomobil ağırlığını minimuma indirerek, CO; yayılımı ile ortaya çıkan küresel ısınma sorununu olabildiğince azaltmaktır [6].

Titanyum ve alaşımlarının; kimyasal, endüstriyel, denizcilik ve uzay ile ilgili uygulamaların geniş bir yelpazesinde üstün, oldukça güvenilir ve ekonomik olduğu teknik açıdan kanıtlanmıştır. Metalin kuvvetli ve rijit yapısı, düşük özgül ağırlığı ve göreceli hafif oluşu, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci, kullanımının bu özel alanlarda yaygınlaşmasına neden olmuştur. Son otuz yılda metalin yeni işleme yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı artmaktadır [20].

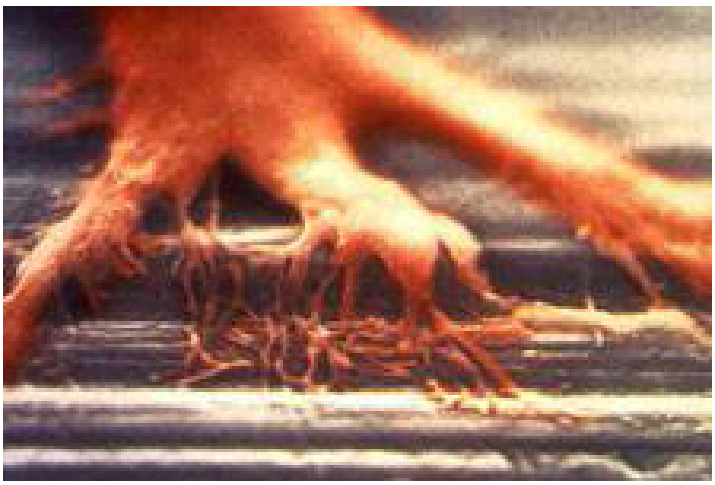
Titanyumun genel kullanım alanları Türkiye için de geçerlidir. Ülkemizde; kaynak elektrotları endüstrisi, boya endüstrisi, tekstil endüstrisi başlıca kullanım alanlarıdır. Bunların yanı sıra deri, lastik, likit gaz, çelik ve seramik endüstrilerinde de kullanılır [7].

Titanyum hala diğer yaygın kullanıma sahip metaller gibi kesintisiz üretim yöntemine sahip olmayışı ve cevherlerinin düşük zenginlikte oluşu nedeniyle pahalı bir malzemedir. Yine de diğer metallerin bir arada sunamadığı özelliklere sahip oluşu sayesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [20].

2.6.1. Biyomedikal uygulamalarda titanyum ve alaşımlarının kullanımı

Biyomalzemeler, insan vücudundaki organ ya da dokuların işlevlerini yerine getirmek veya desteklemek amacıyla kullanılan malzemeler olup; metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere 4 gruba ayrılırlar. Biyomalzemelerde en önemli özellik biyouyumluluk olup, kendisini çevreleyen dokuların normal değişimlerine engel olmayan ve dokuda istenmeyen tepkiler (iltihaplanma, pıhtı vb.) oluşturmayan malzemelerdir. Metalik biyomalzemelerden olan titanyum ve titanyum alaşımları, kemikle bağlanması iyi olan ve doku tarafından

kabul edilirliği yüksek olan biyomalzemelerdir [2]. Şekil 2.4'te vücuttaki dokuların titanyum alaşımları üzerinde gelişimi görülmektedir.



Şekil 2.4: Dokuların titanyum alaşımları ile uyumu [2]

Titanyum alaşımları yüksek korozyon dayanımı özellikleri nedeniyle insan vücudunda "İmplant" olarak kullanılan en önemli metallerdir. İnsan vücudunda bulunan asidik sıvının ph değeri 7.4'tür. Titanyum alaşımları bu asit değerinden etkilenmedikleri için insan vücuduna adaptasyon bakımından en uygun metallerdir [6].

Nikel-titanyum alaşımları, deforme edildikten sonra, ısıtıldıkları zaman ilk şekillerine dönebilme özelliğine sahiptirler. Bu özellik, (Shape Memory Effect-SME) "şekil hafıza etkisi" olarak adlandırılır. Bu alaşımın SME etkisi, ilk olarak Buehler ve arkadaşları tarafından gözlemlenmiştir. Şekil hafıza etkisinin gerekli olduğu bazı biyomalzeme uygulamaları; diş köprüleri, kafatası içerisindeki damar bağlantıları, yapay kalp için kaslar ve ortopedik protezlerin üretiminde kullanılırlar [7]. Aşağıda titanyum ve alaşımlarının, biyomedikal uygulamalardaki avantajları özetlenmiştir;

- Uzun süreli implantasyonda (deri içine yerleştirme) iyi biyouyumluluğa sahiptirler.
- Enjekte edilen maddelerle birlikte, kimyasal reaksiyona girme olasılıkları azdır.
- Manyetik olmadığından, MR (Manyetik Rezonans) için uyumludurlar.
- Yoğunlukları düşük olduğundan hafiftirler.

- Hipoalerjiktir (alerjik özelliği az).
- Mekanik dayanımları bu uygulamalar için uygundur.
- Oksit tabakası, vücut içinde titanyumu korozyona karşı dirençli kılar.
- Titanyum alaşımının elastiklik modülü diğer tüm implant materyallerine nazaran kemiğe daha yakındır [7, 2].

Son yıllarda titanyum ve titanyum alaşımlarının, medikal ve dental uygulamasında ciddi bir artış görülmektedir. Yeni işleme yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal ürünlerdeki kullanımı artmaktadır. Bugün titanyum ve alaşımları protez eklem, cerrahi splint, damar stentler ve bağlayıcıları, dental implant, kuron köprü ve parsiyel protez yapımında kullanılmaktadır [21].

Titanyum oksijenle çok çabuk reaksiyona girdiği için yüzeyinde daima koruyucu bir titanyum dioksit tabakası görülür. Bu sayede korozyona karşı yüksek direnç gösterir dolayısıyla doku uyumu en iyi olan metaldir. Günümüzde metal alerjisinin korozyon kaynaklı olduğu kanıtlanmıştır. Titanyum korozyona karşı dirençli olduğu için metal alerjisi olan hastalarda kullanılabilir. Titanyum alaşımları mikro cerrahinin hassasiyetine uygundur. Havacılık ve uzay sanayisinin ihtiyaçları ile gelişmiş olan titanyum, mikro cerrahi alanında vazgeçilmez hale gelmiştir. Yine çok önemli bir özellik olarak titanyumun bazı alaşımları aşınmaya dayanıklıdır ve uzun ömürlüdür. Sert oluşuyla ince uçları güçlü kullanıma imkân sağlamaktadır. Korozyona karşı çok yüksek dayanıma sahiptir. Titanyum alaşımlarının yorulma dayanımı da diğer metallerin yorulma dayanımlarına göre önemli ölçüde üstündür. Son yıllarda en çok kullanılan metal implant, titanyumdur [2].

Titanyum 25 yıldan daha çok süreden beri kemik içi ve subperiostal implant (cerrahi yöntemle açığa çıkarılan kemik üzerinden ölçü alınarak hazırlanan implantlar) olarak kullanılmaktadır. Kemik içi implantlar çubuk, post ve blade şeklinde saf veya alaşımlı titanyumdan yapılır. İmplant yüzeyindeki oksit tabakasının inert etkisi fizyolojik sıvı, protein, sert ve yumuşak dokunun metal yüzeyini kavramasını sağlar. Canlı doku ve implantın statik ve fonksiyonel olarak bu birleşme işlemine “osseointegrasyon” denilmektedir. Titanyum ayrıca bio-uyumlu implant malzemesi olarak da başarıyla kullanılmıştır [21].

“Bio-integration”, biyoaktif bir yüzeyde kemik gelişimini tetikler ve kemik ile implant arasındaki bağı direkt etkiler. Biyoaktivite, lifli doku arasına girmeksizin bir malzemenin canlı dokuya bağlanma özelliğidir. Kemikle bağlanması iyi olan ve doku tarafından kabul edilirliği yüksek olan titanyum, yerleştirildikten sonra vücudun bir parçası haline gelir. Bu da implanta maksimum dayanım sağlamaktadır [7].

Titanyum; ticari saflıkta titanyum ve Ti6Al4V olmak üzere iki şekilde kullanılır. Saf titanyum mekanik özellikler açısından zayıftır ve protez üzerine poroz kaplama olarak kullanılır. Poroz kaplamalar kalça protezlerinde ve diş implantlarında, kaplamadaki porların içinde kemik büyümesini sağlamak amacıyla sık sık kullanılırlar. Yapay bağlantı ve yerleştirme tedavilerinde yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımları, paslanmaz çelikler ve kobalt-krom alaşımlarının yaklaşık yarısı kadar bir elastik modüle sahiptir [2].

Sonuç olarak titanyum esaslı alaşımların biyolojik olarak uyumlu oldukları histolojik deneylerle kanıtlanmış olup tek dezavantajlarının oldukça pahalı olmalarıdır [2].

2.6.2. Titanyum ve alaşımlarının havacılık uygulamaları

Titanyum kullanımı ilk olarak uçak ve uzay endüstrisiyle başlarken zamanla, söz konusu üstün özellikleri nedeniyle birçok alana yayılmaya başlamıştır. Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılık uygulamalarında kendine yer bulmuştur. Titanyumun havacılık sanayinde yaygın kullanımının önemli sebepleri;

- Hafiflik,
- Çalışma sıcaklığı,
- Korozyon direnci,
- Polimer matrisli kompozitler ile galvanik uyumluluktur.

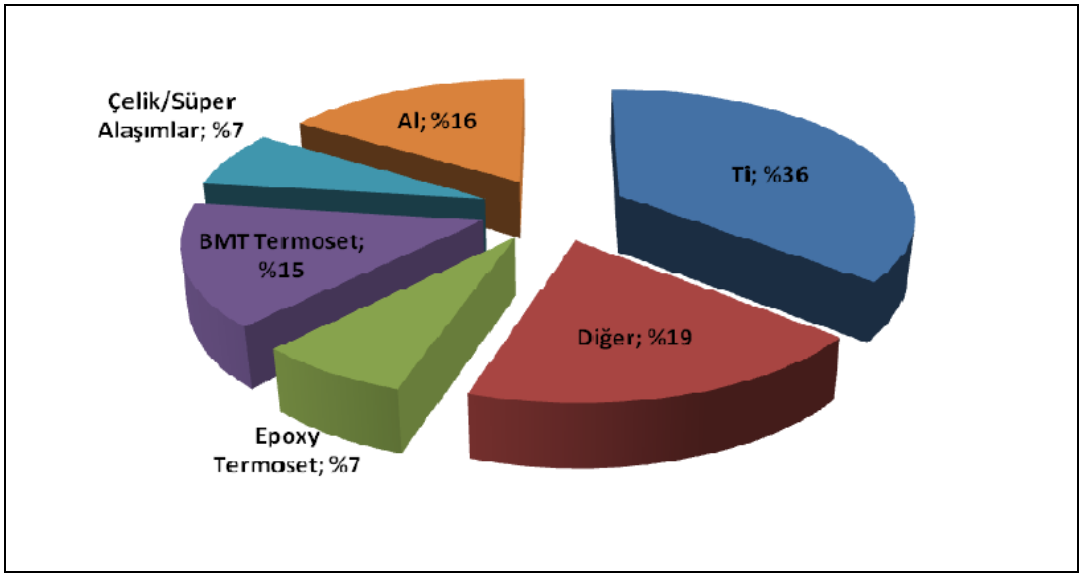
Günümüzde otomobil sanayi ürettiği bir aracın ağırlığındaki bir kilogramlık hafifletme için 15$ maliyeti tolere edebilirken, havacılıkta bu rakam atılan her bir kilogram fazladan ağırlık için 1500$'a çıkmaktadır. Eğer üretim çok daha ileri teknoloji gerektiren uzay faaliyetleri ile ilgili ise bu rakam 15000$ civarına yükselmektedir. Bu durum titanyumun diğer üstün özellikleri dışında sadece düşük yoğunluğu sayesinde

kendisine havacılık sanayinde önemli bir pazar yakaladığını açıklayan güzel bir örnektir [2, 3].

Uçakların yüksek korozyon direnci ve kısmi mukavemet gerektiren içindeki yaşam alanlarında sıkça ticari saflıkta titanyum kullanılır. Yüksek üretim maliyetlerine rağmen uçakların ana iniş takımları için dövme titanyum alaşımlarının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yüksek mukavemet çeliklerinden imal edilen ana iniş takımlarının kullanım ömürleri dolmadan sıkça gerilmeli korozyon şüphesi ile değiştirilmeleri bu malzeme yerine, yeterli mukavemete sahip dövme titanyum alaşımlarının tercih edilmesini sağlamıştır. Bu tercih aynı zamanda büyük bir ticari yolcu uçağının 270-300 kg civarında bir ağırlık azaltılmasını da sağlamaktadır. Ticari uçaklarda kullanımı ile kıyaslandığında askeri uçaklardaki titanyum kullanımının daha fazla olduğu görülmektedir. Askeri uçaklardaki yapısal parçaların maruz kaldığı termal ve mekanik yükler daha yüksek sürat ve zorlayıcı manevralar nedeniyle artmaktadır. Askeri uçaklarda gövde imalatında kullanılan titanyum oranı % 50'lere varmaktadır Askeri uçaklarda kullanılan titanyum parçalar arasında en büyük olan ve kritik parça, kanatlardan maruz kaldığı tekrarlı ve yüksek yükleri taşıma görevindeki kanat kutusudur [2, 3].

Büyük ticari uçaklara bakıldığında, gövde yapısında ortalama % 5-9 arasında titanyum kullanılmaktadır. Ancak çalışma sıcaklığının, çok dikkate alındığı motorlarda ise titanyum kullanımı % 33-38 civarındadır. Uçak motorlarında hacimsel oranlara bakıldığında titanyum alaşımları en çok kullanılan malzemedir. Havacılık sanayinde, mekanik özellikler kadar üretilen parçaların kullanım ömürleri de önemlidir. Titanyum alaşımlarının kullanıldığı parçaların uzun kullanım ömürleri, o parçaları fiyat-kullanım ömrü kıyaslamasında öne geçirmektedir. Uçak gövdelerinde yapısal eleman olarak titanyum kullanılmasındaki maksat, yorulma çatlağı ilerleyişini durdurmaktır [2, 3]. Şekil 2.5’de F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranı verilmiştir.

1940'ların sonunda geliştirilen Ti6Al4V alaşımı hala havacılık uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Alüminyum alaşımlarının, yüksek mukavemet çeliklerinin veya nikel esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklıktaki kararlılıklarının yetersiz kaldığı durumlarda titanyum alaşımları ön plana çıkmaktadırlar [2, 3].



Şekil 2.5: F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranları görülmektedir [2, 3]

Titanyumun havacılıkta ana kullanım alanlarından biri de gaz türbin motorlarıdır. Modern gaz türbin motorlarının ağırlıkça % 33'ü titanyum alaşımlardan oluşmaktadır. Titanyum alaşımların uçak motorlarında kullanımı 1950'li yıllarda başlamıştır. İlk olarak kompresör kanatçıkları titanyumdan imal edilmeye başlanmış, daha sonra kompresör disklerinin de titanyumdan üretimine geçilmiştir [2, 3]. Titanyum, 593 °C'ye kadarki operasyon sıcaklıklarında en yaygın kullanılan malzemedir.

Uçak sanayisinde en yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımları ve bunların özellikleri şöyledir;

- % 99.0 Ti: İyi işlenebilirlik ve orta düzeyde mukavemet özelliklerine sahiptir. Uçaklarda yanma duvarları, kompresör kaplamaları, egzoz çıkış kaplamaları, gövde bölme duvarlarında geniş çapta kullanılır. 20 °C'deki yoğunluğu 4.54 gr/cm^3'tür. Tavlama sıcaklığı 590-732 °C'dir, gerektiğinde gerilme giderme tavlaması yapılır. Bu işlem 537 °C'de 15-20 dakikadır. Bundan sonra havada soğutma uygulanır. Gaz altı koruyuculu ark kaynağı, direnç kaynağı ve nokta kaynağı uygulanır.

- Ti6Al4V α-β Tipi Alaşım: 315 °C sıcaklıklara kadar yüksek mukavemete sahiptir. Uçakların gaz türbin kompresör kapakçıklarında ve disklerinde, dövme uçak bağlantılarında, preslenmiş uçak gövde yüzeylerinde, metal levha halindeki gövde parçalarında kullanılır.

- Ti5Al2.5Sn α Tipi Alaşımı: Uçak egzoz bağlantılarında ve diğer dövme levha komponentlerinde 480 °C'ye kadar çalışır. Roket yakıt tanklarında, uçak gaz türbini kompresörlerinin yataklarında, kaynaklı statör bağlantılarında, içi boş kompresör kanatçıklarında ve kaynaklı borularda geniş çapta kullanılır. 20 °C'deki yoğunluğu 4.46 gr/cm'tür. Tavlama, 830 °C'de 30 dakika ya da 880 °C'de 10 dakikadır. 537 ya da 560 °C'de 1-2 saat tavlamadan sonra gerilme giderme işlemi yapılmalıdır. Ticari saf titanyuma uygulanan kaynak işlemleri bu alaşıma da yapılabilir.

- Ti-8Mn Alaşımı: 93-315 °C arasında çalışan uçak kaplama ve birincil yapı elemanlarında kullanılır. Tam tavlama, 680-700 °C'de 1 saattir. Sonra havada soğutulur. Ergitme kaynağı uygulanamaz. Ancak nokta kaynağı dikkatlice yapılmış konstrüksiyonlarda kullanılabilir.

- Ti7Al4Mo Alaşımı: Uçak gaz türbin kompresör kanatçıklarında, disklerinde kullanılır. 20 °C`deki yoğunluğu 4.48 gr/cm^{3}'tür.

- Ti4Al4Mn Alaşımı: Uçak gövde elemanlarında kullanılır. 20 °C'deki yoğunluğu 4.52 gr/cm^{3}'tür. Tavlanırken 720 °C'de 2 saat ısıtılır ve dakikada 2 °C düşecek biçimde fırında soğutulur [7].

2.6.3. Titanyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisi uygulamaları

Titanyum otomotiv endüstrisinde ilk kez 1950'lerin ortalarında kullanılmaya başlanmıştır. General Motor firmasının "Titanium Firebird ll" adlı deneysel aracının tüm dış yüzeyi titanyum kullanılarak tasarlanmıştır. Hiç üretilmeyen bu araç, hava sürtünmesi kaynaklı ısınmadan korunmaya ihtiyaç duyan hızlı yarış arabaları hariç titanyum dış yüzeyli tek araçtır.

Yakıt tasarrufu sağlayan ve çevreye daha az zarar veren araçlara olan talebin artması araçların ağırlığının hafiflemesi ve performansın arttırılmasını gerektirmiştir. Bu noktada yüksek korozyon direnci ve güce sahip titanyum alaşımları başlıca tercih maddesi olmuştur. Ancak titanyumun maliyeti arttırması otomotiv endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engeldir ve kullanımını yarış otomobilleri, motorları ve Formula 1 araçları gibi yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren araçlarla sınırlamıştır.
1990'ların sonunda "Altezza" modellerinde motor supabında titanyum kullanan Toyota, seri ve toplu üretimde ilk kez titanyum kullanan otomotiv firması olmuştur.

Titanyum supapların üretiminde toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Giriş supaplarının üretiminde Ti6Al4V/TİB tozu, yüksek ısılı çıkış supaplarında ise Ti-Al-Zr-Sn-Nb-Mo-Si/lTiB tozu kullanılmıştır. Altezza'nın motorunda 16 supap bulunmaktadır ve bunların ağırlığı çelik supaplarda yaklaşık 700 gram iken Altezza'da 400 gramdır.

Süspansiyon yayları çelik yerine titanyumun kullanımının oldukça ekonomik olduğu bir otomotiv elemanıdır. Özellikle titanyumun çeliğe oranla çok daha düşük elastik modüle ve düşük kayma modülüne sahip olması tercih sebebidir. Geleneksel süspansiyon yayı malzemesiyle karşılaştırıldığında düşük modül, artan süspansiyon sapmasına ve bir sarmal hareketinde daha az süspansiyon hareketine yol açmaktadır. Böylelikle ağırlık sadece titanyumun düşük yoğunluğundan değil aynı zamanda süspansiyon sarmallarının daha kısa olmasından da kaynaklanmakta ve hem artan taşıma kapasitesine hem de motor ya da yolcu alanının daha geniş olmasına katkıda bulunmaktadır.

Formula1 araçları uzun süre motosiklet yarışlarında da kullanılan titanyum yaylardan faydalanmıştır. Ancak dünyada ilk kez seri üretim araçta titanyum yay kullanan grup Volkswagen olmuştur. Lupo "FSI", 2000 yılından beri arka süspansiyonlarında titanyum kullanılan küçük bir otomobildir.

Titanyumun pahalı bir malzeme olması kullanım yaygınlığının önündeki en önemli engeldir. Yakın gelecekte titanyum fiyatlarının çok fazla düşmesi beklenmemektedir. Umut edilen yüksek hacimli otomotiv pazarında fiyatların havacılık alanındakinin yarısı ya da üçte biri oranında ucuzlayacağı ve böylece otomotiv endüstrisinde de titanyumun daha yaygın olarak kullanılmasıdır [2, 3].

2.6.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer kullanım alanları

Titanyum daha çok asit yağmuru, volkanik serpinti, kentsel kirlilik gibi şiddetli atmosfer koşullarına maruz kalan parçalarda da kullanılmaktadır. Burada titanyum binanın atmosfer koşullarından en az hasar almasını sağlamaktadır [2, 3].

Titanyumun bir başka avantajı da paslanmaz çeliğin yarısı, alüminyum da üçte biri kadar bir ısıl genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Bu durum inşasında fazla cam ya da beton kullanılan binalarda titanyum kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Düşük

ısıl genleşme katsayısının bir sonucu olarak hareketli çatılar gibi büyük titanyum yapılarda gece gündüz ısı farkının neden olduğu gerilim en aza indirilebilmektedir [2, 3].

Titanyum alaşımları yüksek performanslı malzemeler olarak bilinmektedir. Yeni kullanım alanları araştırılırken yine yüksek performans gerektirecek alanların araştırılması gerekmektedir ve bu durum özellikle yüksek performans gerektiren spor dallarını öne çıkmaktadır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı başlıca alanlar golf, tenis, bisiklet, su altı sporları, dağcılık, dağ yürüyüşü ve kış sporlarıdır. Örneğin golf oynarken ana amaç topu mümkün olduğunca uzağa atabilmektir ve bunu sağlamak için golf sopasının ucu en önemli elemandır. Önceleri ağaç kullanılarak üretilen uçlar daha sonra çelik kullanılarak üretilmeye başlanmıştır. 1990'ların ortalarında ise ilk kez titanyum kullanılarak üretilen uçlar pazara sürülmüştür. Düşük ağırlıklı metaller kullanmak üreticilere daha büyük uçlar üretip ağırlığı hafif tutma şansını tanımaktadırlar. Üretimde genellikle Ti6Al4V kullanılmakla birlikte Ti3Al2.5V gibi diğer α+β alaşımlar da kullanılmaktadır [2, 3].

2.7. Titanyum ve Alaşımlarının Aşınma Davranışları

Titanyum ve alaşımları yüksek mukavemet düşük ağırlık ve iyi korozyon direnci gibi mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olmasına rağmen sürtünme ve aşınmanın yer aldığı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Titanyumun kayma sırasında karşı malzemeye çok güçlü yapışma özelliğinden dolayı kayma sırasında sürtünme katsayısı sabit değildir ve çok büyük değerlere ulaşmaktadır. Titanyumun zayıf tribolojik özellikler sergilemesi; titanyumun elektron konfigürasyonundan, kristal yapısından ve yağlayıcıların yetersizliğinden kaynaklanmaktadır.

Titanyumun elektron konfigürasyonu düşük değerli bir d-band karakterine sahiptir. Bundan dolayı titanyumun yüzeyi aşırı reaktif özellik taşır. SPH yapısına sahip metaller iyi bir sürtünme özelliğine sahip olmasına rağmen bu durum titanyum için pek geçerli değildir. Bunun nedeni metallerde ideal sıkı paket oranı (c/a) 1,633 iken bu değer titanyumda 1,588'dir. Bu durum, taban düzlemlerinin yanı sıra prizmatik ve piramidal kayma düzlemlerini kaymaya teşvik eder. Kayma sistemlerinin artması, sünekliliği ve aşınmanın maruz kaldığı yüzeyde plastik deformasyonu arttırır. Titanyumun zayıf tribolojik özellik göstermesinin diğer önemli nedenlerinden biri

yağlayıcılardır. Çoğu metalde başarılı olan yağlayıcılar, titanyum alaşımlarında kullanıldığında yetersiz kalmaktadırlar. Ayrıca titanyumun düşük ısıl iletkenliğinde yağlayıcıların etkisi azaltmaktadır. Yağlayıcıların kullanılmasının bir amacı yüksek ısıl iletkenliğe sahip yüzeyler arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısıyı önlemektir. Ama titanyumun ısıl iletkenliğinin düşük olması yağlayıcının bu işlevi yerine getirmesini önlemektedir [1].

3. AŞINMA

Aşınma; katı cisimlerin yüzeylerinden ufak parçacıkların veya ince parçaların ayrılması ile gerçekleşen malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Yüzey değişikliği, çeşitli sebeplerle veya parçanın zorlanma durumuyla ilgilidir. Mekanik, fiziksel, elektriksel veya termik sebeplerle aşınma oluştuğu gibi korozyon sonucunda da aşınma meydana gelebilmektedir [22].

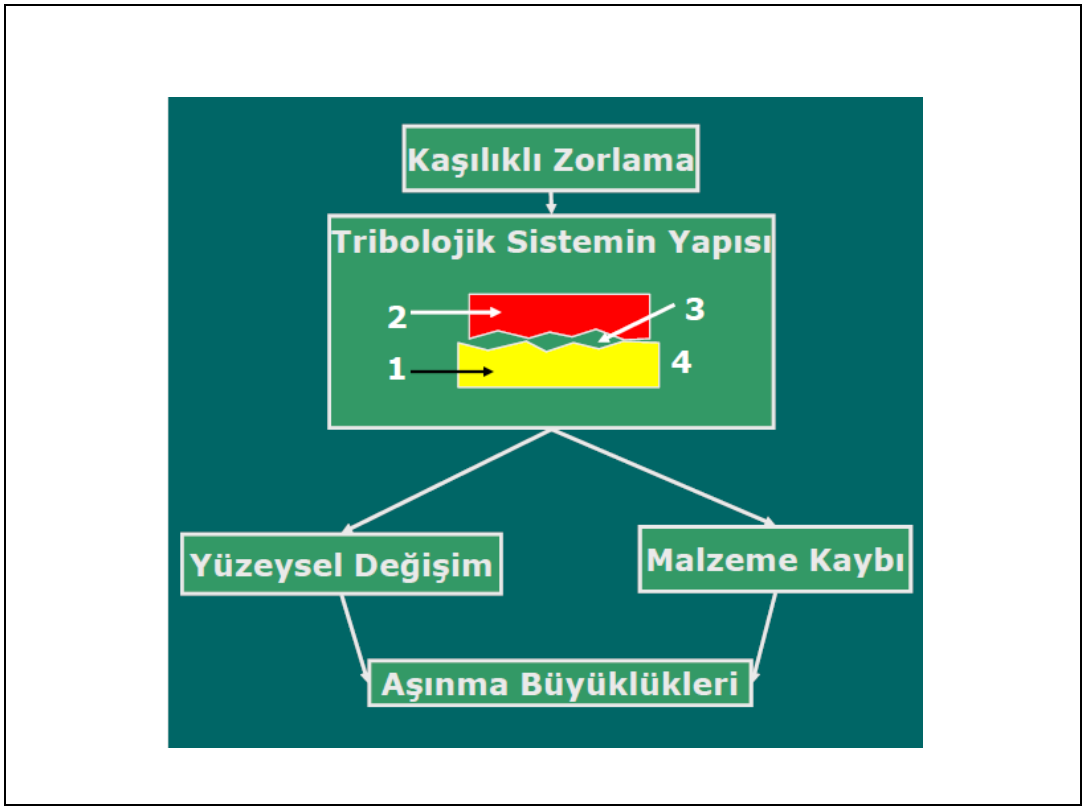
Aşınma, birçok mühendislik sisteminin performansını etkilemesine rağmen çoğu zaman tasarımda ihmal edilen bir faktördür. Çoğu zaman önemli tamirler veya yenileme masrafları gerektirir ve kullanılabilirlik oranını düşürür. Bu sebeplerden dolayı aşınma, tasarım sürecinde ele alınmalı ve kullanım sırasında bir problem olarak karşımıza çıkması önlenmelidir [23].

Mühendislik malzemelerinde görülen yıpranmanın, aşınma sayılabilmesi için şu şartlar sağlanmak zorundadır;

1. Mekanik bir etkinin olması.
2. Sürtünmenin olması (bağıl hareket).
3. Yavaş fakat devamlı olması.
4. Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi.
5. İsteğimiz dışında meydana gelmesi [24]

Bir aşınma sisteminde;
1. Ana malzeme (aşınan)
2. Karşı malzeme (aşındıran)
3. Ara malzeme
4. Yük
5. Hareket, aşınmanın temel unsurlarıdır.

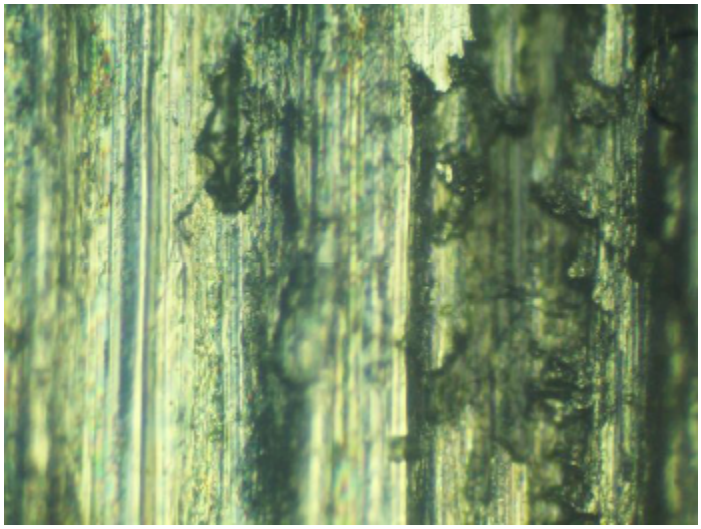
Bu unsurların oluşturduğu sistem teknikte “Tribolojik Sistem” olarak adlandırılır. Tribolojik sistemin standartlara uygun şematik gösterimi Şekil 3.1‘de verilmiştir.



Şekil 3.1: Tribolojik sistemik şematik gösterimi [25]

3.1. Adhezif (Yapışma) Aşınma

Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre relatif hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir. Basınç altında bir araya getirilmiş malzemelerde bulunan karşılıklı pürüzler, sürtünme ile oluşan ısı ve soğuk kaynaklaşma etkisi ile birbirlerine bağ yaparlar. Yüzeylerin relatif teğetsel hareketi, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopmaya neden olur. Şekil 3.2'de adhezif aşınma sonrasında malzeme yüzeyinin görünümü verilmiştir.



Şekil 3.2: Adhezif aşınma sonrasında malzeme yüzeyinin görünümü [23]

Adhezif aşınmada yağlamanın etkisi çok büyüktür. Yüzeylere yapışan yağ tabakası adhezyon aşınmasını büyük ölçüde önler. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeylere katkılı yağların konmasıyla aşınma azaltılır. Yüzeylerin sertliği de önemlidir. Şayet yüzeylerden birinin sertliği diğerinden büyük ise kaynak bağları yumuşak malzemeden kopar [26].

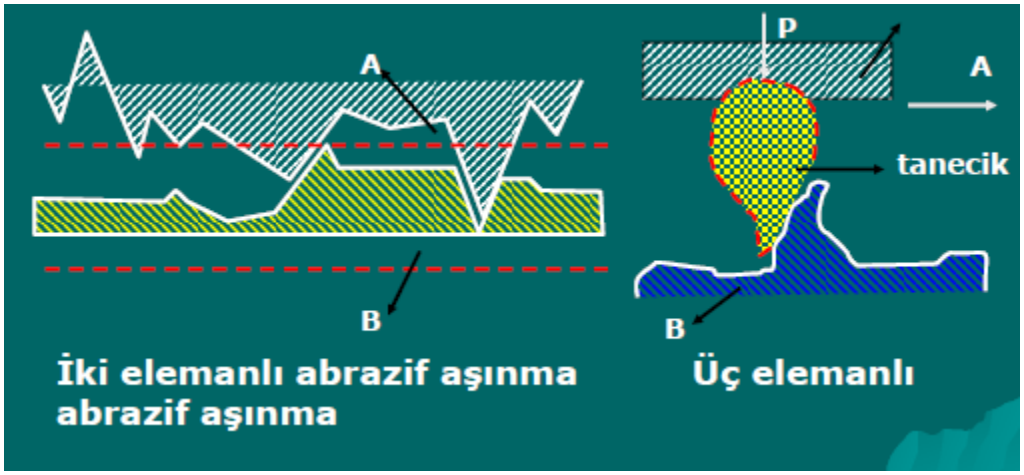
3.2. Abrasif Aşınma

Çok hızlı bir şekilde gelişen, etkisini anında belli eden, çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve sistemin hasarına sebep olacak şekilde gelişen bir aşınma türüdür [27].

Abrasif aşınma uygulanan kuvvet ve hareketin etkisiyle sürtünen iki cisimden, daha sert olan cismin pürüzleri veya tanecikleri ile diğer cismin yüzeyini çizerek, üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu aşınma mekanizması katı - katı, katı - mineral, katı - sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında görülür. Bu tip aşınma iki şekilde meydana gelir:

1. Sürtünen iki malzemeden daha sert olanın yüzeyindeki pürüzleri ile, daha yumuşak olan malzeme yüzeyini çizerek tahrip etmesi şeklindeki aşınmaya "İki Cisimli Abrasif Aşınma" denir.

2. Sürtünen yüzeyler arasında yuvarlanan sert taneciklerin yüzeyleri çizerek tahrip etmesi şeklindeki aşınmaya da "Üç Cisimli Abrasif Aşınma" denir [24]. Şekil 3.3'te iki cisimli ve üç cisimli abrasif aşınma şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3: İki ve üç cisimli abrasif aşınmanın şematik gösterimi [25].

3.3. Korozif Aşınma

Metal veya metal alaşımlarının çevreleriyle (katı, sıvı ve gaz ortam) kimyasal, elektrokimyasal veya metalurjik ilişkilerinden dolayı, yüzeylerinde yapısı farklı tabakaların oluşması ve sürtünme hareketi ile bu tabakaların parçalanıp taşınması sonucu oluşan hasara "Korozif Aşınma" denir. Korozif aşınma için gerekli şart, korozyonun ve sürtünmenin olmasıdır. Sürtünmenin gaz veya sıvılı korozif tesir yapan bir ortamda olmasıyla sürtünen yüzeylerde kimyasal reaksiyon sonucu reaksiyon ürünleri oluşur. Bu artıklar yüzeylere çok zayıf yapıştığından sürtünme esnasında tahrip olarak, yüzeyden taşınırlar. Bu olay sürekli tekrarlanır. Reaksiyon ürünleri ortamın bileşimine bağlıdır. Normal havada bulunan O_2 ve H_2O buharı yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerek oksit ve hidroksit meydana getirirler. Endüstriyel ortamlarda bulunan CO_2, SO_2, H_2S, NH_3 ve NO_2 gazları havadaki nemle birleşerek asitleri, asitler de metal yüzeylerle reaksiyona girerek ilgili bileşiklerini meydana getirirler. Neticede böyle bir ortamda korozif aşınma oldukça hızlı gelişir. Ayrıca içinde erimiş olarak O_2 ve CO_2 gibi korozif tesir yapan gazları ihtiva eden sıvı ortamlarda da bu tip aşınma görülür. Yağlarda erimiş olarak bulunan korozif

elementler zamanla çözünerek, yağların kalitesine etkide bulunurlar. Neticede korozif aşınmayı hızlandırma rolü oynarlar [24].

3.4. Yorulma Aşınması

Metallerde oluşan yorulma olayı, tekrarlanan zorlamalar sonucu zamanla oluşur. Bu tip aşınma, yüzeylerde çok küçük çukurcuklar veya kılcal çatlaklar şeklinde başlar. Sürtünmenin etkisiyle yüzeyde plastik şekil değiştirme dolayısıyla pekleşme oluşur ve malzeme gevrekleşir [28].

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Olay özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında, yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması sonucudur. Bu elemanlarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde Hertz basınçları meydana gelir. Bu çeşit basıncın etkisi altında yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur [23].

Değisken zorlanma nedeniyle malzemenin yüzeyinde bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Bu durumda yüzeyler arasındaki yağın etkisi de önemlidir. Yüksek basınç altındaki yağın çatlaklara girmesi bunların büyümesinde önemli rol oynayabilir. Pitting aşınmasının diğer bir açıklama tarzında ise çukurcukların plastik deformasyon nedeniyle doğrudan doğruya temas yüzeyinde meydana geldiği ve buradan malzemenin iç kısımlarına da yayıldığı ileri sürülmektedir [23].

3.5. Oksidasyon Aşınması

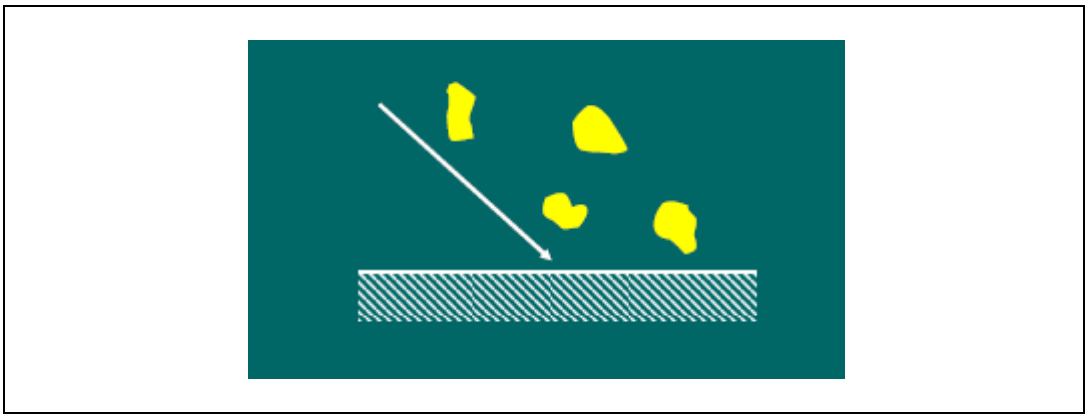
Oksidasyon aşınması, en yaygın karşılaşılan kimyasal aşınma proseslerinden biridir. Metallerin yüzeyinde ince bir oksit tabakası her zaman oluşabilmektedir. Bu tabaka aynı zamanda, sürtünme ve aşınmaya karşı koruyucu tabaka özelliğine sahip olabilir [29].

Oksidasyon aşınması teorisine göre, kayan iki yüzey arasında ortaya çıkan sürtünme ısısı, metal yüzeyi üzerindeki oksit filminin kalınlığını artırmak için enerji sağlayabilir. Oksit filmi kritik bir kalınlığa ulaştığında çıkıntılar (asperities), aşınma partikülleri oluşturarak kırılırlar. Bu yığıntılar (debris) adhezif aşınmayı başlatabilir. Oksidasyon aşınmasının adhezif aşınmadan bir derece daha düşük olduğu düşünülür. Bu şekilde aşındırıcı partikül oluşturma ihtimali temas basıncı, kayma hızı, sıcaklık ve çevre gibi aşınma ortamı özelliklerine ve korozyon potansiyeli, oksidasyon kinetiği, metalin oksijene afinitesi, mukavemet ve sertlik gibi aşman metalin özelliklerine bağlıdır. Şartlar ince, sert ve yapışkan oksit filminin büyümesine izin verirse aşınma hızı, temas eden yüzeyler arasındaki adhezyonun azalmasına bağlı olarak azalabilir [29].

3.6. Erozif Aşınma

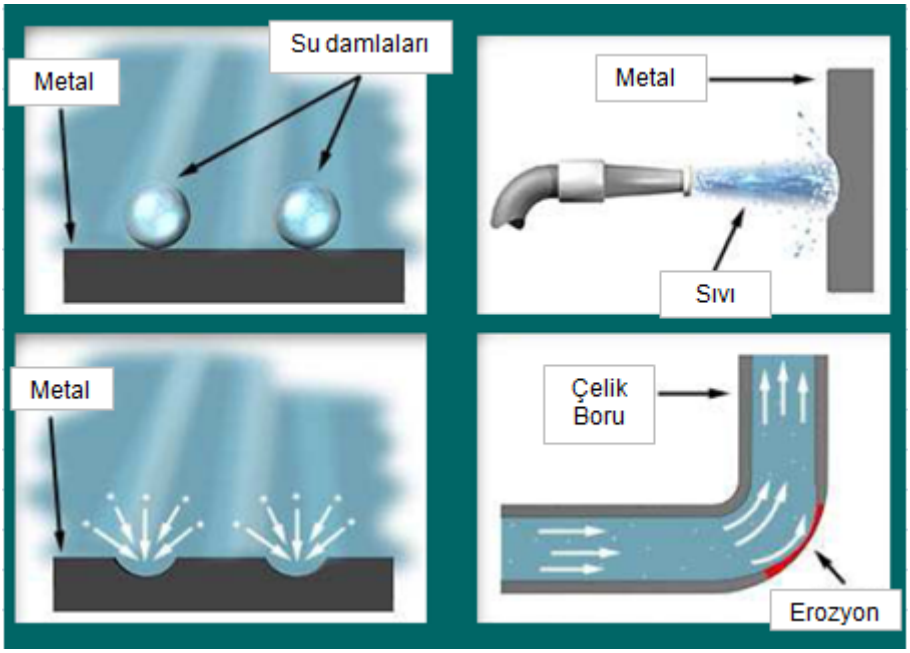
Erozif aşınma katı parçacıklar içeren bir akışkanın bir yüzeye çarpması durumunda oluşur. Başka bir tarifle, belirli bir hıza sahip olan katı parçacıkların metal bir yüzeye çarptığı zaman, yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybı meydana getirmesi sonucu oluşan aşınmaya erozif aşınması denilir. Yüzeyin üst tabakasından malzeme kaybının devam etmesi halinde kullanım yerine bağlı olarak ciddi mekanik olumsuzluklara yol açabilir. Makine elemanlarının erozif ortamlarda bulunması durumunda yüzeylere sıvı damlaları veya katı parçacıklarının çarpması sonucu elemanların ömürlerinde azalmalar meydana gelmektedir [22,27].

Genel olarak söylenildiğinde, erozif aşınma katı, sıvı, gaz maddelerin veya bunların karışımının kayma veya çarpma sonucu katı maddeler üzerinde yarattıkları etkilerdir. Şekil 3.4'te erozif aşınmanın şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3.4: Erozif aşınmanın şematik görünümü [25]

Patlama sonucu oluşan erozif bir gaz akışıyla taşınan veya belirli güçlerce hızlandırılan katı parçacıklar tarafından meydana getirilen bir erozif aşınma biçimidir. Parçacıkların çarpma açıları aşınımı ciddi surette etkiledikleri gibi aşınım mekanizmasını da değiştirebilirler. Akış sonucu oluşan erozif katı parçacık taşıyan sıvı akışları tarafından meydana getirilen aşınma da bir erozif aşınma türüdür. Örneğin, çamurumsu maddelerin naklinde kullanılan boru hatlarında bu tarz aşınmaya rastlanır. Sert bir yüzeye çarpan sıvı damlalar ise yağmur erozif aşınması adı verilen bir aşınmaya neden olur. Örneğin, yağmur bulutları arasından geçen bir uçağın gövdesi veya buhar türbini pervaneleri böyle bir aşınmaya maruz kalabilirler [27]. Şekil 3.5'te erozif aşınma örnekleri verilmiştir



Şekil 3.5: Erozif aşınma örnekleri [25]

4. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Malzemelerin aşınması, malzemelerin performansını belirleyen önemli parametrelerden biridir [30]. Aşınma genel olarak malzemenin yüzeyinde izafi bir hareket ve mekanik bir etki ile meydana gelen malzeme kaybıdır [31]. Bir sıvı ya da gaz akımı tarafından taşınan farklı geometrik boyut ve yapıdaki taneciklerin, temasta bulundukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yaparak oluşturdukları hasar erozyon aşınması olarak tariflenmektedir. Katı partikül erozyonunda, malzeme yüzeyine belirli bir hızla hareket eden sert partiküllerin çarpması sonucunda yüzeyde malzeme kaybı gerçekleşir. Katı partikül erozyonu nedeniyle çeşitli mühendislik uygulamalarında malzeme kayıplarıyla karşılaşılmaktadır [32]. Uzay ve havacılık uygulamalarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, jet motorlarında, helikopter rotor kanatlarında, türbinlerde ve kömür dönüştürme santrallerinde vb. bu aşınma tipini yoğun olarak görmek mümkündür. Aşındırıcı partiküller hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantılarına, boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarparak şiddetli aşınmalar meydana getirmektedir [33].

4.1. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Faktörler

Diğer tribolojik süreçlerde olduğu gibi katı partikül erozyonu da kompleks bir süreçtir. Erozyon mekanizmalarının temel ilkelerinin anlaşılabilmesi için yapılan çalışmalar 20. yüzyılın son yarısında başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. Bütün bu yıllar boyunca bilim adamlarının ilgileri geleneksel malzemelere, özellikle de metallere odaklanmıştır [34].

Katı partikül erozyonu sırasında meydana gelen değişimler birçok faktöre bağlıdır. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı, hızı, debisi ve boyutu, aşındırıcı partiküllerin karışım oranı ve aşınan malzemenin özellikleri katı partikül erozyonunda etkin parametrelerdir [35]. Tablo 4.1'de katı partikül erozyonuna etki eden faktörler verilmiştir.

Tablo 4.1: Partikül erozyonuna etki eden faktörler

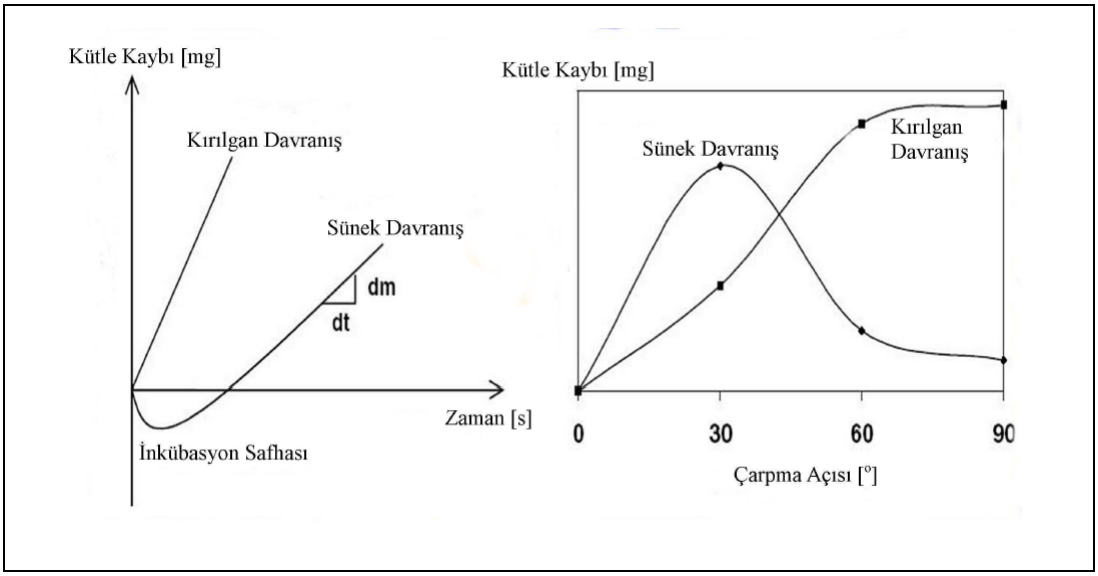
Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Faktörler	
1	Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı
2	Aşındırıcı partiküllerin hızı
3	Aşındırıcı partiküllerin kütlesel debisi
4	Aşındırıcı partiküllerin boyutu
5	Aşındırıcı partiküllerin geometrisi (yuvarlak köşeli, keskin köşeli vb) ve aşındırıcı partiküllerin karışım oranı
6	Aşınan malzemenin özellikleri
7	Aşınmanın gerçekleştiği yerdeki çevresel şartlar (sıcaklık, nem, korozif etkiler vb.)

4.1.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı

Çarpma açısına (a) bağlı olarak, katı partikül erozyonu iki şekilde incelenebilir [36]:

- Dik çarpma açılarındaki erozyon ($a = 90^o$)
- Eğik çarpma açılarındaki erozyon ($0^o < a < 90^o$)

Partikül erozyonu, düşük çarpma açılarında iki cismin sürtünmesine benzer bir mekanizmaya sahiptir, çünkü partiküller etkileşim süresince malzeme yüzeyi boyunca bir yol izlerler. Yüksek çarpma açılarında ise aşınma mekanizması tipik çarpma şeklindedir.



Şekil 4.1: Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [36].

Şekil 4.1'de tasvir edildiği gibi kırılgan malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açılarında ortaya çıkarken, sünek malzemelerde malzeme kaybının en fazla düşük çarpma açılarında (~30°) ortaya çıktığı görülmektedir. Malzeme kaybının çarpma zamanıyla değişimi dikkate alındığında ise sünek davranış gösteren malzemelerde aşınma zamanla lineer orantılı hale gelmeden önce hedef malzeme ağırlığının arttığı gelişim safhasının (inkübasyon periyodu) varlığı söz konusu olabilmektedir. Bu periyot aşındırıcı partiküllerin sünek hedef malzemeye gömülmesiyle ortaya çıkar. Aşındırıcı partiküllerin ardışık olarak hedef malzeme yüzeyinden ayrılmasından sonra kararlı erozyon davranışı gözlemlenir [34, 37, 38]. Çarpma enerjisindeki kaybın büyük kısmı hedef malzeme yüzeyini pürüzlendirirken ortaya çıkar [39, 40].

Erozyon davranışlarındaki farklılıklar, kauçuklar için yırtılma ve yorulma; sünek metaller ve polimerler için kesme ve sürülme; seramikler, camlar ve gevrek polimerler için çatlak oluşumu ve gevrek kırılma gibi çeşitli malzeme taşınması mekanizmaları şeklinde ortaya çıkmaktadır [41].

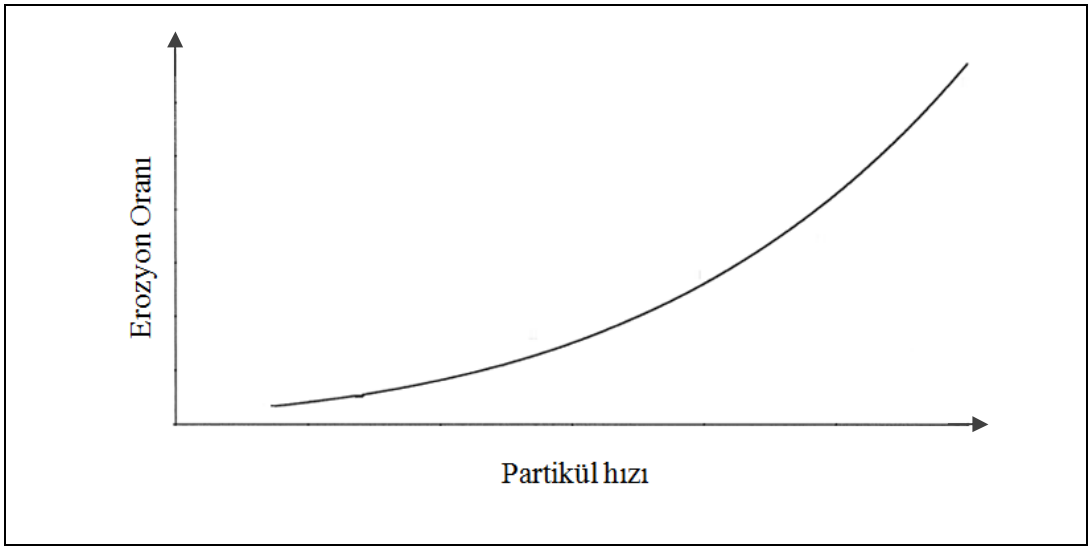
Partiküllerin hareket hızı bileşenlerini yatay ve düşey bileşenler olarak ayırmak mümkündür. Sert partiküller özellikle sünek malzemeleri aşındırırken düşük çarpma açılarında daha az çarpma, ağırlıklı olarak yatay hız bileşeni ile malzeme yüzeyini çizme ve kesme mekanizmalarını harekete geçirmektedir. Açı büyüdükçe partikül hızının dikey bileşeni artmakta ve çarpma etkisine benzer bir etki mekanizması ağırlık kazanmaktadır. Bu mekanizmaların etkisi ile sünek malzemelerde çarpma

açısı küçük açılardan başlayarak giderek arttırıldığında orta dereceli çarpma açılarında aşınmanın maksimuma eriştiği gözlenmektedir. Partiküllerin malzeme ile temas etmeleri sonrası kaymaları ve dönmeleri de malzeme ile etkileşimde farklı sonuçlar doğurmaktadır.

Erozyon aşınmasındaki kütle kaybı çarpma açısının bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünde sünek ve kırılgan malzemeler farklı özellikler gösterir. Sünek malzemelerin karakteristik özelliği düşük çarpma açılarında (15°– 30°) maksimum erozyon göstermeleridir. Kırılgan malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarında (90°) gösterirler. Fiber takviyeli kompozitler, maksimum erozyonun 45°– 60°arasında ortaya çıktığı yarı-sünek davranış gösterirler [42, 43].

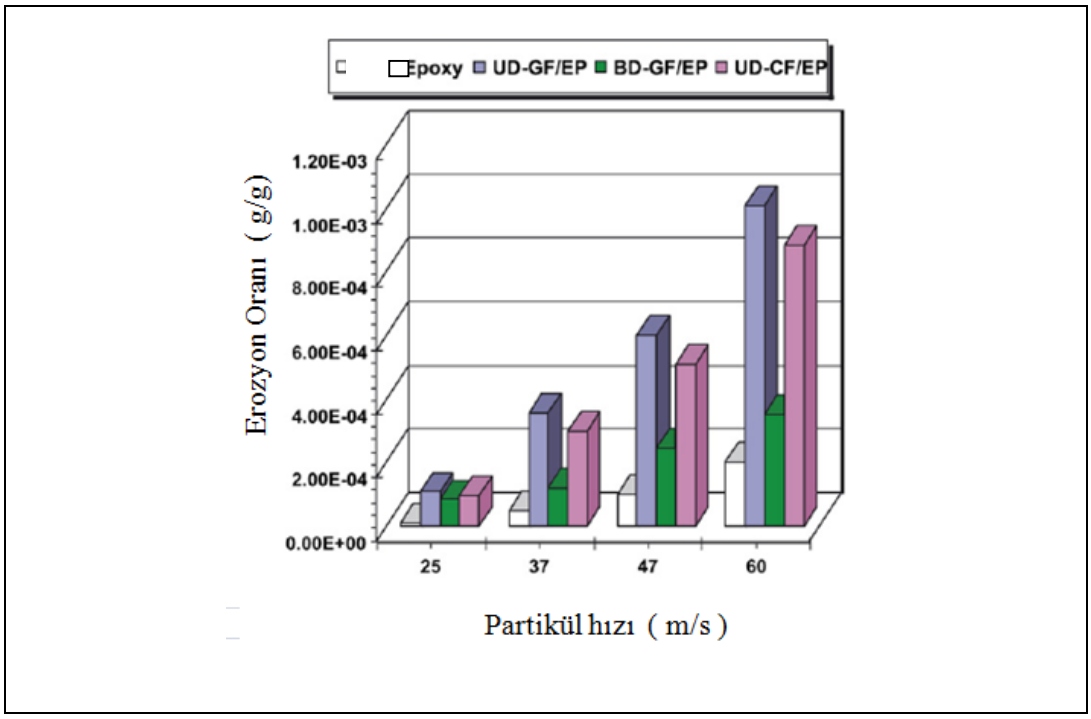
4.1.2. Aşındırıcı partiküllerin hızı

Aşındırıcı partikül hızı aşınma süreci üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir. Şekil 4.2'de partikül hızının aşınma oranına etkisi gösterilmiştir [44]. Eğer hız çok düşükse, çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon oluşumu için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder [42]. Hız arttığında, aşınan malzeme partikülün çarpmasına bağlı olarak plastik deformasyona uğrayabilir. Bu sistemde, aşınma tekrarlanan plastik deformasyonla oluşur. Kırılgan aşınma davranışında, aşınma alt yüzey kırılması şeklinde meydana gelir. Çok yüksek partikül çarpma hızlarında, darbeye maruz kalan yüzeyde lokal ergime ortaya çıkabilir.



Şekil 4.2: Partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi [44]

Yapılan çalışmalar incelendiğinde aşınan malzemelerde partikül hızının arttırılması ile aşınma miktarının arttığı söylenebilir. Şekil 4.3'te epoksi ve kompozitlerin partikül hızına bağlı olarak erozyon oranlarındaki değişim gösterilmiştir [45].



Şekil 4.3: Epoksi ve kompozitlerinin aşınma oranının partikül hızına bağlı olarak değişimi [45].

4.1.3. Aşındırıcı partiküllerin kütlesel debisi

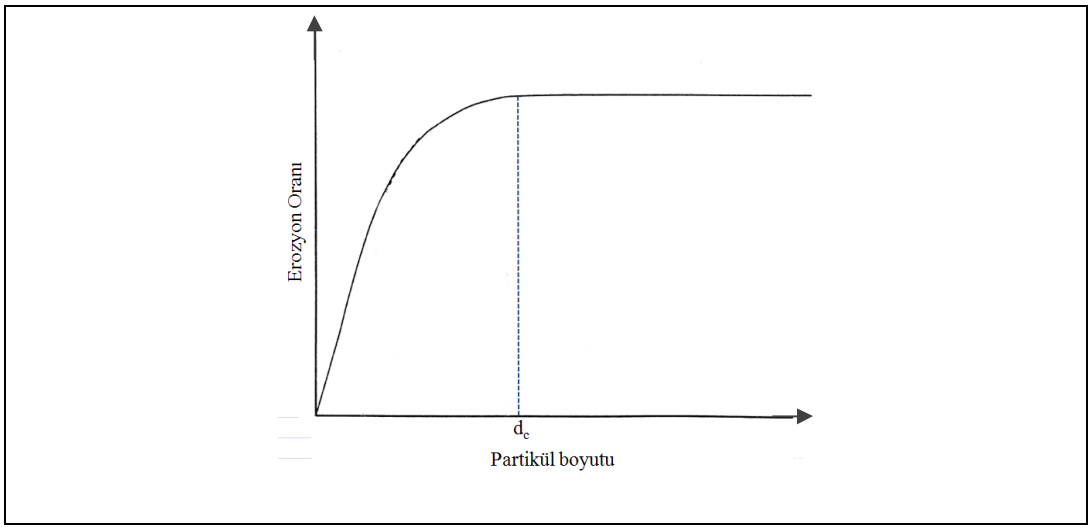
Partikül akış debisi (birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı partikül kütlesi) erozyon aşınmasını yakından etkileyen parametrelerden biridir. Teorik olarak, bütün aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye eşit çarpma açısı ve hızda çarptıkları kabul edildiğinden aşınma miktarı aşındırıcı partiküllerin akış debisinden bağımsız olmalıdır. Ancak pratikte, ölçülen aşınma oranı üzerinde partikül debisinin önemli etkileri vardır [43, 46-48]. Belirli bir akış oranı eşik değerine kadar erozyon aşınma miktarının akış debisiyle doğru orantılı olduğu rapor edilmiştir. Bu limit değerin gelen ve geri seken aşındırıcı partiküller arsındaki etkileşimin bir sonucu olduğuna inanılır [38]. Bu etki, çarpanların önceki partikülleri erozyon sürecinden uzaklaştırdığı birinci sırada partikül çarpma modeli ile rasyonalize edilmiştir [46]. Bu çarpışma teorisi çok düşük değerli akış debi değerlerinde bile önemli role sahip olabilir. Partikül akış oranı sınırı elastomerler için 100 kg/m^2 kadar düşük olduğu gibi büyük ve hızlı parçalarla metallerde oluşan erozyon için 10000 kg/m^2 kadar yüksek olabilir. Sınır

akış debisi değeri geçildiğinde aşınma oranı çok az düşer [38, 46]. Her ne kadar aşındırıcı akış debisinin etkisi temelde yukarıda bahsedilen etkileşimlere bağlansa da, farklı mekanizmalar da oluşabilir ve erozyon aşınmasını etkileyebilir. Süreç, her çarpmadan sonra oluşan bir geçici reaksiyonlar dizisi olarak değerlendirilebilir. Akış debisi arttığında, ilgili yüzeydeki çarpmalar arası zaman azalır. Bundan dolayı bir sonraki çarpmadan önce bozulma reaksiyonu için daha az zaman kalacaktır ve böylece bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması miktarı düşecektir [46]. Yukarıdaki analizlerden "Seçilen malzemenin erozyon davranışını etkilememesi için, partikül etkileşimi ve çevresel bozulma etkilerini ortadan kaldıracak bir özel debi miktarı seçilmesi gereklidir." sonucu çıkarılabilir.

4.1.4. Aşındırıcı partiküllerin boyutu

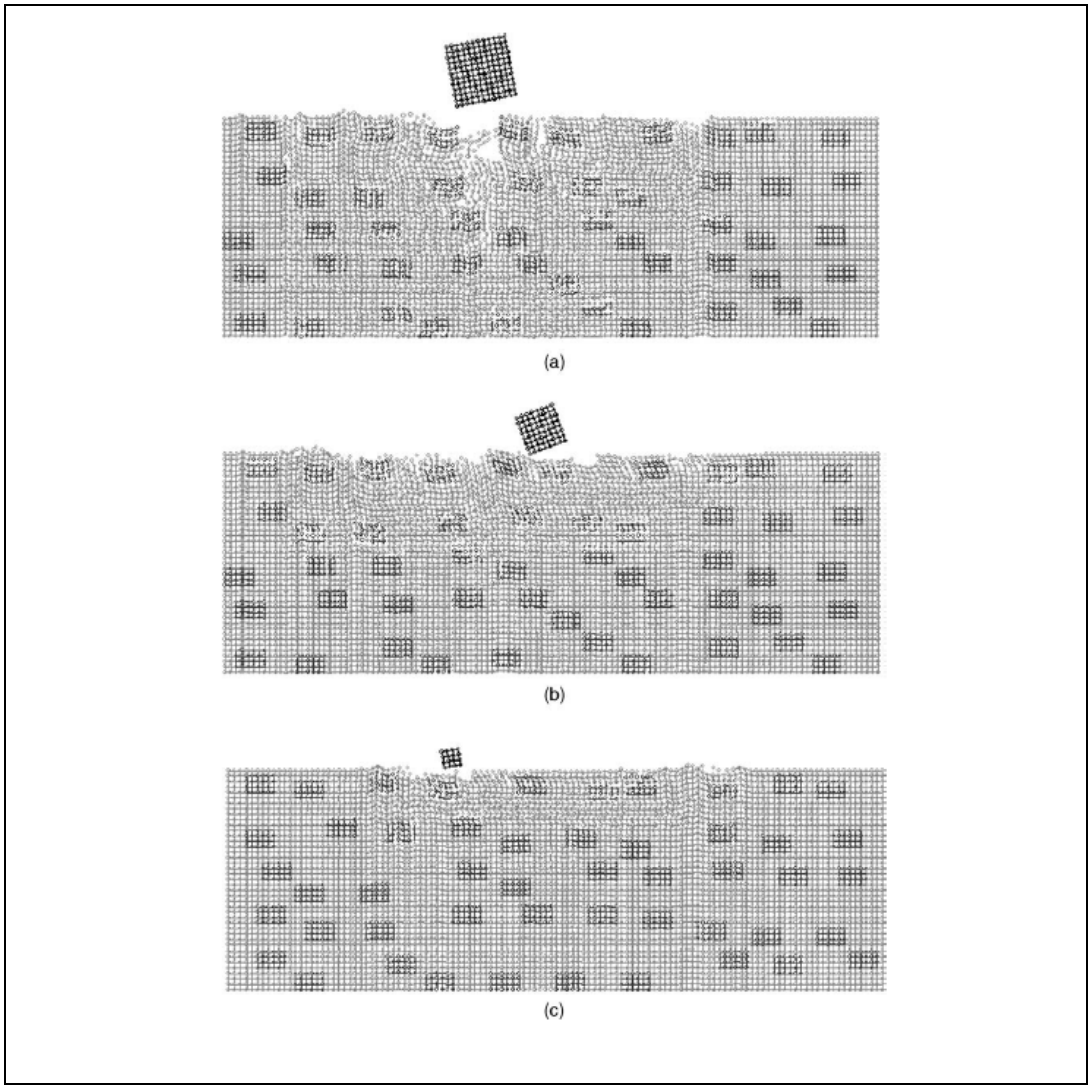
Malzeme yüzeyine çarpan partiküllerin boyutları katı partikül erozyonunda önemli bir rol oynamaktadır [32, 44, 49, 50]. Son yıllarda aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda iki farklı görüş ileri sürülmüştür.

G. Sundararajan, D.P. Mondal, M. Dündar ve diğerleri aşındırıcı partikül boyutunun erozyon miktarı üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu, ancak erozyon miktarının kritik bir değer üzerinde partikül büyüklüğünden bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir. Deneyler sonucunda, bu kritik değere kadar partikül boyutunun arttırılması ile erozyon miktarının arttığını raporlamışlardır (Şekil 4.4) [32, 49, 51, 52].



Şekil 4.4: Erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi [51].

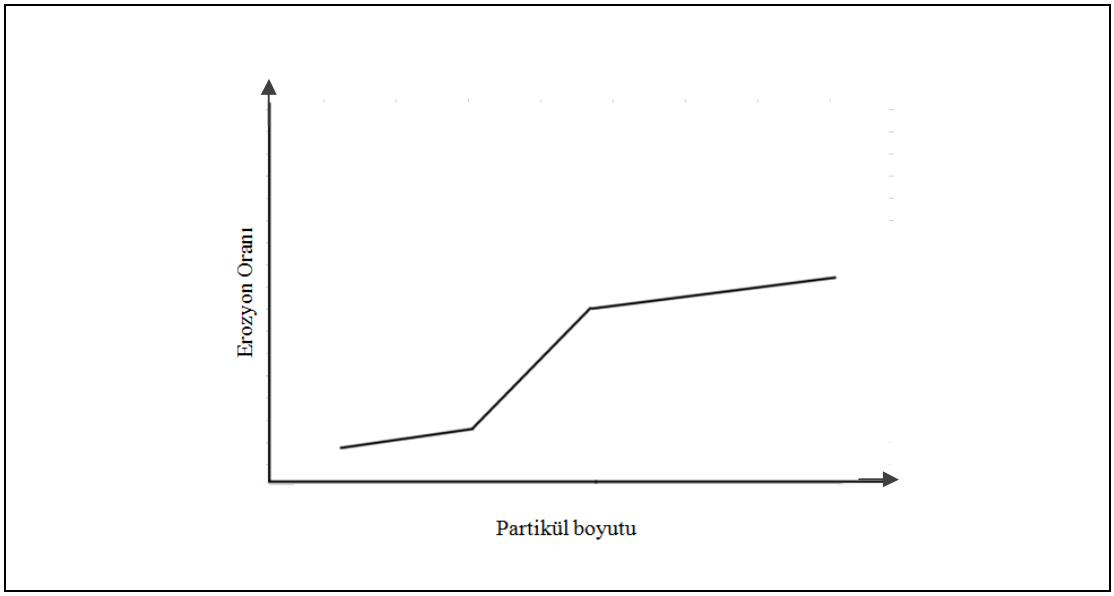
Q. Chen ve D.Y. Li katı partikül erozyonunda aşındırıcı partikül boyutunun etkisini Newton'un hareket kanunlarına dayandırılmış dinamik bilgisayar modellemesi ile incelemişlerdir. Çalışmalar sırasında üç farklı aşındırıcı partikül boyutunun etkisi aşındırıcı partikül debisi eşit tutularak incelenmiştir. Böylece aşınan malzeme yüzeyine gönderilen toplam aşındırıcı partikül miktarı eşit tutularak, sadece partikül boyutları değiştirilmiştir. Deneyler sonucunda partikül boyutunun artışı ile aşınma oranının artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu artışın partikül boyutunun ve partiküllerin taşıdığı kinetik enerjinin artış göstermesi nedeniyle gerçekleştiği anlatılmıştır. Şekil 4.5'te farklı partikül boyutlarındaki aşındırıcıların malzeme yüzeyinde oluşturdukları hasar şematik olarak gösterilmiştir [53].



Şekil 4.5: Farklı boyutlardaki aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde oluşturdukları hasarın şematik gösterimi [53]

Tabakoff, Vittal, Heuer ve diğerleri ise aşındırıcı partikül boyutunun erozyon miktarını çok düşük oranda etkilediğini ifade etmişlerdir. Ancak yapılan deneysel

çalışmalar sonucunda partikül boyutunun arttırılması ile belirli bir partikül boyut aralığında aşınma mekanizmasının değişim gösterdiği ve bu aralıkta aşınma miktarının önemli ölçüde artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Aşınma mekanizmasının değişim gösterdiği partikül boyut aralığının altında ve üstünde ise partikül boyutunun arttırılmasının erozyon miktarını çok az miktarda arttırdığını belirlemişlerdir [44, 50, 54]. Şekil 4.6'da bu değişim gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi [44]

Aşınma mekanizmasının aşındırıcı partikül boyutlarına bağlı olarak gösterdiği değişim incelendiğinde; küçük partikül boyutlarında malzemede hasarın mikro kesme mekanizması ile gerçekleştiği, büyük partikül boyutlarında ise hasarın mikro çatlama ve mikro kırılma mekanizmaları ile gerçekleştiği belirlenmiştir. Küçük boyutlu partiküllerin kinetik enerjilerinin düşük olması sebebiyle aşınma oranının düşük olduğu görülmüştür. Büyük boyutlu partiküllerin yüksek kinetik ve darbe enerjileri ile malzemede çatlak oluşumuna yol açarak malzeme yüzeyinden büyük parçalar kopardığı ve yüksek aşınma oranlarına neden olduğu tespit edilmiştir [50, 55].

Eğik açılı partikül erozyonunda gevrek malzemelerin yüzeylerinde radyal çatlaklar oluşmaktadır [56]. Malzemelerde radyal çatlak oluşumu aşınmayı hızlandırır ve malzeme kaybını arttırır. Aşındırıcı partikül boyutlarının arttırılması ile malzemede daha derin radyal çatlakların oluştuğu ve aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir [52].

Katı partikül erozyonu mekanik ve metalurjik faktörlerden etkilenen karmaşık bir yüzey hasar prosesidir [53]. Aşındırıcı partikül boyutlarının aşınma oranına etkilerinin hedef malzemeye göre değişiklik göstereceği açıktır. Özellikle malzemenin kırılma karakteri (gevrek, sünek veya yarı-sünek) aşınma oranını önemli derecede etkilemektedir.

4.1.5. Aşındırıcı partiküllerin karışım oranı

Erozif aşınma davranışının incelenmesi hususunda ağırlıklı olarak tek boyutta partiküllerin etkisine dikkat edilmiştir. Ancak uygulamada erozif aşınmanın farklı boyutta partiküllerin etkisi altında gerçekleşeceği açıktır. Literatür incelendiğinde, farklı boyutlarda partiküllerden oluşan karışımların etkilerinin anlaşılabilmesi için erozif aşınmanın bir türü olan çamur erozyonunda (slurry erosion) gerçekleştirilmiş çalışmalara rastlanmıştır. Ancak özellikle farklı boyutlara sahip partiküllerden oluşan karışımların, birbirleri ile karıştırılma yüzdelerinin fonksiyonu olarak hedef malzemeler üzerindeki katı partikül erozyonu davranışına etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu sebeple literatürdeki bu eksiklik göz önüne alınarak bu çalışmanın yapılmasına karar verilmiştir. Bu amacın yanı sıra farklı boyutlara sahip partiküllerin kompresörden çıkışı esnasındaki birbirleriyle olan ilişkileri ve bu ilişkinin hedef malzeme üzerindeki etkisi de incelenilmesi düşünülen diğer bir husustur.

4.1.6. Aşınan malzeme özellikleri

Katı partikül erozyonunda, hedef malzeme özellikleri aşınma mekanizması ve aşınma oranı üzerinde etkin bir rol oynar. Aşınma olayı daha önce de değinildiği gibi kompleks bir süreçtir. Bu yüzden aşınan malzemelerin aşınma karakterlerinin net bir şekilde belirlenebilmesi için malzemelerin farklı parametreler altında (aşındırıcı partikülün çarpma açısı, hızı, debisi ve karışım oranı) aşındırılması gerekir. Katı partikül erozyonunda hedef malzemenin kırılma davranışı, aşınma sırasında görülen etkin aşınma mekanizmasını belirleyen önemli bir faktördür [57].

5. TEKNİK BİLGİLER

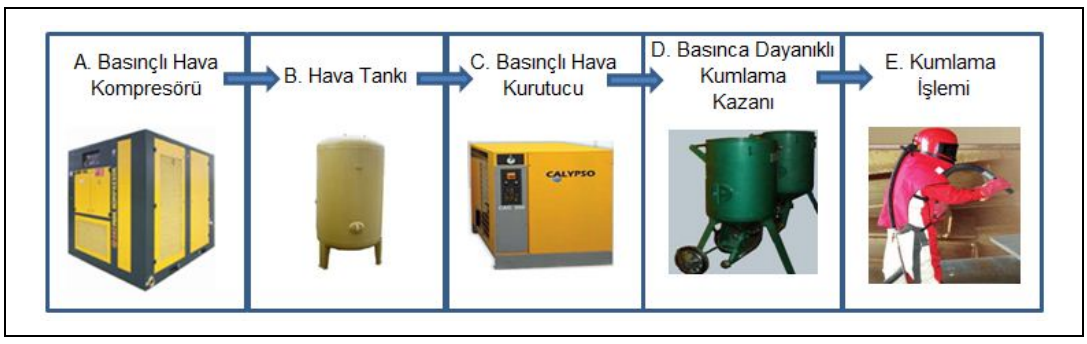
5.1. Kumlama

Bu bölümde basınçlı ve vakumlu kumlama yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan ekipmanlar kısaca anlatılacaktır.

5.1.1. Basınçlı kumlama

Basınçlı kumlama yönteminin ülkemizdeki geçmişi çok kısadır. Önceleri sadece deniz kumunun paslı yüzeye püskürtülmesi olarak bilinen bu yöntem, daha sonraları sanayimizin gelişmesiyle daha hassas malzemelere daha özel yöntemlerle uygulanmaya başlanmıştır.

Günümüzde kaplama öncesi pürüzlendirme amacıyla yoğun şekilde uygulanan kumlama işlemi kısaca basınçlı hava yada su gibi bir akışkan ile yüzeye, kum olarak tabir edilen ve mikron boyutlarında olan malzemelerin püskürtülmesi olarak tanımlanabilir. Hava sayesinde yüksek bir hıza ve dolayısıyla momentuma sahip olan bu kumlar yüzeye çarptıklarında mikron mertebesinde izler bırakırlar. Oluşan bu izlerin derinliği ve şekilleri yüzeyin parlaklığına birebir etki ederler. Şekil 5.1'de standart bir basınçlı kumlama düzeneğinin akış şeması verilmiştir [58.



Şekil 5.1: Basınçlı kumlama işlemi akış şeması

Yüzeyin kumlanarak işlenmesinde rol oynayan başlıca elemanlar basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankları, çeşitli özelliklerdeki kumlar (aşındırıcılar), hava ve kum tankları ve kum püskürtme nozullarıdır.

Kumlama düzeneğinin en başında basınçlı akışkan olarak kullanılan atmosferik hava ve bu havayı basınçlandırmada kullanılan hava kompresörleri bulunmaktadır. Kompresörler basınçlı hava üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Kumlama işleminde yoğun miktarda basınçlı hava kullanıldığından, kompresör seçimi çok büyük önem arz etmektedir. Kompresörleri genel olarak pistonlu ve vidalı kompresörler şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Vidalı kompresörler, birbiri ile iç içe geçmiş olan iki vidanın döndürülmesi suretiyle hava üretirler. Pistonlu kompresörler ise kayış ile pistonlara bağlı olan bir elektrik motorunun pistonları yukarı aşağı hareket ettirtmesi suretiyle hava üretmektedirler. Genellikle yüksek basınç gerektiren ve hava tüketim miktarı yüksek olan kumlama işlemlerinde vidalı kompresörler tercih edilmektedir.

Standart bir kumlama düzeneğinde kompresörden sonra gelen ekipman ise basınçlı hava tanklarıdır. Kompresörlerin ürettikleri basınçlı hava, kumlama kazanına gitmeden önce bir tank içine depolanmaktadır. Basınçlı havayı depolayan hava tankı kompresörün dinlenmesine yardımcı olduğu gibi kumlamanın başlangıcı ile sonu arasında sürekli aynı basınç ve debide havanın elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu hava tankları basınca dayanıklı olup mutlaka basınç testlerinden geçirilmiş ve sertifikalandırılmış olması gerekmektedir.

Kumlama düzeneğinde basınçlı hava tankından sonra basınçlı hava kurutucular gelmektedir. Havada bulunan nem yüksek basınca maruz kaldığı zaman yoğuşmaktadır. Yoğuşan bu nem, su damlacıkları şeklinde basınçlı hava ile taşınarak, sarf malzemesine karışır. Bağlayıcı etkisi nedeniyle sarf malzeme taneciklerini topaklaştıran ve bu topaklaşma nedeniyle de kesik kesik kum püskürtülmesine neden olan bu nemi, havanın içerisinden uzaklaştırmak için, hava kurutucuları kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek nem içeren sarf malzemeleri, kumlanılan yüzeyin çok kısa sürede oksitlenmesine de neden olmaktadır. Temel çalışma prensibi olarak, içerisinden geçen havayı soğutup, havanın içindeki nemi yoğuşturarak çiğleşme sağlayan bu kurutucular olmaksızın verimli bir kumlama yapılması çok zordur.

Kumlama düzeneğinde hava kurutucularından sonra gelen kumlama ekipmanı ise basınçlı kumlama kazanıdır. Basınçlı kumlama işleminde kullanılan portatif kumlama kazanları, öncelikle basınçlı bir kaptır. Bu sebeple imalatı dikkat ve özen gerektirir. Yüzeye püskürtülecek olan sarf malzemeleri bu hazneye yerleştirilirler. Basınçlı hava bu kazanların önce içine dolarak kazanın kum yükleme deliğini kapatan tapayı

yukarıya doğru hareket ettirir. Tapa kapandıktan sonra kendine çıkış yolu arayan basınçlı hava kazanın alt kısmında bulunan vananın çıkışına yönelir. Buradaki vananın asıl görevi uygun hava ve kum karışımını sağlamaktır. Kazanın kumlama basıncına dayanıklı olması şarttır. Aksi taktirde patlama meydana gelebilir. Kazan sürekli basınç yüklenmesi ve boşaltılmasına maruz kalmaktadır. Bu da kazanda yorulma etkisi meydana getirmektedir. Basınca dayanıklı imal edilen kumlama kazanlarının iç hacimlerinin büyük olması kumlama işleminin sürekliliği açısından büyük avantajdır. Küçük hacimli kumlama kazanlarında işlem süresince sıklıkla durmak ve kazanı tekrar kum doldurmak gerekmektedir. Basınçlı hava itişli kumlama sisteminde kumun sisteme dahil edilebilmesi için mutlaka sistemin durdurulması gerekmektedir. Bu nedenle mümkün olan en uzun periyotla sistemin durdurulması için kum haznesinin mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerekmektedir. Basınçlı kumlama işleminde yüzeyde istenilen etkiyi yaratmak için yüzeye ortalama 6-8 bar basınçta, dakikada 3-4 metreküp hava ve aşındırıcı püskürtülmektedir. Bu işlem esnasında püskürtülen havaya aşındırıcı karıştırılmasını ise basınçlı kumlama kazanı sağlamaktadır. Basınçlı kumlama kazanının kum haznesine konulan aşındırıcı, basınçlı kabın altında bulunan vanaya akar. Bu vanaya ayrı ayrı giren aşındırıcı ve basınçlı hava karışmış olarak kumlama hortumuna girer. Kumlama hortumundan hızlı bir şekilde ilerleyen bu karışım ortalama 6-8 mm iç çapı olan kumlama nozuluna gelince sıkışır ve nozuldan dışarıya şiddetli bir şekilde püskürür. Bu karışım yüzeye ulaştığında çarptığı noktada çok hızlı ve etkili bir temizlik yapar.

Kumlama işleminde önemli rol oynayan diğer bir eleman ise kum püskürtme nozuludur. Kumun çıkış yerinde yani kumlama hortumunun en uç noktasında bulunan ve yoğun sürtünmeye maruz kalan bu ekipmanın mutlaka aşınmaya dayanıklı bir malzemeden üretilmiş olması gerekmektedir. Kumlama nozullarının çaplarındaki değişim içerisinden geçen havanın debisini belirler. Çapta meydana gelen bir kat aşınma hava tüketimini tam dört kat arttırmaktadır. Bu artış maliyetleri olumsuz yönde etkiler. Ayrıca bu artış kumlama işlemi sırasında kısa zamanda meydana geldiği taktirde kumlanan yüzeyin dengesiz kumlanmasına neden olur, bu da dalgalı bir ürün yüzeyi anlamına gelmektedir. Hava ve kum sarfiyatını belirleyen en önemli ekipman kum püskürtme nozullarıdır. Kumla hava sıkıştırılarak belirli büyüklükteki deliklerden geçmeye zorlanırlar. Bu sıkışmadan dolayı hava ile taşınan kum yan çeperlere sürtünerek aşınmaya neden olur. Aşınma nozul çapının en küçük değerlere düştüğü yerde maksimumdur. Sürtünmeden dolayı oluşan aşınmayla, zamanla nozul çapları genişlemektedir. Nozul çaplarında oluşan bu genişleme, hava

sarfiyatını hızlı bir şekilde arttırır ve bir süre sonra nozuldan çıkan havanın basıncı düşmeye başlar. Yapılan kumlama işleminde verim alınabilmesi için özellikle püskürtülen havanın basıncının belirli basınç aralığında sabit tutulması gerekmektedir. Aksi taktirde yüzeye püskürtülen sarf malzemesinin etkisi değişken olacak ve elde edilen yüzeyde dalgalanmalar meydana gelecektir. Bu nedenlerden dolayı kumlama işleminde kullanılacak nozulların aşınmaya son derece dayanıklı malzemelerden yapılması gerekmektedir. Bu malzemeler genellikle sinterlenmiş metal karbürlerdir. Aşınmaya en dayanıklı malzemelerin başında B_3C (Bor karbür) malzemesi gelmektedir. Bu malzemeden yapılmış nozulların aşınma ömürleri diğer nozullara göre çok daha yüksektir. Örneğin, cam kürecik sarf malzemesi kullanılarak yapılan kumlamalarda bor karbür nozulların 1500 saatten daha fazla çalışma ömürleri bulunmaktadır.

Kumlama işleminde aşınan malzemenin (hedef malzeme) yüzey morfolojisini en çok etkileyen parametreler; hava basıncı, aşındırıcı ve aşınan malzeme özellikleridir. Basınçlı hava kumlama işleminde itici güç olarak kullanılmakta ve yüzeye gönderilen aşındırıcı partiküllerin hızları ve debileri üzerinde etkin rol oynamaktadır. Tüm bu parametreler aşınan malzemenin aşınma miktarını ve buna bağlı olarak yüzey morfolojilerini etkilemektedir. Aşınan malzemenin yüzey morfolojisini etkileyen bir diğer önemli parametre de aşındırıcı partiküllerin şekilleridir. Aşındırıcı partikülleri şekil itibariyle küresel ve köşeli olarak ikiye ayırmak mümkündür.

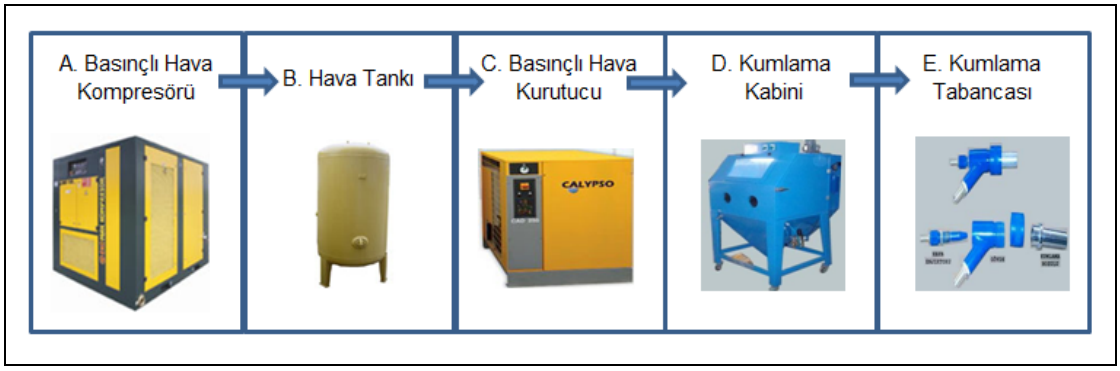
Köşeli taneciklerin oluşturduğu aşındırıcı malzemelere grit adı verilmektedir (Örneğin; çelik grit, cam grit, dere kumu, alüminyum oksitler vb.). Bu malzemeler daha çok kaplama işlemleri öncesinde yüzey pürüzlendirilmesi amacıyla püskürtülürler. Köşeli malzemelerin çarpması ile pürüzlenen yüzey sonradan uygulanacak kaplayıcı elemanın yüzeye daha iyi tutunmasına olanak sağlar. Köşeli aşındırıcılar kullanılırken dikkat edilmesi gereken önemli hususlar vardır. Öncelikle bu tip aşındırıcılar aynı bölgeye uzun süre uygulandıklarında malzemenin toleranslarında değişikliğe neden olurlar. Bunun nedeni, yüzeye çarpan partiküllerin köşeli yapılarından dolayı kesme etkisine neden olmalarıdır. Yüzeyden çok küçük parçalar koparark pürüzlendirme yaptığından dolayı bu işlem aynı bölge üzerinde uzun süre uygulanmamalıdır. Uzun süreli uygulamalarda kaplanacak malzeme yüzeyinin (aşınan malzeme) gereğinden fazla pürüzlenmesi kaplayıcı elemanın tüketiminin artmasına yol açar. Sonuç olarak bu durum kaplama maliyetinde artışa sebep olur.

Küresel aşındırıcılar ile kumlanan yüzeyler köşeli aşındırıcılar ile kumlanan yüzeylerden oldukça farklıdır. Küresel aşındırıcılar daha çok nihai ürün üretimindeki son kumlama işleminde kullanılırlar. Küresel aşındırıcılar ile kumlama işleminin amacı, ürün üzerinde üretim işlemleri sırasında oluşan leke ve izlerin ortadan kaldırılmasıdır. Ürün üzerine daha sonra bir boyama veya kaplama işlemi uygulanmayacaksa, yüzeylerin parlak görünmesi ve kir tutmaması için kumlama işleminin küresel şekilli aşındırıcılar ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Köşeli aşındırıcılar ile gerçekleştirilen kumlama işlemi ürün yüzeyinde derin yarıklar oluşturmaktadır. Bu durum ışığın yoğun miktarda kırılmasına ve doğal olarak yüzeyin mat görünmesine neden olmaktadır. Ayrıca oluşan bu derin yarıklara çeşitli partiküller yerleşerek yüzeyin kirlenmesine yol açmaktadır.

Kumlama işleminde önemli rol oynayan diğer bir eleman ise kum püskürtme nozullarıdır. Kumun çıkış yerinde yani kumlama hortumunun en uç noktasında bulunan ve yoğun aşınmaya maruz kalan bu ekipmanın mutlaka aşınmaya dayanabilecek özelliklerde olması gerekmektedir. Zaman içerisinde nozul çaplarının aşınarak genişlemesi, aşındırıcı partiküllerin debisin ve hızının azalmasına yol açabilir ve bu durum aşındırma süresi ve maliyetinde artışa sebep olabilir [58].

5.1.2. Vakumlu kumlama

Vakumlu kumlama sisteminde basınçlı havanın vakum etkisinden faydalanılmaktadır. Basınçlı hava; kumlama tabancası adı verilen bir ekipmanın içinden geçirilmek suretiyle, bu tabancanın alt kısmındaki boşluktan emiş yapılması sağlanır. Belirli bir yönde akmakta olan basınçlı havanın yaptığı vakum etkisiyle emilen aşındırıcı malzeme yine bu tabancanın içinde hava ile karışarak yüzeye püskürtülür. Bu işlem açıkta yapılabildiği gibi özel filtre sistemi ile donatılmış ve kumlama tabancası bulundurulan bir kumlama kabini içinde de yapılabilir. Şekil 5.2'de basınçlı hava etkisiyle vakum yapılarak kumlama yapılan sistemin akış şeması ve gereksinimleri resmedilmiştir [58].



Şekil 5.2: Basınçlı hava etkisiyle vakum yapılarak kumlama yapılan sistemin akış şeması

Kumlama kabinlerinde temel prensip yerçekimi etkisiyle alt haznesinde biriken kumun, içinden basınçlı hava geçirilen bir kumlama tabancası vasıtasıyla emilerek püskürtülmesidir. Operatör kabinin içine koruyucu eldivenler vasıtasıyla ellerini sokar ve bir eliyle kumlanacak malzemeyi, diğer eliyle de kumlama tabancasını tutar ve kumlama işlemini gerçekleştirir. Malzemeler kabinin içine yan taraftaki bölmelerden yerleştirilir ve havanın kontrolü ayak pedalından sağlanır. Bu tip kabinler özellikle elle tutulabilecek kadar küçük parçaların kumlanmasında oldukça pratiktir. İşlem basıncı 4-8 bar arasındadır.Tablo 5.1'de hava vasıtasıyla gerçekleştirilen basınçlı ve vakumlu kumlama yöntemleri karşılaştırılmıştır [58].

Tablo 5.1: Kumlama yöntemlerinin karşılaştırılması [58]

Kumlama Yöntemleri Karşılaştırması	**Basınçlı Kumlama Yöntemi**	**Vakumlu Kumlama Yöntemi**
Çalışma Basıncı	5-8 Bar	5-8 Bar
Hava Tüketimi	0,8 - 3,50 m^3/dk	0,6 - 1,20 m^3/dk
Parça Büyüklüğü	Büyük Parçalar	Küçük Parçalar
Kum ve Hava Çıkış Hızı	200-250 m/s	60-100 m/s
Kontrollü Kumlama İmkanı	Düşük	Yüksek
Yatırım Maliyeti	Yüksek	Düşük
Seyyar Kumlama İmkanı	Var	Yok
Sürekli Çalışma Olanağı	Yok	Var
Kumlama Süresi	Hızlı	Yavaş
Kumlama Etkisi	Fazla	Az

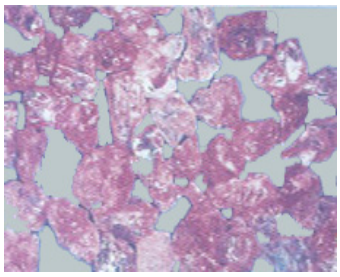
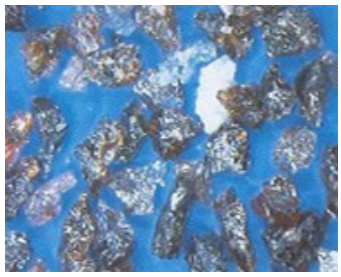
Kumlama işlemi ile malzemelerin işlenmesinde en önemli elaman daha önce de bahsedildiği gibi aşındırıcı malzemelerdir. Aşındırıcı malzemenin partikül büyüklüğü, şekli, sertliği gibi birçok özelliği kumlama işleminin verimliliğini ve başarısını doğrudan etkiler. Tablo 5.2'de farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılması önerilen kumlama malzemeleri (aşındırıcı partiküller) verilmiştir.

Tablo 5.2: Farklı malzemeler için önerilen kumlama malzemeleri [58]

	Önerilen Kumlama Sarf Malzemesi											
Malzeme Cinsi	cam küre	cam grit	alüminyum oksit	çelik bilye	çelik grit	paslanmaz bilye	seramik bilye	silisyum karbür	plastik abrasiv	kumlama sodası	silis kumu	garnet
Paslanmaz	☑	-	-	-	-	☑	☑	-	-	-	-	-
Alüminyum	☑	-	☑	-	-	☑	☑	-	-	-	-	-
Dökme Demir	-	☑	☑	☑	☑	-	-	☑	-	☑	☑	☑
Çelik	-	☑	☑	☑	☑	-	-	☑	-	☑	☑	☑
Pirinç	☑	-	☑	-	-	☑	☑	-	-	-	-	-
Titanyum	☑	-	☑	-	-	☑	☑	-	☑	-	-	-
Cam	-	☑	☑	-	-	-	-	☑	-	-	☑	☑
Gümüş	☑	-	☑	-	-	☑	☑	-	☑	☑	-	-
Bakır	☑	-	☑	-	-	☑	☑	-	☑	☑	-	-
Altın	☑	-	☑	-	-	☑	☑	-	☑	-	-	-
Magnezyum	☑	-	☑	-	-	☑	☑	-	☑	-	-	☑
Ahşap	-	-	-	-	-	-	-	-	☑	☑	☑	☑
Tekstil	-	-	☑	-	-	-	-	☑	-	☑	☑	☑
Termoset	-	☑	☑	-	-	-	-	☑	-	☑	☑	☑
Termoplastik	-	☑	☑	-	-	-	-	☑	-	☑	☑	☑
Akrilik	-	☑	☑	-	-	-	-	☑	-	☑	☑	☑
Platin	☑	-	☑	-	-	☑	☑	-	☑	☑	-	-
Zamak	-	☑	☑	-	-	☑	☑	-	-	☑	-	☑
Mermer	-	☑	☑	-	-	-	-	☑	-	☑	☑	☑

5.2. Alüminyum Oksit

Mineral içerikli bir sarf malzemesi olan alüminyum oksit, saflığına göre derecelendirilir. Piyasada alüminyum oksit, corund, corondum ve alümina isimleriyle de adlandırılan bu malzeme saflık derecesine göre beyaz, pembe ve kahverengi renkte bulunur. Şekil 5.1'de beyaz, pembe ve kahverengi alüminyum oksit çeşitleri verilmiştir [59].

Beyaz Alüminyum Oksit	Pembe Alüminyum Oksit	Kahverengi Alüminyum Oksit
		

Şekil 5.3: Alüminyum oksit çeşitleri [59]

Alüminyum oksit minerali, alüminyum metalinin oksijene karşı yüksek duyarlılığı sonucu oluşmaktadır. Yüksek sertlikleri ve dayanım ömürleri nedeniyle yüzey işlem sektöründe tercih edilirler. Boya çıkarma veya pürüzlendirme işlemleri için en çok kullanılan malzemelerdir. Alüminyum oksit yüksek sertlikleri ve köşeli yapılarından dolayı özellikle kaplama öncesi pürüzlendirme işleminde yoğun olarak kullanılmaktadır. Basınçlı hava ile birlikte yüzeye püskürtüldüklerinde, partikül boyutlarına bağlı olarak yüzeyde mikron mertebesinde yarıklar açmaktadırlar. Sonradan bir kaplama işlemi uygulandığında açılan bu yarıklara yerleşen kaplama malzemesi ana metale daha iyi tutunduğundan kaplama ömrü ve kalitesi yüksek olmaktadır. Alüminyum oksit köşeli bir kumlama malzemesidir. Köşeli malzemelerin aşındırma özelliği yüksektir. Bu özelliğinden ötürü alüminyum oksit yüzeyin pürüzlendirilmesi işlemlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüzey profilinin çok önemli olmadığı uygulamalarda hızlı bir temizleyici olarak da kullanılmaktadır. Beyaz alüminyum oksit saflık değerinden ötürü paslanmazlık özelliği taşıyan malzemelerin kumlanmasında tercih edilmelidir. Paslanmaz çelikler, titanyum ve alüminyum alaşımları, bakır ve pirinç alaşımları ve hatta porselen esaslı malzemelerin kumlamasında tercih edilen beyaz alüminyum oksit, kahverengi

alüminyum oksite nazaran çok daha az toz çıkararak daha temiz bir yüzey kalitesi sunmaktadır. Kahverengi alüminyum oksit ise serbest halde demir içerdiği için yüzeyin paslanmazlık özelliğini zedelemektedir. Ayrıca yoğun kullanımda yüzeyde renk değişimine de yol açabilmektedir. Bu nedenlerle kahverengi alüminyum oksit paslanmazlığın ve yüzey rengi kalitesinin şart olmadığı durumlarda tercih edilmelidir. Cam kumlama makinelerinde ve elle yapılan cam kumlama uygulamalarında hızlı kumlama imkanı tanıması ve diğer sarf malzemelerine nazaran (silis kumu, cam kumu, garnet gibi) daha yüksek sertlik ve daha az toz çıkışı sağlaması nedeniyle, bu malzemeler yoğun olarak tercih edilmektedir. Alüminyum oksit neme duyarlı bir malzemedir, bu nedenle depolanması sırasında kesinlikle neme maruz kalmamaları gerekmektedir. Tablo 5.3'te alüminyum oksit mineralinin fiziksel özellikleri verilmiştir. Tablo 5.4'te ise kahverengi, pembe ve beyaz alüminyum oksit minerallerinin kimyasal özellikleri verilmiştir [59].

Tablo 5.3: Alüminyum oksit mineralinin fiziksel özellikleri [59]

Alüminyum oksit mineralinin fiziksel özellikleri	
Alüminyum Kahverengi Oksit 'in Özgül Ağırlığı	3,96 gr/cm^3
Beyaz Alüminyum Oksit 'in Özgül Ağırlığı	3,92 gr/cm^3
Pembe Alüminyum Oksit 'in Özgül Ağırlığı	3,92 gr/cm^3
Alüminyum Oksit 'in Ortalama Dökme Yoğunluğu	2,4 gr/cm^3
Alüminyum Oksit 'in Sertliği	9 (mohs scale)
Alüminyum Oksit 'in Kristal Sistemi	Kübik
Alüminyum Oksit 'in Kristal Şekli	Köşeli
Alüminyum Oksit 'in Kırılması	Dökme Mineralin Preslenmesi
Alüminyum Oksit 'in Dayanıklılığı	Yüksek
Alüminyum Oksit 'in Serbest Akış Özelliği	97 % minimum
Alüminyum Oksit 'in Aside Duyarlılığı	Yoktur
Alüminyum Oksit 'in Nem Çekme Özelliği	Vardır.
Alüminyum Oksit 'in Magnetiklik Özelliği	Çok hafif magnetikdir
Alüminyum Oksit 'in Elektrik İletimi	100 microsiemens per meter
Alüminyum Oksit 'in Radioaktivite Özelliği	Tesbit edilmemiştir
Alüminyum Oksit 'in Patoljik Zarar Verme Özelliği	Yoktur
Alüminyum Oksit 'in Serbet Silika İçeriği	Yoktur

Tablo 5.4: Alüminyum oksit mineralinin kimyasal özellikleri [59]

Kahverengi Alüminyum Oksit Mineralinin Kimyasal Özellikleri	
Al_2O_3 : %94,5-95,5	Klor içeriği <50 ppm
SiO_2: %0,50-0,80	Eriyebilen tuz içeriği<100 ppm
Fe_2O_3: %0,30	Sulu ortamda pH 6,93
TiO_2: %2,60-3,20	Alçıtaşı içeriği yoktur
CaO+MgO: % 0,30	Rutubet < 0,5 %Eser
Beyaz Alüminyum Oksit Mineralinin Kimyasal Özellikleri	
Al_2O_3: %99,7	Klor içeriği <50 ppm
SiO_2: %0,02	Eriyebilen tuz içeriği<100 ppm
Fe_2O_3: %0,02	Sulu ortamda pH 6,93
TiO_2: %2,60-3,20	Alçıtaşı içeriği yoktur
Na_2O: %0,20	Rutubet < 0,5 %Eser
Pembe Alüminyum Oksit Mineralinin Kimyasal Özellikleri	
Al_2O_3: %99,4	Klor içeriği <50 ppm
SiO_2: %0,30	Eriyebilen tuz içeriği<100 ppm
Fe_2O_3: %0,02	Sulu ortamda pH 6,93
TiO_2: %2,60-3,20	Alçıtaşı içeriği yoktur
Na_2O: %0,20	Rutubet < 0,5 %Eser

Alüminyum oksit mineralleri aşındırıcı partikül olarak birçok kumlama uygulamasında kullanılmaktadır. Tablo 5.5'te bu malzemelerin kullanım alanları ve nedenleri verilmiştir [59].

Tablo 5.5: Alüminyum oksit aşındırıcıların kullanımı [59]

Alüminyüm Oksit Aşındırıcıların Kullanımı		
Sanayi Kolu	**Alüminyum Oksit Türü**	**Kullanım Nedeni**
Cam Kumlama	Kahverengi Alüminyum Oksit	Uygun Fiyat , Yüksek Sertlik
Medikal Malzeme İmalat	Beyaz Alüminyum Oksit	Yüksek Saflık , İnert Yapı
Zımpara ve Taş İmalat	Kahverengi Alüminyum Oksit	Uygun Fiyat , Yüksek Sertlik
Zımpara ve Taş İmalat	Pembe Alüminyum Oksit	Yüksek Saflık , Yüksek Dayanım Ömrü
Paslanmaz Pürüzlendirme	Beyaz Alüminyum Oksit	Yüksek Saflık , İnert Yapı
Silah Sanayi	Beyaz Alüminyum Oksit	Yüksek Saflık , İnert Yapı
Kalıpçılk	Kahverengi Alüminyum Oksit	Uygun Fiyat , Yüksek Sertlik
Poliüretan	Kahverengi Alüminyum Oksit	Uygun Fiyat , Yüksek Sertlik
PTFE Kaplama	Beyaz Alüminyum Oksit	Yüksek Saflık , İnert Yapı
Kot Taşlama	Kahverengi Alüminyum Oksit	Uygun Fiyat , Yüksek Sertlik

6. MALZEME VE YÖNTEM

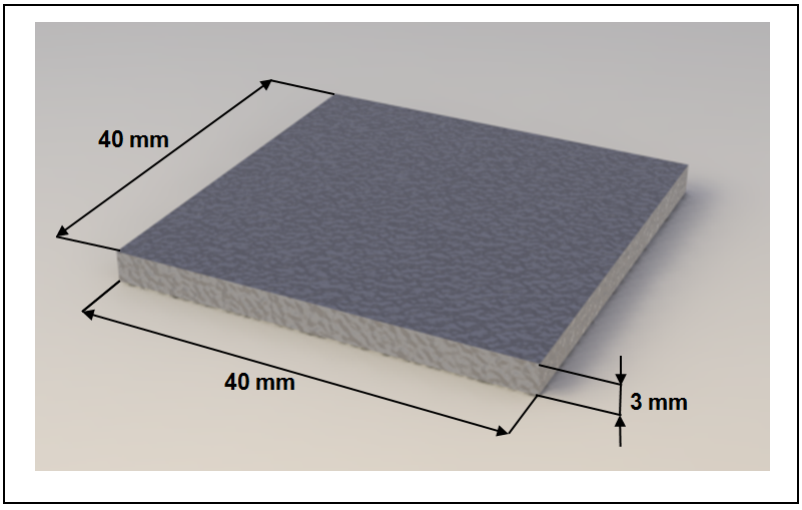
6.1. Kullanılan Malzemeler

Tüm deneysel çalışmalarda hedef malzeme (aşındırılan malzeme) olarak Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda levha halindeki Ti6AL4V'un XRF (X-Işını Floresan Spektrometre) ile alınan elementsel analizi verilmiştir.

Tablo 6.1: Çalışmalarda kullanılan titanyum alaşımının (Ti6Al4V) elementsel analizi

Element	% Ağırlık Oranı
Al	5,629
Fe	0,089
S	0,006
Si	0,052
Ti	91,455
V	2,769

Levha halindeki Ti6Al4V malzeme giyotin makas ile kesilerek, kare plakalar şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Şekil 6.1'de hazırlanan numunelerin boyutları gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Ti6Al4V numunelerin boyutları

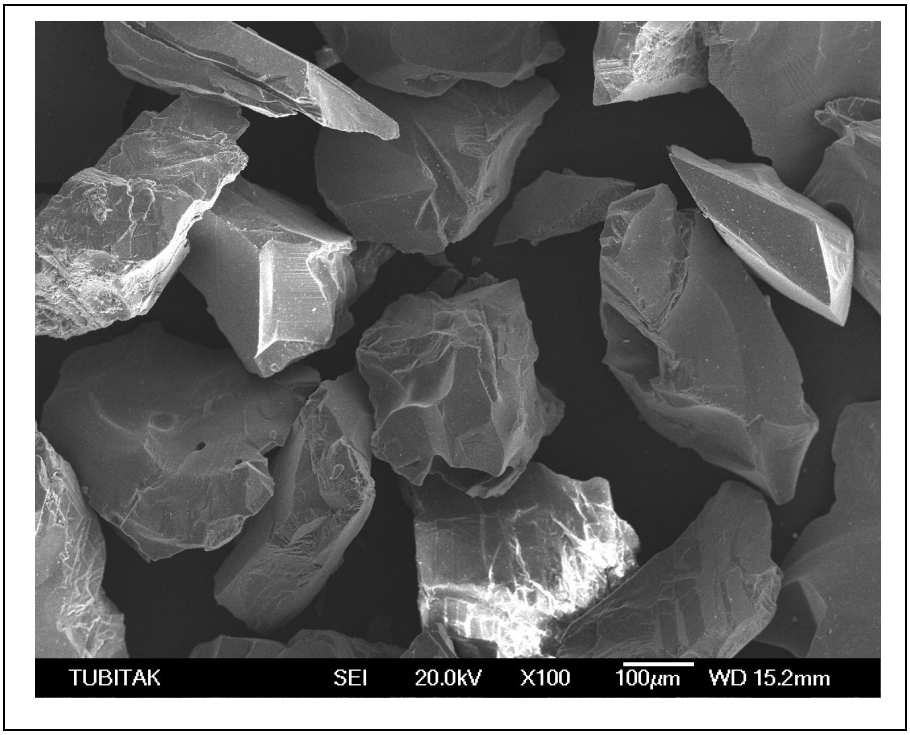
Deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak, üç farklı partikül boyutuna sahip alüminyum oksit kullanılmıştır. Teknik bilgiler bölümünde alüminyum oksit

aşındırıcılar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Tablo 6.2'de deneysel çalışmalarda kullanılan alüminyum oksit aşındırıcıların partikül boyutları verilmiştir.

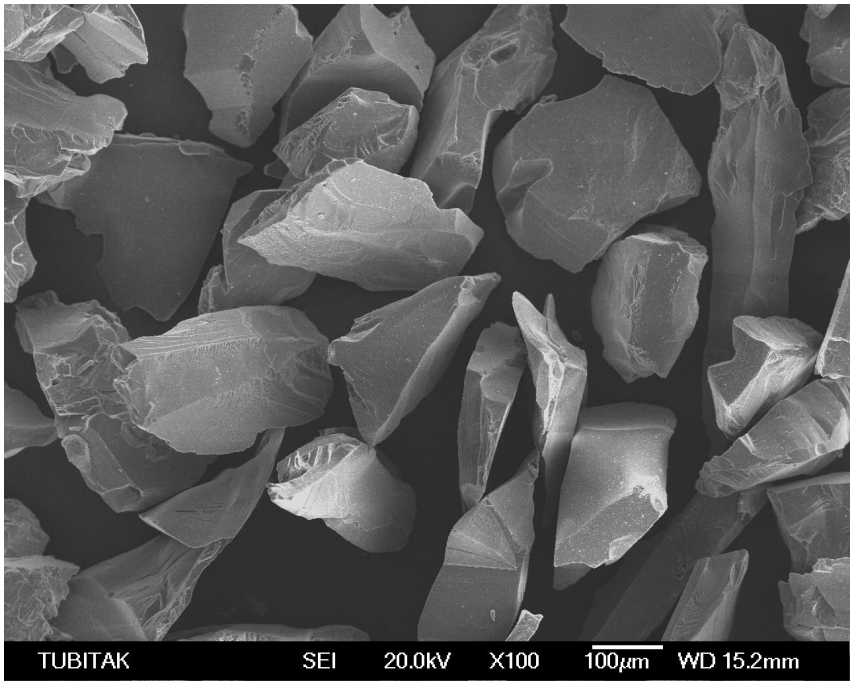
Tablo 6.2: Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları

Aşındırıcı Partikül Adı	**Aşındırıcı Tane Büyüklüğü**
Beyaz Alüminyum Oksit F 60	212 -300 µm
Beyaz Alüminyum Oksit F 80	150 -212 µm
Beyaz Alüminyum Oksit F 120	90 -125 µm

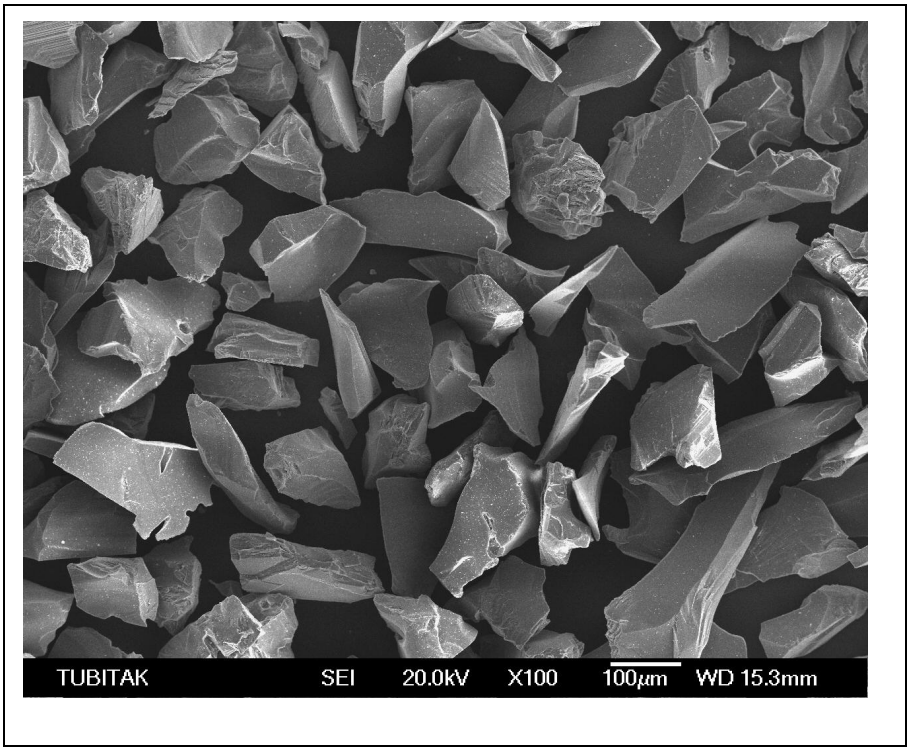
Şekil 6.2, 6.3 ve 6.4'te deneysel çalışmalarda kullanılan 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutlarına sahip alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde teknik bilgiler bölümünde de anlatıldığı gibi alüminyum oksit aşındırıcıların keskin köşeli bir şekle sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.2: 60 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı



Şekil 6.3: 80 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı



Şekil 6.4: 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı

6.2. Uygulanan Deneysel Yöntem

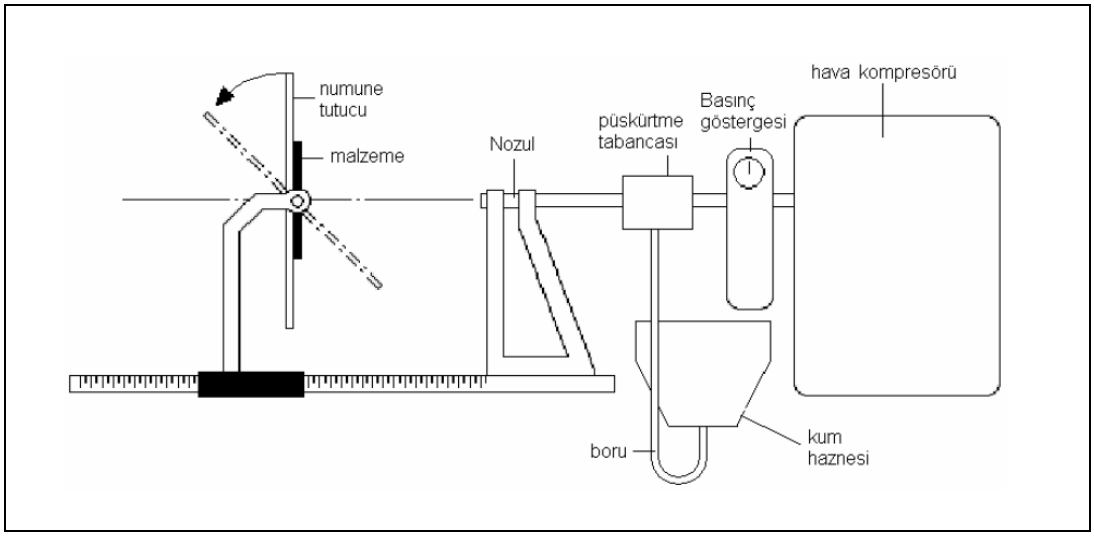
Bu çalışmada kare plakalar şeklinde hazırlanan Ti6Al4V numuneler vakumlu kumlama yöntemi ile farklı parametreler altında aşındırılmıştır. Deneysel çalışmaların birinci bölümünde Ti6Al4V numuneler üç farklı partikül boyutuna sahip alüminyum oksit aşındırıcılar ile özel olarak hazırlanan kumlama düzeneği kullanılarak aşındırılmıştır. Tablo 6.3'te verilen parametrelerin farklı kombinasyonları ile çok sayıda deney gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda Ti6AL4V'un katı partikül erozyonu davranışı karakterize edilmiştir.

Tablo 6.3: Kumlama deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı Partikül Boyutu (Mesh)	**Püskürtme Basıncı (Bar)**	**Aşındırıcı Partikül Çarpma Açısı (Derece)**
60	1,5	15
80	3	30
120	4	45
		60
		75
		90

Kumlama işlemleri özel olarak tasarlanan kumlama düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Kumlama düzeneği basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kumlama kabini, numune fikstürü ve kumlama tabancası elemanlarından oluşmaktadır. Kumlama tabancası kumlama kabini içerisine sabitlenmiştir ve kabin dışarısından bir pedal vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Kumlama basıncı da kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir. Kumlama kabini içerisine numunenin sabitlenmesi ve numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülmesini sağlayan özel bir numune fikstürü yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile kabin içerisine sabitlenmiş kumlama tabancası, numunenin 15'er derece ile döndürülmesine

olanak veren fikstürün hareketi ile numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtebilmektedir. Kumlama işlemleri sırasında numuneler bu fikstür kullanılarak kumlama tabancasından 20 mm uzaklıkta tutulmuştur. Şekil 6.5'te katı partikül erozyonu test düzeneği verilmiştir.



Şekil 6.5: Katı partikül erozyonu test düzeneği

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde Ti6Al4V malzeme, maksimum aşınmanın görüldüğü parametreler kullanılarak, farklı partikül büyüklüklerine sahip alüminyum oksit aşındırıcıların farklı oranlarda karıştırılmaları ile hazırlanan aşındırıcı partikül karışımları ile aşındırılmıştır. Tablo 6.4'te deneysel çalışmaların bu bölümü için hazırlanan partikül karışımları verilmiştir.

Tablo 6.4: Deneylerde kullanılacak 9 farklı partikül konsantrasyonu

	Karışım İçeriği (ağırlıkça %)		
No	**60 mesh**	**80 mesh**	**120 mesh**
1	75	-	25
2	50	-	50
3	25	-	75
4	75	25	-
5	50	50	-
6	25	75	-
7	-	75	25
8	-	50	25
9	-	25	75

7. DENEYSEL BULGULAR

7.1. Kütlesel Debilerin Hesaplanması

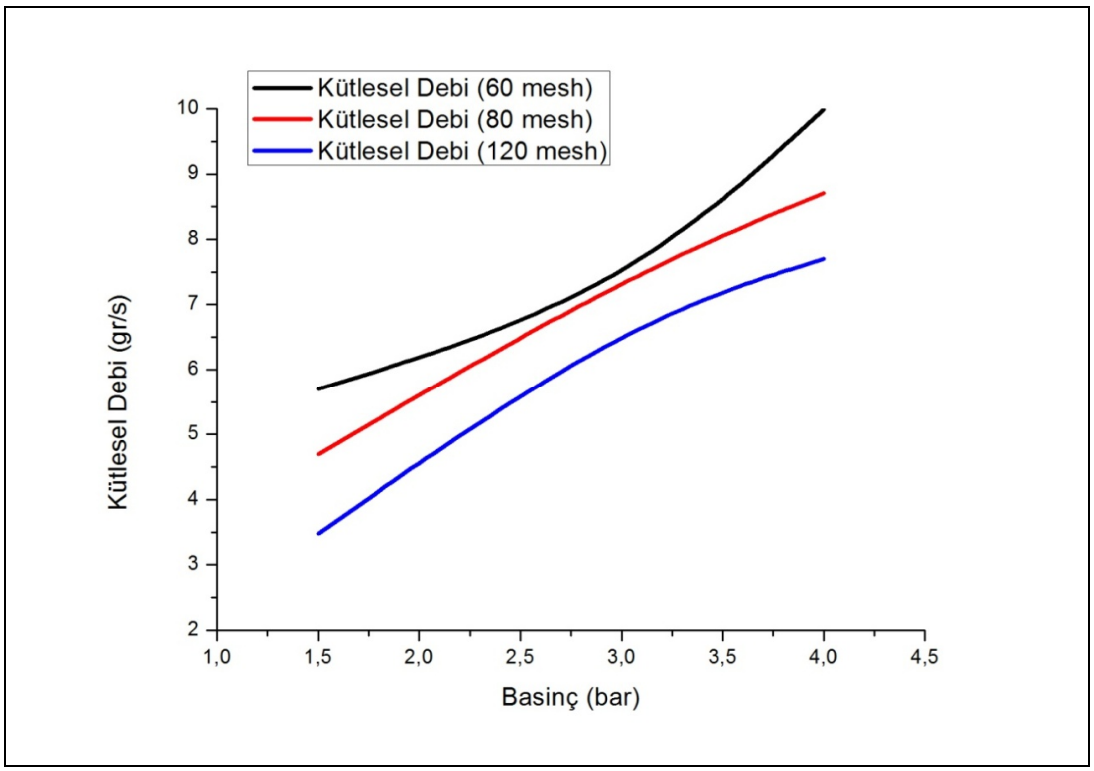
Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, farklı partikül boyutlarına sahip aşındırıcıların ve aşındırıcı partikül karışımlarının, farklı basınçlarda kütlesel debileri hesaplanmıştır. Tablo 7.1'de 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcıların kütlesel debilerinin hesaplanması için gerçekleştirilen deneylerin sonuçları verilmiştir.

Tablo 7.1: 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutlarına sahip aşındırıcıların kütlesel debilerinin hesaplanması için gerçekleştirilen deneylerin sonuçları

No	Aşındırıcı Partikül Boyutu (mesh)	Püskürtme Basınç (Bar)	Süre (s)	Kullanılan Aşındırıcı Miktarı (gr)	Hesaplanan Kütlesel debi (gr/s)
1	60	1,5	90	513,72	5,70
2	60	3	90	643,67	7,15
3	60	4	90	899,28	9,99
4	80	1,5	90	423,87	4,70
5	80	3	90	668,44	7,42
6	80	4	90	874,21	8,71
7	120	1,5	90	313,55	3,48
8	120	3	90	606,52	6,73
9	120	4	90	693,17	7,70

Tablo 7.1 incelendiğinde kütlesel debinin partikül boyutu ve basınç artışına paralel olarak artış gösterdiği sonucuna varılabilir. En yüksek kütlesel debinin, en yüksek püskürtme basıncında (4 Bar) en büyük partiküllerin (60 mesh) kullanılması ile gerçekleştirilen 3 numaralı deneyde 9.99 gr/s olarak elde edildiği görülmektedir. Şekil 7.1'de grafik üzerinde kütlesel debinin püskürtme basıncına ve partikül boyutuna bağlı olarak değişimi görülmektedir.

Deneysel çalışmalar öncesinde basıncın ve partikül boyutunun arttırılması ile birim zamanda püskürtülen katı partikül miktarının (kütlesel debi) artacağı varsayılmıştır. Tablo 7.1 ve Şekil 7.1 yorumlanarak bu varsayımın doğru olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 7.1: Aşındırıcı partiküllerin kütlesel debilerinin aşındırıcı partikül boyutu ve basınca bağlı değişimi

Tablo 7.2 ve 7.3'te 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutlarındaki aşındırıcıların farklı oranlarda karıştırılmaları ile hazırlanan karışımların kütlesel debilerinin hesaplanması için gerçekleştirilen deneylerin sonuçları verilmiştir. Tablo 7.2'de verilen deneyler 4 bar, tablo 7.3'te verilen deneyler 1.5 bar püskürtme basıncı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.2 ve 7.3 incelendiğinde tüm karışımlar için, karışım içerisindeki büyük partikül boyutuna sahip aşındırıcı oranının azalması ile kütlesel debinin azaldığı görülmüştür. Ancak tüm karışımların kütlesel debilerinin, partiküllerin tek başlarına kullanılmaları ile elde edilen kütlesel debilerden daha büyük olduğu görülmüştür. Tablo 7.1'de 4 bar için en büyük kütlesel debi daha önce de değinildiği gibi 9,99 gr/s olarak bulunmuştur. Buna karşın Tablo 7.2'de en düşük kütlesel debinin % 75 120 mesh - % 25 80 mesh'lik partiküllerde oluşan karışımda 12,37 gr/s olarak tespit edilmiştir. Tablo 7.1'de 1,5 bar için en büyük kütlesel debi 5,70 gr/s olarak

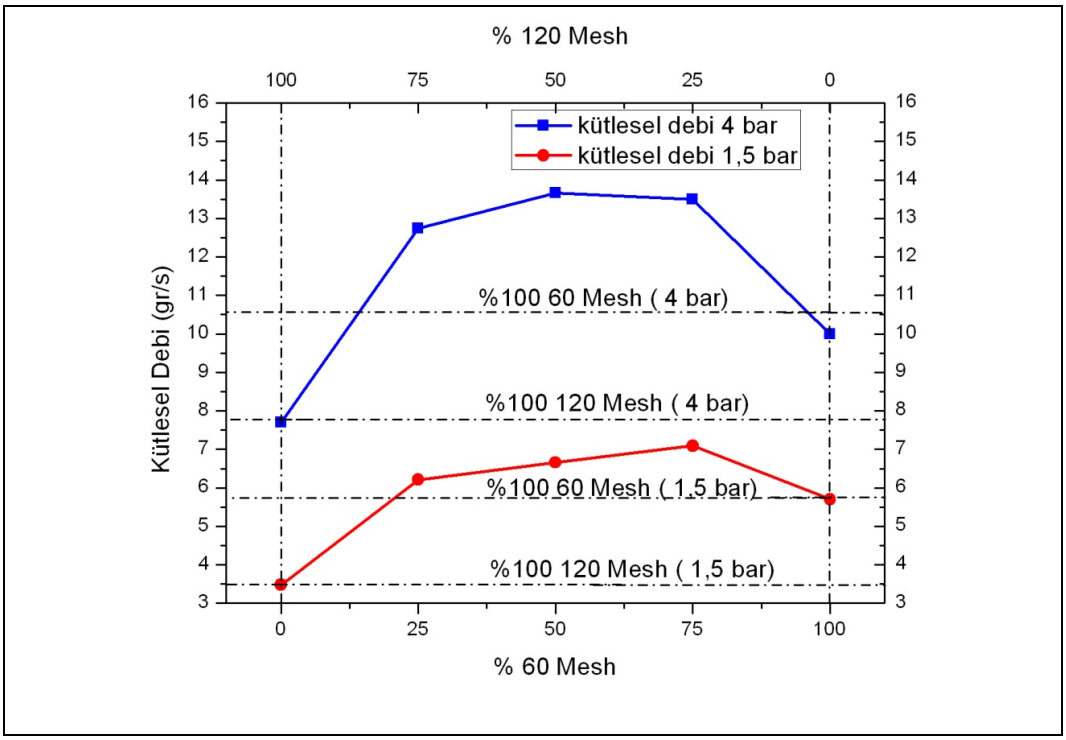
bulunmuştur. Buna karşın tablo 7.3 incelendiğinde en düşük kütlesel debinin % 75 120 mesh - % 25 60 mesh'lik partiküllerde oluşan karışımda 6,21 gr/s olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak partikül karışımlarının debileri aynı basınç altında, partiküllerin tek başlarına kullanılmalarına göre daha yüksektir. Bu sonucun partiküllerin kum haznesini tek başlarına doldurmaları durumunda partiküller arasında bulunan boşlukların, partiküllerin karıştırılmaları ile küçük boyuta sahip partiküller tarafından doldurulmaları ile açıklanabilir. Bu sayede birim hacim içerisinde kütlece daha fazla partikül yer almakta ve kumlama esnasında birim zamanda daha fazla partikül püskürtülmektedir. Şekil 7.2, 7.3 ve 7.4'te tüm karışımların 1,5 bar ve 4 bar basınçta, kütlesel debilerinin karışım konsantrasyonuna bağlı olarak değişimleri verilmiştir.

Tablo 7.2: 60, 80, 120 mesh partikül boyutlarındaki aşındırıcıların farklı oranlarda karıştırılmaları ile hazırlanan karışımların 4 bar püskürme basıncında kütlesel debileri

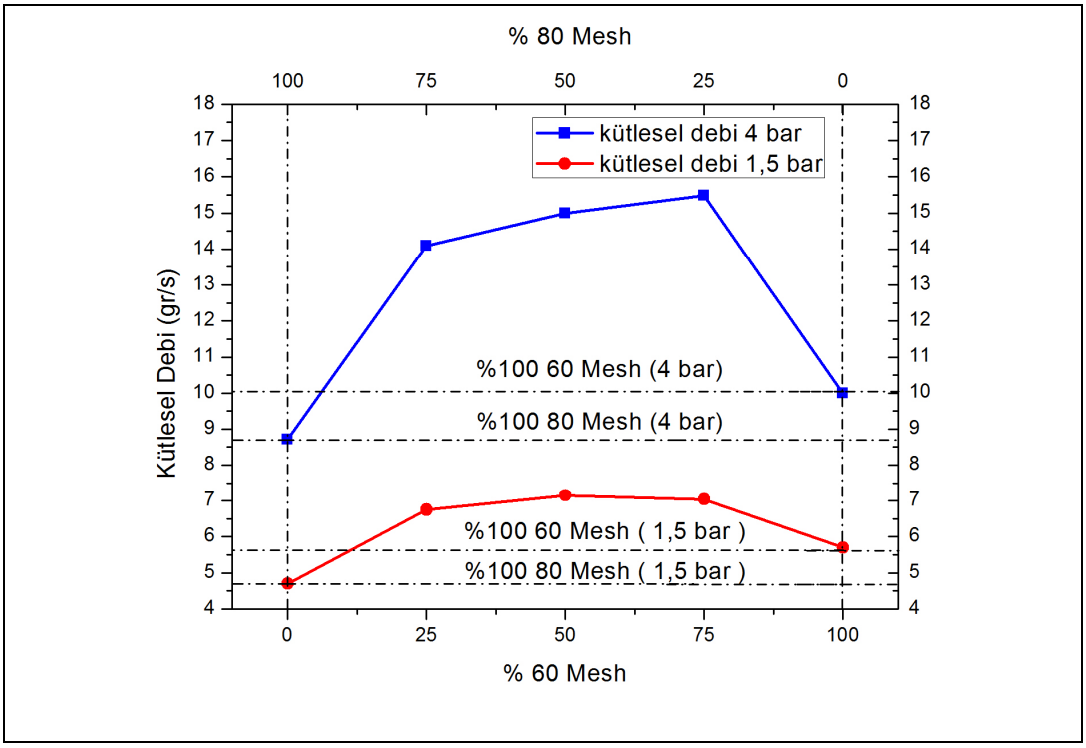
No	Karışım İçeriği (Kütlece %)			Püskürtme Basıncı (Bar)	Süre (s)	Kullanılan Aşındırıcı Miktarı (gr)	Hesaplanan Kütlesel debi (gr/s)
	60 mesh	80 mesh	120 mesh				
1	75	-	25	4	170	2296,68	13,50
2	50	-	50	4	75	1024,95	13,66
3	25	-	75	4	75	957,764	12,74
4	75	25	-	4	75	1161,07	15,48
5	50	50	-	4	75	1124,64	14,99
6	25	75	-	4	75	1056,68	14,09
7	-	75	25	4	75	1002,21	13,36
8	-	50	50	4	75	928,11	13,45
9	-	25	75	4	75	1008,78	12,37

Tablo 7.3: 60, 80, 120 mesh partikül boyutlarındaki aşındırıcıların farklı oranlarda karıştırılmaları ile hazırlanan karışımların 1,5 bar püskürme basıncında kütlesel debileri

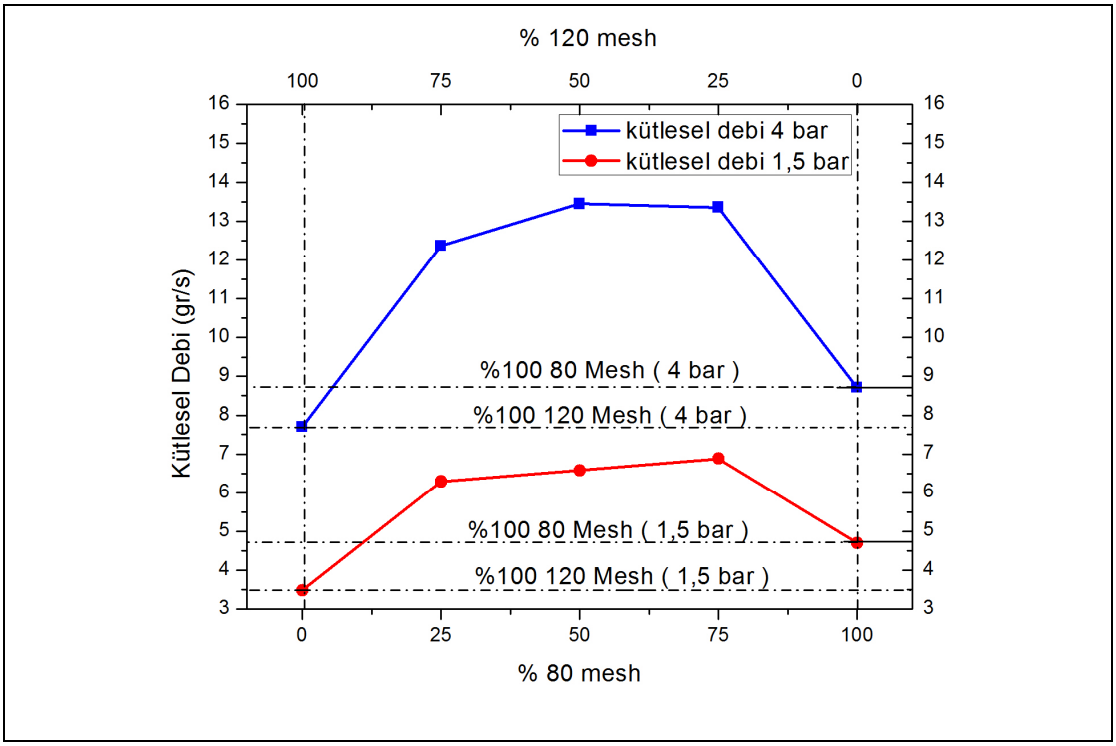
No	Karışım İçeriği (Kütlece %)			Püskürtme Basıncı (Bar)	Süre (s)	Kullanılan Aşındırıcı Miktarı (gr)	Hesaplanan Kütlesel debi (gr/s)
	60 mesh	80 mesh	120 mesh				
1	75	-	25	1,5	30	212,7619	7,09
2	50	-	50	1,5	30	199,8555	6,66
3	25	-	75	1,5	30	186,4650	6,21
4	75	25	-	1,5	30	211,3203	7,04
5	50	50	-	1,5	30	214,7145	7,15
6	25	75	-	1,5	30	202,7160	6,75
7	-	75	25	1,5	30	206,4128	6,88
8	-	50	50	1,5	30	197,5544	6,58
9	-	25	75	1,5	30	188,8693	6,29



Şekil 7.2: 60 mesh – 120 meshlik karışımın kütlesel debisinin karışım konsantrasyonuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 ve 4 bar)



Şekil 7.3: 60 mesh – 80 meshlik karışımın kütlesel debisinin karışım konsantrasyonuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 ve 4 bar)



Şekil 7.4: 80 mesh – 120 meshlik karışımın kütlesel debisinin karışım konsantrasyonuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 ve 4 bar)

Şekil 7.2, 7.3 ve 7.4 incelendiğinde kütlesel debinin püskürtme basıncına bağlı olarak değişim gösterdiği açık bir şekilde görülmektedir. Partikül karışımlarının kütlesel debisi püskürtme basıncındaki artış ile birlikte artmaktadır.

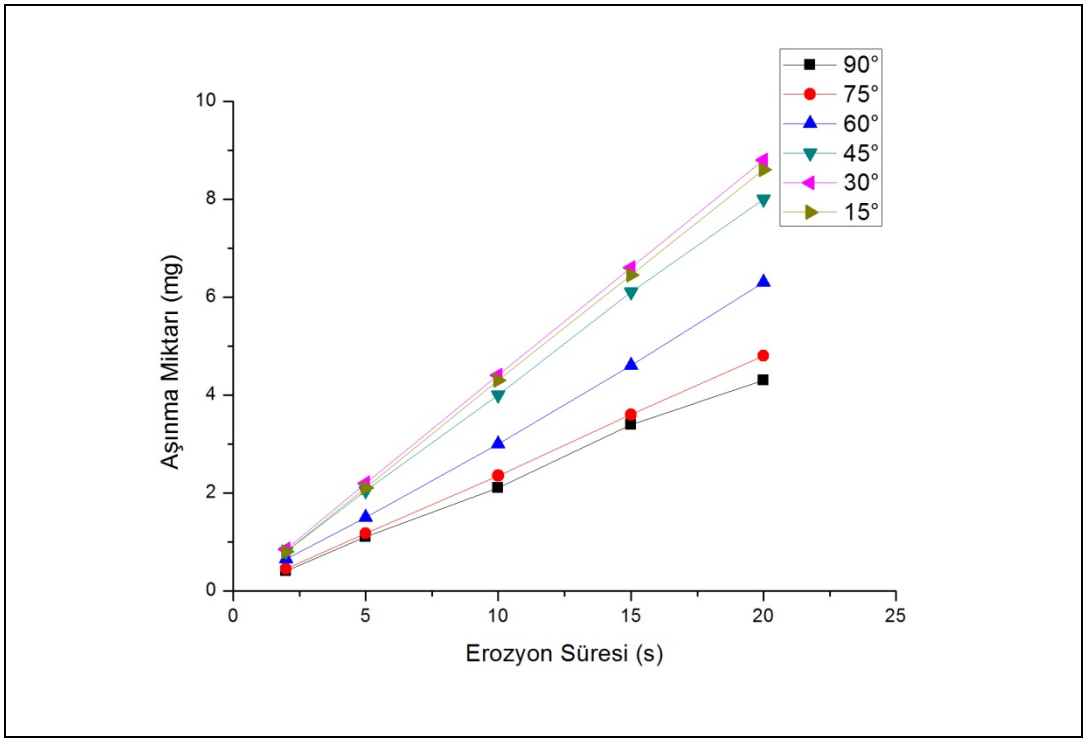
Bu bölümde verilen tablo ve grafikler yorumlanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1. Aşındırıcı partiküllerin ve aşındırıcı partikül karışımlarının kütlesel debileri püskürtme basıncı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.
2. Tek tip aşındırıcılar ile gerçekleştirilen deneylerde aşındırıcı partikül boyutunun artışı ile kütlesel debinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumda kütlesel debinin aşındırıcı partikül boyutu ile de doğru orantılı olarak değiştiği söylenebilir.
3. Aşındırıcı partiküllerin karıştırılması ile hazırlanan partikül karışımlarının kütlesel debileri, tüm basınçlarda ve karışım oranlarında partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumunda elde edilen kütlesel debilerden daha yüksektir.
4. Aşındırıcı partikül karışımlarında, karışım içerisindeki büyük boyuta sahip partikül miktarının arttırılması ile karışımın kütlesel debisi artmaktadır.

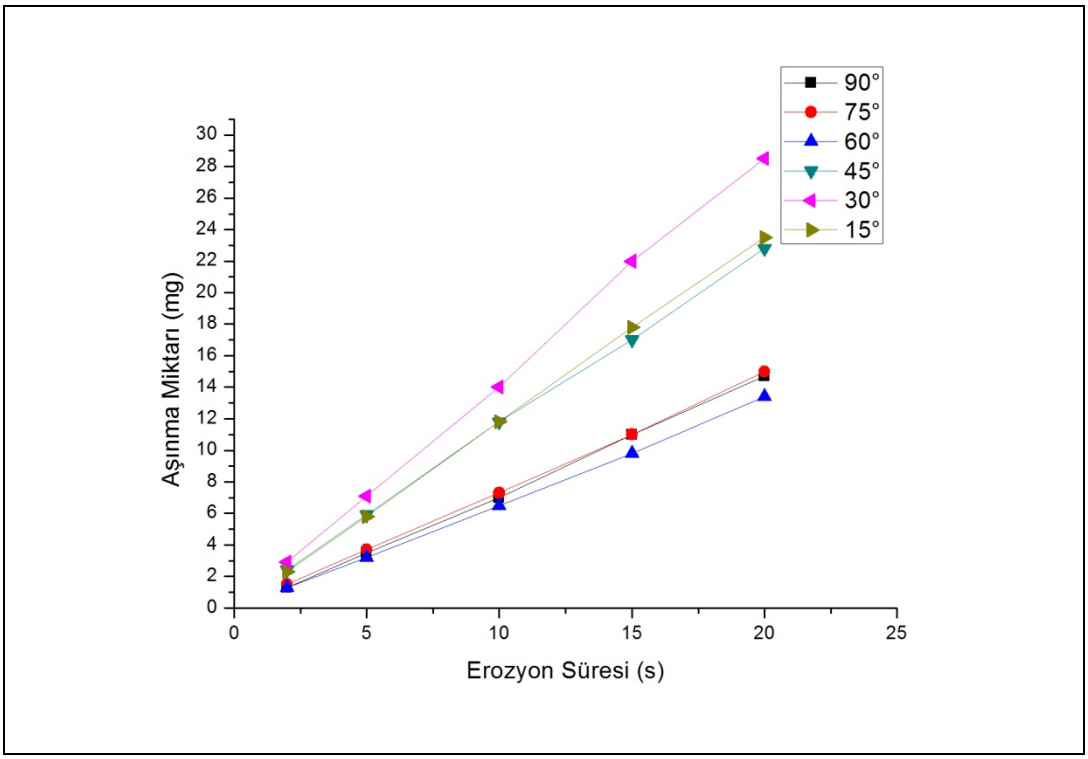
7.2. Katı Partikül Erozyonunun Zamana Bağlı Değişimi

Bu bölümde Ti6Al4V numuneler farklı püskürtme basınçları (1,5 bar, 3 bar ve 4 bar), farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) ve farklı büyüklükteki aşındırıcı partiküller (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) ile farklı sürelerde (2 s, 5 s, 10 s, 15 s ve 20 s) aşındırılmıştır. Şekil 7.5, 7.6 ve 7.7'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller, Şekil 7.8, 7.9 ve 7.10'da 80mesh boyutunda aşındırıcı partiküller, Şekil 7.11, 7.12 ve 7.13'te 120 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile gerçekleştirilen katı partikül erozyonu deneyleri sonuçları verilmiştir.

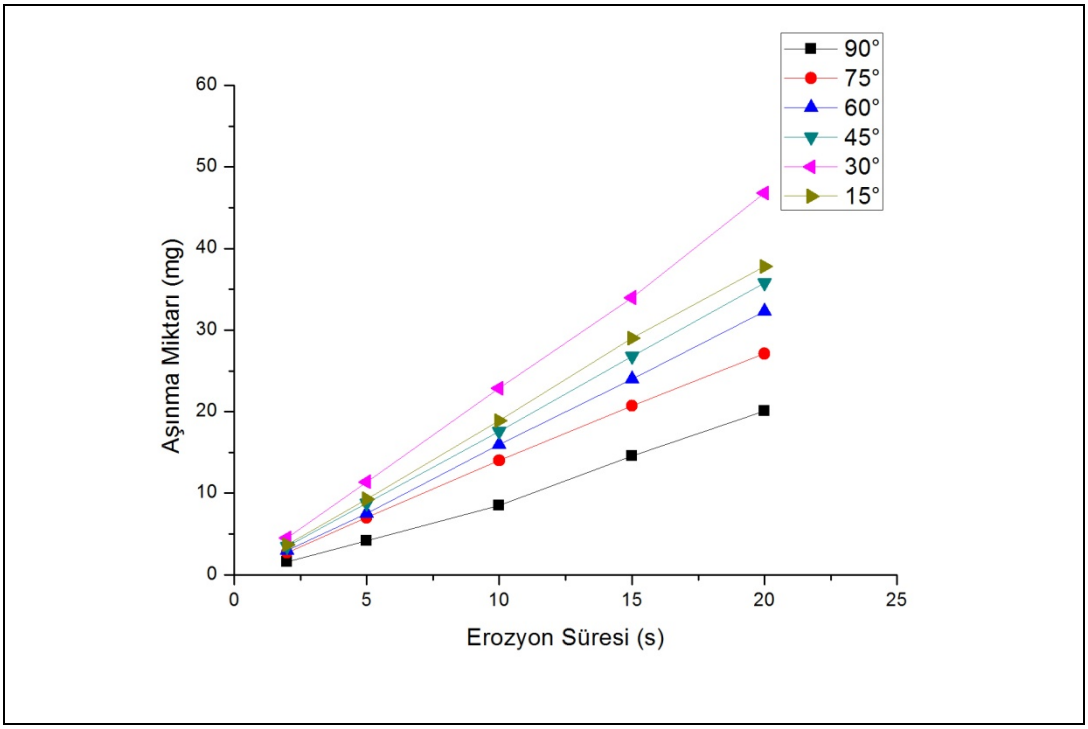
Grafikler incelendiğinde, aşınma sırasında farklı basınçlarda (1,5, 3 ve 4 bar), farklı partikül çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) ve farklı partikül büyüklüklerinde (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) herhangi bir inkübasyon (kuluçka) periyodunun olmadığı, erozyon süresi ile aşınma miktarının deneyin hemen başından itibaren lineer olarak değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlar aşınmanın deneyin hemen başında düzenli tekrarlanan "steady state" rejimine ulaştığını göstermektedir. Deneysel çalışmaların sonraki aşamalarında bu verilerden yararlanılarak, düşük miktardaki aşınmaların hassas bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla aşınma süresi olarak 10 ve 20 saniye seçilmiştir.



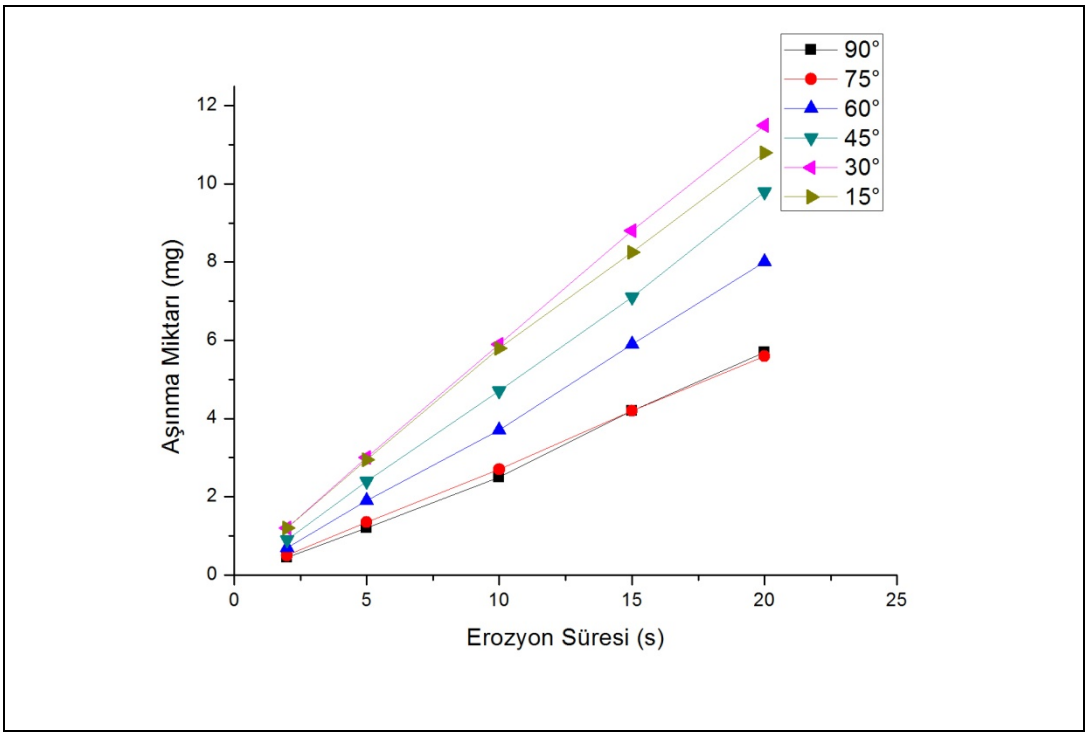
Şekil 7.5: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)



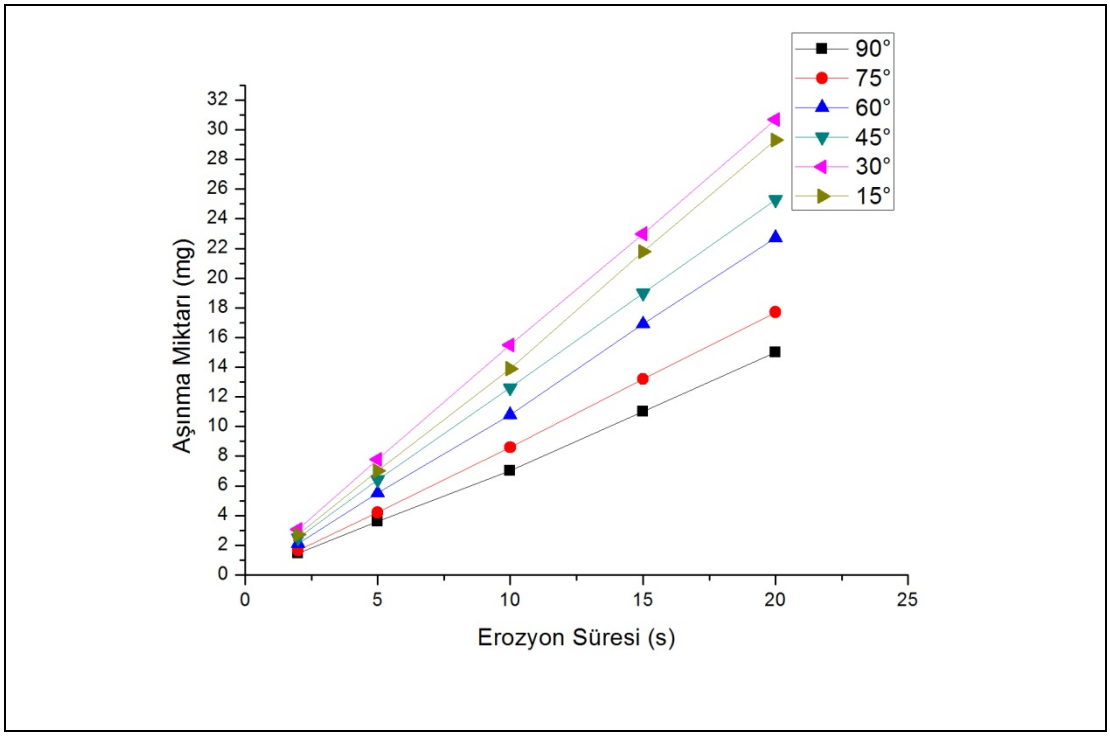
Şekil 7.6: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)



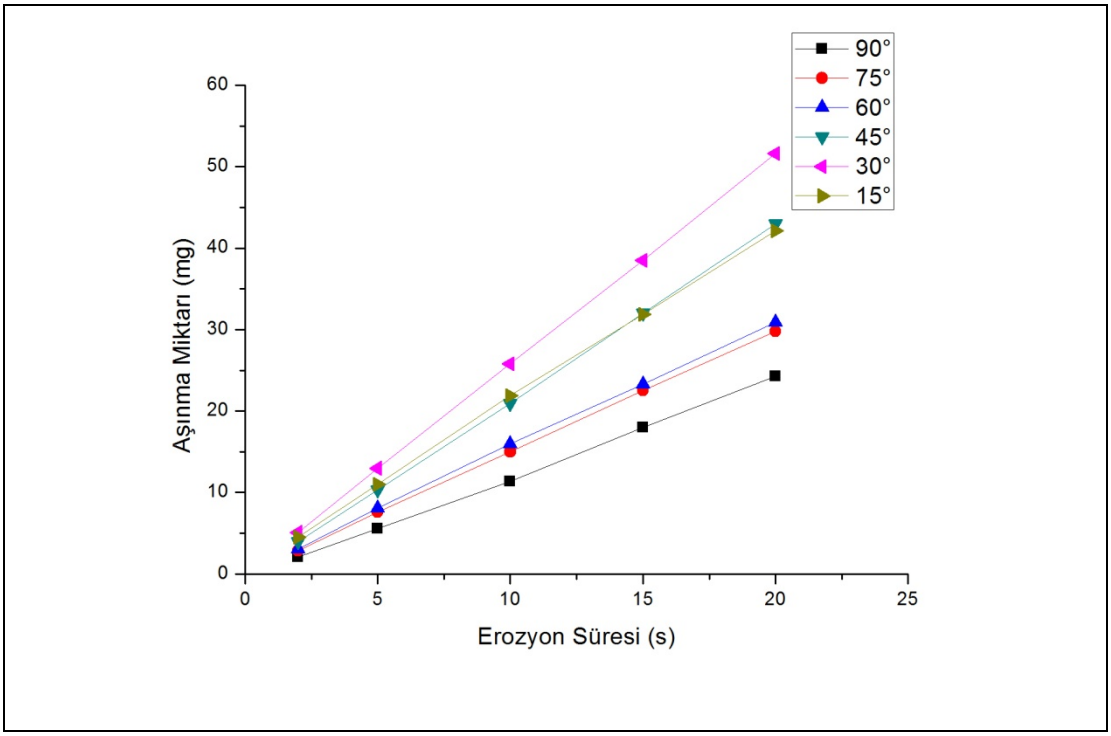
Şekil 7.7: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)



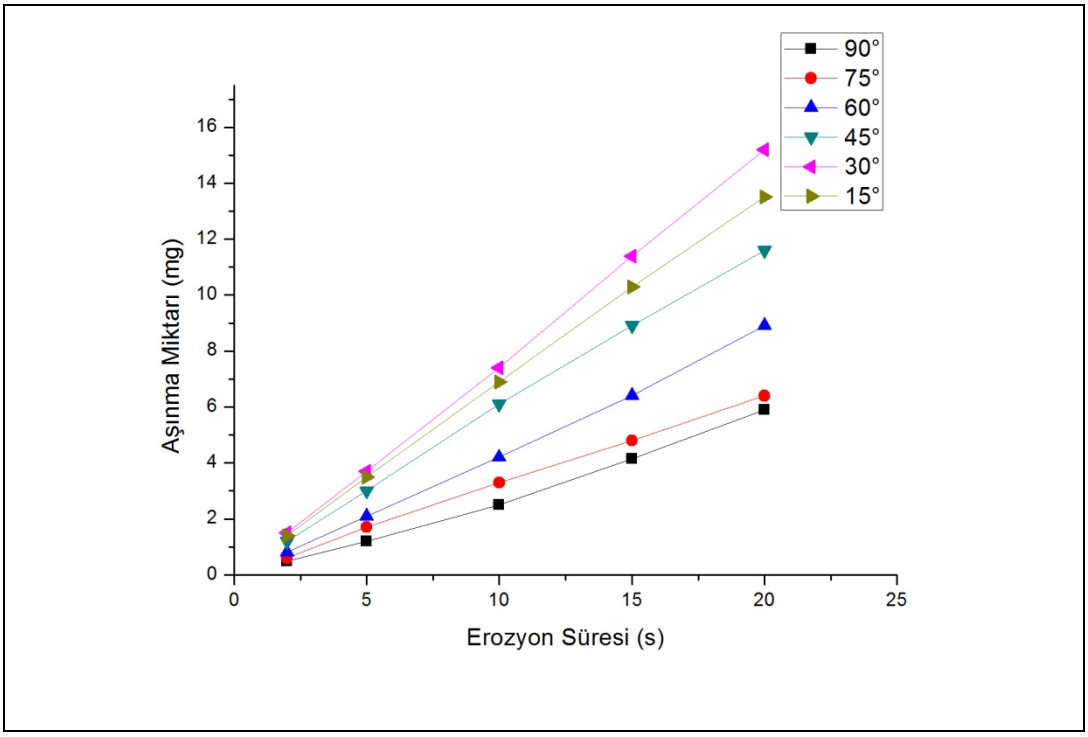
Şekil 7.8: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)



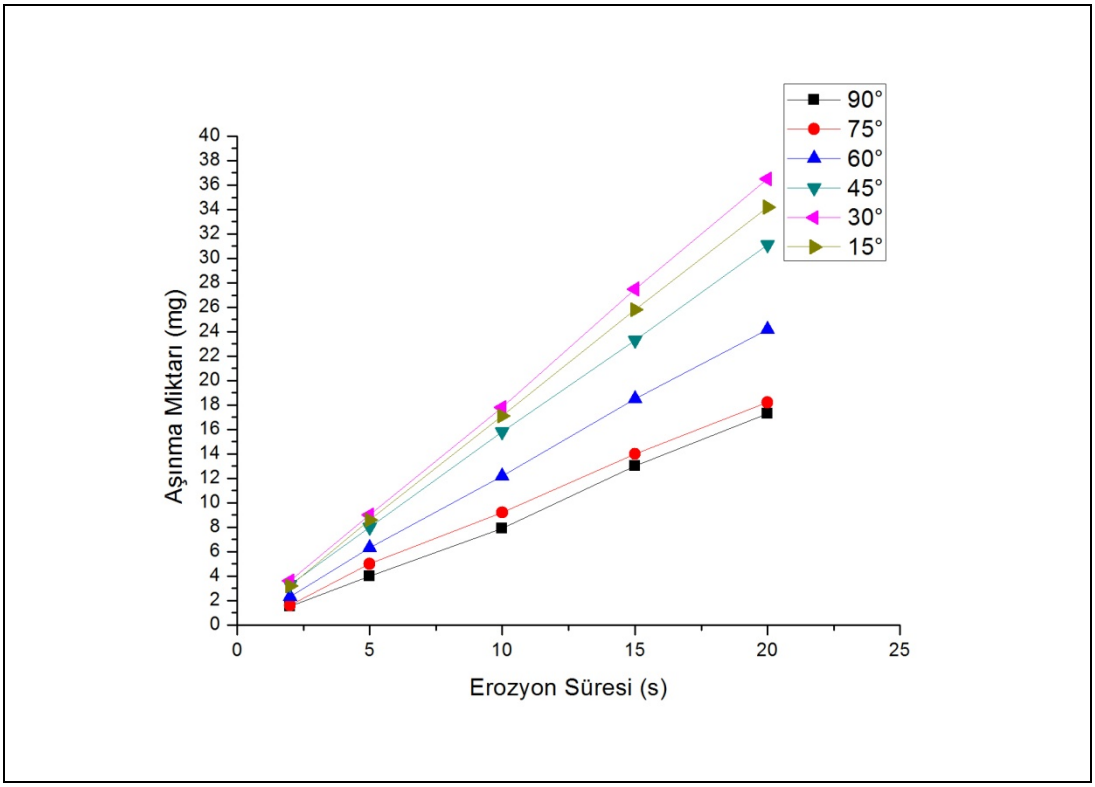
Şekil 7.9: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)



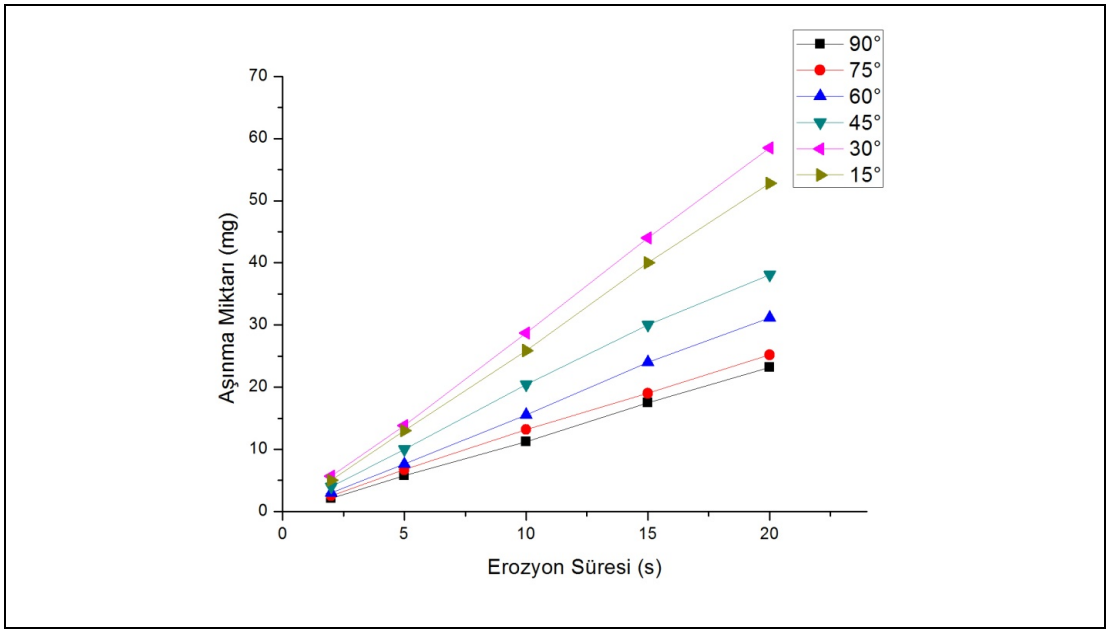
Şekil 7.10: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)



Şekil 7.11: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



Şekil 7.12: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



Şekil 7.13: Erozyon miktarının katı partikül çarpma açısına ve erozyon süresi bağlı olarak değişimi (püskürme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)

7.3. Katı Partikül Erozyonunun Partikül Çarpma Açısına Bağlı Değişimi

Bu bölümde Ti6Al4V malzemenin katı partikül erozyonu davranışının farklı partikül çarpma açılarında değişimi incelenmiştir. Bu amaçla 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutlarında aşındırıcı kumlar kullanılarak farklı basınç ve partikül çarpma açılarında deneyler yapılmıştır. Tüm deneylerde numuneler 20 saniye aşındırılmıştır. Tablo 7.4'te 60 meshlik, Tablo 7.5'te 80 meshlik ve tablo 7.6' da 120 meshlik aşındırıcı partiküller ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçları verilmiştir. Şekil 7.14, 7.15 ve 7.16'da sırasıyla Tablo 7.4, 7.5 ve 7.6'da verilen veriler kullanılarak aşınma miktarının partikül çarpma açısına bağlı değişimi gösterilmiştir.

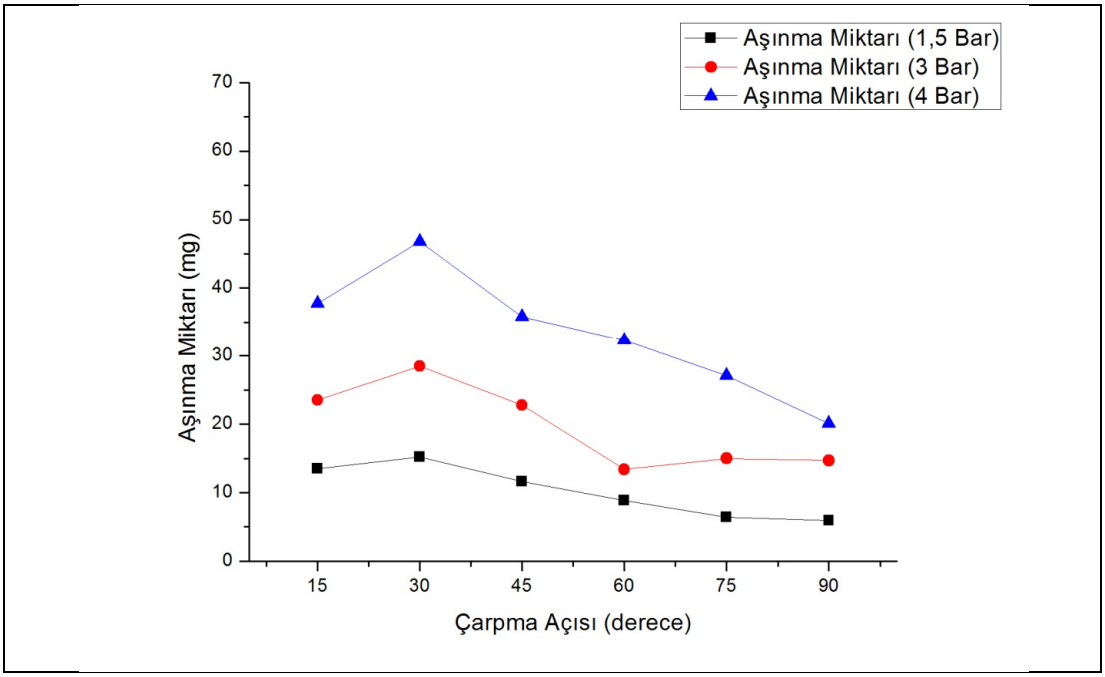
Şekil 7.14'te 60 mesh boyutundaki katı partiküllerin yüzeye çarpma açılarının bir fonksiyonu olarak değişen aşınma miktarları verilmiştir. Grafik incelendiğinde tüm basınç değerlerinde aşınma miktarının katı partikül çarpma açısına bağlı olarak büyük değişim gösterdiği görülmektedir. En yüksek aşınma 30 derecelik çarpma açısında, en düşük aşınma ise 90 derecelik çarpma açısında meydana gelmektedir. Bu durum Ti6Al4V malzemenin sünek karakteri ile açılanabilir. Literatürde de anlatıldığı gibi sünek malzemelerde en fazla malzeme kaybının düşük çarpma açılarında (~30°) ortaya çıktığı bilinmektedir. Bunun nedeni, sert bir malzeme olan alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin düşük çarpma açılarında daha az çarpma, ağırlıklı olarak yatay hız bileşenleri ile malzeme yüzeyini çizerek ve keserek

aşındırmalarıdır. Bu durum 80 ve 120 meshlik alüminyum oksit aşındırıcılar ile gerçekleştirilen deney sonuçlarında da görülmektedir. Tüm deneylerde maksimum aşınmanın düşük çarpma açılarında meydana geldiği ve çarpma açısının büyümesiyle birlikte aşınma miktarının düştüğü görülmektedir. Aşındırıcı partiküllerin yatay hız bileşenlerinin, çarpma açısının büyümesi ile küçüldüğü ve buna bağlı olarak bu durumun ortaya çıktığı söylenebilir.

Tablo ve grafikler incelendiğinde, düşük çarpma açılarında keskin köşeli aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyini, mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları ile yoğun miktarda aşındırdığı söylenebilir. Yüksek çarpma açılarında ise aşındırıcı partiküller hedef malzeme yüzeyini, malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar oluşturarak aşındırmaktadır. Ancak Ti6AL4V malzemenin sünek kırılma karakterinden dolayı, hedef malzemede mikro çatlak mekanizmaları ile yüksek miktarda aşınma gerçekleşmesi mümkün değildir. Tüm bu aşınma mekanizmaları deneysel çalışmaların ilerleyen bölümlerinde taramalı elektron mikroskobu ile aşındırılan malzemelerin yüzey morfolojileri incelenerek yorumlanacaktır.

Tablo 7.4: 60 meshlik aşındırıcı kumlar ile yapılan deneylerin sonuçları

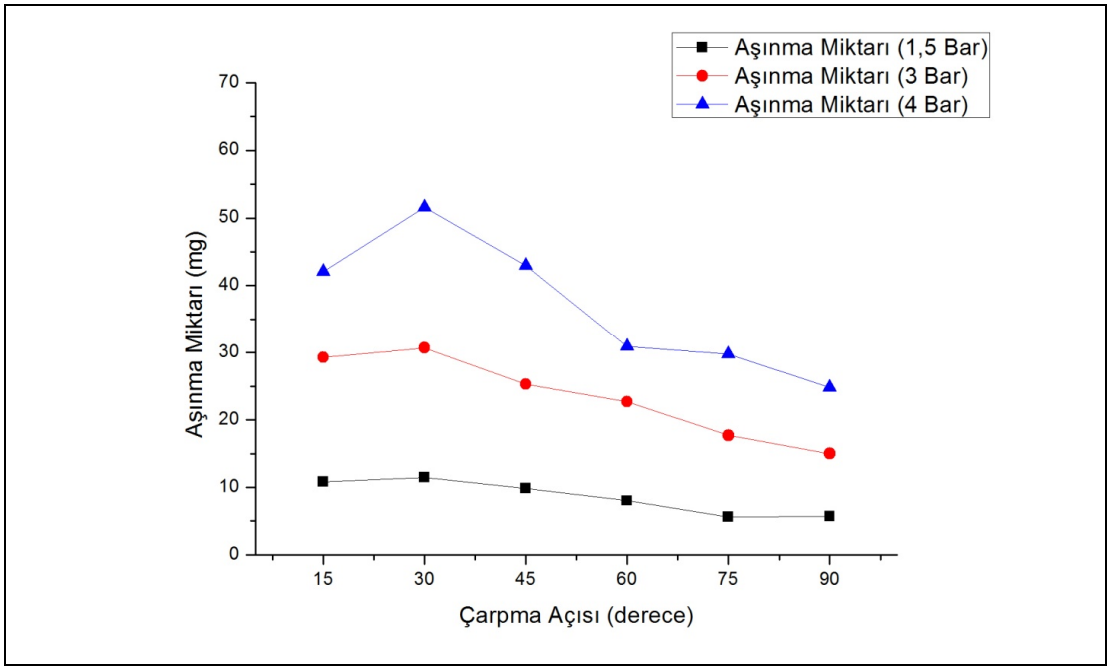
No	Partikül Çarpma Açısı (°)	Basınç (Bar)	Aşınma Miktarı (mg)
1	15	1,5	13,5
2	15	3	23,5
3	15	4	37,8
4	30	1,5	15,2
5	30	3	28,5
6	30	4	46,8
7	45	1,5	11,6
8	45	3	22,8
9	45	4	35,8
10	60	1,5	8,9
11	60	3	13,4
12	60	4	32,3
13	75	1,5	6,4
14	75	3	15
15	75	4	27,1
16	90	1,5	5,9
17	90	3	14,7
18	90	4	20,1



Şekil 7.14: Aşınma miktarının farklı basınçlar altında, partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)

Tablo 7.5: 80 meshlik aşındırıcı kumlar ile yapılan deneylerin sonuçları

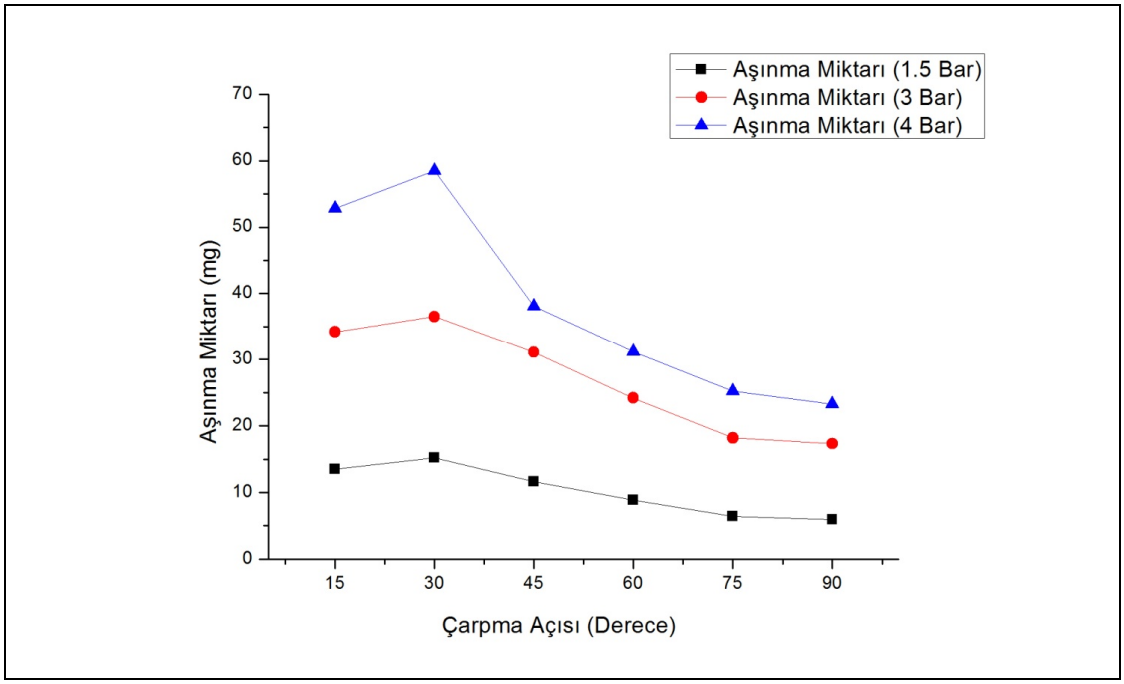
No	Partikül Çarpma Açısı (°)	Basınç (Bar)	Aşınma Miktarı (mg)
1	15	1,5	10,8
2	15	3	29,3
3	15	4	42,1
4	30	1,5	11,5
5	30	3	30,7
6	30	4	51,6
7	45	1,5	9,8
8	45	3	25,3
9	45	4	43
10	60	1,5	8
11	60	3	22,7
12	60	4	30,9
13	75	1,5	5,6
14	75	3	17,7
15	75	4	29,8
16	90	1,5	5,7
17	90	3	15
18	90	4	24,8



Şekil 7.15: Aşınma miktarının farklı basınçlar altında, partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)

Tablo 7.6: 120 meshlik aşındırıcı kumlar ile yapılan deneylerin sonuçları

No	Partikül Çarpma Açısı (°)	Basınç (Bar)	Aşınma Miktarı (mg)
1	15	1,5	13,5
2	15	3	34,2
3	15	4	52,8
4	30	1,5	15,2
5	30	3	36,5
6	30	4	58,5
7	45	1,5	11,6
8	45	3	31,1
9	45	4	38,1
10	60	1,5	8,9
11	60	3	24,2
12	60	4	31,2
13	75	1,5	6,4
14	75	3	18,2
15	75	4	25,2
16	90	1,5	5,9
17	90	3	17,3
18	90	4	23,3



Şekil 7.16: Aşınma miktarının farklı basınçlar altında, partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)

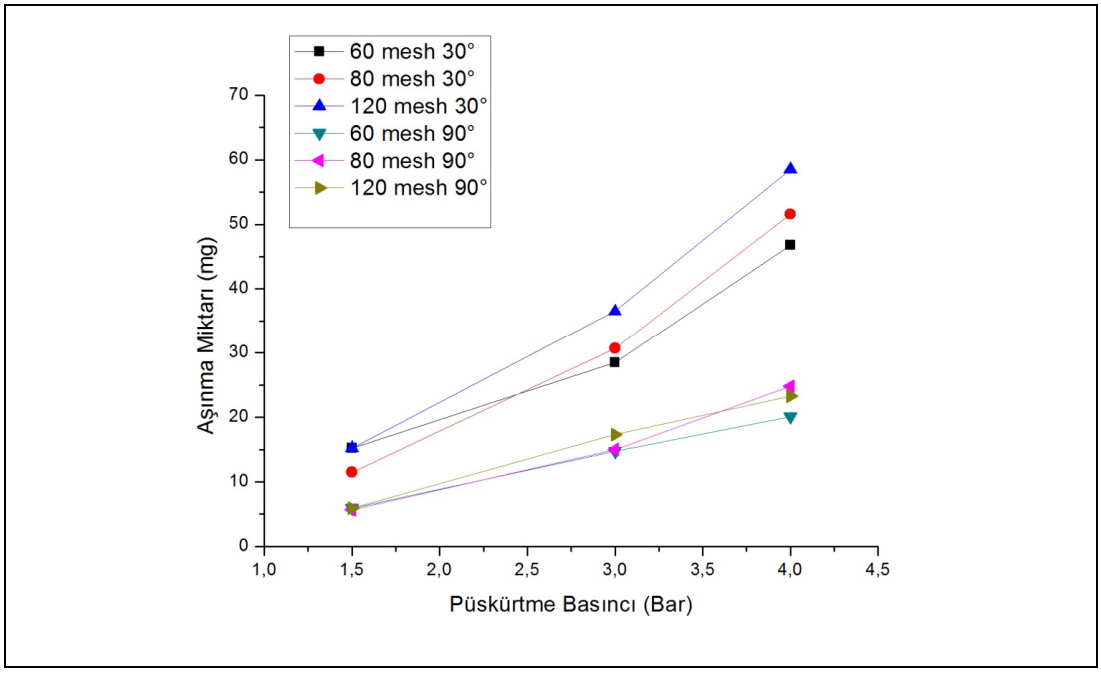
7.4. Katı Partikül Erozyonunun Püskürtme Basıncına Bağlı Değişimi

Bu bölümde Ti6Al4V malzemenin katı partikül erozyonu davranışının farklı püskürtme basınçlarında değişimi incelenmiştir. Bu amaçla 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutlarında aşındırıcı kumlar kullanılarak hedef malzeme 1,5 bar, 3 bar ve 4 bar basınçlarda aşındırılmıştır. Bir önceki bölümde Ti6Al4V malzemede en yüksek aşınmanın 30° çarpma açısında, en düşük aşınmanın ise 90° çarpma açısında görüldüğü belirlenmiştir. Bu bölümde Ti6Al4V malzeme bu sonuçlardan yararlanılarak bu iki çarpma açısında aşındırılmıştır. Tüm deneylerde numuneler 20 saniye aşındırılmıştır.

Tablo 7.7'de yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir. Sonuçlarda tüm partikül boyutlarında ve çarpma açılarında, püskürtme basıncının arttırılmasıyla ile aşınma miktarının arttığı görülmektedir. Bu ilişkinin daha net görülebilmesi için Tablo 7.7'deki veriler kullanılarak Şekil 7.17 çizilmiştir. Şekilde püskürtme basınçlarının bir fonksiyonu olarak değişen aşınma miktarları verilmiştir.

Tablo 7.7:. Aşınma miktarının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi (aşındırma süresi: 20 s)

No	Partikül Çarpma Açısı (°)	Aşındırıcı Partikül Boyutu	Basınç (Bar)	Aşınma Miktarı (mg)
1	30	60	1,5	15,2
2	30	60	3	28,5
3	30	60	4	46,8
4	30	80	1,5	11,5
5	30	80	3	30,7
6	30	80	4	51,6
7	30	120	1,5	15,2
8	30	120	3	36,5
9	30	120	4	58,5
10	90	60	1,5	5,9
11	90	60	3	14,7
12	90	60	4	20,1
13	90	80	1,5	5,7
14	90	80	3	15
15	90	80	4	24,8
16	90	120	1,5	5,9
17	90	120	3	17,3
18	90	120	4	23,3



Şekil 7.17: Katı partikül erozyonunda aşınma miktarının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

Şekil 7.17'de tüm partikül boyutlarında en yüksek aşınmanın, 30° çarpma açısı ve 4 Bar püskürtme basıncı altında meydana geldiği görülmektedir. Sünek bir malzeme olan Ti6Al4V malzemede 30° çarpma açısında en yüksek aşınmanın meydana geldiği bir önceki bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Her bir çarpma açısı ve partikül boyutu için çizilen eğriler incelendiğinde, püskürtme basıncı artışı ile aşınma miktarının artığı görülmektedir. Bu durum püskürtme basıncındaki artış ile birlikte malzeme yüzeyine püskürtülen katı partiküllerin kütlesel debinin artması ile açıklanabilir. Bu artış beraberinde partiküllerin çarpma hızlarında da artış meydana getirmektedir. Böylece malzeme yüzeyine aşınma süresince daha yüksek hız ve momentuma sahip çok sayıda partikül çarpmaktadır. Bu durum malzemenin yüksek basınçlarda düşük basınçlara oranla çok daha fazla aşınmasına neden olmaktadır.

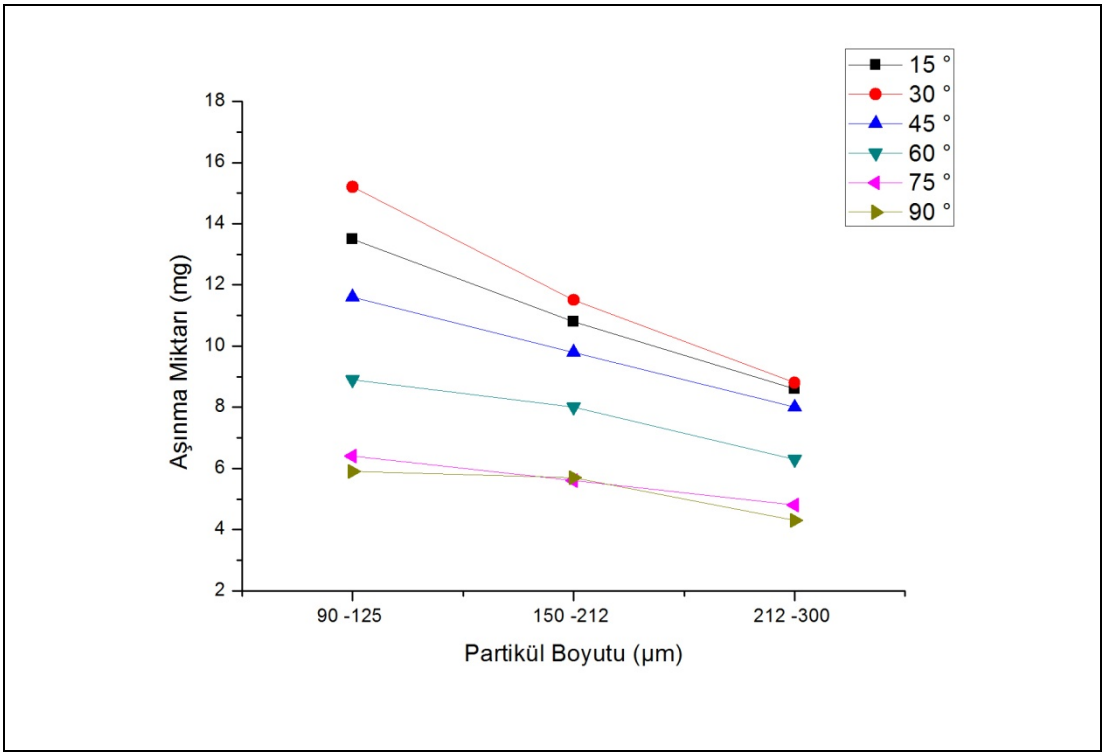
7.5. Katı Partikül Erozyonunun Aşındırıcı Partikül Boyutuna Bağlı Değişimi

Malzeme yüzeyine çarpan partiküllerin boyutu katı partikül erozyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu Bölümde farklı boyutlara sahip aşındırıcıların katı partikül erozyonuna etkileri incelenmiştir. Tablo 7.8'de kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve büyüklükleri verilmiştir. Tez çalışmasının Malzeme ve Yöntem Bölümü' nde bu partiküllerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları da verilmiştir.

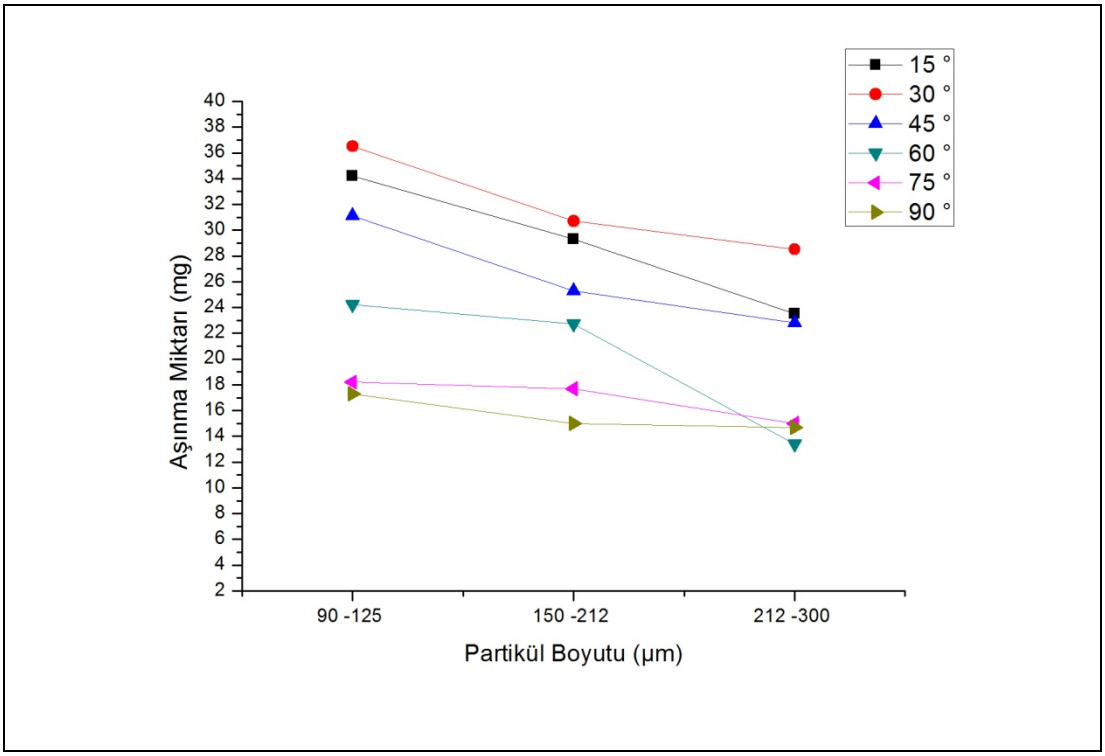
Tablo 7.8: Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları

Aşındırıcı Partikül Adı	Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
Beyaz Alüminyum Oksit F 60	60 mesh / 212 -300 µm
Beyaz Alüminyum Oksit F 80	80 mesh / 150 -212 µm
Beyaz Alüminyum Oksit F 120	120 mesh / 90 -125 µm

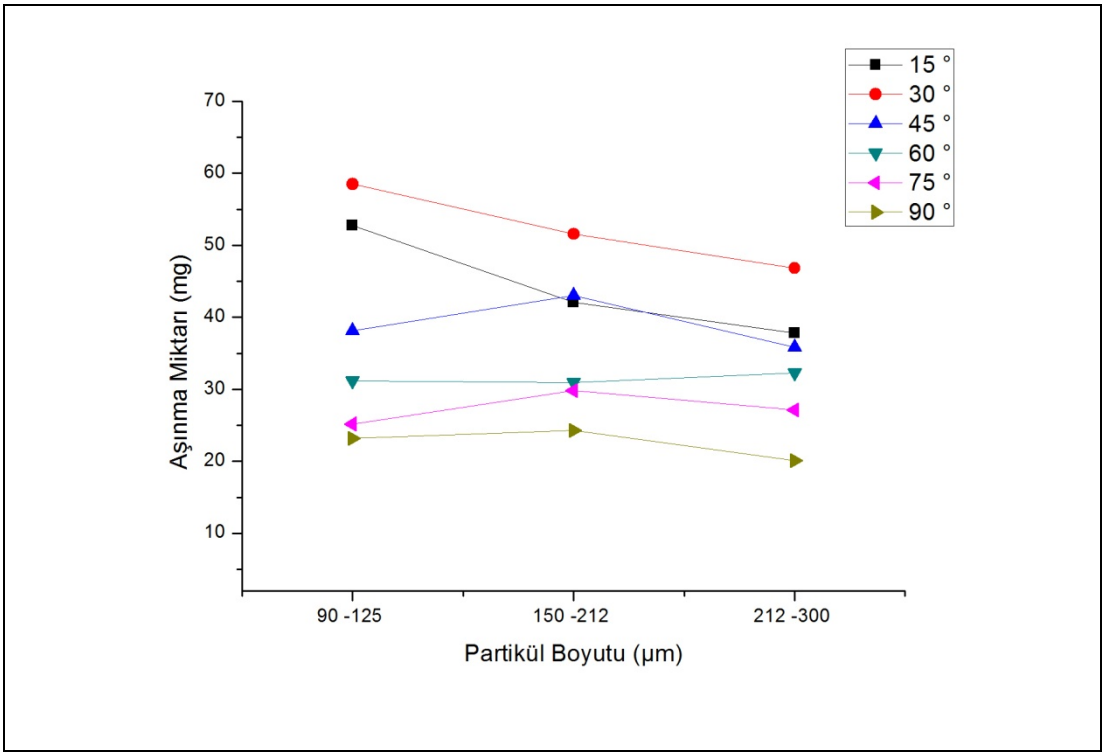
Şekil 7.18, 7.19 ve 7.20'de numunelerin tüm çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) ve basınçlar (1,5 bar, 3 bar ve 4 bar) altında 60, 80 ve 120 meshlik partiküller ile aşındırılması ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçları verilmiştir. Tüm deneylerde numuneler 20 saniye aşındırılmıştır.



Şekil 7.18: Katı partikül erozyonunda aşınma miktarının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 Bar, aşınma süresi: 20 s)



Şekil 7.19: Katı partikül erozyonunda aşınma miktarının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 3 Bar, aşınma süresi: 20 s)



Şekil 7.20: Katı partikül erozyonunda aşınma miktarının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 4 Bar, aşınma süresi: 20 s)

Partikül boyutunun aşınma miktarına etkisi üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu konuda net bir fikir olmadığı görülmektedir. Baz çalışmalarda partikül boyutunun artışına paralel olarak aşınma oranının artış gösterdiği fikri ileri sürülmüştür. Buna karşın bazı çalışmalarda aşınma miktarının katı partikül boyutundan bağımsız olduğu fikrine ulaşılmıştır.

Şekiller incelendiğinde partikül boyutunun aşınma üzerinde etkin olduğu kesin bir şekilde söylenebilir. Tüm basınçlarda Ti6Al4V malzemenin aşınma miktarı aşındırıcı partikül boyutu artışıyla birlikte azalmıştır. Deneysel çalışmalar öncesinde partikül boyutundaki artışın partiküllerin hızlarını ve momentumlarını arttıracağı ve buna paralel olarak aşınma miktarının da artacağı öngörülmüştür. Ancak sonuçlar bu durumun aksini göstermektedir. Bu durum Ti6Al4V malzemede görülen etkin aşınma mekanizmaları ile açıklanabilir. Daha önce de belirtildiği gibi Ti6Al4V malzeme düşük ve yüksek çarpma açılarında, farklı aşınma mekanizmalarının etkisi altında aşınmaktadır. Partikül boyutu artışıyla birlikte aşınma miktarının azalması, büyük partiküllerin bu aşınma mekanizmalarında yeterli aşınmayı gerçekleştiremediklerini göstermektedir. Ancak bu konu üzerine daha net bir sonuca varabilmek için malzemenin yüzey morfolojisini incelemek gerekmektedir. Deneysel çalışmaların

ilerleyen bölümlerinde bu konu taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları ile tekrar ele alınacaktır.

7.6. Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Katı Partikül Erozyonuna Etkileri

Deneysel çalışmalarda bu bölüme kadar, Ti6Al4V malzemenin katı partikül erozyonu davranışı üç farklı büyüklükteki aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı kullanılmalarıyla karakterize edilmiştir. Ancak uygulamada Ti6Al4V malzemenin aşınmasının farklı boyutta partiküllerden oluşan aşındırıcı partikül karışımlarının etkisi altında gerçekleşeceği açıktır. Buna karşın katı partikül erozyonu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların tümünde tek boyutta partiküllerin kullanıldığı görülmektedir. Bu bölümde 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh partikül boyutlarındaki aşındırıcılar birbirleri içerisinde farklı oranlarda karıştırılmış ve bu şekilde 9 farklı aşındırıcı partikül karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımlar ile gerçekleştirilen deneyler sonrasında aşındırıcı partikül karışımlarının katı partikül erozyonu üzerindeki etkinliği araştırılmış ve literatürde bu konu ile ilgili boşluk doldurulmaya çalışılmıştır. Tablo 7.9'da hazırlanan katı partikül karışımları verilmiştir.

Tablo 7.9: Katı partikül karışımları

No	Karışım İçeriği (ağırlıkça %)		
	60 mesh	80 mesh	120 mesh
1	75	-	25
2	50	-	50
3	25	-	75
4	75	25	-
5	50	50	-
6	25	75	-
7	-	75	25
8	-	50	25
9	-	25	75

Tek boyutta partiküller ile yapılan deneyler sonrasında Ti6Al4V malzemede en yüksek aşınmanın 4 bar püskürtme basıncı ve 30 derecelik çarpma açısında gerçekleştiği görülmüştür. Bu bilgilerin ışığında bu bölümde numuneler ilk aşamada bu parametreler kullanılarak yukarıdaki tabloda verilen 9 farklı partikül karışımı ile aşındırılmıştır. Daha sonrasında aynı çarpma açısında 1,5 bar püskürtme basıncı ile deneyler tekrarlanmıştır. Tüm deneylerde numuneler 20 saniye aşındırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda bu bölümüne kadar Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu, malzemede oluşan aşınma miktarları baz alınarak karakterize edilmiştir. Bu deneylerde partiküllerin tek başlarına kullanıldıkları düşünüldüğünde bu yaklaşımın doğru olduğu söylenebilir. Buna karşın partikül karışımlarının katı partikül erozyonu üzerindeki etkisinin incelenmesi aşamasında aşınma miktarlarının doğrudan kullanılması kısmen doğru bir yaklaşımdır. Bunun nedeni deneysel çalışmaların ilk bölümünde verilen partiküller ve partikül karışımlarının kütlesel debi değerleri incelendiğinde görülmektedir. Bölüm 7.1'de de belirtildiği gibi partiküllerin karıştırılmaları durumunda kütlesel debileri bireysel kullanılmalarına kıyasla büyük bir artış göstermektedir. Bu durumda hedef malzeme yüzeyine birim zamanda çok daha fazla partikül çarpmakta ve böylece partikül karışımlarının kütlesel debileri aşınma miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle bu bölümde partikül karışımlarının etkileri irdelenirken elde edilen aşınma miktarları kullanılan karışımların kütlesel debisine bölünmüş ve karışımların aşınma oranları elde edilmiştir. Bu şekilde kütlesel debinin aşınma üzerindeki etkisi elemine edilerek daha sağlıklı bir değerlendirme yapılmıştır. Tüm tablolarda partikül ve partikül karışımlarının kütlesel debilerine de yer verilmiştir.

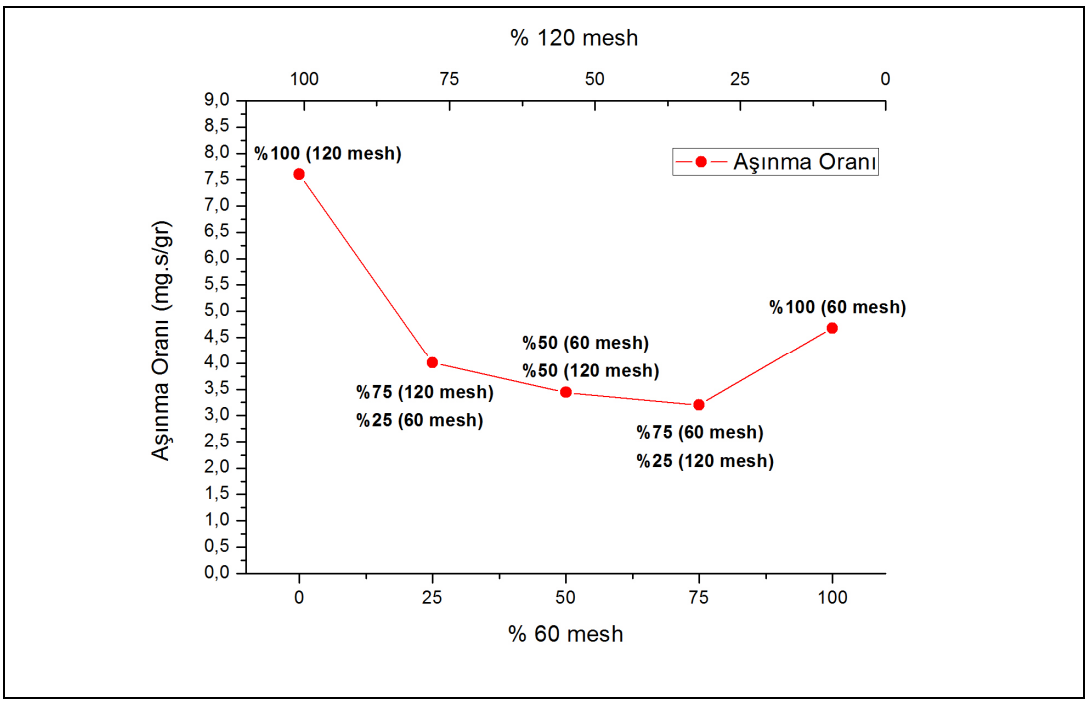
Tablo 7.10'da 60 ve 120 meshlik partiküller içeren karışımlar ile 4 bar püskürtme basıncında yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir.

Tablo 7.10: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller ile hazırlanan karışımların katı partikül erozyon deneyi sonuçları (deney süresi: 20 s)

Karışım İçeriği (Kütlece %)			**Kütlesel Debi (gr/s)**	**Çarpma Açısı (°)**	**Püskürtme Basıncı (Bar)**	**Aşınma Oranı (mg.s/gr)**
60 mesh	**80 mesh**	**120 mesh**				
75	-	25	13,50	30	4	3,20
50	-	50	13,66	30	4	3,44
25	-	75	12,74	30	4	4,01
100	-	-	9,99	30	4	4,68
-	-	100	7,70	30	4	7,60

Aşınma oranının karışım içeriğine göre değişimi Şekil 7.21' de verilmiştir. Tablo 7.10 ve Şekil 7.21'de karşılaştırma yapılabilmesi için 60 mesh ve 120 mesh boyutundaki partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumunda elde edilen aşınma oranları da verilmiştir. Karışım içeriğinin etkisinin daha rahat yorumlanabilmesi

amacıyla bu bölümde grafiklerin hazırlanırken her iki partikülün oransal değişimini gösteren iki adet x ekseni çizilmiştir. Üst eksende karışım içerisindeki küçük partikül boyutlu aşındırıcı miktarının değişimi, alt eksen de ise büyük partikül boyutlu aşındırıcı miktarının değişimi verilmiştir.



Şekil 7.21: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımlar için, aşınma oranının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s)

Tablo 7.10 ve Şekil 7.21'de karışım içeriğinin katı partikül erozyonu üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Karışım içerisindeki 120 mesh boyutuna sahip aşındırıcı miktarının azalması ile aşınma oranının azaldığı görülmektedir. En düşük aşınma % 75 oranında 60 meshlik partiküller içeren karışımda gerçekleşmiştir. Tüm karışımların aşınma oranı 120 meshlik partiküllerin tek başlarına kullanılmaları ile elde edilen aşınma oranından düşüktür. Bu durumda partikül karışımlarının aşınma performansının partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumuna göre düşük oldukları söylenebilir.

Tablo 7.10 ve Şekil 7.21 deneysel çalışmalar neticesine elde edilen aşınma oranları ile hazırlanmıştır. Karışımlar ile ilgili deneysel çalışmalar öncesinde aşınma oranının teorik olarak da hesaplanabileceği düşünülmüştür. % 100 büyük partikülün aşınma oranı ve % 100 küçük partikülün aşınma oranı biliniyor ise, bu iki partikülün aşınma oranları ile karışım içerisindeki kütlesel oranları çarpılarak teorik bir aşınma oranı elde edilebilir. Tablo 7.11'de bu şekilde hesaplanan aşınma oranları ile deneysel

sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 7.22'de ise bu veriler ile çizilen grafik verilmiştir.

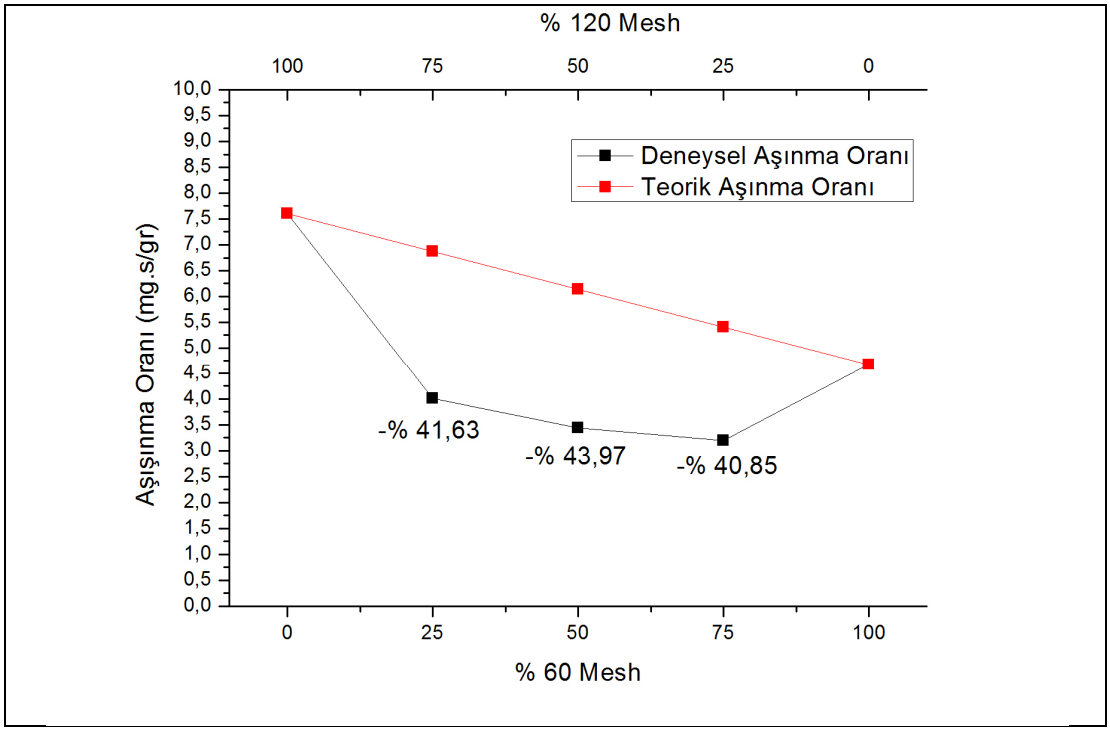
Tablo 7.11 ve Şekil 7.22'de, teorik olarak hesaplanan aşınma oranları ile deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen aşınma oranlarının farklılık gösterdiği görülmektedir. Tüm karışımlar için deneysel aşınma oranı teorik aşınma oranından daha düşüktür. Partiküllerin karıştırılarak püskürtülmesi durumunda, partiküllerin hedef malzemeye çarpmadan önce birbirleri ile etkileşim içinde olduğu, teorik ve deneysel aşınma oranları arasındaki farkın bu etkileşimlerin neticesinde oluştuğu düşünülebilir. İki farklı büyüklüğe sahip partiküllerin karıştırılmaları sonrasında, aşınma işlemi sırasında bu partiküllerin birbirleri ile etkileşime girdikleri ve bu etkileşimin aşınma oranını azalttığı sonucuna varılabilir.

Tabloda ve grafikte teorik ve deneysel aşınma oranları arasındaki yüzde değişim miktarları da verilmiştir. Tüm karışımlarda deneysel aşınma oranlarının hesaplanan aşınma oranlarından yaklaşık olarak % 40 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Aşınma oranlarındaki bu azalmanın partikül karışımlarının hedef malzemeye çarpmadan önce birbirleri ile çarpışarak enerjilerinin bir kısmını kaybetmeleri sonucunda meydana geldiği düşünülebilir.

Bu bölüm içerisinde bundan sonra verilen tablolarda ve grafiklerde, her bir karışımın deneysel ve teorik aşınma oranları ile bu aşınma oranları arasındaki yüzde değişim miktarları verilmiştir.

Tablo 7.11: 60 – 120 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması (püskürtme basıncı: 4 bar, çarpma açısı: 30°)

Karışım İçeriği (Kütlece %)			**Kütlesel Debi (gr/s)**	**Teorik Aşınma Oranı (T) (mg.s/gr)**	**Deneysel Aşınma Oranı (D) (mg.s/gr)**	**Yüzde Değişim $\frac{(T-D)x100}{T}$ (%)**
60 mesh	**80 mesh**	**120 mesh**				
75	-	25	13,50	5,41	3,20	-40,85
50	-	50	13,66	6,14	3,44	-43,97
25	-	75	12,74	6,87	4,01	-41,63
100	-	-	9,99	4,68	4,68	0
-	-	100	7,70	7,60	7,60	0

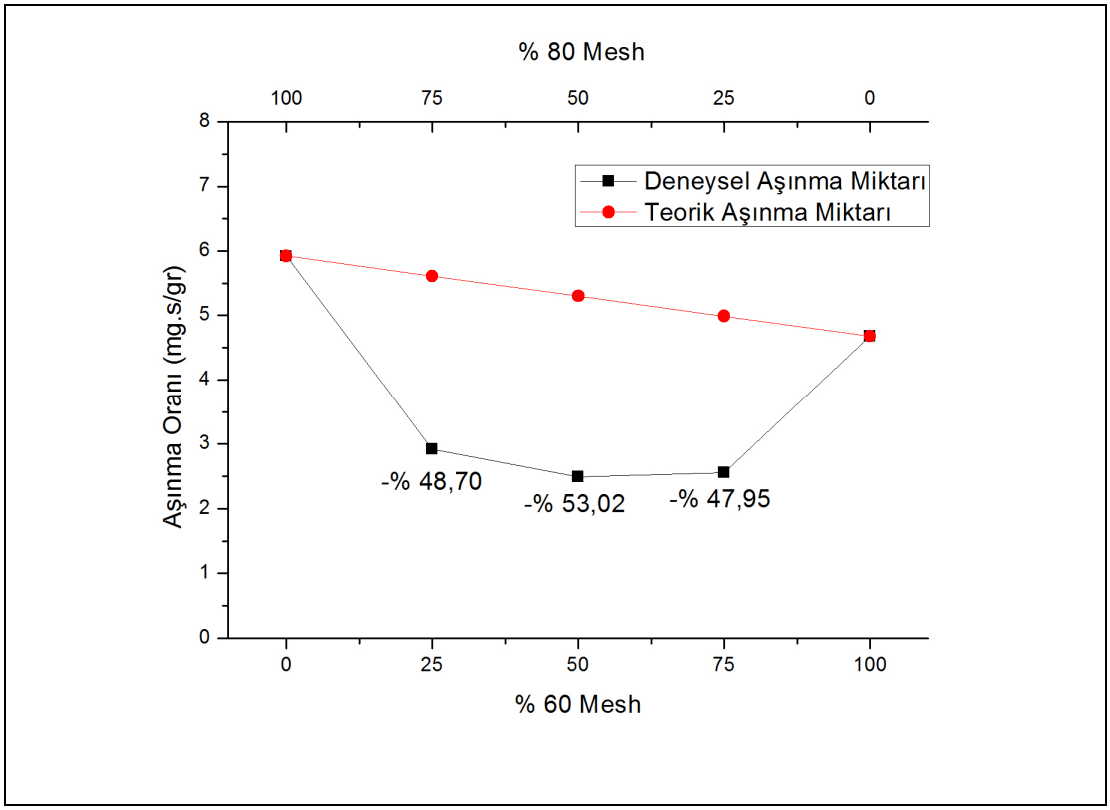


Şekil 7.22: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s)

Tablo 7.2'de 60 ve 80 meshlik partiküller içeren karışımlar ile 4 bar püskürtme basıncında yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir. Tablodaki veriler kullanılarak Şekil 7.23'te verilen grafik çizilmiştir.

Tablo 7.12: 60 – 80 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması (püskürtme basıncı: 4 bar, çarpma açısı: 30°)

Karışım İçeriği (Kütlece %)			**Kütlesel Debi (gr/s)**	**Teorik Aşınma Oranı (T) (mg.s/gr)**	**Deneysel Aşınma Oranı (D) (mg.s/gr)**	**Yüzde Değişim $\frac{(T-D)x100}{T}$ (%)**
60 mesh	**80 mesh**	**120 mesh**				
75	25	-	15,48	4,99	2,56	-47,95
50	50	-	14,99	5,30	2,49	-53,02
25	75	-	14,09	5,61	2,92	-48,70
100	-	-	9,99	4,68	4,68	0
-	100	-	8,71	5,92	5,92	0



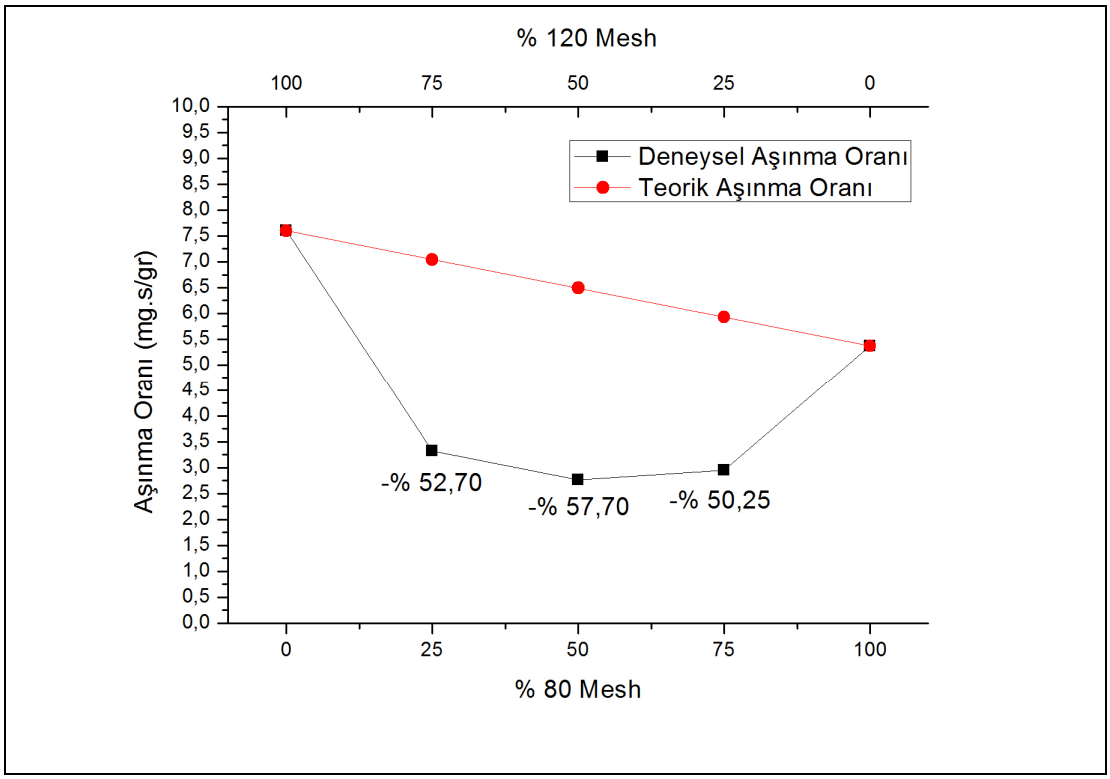
Şekil 7.23: 60 – 80 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s)

60 – 80 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların katı partikül erozyonu davranışlarının 60 – 120 mesh partiküller içeren karışımın davranışlarına benzer olduğu görülmektedir. Tüm karışımlarda aşınma oranı partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumuna kıyasla düşüktür. Karışım içerisinde daha küçük partikül boyutuna sahip olan 80 meshlik aşındırıcı miktarının azalması ile aşınma oranı azalmıştır.

Tablo 7.13'te 80 ve 120 meshlik partiküller içeren karışımlar ile 4 bar püskürtme basıncında yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir. Tablodaki veriler kullanılarak Şekil 7.24'te verilen grafik çizilmiştir.

Tablo 7.13: 80 – 120 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması (püskürtme basıncı: 4 bar, çarpma açısı: 30°)

Karışım İçeriği (Kütlece %)			Kütlesel Debi (gr/s)	Teorik Aşınma Oranı (T) (mg.s/gr)	Deneysel Aşınma Oranı (D) (mg.s/gr)	Yüzde Değişim $\frac{(T-D)x100}{T}$ (%)
60 mesh	80 mesh	120 mesh				
-	75	25	13,36	5,93	2,96	-50,25
-	50	50	13,45	6,49	2,77	-57,70
-	25	75	12,37	7,04	3,33	-52,70
-	100	-	8,71	5,37	5,37	0
-	-	100	7,70	7,60	7,60	0



Şekil 7.24: 80 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s)

Tablo 7.13 ve Şekil 7.24 incelendiğinde 80 – 120 mesh partiküllerden oluşan karışımın aşınma davranışının 60 – 120 mesh ve 60 – 80 mesh partiküllerden oluşan karışımların aşınma davranışına benzer olduğu görülmektedir. Bu karışımlar için çıkarılan tüm sonuçlar bu karışım için de geçerlidir.

4 bar püskürtme basıncı ve 30 ° çarpma açısında partikül karışımları ile gerçekleştirilen deneylerin analizleri sonrasında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

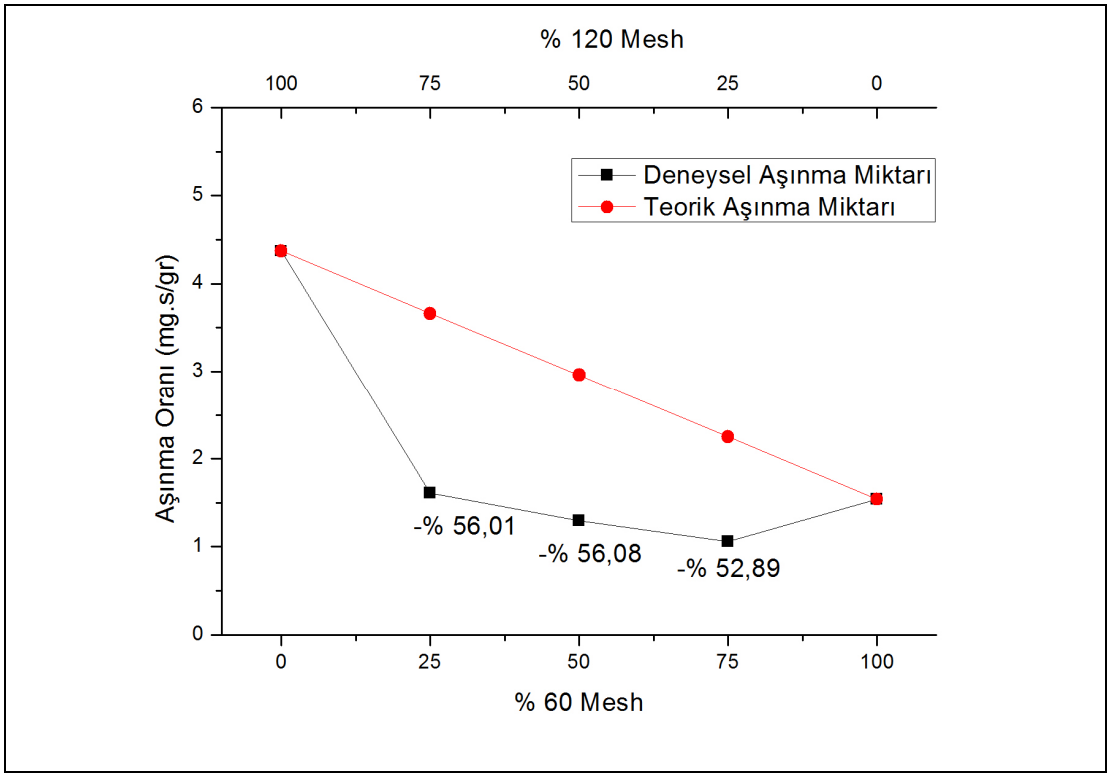
- Farklı boyutlarda partiküller ile hazırlanan karışımlar Ti6Al4V malzemeyi karışım içerisindeki partiküllerin tek başlarına kullanılmalarına nazaran daha az aşındırmaktadırlar.
- Karışım içerisindeki küçük partikül oranının artması ya da diğer bir deyişle karışım içerisinde daha yüksek aşınmaya sebep olan partikül oranının artması karışımın aşınma performansının arttırmaktadır.
- Deneysel çalışmalar öncesinde hesaplanan teorik aşınma oranları ile deneysel aşınma oranları büyük farklılıklar içermektedir. Tüm karışımlarda ve içeriklerde deneysel aşınma oranı teorik aşınma oranından daha düşüktür.

Yukarıda çıkarılan sonuçların tekrarlanabilir olduğunun ispatı ve karışımların etkisinin daha geniş kapsamlı incelenebilmesi amacıyla 1.5 bar püskürtme basıncı ve 30 derecelik çarpma açısında tüm deneyler tekrarlanmıştır. Aşağıda 60 – 120 meshlik partikül karışımı ile bu parametreler altında yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir.

Tablo 7.14: 60 – 120 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması (püskürtme basıncı: 1,5 bar, çarpma açısı: 30°)

Karışım İçeriği (Kütlece %)			**Kütlesel Debi (gr/s)**	**Teorik Aşınma Oranı (T) (mg.s/gr)**	**Deneysel Aşınma Oranı (D) (mg.s/gr)**	**Yüzde Değişim $\frac{(T-D)x100}{T}$ (%)**
60 mesh	**80 mesh**	**120 mesh**				
75	-	25	7,09	2,25	1,06	-52,89
50	-	50	6,66	2,96	1,56	-56,08
25	-	75	6,21	3,66	1,30	-56,01
100	-	-	5,70	1,54	1,54	0
-	-	100	3,48	4,37	4,37	0

Tablo ve şekil incelendiğinde 4 bar püskürtme basıncı ile benzer sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir. 60 ve 120 mesh partiküllerden oluşan karışımda deneysel aşınma oranları teorik aşınma oranlarından daha düşüktür. Karışım içerisindeki 120 meshlik partikül miktarının artmasıyla aşınma oranı da artmıştır. Ancak karışımları içersinde en yüksek aşınma partiküllerin eşit miktarlarda karıştırılmaları ile elde edilmiştir. Bu noktada aşınma oranı 4 bar basınçtaki aşınma oranlarına göre değişim göstermiştir.

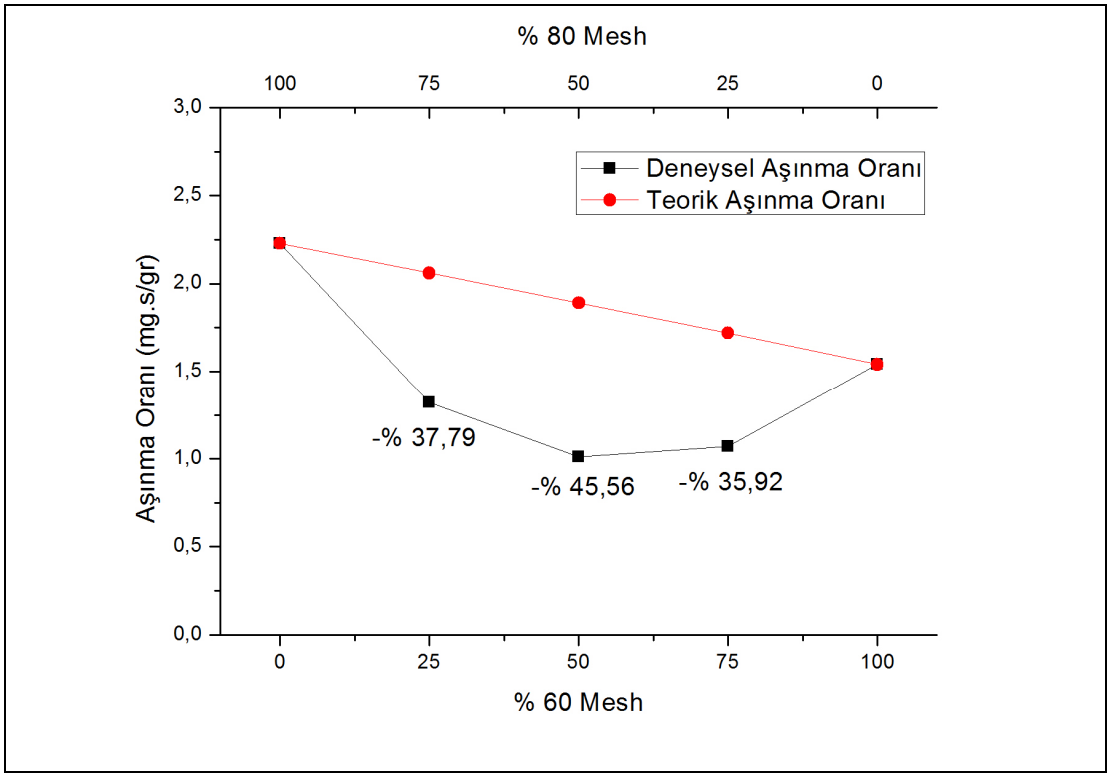


Şekil 7.25: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 1,5 bar, aşınma süresi: 20 s)

Tablo 7.15 ve Şekil 7.26'da 60 ve 80 meshlik partiküller içeren karışımların deney sonuçları verilmiştir. Aynı sonuçları bu karışımlar için de geçerlidir. Tüm gerçek aşınma oranları teorik aşınma oranlarından düşüktür. Partiküllerinin aşınma esnasında birbirleri ile etkileşim içinde oldukları ve bu etkileşimin partiküllerin aşınma oranlarının azalttığı söylenebilir.

Tablo 7.15: 60 – 80 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması (püskürtme basıncı: 1,5 bar, çarpma açısı: 30°)

Karışım İçeriği (Kütlece %)			**Kütlesel Debi (g/s)**	**Teorik Aşınma Oranı (T) (mg.s/gr)**	**Deneysel Aşınma Oranı (D) (mg.s/gr)**	**Yüzde Değişim $\frac{(T-D)x100}{T}$ (%)**
60 mesh	**80 mesh**	**120 mesh**				
75	25	-	7,04	1,72	1,07	-35,92
50	50	-	7,15	1,89	1,01	-45,56
25	75	-	6,75	2,06	1,32	-37,79
100	-	-	5,70	1,54	1,54	0
-	100	-	4,70	2,23	2,23	0

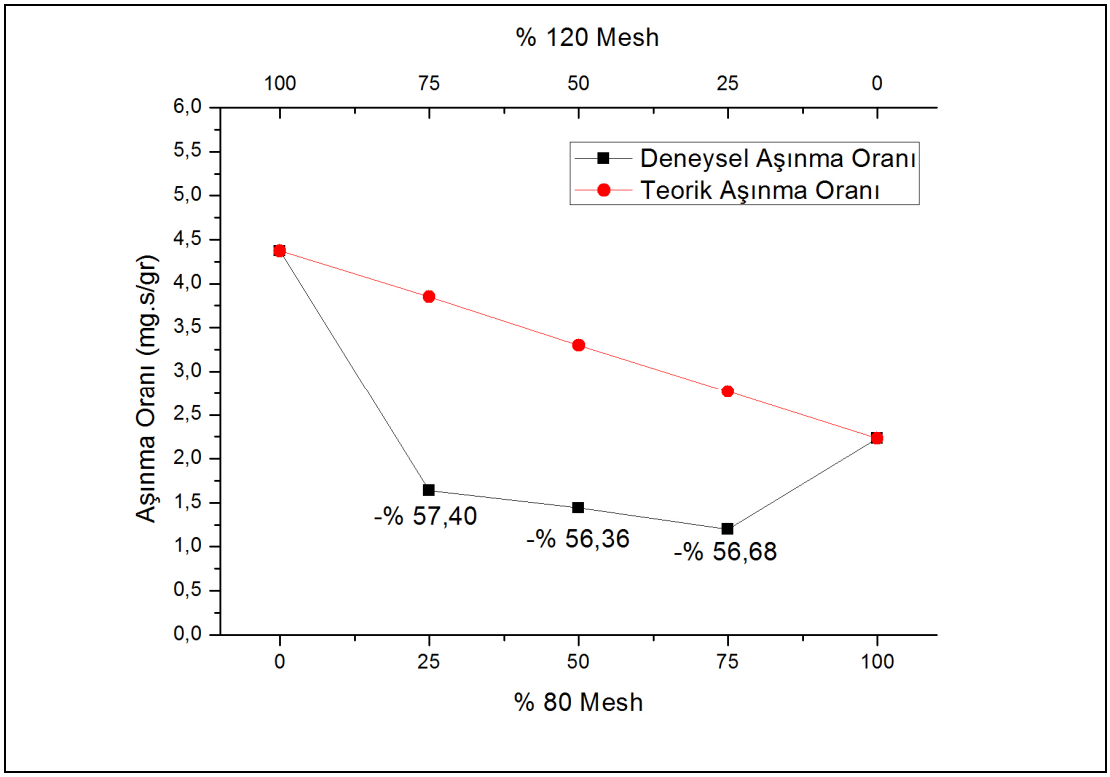


Şekil 7.26: 60 – 80 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 1,5 bar, aşınma süresi: 20 s)

Tablo 7.16 ve Şekil 7.27'de 80 ve 120 meshlik partiküller içeren karışımların deneysel sonuçları verilmiştir. Diğer sonuçlara benzer şekilde partiküllerin farklı oranlarda karıştırılarak püskürtülmeleri durumunda daha düşük miktarda aşınma meydana gelmektedir. Deneysel aşınma oranı bu karışımlar için de teorik aşınma oranının altındadır.

Tablo 7.16: 80 – 120 meshlik partikül içeren karışımlarda teorik ve deneysel aşınma oranları karşılaştırması (püskürtme basıncı: 1,5 bar, çarpma açısı: 30°)

Karışım İçeriği (Kütlece %)			**Kütlesel Debi (g/s)**	**Teorik Aşınma Oranı (T) (mg.s/gr)**	**Deneysel Aşınma Oranı (D) (mg.s/gr)**	**Yüzde Değişim $\frac{(T-D)x100}{T}$ (%)**
60 mesh	**80 mesh**	**120 mesh**				
-	75	25	6,88	2,77	1,20	-56,08
-	50	50	6,58	3,30	1,44	-56,36
-	25	75	6,29	3,85	1,64	-57,40
-	100	-	4,70	2,23	2,23	0
-	-	100	3,48	4,37	4,37	0



Şekil 7.27: 80 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma oranlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 1,5 bar, aşınma süresi: 20 s)

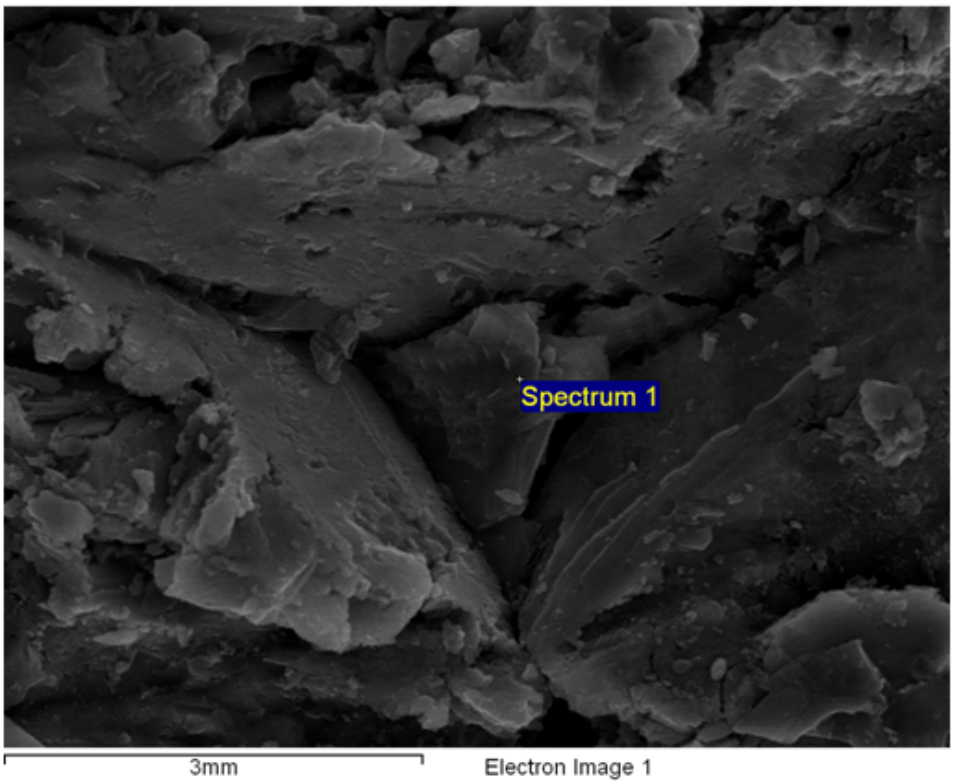
1,5 ve 4 bar püskürtme basıncı ve 30 ° çarpma açısı altında gerçekleştirilen deneyler ile aşındırıcı partikül karışımların aşınma karakteristikleri ile ilgili şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Farklı boyutlardaki iki partikülün karıştırılmaları ile elde edilen aşınma oranları, bu partiküllerin tek başlarına gerçekleştirdikleri aşınma oranlarından daha düşüktür.
- Gerçek aşınma oranları, deneysel çalışmalar öncesinde hesaplanan teorik aşınma oranlarının altındadır.
- Karışımlar içerisindeki partiküllerin, hedef malzemeye çarpmadan önce ve çarpışma sırasında birbirleri ile etkileşim içinde oldukları söylenebilir. Bu etkileşim sonucunda partiküllerin enerji ve hızlarının bir bölümünü kaybettikleri ve bu yüzden daha düşük aşınma gerçekleştirdikleri düşünülebilir. Karışımların daha düşük aşınma göstermesi ve gerçek aşınma oranının teorik aşınma oranından düşük olması bu sonuca bağlanabilir.
- Son olarak karışım içerisindeki küçük boyuta sahip partikül oranının artması ya da diğer bir deyişle karışım içerisinde daha yüksek aşınmaya sebep olan partikül oranının artması birçok karışımda aşınma oranını arttırmıştır.

7.7. Elementsel Analizler

Bu bölümde farklı parametreler altında aşındırılmış Ti6Al4V numunelerin elementsel analizlerine yer verilmiştir. Elementsel analizler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile alınmıştır. Bölüm içerisinde farklı parametreler altında aşındırılmış numunelerin elementsel analizleri SEM fotoğraflarıyla birlikte verilmiştir. Numunelerin SEM fotoğrafları elementsel analizi yapılan bölge ile ilgili fikir sahibi olunması amacıyla verilmiştir. SEM fotoğraflarının yorumları morfolojik analizler bölümünde yapılacaktır.

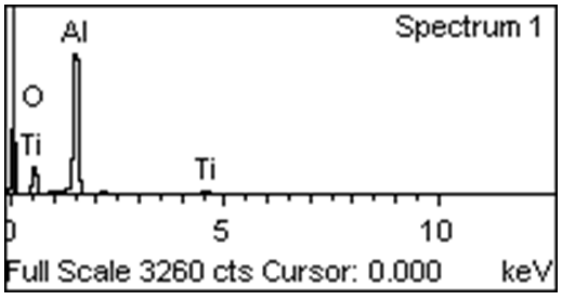
Şekil 7.28'de 4 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında, 60 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile 20 saniye aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 7.28: Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 4 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi: 20 s)

Fotoğrafta spektrum 1 ile işaretlenen bölgenin Ti6A4V matrisine saplanmış bir aşındırıcı partikül olduğu düşünülmüştür. Bu amaçla SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 ile gösterilen noktanın EDS analizi yapılmıştır. Şekil 7.29'da bu noktanın

EDS spektrumu, Tablo 7.17'de ise EDS analizi ile elde edilen elementsel analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.29: SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

Tablo 7.17: Spektrum 1 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları

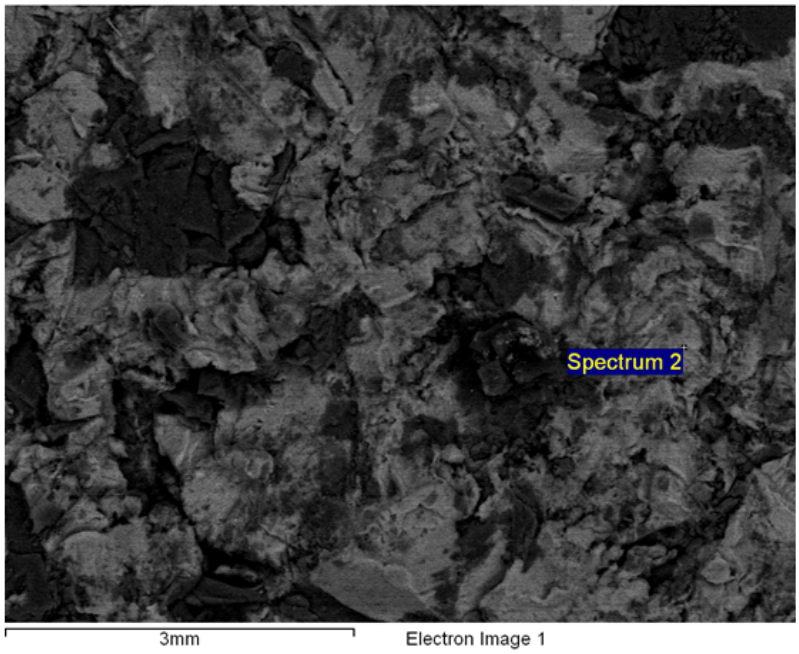
Element	Kütlesel %	Atomik %
Oksijen (O)	42,07	55,81
Alüminyum (Al)	53,89	42,40
Titanyum (Ti)	4,05	1,76
Toplam	100	100

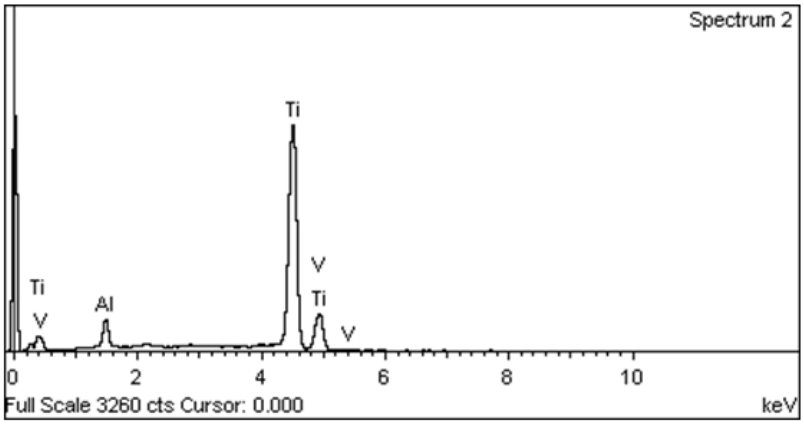
EDS spektrumu ve elementsel analiz sonuçları incelendiğinde, bu bölgede ağırlıklı olarak alüminyum ve oksijen elementlerinin varlığından söz edilebilir. Aşındırıcı partikül olarak alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanıldığı düşünülürse, SEM fotoğrafında görülen yapının numune yüzeyine saplanmış bir alüminyum oksit partikülü olduğu anlaşılmaktadır.

Morfolojik çalışmalar esnasında aşındırılmış numunelerin yüzeylerindeki fazların anlaşılabilmesi amacıyla çok sayıda EDS analizi yapılmıştır. Bu bölüm içerisinde bu analizlerin bir bölümüne yer verilecektir. Analizlerde verilen SEM fotoğrafları, daha önce de belirtildiği gibi morfolojik incelemeler bölümünde detaylı bir şekilde yorumlanacaktır. Bu noktadan sonra EDS analizleri; incelenen numunenin aşınma parametrelerini (püskürtme basıncı, çarpma açısı, aşındırıcı partikül boyutu ve aşınma süresi), SEM fotoğrafını, EDS spektrumunu, elementsel analiz sonuçlarını ve yorumunu içeren tablolarda verilecektir.

Tablo 7.18: Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış yüzeyin EDS analizi

Deney Parametreleri	Püskürtme Basıncı (Bar)	Çarpma Açısı (°)	Aşındırıcı Partikül Boyutu (Mesh)	Aşınma Süresi (s)
	4	90	60	20



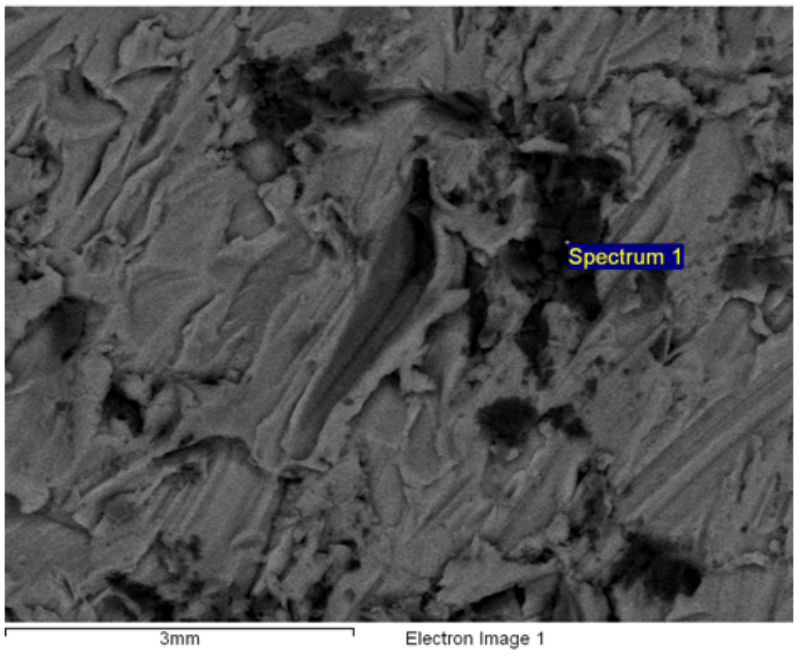


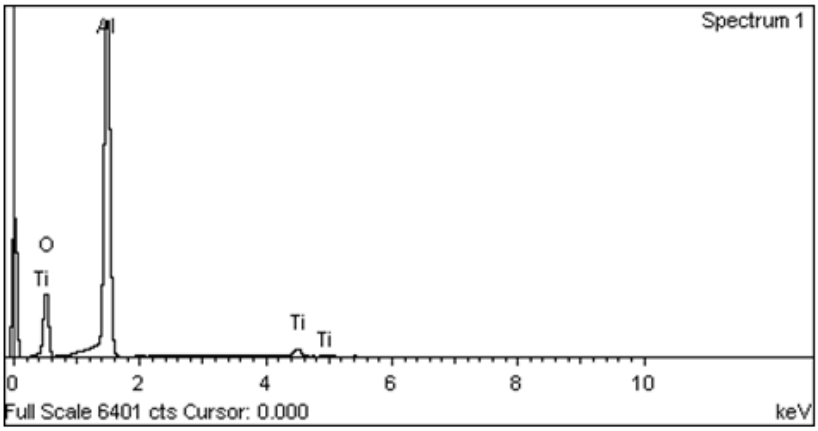
Element	Kütlesel %	Atomik %
Alüminyum (Al)	5,51	9,40
Titanyum (Ti)	91,04	87,48
Vanadyum (V)	3,45	3,12

Açıklama: SEM fotoğrafında spektrum 2 ile gösterilen açık gri renkli fazın EDS analizi alınmıştır. Resimde bu fazın yapının geneline hakim olduğu görülmektedir. Yukarıdaki analiz sonuçlarına göre bu faz % 91,04 titanyum, % 5,51 alüminyum ve % 3,45 vanadyum içermektedir. Bu sonuçlara göre bu fazın Ti6AL4V alaşımı olduğu söylenebilir.

Tablo 7.19: Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış yüzeyin EDS analizi

Deney Parametreleri	Püskürtme Basıncı (Bar)	Çarpma Açısı (°)	Aşındırıcı Partikül Boyutu (Mesh)	Aşınma Süresi (s)
	4	15	120	20



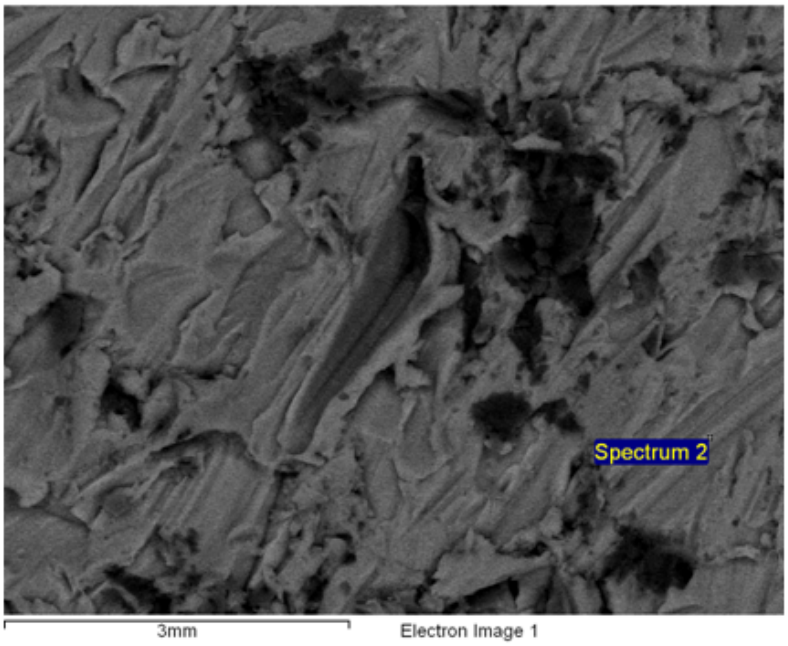


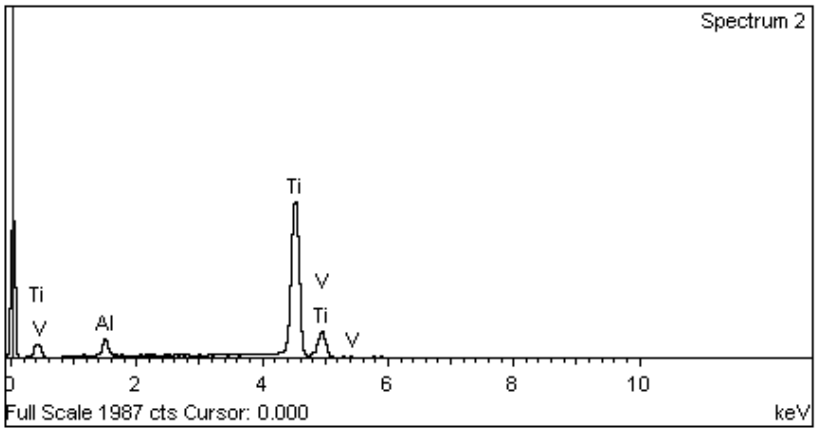
Element	Kütlesel %	Atomik %
Oksijen (O)	41,95	55,55
Alüminyum (Al)	54,76	43,00
Titanyum (Ti)	3,29	1,46

Açıklama : Fotoğrafta spektrum 1 ile gösterilen siyah renkli bölgenin EDS analizi gerçekleştirilmiştir. EDS analizi sonuçları bu yapının yüksek oranda alüminyum ve oksijen içerdiğini göstermektedir. Bu sonuçlara göre bu yapının numune yüzeyine saplanmış alüminyum oksit partikülü olduğu söylenebilir.

Tablo 7.20: Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış yüzeyin EDS analizi

Deney Parametreleri	Püskürtme Basıncı (Bar)	Çarpma Açısı (°)	Aşındırıcı Partikül Boyutu (Mesh)	Aşınma Süresi(s)
	4	15	120	20





Element	Kütlesel %	Atomik %
Alüminyum (Al)	5,24	8,96
Titanyum (Ti)	91,51	88,10
Vanadyum (V)	3,24	2,94

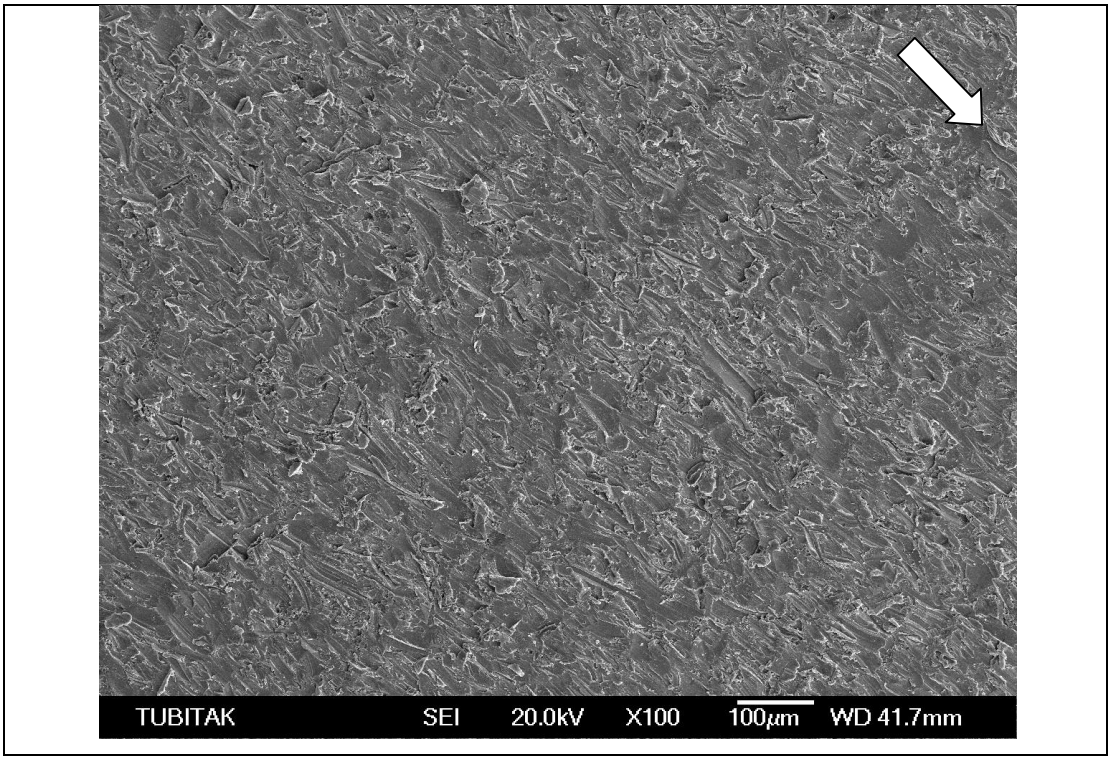
Açıklama : Fotoğrafta spektrum 2 ile gösterilen açık gri renkli fazın EDS analizi yapılmıştır. Bir önceki tabloda fotoğrafta siyah renkte görülen fazların alüminyum oksit partikülleri olduğu belirlenmiştir. Bu durumda EDS analizi yapılacak olan açık gri renkli fazın Ti6Al4V alaşımı olduğu düşünülmektedir. EDS analizi sonrasında yapının % 91,51 Ti, % 5,24 Al ve % 3,24 V içerdiği görülmüş ve bu fazın Ti6Al4V alaşımı olduğu sonucuna varılmıştır.

7.8. Morfolojik Analizler

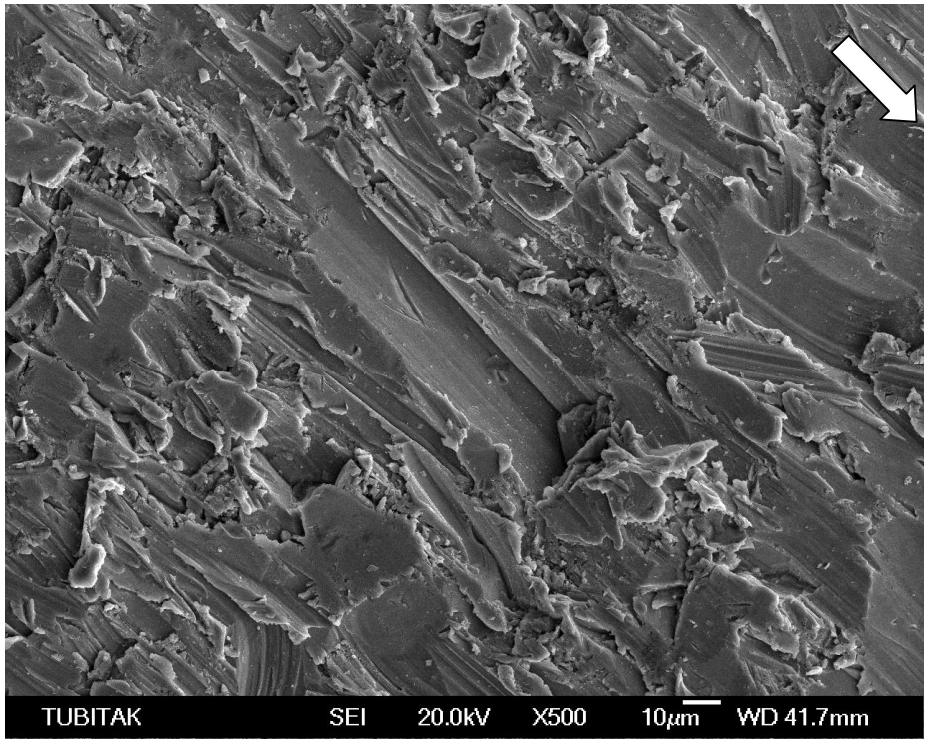
Bu bölüme kadar Ti6Al4V malzemenin katı partikül erozyonu davranışı grafik ve tablolar yardımıyla incelenmiştir. Bu bölümde ise Ti6Al4V numunelerin aşınma davranışları taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları yardımıyla yorumlanacaktır. Katı partikül erozyonunda etkin olan parametrelere bağlı olarak malzemede görülen aşınma mekanizmaları incelenecektir.

7.8.1. Aşınan yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı incelenmesi

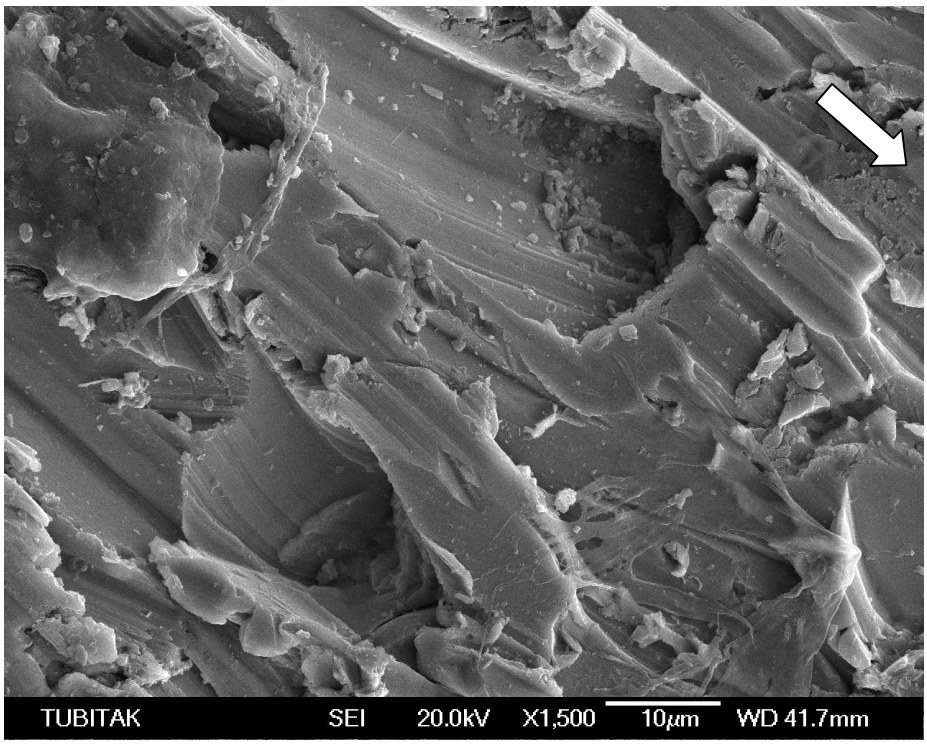
Katı partikül erozyonu deneylerinde Ti6Al4V malzeme 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutlarında aşındırıcı kumlar kullanılarak farklı basınç ve partikül çarpma açılarında aşındırılmıştır. Sonuçlar tüm basınçlarda ve partikül boyutlarında, en yüksek aşınmanın düşük çarpma açılarında (15° ve 30°), en düşük aşınmanın ise yüksek çarpma açılarında (75° ve 90°) görüldüğünü göstermiştir. Aşağıda verilen SEM fotoğrafları ile bu sonucun nedenleri irdelenecektir. Şekil 7.30, 7.31 ve 7.32'de 60 meshlik partiküller ile 4 bar püskürtme basıncı ve 15° çarpma açısında aşındırılan numunelerin farklı büyütmelerde SEM fotoğrafları verilmiştir. Numunelerin aşınma doğrultuları, fotoğrafların sağ üst köşesinde beyaz oklar ile gösterilmiştir.



Şekil 7.30: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x100 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)

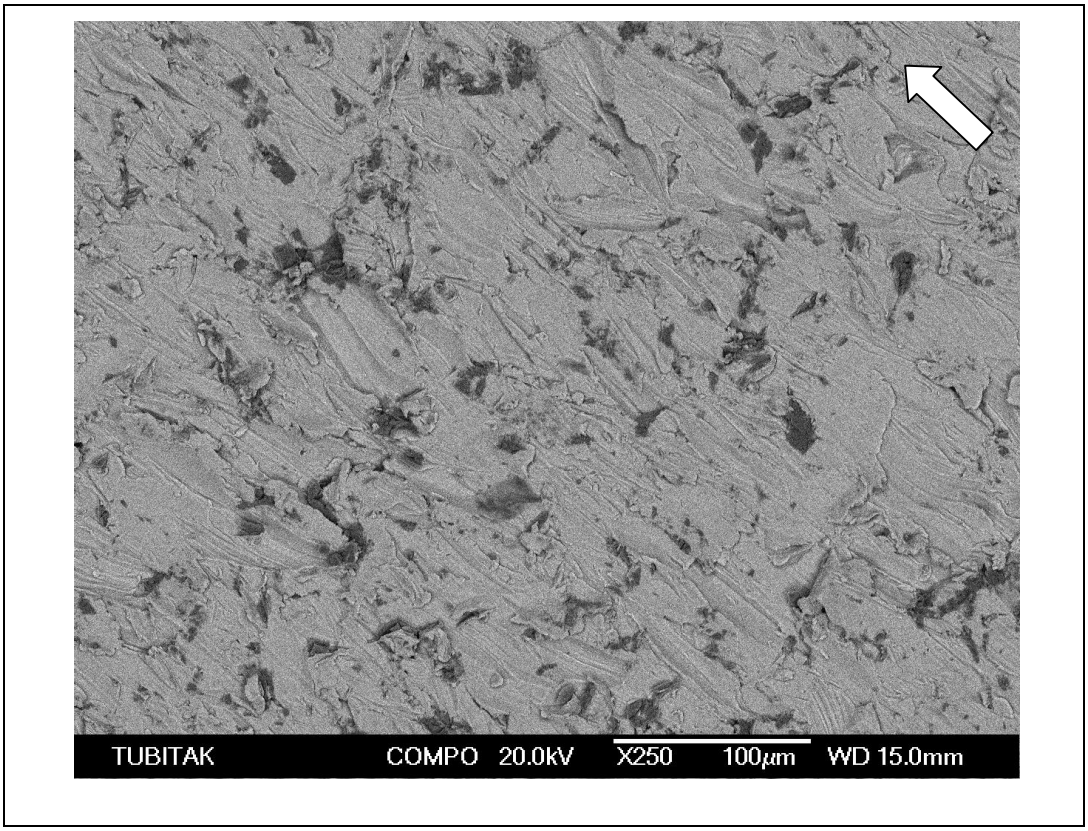


Şekil 7.31: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)



Şekil 7.32: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh

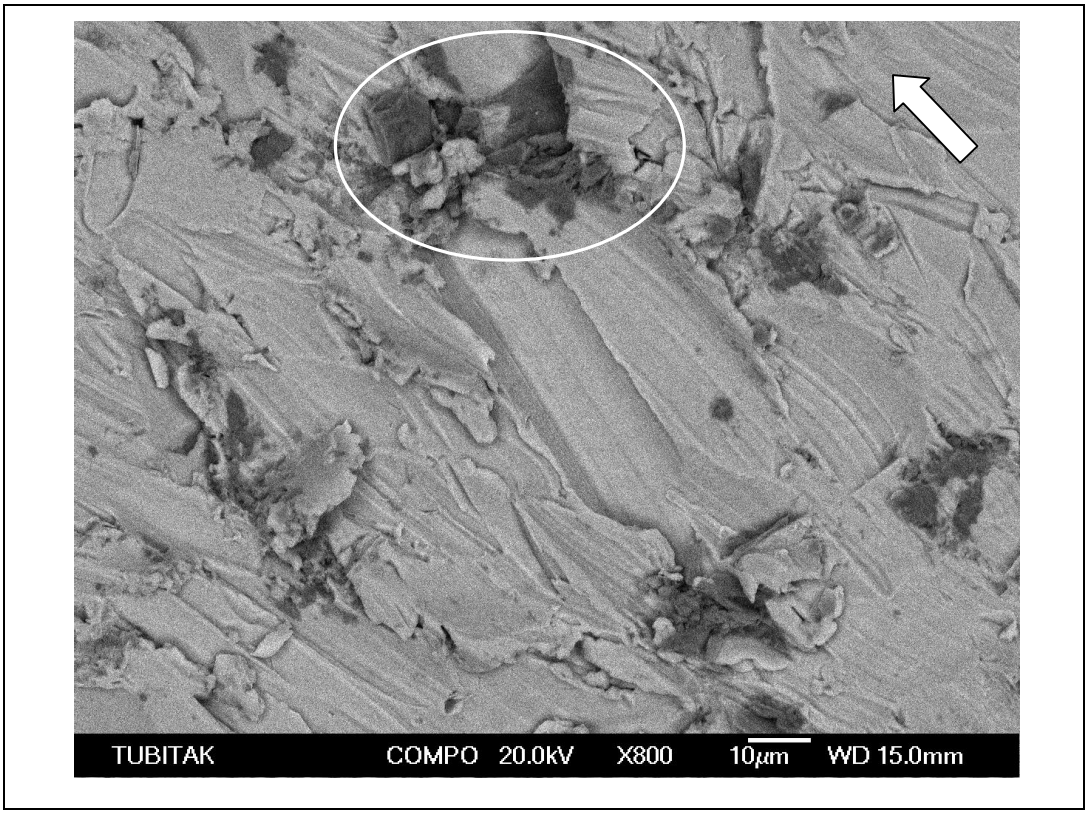
Fotoğraflar incelendiğinde 15° çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin numune yüzeyini mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları ile yoğun bir şekilde aşındırdıkları görülmektedir. Yüzeyin tamamının plastik deformasyona uğradığı ve partiküllerin malzeme yüzeyini sürerek aşınma izleri oluşturduğu görülmektedir. Aşınmanın tüm yüzeyde aynı doğrultuda gerçekleştiği söylenebilir. Şekil 7.32'de malzeme yüzeyinde derin yarık ve vadiler görülmektedir. Bu durum malzemenin bu parametreler altında yüksek miktarda aşındığını göstermektedir. Şekil 7.31 ve 7.32'de yüzeye saplanmış alüminyum oksit partikülleri de görülmektedir. Bu partiküllerin ve aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 7.33 ve 7.34'te aynı numunenin compo modunda çekilmiş SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.33: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede compo modunda SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)

Elementsel analizler bölümünde gerçekleştirilen EDS analizleri ile Şekil 7.33 ve 7.34'te fotoğraflar üzerinde siyah renkte görülen fazların, alüminyum oksit partikülleri olduğu belirlenmiştir. Resimde açık gri renkte görülen faz ise Ti6Al4V alaşımıdır. Fotoğraflar incelendiğinde tüm aşınma izlerinin aynı doğrultuda olduğu ve numune yüzeyinin mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları ile yoğun miktarda aşındığı söylenebilir.

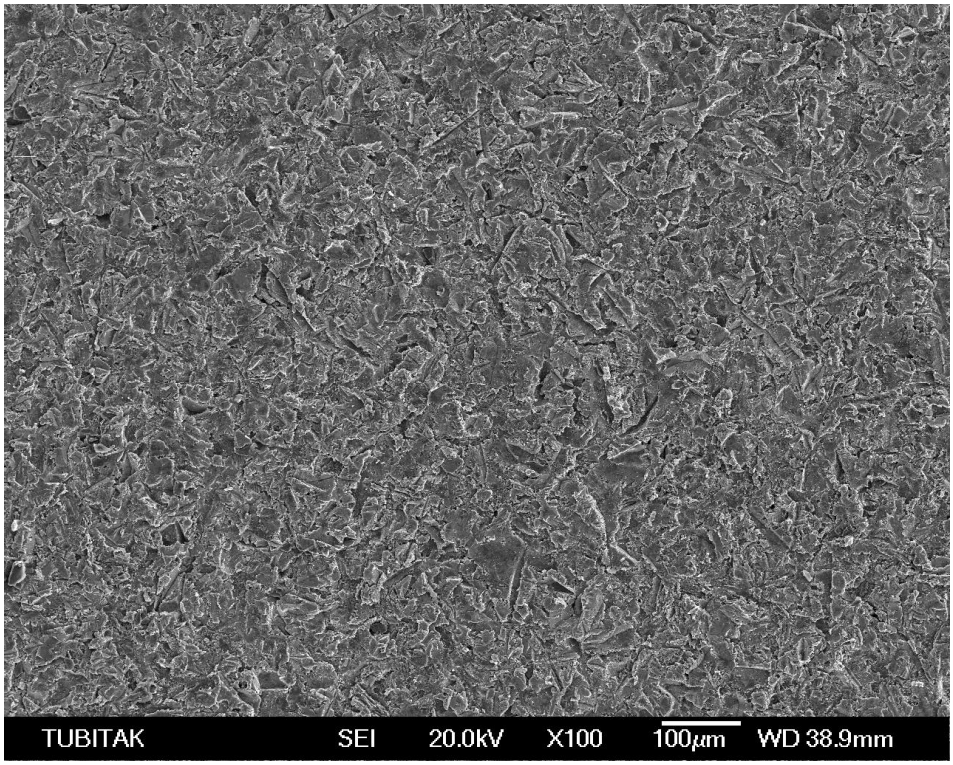
SEM fotoğrafları verilen bu numune 60 mesh (212 - 300 μm) boyutuna sahip partiküller ile aşındırılmıştır. Buna karşın numune yüzeyine saplanan partiküllerin boyutlarının 60 mesh' den çok daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum partiküllerin çarpışma esnasında numune yüzeyine ve birbirlerine çarparak kırılmaları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Şekil 7.34'te numune yüzeyine saplanan partiküllerin kırılarak çok sayıda küçük parçacığa ayrıldıkları görülmektedir.



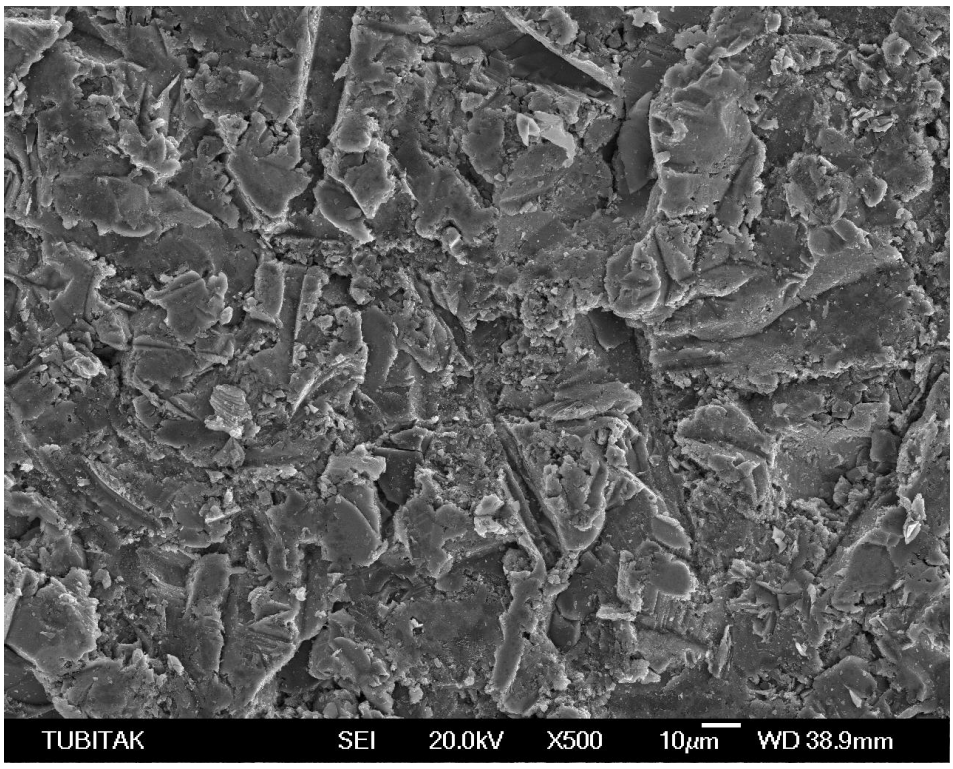
Şekil 7.34: 15° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x800 büyütmede compo modunda SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)

Şekil 7.34'te numune yüzeyini sürerek aşındırdıktan sonra malzeme yüzeyine saplanan partiküller daire içerisinde gösterilmiştir. Yüksek bir hıza ve enerjiye sahip olan b partiküllerin malzemenin yüzeyine çarptıkları anda veya malzeme yüzeyinin aşındırmaları esnasında parçalara ayrıldıkları söylenebilir. Partiküllerin yüzeye saplanmalarından sonra arkalarında gelen diğer partiküllerin darbeleri sonrasında da parçalandıkları düşünülebilir.

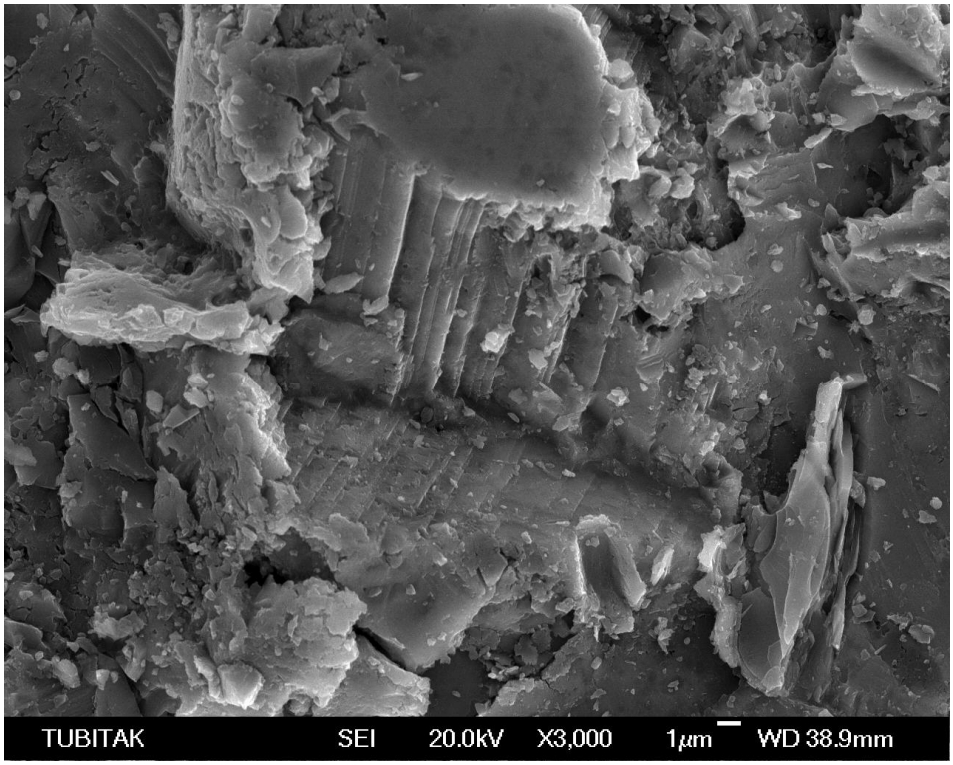
Şekil 7.35, 7.36, 7.37 ve 7.38'de 60 meshlik partiküller ile 4 bar püskürtme basıncında 90° çarpma açısında aşındırılan numunelerin farklı büyütmelerde SEM fotoğrafları verilmiştir.



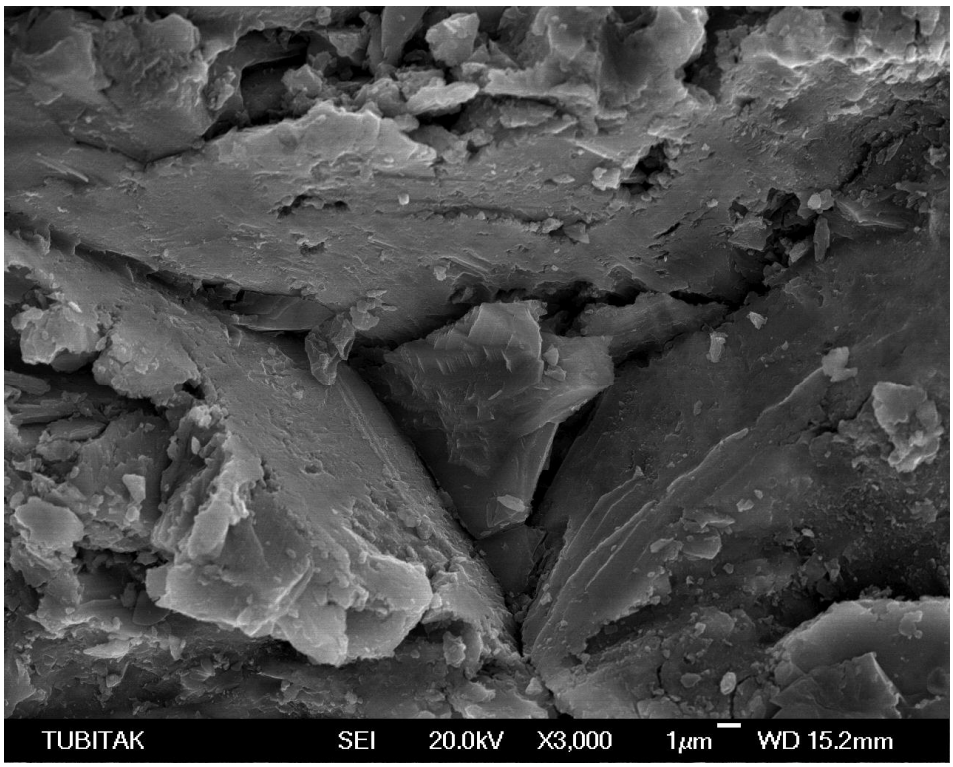
Şekil 7.35: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x100 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)



Şekil 7.36: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)

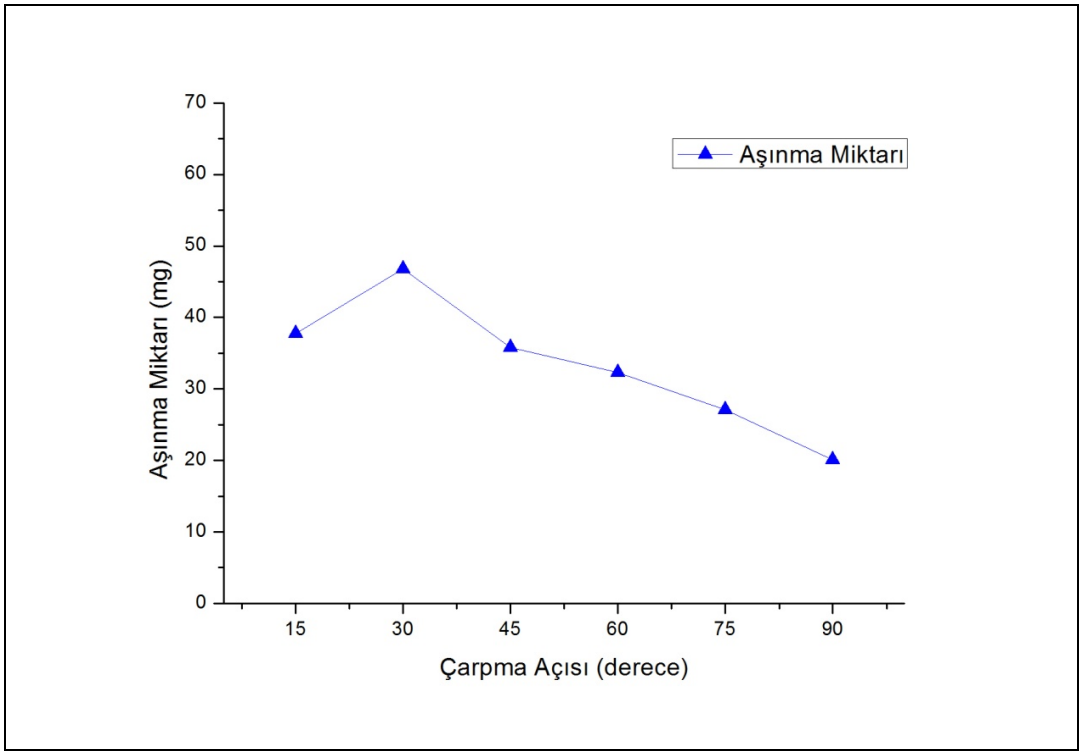


Şekil 7.37: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x3000 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)



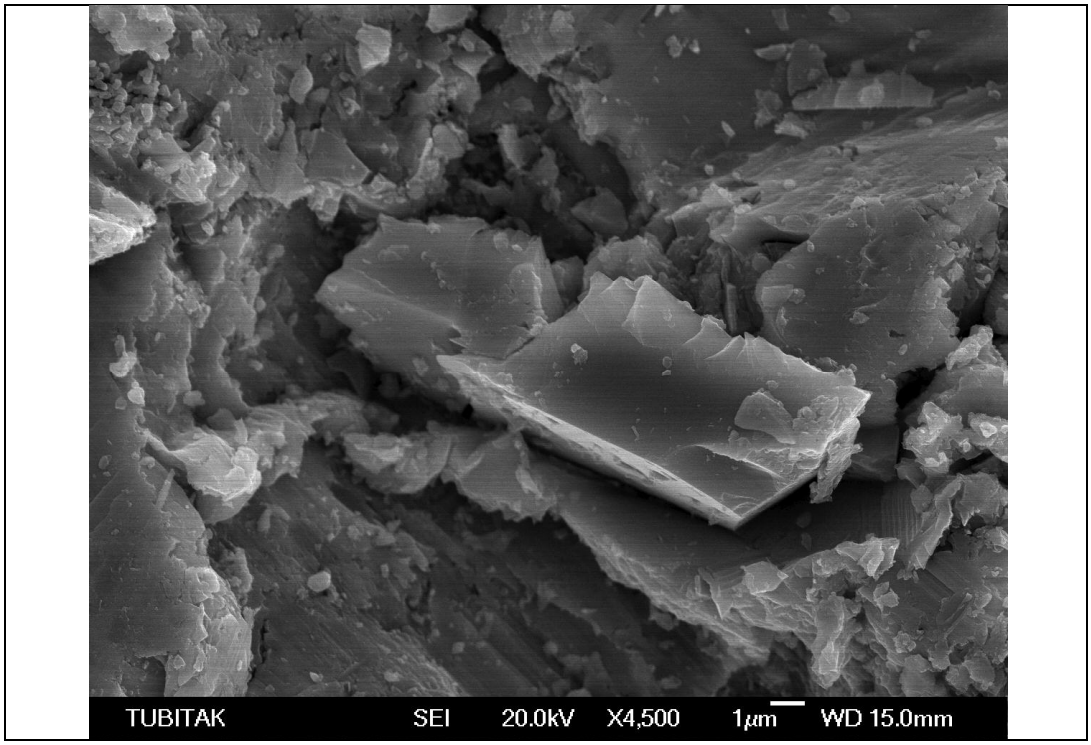
Şekil 7.38: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x3000 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)

90° çarpma açısı ile aşındırılan numunenin SEM fotoğraflarında, yüzeyin 15° çarpma açısı ile aşındırılan numune yüzeyinden çok farklı olduğu görülmektedir. 15° çarpma açısında gözlemlenen aşınma izleri bu numunede görülmemektedir. Numune yüzeyinin mikro çatlak mekanizmaları ile plastik deformasyona uğradığı söylenebilir. Yüksek büyütmelerde verilen fotoğraflarda, alüminyum oksit partiküllerinin yüzeye saplandıkları görülmektedir. Partiküller, yüzeyi plastik deformasyona uğratarak yüzeyde vadiler oluşturmuşlardır. Malzeme yüzeyinde plastik deformasyonla birlikte çok sayıda tepecik oluştuğu görülmektedir. Bu durum Ti6Al4V malzemenin sünek karakterinden kaynaklanmaktadır. Ancak literatür ve deneysel çalışmalar bölümünde değinildiği gibi sünek malzemelerde bu şekilde yüksek miktarda aşınma gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Şekil 7.39'da aşınma miktarının partikül çarpma açısına bağlı değişimi verilmiştir. Şekilde verilen grafik ile 15° ve 90° çarpma açısına ait SEM resimlerinin birebir örtüştüğü söylenebilir. Düşük çarpma açılarında SEM fotoğraflarında görülen mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları malzemenin yüksek miktarda aşınmasına yol açmaktadır. Yüksek çarpma açılarında ise SEM fotoğraflarında görülen morfoloji, yüzeyin partiküllerin darbeleriyle plastik deformasyona uğradığını ve bu şekilde malzeme yüzeyinde çok sayıda tepeciğin oluştuğunu göstermektedir. Bu oluşumlar ile malzeme yüzeyinde düşük miktarda aşınma gerçekleşmektedir.

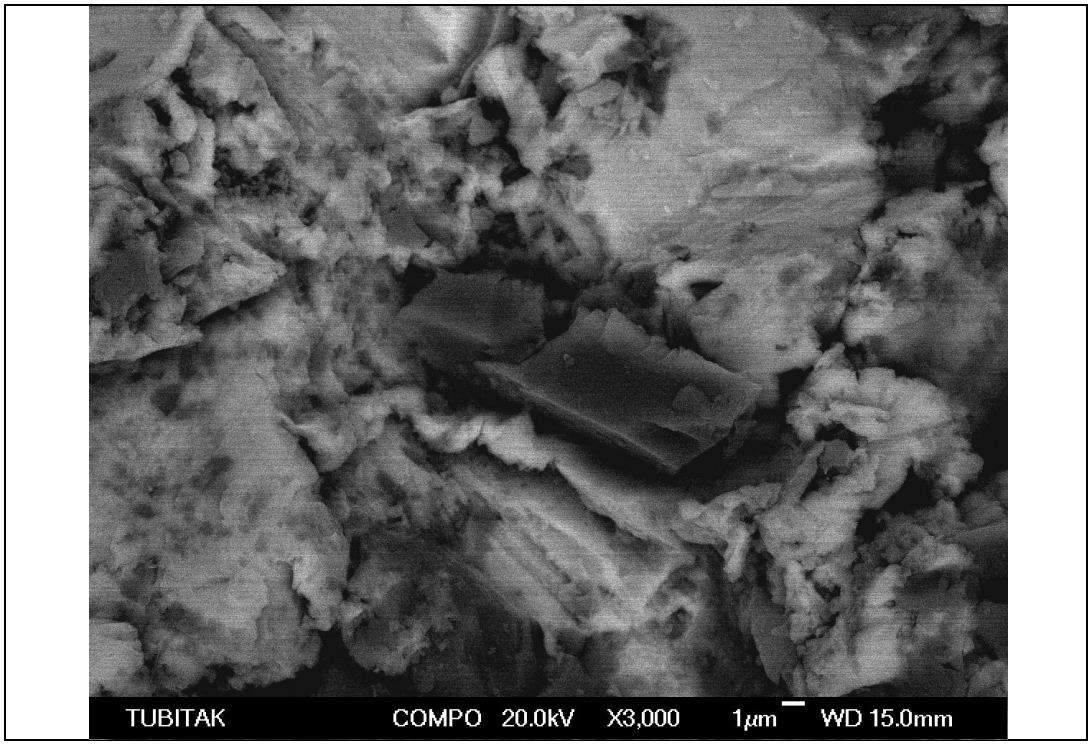


Şekil 7.39: Aşınma miktarının partikül çarpma açısına bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi: 20s)

Şekil 7.40 ve 7.41' de 90° çarpma açısı ile aşındırılan numunede yüzeye saplanan alüminyum oksit partikülün SEI ve COMPO modlarında SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.40: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x3000 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)



Şekil 7.41: 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunenin x3000 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)

7.8.2. Aşınan yüzey morfolojisinin püskürtme basıncına bağlı incelenmesi

Deneysel çalışmalarda Ti6Al4V malzemenin katı partikül erozyonu davranışının farklı püskürtme basınçlarında değişimi incelenmiş, 60, 80 ve 120 mesh partikül boyutlarında aşındırıcı kumlar kullanılarak hedef malzeme 1,5 bar, 3 bar ve 4 bar basınçlarda aşındırılmıştır. Çalışmalarda basınç artışına paralel olarak aşınma miktarının da artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu bölümde bu ilişki SEM fotoğrafları yardımıyla irdelenecektir.

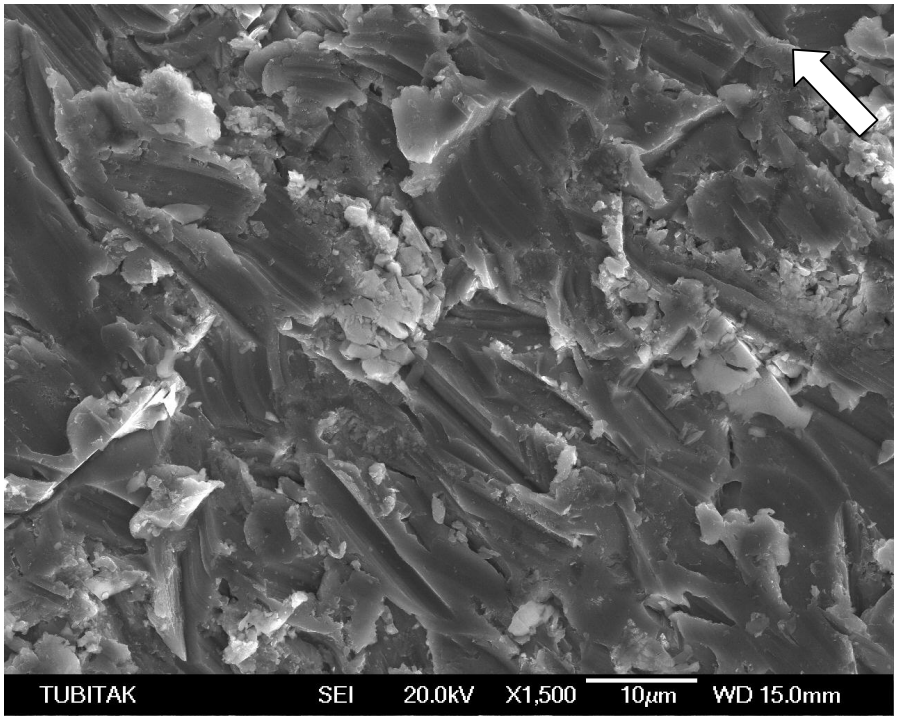
Şekil 7.42 ve 7.43'te 1,5 bar püskürtme basıncı ve 15° çarpma açısında 120 meshlik partiküller ile aşındırılmış malzemenin SEM fotoğrafları verilmiştir. Şekil 7.44 ve 7.45'te aynı parametreler altında 4 bar püskürtme basıncında aşındırılan malzemenin SEM fotoğrafları verilmiştir.

Numuneler 15° çarpma açısına nedeniyle mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmaları ile aşınmıştır. Tüm fotoğraflarda aynı doğrultularda aşınma izleri oluştuğu görülmektedir. Resimler üzerinde aşınma doğrultuları gösterilmiştir. Compo modunda verilen Şekil 7.43 ve 7.45'te malzeme yüzeyine saplanmış alüminyum oksit partikülleri görülmektedir. Her iki resimde de partiküllerin malzeme yüzeyini sürdükleri ve sonrasında yüzeye saplandıkları söylenebilir. Aşındırıcı partiküller kırılarak küçük parçacıklara ayrılmışlardır.

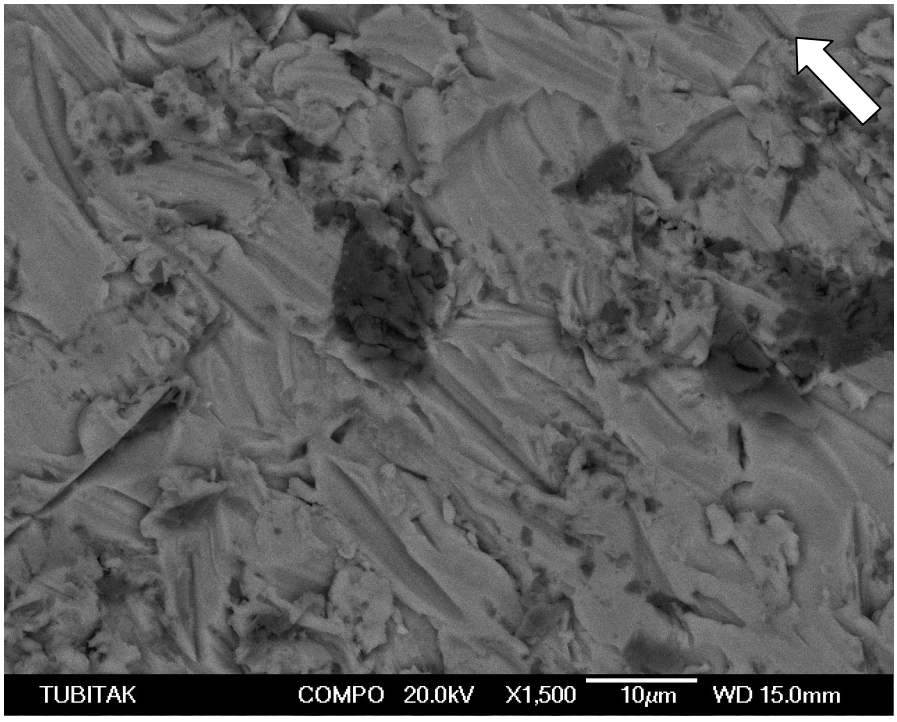
Püskürtme basıncı ile aşınma miktarı doğru orantılı değişmektedir. Şekil 7.42 ve 7.43'te 1,5 bar basınçta aşındırılan numune ile Şekil 7.44 ve 7.45'te 4 bar basınçta aşındırılan numune fotoğrafları arasında şu farklılıklar gözlenmiştir;

- 1,5 bar basınçta aşındırılan numunenin aşınma izleri 4 bar basınçta aşındırılan numunedeki aşınma izlerine göre daha kısadır. Şekil 7.46'da SEM fotoğrafları üzerinde iz ölçümleri verilmiştir
- Aşınma izlerinin düşük basınçta daha yüzeysel olduğu görülmektedir. 4 bar basınçta aşındırılan numunede derin aşınma izleri dikkat çekmektedir. Aşınma izlerinin derinlikleri compo modunda çekilmiş 7.43 ve 7.45 numaralı şekillerde rahatça görülmektedir.
- SEM fotoğrafları ile belirlenen bulgular ışığında malzemenin 1,5 bar basınçta daha az aşındığı ve basınç artışı ile aşınma miktarının arttığı söylenebilir. Bu sonuçlar, 120 mesh partiküller ve 15° çarpma açısı için aşınma miktarının

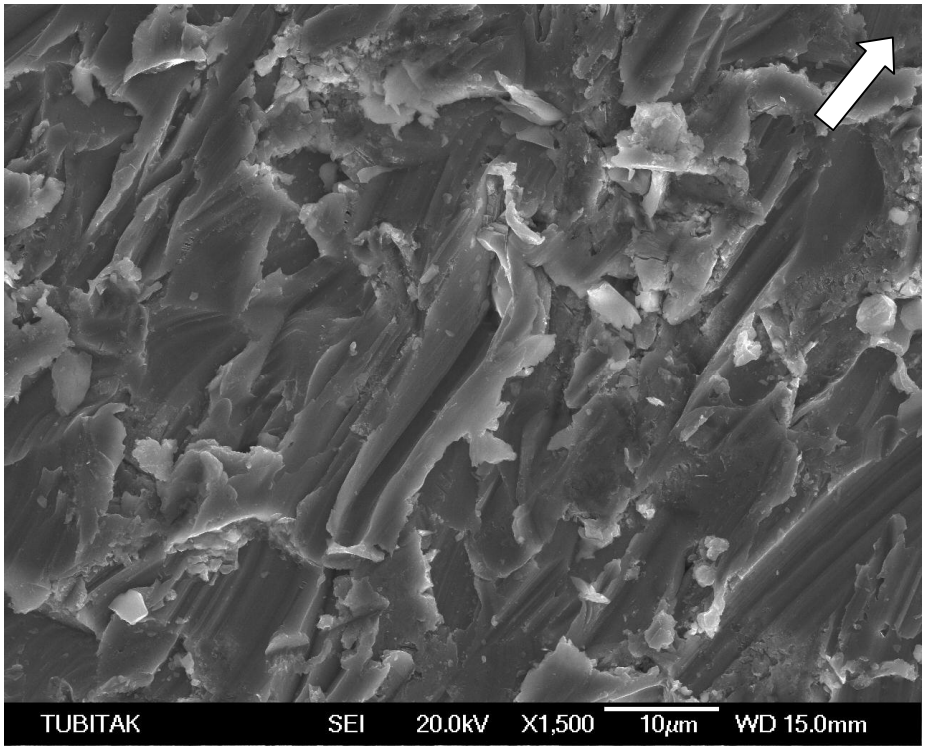
püskürtme basıncına bağlı olarak değişimin gösteren Şekil 7.47 ile uyuşmaktadır.



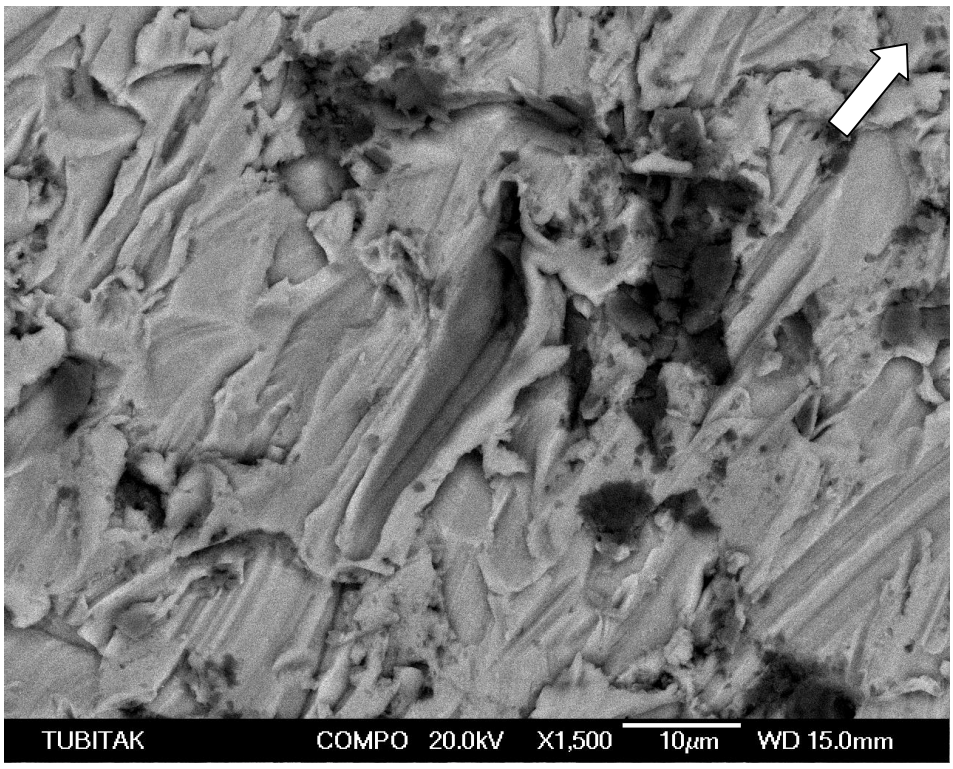
Şekil 7.42: 1,5 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



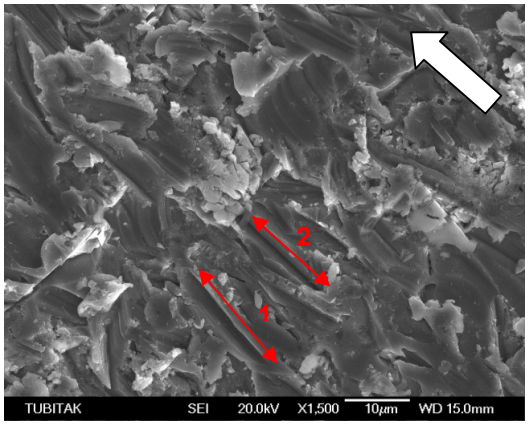
Şekil 7.43: 1,5 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)

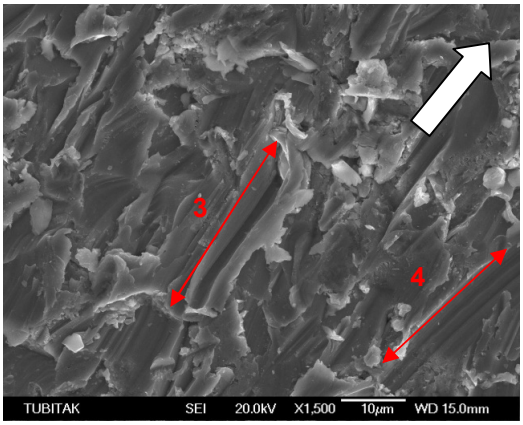


Şekil 7.44: 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



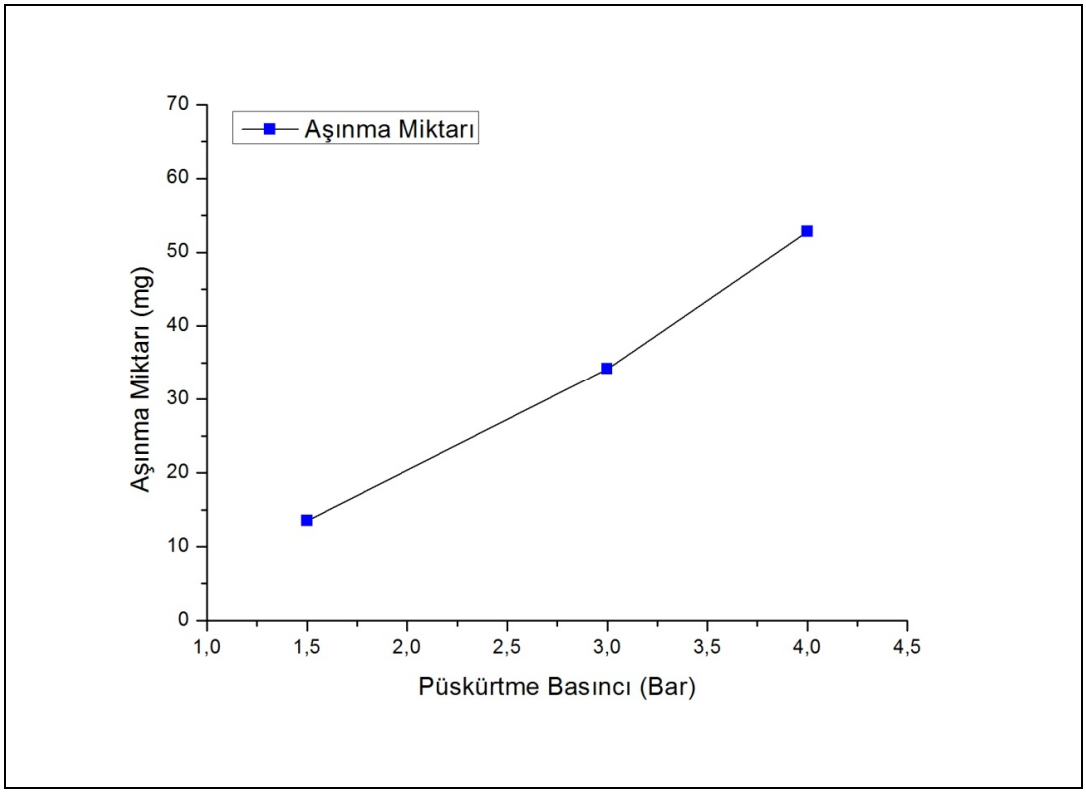
Şekil 7.45: 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunenin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)





İz numarası	İz Uzunluğu (μm)	İz numarası	İz Uzunluğu (μm)
1	17	3	30
2	14	4	23

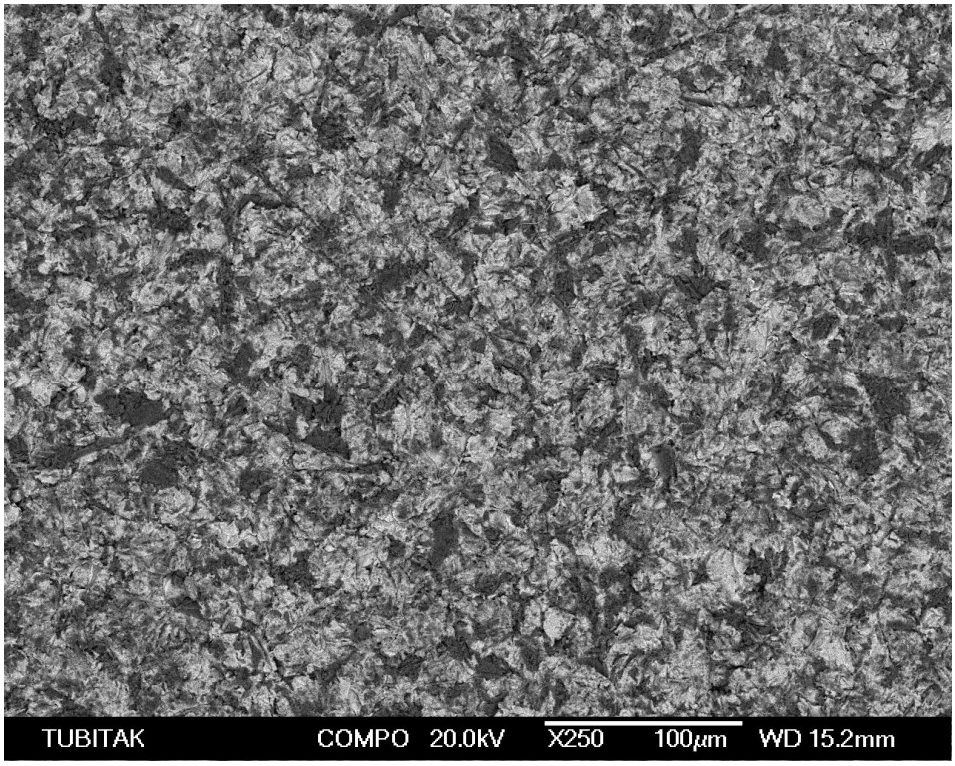
Şekil 7.46: 1,5 ve 4 bar püskürtme basınçları ile aşındırılmış numunelerin aşınma iz uzunluğu ölçümleri (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



Şekil 7.47: Aşınma miktarının püskürtme basıncına bağlı değişimi (partikül çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi: 20s)

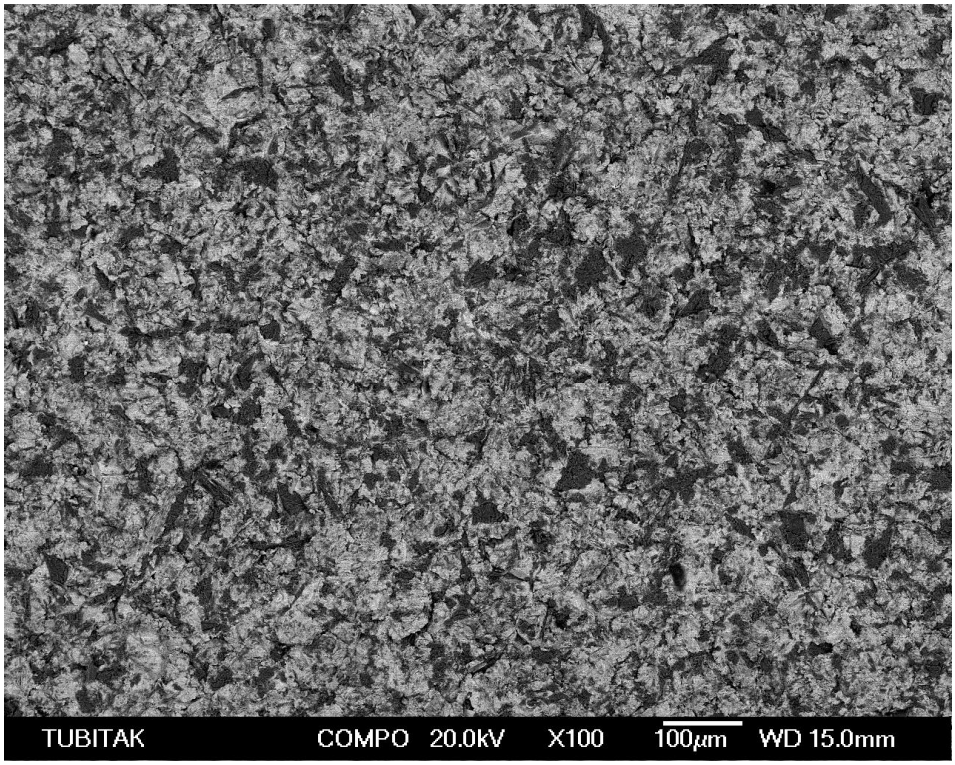
7.8.3. Aşınan yüzey morfolojisinin katı partikül boyutuna bağlı incelenmesi

Deneysel çalışmalarda Ti6Al4V malzemede aşınma miktarının partikül boyu ile ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir. Partikül boyutundaki artış ile aşınma miktarı azalmaktadır. Bunun sonucunda en yüksek aşınma değerleri 120 meshlik partiküller ile gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir. Şekil 7.48 ve 7.49'da 4 bar basınç ve 90° çarpma açısında, 60 ve 120 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları verilmiştir.

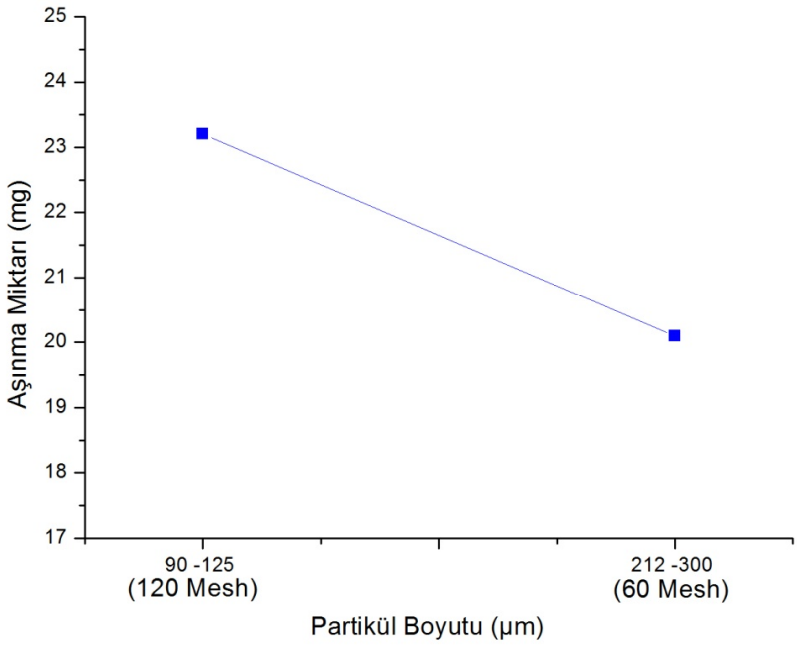


Şekil 7.48: 120 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s)

İki resim karşılaştırıldığında, Şekil 7.48'te siyah fazın daha yoğun olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak 120 meshlik partiküller ile aşındırılan numune yüzeyine daha fazla miktarda alüminyum oksit partikülü saplandığı söylenebilir. Bu durumda 120 meshlik partiküllerin numuneye daha yüksek hız ve enerji ile çarptıkları düşünülebilir. Bu sonuç yüksek enerji ve hızları ile 120 meshlik partiküllerin daha fazla plastik deformasyon ve aşınma sağladıkları anlamına gelmektedir. Şekil 7.50'de 90° çarpma açısı ve 4 bar püskürtme basıncında aşınma miktarının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 7.49: 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s)

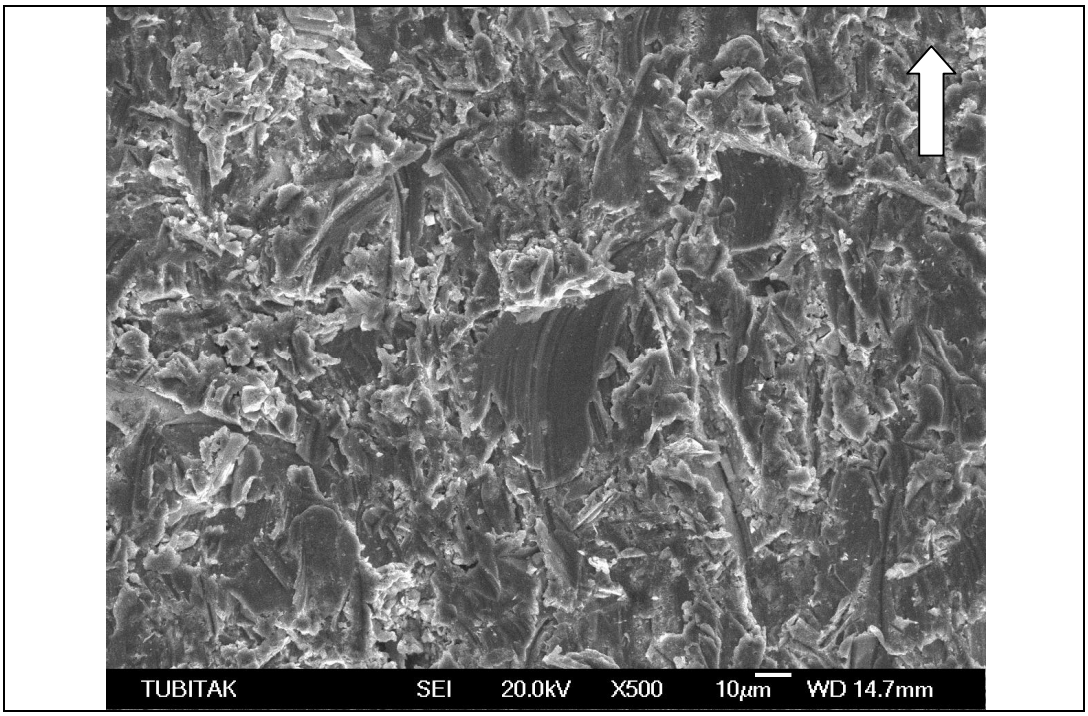


Şekil 7.50: Aşınma miktarının partikül boyutuna bağlı değişimi (partikül çarpma açısı: 15°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s)

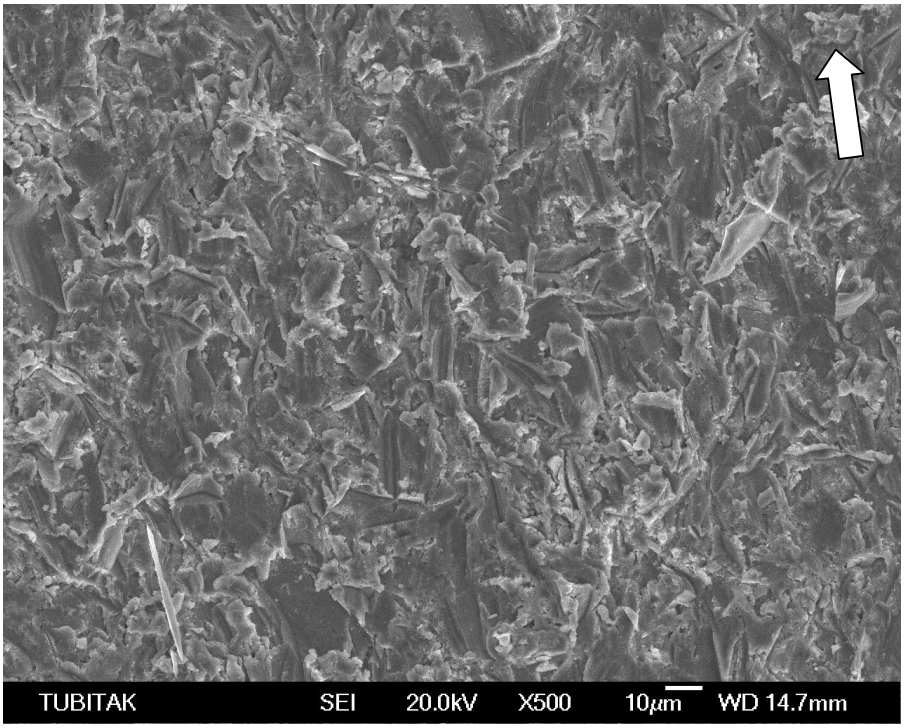
7.8.4. Aşınan yüzey morfolojisinin partikül karışımlarına bağlı incelenmesi

Deneysel çalışmalar süresince partikül karışımlarının aşınma miktarına etkisinin incelenmesi amacıyla çok sayıda deney gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonrasında partikül karışımlarının aşınma performanslarının, karışımı oluşturan partiküllerin tek başlarına kullanılmalarına nazaran daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca tüm karışımlarda deneysel aşınma oranları, deneyler öncesi hesaplanan teorik aşınma oranlarından düşük çıkmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi bu sonuçlar partiküllerin hedef malzemeye çarpmadan önce birbirleri ile etkileşim için de olmalarına ve bu etkileşimler ile enerji ve hızlarının bir kısmını kaybetmelerine bağlanmıştır. Bu bölüm içerisinde bu ilişkiler partikül karışımları ile aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları ile irdelenecektir.

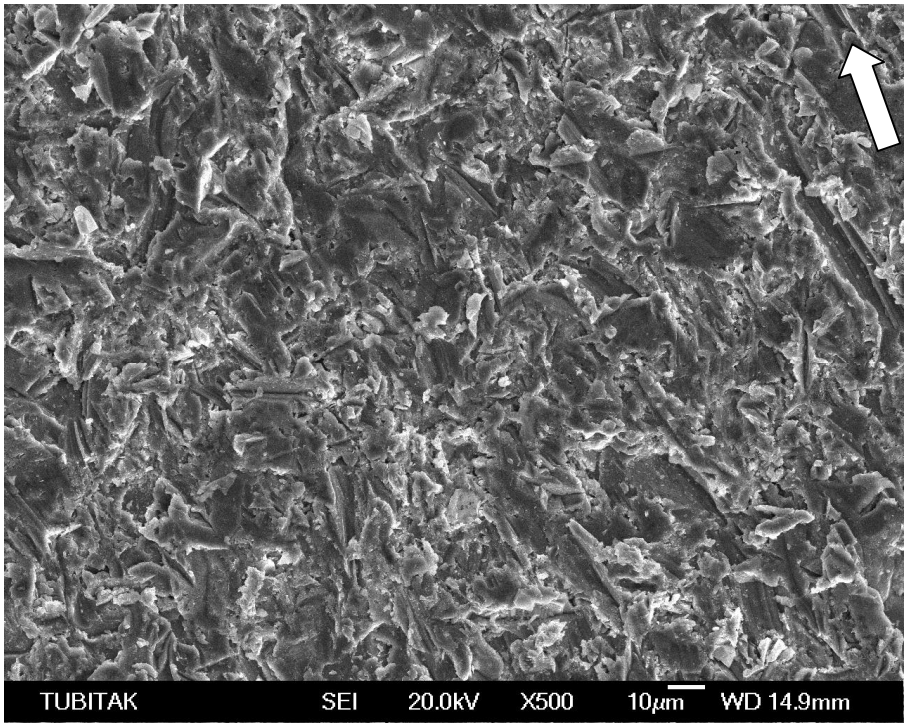
Şekil 7.51, 7.52 ve 7.53'te 4 bar püskürtme basıncı ve 30° çarpma açısında 60 ve 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımlar ile aşındırılmış numunelerin SEM fotoğrafları verilmiştir. Şekil 7.51' de % 75 60 mesh - % 25 120 mesh, Şekil 7.52'de % 50 60 mesh -% 50 120 mesh ve Şekil 7.53'te % 25 60 mesh - % 75 120 mesh içeren karışımlar ile aşındırılan numunelerin fotoğrafları verilmiştir. Şekil 7.54'te karşılaştırılma yapılabilmesi amacıyla, aynı parametreler altında 60 meshlik partiküller ile aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı verilmiştir.



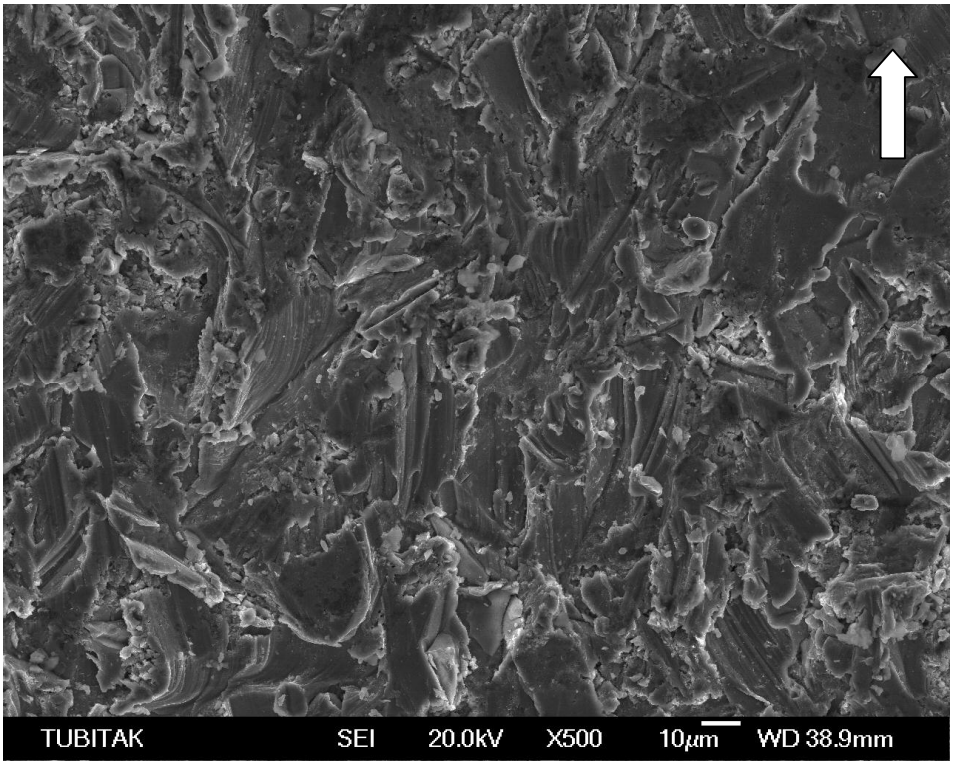
Şekil 7.51: %75 60 mesh - % 25 120 mesh ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s)



Şekil 7.52: %50 60 mesh - % 50 120 mesh ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s)



Şekil 7.53: % 25 60 mesh - % 75 120 mesh ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s)



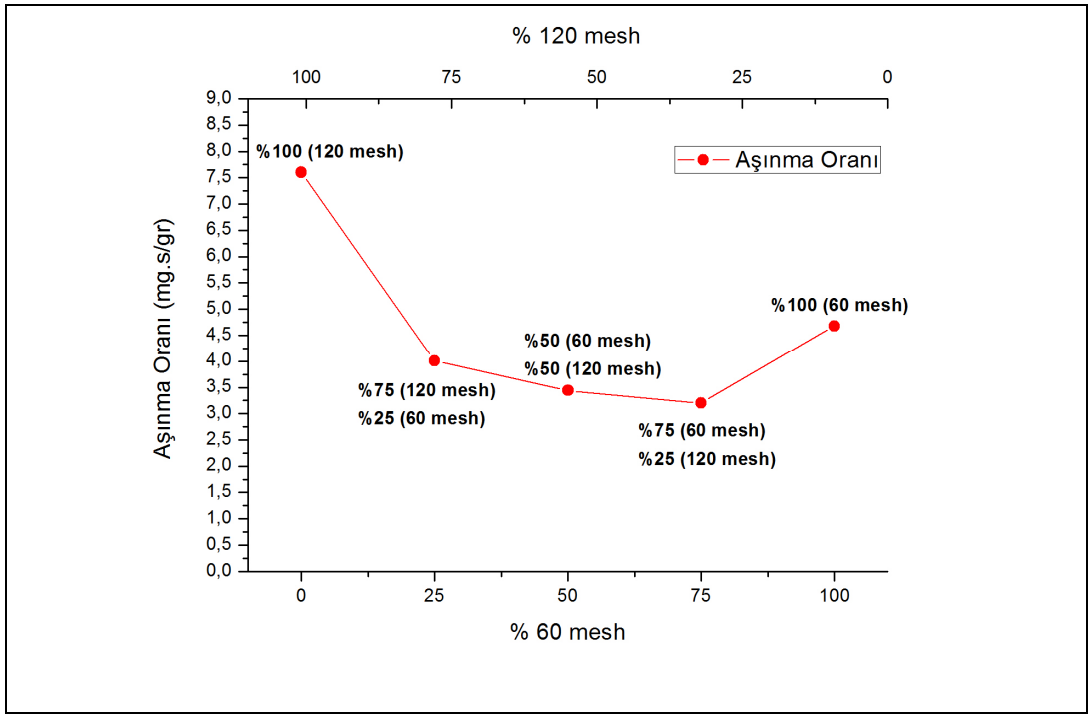
Şekil 7.54: % 100 60 mesh'lik partiküller ile aşındırılmış numunenin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar, aşınma süresi: 20s)

Bölüm içerisinde verilen SEM fotoğrafları incelerek aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Tüm fotoğraflarda mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmalarına ait aşınma izleri görülmektedir. Tek tip aşındırıcı partikül ile aşındırılan numunede bu izlerin yüzeyin tamamına yayıldığı gözlenirken, partikül karışımları ile aşındırılan numunelerde aşınma izlerinin bazı bölgelerle sınırlı kaldığı görülmektedir.

- 60 meshlik partiküller ile aşındırılan numunenin SEM fotoğrafında görülen aşınma izlerinin, karışımlar ile aşındırılan numunelerin aşınma izlerine göre çok daha derin ve uzun olduğu dikkat çekmektedir. Partikül karışımları daha kısa ve yüzeysel izler meydana getirmiştir.

- Bu gözlemler sonrasında, partikül karışımlarının aşınma performanslarının partiküllerin tek başlarına kullanılmalarına kıyasla daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 7.55'te 60 – 120 mesh partiküllerden oluşan karışım için aşınma oranının karışım içeriğine bağlı değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde morfolojik incelemeler sonrası çıkarılan sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir.



Şekil 7.55: 60 – 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımların teorik ve deneysel aşınma miktarlarının karışım içeriğine bağlı değişimi (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı : 4 bar, aşınma süresi: 20 s)

8. SONUÇ

Katı partikül erozyonu, diğer tribolojik süreçler gibi çok kompleks bir süreçtir. Katı partikül erozyonu, aşındırıcı partiküllerin çarpma açılarına ve boyutlarına, püskürtme basıncına ve erozyon süresine bağlı olarak gerçekleşen bir süreçtir. Tez çalışmasında ilk olarak Ti6Al4V alaşımı, katı partikül erozyonunda etkin olan bu parametrelerin çeşitli kombinasyonları altında aşındırılmıştır. Her bir parametrenin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkisi irdelenmiştir. Bunların yanında erozif aşınma esnasında püskürtülen partikül ve partikül karışımlarının kütlesel debilerinin bu parametrelere bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Tez kapsamında bu çalışmalardan sonra Ti6Al4V malzeme farklı büyüklüklerde partiküllerin birbirleri içerisinde farklı oranlarda karıştırılmalarıyla hazırlanan aşındırıcı partikül karışımları ile aşındırılmıştır. Partikül karışımlarının katı partikül erozyonu üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Çalışmalar süresince aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları çekilmiş ve aşınma miktarları ile yüzey morfolojileri ilişkilendirilmiştir. Bu bölüm içerisinde öncelikle tek tip partiküller ile yapılan çalışmaların ve kütlesel debi değişimlerinin sonuçları verilecektir. Daha sonra aşındırıcı partikül karışımları ile yapılan deneylerin sonuçları verilecektir.

Katı partikül erozyonunda kütlesel debinin değişimi:

Deneysel çalışmalar süresince püskürtülen partiküllerin kütlesel debilerinin değişimi tüm parametreler ve partikül karışımları için ayrıntılı bir şekilde takip edilmiş ve aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Aşındırıcı partiküllerin ve aşındırıcı partikül karışımlarının kütlesel debileri püskürtme basıncı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

- Tek tip aşındırıcılar ile gerçekleştirilen deneylerde aşındırıcı partikül boyutunun artışı ile kütlesel debinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumda kütlesel debinin aşındırıcı partikül boyutu ile de doğru orantılı olarak değiştiği söylenebilir.

- Aşındırıcı partiküllerin karıştırılması ile hazırlanan partikül karışımlarının kütlesel debileri, tüm basınçlarda ve karışım oranlarında partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumunda elde edilen kütlesel debilerden daha yüksektir.

- Aşındırıcı partikül karışımlarında, karışım içerisindeki büyük boyuta sahip partikül miktarının arttırılması ile karışımın kütlesel debisi artmaktadır.

Katı partikül erozyonunun zamana bağlı değişimi:

Katı partikül erozyonu sırasında farklı basınçlarda (1,5, 3 ve 4 bar), farklı partikül çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) ve farklı partikül büyüklüklerinde (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda bütün parametrelerde aşınma sırasında herhangi bir inkübasyon (kuluçka) periyodunun olmadığı, erozyon süresi ile aşınma miktarının deneyin hemen başından itibaren lineer olarak değiştiği görülmüştür. Aşınma süresindeki artış ile birlikte aşınma miktarı lineer olarak artış göstermiştir. Bu sonuçlar aşınmanın, deneylerin hemen başında düzenli tekrarlanan “steady state” rejimine ulaştığını göstermiştir.

Katı partikül erozyonunun partikül çarpma açısına bağlı değişimi:

Tüm deneylerde maksimum aşınmanın düşük çarpma açılarında (15° ve 30°) meydana geldiği ve çarpma açısının büyümesiyle birlikte aşınma miktarının düştüğü görülmüştür. En düşük aşınma 90° çarpma açısında gerçekleşmiştir. 15° ve 90° çarpma açılarında aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları incelendiğinde numunelerin yüzey morfolojilerinde büyük farklılıklar olduğu görülmüştür. 15° çarpma açısı ile aşındırılan numunelerin yüzeylerinde mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmaları ile oluşan uzun ve derin aşınma izleri görülmüştür. 90° çarpma aşısında aşındırılan numunelerin yüzeylerinde ise bu izlere rastlanmamıştır. 90° çarpma açısında, partiküllerin numune yüzeyine saplanmaları sonucunda gerçekleştirdikleri plastik deformasyonlar nedeniyle oluşan tepecikler gözlemlenmiştir. Ti6Al4V alaşımının sünek bir malzeme oluşu bu sonuçları doğurmuştur. Aşınma miktarının değişimi ile morfolojik yapının değişiminin birebir örtüştüğü tespit edilmiştir.

Katı partikül erozyonunun püskürtme basıncına bağlı değişimi:

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tüm partikül boyutlarında ve çarpma açılarında, püskürtme basıncının arttırılmasıyla ile aşınma miktarının arttığı tespit edilmiştir. En yüksek aşınma miktarının, tüm çarpma açılarında ve partikül boyutlarında 4 bar basınç altında gerçekleştiği belirlenmiştir. En düşük aşınmanın ise 1.5 bar püskürtme basıncında gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum püskürtme basıncının arttırılması ile aşındırıcı partiküllerin hızlarının ve enerjilerinin de artmasına bağlanabilir. Daha yüksek hız ve enerjiye sahip partiküllerin malzeme yüzeyinin daha fazla aşındırması beklenen bir sonuçtur.

Morfolojik incelemelerde 15° çarpma açısında, 120 mesh'lik aşındırıcı partiküller ile 1,5 ve 4 bar basınçta aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları incelenmiştir. Numunelerin 15° çarpma açısına bağlı olarak mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmaları ile aşındıkları gözlenmiştir. Buna karşın 1,5 bar basınçta aşındırılan numunenin aşınma izleri 4 bar basınçta aşındırılan numunedeki aşınma izlerine göre daha kısa olduğu görülmüştür. SEM fotoğrafları üzerinde aynı zamanda iz ölçümleri de verilmiştir. Aşınma izlerinin düşük basınçta daha yüzeysel olduğu görülmüştür. 4 bar basınçta aşındırılan numunede derin aşınma izleri dikkat çekmiştir. Bu incelemeler sonucunda malzeme yüzeyinde basınç artışına paralel olarak daha fazla aşınmanın gerçekleştiği belirlenmiştir.

Katı partikül erozyonunun aşındırıcı partikül boyutuna bağlı değişimi:

Aşındırıcı partikül boyutunun katı partikül erozyonu üzerindeki etkinliğinin incelenmesi amacıyla, Ti6Al4V malzeme 60 mesh (212 -300 μm), 80 mesh (150 - 212 μm) ve 120 mesh (90 -125 μm) boyutunda partiküller ile aşındırılmıştır. Deneyler sonucunda partikül boyutunun aşınma üzerinde etkin olduğu belirlenmiştir. Tüm basınçlarda Ti6Al4V malzemenin aşınma miktarı aşındırıcı partikül boyutu artışıyla birlikte azalmıştır. Deneysel çalışmalar öncesinde partikül boyutundaki artışın partiküllerin hızlarını ve momentumlarını arttıracağı ve buna paralel olarak aşınma miktarının da artacağı öngörülmüştür. Ancak sonuçlar bu durumun aksini göstermektedir. Aşındırılmış numunelerin morfolojileri incelendiğinde, 90° çarpma açısında, büyük boyutlu partiküllerin (60 mesh) malzeme yüzeyine küçük boyutlu partiküllerden (120 mesh) daha az saplandıkları görülmüştür. Bu durumda 120 meshlik partiküllerin numuneye daha yüksek hız ve enerji ile çarptıkları

düşünülebilir. Morfolojik incelemeler ile yüksek enerji ve hızları ile 120 meshlik partiküllerin daha fazla plastik deformasyon ve aşınma sağladıkları sonucuna varılmıştır.

Aşındırıcı partikül karışımlarının katı partikül erozyonuna etkileri:

Tez çalışmasında 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh partikül boyutlarındaki aşındırıcılar birbirleri içerisinde farklı oranlarda karıştırılmış ve bu şekilde 9 farklı aşındırıcı partikül karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımlar ile gerçekleştirilen deneyler sonrasında aşındırıcı partikül karışımlarının katı partikül erozyonu üzerindeki etkinliği araştırılmış ve literatürde bu konu ile ilgili boşluk doldurulmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışmalarda Ti6Al4V malzeme en yüksek aşınmanın meydana geldiği 30° çarpma açısında en yüksek (4 bar) ve en düşük (1,5 bar) basınç altında aşındırılmıştır.

Deneysel çalışmaları sonucunda 60 – 120 mesh, 60 – 80 mesh ve 80 – 120 mesh boyutlarında partikülleri içeren karışımların aşınma davranışlarının benzer olduğu görülmüştür. 1,5 ve 4 bar püskürtme basıncı ve 30 ° çarpma açısında partikül karışımları ile gerçekleştirilen deneylerin analizleri sonrasında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Aşındırıcı partikül karışımları, Ti6Al4V malzemeyi karışım içerisindeki partiküllerin tek başlarına kullanılmalarına nazaran daha az aşındırmaktadırlar. Partikül karışımlarının aşınma performanslarının, partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumuna göre düşük oldukları tespit edilmiştir.

- Karışımlar ile ilgili deneysel çalışmalar öncesinde aşınma oranının teorik olarak da hesaplanabileceği düşünülmüştür. % 100 büyük partikülün aşınma oranı ve % 100 küçük partikülün aşınma oranı biliniyor ise, bu iki partikülün aşınma oranları ile karışım içerisindeki kütlesel oranları çarpılarak teorik bir aşınma oranı elde edilebilir. Tüm karışımların deneysel çalışmalar öncesinde, bu yaklaşımla teorik aşınma oranları hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda gerçek aşınma oranlarının, deneysel çalışmalar öncesinde hesaplanan aşınma oranlarından daha düşük olduğu belirlenmiştir.

- Karışımlar içerisindeki partiküllerin, hedef malzemeye çarpmadan önce ve çarpışma sırasında birbirleri ile etkileşim içinde oldukları söylenebilir. Bu etkileşim sonucunda partiküllerin enerji ve hızlarının bir bölümünü kaybettikleri ve bu yüzden daha düşük aşınma gerçekleştirdikleri düşünülmüştür. Karışımların daha düşük aşınma göstermesi ve gerçek aşınma oranlarının teorik aşınma oranlarından daha düşük olması bu etkileşimlere bağlanmıştır.

- Karışım içerisindeki küçük boyuta sahip partikül miktarının artması ya da diğer bir deyişle karışım içerisinde daha yüksek aşınmaya sebep olan partikül miktarının artması birçok karışımda aşınma oranını arttırmıştır.

Aşındırıcı partikül karışımlarının katı partikül erozyonuna etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla, 4 bar püskürtme basıncı ve 30° çarpma açısında 60 ve 120 mesh boyutunda partiküller içeren karışımlar ile aşındırılmış numunelerin SEM fotoğrafları çekilmiştir. Bu fotoğraflar, aynı parametreler altında 60 meshlik partiküller ile aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı ile karşılaştırılmıştır. Morfolojik incelemeler ile aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Tüm fotoğraflarda mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmalarına ait aşınma izleri görülmüştür. Tek tip aşındırıcı partikül ile aşındırılan numunede bu izlerin yüzeyin tamamına yayıldığı gözlenirken, partikül karışımları ile aşındırılan numunelerde aşınma izlerinin bazı bölgelerle sınırlı kaldığı gözlenmiştir.

- 60 meshlik partiküller ile aşındırılan numunenin SEM fotoğrafında görülen aşınma izlerinin, karışımlar ile aşındırılan numunelerin aşınma izlerine göre çok daha derin ve uzun olduğu dikkat çekmektedir. Partikül karışımları daha kısa ve yüzeysel izler meydana getirmiştir.

- Bu gözlemler ile partikül karışımlarının aşınma performanslarının partiküllerin tek başlarına kullanılmalarına kıyasla daha düşük olduğu sonucu doğrulanmıştır.

KAYNAKLAR

1. İçdem, C., “Saf titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb alaşımlarının akışkan yatak ortamında termal oksidasyonu”, Yüksek lisans tezi, ***İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü,*** İstanbul, (2007).

2. Akagündüz, E., “Isıl işlem görmüş Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliklerinin mikroyapı ve yüzey çizilme dayanımları açısından incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, ***Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Gebze**,** (2008).

3. Yücel, Z., “Lazer ve Kumlama Yöntemleri ile Ti6Al4V alaşımında fonksiyonel yüzeylerin oluşturulması”, Yüksek lisans tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü,*** Kocaeli, (2008).

4. Akyol, S., “Ti6Al4V Titanyum alaşımının işlenebilirliğinin ısıl işlem yardımıyla artırılması” , Yüksek lisans tezi, ***İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü,*** İstanbul, (2007).

5. *Titanyum Alloys-Physical Properties,*
http://www.azom.com/Details.asp7ArticleIDi1341 , **(Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2007)**

6. Akman, E. “Ti6Al4V alaşımlarının atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi” ,Yüksek Lisans Tezi ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** İzmit (2006)

7. Özdemir, B., "Lazer ile titanyum ve magnezyum alaşımlarının işlenmesi ve kaynağı ", Bitirme Tezi*,* ***Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,*** İzmit, (2006)

8. William F. Smith., "Structure and properties of engineering alloys" , ***McGraw- Hill International Editions,*** 433-487 (1993)

9. Boyer, R., VVelsch, G. and Collings, E.W., "Materials properties handbook Titanium alloys" , ***ASM International,*** 483-491,606-620 (1994)

10. Leyens, C., Peters M, "Titanium and Titanium Alloys" , ***Wiley-VCH***, (2003)

11. Boettcher, C, Bell, T. and Dong, H., "Surface engineering of Timet 550 with oxygen to form a rutile-based, wear resistant coating", ***Metallurgical and Materials Transactions A33***, 1201-1211 (2002)

12. Stachowiak, G.W. and Bachelor, A.W., "Engineering Tribology”, ***Elsevier Buttenvorth Heinemann***, (2001)

13. Ensarioğlu, C., Çakır, M., C., "Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü ", ***Mühendis ve Makine,*** 547, 36-46 , (2005).

14. Zeng, L., Bieler, T.R., "Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of a', a", a" and Q phases in Ti-6Al-4V wire" ***Materials Science and Engineering***, A 392, 403414, (2005)

15. Donachie, M.J., "Titanium A Technical Guide" ***ASM International,*** 55-65, 203-217, (2000)

16. Çaydaş, U., **"**Ti6Al4V alaşımlarının elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme yöntemleriyle incelenebilirliğinin araştırılması", Doktora tezi, ***Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*****,** Elazığ, (2008).

17. Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M., "Titanium Alloys and Their Machinability" , ***Jounal of Materials Processmg Technology,*** 262 (1997).

18. Askeland, D.R., "The Science and Engineering of Materials" , ***VNR nternational,*** USA (1994).

19. Brunette, D.M., TengwaU, B.,Textor, M. and Thomsen, P., "Titanium in Medicine", ***Springer Verlag***, 27-31,239-241 (2001).

20. International Titanium Association, http://www.titanium.org/ , **(Ziyaret Tarihi: 8 Eylül 2010)**.

21. Dişhekimliğinde Titanyum Uygulamaları, http://www.ido.org.tr/dergi.asp?Sayi=91*,* **(Ziyaret Tarihi: 8 Eylül 2010)**.

22. Bayındır, M., K., "Katı parçacık erozyon aşınmasının alüminyum alaşımları üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi", Yüksek lisans, ***Selçuk Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*****,** Konya, (2009).

23. Khalfan, O., M., "Dış yüklerin erosif aşınma üzerine etkisi", Yüksek lisans tezi, ***Selçuk Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*****,** Konya, (2008).

24. Önder, A., "Silindirik parçaların yüzey tornalamasında elde edilen yüzey pürüzlülüğünün aşınmaya etkisi", Yüksek lisans tezi, ***Cumhuriyet Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*****,** Sivas, (1995).

25. Aşınma Hasarları, http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ha/lecture2.pdf, (**Ziyaret Tarihi: 14 Ekim 2010**).

26. Soydaş, S., "Üniversal aşınma test cihazı, tasarımı ve imalatı", Yüksek lisans tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*****,** İzmit, (2006).

27. Yürüker, E., "Aşındırıcı partikül boyut dağılımının erozif aşınmaya etkisi", Yüksek lisans tezi*,* ***Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*****,** İzmit, (2010).

28. Güldaş, A., "Aşınma deney aparatının tasarımı, üretimi ve metal matriksli kompozitlerin aşınma davranışlarının deneysel olarak incelenmesi", Yüksek lisans tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*****,** Ankara, (1998).

29. Taktak, Ş. "Plazmada nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının difizyon kinetiği ve aşınma davranışının incelenmesi", Doktora tezi, ***Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*****,** Sakarya, (2002).

30. Rana F., Stefanescu D.M., Friction properties of Al-1.5 Pct Mg/SiC particulate metal-matrix composites, ***Metallurgical Transactions A***, Volume 20, Issue 8, Pp:1564-1566, (1989).

31. Vingsbo O., Wear and wear mechanisms, ***Proc. Intl. Conf. Wear of Materials, ASME***, Pp: 620, New York, (1979)

32. Sundararajan G., Roy M., Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures, ***Tribology International***, Vol. 30; No. 5, Pp: 339-359, (1997).

33. Bağcı M., İmrek H., CuZn10 ve CuSN10 Bakır alaşımlarının erozif aşınması, ***5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09),*** Pp:1559-1566, Karabük (2009).

34. Finnie I.**,** Some reflections on the past and future of erosion: Part I, ***Wear***, 186-187, Pp:1-10, (1995).

35. Veinthal R., Tarbea R., Kulua P., Kaerdi H., Abrasive erosive wear of powder steels and cermets, ***Wear***, 267, Pp:1838–1844, (2009).

36. Czichos H., Habig K.H., "Reibung und Verschleiß, Systemanalyse", Pruftechnik, Werkstoffe und Konstruktionselement, Friedr. Vieweg & Sohn Verlaggesellschaft GmbH, ***Tribologie-Handbuch***, Wiesbaden, Pp: 128, (1992).

37. Tsiang T.H., Survey of sand and rain erosion of composite materials, ***Journal of Composite Technology and Research***, Volume 8, Pp: 154, (1986).

39. Tilly G. P., Erosion Caused by Airborne Particles, ***Wear*** 14 Pp: 63-79, (1969)

40. Arnold J. C. , Hutchings M., A model for the erosive wear of rubber at oblique impact angles , ***Journal of Physics D: Applied*** Physics , 25 , Pp: A222-A229, (1992).

41. Tewari U.S, Harsha A.P., Hager A.M., Friedrich K., Solid particle erosion of carbon fibre and glass fibre epoxy composites, ***Composites Science and Technology,*** 63 ,Pp 549-557, (2003).

42. Hager A., Friedrich K., Dzenis Y.A., Paipetis S.A., Study of erosion wear of advanced polymer composites. In: Street K, editor. ***ICCM-10 Conference Proceedings***, Whistler, BC, Pp: 155-162, Canada. Cambridge (UK) (1995).

43. Stachowiak G. W., Batchelor A.W., Engineering Tribology, ***Tribology Series***, Volume 24, Page vii, Elsevier Amsterdam, Pp: 577-586, (1993).

44. Heuer V. , Walter G., Hutchings I.M., A study of the erosive wear of fibrous ceramic components by solid particle impact, ***Wear*** 225–229, Pp: 493–501, (1999).

45. Harsha A.P., Kumarjha S., Erosive wear studies of epoxy-based composites at normal incidence. ***Wear*** 265 , Pp: 1129–1135, (2008).

46. Barkoula N. M., Kocsis J. K., Processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites, ***Journal of Materials Science***, Volume 37, Number 18, Pp: 3807-3820, (2002).

47. Shipway P. H., Hutchings I. M., Wear-resistant materials - into the next century Materials in erosion testing with a gas-blast apperatus, ***Wear*** 174 , Pp: 169-175, (1994).

48. Anand K., Hovis S. K., Conrad H., Scattergood R. O., Flux effect in solid particle erosion, ***Wear*** 118, Pp: 243-257, (1987) .

49. Mondal D.P., Das S., Jha A.K., Yegneswaran A.H., Abrasive wear of Al alloy–Al_2O_3 particle composite: a study on the 2 3 combined effect of load and size of abrasive, ***Wear*** 223, Pp: 131–138, (1998).

50. Mondal D.P., Das S., High stress abrasive wear behaviour of aluminium hard particle composites: Effect of experimental parameters, particle size and volume fraction, ***Tribology International***, Volume 39 , Number: 6, Pp: 470–478, (2006).

51. Dundar M. , Inal O.T., Solid particle erosion of a-brass with 5 and 25 mm particles at normal Incidence, ***Wear*** 224, Pp: 226–235, (1999).

52. Amirthan G., Udayakumar A., Prasad B., Balasubramanian M., Solid particle erosion studies on biomorphic Si/SiC ceramic composites, ***Wear*** 268 , Pp: 145–152, (2010).

53. Chen Q., Li D.Y., Computer simulation of solid-particle erosion of composite materials, ***Wear*** 255 , Pp: 78–84, (2003).

54. Tabakoff W., Vittal B.V.R., High Temperature Erosion Study of INCO 600 Metal, ***Wear*** 86, Pp: 89-99, (1983).

55. Sinmazcelik T., Sari N., Erodent Size Effect on the Erosion of Polyphenylene Sulfide Composite, ***Department of Mechanical Engineering, Kocaeli University, Kocaeli***, Turkey, (2009).

56. Scattergood R.O., Routbort J.L., Turner A.P.L., Velocity and size dependence of the erosion rates in silicon, ***Wear*** 67, Pp: 227-232, (1981).

57. Sinmazcelik T., Fidan S., Polimerler ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonun Mekanizmaları ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler, ***Department of Mechanical Engineering, Kocaeli University***, Kocaeli, Turkey, (2009).

58. SAYLAN U. A, Basınçlı Kumlama, http://www.saykar.net/kumlama.html, (**Ziyaret Tarihi: 6 Ekim 2010)**

59. SAYLAN U. A, Alüminyum Oksit Minerali, http://www.saykar.net/aluminyum+oksit.html , (**Ziyaret Tarihi: 6 Ekim 2010)**

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Edirne'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Edirne, lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2004 yılında çift anadal programı (ÇAP) kapsamında aynı üniversite ve fakültede Makine Mühendisliği Bölümü'ne kaydoldu. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılı bahar dönemi sonunda mezun oldu. Makine Mühendisliği Bölümü'ndeki eğitimini 2010 yılı güz dönemi sonunda tamamladı. 2009 yılı güz döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

2007 – 2008 yılları arasında, D.S.C. Otomotiv'de Üretim Mühendisi, 2008 – 2009 yılları arasında aynı firmada Üretim ve Üretim Planlama Takım Şefi olarak çalıştı. 2010 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsü'nde iç bursiyer olarak görev aldı. 2010 yılı Aralık ayından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.