

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

3003 H14 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KATI PARTİKÜL
EROZYONU DAVRANIŞI

YASEMİN YILDIRAN

KOCAELİ 2013

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**3003 H14 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KATI PARTİKÜL
EROZYONU DAVRANIŞI**

YASEMİN YILDIRAN

**Yrd.Doç.Dr. Hülya YETİŞTİREN
Danışman, Kocaeli Üniv.**

**Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Prof.Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.**



Tezin Savunulduğu Tarih: 27.06.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Katı partikül erozyonu literatürde çok çalışılan popüler konulardan biridir. Eroziyona aşınmaya ilişkin çalışmalar iki temel nedenle yürütülmektedir. Birincisi eroziyona aşınmaya maruz kalan 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. Eroziyona aşınma, bir anlamda sistemlere zarar veren, onları aşındırıp kullanılamaz hale getiren bir faktör iken diğer yandan bir makine parçasına istediğimiz yüzey özelliklerini kazandırmak adına etkilerini bilerek kontrollü bir şekilde kullanmayı istediğimiz bir yöntemdir. Tez çalışmada bu iki husus göz önünde bulundurularak 3003 H14 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etki eden parametreler incelenmiş, bu parametrelere bağlı olarak erozyon oranı, yüzey morfolojisi ve yüzey pürüzlülük değerleri incelenerek alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı karakterize edilmiştir.

Yüksek Lisans Tez çalışmalarım boyunca her türlü katkı ve yardımlarını esirgemeyen, değerli fikirleri ile çalışmalarımı yönlendiren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Hülya YETİŞTİREN, Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK ve Yrd. Doç. Dr. Sinan FİDAN'a teşekkür ederim. Karşılaştığım her türlü zorluk karşısında dimdik ayakta kalmamı sağlayan, çalışmalarım sırasında her işe benimle birlikte koşup yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, değerli fikirleri ile çalışmalarımı yönlendiren değerli arkadaşım Arş. Gör. Egemen AVCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sivil Havacılık Yüksekokulu'nda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Alp Eren ŞAHİN'e, lisans öğrencilerimiz Hürol KOÇOĞLU, Harun Arda BALYALI ve Ahmet ÖZTÜRK'e yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek Lisans Tez çalışmalarında yardımlarını ve değerli fikirlerini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı'nda görev yapmakta olan Arş. Gör. Metalürji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Fatih Erdem Baştan'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmalarımın gerçekleşmesine katkıda bulunan Assan Alüminyum ARGE departmanında çalışmakta olan Metalürji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Onur Birbaşar'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her anında hep yanımda olan ve bana cesaret veren aileme çok teşekkür ederim.

Mayıs-2013

Yasemin YILDIRAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
GİRİŞ.....	1
1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	5
1.1. Alüminyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi	5
1.2. Alüminyum ve Alaşımının Genel Özellikleri.....	7
1.3. Alüminyum ve Alaşımının Sınıflandırılması.....	8
1.3.1. Dövme alüminyum alaşımları	9
1.3.1.1. Ticari saflıktaki alüminyum (1XXX serisi)	13
1.3.1.2. Al-Cu ve Al-Cu-Li alaşımları (2XXX serisi).....	13
1.3.1.3. Al-Mn alaşımları (3XXX serisi).....	13
1.3.1.4. Al-Si, Al-Mg-Si alaşımları (4XXX serisi).....	13
1.3.1.5. Al- Mg alaşımları (5XXX serisi).....	13
1.3.1.6. Al-Mg-Si alaşımları (6XXX serisi)	14
1.3.1.7. Al-Mg-Zn alaşımları (7XXX serisi)	14
1.3.1.8. Al-Li alaşımları (8XXX serisi).....	14
1.3.2. Dökme alüminyum alaşımları	15
1.3.2.1. Ticari saflıktaki alüminyum	16
1.3.2.2. Al-Cu alaşımları	16
1.3.2.3. Al-Si alaşımları.....	16
1.3.2.4. Al-Mg alaşımları	17
1.3.2.5. Al-Zn alaşımları.....	17
1.3.2.6. Al-Sn alaşımları.....	17
1.4. Alüminyum ve Alaşımının Kullanım Alanları	17
1.4.1. Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde kullanımı.....	17
1.4.2. Alüminyumun mimaride kullanımı	19
1.4.3. Alüminyumun ambalaj olarak kullanımı	20
1.4.4. Alüminyumun elektrik- elektronikte kullanımı.....	20
2. KATI PARTİKÜL EROZYONU	21
2.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı.....	22
2.2. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı.....	24
2.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütleli Debisi	25
2.4. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu.....	26
2.5. Aşınan Malzeme Özellikleri	28
3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ EROZYON DAVRANIŞININ LİTERATÜR İNCELEMESİ	29
3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi	30
3.2. Aşındırıcı Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	30

3.2.1. Aşındırıcı partikül boyutu etkisi	31
3.2.2. Partikül sertliği, şekil faktörü ve dönüş hızı	31
3.3. Operasyon Parametrelerinin Etkisi	32
3.3.1. Partikül çarpma açısının etkisi.....	32
3.3.2. Partikül çarpma hızının etkisi	33
3.4. Çevresel Etkenler	34
4. GARNET MİNERALİ	35
4.1. Garnet Mineralinin Özellikleri.....	35
4.2. Kullanım Alanları.....	35
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	38
5.1. Aşındırıcı Malzeme	39
5.2. Yöntem	40
5.2.1. Çift disk yöntemi ile aşındırıcı partiküllerin çarpma hızlarının ölçülmesi	41
5.2.2. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin hesaplanması.....	44
5.2.3. Erozyon aşınma deneyleri.....	45
5.2.4. SEM ve EDS analizleri	46
5.2.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri	49
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	50
6.1. Aşındırıcı Partiküllerin Kütleli Debileri ve Hızlarının Değişimi.....	50
6.2. Erozyon Aşınma Deneylerinin Sonuçları	52
6.2.1. Erozyon oranının partikül çarpma açısına göre değişimi.....	54
6.2.2. Erozyon oranının partikül püskürtme basıncına göre değişimi.....	56
6.2.3. Erozyon oranının partikül boyutuna göre değişimi	57
6.2.4. Erozyon oranının partikül çarpma hızına göre değişimi.....	59
6.3. SEM ve EDS Çalışmaları	61
6.3.1. SEM çalışmaları sonuçları	64
6.3.1.1. Partikül çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi.....	64
6.3.1.2. Partikül püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkisi	66
6.3.1.3. Aşındırıcı partikül boyutunun yüzey morfolojisine etkisi	70
6.3.2. EDS çalışmaları sonuçları	73
6.3.2.1. Partikül çarpma açısının etkisi	73
6.3.2.2. Partikül püskürtme basıncının etkisi.....	76
6.3.2.3. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisi	78
6.4. Aşınmış Yüzeylerin Pürüzlülük Değerlerinin Değişimi.....	80
6.4.1. Partikül çarpma açısının etkisi.....	81
6.4.2. Partikül püskürtme basıncının etkisi	83
6.4.3. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisi	85
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR.....	93
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	98
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Alüminyumun alaşım elementleri ile yaptığı alaşımlar	9
Şekil 1.2. Audi A8 aracının alüminyum iskeleti	19
Şekil 1.3. Sera yapımında kullanılan alüminyum iskeletler	20
Şekil 2.1. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler	22
Şekil 2.2. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri	23
Şekil 3.1. Alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışına etki eden parametreler	29
Şekil 3.2. Aşındırıcıların SEM görüntüsü a) SPS b) NAS	32
Şekil 5.1. 3003 H14 numunelerin boyutları	39
Şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcılar (a, b) 80 mesh, (c, d) 180 mesh	40
Şekil 5.3. Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması	41
Şekil 5.4. Çift disk partikül hızı ölçme sisteminin CAD ve gerçek resimleri	42
Şekil 5.5. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler	42
Şekil 5.6. Döner disk hız ölçüm hız hesap formu	44
Şekil 5.7. Katı partikül erozyonu test düzeneği	45
Şekil 5.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı	46
Şekil 5.9. SEM çalışmasında kullanılan yöntemler	47
Şekil 5.10. Farklı görüntüleme açısında gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi	48
Şekil 5.11. Optik profilometre cihazı	49
Şekil 6.1. Ortalama partikül çarpma hızların püskürtme basıncı ve partikül boyutuna bağlı değişimi	50
Şekil 6.2. Aşındırıcı partiküllerin basınca bağlı hız dağılımları	51
Şekil 6.3. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi	52
Şekil 6.4. Erozyon oranının katı partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi a) partikül boyutu 80 mesh, b) partikül boyutu 180 mesh	55
Şekil 6.5. Erozyon oranının katı partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi a) partikül boyutu 80 mesh, b) partikül boyutu 180 mesh	56
Şekil 6.6. Erozyon oranının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi partikül püskürtme basıncı a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar (erozyon süresi 20 saniye)	58
Şekil 6.7. Erozyon oranının partikül hızına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu 80 mesh, erozyon süresi 20 saniye)	60
Şekil 6.8. Erozyon oranının partikül hızına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu 180 mesh, erozyon süresi 20 saniye)	60
Şekil 6.9. SEM çalışmaları	63

Şekil 6.10. Farklı çalışma açısında gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi	63
Şekil 6.11. a) 15°, b) 60°, c) 15°, d) 60° çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)	64
Şekil 6.12. a) 15°, b) 60° çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerin 1kx büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)	66
Şekil 6.13. a) 1,5 bar, b) 4 bar, c) 1,5 bar, d) 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)	67
Şekil 6.14. a) 1,5 bar, b) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı:15 derece, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)	69
Şekil 6.15. a) 80 mesh, b) 180 mesh, c) 80 mesh, d) 180 mesh aşındırıcı boyutu ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, püskürtme basıncı: 1,5 bar).....	71
Şekil 6.16. a) 80 mesh, b) 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı partikül çarpma açısı: 15°, püskürtme basıncı: 4 bar	72
Şekil 6.17. a) 15° çarpma açısı x500 büyütme, b) 60° çarpma açısı x500 büyütme, c) 15° çarpma açısı x2500 büyütme, d) 60° açısı x 2500 büyütme.....	74
Şekil 6.18. a) 15° çarpma açısı x500 büyütme, b) 60° çarpma açısı x500 büyütme, c) 15° çarpma açısı x2500 büyütme, d) 60° çarpma açısı x500 büyütme açısı ile aşındırılmış numunelerin x2500	75
Şekil 6.19. a) 1,5 bar püskürtme basıncı x500 büyütme, b) 4 bar püskürtme basıncı x500 büyütme, c) 1,5 bar püskürtme basıncı x2500 büyütme, d) 4 bar püskürtme basıncı x2500 büyütme	77
Şekil 6.20. a) 1,5 bar püskürtme basıncı x500 büyütme, b) 4 bar bar püskürtme basıncı x500 büyütme, c) 1,5 bar püskürtme basıncı x2500 büyütme, d) 4 bar bar püskürtme basıncı x500 büyütme	78
Şekil 6.21. a) 80 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme, b) 180 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme, c) 80 mesh boyutunda aşındırıcı x2500 büyütme, d) 180 mesh boyutunda aşındırıcı x2500 büyütme.....	79
Şekil 6.22. a) 80 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme, b) 180 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme, c) 80 mesh mesh boyutunda aşındırıcı x2500 büyütme, d) 180 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme	80
Şekil 6.23. Partikül çarpma açısına bağlı olarak ortalama pürüzlülük değişimi a) 1,5 bar, b)3 bar, c) 4 bar	81
Şekil 6.24. 80 mesh boyutundaki aşındırıcı,4 bar püskürtme basıncı, partikül çarpma açısı a)15 derece, b)30 derece, c)45 derece d) 60 derecede	82

Şekil 6.25. Püskürtme basıncına bağlı olarak ortalama pürüzlülük değişimi a) 80 mesh, b) 180 mesh	84
Şekil 6.26. 80 mesh boyutundaki aşındırıcı,45 derece püskürtme açısında, püskürtme basıncı a)3 bar, b) 4 bar	84
Şekil 6.27. 180 mesh boyutundaki aşındırıcı,15 derece püskürtme açısında püskürtme basıncı a) 3 bar, b) 4 bar	85
Şekil 6.28. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak pürüzlülük değişimi a) 1,5 bar, b) 4 bar.....	86
Şekil 6.29. 1,5 bar püskürtme basıncında, 30 derece çarpma açısında, aşındırıcı boyutu a) 80 mesh, b)180 mesh	86
Şekil 6.30. 4 bar püskürtme basıncında, 45 derece çarpma açısında, aşındırıcı boyutu a) 80 mesh, b) 180 mesh	87

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Yeryüzünde en çok bulunan on elementin kimyasal sembolleri ve bulunma sıklıkları	5
Tablo 1.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının standartlarda gösteriliş biçimleri	10
Tablo 1.3. Isıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları malzemeler için temper durumları	10
Tablo 1.4. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösterilişi	16
Tablo 5.1. 3003 H14 alüminyum alaşımının önemli özellikleri.....	38
Tablo 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan garnet minerallerinin özellikleri.....	39
Tablo 5.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları	40
Tablo 5.4. Eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler.....	46
Tablo 5.5. SEM cihazının özellikleri	47
Tablo 5.6. Optik profilometre cihazının özellikleri	49
Tablo 6.1. Eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler.....	53

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

α	: SEM görüntüleme açısı ($^{\circ}$)
θ	: İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı ($^{\circ}$)
Δm_s	: Örnek numunenin kütle kaybı (mg)
E	: Erozyon oranı (g/g)
L	: Diskler arası mesafe (m)
m_e	: Aşındırıcı kütlesi (mg)
n	: Disklerin dönüş hızı (ms^{-1})
t	: Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)
V	: Partikül çarpma hızı (ms^{-1})

Kısaltmalar

AA	: Aluminum Association (Alüminyum Birliği)
BSE	: Back Scatter Electrons (Geri Saçılan Elektronlar)
EDS	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektrometresi)
HVOF	: High Velocity Oxy Fuel (Yüksek Hızla Kaplama)
SE	: Seconder Electrons (İkincil Elektronlar)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

3003 H14 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KATI PARTİKÜL EROZYONU DAVRANIŞI

ÖZET

Bu çalışmada 3003 H14 Alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışının karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 3003 H14 alüminyum alaşımı numuneler özel olarak tasarlanmış erozif aşınma test düzeneğinde farklı partikül çarpma açıları (15°, 30°, 45° ve 60°), farklı püskürtme basınçları (1,5, 3 ve 4 bar) ve farklı boyutta (80 ve 180 mesh) aşındırıcı partiküller (garnet) kullanılarak aşındırılmıştır. Alüminyum alaşımı numunelerinin erozyon oranının erozyon parametrelerine bağlı olarak değişimi hesaplanmıştır. Numunelerin erozyon oranı partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak önemli oranda değişiklik göstermiştir. 15° çarpma açısında tüm püskürtme basıncı ve partikül boyutlarında maksimum erozyon oranı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak tüm partikül çarpma açılarında ve tüm aşındırıcı partikül boyutlarında yükselen püskürtme basıncı ile erozyon oranı yükselmiştir. Diğer yandan numunelerin erozyon oranı aşındırıcı partikül boyutunun artması ile azalmıştır. Sonuç olarak alüminyum alaşımının 15° çarpma açısında, 4 bar püskürtme basıncında ve 180 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılması durumunda maksimum erozyon oranı ortaya çıkmıştır. Aşınmış numunenin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Numunelerin yüzeyleri enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile de incelenmiştir. 15° ve 30° çarpma açılarında mikrosürme ve mikrokesme erozyon mekanizmaları görülürken, plastik deformasyondan kaynaklanan derin çukurlar ve vadiler 45° ve 60° çarpma açılarında gözlemlenmiştir. Buna ek olarak numunelerin yüzeyinde saplanmış partiküller EDS analizi ile açıkça saptanmıştır. Aşınmış numunelerin optik profilometre ile yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş, ortalama pürüzlülük değerlerinin erozyon parametrelerine bağlı olduğu saptanmıştır. Ortalama pürüzlülük değerlerinin püskürtme basıncının ve partikül boyutunun artması ile arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3003 H14 Alüminyum Alaşımı, Katı Partikül Erozyonu, SEM, Yüzey Pürüzlülüğü.

SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIOUR OF 3003 H14 ALUMINUM ALLOY

ABSTRACT

The aim of this study is to characterize the solid particle erosion behavior of 3003 H14 Aluminum alloy. For that purpose, 3003 H14 samples were eroded in specially designed erosion test rig under various particle impingement angles (15°, 30°, 45° and 60°) and acceleration pressures (1,5, 3 and 4 bar) by using various sizes (80 and 180 mesh) of erodent particles (garnet). The erosion rates of samples were calculated depending on the erosion parameters. The erosion rates have varied dramatically depending on particle impingement angle, acceleration pressure and erodent particle size. The maximum erosion rates were observed at 15° impingement angles at all acceleration pressures and particle sizes. Moreover, erosion rates were increased with increase in acceleration pressure at all particle impingement angles and particle sizes. On the other hand erosion rates were decreased with increase in erodent particle sizes. Hence, maximum erosion rate was observed when the aluminum alloy eroded at 15° impingement angle and 4 bar pressure by using 180 mesh erodent particles. The eroded surfaces of the samples were analyzed by SEM. The surfaces of the samples were also investigated by using energy dispersive X-ray analysis (EDS) in SEM studies. Microcutting and microploughing erosion mechanisms were observed at 15° and 30° impingement angles, while deep cavities and valleys formed due to plastic deformation were observed at 45° and 60° impingement angles. Moreover, embedded erodent particles were clearly detected on the surfaces by EDS analysis. By using an optical profilometer roughness values of the eroded surfaces were calculated, mean height were calculated depending on the erosion parameters. It was observed that mean height increases with increases in acceleration pressures and particle sizes.

Keywords: 3003 H14 Aluminum Alloy, Solid Particle Erosion, SEM, Surface Roughness

GİRİŞ

Çalışma şartları altında mühendislik malzemeleri birçok zararlı dış etmene maruz kalmaktadır. Tozlu çalışma şartları altında katı partiküllerin yüksek hızlarda tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarpmaları sonucunda erozif aşınma meydana gelmekte ve malzemeler hasara uğramaktadır. Erozif aşınma ile ilgili ilk çalışmalar 1950' lerin başlarında başlamış ve bu tarihten itibaren malzemelerin erozif aşınma davranışları ile ilgili çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir.

Katı partikül erozyonu yukarıdaki paragrafta da kısaca açıklandığı gibi mühendislik malzemelerine zarar veren ve malzeme kayıplarına yol açan bir süreçtir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmaların büyük çoğunluğu bu süreç ile oluşan zararların en aza indirilebilmesi ve önlenbilmesine yönelik çalışmalardır. Erozif aşınma diğer aşınma süreçlerinde olduğu gibi birçok farklı parametrenin etkisi altında gerçekleşen karmaşık bir mekanizmadır. Bu nedenle konu ile ilgili yapılan birçok çalışma farklı mühendislik malzemelerinin farklı parametreler altında erozif aşınma davranışının anlaşılmasına yönelik gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan erozif aşınma malzemelerin yüzeylerinin işlenmesi ve temizlenmesi için uygulanan kumlama ve su jeti işlemlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu işlemlerde malzemeler istenilen parametreler altında erozif aşınma ile işlenmektedir.

Alüminyum ve alaşımlarının kullanımı, yüksek dayanım/ağırlık oranı ile özellikle havacılık endüstrisinde çok büyük öneme sahiptir. Alüminyum alaşımlarının yüksek korozyon direnci ve hafifliği bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Tüm bu olumlu özelliklerine karşın alüminyum alaşımları, zayıf aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın gerçekleştiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Alüminyum alaşımlarının kullanıldığı mühendislik uygulamalarında aşınma sonucunda enerji ve malzeme kaybı olmaktadır. Bunlara ek olarak aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan oksit yapı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Bu durumda alüminyum ve alaşımlarının özellikle tozlu şartlar altında çalışan uygulamalarda katı partikül erozyonuna maruz kalması ve zarar görmesi

kaçınılmazdır. Bu noktada son yıllarda özellikle havacılıkta kullanılan alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışına yönelik çalışmalar üzerine odaklanılmıştır. Havacılık malzemelerinin yanı sıra tozlu şartlar altında çalışan uygulamalarda kullanılan alüminyum alaşımlarının da katı partikül erozyonu ile hasara uğramaları kaçınılmazdır. Diğer yandan erozif aşınma alüminyum alaşımlarının işlenmesi ve bu malzemelerde istenilen yüzey özelliklerinin kazandırılması için etkilerini bilerek kullanmak istediğimiz bir yöntemdir. Bu durumda alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışlarının detaylı bir şekilde anlaşılması hem bu malzemelerde erozif aşınma nedeniyle oluşabilecek hasarların indirgenmesi ve önlenmesi aşamasında, hem de bu malzemelerin işlenmesi ve bu malzemelere istenilen yüzey özelliklerinin kazandırılması aşamasında büyük önem arz etmektedir. Tez çalışması kapsamında bu kavramdan hareket edilerek alüminyum alaşımlarının farklı erozif aşınma parametreleri altında erozif aşınma davranışlarının deneysel olarak araştırılması ve anlaşılması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında 3003 H14 alüminyum alaşımı, farklı partikül çarpma açılarında, farklı püskürtme basınçlarında ve farklı boyutlarda aşındırıcı partiküller ile aşındırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda tüm bu parametrelerin alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışına olan etkileri deneysel çalışmalar sonrasında hesaplanan erozyon oranları yorumlanarak irdelenmiştir. Bu çıktılar katı partikül erozyonuna maruz kalan uygulamalarda erozif aşınma hasarının en aza indirilmesi için doğru tasarımların gerçekleştirilmesi noktasında büyük önem arz edecektir. Diğer yandan tez çalışmasının bu çıktıları ile alüminyum alaşımlarının ve yüzeylerinin işlenmesi esnasında işlem parametrelerin seçimi ve optimizasyonuna katkı sağlanacaktır.

Yukarıda özetlenen çıktılarına ulaşılabilmesi aşamasında erozyon oranlarının yanı sıra aşındırılan malzemelerin yüzey morfolojilerinin incelenmesi de çok önemlidir. Bu amaçla tez çalışması kapsamında aşındırılan numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizleri ile yüzey morfolojileri detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Aşınma sonrası malzeme yüzeyinde meydana gelen hasarın analizi ile alüminyum alaşımında hangi parametrelerin ne tür hasarlara yol açtıkları incelenmiştir. Oluşan bu hasarların hangi aşınma mekanizmaları ile meydana geldiğinin belirlenmesi önemli bir husustur. Tez

çalışmasında özellikle malzemede görülen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında birçok farklı parametrenin 3003 H14 alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM çalışması gerçekleştirilmiştir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin farklı detektörler ile farklı modlarda (SE ve BSE) görüntüleri alınmış, malzeme yüzeyine saplanan partiküller enerji dağılım spektrometresi analizi (EDS) ile derinlemesine incelenmiş ve son olarak aşınmış yüzeylerden farklı çalışma açılarında görüntüler alınarak incelenmiştir. Tez çalışmasında farklı görüntüleme açılarında alınan aşınmış yüzey morfolojilerinin görüntüleri özgünlük taşımaktadır. Bu görüntüleme metodu ile aşınmış malzeme yüzeylerinde ve erozif aşınma mekanizmalarında derinlik algısı arttırılmıştır. Bu görüntülerin farklı modlarda çekilen görüntüler ve EDS analizi sonuçları ile bir arada değerlendirilmeleri ile malzemelerin erozif aşınma davranışlarının elektron mikroskopisi ile incelenmesine özgün bir bakış açısı kazandırılmıştır.

Tez çalışmaları kapsamında aşındırılmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri optik profilometre yardımı ile incelenmiş, aşındırılmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri elde edilmiştir. Operasyon parametlerinin aşınmış yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine ve 3 boyutlu yüzey morfolojilerine olan etkileri araştırılmıştır.

Yüksek Lisans Tez çalışmasında ilk bölümlerde Alüminyum alaşımları, katı partikül erozyonu, Alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışları ve garnet minerali ile ilgili literatür bilgileri verilmiştir. Bu bölümlerden sonra tez çalışmasında kullanılan malzeme, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu bölümden sonra gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları üç ayrı bölüm içerisinde verilmiştir. Birinci bölümde 3003 H14 alüminyum alaşımının erozyon oranının erozif aşınma test parametrelerine bağlı olarak değişimleri irdelenmiştir. İkinci aşamada aşındırılmış yüzeylerin morfolojilerindeki değişimler ve malzemede görülen etkin aşınma mekanizmaları SEM ve EDS analizleri yardımıyla elde edilen sonuçlar ile verilmiştir. Üçüncü aşamada ise aşındırılmış yüzeylerin pürüzlük değerleri, 2 ve 3 boyutlu görüntüleri

verilmiş ve yorumlanmıştır. Son bölümde ise tez çalışmasının sonuçları akademik ve endüstriyel bakış açıları ile genel hatları ile ortaya konmuştur.

1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

1.1. Alüminyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi

Alüminyum, yeryüzünün bileşiminde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen, endüstriyel çapta üretimi 1886 yılında elektroliz yönteminin kullanımının başlanması ile gerçekleşmiştir. Tablo 1.1’ de doğada en çok bulunan elementler verilmiştir.

Tablo 1.1. Yeryüzünde en çok bulunan on elementin kimyasal sembolleri ve bulunma sıklıkları

Element	Kimyasal Sembol	Doğada Bulunabilirlik %
Oksijen	O	47,3
Silisyum	Si	27,7
Alüminyum	Al	7,9
Demir	Fe	4,5
Kalsiyum	Ca	3,5
Sodyum	Na	2,5
Potasyum	K	2,5
Magnezyum	Mg	2,2
Titanyum	Ti	0,5
Hidrojen	H	0,1

Alüminyum, kimyasal aktivitesinin yüksek olması nedeniyle doğada saf halde bulunmamaktadır. Bu nedenle üretimi demir oksit ve alüminyum silikattan oluşan boksit cevherinden yapılır. Tablo 1.1’ de görüldüğü gibi, yerkabuğunun % 7,9’u alüminyumdur ve yerkabuğu içerisinde yaklaşık 250 farklı alüminyum minerali bulunmaktadır. Bu minerallerin en önemli grupları silikatlar ve oksit hidrattardır. Günümüzde alüminyum üretiminin en önemli bileşiği olan boksit bir hidrattır.

Bir alüminyum minerali olan alum Yunanlılar ve Romalılar tarafından bilinmekte ve harç olarak kullanılmaktaydı. 1746 yılında J.H. Pott alumdan alüminayı (Al_2O_3)

ayırıştır [1, 2]. O zamanlar içerisinde A.L. Laosiier’inde olduğu birkaç bilim adamı alüminanın bilinmeyen bir metalin oksidi olduğuna inanmışlardır.

Alüminyumun oksijene olan ilgisinin fazla olması nedeniyle ne karbon ne de bilinen indirgeyiciler alüminyumun oksidini redüklemede etkili olmamıştır. 1807 yılında H. Davy alüminyum oksit halindeki bileşğinden ilk ayıran ve kısmi olarak elde eden kişi olmuştur. Elektrotermik ve elektrokimyasal yöntemle küçük miktarda Al-Fe alaşımını ayırmayı başararak, bunu alüminyum olarak adlandırmıştır.

Alüminyumun tarihi geçmişten bugüne üç ayrı dönem ile anlatılabilir. Birinci dönemde H.C. Oersted, 1825’de bir çeşit cıvalı bileşik olan potasyum amalgamının alüminyum klorüre etkisi sonucu açığa çıkan üründen cıvayı ayırarak alüminyum elde etmiştir. Fakat bu yeni metalin özelliklerini belirleyememiştir. Sadece rengini ve çinkonun parlaklığına sahip olduğunu tespit etmiştir. İki yıl sonra F. Wöhler, metalik potasyumla alüminyum klorürü ısıtıp karıştırarak küçük miktarda alüminyum gri toz şeklinde üretmiştir. Ancak elde edilen bu küçük miktardaki metalik alüminyumun özellikleri belirlenememiştir. Wöhler, 1845 yılında alüminyumun bilinmeyenlerine yeniden dönmüştür. Bu kez, buhar halindeki $AlCl_3$ ’ü ergimiş potasyum üzerinden geçirerek her biri 10-15 mg olan alüminyum küreciklerini elde etmiştir. Üretilen alüminyumun ergime noktası, yoğunluğu, dövülebilme ve çekme özellikleri belirlenmiştir. Wöhler’in bu başarılı çalışmalarıyla alüminyumun elde edilmesinin ve özelliklerinin belirlenmesinin birinci dönemi kapanmıştır.

İkinci dönem teknik alüminyum üretim dönemi 1854 yılında H.St. Claire Deville adlı Fransız okul öğretmeni tarafından başlatılmıştır. Deville, alüminyum sodyum tetra klor alüminattan ısı indirgeme yoluyla üretmiştir. Böylece sodyum, çok pahalı potasyum yerine indirgen olarak ortaya çıkmıştır. Alüminyumun hafifliği onun üzerindeki ilgiyi arttırmıştır. İlk üretilen alüminyumda saflık % 92 civarında ve ana safsızlıklar demir ve silisyumdan oluşmuştur.

1854 yılından sonra alüminyum üretim teknolojisi sürekli iyileştirilerek kalite ve üretimi artırma, üretim maliyetini düşürme çalışmaları yapılmıştır. Fransa’da ilk kurulan tesiste günde 2 kg alüminyum üretilirken, 1857’de bu miktar 50 kg/gün’e

saflığı da % 96-97'ye erişmiştir. Tüm kimyasal yöntemlere rağmen, ikinci dönemde alüminyum üretimi istenilen düzeylere erişememiştir.

Üçüncü dönem, bugünkü endüstriyel alüminyum üretiminin temeli olan süreç için 23 Nisan 1886'da P.L.T. Heroult ve aynı yılın 9 Temmuz'unda Amerika'da C.M. Hall tarafından, birbirlerinden habersiz olarak, ergimiş kriyolit içerisinde çözünen alüminadan elektroliz yoluyla alüminyum üretimi için patent istemeleri ile başlamıştır. Bu nedenle Hall-Heroult olarak adlandırılan bu yöntemin endüstriye uygulanmasıyla alüminyum üretimi ani olarak artış göstermeye başlamıştır. Bu yöntem günümüzde birincil alüminyum üretiminde halen kullanılmaktadır. Bu sebeple 1886 yılı alüminyum endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilir. 1886 yılında Werner Von Siemens'in dinamoyu keşfi ve 1892 yılında K.J. Bayer'in, boksitten alümina eldesini sağlayan Bayer prosesini bulması ile alüminyumun endüstriyel çapta üretimi kolaylaşmış ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu sayede alüminyum, demir çelikten sonra dünyada en çok kullanılan ikinci metal olmuştur [1].

1.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

Demir dışı metaller demir esaslı metallere göre hafiflik, korozyona dayanıklılık, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, güzel görünüş ve kolay işlenebilme gibi bazı üstün özellikleri nedeniyle endüstride önemli kullanım alanına sahiptirler. 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, diğer metallerle karşılaştırıldığında, alüminyum endüstriyel çapta üretimi yapılan yeni metallere biri olmasına rağmen, bugün bakır, kurşun, kalay ve çinko gibi tüm demir dışı metallerin toplam kullanımından daha fazla miktarda kullanılır. Alüminyumun kullanımını arttıran özelliklerinin başında hafifliği gelmektedir. Özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$ olup demirinkinin üçte biri kadardır. Alaşımsız halde çekme mukavemeti 90 N/mm^2 civarında olmasına karşın alaşımlandırma ile kolayca 220 N/mm^2 ve ısı ile işleme (çökeltme sertleştirme) 440 N/mm^2 'ye yükseltilebilir. Bu değer yapı çeliğinin mukavemetine yakındır. Özgül mukavemet çekme mukavemeti/ölgül ağırlık olarak tanımlandığına göre alüminyum alaşımlarının ölgül mukavemetinin yapı çeliklerinin üç katına yakın olduğu kolayca görülür. Bu nedenle alüminyum alaşımları hafifliğin önemli olduğu taşıt araçları ve uçak üretimine çok elverişlidir.

Saf alüminyumun elektriksel iletkenliği yüksek olup bakırınkinin % 60'ı kadardır. Diğer taraftan bakırın özgül ağırlığının alüminyumunkinin üç katından fazla olduğu göz önüne alınırsa birim ağırlık başına düşen iletkenlik yönünden bakırdan daha üstün olduğu görülür. Bu nedenle geniş açıklıklı yüksek gerilim hatlarında çelik taşıyıcılarla birlikte en uygun iletken alüminyumdur.

Yüzey merkezli kübik kafese sahip alüminyum büyük ölçüde plastik şekil değiştirebilir. Haddeme sonucu % 99 oranında plastik şekil değiştirerek folyo haline getirilebilir. Ayrıca toksit olmadığından gıda endüstrisinde ve paketleme işlemlerinde çok yaygın olarak kullanılır.

Alüminyumun diğer bir üstün özelliği korozyona dayanıklılıktır. Yüzeyinde oluşan oksit tabakası alüminyumu korozyona karşı korur. Ayrıca anodizasyon veya eloksal işlemi ile bu koruyucu tabakalarının kalınlığı artırılabilir. Ancak alkali eriyikler bu oksit tabakasını bozduğundan koruyuculuk etkisi kaybolur. Bu nedenle yapılarda harç, sıva gibi kireç içeren malzemelerin alüminyum elemanlara sürülmemesi gerekir. İnşaat süresinde bu elemanların üzeri bir bantla örtülmelidir [2].

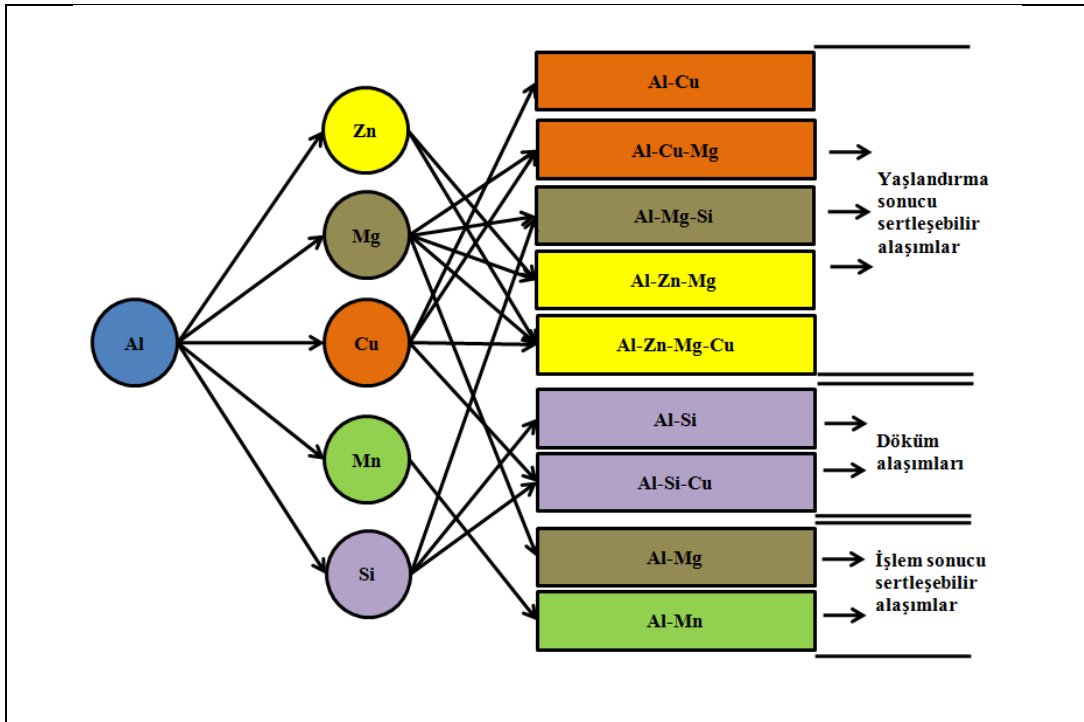
1.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Saf Alüminyum yumuşak ve sünektir. Belirli bir seviyede mekanik özellikler istenen ana kullanım alanları söz konusu olduğunda bu özellik saf bir metalin sağlayabileceği belirli sınırlar içerisinde kalmaktadır. Bu sebeple fiziksel, mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla diğer metallerle alaşımlandırılır.

Alüminyum Alaşımları özelliklerine göre ve kullanım şartlarına bağlı olarak dövme ve dökme olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Dövme Alüminyum alaşımları dövme ve plastik şekil verme usulleri ile şekillenirken, dökme alüminyum alaşımları sadece döküm yolu ile şekillendirilebilir [3].

Bu iki grup kendi içinde ısıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları olmak üzere alt bölümlere ayrılırlar. Isıl işlem uygulanabilen alaşımların mekanik özellikleri soğuk şekil verme ve ısıl işlem ile gerçekleştirilirken, ısıl işlem uygulanmayan alaşımlarda sadece soğuk şekil verme

ile mukavemet artışı gerçekleştirilir [3]. Birçok metalik element alüminyum ile alaşım yapmaktadır. Ancak bunların bir kısmı ticari olarak kullanılabilen alaşımlardır. En genel kullanılan alaşım elementleri Cu, Si, Zn, Mg ve Mn'dır. Şekil 1.1' de görüldüğü gibi bu elementler alüminyumun ana özelliklerini geliştirmek amacıyla yalnız başlarına veya çeşitli kombinasyonlarla ilave edilirler [2]. Bu bölüm içerisinde Şekil 1.1' de gruplandırılan alüminyum alaşım serileri kısa bir şekilde anlatılacaktır.



Şekil 1.1. Alüminyumun alaşım elementleri ile yaptığı alaşımlar [1]

1.3.1. Dövme alüminyum alaşımları

Dövme Alüminyum alaşımlarını tayin etmek için neredeyse tüm dünya çapında Amerikan sistemi kullanılır ve Washington'da bulunan Alüminyum Birliği (Aluminum Association (AA)) tarafından bu sistem yönlendirilir [4].

Her malzeme için iki parçadan oluşun referans numarası belirlenmiştir. Örneğin; 3103-H14, 6082-T6, 5083-O. Tireden önceki dört rakam alaşımı belirtirken, tireden sonraki semboller ise alaşıma uygulanan kondüsyon veya temperi gösterir. Alüminyum alaşımları ısıt işlem görebilen ve ısıt işlem göremeyen alaşımlar olarak ikiye ayrılır. Isıt işlem göremeyen alüminyum alaşımları ilk örnekte olduğu gibi

tireden sonra H-sayı ile ifade edilirken, ısıtım işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları ikinci örnekte olduğu gibi tireden sonra T-sayı ile ifade edilir [2, 4].

Dövme Alüminyum alaşımları plastik deformasyon yoluyla şekillendirilen alaşımlardır [2]. Isıtım işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarının en önemli özelliği yaşlandırma ile sertleştirilebilmeleridir. Çökelme sertleştirilmesi olarak da adlandırılan bu olay, alaşımların mekanik özelliklerini çok belirgin bir şekilde iyileştirmektedir. Isıtım işlem uygulanmayan dövme alüminyum alaşımlarının en belirgin özelliği soğuk işlenmiş durumda kazandıkları rijitlikleri ve yüksek korozyon dirençleridir. Isıtım işlem uygulanmayan dövme alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri soğuk şekil verme yöntemleri ile iyileştirilir [3, 5].

Tablo 1.2’ de alüminyumun alaşımları içerdiği alaşım elementlerine göre diziliş bulunmaktadır. Dövme alaşımları, döküm alaşımlarına nazaran belirgin bir biçimde kompozisyon ve mikro yapısal özellikleri bakımından farklıdır [2-5].

Tablo 1.2. Dövme alüminyum alaşımlarının standartlarda gösteriliş biçimleri [2, 4]

Dövme Alüminyum Alaşımları	Alaşım Elementi	Yaşlandırılabilir
1XXX	Min. %99 Saflıkta Alüminyum	Hayır
2XXX	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Evet
3XXX	Al-Mn	Hayır
4XXX	Al-Si, Al-Mg-Si	Evet
5XXX	Al- Mg	Hayır
6XXX	Al-Mg-Si	Evet
7XXX	Al-Mg-Zn	Evet
8XXX	Al-Li, Sn, Zr, B	Evet
9XXX	Kullanılmayan Seri	-

Pekleştirilmiş alaşımların temper sertlikleri standart olarak çeyrek, yarım, üç çeyrek ve tam sert ile ifade edilir. Tablo 1.3’te ısıtım işlem göremeyen alüminyum alaşımlarının temper durumu verilmiştir. Tabloda H-sayı en yaygın kullanılan semboldür. Tabloda temper H-sayı ile ifade edilmektedir. H’ den sonraki ikinci basamaktaki sayı sertliği gösterdiği için çok önemlidir. Buradaki sayı 8’e bölünerek

sertlik ifade edilir. Örneğin H16 ile temperlenmiş alaşım için $H16=6\div 8=3/4$ sertte denilir. H'den sonraki ilk basamak ise son sertliği veren işlemi belirtmektedir [4,6].

Tablo 1.3. Isıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları malzemeler için temper durumları [4,6]

Kondüsyon	Temper Durumları		
	Soğuk Şekil Değişirme	Soğuk Şekil Değişirme Kısmen Tavlama	Dengelenmiş
Tamamen Sert	H18	H28	H38
$3/4$ Sert	H16	H26	H36
$1/2$ Sert	H14	H24	H34
$1/4$ Sert	H12	H22	H32
Tavlanmış	O		
Isıl İşlem Uygulanmış	F		

Tablo 1.3'de ısıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları temper durumları kısaltmaları ile verilmiştir. Aşağıda Tablo 1.3'te verilen temper durumlarının kısaltmaları açıklanmıştır.

Temel temper durumları;

F: Üretildiği gibi. Pekleşme üzerine kontrol yok, mekanik özellikler sınırlaması yok

O: Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş. En düşük dayanım ve en yüksek sünekliğe sahip temper

H: Pekleştirilmiş

T: F ve O' dan başka kararlı temperler üretmek için ısıl işlem uygulanmış

Pekleştirilmiş alt bölümler;

H1X: Sadece soğuk şekillendirilmiş (X soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder).

H12: Soğuk şekillendirme, O ve H14 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar.

H14: Soğuk şekillendirme, O ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar.

H16: Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar.

H18: Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar.

H19: Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 13, 789 MPa fazla dayanım sağlar.

H2X: Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavllanmış.

H3X: Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş.

Isıl işlem uygulanmış alt bölümler;

W: Çözündürme uygulanmış

T: Yaşlandırılmış

T1: Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış

T2: Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış.

T3: Çözündürme uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış.

T4: Çözündürme uygulanmış ve doğal olarak yaşlandırılmış.

T5: Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş ve yapay olarak yaşlandırılmış.

T6: Çözündürme uygulanmış ve yapay olarak yaşlandırılmış.

T7: Çözündürme uygulanmış ve aşırı yaşlandırma ile kararlı hale getirilmiş.

T8: Çözündürme uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış.

T9: Çözündürme uygulanmış, yapay olarak yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş.

T10: Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış [6].

1.3.1.1. Ticari saflıktaki alüminyum (1XXX serisi)

Bu seri yüksek saflıkta alüminyum içerir. Bu alaşımların karakteristik özellikleri; mükemmel korozyon direnci, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, düşük mekanik özelliği ve mükemmel işlenebilirlikleriyle sınıflandırılabilirler. % 99 ve daha yüksek saflıktaki alüminyum içeren bu seri elektrik ve kimya endüstrisinde önemli rol oynar [2, 5].

1.3.1.2. Al-Cu ve Al-Cu-Li alaşımları (2XXX serisi)

2XXX serisinin ana alaşım elementi bakırdır. Bu alaşımlara genelde çözelti ısıtma işlemi uygulanması ile karbonlu çeliklerin mekanik özelliklerine benzer özellik elde edilebilir. Bu seri genelde uçakların kanat yüzeylerinde kullanılır [2, 5].

1.3.1.3. Al-Mn alaşımları (3XXX serisi)

3XXX serisinin ana alaşım elementi mangandır. Bu alaşımlara genelde ısıtma işlemi uygulanmadığı halde 1XXX serisi alaşımlardan % 20 oranında daha mukavimlerdir. Bu seri alaşımlar da yiyecek konserve kutularında, mutfak takımlarında, depolama tanklarında kullanılmaktadır [2, 5].

1.3.1.4. Al-Si, Al-Mg-Si alaşımları (4XXX serisi)

4XXX serisinin ana alaşım elementi silisyumdur. Silisyum yeterli miktarda eklendiğinde (% 12 civarında) gevreklik oluşturmadan ergime aralığının daralmasına neden olur. Bu sebepten dolayı alüminyumun bağlamak üzere kaynak teli ve sert lehim alaşımları kullanılır [2, 5].

1.3.1.5. Al- Mg alaşımları (5XXX serisi)

5XXX serisinin ana alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyumun alüminyuma ilavesi, deniz suyu korozyonuna karşı yüksek mukavemet, çekme ve yorulma mukavemetlerinde iyileşme de dahil olmak üzere arzu edilen birçok özellik

kazandırır. Magnezyuma, mangan katıldığında yüksek mukavemetli dövme sertleşmesi gösteren ana alaşım ortaya çıkar. 5XXX serisindeki alaşımlar iyi kaynak yapılabilme özelliğine sahiptirler ve korozyon dirençleri yüksektir. Daha çok gemilerde, vinç parçalarında ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [2, 5].

1.3.1.6. Al-Mg-Si alaşımları (6XXX serisi)

6XXX serisinin alaşımları (Mg_2Si) yapısında silisyum ve magnezyum içerirler. 2XXX ve 7XXX serisi alaşımları ile aynı mukavemet değerine sahiptirler fakat 6XXX serisi alaşımları şekillenebilme, kaynaklanabilirlik, işlenebilme ve korozyon dirençleri açısından daha iyidirler. Bu alaşımların korozyona gösterdikleri direnç, saf alüminyumun gösterdiği dirence kıyasla daha düşüktür. Mimari uygulamalar, köprü korkulukların ve kaynaklı yapılar kullanım alanlarına örnektir [2, 5].

1.3.1.7. Al-Mg-Zn alaşımları (7XXX serisi)

7XXX serisinin ana alaşım elementi % 1 ile % 8 aralığında değişen çinkodur. Bileşim bakımından % 8'e kadar çinko, % 4 magnezyum, % 3 bakır ve düşük miktarlarda krom, titanyum, mangan veya nikel ihtiva ederler. Küçük oranlarda magnezyum ilavesi ile ısıl işlem yapılabilme kabiliyeti kazandırılır ve ısıl işlem yapılarak yüksek mukavemet değerleri en yüksek olanlardır. 2. Dünya savaşı esnasında hava kuvvetlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir [2, 5].

1.3.1.8. Al-Li alaşımları (8XXX serisi)

8XXX serisi, alüminyum ön alaşımları olarak adlandırılır. Alüminyum ön alaşımları, sıvı metalin içine katıldığında amaçlanan bir kimyasal bileşimi veya tane küçültme gibi işlemleri gerçekleştiren, alüminyum ana metalli alaşımlardır. Alaşım elemanlarının saf metal durumunda sıvı alüminyum içinde ergitilmesi ergime derecelerinin farklılığı sebebiyle zorluk yaratmaktadır. %5' lik Al-Ti ön alaşımının ergime derecesi saf titanyumun kullanılırsa ocaktaki tüm sıvı alüminyumun sıcaklığını çok yüksek derecelere çıkartmak gerekmektedir. Bu hem enerji israfı hem de alaşım içindeki öteki elemanların miktar ve dağılımı açısından sakıncalı bir durum yaratmaktadır. Alüminyum ön alaşımlarının bir diğer faydası da az olanlardan katılan alaşım elemanlarının homojen olarak dağılımının kolayca sağlanabilmesidir [2, 5].

1.3.2. Dökme alüminyum alaşımları

Dökme alüminyum alaşımları genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak dökülürler. Bu alaşımlar işlenmeye elverişlidirler ve kaynak edilebilirler [3].

Genel alüminyum döküm alaşımlarının çoğu, alaşımlara düşük erime sıcaklığı, iyi akışkanlık ve iyi dökülebilirlik özelliği veren yeterli miktarda silisyum içermektedir. Akışkanlık, sıvı metalin döküm kalıbına doğru yol alırken erken katılaşmadan hareketini sürdürmesine, dökülebilirlik ise alaşımdan kolayca ve iyi bir döküm elde edebilme özelliği anlamına gelmektedir [2].

Isıl işlem uygulanabilen dökme alüminyum alaşımlarında ısıl işlem uygulanarak mekanik özellikler iyileştirilir. Isıl işlem, tek fazlı bölgede bir çözündürme işleminden sonra su verme ve doğal yaşlandırma veya suni yaşlandırma işlemlerini kapsar [4].

Isıl işlem uygulanmayan dökme alüminyum alaşımları genellikle rijitlikleri, sıvı haldeki akışkanlıkları ve yüksek korozyon dirençleri nedeni ile tercih edilirler.

Dökme alüminyum ve alaşımları için kullanılan simgeleme şekli dövme alüminyum ve alaşımlarının simgelenmesine benzer. Dört rakamlı simgelemede tek fark dördüncü rakamın üçüncü rakamdan bir nokta ile ayrılmasıdır. Tablo 1.4'te dökme alüminyum ve alaşımlarının simgeleme şekli verilmiştir [3].

1XX.X için ikinci ve üçüncü rakamlar alüminyumun %99,00'dan daha yüksek olan saflık derecesini belirler. 2XX.X'den 9XX.X'e kadar olan dizilerde ilk rakam ana alaşım elementini belirtir. Bu alaşımların tümünde son rakam 0 ise parça döküm, 1 ise ingot olduğunu belirtir [3].

Tablo 1.4. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösterilişi [2, 5]

Dökme Alüminyum Alaşımları	Alaşım Elementi	Yaşlandırılabilir
1XX.X	Ticari Saflıkta Alüminyum	Hayır
2XX.X	Al-Cu	Evet
3XX.X	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları
4XX.X	Al-Si	Evet
5XX.X	Al- Mg	Hayır
7XX.X	Al-Mg-Zn	Evet
8XX.X	Al-Sn	Evet
9XX.X	Kullanılmayan Seri	-

1.3.2.1. Ticari saflıktaki alüminyum

Bu seride % 99,0, 99,5 ve 99,7 saflık içeren alüminyum alaşımları yüksek elektriksel özelliklerinden dolayı bir transistör elemanı olan kollektor bileziği veya iletken çubuğu olarak kullanılmaktadır [2, 5].

1.3.2.2. Al-Cu alaşımları

Amerika'da ilk kullanılan döküm alaşımı %8 bakır içeren bir alaşım çeşididir. Daha sonra bu alaşım grubuna Zn, Si ve Ni alaşımlayıcıları ilavesiyle daha yüksek performans sergileyen alaşımlar elde edilmiştir. Yapısında bakır içerdiği için ısı işlem uygulanarak yaşlandırılabilir alaşım grubundadır. İçten yanmalı motorların pistonlarında, uzay mekiği parçaları üretiminde kullanılabilirler [2, 5].

1.3.2.3. Al-Si alaşımları

Silisyumun ana alaşımlayıcı element olduğu alaşım grubudur, silisyumun kazandırdığı yüksek akışkanlıktan dolayı döküm kabiliyeti yüksek olan bir gruptur. Fiziksel ve mekanik özellikler bakımından geniş bir ölçüde performans göstermektedir. İkili Al-Si alaşımları yüksek korozyon direnci, iyi kaynaklanabilirlik ve düşük özgül ağırlık gibi önemli özellikleri bünyesinde barındırır. Mimari alanda dekoratif amaçlı, uçak ve otomobil parçaları olarak ta üretilmektedir [2, 5].

1.3.2.4. Al-Mg alaşımları

Al-Mg alaşımları mükemmel korozyon direnci, iyi işlenebilirlik ve anodik kaplama yapıldığında çekici bir görüntüye sahiptir. Al-Mg döküm alaşımları; Al-Si döküm alaşımlarıyla kıyaslandığında, üretiminde yolluk ve besleyicinin yeri ve boyutlarına biraz daha dikkat edilmelidir. Eriyik halde yapısında barındırdığı magnezyumdan dolayı yüksek oksitlenme eğiliminde olduğundan kontrollü bir ergitme ve dökme pratiği gerekmektedir [2, 5].

1.3.2.5. Al-Zn alaşımları

Geçmişte kullanılan birçok Al-Zn alaşımı bugün pek kullanılmamaktadır. Al-Zn-Mg alaşımları döküm sonrası geçen kısa süre içinde oda sıcaklığında yaşlanmaya uğrar. Çökeltme sertleşmesi olur. Kaliteli bir döküm yapabilmek için iyi soğutma ve alaşımı dengeli besleme için ise dikkatli yolluk tasarımı yapılmalıdır. Bu alaşımların kokil dökümleri çok daha zordur çünkü sıcak çatlama olabilir [2, 5].

1.3.2.6. Al-Sn alaşımları

Yük taşıma kapasiteleri ve yorulma dayanımları yüksektir. İçten yanmalı motorlarda yağlama yağının yaptığı aşındırıcı etkiye dayanıklılık, yatak malzemelerinde çok önemlidir ve bu alaşımlar, diğer bütün metallere göre bu konuda üstündürler [2, 5].

1.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

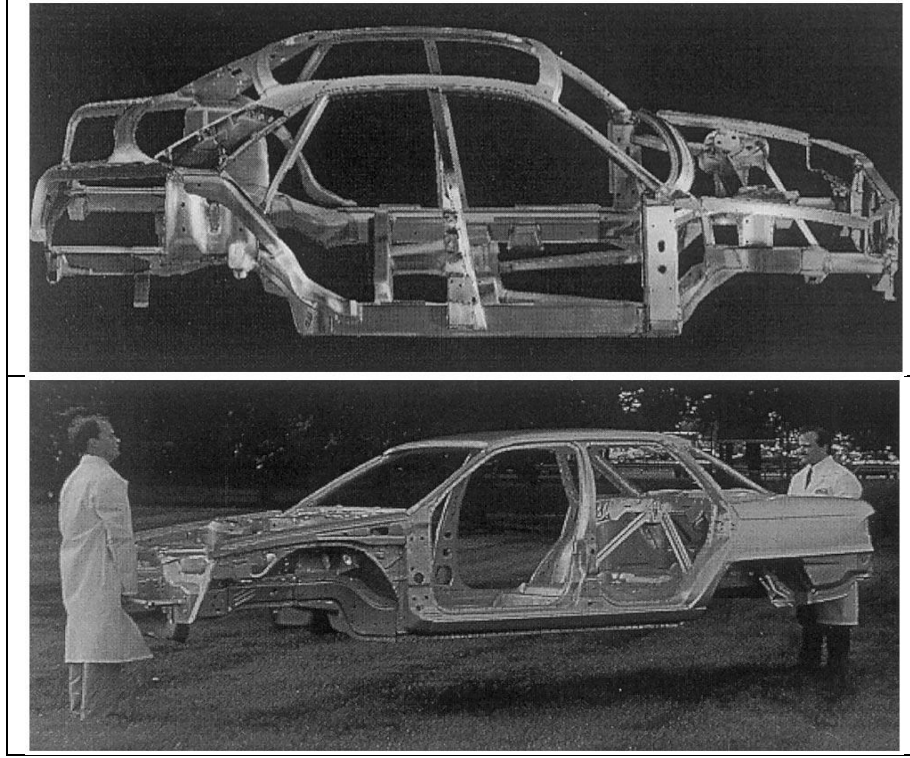
1.4.1. Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde kullanımı

Yer kabuğunda en çok bulunan ikinci metal element olan alüminyum, geri dönüşüm çemberiyle tekrar geri kazanılmaktadır. Alüminyum, hammaddeden üretim için gerekli enerjinin sadece %5'i kadar bir enerjiyle tekrar ergitilebilir ve yepyeni ürünler için kullanılabilir. Hafif olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için günümüzde önemli bir malzeme konumundadır. Özellikle son yıllarda, enerji tasarrufuna dönük çalışmalar, daha az yakıt harcayan hafif ve ekonomik taşıtların üretimini gündeme getirmiş, alüminyum alaşımları otomobillerde, otobüslerde, trenlerde, deniz taşıtları yapımında öncelikli olarak

tercih edilen malzemeler olmuştur. Aslında bu alaşımlar, uzun yıllardır havacılık endüstrisinde kullanılmakta olan malzemelerdir ve artırılmış mukavemet ve darbe özellikleri sayesinde savunma sanayinde de kullanıma girmişlerdir [7].

Alüminyum, çelik ve demire göre yaklaşık üç kat daha hafiftir. Otomobil toplam ağırlığındaki her %10'luk azalma %5-10 oranında yakıt tasarrufu sağlamaktadır. 1400 kg ağırlığındaki bir taşıtta geniş kapsamda alüminyum kullanımı taşıtın ağırlığında 300 kg azalmaya neden olmakta, taşıtın toplam ağırlığında %20'lik bir azalma sağlanmaktadır. Bir araç için kullanılan her 1 kg çeliğin 500 gr alüminyumla yer değiştirmesi aracın tüm kullanım ömrü için toplam 10 kg daha az emisyonu sebep olacaktır [7].

Ekolojik dengeyi bozan atık gazların miktarını azaltmak için, daha düşük yakıt tüketimi sağlayacak teknolojileri üreterek ve geliştirerek yakıtı minimum şekilde kullanabilme yoluna gidilmektedir. Otomotiv üreticileri ekolojik dengenin korunmasını sağlayarak ürettikleri malzemelerin maliyetlerinin düşük olmasını istemektedirler. Taşıt konforunun artması ve yolcu güvenliğinin önemsenmesiyle yeni aksamlar eklenmekte ve bu da taşıt ağırlığında artışa neden olmaktadır. Taşıtların temel bileşenlerinin ağırlığı azaltılmaktadır. Ancak, bahsedilen sebepler nedeniyle toplam ağırlık aynı kalmaktadır. Yüksek yakıt tasarrufu için çözüm taşıttaki alüminyum parça miktarını arttırmaktır. Yakıt tüketimini azaltmak için diğer bir yöntem de hava direncinin azaltılmasıdır. Ancak bu yöntem otomobil boyutlarıyla ilgili sınırlamalar getirdiği için çok pratik olmamaktadır. Çevre şartlarının iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda hava kirliliğinin azaltılmasında, motorlu araçlarda direkt püskürtmeli dizel motorlar ve hafif taşıt üretimi önemli bir çözüm olarak görülmektedir. Güvenlikten ödün vermeden ve konfordan vazgeçmeden az yakıt tüketen otomobiller için hafif, fakat mukavemeti yüksek alaşımların geliştirilmesi, otomobil üreticilerinin önemli hedefleri arasında yer almaktadır. Şekil 1.2' de bu amaçla üretilmiş Audi A8 aracının iskelet fotoğrafları verilmiştir [7, 8].



Şekil 1.2. Audi A8 aracının alüminyum iskeleti [8]

1000/3000/5000 serisi alüminyum alaşımları paslanmazlık özelliği sebebi ile çelikten yapılmış gövdeye göre üç, dört kat daha çok dayanıklıdır, hafiftir, yüksek dayanım ve şekil alabilme özelliğine sahiptir. Bu özellikleri nedeni ile otomotiv sektöründe kamyon kasası, bagaj kapağı, hava tüpü, otobüs gövdesi ve oto plakası gibi yerlerde kullanılırlar [9].

Son yıllarda otomotiv piyasasında çelik jant denilen gösterişli, parlak, boya ve bakım gerektirmeyen hafif alaşımlı jantlar literatürde AlSi7Mg, ticari olarak A356 alaşımı olarak bilinen ve otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulan Alüminyum–Silisyum–Magnezyum alaşımlarıdır [10].

1.4.2. Alüminyumun mimaride kullanımı

Alüminyum, binaların çatı ve cephe kaplamalarında, kapı ve pencerelerinde, merdivenlerde, çatı iskeletinde, inşaat iskelelerinde ve sera yapımında büyük miktarda kullanılır [1]. Şekil 1.3’ te sera yapımında alüminyumun kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Sera yapımında kullanılan alüminyum iskeletler [4]

1.4.3. Alüminyumun ambalaj olarak kullanımı

Alüminyum, en kullanışlı ambalaj malzemelerinden birisidir. Alüminyum, konteynır imalatından ilaç kutularına kadar çok çeşitli ambalaj uygulamalarına mükemmel cevap verir. Banyoda diş macunu tüpünden, marketlerdeki sayısız ürünler (çikolata vb.) mutfakta folyoya sarılı fırın yemekleri ve buzdolabındaki soğuk meşrubatlara kadar, alüminyum pek çok ürünü sarar ve korur. Alüminyumun homojen yapısı, ince folyo (alüminyum kâğıt) şeklinde üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve kolay şekillenebilmesi onu ideal bir ambalaj malzemesi yapar. Alüminyum folyo, hava ve mor-ötesi ışınları geçirmediğinden, gıdaları doğal renk ve tatları ile birlikte korur [1].

1.4.4. Alüminyumun elektrik- elektronikte kullanımı

Hem elektrik iletiminde hem de motor, jeneratör, transformatör gibi cihazların muhtelif kısımlarında alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum son derece iletken bir metaldir. Bu nedenle, tüm alüminyum kullanımının Avrupa’ da % 10’ u, ABD’ de % 9’u, Japonya’ da % 7’si elektrik ve elektronik sektöründe kullanılmaktadır.

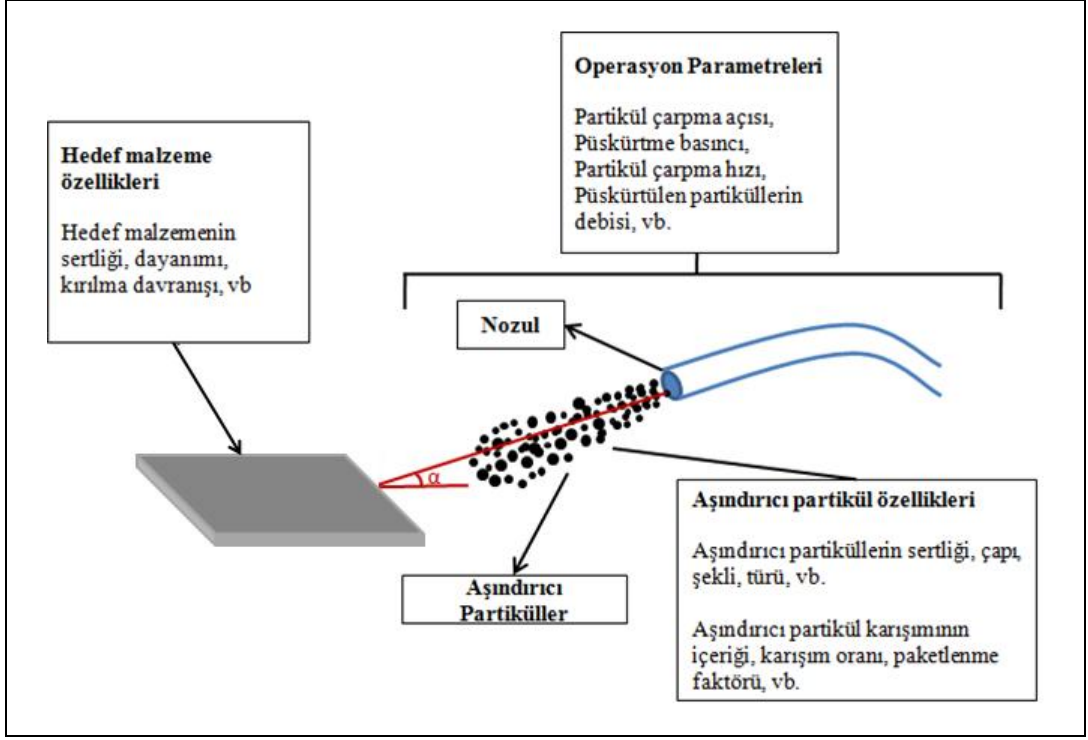
Alüminyumun bu alanda en çok kullanıldığı yer, elektrik nakil hatlarıdır. Çelik özlü alüminyum iletkenler, yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında tercih edilen tek malzeme olmuştur. Alüminyum, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve motor bobin sarımında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Elektronikte, alüminyum kullanım yerleri arasında, şaseler, transistor soğutucuları, data kayıt diskleri ve elektronik cihazların kasaları bulunmaktadır [11].

2. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Malzemelerin aşınması, malzemelerin performansını belirleyen önemli parametrelerden biridir [12]. Aşınma genel olarak malzemelerin yüzeyinde izafi bir hareket ve mekanik bir etki ile meydana gelen malzeme kaybıdır [13]. Bir sıvı ya da gaz akımı tarafından taşınan farklı geometrik boyut ve yapıdaki taneciklerin, temasta buldukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yaparak oluşturdukları hasar erozyon aşınması olarak tanımlanmaktadır. Katı partikül erozyonunda, malzeme yüzeyine belirli bir hızla hareket eden sert partiküllerin çarpması sonucunda yüzeyde malzeme kaybı gerçekleşir [14]. 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 [15].

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 [16].

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 olan en önemli parametrelerdir [17]. Şekil 2.1' de katı partikül erozyonuna etki eden parametreler gruplandırılarak şematik olarak verilmiştir. Bu bölüm içerisinde malzemelerin katı partikül erozyonu davranışını etkileyen önemli parametreler kısaca açıklanacaktır. Bir sonraki bölümde ise literatürde alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar verilecektir.



Şekil 2.1. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler

2.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı

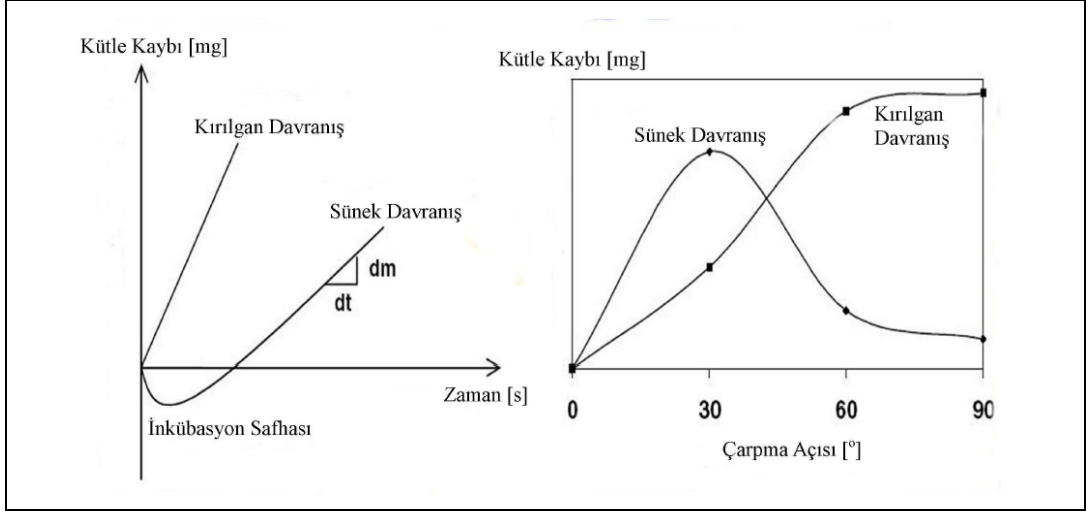
Partikül çarpma açısı malzemelerin katı partikül erozyonu davranışlarını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Partikül çarpma açısına bağlı olarak, katı partikül erozyonu iki şekilde incelenebilir [18]:

Dik çarpma açılarındaki erozyon ($\alpha = 90^\circ$)

Eğik çarpma açılarındaki erozyon ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)

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

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi kırılmalı malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açılarındaki ortaya çıkarken, sünek malzemelerde malzeme kaybının en fazla düşük çarpma açılarındaki ($\sim 30^\circ$) ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 2.2. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [18]

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 [15, 19, 20]. Çarpma enerjisindeki kaybın büyük kısmı hedef malzeme yüzeyini pürüzlendirirken ortaya çıkar [21, 22].

S.Yerramareddy ve S. Bahadur yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının tipik sünek erozyon davranışı sergilediğini ve maksimum erozyonun 30° çarpma açısında meydana geldiğini saptamışlardır [23].

J. Zhou ve S. Bahadur' un yaptıkları diğer bir çalışmada ise yüksek sıcaklıklardaki hava ortamında ısıtılmış Ti6Al4V alaşımının korozyon-erozyon davranışını incelenmişlerdir. Hedef numuneyi 10-90° çarpma açısı ve 55-110 ms⁻¹ çarpma hızında 120 mesh boyutunda silikon karpit partikülleri ile aşındırmışlardır. Çarpma açısının 30° olduğu durumda maksimum erozyon oranını gözlemlemişlerdir. Yükselen sıcaklık değerlerinde, erozyon oranının 30° çarpma açısının olduğu durumda sıcaklık ile düzenli olarak arttığını ancak çarpma açısının 90° olduğu durumda ise erozyon oranının sıcaklık ile aşırı artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir [24].

A. P. Harsha ve D. K. Bhaskar yaptıkları çalışmalarda demir içeren ve demir içermeyen malzemelerde (alüminyum, pirinç, düşük karbonlu çelik, bakır, paslanmaz çelik, dökme demir), farklı partikül çarpma açılarında (15-90°) ve farklı partikül çarpma hızlarında (24-52 ms⁻¹) katı partikül erozyonunu gerçekleştirmişler ve yüksek hızlarda 60° partikül çarpma açısında bütün malzemelerde en yüksek erozyon oranının gerçekleştiğini bulmuşlardır [25].

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 [26].

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. Açılı 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 kırılğan malzemeler farklı özellikler göstermektedir. Sünek malzemelerin karakteristik özelliği düşük çarpma açılarında (15°–30°) maksimum erozyon göstermeleridir. Kırılğan malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarında (90°) gösterirler. Fiber takviyeli kompozitler, maksimum erozyonu 45°–60° çarpma açıları arasında ortaya çıktığı yarı-sünek davranış gösterirler [27, 28].

2.2. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı

Aşındırıcı partikül hızı aşınma süreci üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir [29]. Eğer partikül çarpma hızı çok düşük ise, çarpma anındaki gerilmeler plastik

deformasyon oluşumu için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder [27]. 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.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde aşınan malzemelerde partikül hızının artırılması ile aşınma miktarının arttığı söylenebilir [30].

Jianren Zhou ve Shyam Bahadur, yüksek sıcaklık değerlerinde erozyon oranının partikül çarpma hızına bağlı değişimini incelemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda partikül çarpma hızı arttıkça erozyon oranının da aynı oranda arttığını görmüşlerdir [24].

A. P. Harsha ve D. K. Bhaskar yaptıkları çalışmalarda demir içeren ve demir içermeyen malzemelerde (alüminyum, pirinç, düşük karbonlu çelik, bakır, paslanmaz çelik, dökme demir), farklı partikül çarpma açılarında (15-90°) ve farklı partikül çarpma hızlarında (24-52 ms⁻¹) katı partikül erozyonunu gerçekleştirmişler ve tüm partikül çarpma açılarında yüksek hızlarda yüksek erozyon oranı meydana geldiğini görmüşlerdir [25].

M. Ahmad, M. Casey ve N. Sürken yaptıkları çalışmada buhar türbini kanatlarının yapımında kullanılan 5 farklı malzemenin (X20Cr13, X5CrNiCuNb 16-4, lazer tavlı X5CrNiCuNb 16-4, X5CrNiMoCuNb 14-5 ve Ti6Al4V) damlacık erozyonu davranışını incelemişlerdir. Damlacık erozyonunda hacim kaybı artışının damlacıkların çarpma hızı artışı ile arttığını gözlemlemişlerdir [31].

2.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütleli 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 [28, 32-34]. Belirli bir akış oranı eşik değerine kadar erozyon aşınma miktarının akış debisiyle doğru orantılı olduğu rapor edilmiştir. Bu limit değerlerin gelen ve geri seken aşındırıcı partiküller arasındaki etkileşimin bir sonucu olduğuna inanılır [20]. Bu etki, çarpanların önceki partikülleri erozyon sürecinden uzaklaştırdığı birinci sırada partikül çarpma modeli ile rasyonalize edilmiştir [32]. 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 [32, 34]. 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 [32]. Yukarıdaki analizlerden “Seçilen malzemenin erozyon davranışını etkilememesi için, partikül etkileşimi ve çevresel bozulma etkilerini ortadan kaldıracak bir özel debi miktarı seçilmesi gereklidir.” sonucu çıkarılabilir.

2.4. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu

Malzeme yüzeyine çarpan partiküllerin boyutları katı partikül erozyonunda önemli bir rol oynamaktadır [14, 29, 35, 36]. 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. Dünder 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 artırılması ile erozyon miktarının arttığını raporlamışlardır [14, 35, 37, 38].

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. Deneyle sonuçunda partikül boyutunun artışı ile aşınma oranının artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu artışın partikül boyutunun ve partiküllerin taşıdığı kinetik enerjinin artış göstermesi nedeniyle gerçekleştiğini anlatmışlardır [39].

W. Tabakoff ve B.V.R. Vittal ise aşındırıcı partikül boyutunun erozyon miktarını çok düşük oranda etkilediğini ifade etmişlerdir. Ancak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda partikül boyutunun artırılması 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 artırılmasının erozyon miktarını çok az miktarda arttırdığını belirlemişlerdir [40].

G. Fowler, P.H. Shipway ve I.R. Pashby su jeti yöntemine etki eden aşındırıcı partikül boyutu ve jet-iş parçası dönüş hızının malzemenin yüzey karakteristiğine etkisini incelemişlerdir. Abrasif partikül olarak 80 ve 200 gritlik garnet kullanmışlar, erozyon oranının, yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey dalgalanmasının düşük gritlerde daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Her iki aşındırıcı partikül boyutu için kesmenin aynı derinlikte olduğunu ancak yüksek dönüş hızlarında yüzey dalgalanması farkının farklı boyutlu partiküller arasında daha az olduğunu, düşük dönüş hızlarında ise bu dalgalanma farkının daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [41].

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 [41, 42].

Eğik açılı partikül erozyonunda gevrek malzemelerin yüzeylerinde radyal çatlaklar oluşmaktadır [43]. Malzemelerde radyal çatlak oluşumu aşınmayı hızlandırır ve malzeme kaybını artırır. Aşındırıcı partikül boyutlarının artırılması ile malzemedeki daha derin radyal çatlakların oluştuğu ve aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir [38].

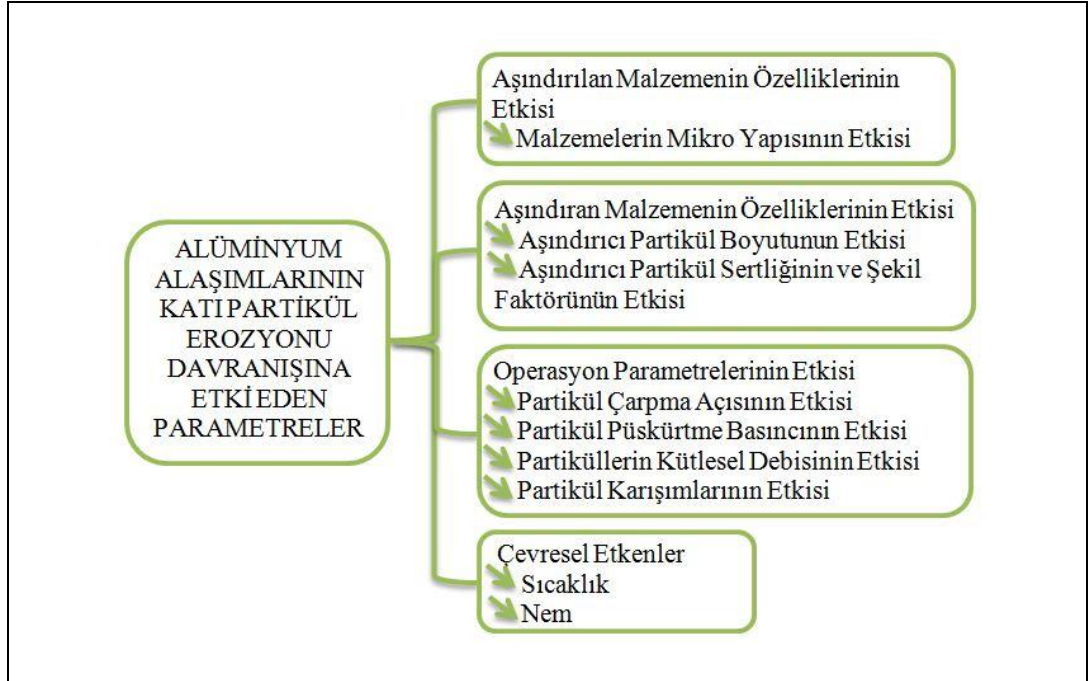
Katı partikül erozyonu mekanik ve metalurjik faktörlerden etkilenen karmaşık bir yüzey hasar prosesidir [39]. Aşındırıcı partikül boyutlarının aşınma oranına etkilerinin hedef malzemeye göre değişiklik göstereceği açıktır. Özellikle malzemenin kırılma karakteri (gevrek, sünek veya yarı-sünek) aşınma oranını önemli derecede etkilemektedir.

2.5. Aşınan Malzeme Özellikleri

Katı partikül erozyonunda, hedef malzeme özellikleri aşınma mekanizması ve aşınma oranı üzerinde etkin bir rol oynar. 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 [44].

3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ EROZYON DAVRANIŞININ LİTERATÜR İNCELEMESİ

Alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışına birçok parametre etkilemektedir. Bu parametreler; aşındırılan malzemenin özellikleri (malzemenin mikro yapısı), aşındırıcı malzemenin özellikleri (partikül boyutu, partikül geometrisi, sertliği, şekil faktörü), operasyon parametreleri (partikül çarpma açısı, partikül çarpma hızı, partiküllerin kütleli debisi) ve çevresel etkenler (sıcaklık, nem) olmak üzere dört ana başlık altında toplanabilir. Bu bölümde alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışının bu parametreler etkisi ile göstermiş olduğu davranışın literatürde yer alan çalışmaları incelenmiştir. Şekil 3.1’de alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışına etki eden parametreler verilmiştir.



Şekil 3.1. Alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışına etki eden parametreler

3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

A.J. Speyer, R.J.K. Wood ve K.R. Stokes yaptığı çalışmalarda HVOF (High Velocity Oxy Fuel) yöntemi ile üç farklı (Al, Al/12Si, Al/12Si+Al₂O₃) malzeme ile kapladıkları çeliğe (AISI 1020) çamur erozyonu uygulamışlardır. Çamur erozyonunda silika aşındırıcı (235µm) %2,5 oranında musluk suyuna eklenmiş, 30° ve 90° çarpma açılarında, 27 ms⁻¹ jet hızında deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda sadece alüminyum ile kaplanan numunenin en kötü erozyon oranına, silikon ilavesi ile erozyon direncinin arttığına, alümina takviyesinin ise silikon ilavesine göre daha kötü sonuçlar verdiğini saptamışlardır. Erozyon direncinin mikrosertlik ile arttığını 30° çarpma açısında daha etkili şekilde gözlemlemişlerdir [45].

Q. Fang, P. Sidky, M. G. Hocking yaptıkları çalışmada alüminyum metal matrisli kompozitleri alümina fiber ve titanyum diborür (TiB₂) partiküller kullanarak takviye etmişler, sonrasında çamur erozyonuna maruz bırakmışlardır. 45° çarpma açısında malzemelerin SEM görüntülerini incelemişler, bütün yüzeylerde mikro kesme ve mikro sürme şeklinde erozif aşınmanın gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Deneyleri sonucunda takviye görmüş Al metal matrisli kompozitin erozyon davranışının matrisi destekleyen alümina fibere veya partiküle, matris ve fiberlerin veya partiküllerin birbirine yapışma gücüne bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir [46].

K. Elleuch ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada farklı alüminyum alaşımlarının (5xxx, temperlenmiş 5xxx ve farklı ısıl işlem görmüş 7xxx alaşımları) erozif aşınma davranışlarını, erozyon direncinin sertlik ile ilişkisini incelemişlerdir. Pekleşmeye maruz bırakılmış 5xxx alüminyum alaşımının erozif dayanımının iyileştirilemediği, sertleşme ısıl işlemi uygulanan 7xxx alüminyum alaşımının ise erozif dayanımını geliştirdiğini gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak kimyasal bileşimlerin erozif dayanıma etkisinin sertlikten daha önemli olduğunu belirtmişlerdir [47].

3.2. Aşındırıcı Malzeme Özelliklerinin Etkisi

Y. Li, G.T. Burstein ve I.M. Hutchings yaptıkları çalışmada alüminyum alaşımının (AA1100) çamur erozyonu-korozyon davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları

çalışmada içerisinde 0,5 mol NaCl, asetik asit ve 0,1 mol Na₂CO₃ içeren farklı silika çamuru karışımları kullanmışlar, testleri modifiye edilmiş çamur erozyonu test düzeneğinde yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda NaCl ve asetik asit içeren çamur ile yapılan deneylerde çamurun içinde saf korozyon bileşeni az olmasına rağmen alüminyumun erozyon oranının saf silika çamuru ile yapılan deneylere göre daha yüksek gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir [48].

3.2.1. Aşındırıcı partikül boyutu etkisi

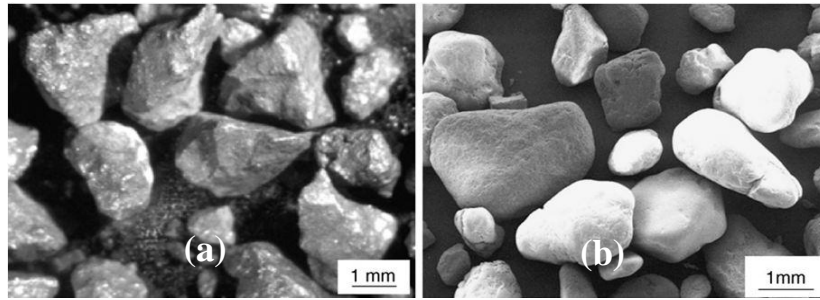
Girish R. Desale ve arkadaşları yaptıkları çalışmada alüminyum alaşımının erozif aşınmasında aşındırıcı partikül boyutunun etkisini çamur erozyonu yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarında 8 farklı boyutta aşındırıcı partikül (boyutları 37,5 ve 655 µm arasında değişen kuartz) kullanmışlardır. Bütün numunelerde partikül çarpma hızı olarak 3 ms⁻¹ ve partikül çarpma açısı olarak 30° ve 90° kullanılmıştır. Yaptıkları deneylerde erozif aşınmanın ortalama partikül boyutunun artması ile arttığını görmüşlerdir [49].

3.2.2. Partikül sertliği, şekil faktörü ve dönüş hızı

J. E. Talia ve arkadaşları yaptıkları çalışmada saf alüminyum ve Al-12Si alaşımının yüzeyindeki dalgalanma oluşumunu incelemişlerdir. Çalışmalarında aşındırıcı partikül olarak keskin açılı köşelere sahip alümina ve küresel cam boncuk kullanmışlar, bu partikülleri basınçlı hava ile hızlandırmışlar, farklı çarpma açılarında ve karışım halinde alüminyum alaşımlarını aşındırmışlardır. Taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile aşınmış yüzeyleri incelemeleri sonucunda küresel cam boncuk ile aşındırılan numunelerde yüzeyde dalgalanma gözlemlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda aşınmış numunelerin yüzeylerindeki dalgalanmanın malzeme kaybından olmadığını, malzemenin plastik deformasyona uğramasından kaynaklandığını gözlemlemişlerdir [50].

K. Elleuch ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada farklı alüminyum alaşımlarının (5xxx ve farklı ısıl işlem görmüş 7xxx alaşımları) erozif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde iki farklı aşındırıcı NAS (normalize edilmiş abrasif aşındırıcı kum) ve SPS (standart ocak kumu) kullanmışlardır. Şekil 3.2' de K. Elleuch ve arkadaşlarının kullandıkları NAS ve SPS aşındırıcılara ait SEM

görüntüleri verilmiştir. Şekilde SPS kumu keskin köşeli iken NAS kumu keskin olmayan köşe ve kenarlara sahip olduğu görülmektedir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda abrasif partiküllerin erozyon oranına etkisinin büyük olduğunu bulmuşlardır. NAS kullanılarak gerçekleştirdikleri deneylerdeki erozyon oranının SPS kullanarak gerçekleşen erozyon oranına göre fazla olduğu görmüşlerdir. NAS kullanılarak gerçekleşen deneylerde numunenin yüzeyinin daha fazla hasar gördüğünü gözlemlemişlerdir [47].



Şekil 3.2. Aşındırıcıların SEM görüntüsü a) SPS b) NAS [47]

3.3. Operasyon Parametrelerinin Etkisi

3.3.1. Partikül çarpma açısının etkisi

A. K. Jha ve arkadaşları yaptıkları çalışmada çarpma açısı ve çarpma hızının ticari adı Grade 1900 olan alüminyum alaşımının erozyon davranışına etkisini incelemişlerdir. Alüminyum numuneleri çeşitli açılarda ve çarpma hızlarında çamur erozyonuna maruz bırakmışlardır. Aşınma oranını kütle kaybını ölçerek hesaplamışlardır. Erozyon oranının çarpma açısı arttıkça arttığını, maksimum erozyon oranının 90° çarpma açısında meydana geldiğini bulmuşlardır [51].

K.S. Tan, R.J.K. Wood ve K.R. Stokes yaptıkları çalışmada HVOF (High Velocity Oxy Fuel) alüminyum bronz kaplamaların çamur erozyonu yöntemi ile erozif aşınma davranışını incelemişlerdir. 30°, 60° ve 90° çarpma açısında, 0,5 μJ kinetik enerji ($16,5 \text{ ms}^{-1}$ hız) ile 135 μm ortalama çapa sahip silika kumu çamur erozyonunda kullanmışlardır. Çarpma açısı azaldıkça erozyon oranında da azalma meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [52].

Y.W. Shin ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada Al-Si alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışını incelemişlerdir. Deneylerinde farklı oranlarda silisyum içeren

alaşımaları farklı sıcaklıklarda temperlemişlerdir. Ardından malzemeleri 40 µm boyutunda Al₂O₃ aşındırıcı partiküllerle farklı partikül çarpma açılarında aşındırmışlardır. Al ve Al-Si alaşımaları sünek aşınma davranışı sergilerken, saf Si aşındırıldığında gevrek aşınma davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Al ve Al-Si alaşımalarını 10°-90° çarpma açıları arasında aşındırmışlar, en yüksek erozyon oranını 20° çarpma açısında gözlemlemişlerdir [53].

S. Das ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Al- Si alaşımının katı partikül erozyonu davranışını incelemişlerdir. Maksimum aşınmanın alüminyum alaşımının 45° partikül çarpma açısı ile aşındırılması ile gerçekleştiğini, 15°-30° çarpma açılarında malzemedeki mikro-sürme ve mikro-kesme, 45°-60° açılarında kesme ve 75°-90° çarpma açılarında mikro-kırılma aşınma mekanizmalarını gözlemlemişlerdir [54].

C.K. Fang ve T.H. Chuang yaptıkları çalışmada AA6063 alaşımının katı partikül erozyonu davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında 15°-90° çarpma açılarında deneyler yapmışlar, en yüksek erozyon oranının düşük çarpma açılarında gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir [55].

E. Avcu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada AA-6101 ve AA-1070 alüminyum alaşımalarının katı partikül erozyonu davranışını, farklı partikül çarpma açısı değerlerinde (30°-90°) incelemişler, 30° çarpma açısında en yüksek erozyon oranının gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. 90° çarpma açısında aşındırdıkları malzemedeki SEM görüntüsü almışlar ve EDS analizi yapmışlar. EDS analizi sonucunda 90° çarpma açısında yüzeye saplanmış partiküller olduğunu tespit etmişlerdir [56].

3.3.2. Partikül çarpma hızının etkisi

K.S. Tan, R.J.K. Wood ve K.R. Stokes yaptıkları çalışmada HVOF (High Velocity Oxy Fuel) alüminyum bronz kaplamaların çamur erozyonu yöntemi ile erozif aşınma davranışını incelemişlerdir. Aşındıcıları çeşitli kinetik enerjilerde (0,1, 0,3, 0,5 ve 0,8 µj) numunelere göndermişlerdir. Yüksek enerji ile gönderdikleri partiküllerin yüksek hızlara ulaştıklarını gözlemlemişlerdir. Gerçekleşen erozyon oranının partiküllerin hızlarının artması ile birlikte artış gösterdiğini saptamışlardır. SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek enerji ile gerçekleşen erozyon oranlarında

küçük partiküllerin etkili olduğu, yüzeydeki izlerin mikro kesme şeklinde gerçekleştiğini, düşük enerjide gerçekleşen deneylerde ise bütün çarpan partiküllerin hasar oluşturmadığı ancak hasar mekanizmasında yine de küçük boyuttaki partiküllerin etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [52].

Suwendu P. Sahu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarında kül içine katılan farklı oranlarda alüminyum tozu ile yapılan plazma sprey kaplamalardaki katı partikül erozyonu davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda katı partikül erozyonu oranına partikül çarpma hızının, partikül çarpma açısının ve kaplamada bulunan alüminyum oranının etkisinin, partikül boyutu ve nozul numune arası mesafesine göre daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır [57].

3.4. Çevresel Etkenler

C.K. Fang ve T.H. Chuang yaptıkları çalışmada AA6063 alaşımının katı partikül erozyonu davranışını incelemişlerdir. Hedef malzemedeki kütle kaybını ve aşınma derinliğini farklı sıcaklıklarda (25°C, 35°C, 45°C ve 55°C), farklı bağıl nem durumlarında (% 50, % 65, % 80 ve % 95) ve farklı partikül çarpma açılarında (15°-90°) araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda bağıl nem miktarının, maksimum çarpma açısında hedef malzemede meydana gelen kütle kaybında çok az etkisi olduğunu, ancak genel olarak meydana gelen hacim kaybında ve aşınma derinliğinde karmaşık bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir [55].

4. GARNET MİNERALİ

Garnet benzer fiziksel özellikleri, kristal formu ve genel kimyasal bileşimlere sahip bir grup demir-alüminyum silikat minerallerine verilmiş genel bir isimdir.

4.1. Garnet Mineralinin Özellikleri

Garnetler orta derecede sertlik, yüzeylerinde keskin çatlaklar, 1250 °C de erime noktası, yarı yuvarlaktan yarı köşeliye değişen keskin kenarlı taneler, fiziksel ve kimyasal ayrışmalara karşı dirençli oluşları ve çoğunlukla serbest silis içermemeleri ya da çok az oranda bulundurmaları gibi özellikleri nedeniyle yüksek kaliteli aşındırıcılar sınıfına girer. Genel olarak aşındırıcılar doğal ve yapay olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılır. Garnetler, yüksek sertlik özelliği gösteren doğal aşındırıcılar sınıfına girmektedir.

Garnetler kimyasal bileşimlerinde silisyum ve oksijene ilave olarak kalsiyum, magnezyum, demir ve alüminyum da içerirler. Demirli olanların önemli bir özelliği 800°C'ye kadar ısıtılıp ani olarak soğutulduklarında sertliklerinin artması ve çatlaklarının derinleşmesidir.

4.2. Kullanım Alanları

Son derecede sert ve üzerinde keskin çatlaklar bulunan garnetler bu özellikleri nedeniyle ağaç, deri, cam, metal ve plastik malzemelerin işlenmesinde aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. Kullanımı çoğunlukla aşındırma kağıdı, aşındırıcı diskler, bileme taşları, parlatma ya da cilalama toz ve kumları şeklindedir.

Belirli bir tane boyutu dağılımı içeren garnetler kum basınçlı veya su basınçlı kesici ve aşındırıcılar olarak geniş kullanım alanı bulur. Bu tür işlemlerde garnetlerin sert ve yüksek yoğunluğu, bu amaçlarla tüketilen diğer tür aşındırıcılara oranla çok daha etkilidir ve daha düşük hava ve su basıncında rahatlıkla kullanılırlar. Su basınçlı kesmelerin en önemli avantajı hemen hemen hiç toz içermemeleri, yüksek kesme hızları, farklı şekillerde kesme yeteneği ve yüksek sıcaklıklardan kaynaklanabilecek

bozulmaların bulunmamasıdır. Kum basınçlı sistemlerin en önemli yönünü ise serbest silis içermemesi ya da az oranda bulunması nedeniyle silikosis gibi hastalıklara yol açmaması oluşturur. Diğer yandan, bu amaçla kullanılan silis kumuna göre daha yüksek olan yoğunluğu, aynı çaptaki kuvars tanesine oranla işlenen yüzeye daha etkili darbeler vurmasını sağlar [58, 59]. Kimyasal ayrışmaya karşı olan direnci, tane şekli, boyut dağılımı ve yüksek yoğunlukları nedeniyle garnetler çeşitli filtrasyon sistemlerinde kullanılır ve bu amaçla kullanılan silis kumu antrasite kıyasla daha iyi özelliklere sahiptir. Bu tür kullanımlarda garnetlerin aşındırıcı kabiliyetinden çok yoğunluk, tane şekil ve boyutu ön planda tutulur. En yaygın kullanım şehir içme suları filtrasyonudur.

Su basınçlı kesme sistemlerinde yoğunlukla keskin kenarlı garnetler tercih edilir. Sahil kumlarında yaygınca görülen kenarları yuvarlaklaşmış tanelerin keskin taneler halinde kırılıp ufalanmaları bu tür garnetlerin de rahatlıkla kullanılmasını sağlar. Bunun başlıca nedeni, oluşan ikincil kırıkların kesme işlemlerinde çok daha etkili olmasıdır. Genel olarak çelik alaşımlı ürünlerin kesilmesinde bu tür iri taneli garnetler kullanılmaktadır. Beton kesmelerde aşındırıcı olarak garnetlerin kullanıldığı kesme teknikleri yerine günümüzde daha çok elmas uçlu bıçıklar kullanılır. Gerek hava basınçlı kesim gerekse de su basınçlı tekniklerin en önemli problemi kullanılan aşındırıcıların yüksek maliyetidir. Bu nedenle de gelişmiş bazı ülkelerde, özellikle de Batı Avrupa ülkelerinde garnet kullanımı istenilen boyutlarda gelişmemiştir.

Garnetler kaplama aşındırıcılar olarak ahşap, deri, sert kauçuk, plastik, cam ve yumuşak metallerin işlenmesinde kullanılır. Bu tür kaplama aşındırıcılar belirli boyutlara indirgenmiş olan garnetlerin kağıt veya bez dokumalar üzerine çimentolanması ile elde edilirler. Bu amaçla yakın yıllara kadar kullanılmış olan reçine bağlayıcılar yerlerini elektrostatik kaplamalara bırakmıştır. Kaplama aşındırıcı yapımında tanelerin etkisini yükseltmek amacı ile keskin kenarlar zemine dikey bağlanmaktadır. Bu alanda garnet ile birlikte alumina, silikon karbid, kuvars, ve zımpara gibi diğer bazı aşındırıcılar da kullanılmaktaysa da garnetli kaplama aşındırıcılar ahşap yüzeylerde daha iyi bir parlatma sağlar ve diğer aşındırıcılara oranla çok daha ucuzdur. Garnet kaplamalı kağıt ve bez dokumalı aşındırıcılar diğer tür aşındırıcılar içinde yaklaşık % 10–15’lik bir paya sahiptir. Yüksek kaliteli

garnet tozları, elektronik malzemeler, özel camlar ve diğ er ileri teknoloji ürünü malzemelerin parlatılmasında ve tesviyesinde kullanılmaktadır. Ancak bu tür pazar oldukça dardır ve esas olarak Batı Avrupa ülkeleri ve Japonya ile sınırlıdır. Bir aşındırıcı toz olarak garnetler cam ürünlerin, özellikle de optik camların taşlanması için kullanılan korundumun sağlanmasıdaki zorluklar nedeniyle son yıllarda bu alanda yaygınca kullanılmaya başlanmıştır. Garnetlerin kullanılması ürün kalitesini arttırmış, parlatma ve cilalama zamanını azaltmıştır. İngiltere’de televizyon camı yapımında iyi bir televizyon tüpü yüzey parlaklığı elde edilmesinde 0,03–0,04 mm boyutlarında garnet tozu kullanılmaktadır.

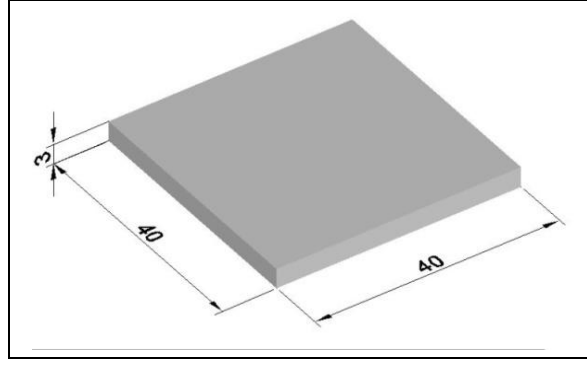
Günümüzde aşındırıcı olarak kullanılan garnetler, bir işlemsel yöntem olarak ısı işlemlere tabi tutulur. 1930 ve 1949’lu yıllarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmış olan garnetlerin aşındırıcı etkilerinin arttığına inanılmaktaydı. Ancak 1960’lı yıllarda yapılan çalışmalar bunun doğru olmadığını ortaya koymuş, çok yüksek sıcaklıkların garnet kalitesini bozduğu anlaşılmıştır. Genel olarak ısı işlemler tane yüzeyinin temizlenmesini ve tane üzerinde aşındırıcı etkisini arttıran mikroskopik kırıkların meydana gelmesini sağlamıştır [58-60].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda kullanılan 3003 H14 alüminyum alaşımı 300x200 mm' lik levhalar halinde ASSAN Alüminyum Firmasından temin edilmiştir. Hedef malzeme (aşındırılan malzeme) olarak kullanılan levha halindeki 3003 H14 alaşımının fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 5.1' de verilmiştir. Alaşımın özellikleri üretici firmadan tedarik edilmiştir. Levha halindeki 3003 H14 malzeme giyotin makas ile kesilerek, kare plakalar şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Şekil 5.1' de hazırlanan numunelerin boyutları gösterilmiştir.

Tablo 5.1. 3003 H14 alüminyum alaşımının önemli özellikleri

Alüminyum Alaşımı (Aluminium 3003-H14 ISO AlMn1Cu)	
Fiziksel Özellikleri	
Yoğunluk (g/cm ³)	2,73
Mekanik Özellikleri	
Sertlik Brinell (500 g yük; 10 mm bilye)	40
Kopma Mukavemeti (25,0 °C)(MPa) (kalınlık 0.229 - 25.4 mm)	152
Akma Mukavemeti (25,0 °C) (MPa) (kalınlık 0.229 - 25.4 mm)	145
Kopma Uzaması (%) (kalınlık 0.229-25.4 mm)	16
ElastisiteModülü (çekme) (GPa)	68,9
Poission Katsayısı	0,330
Elektriksel Özellikler	
Özdirenç (20,0 °C) (ohm-cm)	0.00000416
Isıl Özellikler	
Özgül Isı Sığası (J/g-°C)	0,893
Isı İletim Katsayısı (W/m-K)	159
Erime Noktası (°C)	643 - 654
Proses Özellikleri	
Tavlama Sıcaklığı (°C)	413
Kimyasal Kompozisyon	
	%
Alüminyum, Al	96.7 - 99.0
Bakır, Cu	0.050 - 0.20
Demir, Fe	<= 0.70
Mangan, Mn	1.0 - 1.50
Silikon, Si	<= 0.60
Çinko, Zn	<= 0.10



Şekil 5.1. 3003 H14 numunelerin boyutları

5.1. Aşındırıcı Malzeme

Deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak, iki farklı partikül boyutuna sahip garnet aşındırıcılar kullanılmıştır. Dört numaralı bölümde garnet aşındırıcılar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Garnet mineralleri Saykar Metalurji ve Yüzey İşlem Ürünleri San. Tic. Ltd. Şti'nden temin edilmiştir. Temin edilen firmadan alınan ürünlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile mineralojik yapısı Tablo 5.2'de verilmiştir. Tablo 5.3'de ise deneysel çalışmalarda kullanılan garnet aşındırıcıların partikül boyutları verilmiştir.

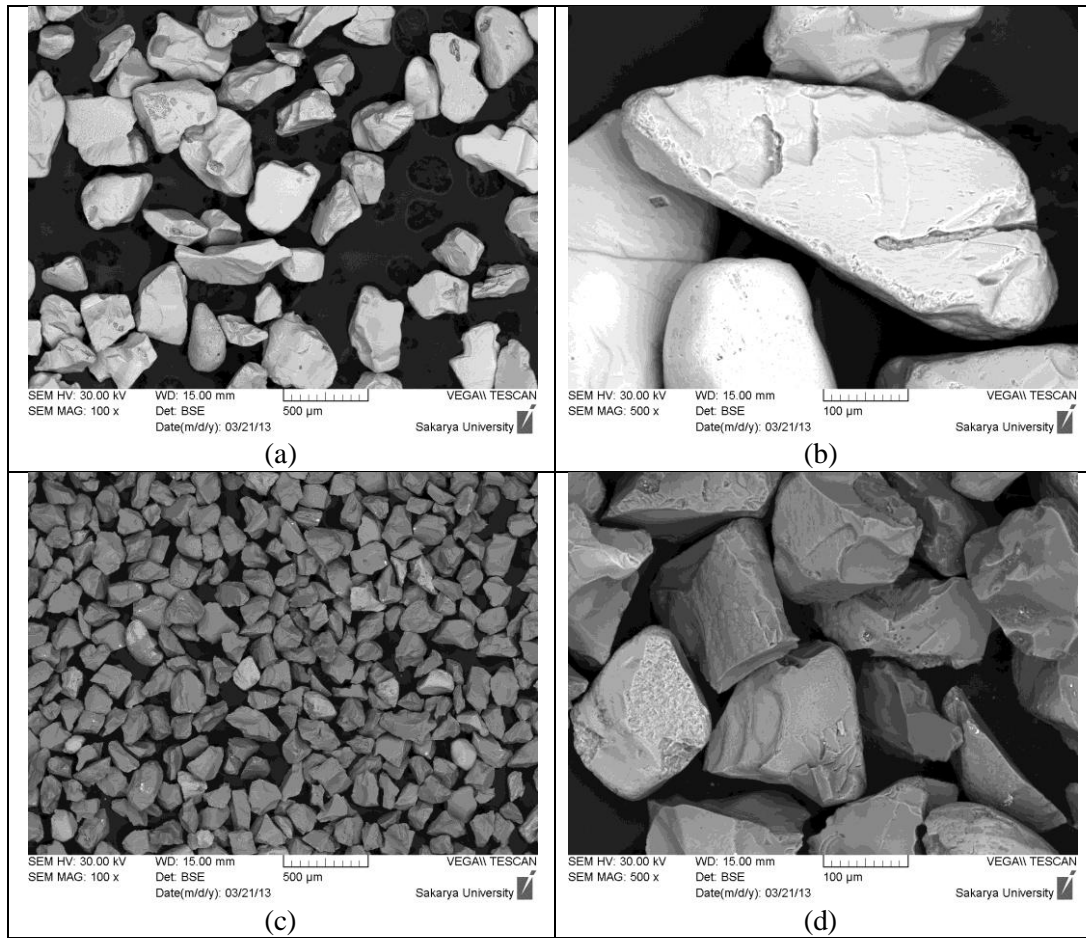
Tablo 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan garnet minerallerinin özellikleri

GARNET MİNERALİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
Garnet 'in Özgül Ağırlığı	4,1 g/cm ³
Garnet 'in Ortalama Dökme Yoğunluğu	2,4 g/cm ³
Garnet 'in Sertliği	>8 (mohsscale)
Garnet 'in Kristal Sistemi	Kübik
Garnet 'in Kırılması	Yarı-concoidal (midye kabuğu şekli)
Garnet 'in Aside Duyarlılığı	Yoktur
Garnet 'in Nem Çekme Özelliği	Nem çekmez (higroskopik değildir)
Garnet 'in Serbet Silika İçeriği	Yoktur
GARNET MİNERALİNİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	
Al ₂ O ₃ : 21%, Fe ₂ O ₃ : 31%, SiO ₂ : 35%, MgO : 8%, CaO : 1,5%, TiO ₂ : 1%	
P ₂ O ₅ : 0,05%, MnO : 0,5%, ZrO ₂ : Eser Miktarda	

Tablo 5.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları

Aşındırıcı Partikül Adı	Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
Garnet (80 Mesh)	150-212 mikron
Garnet (180 mesh)	53-90 mikron

Şekil 5.2’de deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin farklı büyütmelerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları verilmiştir.

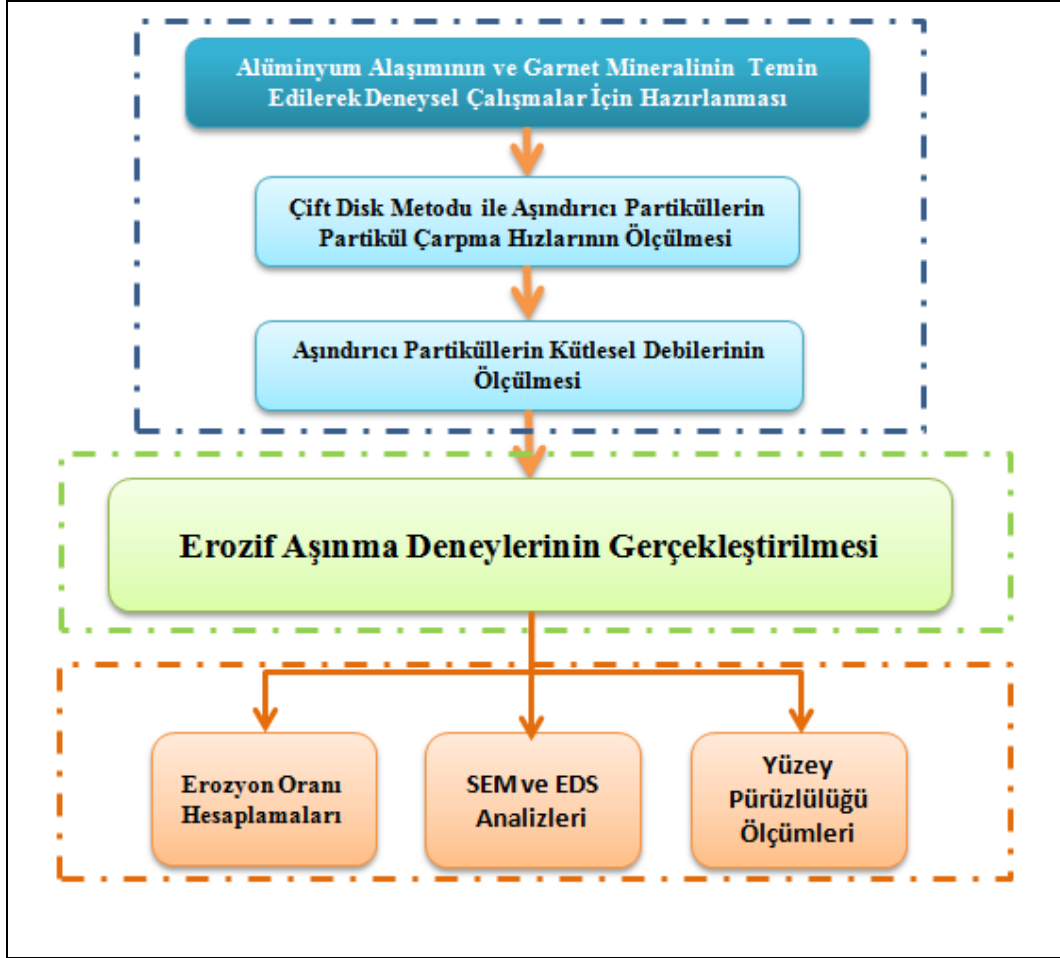


Şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcılar (a, b) 80 mesh, (c, d) 180 mesh

5.2. Yöntem

Tez çalışması kapsamında Şekil 5.3’ teki akış şemasında verilen deneysel çalışmalar sırası ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm içerisinde akış şemasında verilen yöntemlerin nasıl gerçekleştirildiği ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Deneysel

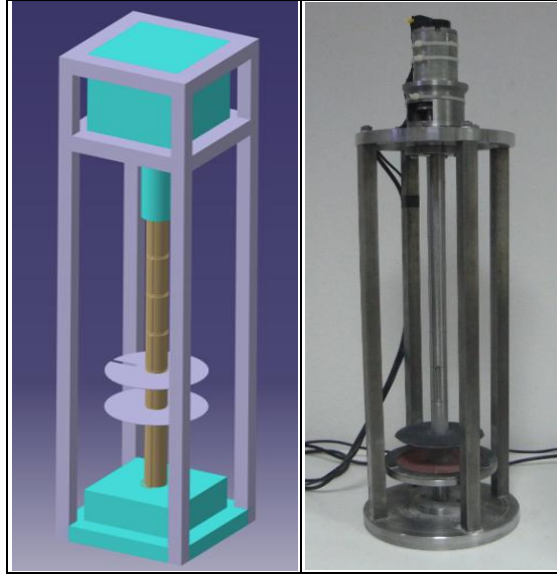
çalışmaların gerçekleştirilmesi aşamasında kullanılan cihaz ve ekipmanlar akış şemasında verilen yöntemlerin anlatıldığı bölümler içerisinde verilmiştir.



Şekil 5.3. Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması

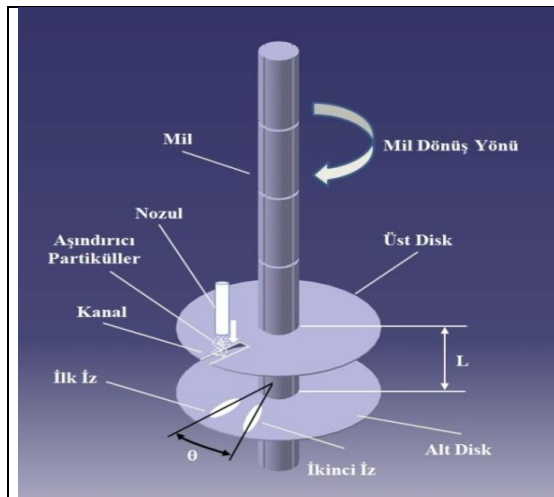
5.2.1. Çift disk yöntemi ile aşındırıcı partiküllerin çarpma hızlarının ölçülmesi

Deneysel çalışmalarda çift disk metodu ile garnet aşındırıcıları üç farklı basınçta (1,5, 3 ve 4 bar) hızlandırılmış ve bu basınçlarda partikül hızları ölçülmüştür. Çift disk metodu ile gerçekleştirilen aşındırıcı partikül hız ölçümleri için kullanılan deneysel cihaz aşağıda açıklanan matematiksel hesaplamalara göre tasarlanarak imal edilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4' te çift disk yöntemi deney düzeneğinin CAD ve gerçek resmi verilmiştir.



Şekil 5.4. Çift disk partikül hızı ölçme sisteminin CAD ve gerçek resimleri

Şekilde verilen çift disk partikül hız ölçme sisteminin temin edilmesinden sonra hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hız ölçümleri için gerekli denklemler Microsoft Office Excel’ de hazırlanmıştır. Aşınma izleri arası mesafe, diskler arası mesafe, disk merkezi ile iz arası mesafe ve disk devir sayısının excelde hazırlanan denklemlere girilmesi ile her bir partikülün 1,5, 3 ve 4 bar basınç değerlerinde hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5’ te partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler cihazın CAD resmi üzerinde verilmiştir.



Şekil 5.5. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler

Denklem (5.1) ve (5.2)'de Şekil 5.5'te verilen çift disk ile partikül çarpma hızlarının hesaplanması için kullanılan ifadeler verilmiştir. İlk aşamada disklerin dönüş hızı (n) ve aşınma izleri arasındaki açı (θ) ölçülerek partiküllerin birinci diskten ikinci diske ulaşmaları esnasında geçen süre (t) hesaplanır.

$$t = \frac{60x\theta}{360xn} \quad (5.1)$$

t = Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)

θ = İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı ($^{\circ}$)

n = Devir hızı (d/dak)' nı göstermektedir.

Daha sonra hesaplanan süre aşağıdaki denklemde yerine koyularak partiküllerin çarpma hızı bulunur.

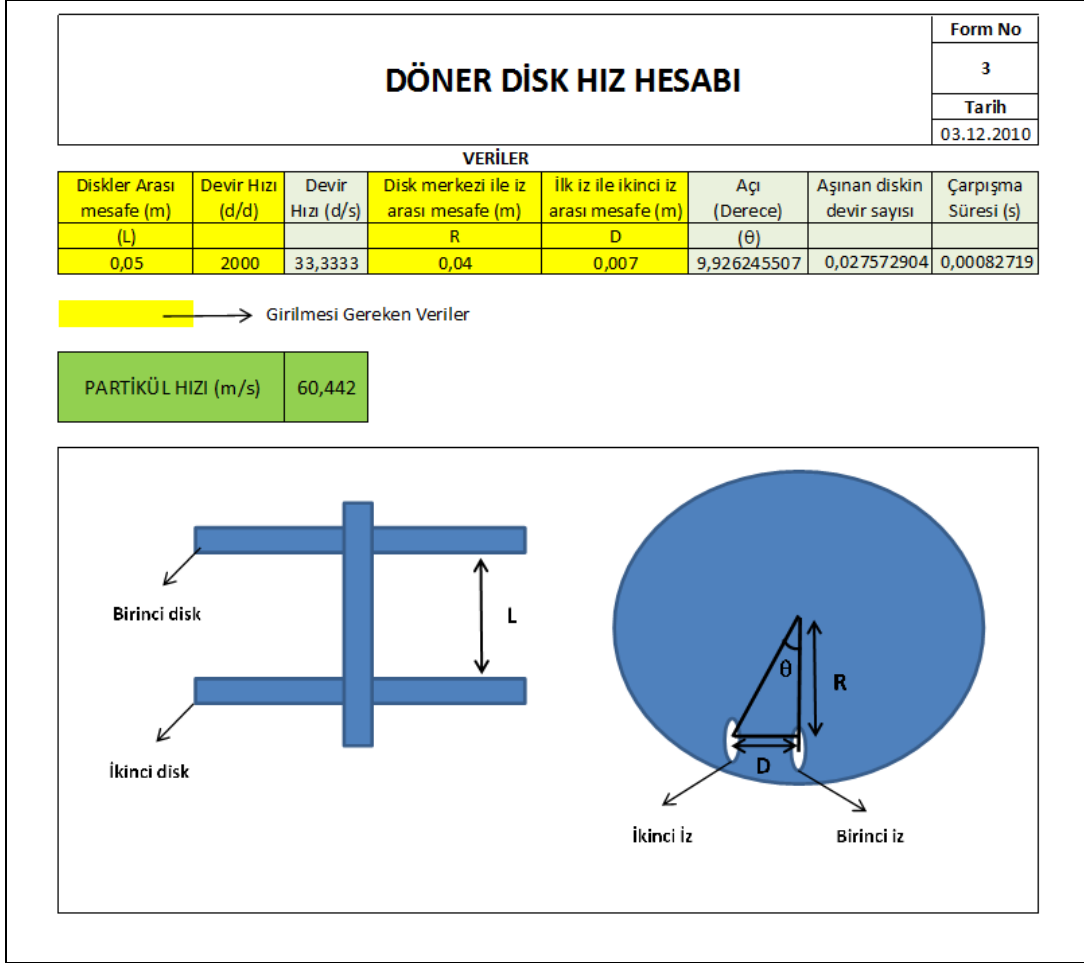
$$V = \frac{L}{t} \quad (5.2)$$

V = Partikül çarpma hızı ($m.s^{-1}$)

L = Diskler arası mesafe (m)

t = Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)'yi göstermektedir.

Şekil 5.6' da döner disk partikül hız ölçme sistemi ile ölçülen partikül hızı form üzerinde görülmektedir.



Şekil 5.6. Döner disk hız ölçüm hız hesap formu

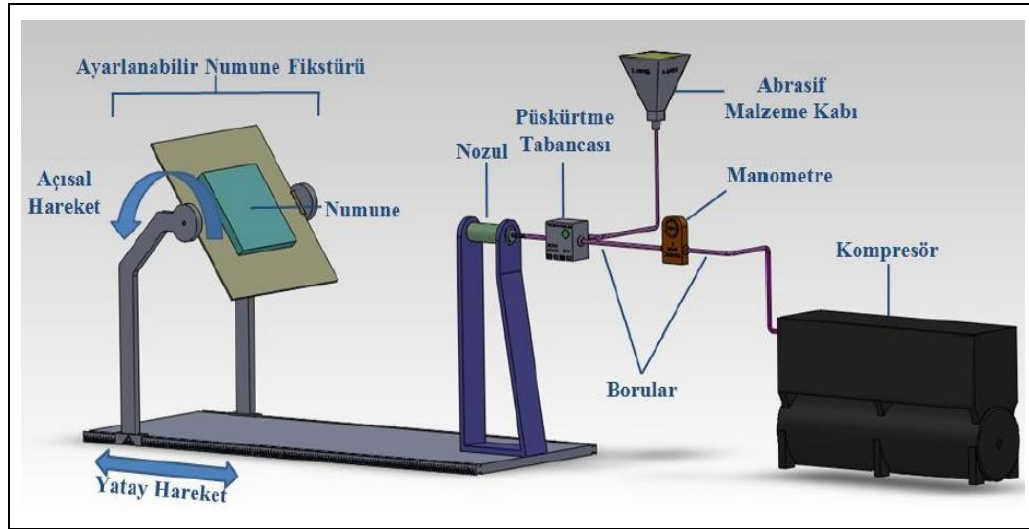
5.2.2. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin hesaplanması

Tez çalışmasında garnet aşındırıcılar üç farklı basınçta (1,5, 3 ve 4 bar) hızlandırılmış ve bu basınçlarda aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri ölçülmüştür. Elde edilen debi değerleri daha sonra alüminyum alaşımının farklı boyutlardaki partiküller ile aşındırılması sonrasında erozyon oranlarının hesaplanması için kullanılmıştır.

Kütleli debilerin ölçülmesi için aşındırıcı partiküller 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında 30 saniye süresince püskürtülmüştür. Bu süre içerisinde harcanan aşındırıcı partikül kütlelerinin püskürtme süresine bölünmesi ile her bir partikül boyutu ve basınç değeri için kütleli debi hesaplanmıştır.

5.2.3. Eroziyon deneyleri

Eroziyon deneyleri özel olarak tasarlanan eroziyon test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Eroziyon test düzeneği basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kuşlama kabini, numune fikstürü ve kuşlama tabancası elemanlarından oluşmaktadır. Kuşlama tabancası kuşlama kabini içerisine sabitlenmiştir ve kabin dışarısından bir pedal vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Kuşlama basıncı da kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir. Kuşlama kabini içerisine numunenin sabitlenmesi ve numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülmesini sağlayan özel bir numune fikstürü yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile kabin içerisine sabitlenmiş kuşlama tabancası, numunenin 15'er derece ile döndürülmesine olanak veren fikstürün hareketi ile numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtebilmektedir. Kuşlama işlemleri sırasında numuneler bu fikstür kullanılarak kuşlama tabancasından 20 mm uzaklıkta tutulmuştur. Şekil 5.7'de katı partikül erozyonu test düzeneği verilmiştir.



Şekil 5.7. Katı partikül erozyonu test düzeneği

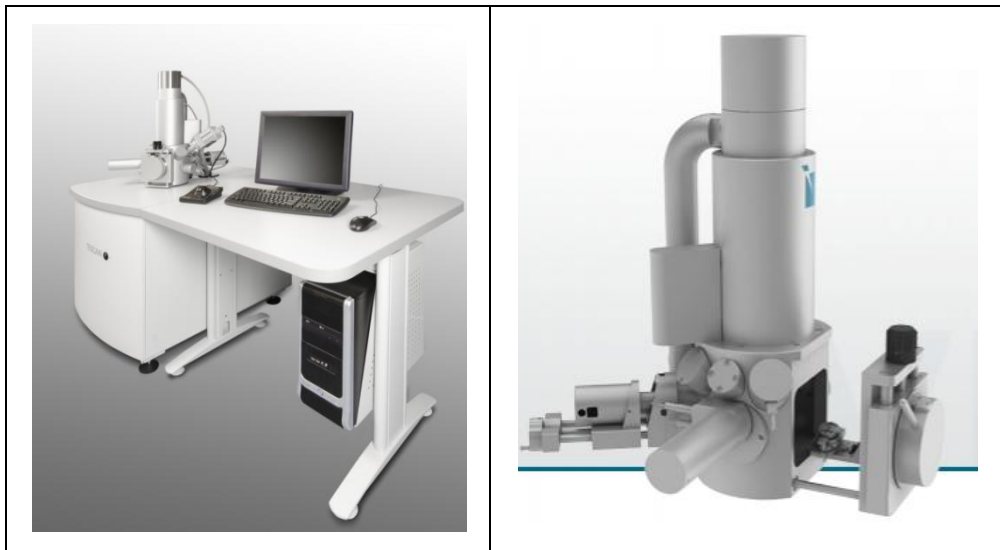
Şekilde verilen test düzeneği ile alüminyum alaşımı farklı partikül çarpma açılarında (15°, 30°, 45° ve 60°), farklı hızlarda, farklı püskürtme basınçlarında (1,5, 3 ve 4 bar) farklı partikül boyutlarında (80 ve 180 mesh) garnet mineralleri kullanılarak aşındırılmıştır. Tablo 5.4' te deneysel çalışmalarda kullanılan tüm parametreler özetlenmiştir.

Tablo 5.4. Eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı türü	Garnet
Aşındırıcı Partikül Boyutları	80 mesh (150-212 mikron) 180 mesh (53-90 mikron)
Partikül çarpma açısı	15°, 30°, 45°, 60°
Püskürtme basıncı	1,5 bar, 3 bar, 4, bar
Partikül çarpma hızı	30-81 m.s ⁻¹
Test sıcaklığı	25 °C
Nozul çapı	5 mm
Nozul uzunluğu	50 mm
Nozul- numune arası mesafe	20 mm

5.2.4. SEM ve EDS analizleri

Farklı parametreler altında aşındırılan numunelerin yüzeyleri Tescan Vega 2 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 5.8' de deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazının fotoğrafı, Tablo 5.5'de ise bu cihazın önemli özellikleri verilmiştir. Deneysel çalışmalarda enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizleri SEM cihazına ekli Bruker Quantax EDS dedektörü ile gerçekleştirilmiştir.

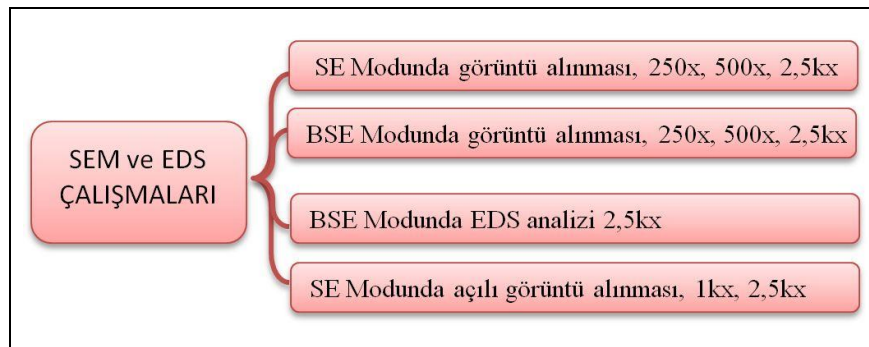


Şekil 5.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı

Tablo 5.5. SEM cihazının özellikleri

Çözünürlük	Yüksek vakum modunda 3nm, Düşük vakum modunda 3nm
Büyütme	6x – 1'000'000x
Hızlandırma Voltajı	200V - 30kV, 10V adımlı
Prob akımı	1pA - 2uA
Tarama	Tarama hızı: piksel başına 160ns - 10ms, adımlı veya sürekli
Resim boyutu	8192 x 8192 piksele kadar
Numune kabini	160 mm iç çap

Tez çalışması kapsamında farklı parametrelerde aşındırılan numunelerin yüzeyleri bu bölüm içerisinde verilen SEM cihazı ile derinlemesine incelenmiştir. SEM analizleri sırasında numunelerden farklı modlarda ve farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmış, numune yüzeylerinde EDS analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9' da SEM çalışmalarında gerçekleştirilen faaliyetler şematik olarak verilmiştir. Malzemelerin erozif aşınma davranışlarının araştırılmasında taramalı elektron mikroskobu çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Literatürde konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğunda malzemelerin erozyon oranları ile birlikte aşınmış yüzeylerin morfolojileri SEM ile birlikte incelenmiş ve malzemenin yüzey morfolojisinin incelenen parametrelere (hedef malzeme özellikleri, operasyon parametreleri, aşındırıcı partikül özellikleri, sıcaklık, nem vb çevresel özellikler vb.) bağlı olarak değişimi gözlenmiştir.

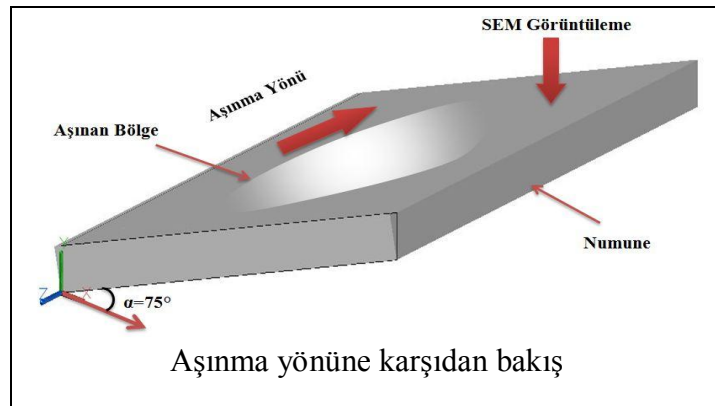


Şekil 5.9. SEM çalışmasında kullanılan yöntemler

Gerçekleştirilen çalışmalarda malzemede görülen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında birçok farklı parametrenin alüminyum alaşımın erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve

malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM çalışması gerçekleştirilmiştir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin farklı detektörler ile farklı modlarda (ikincil elektron (SE) ve geri saçılan elektron (BSE)) görüntüleri alınmış, malzeme yüzeyine saplanan partiküller enerji dağılım spektrometresi analizi (EDS) ile derinlemesine incelenmiş ve son olarak aşınmış yüzeylerden farklı görüntüleme açılarında SEM fotoğrafları alınarak incelenmiştir.

Tez çalışması içerisinde tüm bu çalışmaların sonuçları bir arada değerlendirilerek alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışı yorumlanmıştır. Bölüm içerisinde özellikle farklı görüntüleme açılarında alınan aşınmış yüzeylerin fotoğrafları özgünlük taşımaktadır. Bu görüntülerin farklı modlarda çekilen görüntüler ve EDS analizi sonuçları ile bir arada değerlendirilmeleri ile malzemelerin erozif aşınma davranışlarının elektron mikroskopisi ile incelenmesine özgün bir bakış açısı kazandırılmıştır. Şekil 5.10'da farklı görüntüleme açılarında gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 5.10' da verilen "α" simgesi görüntülemenin gerçekleştirildiği açıyı ifade etmektedir. Tez çalışması kapsamında Şekil 5.10' da verilen konumda ve aşınma yönüne karşıdan bakılarak fotoğraflar alınmıştır.



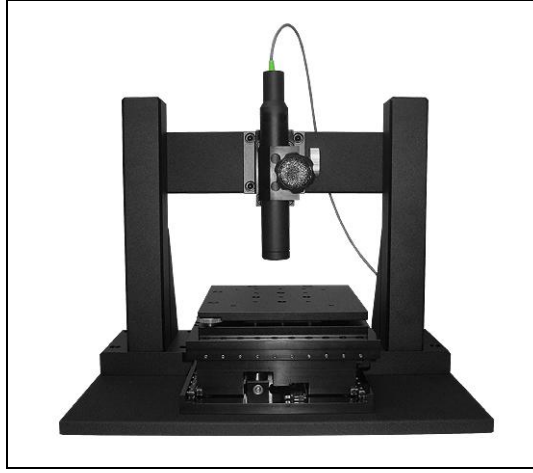
Şekil 5.10. Farklı görüntüleme açısında gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi

"DeneySEL sonuçlar ve irdeleme" bölümünde "SEM ve EDS çalışmaları" başlığı altında bu bölümde anlatılan çalışmaların sonuçları verilmiştir. Tez çalışması kapsamında alüminyum alaşımının yüzey morfolojisinin erozif aşınma parametrelerine bağlı olarak değişiminin özgün ve detaylı bir şekilde

değerlendirilmesi amacıyla bu bölüm içerisinde açıklanan çalışmalara büyük önem verilmiştir.

5.2.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Farklı operasyon parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacı ile aşındırılan numuneler optik profilometre cihazı ile taranmıştır. Cihaz yardımı ile herbir yüzeye ait ortalama pürüzlülük değeri hesaplanmıştır. Aşındırılan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.11’ de deneysel çalışmalarda kullanılan Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazının görüntüsü ve Tablo 5.6’da cihaza ait özellikler verilmiştir.



Şekil 5.11. Optik profilometre cihazı

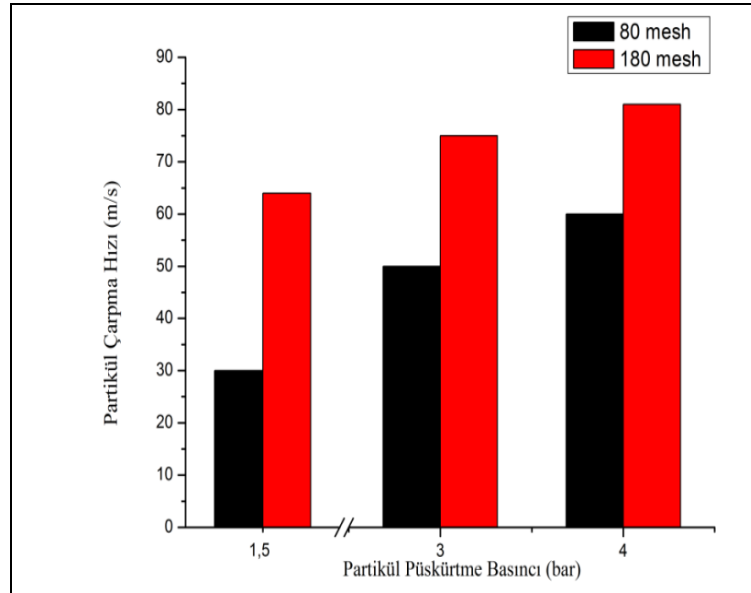
Tablo 5.6. Optik profilometre cihazının özellikleri

X-Y eksen mesafesi	50 mm
Z eksen	30 mm
X-Y eksen çözünürlüğü	0,1 μm
Maksimum X-Y hızı	10 mm/s

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debileri ve Hızlarının Değişimi

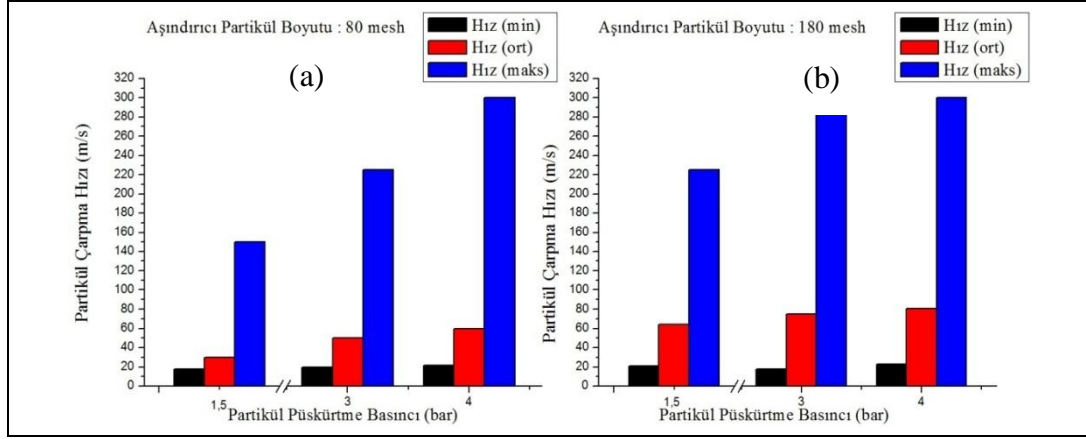
Bu bölüm içerisinde aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin ve partikül çarpma hızlarının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Tez çalışması kapsamında çift disk metodu ile iki farklı boyuttaki garnet partiküllerinin hızları ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Şekil 6.1’ de 80 ve 180 mesh boyutunda garnet partiküllerinin 1,5, 3 ve 4 bar basınçlarda ölçülen hızları verilmiştir.



Şekil 6.1. Ortalama partikül çarpma hızlarının püskürtme basıncı ve partikül boyutuna bağlı değişimi

Şekil 6.1 incelendiğinde partikül boyutunun küçülmesi ile üç basınç değerinde de partiküllerin ortalama hızlarının artış gösterdiği görülmektedir. 80 mesh boyutunda garnet partiküllerinin tüm basınç değerlerinde 180 mesh partiküllere kıyasla çok daha düşük hızlara ulaşabildikleri görülmektedir. 80 mesh partikül boyutu en yüksek basınç değerinde dahi 180 mesh boyutundaki partiküllerin en düşük basınçta ulaştığı hıza ulaşamamıştır. Partikül boyutunun erozif aşınmada partiküllerin hedef malzemeye çarpma hızları üzerinde çok etkin bir rol oynadığı sonucuna varılmaktadır.

Deneysel çalışmalarda çift disk metodu ile partiküllerin ortalama hızlarının yanında en düşük ve en yüksek hızları da ölçülerek farklı boyutlardaki partiküllerin ortalama hız dağılımları da çıkarılmıştır. Şekil 6.2’ de 80 ve 180 mesh boyutunda partiküllerin 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında hız dağılımları verilmiştir.

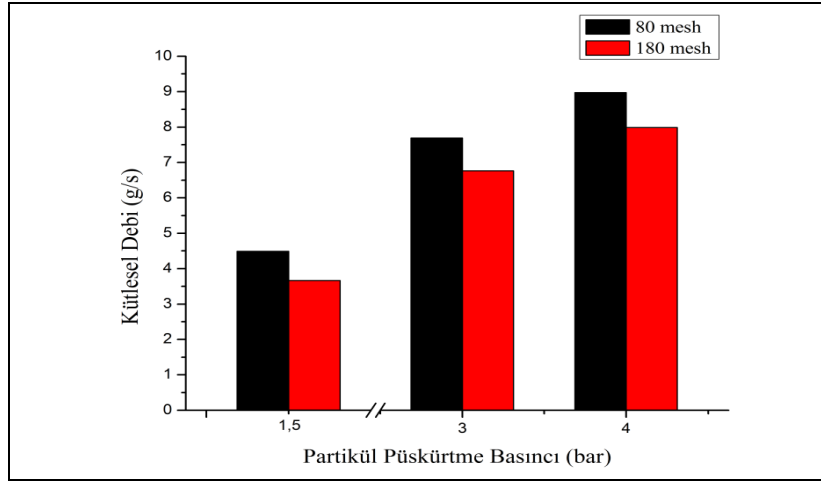


Şekil 6.2. Aşındırıcı partiküllerin basınca bağlı hız dağılımları

Şekil 6.2 incelendiğinde iki farklı partikül boyutu için püskürtme basıncının artışına bağlı olarak partiküllerin minimum ve maksimum hızlarının artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca her iki partikülde de hız dağılımının çok geniş bir aralıkta olduğu görülmektedir. Partiküllerin ulaşabildikleri minimum ve maksimum hızların ortalama hızların artışına ve azalışına paralel olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Diğer yandan hedef malzemeye çarpan partiküllerin içerisinde çok yüksek ve çok düşük hızlarda partiküller bulunduğu görülmektedir. Bu durumun partiküllerin püskürtme sistemi içerisinde farklı oranlarda hızlandıkları ve sonrasında numune yüzeyine çarpmadan önce kendi aralarında çarpışarak hızlanmaları veya yavaşlanmalarından kaynaklandığı söylenebilir.

Şekil 6.3’te aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde püskürtme basıncının artışına paralel olarak her iki partikül boyutunda da kütleli debinin artış gösterdiği söylenebilir. Diğer yandan partikül boyutunun etkisi incelendiğinde partikül boyutunun artışı ile kütleli debinin arttığı görülmektedir. Ancak partiküllerin kütleli debileri arasındaki farklılıkların ortalama hızlarına kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Diğer yandan partikül boyutunun küçülmesi ile kütleli debisi azalırken ortalama partikül hızının artması dikkat

çekmektedir. Bu durumda aynı basınç değerleri için küçük partiküllerin malzeme yüzeyine daha hızlı çarpmalarına rağmen, birim zamanda yüzeye çarpan malzeme kütlesinin düşük olduğu sonucuna varılmaktadır. Diğer bir ifade ile birim zamanda malzeme yüzeyine çarpan partikül miktarı büyük partiküllerde küçük partiküllerden daha fazladır. Ancak büyük partiküller yüzeye daha düşük hızlarda ulaşabilmektedir. Bu sonuçların malzemenin erozyon oranı üzerinde meydana getirdiği değişimler sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde tartışılacaktır.



Şekil 6.3. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

6.2. Eroziyon Aşınma Deneylerinin Sonuçları

Bu bölümde 3003 H14 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışına eroziyon aşınma test parametrelerinin etkileri incelenecektir. Tez çalışması kapsamında alüminyum alaşımını dört farklı partikül çarpma açısında (15° , 30° , 45° ve 60°), üç farklı partikül püskürtme basıncında (1,5, 3 ve 4 bar), 80 ve 180 mesh boyutunda partiküller kullanılarak aşındırılmıştır. Bu noktada alüminyum alaşımının eroziyon aşınma davranışına partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve partikül boyutunun etkilerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Diğer yandan çift disk metodu ile aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine çarpma hızları belirlenmiş ve partikül çarpma hızının alüminyum alaşımının eroziyon aşınma davranışına etkileri de ele alınmıştır. Bu noktada literatür çalışmaları incelendiğinde alüminyum alaşımlarının eroziyon aşınma davranışlarının incelenmesi aşamasında bu kadar detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tez çalışmasının en büyük çıktılarından biri tüm bu parametrelerin alüminyum alaşımlarının eroziyon aşınma davranışına etkilerinin net bir şekilde

anlaşılmasıdır. Daha önce de belirtildiği gibi erozif aşınma bir yandan mühendislik malzemelerine zarar veren bir proses iken, diğer yandan malzemelerin işlenmesi (su jeti, mikro yüzey işleme), yüzeylerinin temizlenmesi ve hazırlanması (endüstriyel kumlama) amacıyla kullanılan faydalı bir süreçtir. Bu noktada alüminyum alaşımlarının farklı parametreler altında göstermiş olduğu erozif aşınma davranışının ortaya konulması çok büyük önem arz etmektedir. Gerek alüminyum alaşımlarının kullanıldığı özellikle havacılık uygulamalarında erozif aşınma nedeniyle oluşabilecek hasarlarının minimize edilmesi aşamasında, gerek alüminyum alaşımlarının temeli erozif aşınma prosesine dayanan uygulamalar ile işlenmesi aşamasında bu bölüm içerisinde verilecek sonuçların büyük bir önem taşıdığı düşünülmektedir.

Bu bölüm içerisinde alüminyum alaşımının erozyon oranının; partikül çarpma açısı, partikül püskürtme basıncı, partikül çarpma hızı ve aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi ayrı ayrı çizilen grafikler yardımı ile incelenmiş ve bölümde alt başlıklar halinde verilmiştir.

Tablo 6.1’de erozif aşınma deneylerinde incelenen parametreler verilmiştir. Tez çalışması kapsamında tabloda verilen parametrelerin tüm kombinasyonlarında erozif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir ve tüm deneyler için 3003 H14 alüminyum alaşımının erozyon oranı hesaplanmıştır.

Tablo 6.1. Erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı Partikül Boyutu	80 ve 180 mesh
Partikül Çarpma Açısı	15°, 30°, 45° ve 60°
Püskürtme Basıncı	1,5, 3 ve 4 bar

Erozyon oranı; katı partikül erozyonu sonucunda aşınan numunedeki kütle kaybının, bu kaybı meydana getiren toplam aşındırıcı partikül kütlelerine oranı olarak tanımlanmaktadır. Bir önceki bölümde aşındırıcı partiküllerin kütledebilerinin; partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu durumda farklı basınçlarda ve boyutlarda partiküller ile aşındırılan numunelere aynı aşınma süresinde çarpan partikül miktarının (kütlelerinin) değişim

göstereceği aşikardır. Bu parametreler ile aşındırılan numunelerin erozyon davranışlarının karşılaştırılması istendiğinde doğrudan malzemede meydana gelen kütle kaybının (Δm) kullanılması doğru bir yöntem değildir. Malzemelerin erozyon miktarlarının erozyona neden olan aşındırıcı partikül kütlelerinden bağımsız olarak hesaplanması gerekmektedir. Özetle malzemelerin erozyon davranışı incelenirken birim aşındırıcının gerçekleştirdiği erozyon miktarı hesaplanmalıdır. Bu durumda parametreler ne olursa olsun malzemelerin erozyon davranışları karşılaştırılabilir. Bu nedenlerden dolayı tez çalışmasında daha önce de belirtildiği gibi tüm deneylerin sonuçları erozyon oranına göre hesaplanmıştır. Erozyon oranı Denklem (6.1)'de verilmiştir.

$$E = \frac{\Delta m_s}{m_e} \quad (6.1)$$

E = Erozyon oranı (g/g)

Δm_s = Örnek numunenin kütle kaybı (g)

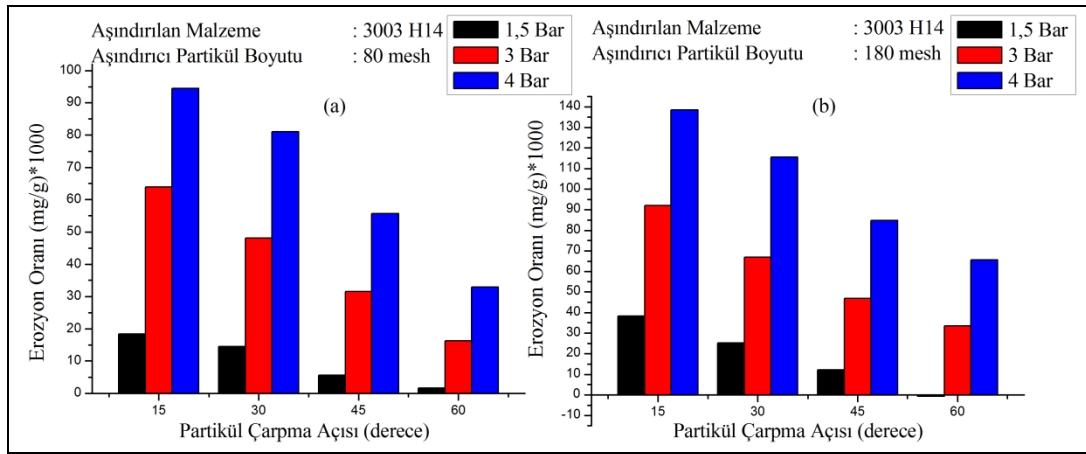
m_e = Aşındırıcı kütlesi (g)'dir

6.2.1. Erozyon oranının partikül çarpma açısına göre değişimi

Bu bölümde alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına partikül çarpma açısının etkileri incelenecektir. Alüminyum alaşımı ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde alüminyum alaşımının sünek bir erozif aşınma davranışı sergilediği görülmüştür. Literatür çalışmalarında alüminyum alaşımının sünek erozif aşınma davranışına bağlı olarak düşük çarpma açıları (15°-45° arası) maksimum miktarda kütle kaybına uğradığı, normale yakın çarpma açıları ise kütle kaybının önemli miktarda azaldığı belirtilmiştir [53-56]. Bu çalışmalar göz önünde bulundurularak tez çalışması kapsamında alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışı 15°-60° partikül çarpma açısı aralığında incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında bu açılarda iki farklı partikül boyutunda ve üç farklı partikül püskürtme basıncında erozif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrasında ölçülen kütle değişimleri ile “Yöntem” bölümü ve bu bölüm içerisinde belirtilen adımlar izlenerek alüminyum alaşımının her bir parametre için erozyon oranı

hesaplanmıştır. Bu bölüm içerisinde hesaplanan erozyon oranları ile çizilen grafikler yardımıyla alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Şekil 6.4' te 80 ve 180 mesh aşındırıcı kullanarak ve farklı partikül püskürtme basıncı değerlerinde (1,5 bar, 3 bar ve 4 bar) gerçekleştirilen deneylerde erozyon oranının partikül çarpma açısına bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 6.4. Erozyon oranının katı partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi a) partikül boyutu 80 mesh, b) partikül boyutu 180 mesh

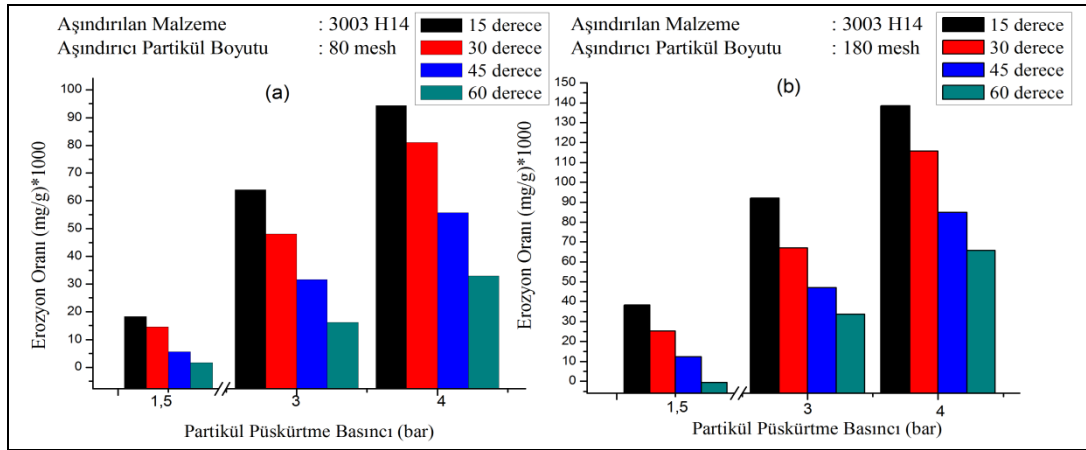
Şekil 6.4-a incelendiğinde partikül çarpma açısının artışı ile malzemenin erozyon oranının lineer bir şekilde azaldığı görülmektedir. Tüm püskürtme basınçları için bu ilişkinin geçerli olduğu Şekil 6.4-a' da açık bir şekilde görülmektedir. Bu durumda en düşük erozyon oranının alüminyum alaşımının 60° partikül çarpma açısında, en yüksek erozyon oranının ise malzemenin 15° partikül çarpma açısı altında gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 6.4-b alüminyum alaşımının küçük partiküller (180 mesh) ile farklı partikül çarpma açıları ve püskürtme basınçlarında aşındırılması ile elde edilen erozyon oranları verilmiştir. Şekil 6.4-b incelendiğinde Şekil 6.4-a için ulaşılan sonuçların geçerli olduğu söylenebilir. Tüm basınç değerlerinde maksimum erozyon oranı 15° partikül çarpma açısında, minimum erozyon oranı ise 60° partikül çarpma açısında gözlenmiştir. Şekil 6.4 incelendiğinde literatürdeki çalışmalara benzer olarak alüminyum alaşımının sünek bir erozif aşınma davranışı gösterdiği söylenebilir. Bu sonuca ek olarak partikül püskürtme basıncı, partikül çarpma hızı ve partikül boyutunun alüminyum alaşımının minimum ve maksimum erozyon oranının görüldüğü açı değerlerini

değiştirmedeği gözlenmektedir. Buna karşın bu parametrelerin erozyon oranı üzerinde radikal değişimlere yol açtığı Şekil 6.4' de görülmektedir. Bu bölüm içerisinde bu parametrelerin alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına etkileri ileriki bölümlerde detaylı bir şekilde verilecektir.

6.2.2. Erozyon oranının partikül püskürtme basıncına göre değişimi

Partikül püskürtme basıncı literatürde de incelendiği üzere erozyon oranına etki eden önemli bir operasyon parametresidir. Bu bölümde erozyon oranının partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi farklı partikül çarpma açılarında ve farklı boyutlarda aşındırıcı partikül kullanılarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar Şekil 6.5' te verilmiştir.

Şekil 6.5-a' da 80 mesh aşındırıcı partiküller ile aşındırılan 3003 H14 alüminyum alaşımının farklı partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişen erozyon oranları gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde erozyon oranının partikül püskürtme basıncının artması ile artış gösterdiği ve en yüksek püskürtme basıncında en yüksek erozyon oranının gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 6.5. Erozyon oranının katı partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi
a) partikül boyutu 80 mesh, b) partikül boyutu 180 mesh

Şekil 6.5-b'de 180 mesh aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde partikül püskürtme basıncının artması ile erozyon oranının arttığı görülmektedir. Şekilde tüm partikül püskürtme basıncı değerleri için 4 farklı açı değerinde (15°, 30°, 45° ve 60°) erozyon oranları incelenmiştir. Partikül püskürtme basıncı arttıkça tüm açı değerleri için erozyon oranının arttığı gözlenmektedir. Bunun sebebi artan

püskürtme basıncı ile aşındırıcı partiküllerin sahip olduğu kinetik enerjinin artmış olması ve partiküllerin hedef malzemeye bu yüksek enerjileri ile çarpmaları sonucunda da malzemeyi daha fazla aşındırmalarıdır.

6.2.3. Erozyon oranının partikül boyutuna göre değişimi

Aşındırıcı partikül boyutu malzemelerin erozif aşınma davranışlarını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Buna karşın literatürde bu konu ile ilgili çok detaylı çalışmalar bulunmamaktadır. Birçok araştırmacı farklı malzemelerin erozif aşınma davranışlarını farklı boyutlarda partiküller ile incelemiştir [49]. Bazı araştırmacılar partikül boyutunun erozif aşınma üzerinde önemli bir etkinliği olmadığını dile getirmiştir. Buna karşın araştırmacıların bir çoğu aşındırıcı partikül boyutunun malzemelerin erozif aşınma davranışları üzerinde etkin olduğu ve genel olarak aşındırıcı partikül boyutunun artışına paralel olarak erozyon oranının da artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Tez çalışmasında alüminyum alaşımı 80 ve 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar ile farklı partikül çarpma açıları ve püskürtme basınçlarında aşındırılmış ve aşındırıcı partikül boyutunun etkileri incelenmiştir.

Şekil 6.6'da 3003 H14 alüminyum alaşımında erozyon oranına partikül boyutunun etkisi, farklı partikül püskürtme basıncı ve farklı partikül çarpma açısı değerlerinde verilmiştir.

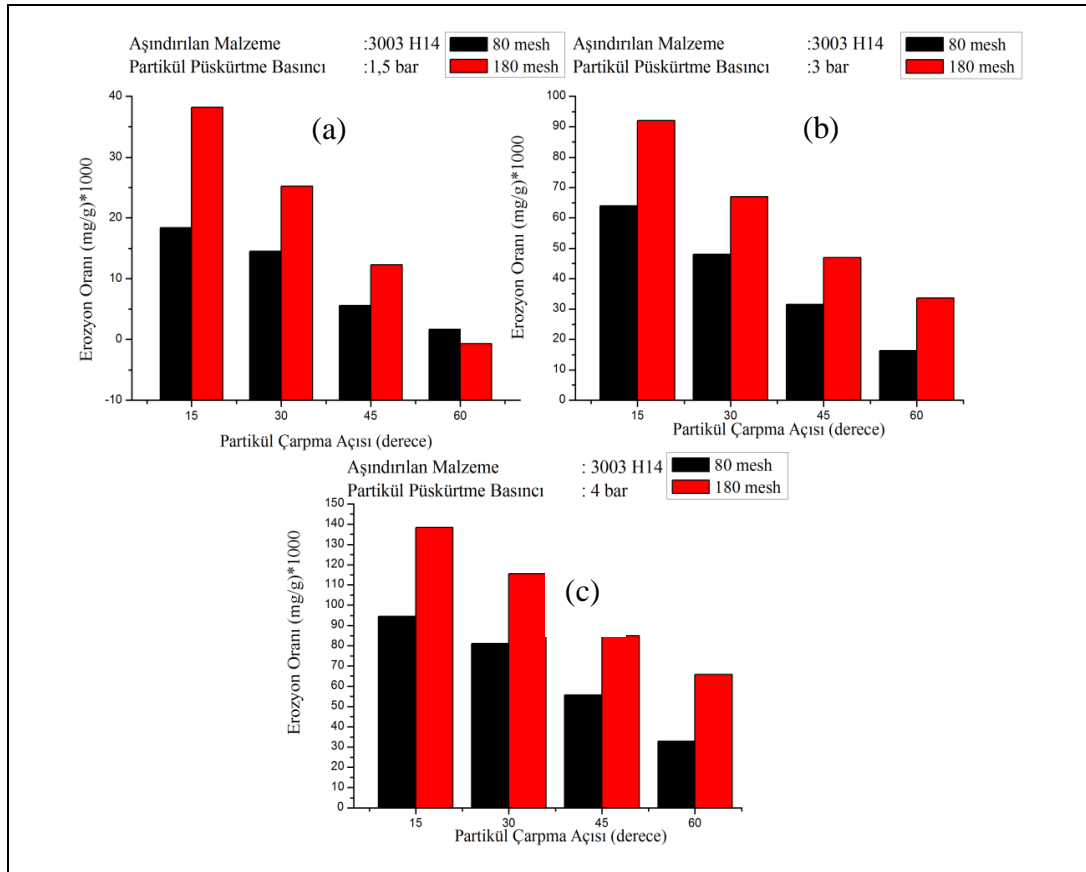
3003 H14 malzemesinin Şekil 6.6-a' da 1,5 bar, Şekil 6.6-b' de 3 bar, Şekil 6.6-c' de 4 bar partikül püskürtme basıncı altında, farklı partikül çarpma açıları ve farklı aşındırıcı partikül boyutlarında (80 mesh ve 180 mesh) gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. Şekilde kırmızı sütun ile 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller, siyah sütun ile de 80 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin sonuçları verilmiştir.

Şekil 6.6-a incelendiğinde 1,5 bar püskürtme basıncında tüm çarpma açısı değerleri için gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda en yüksek erozyon oranının 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil 6.6-b incelendiğinde 3 bar püskürtme basıncında, tüm çarpma açısı değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde aşındırıcı partikül boyutunun erozyon

oranına etkisi incelenmiş, 180 mesh boyutunda aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde erozyon oranı miktarının 80 mesh boyutunda gerçekleştirilen deneylere kıyasla daha yüksek değerde olduğu görülmüştür.

Şekil 6.6-c’ de 3003 H14 malzemesinin 4 bar partikül püskürtme basıncı altında, farklı partikül çarpma açıları ve farklı aşındırıcı partikül boyutlarında (80 mesh ve 180 mesh) gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm açı değerleri için yapılan aşınma deneyleri sonucunda 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleşen erozyon oranının, 80 mesh boyutundaki partiküller kullanılarak elde edilen sonuçlara kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6.6. Erozyon oranının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi partikül püskürtme basıncı a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar (erozyon süresi 20 saniye)

Bölüm içerisinde verilen grafikler incelendiğinde alüminyum alaşımının erozyon oranı değerinin kullanılan aşındırıcıların boyutlarına bağlı olarak önemli bir değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Küçük partiküllerin büyük partiküllere kıyasla alüminyum alaşımında daha fazla kütle kaybına yol açtıkları belirlenmiştir.

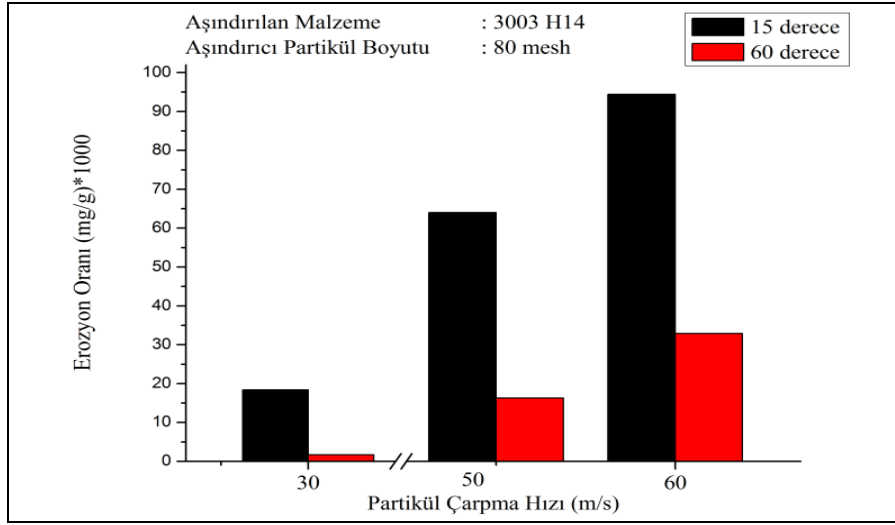
Bu durumun küçük partiküllerin büyük partiküllerle karşılaştırıldığında hedef malzemeye daha yüksek hızlarda çarpmalarından kaynaklandığı söylenebilir. “Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debileri ve Hızlarının Değişimi” bölümü içerisinde küçük partiküllerin hedef malzemeye büyük partiküllere kıyasla çok daha yüksek hızlarda çarptıkları belirlenmiş ve çizilen grafikler yardımı ile bu sonuçlar açıklanmıştır. Daha yüksek hızlara sahip partiküller daha yüksek bir kinetik enerji ve momentuma da sahiptir. Bu durumda tek bir aşındırıcı partikülün sahip olduğu toplam enerji küçük partiküllerde büyük partiküllere kıyasla daha yüksek olmaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak küçük partiküller alüminyum alaşımını daha yüksek miktarda aşındırabilmektedir.

Yukarıda belirtilen çıktılar uygulamada büyük önem taşımaktadır. Konu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde partikül boyutunun azalması ile erozyon oranının artması beklenmeyen bir sonuçtur. Bu bölüm içerisinde küçük partiküllerin yukarıda belirtildiği gibi alüminyum alaşımında daha yüksek erozyon oranına, diğer bir ifade ile daha yüksek tahribata yol açtıkları belirlenmiştir. Bu noktada malzemelerin erozif aşınma karşısında hasar görmemeleri ve kullanım ömürlerinin arttırılması için bu çıktılar göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Diğer yandan kumlama vb. uygulamalar için de bu çıktılar büyük bir önem arz etmektedir. Malzeme yüzeyinin işlenmesi, temizlenmesi ve pürüzlendirilmesi uygulamalarında küçük partiküllerin daha efektif olduğu sonucu uygulamada büyük avantaj sağlayabilir. Çok büyük veya çok küçük hassas makine elemanlarının işlenmesi aşamasında doğru partikül boyutunun seçilmesi hem uygulamanın güvenilirliğini hem de verimliliğinin sağlanması için büyük önem arz etmektedir. Tez çalışmasının sonuçlar bölümünde bu çalışmaların endüstriyel ve akademik çıktıları derinlemesine değerlendirilecektir.

6.2.4. Erozyon oranının partikül çarpma hızına göre değişimi

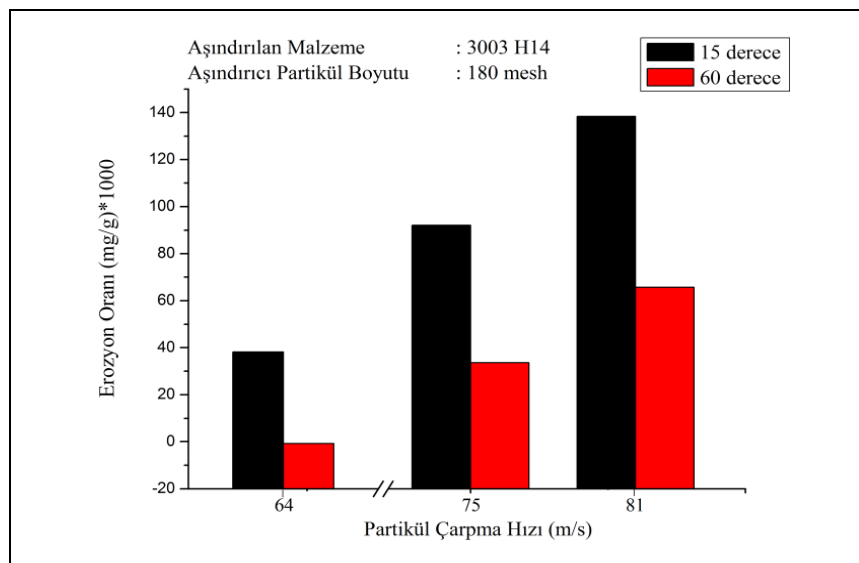
3003 H14 malzemesinin erozif aşınma davranışına etkiyen önemli bir operasyon parametresi de partikül çarpma hızıdır. Aşındırıcı partiküllerin malzemeye çarpma hızları malzemedeki aşındırıcı miktarı etkilemektedir [52, 57]. Şekil 6.7’ de 80 mesh boyutundaki partiküllerin sahip olduğu 3 farklı hız değerinde (30, 50 ve 60 ms^{-1}) gerçekleştirilen deneyler sonucunda meydana gelen erozyon oranı değerleri

verilmiştir. Partiküller püskürtme basıncı ile hızlandırılmış, hızları çift disk metodu ile ölçülmüştür. Bölüm 5’ te çift disk metodu detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 6.7. Erozyon oranının partikül hızına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu 80 mesh, erozyon süresi 20 saniye)

Şekil 6.7’ de 80 mesh boyutunda aşındırıcı partiküllerin hızlarını 30, 50 ve 60 ms⁻¹ hızla çıkararak deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekle genel olarak bakıldığında partikül çarpma hızının artması ile erozyon oranında artış meydana gelmektedir. Şekilde ayrıca tüm hız değerleri için 2 farklı açıda (15° ve 60°) aşınma değerleri verilmiştir. Partikül çarpma açılarının her ikisi için de partikül çarpma hızının artması ile erozyon oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 6.8. Erozyon oranının partikül hızına bağlı olarak değişimi (aşındırıcı partikül boyutu 180 mesh, erozyon süresi 20 saniye)

Şekil 6.8' de 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanmış ve bu partiküllerin çarpma hızı değerleri 64, 75 ve 81 ms⁻¹ olarak hesaplanıp aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekle genel olarak bakıldığında partikül çarpma hızının artması ile erozyon oranında artış meydana gelmektedir. Ayrıca grafikte her bir hız değeri için 2 farklı açıda (15° ve 60°) aşınma gerçekleştirilmiştir. Erozyon oranının partikül çarpma açısının 15° olduğu durumda tüm hız değerlerinde en yüksek değerde gerçekleştiği görülmektedir.

Partikül çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranında değişim meydana geldiği daha önceki bölümde bahsedilmiştir. Şekildeki grafikte 64 ms⁻¹ hız ile gerçekleştiren deneyler incelendiğinde en yüksek erozyon oranının 15° partikül çarpma açısında meydana geldiği, 60° partikül çarpma açısı değerlerinde erozyon oranının azaldığı görülmektedir. Tüm hız değerleri için incelendiğinde partikül çarpma hızı arttıkça erozyon oranının partikül çarpma açısı etkisine bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir.

6.3. SEM ve EDS Çalışmaları

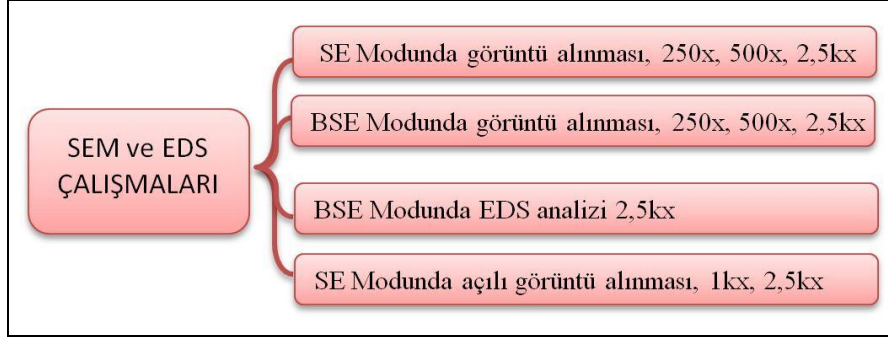
3003 H14 alüminyum alaşımının erozyon oranının partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve partikül boyutuna bağlı olarak önemli derecede değişim gösterdiği bir önceki bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ancak bu çıktıların yanında bu sonuçların nedenlerinin anlaşılması çok önemlidir. Katı partikül erozyonu çok karmaşık bir aşınma sürecidir. Bu sürecin ve bu sürece etki eden parametrelerin malzemede meydana getirdiği değişimin net olarak anlaşılabilmesi için aşındırılmış yüzeylerin morfolojilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle malzemelerin erozif aşınma davranışlarının araştırılmasında taramalı elektron mikroskobu çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Aşınma sonrası malzeme yüzeyinde meydana gelen hasarın analizi ile alüminyum alaşımında hangi parametrelerin ne tür bir hasara yol açtıkları ve oluşan bu hasarın hangi aşınma mekanizmaları ile meydana geldiğinin belirlenmesi önemli bir husustur. Literatürde bir çok malzemenin erozif aşınma davranışlarının incelenmesi aşamasında gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğunda malzemelerin erozyon oranları ile birlikte aşınmış yüzeylerin morfolojileri SEM ile birlikte incelenmiş ve malzemenin yüzey morfolojisinin incelenen parametrelere (hedef malzeme özellikleri, operasyon

parametreleri, aşındırıcı partikül özellikleri, sıcaklık, nem vb çevresel özellikler) bağlı olarak değişimi gözlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda özellikle malzemede görülen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında birçok farklı parametrenin 3003 H14 alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM çalışması gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında birçok farklı parametre ile çalışılmış ve bu parametrelerin malzemenin erozyon oranına olan etkileri açık bir şekilde ortaya konmuştur. Bu etkilerin ana nedenlerinin ortaya konması için ise tez çalışmasında çok kapsamlı bir SEM analizi planlanmış ve incelenen tüm parametrelerde aşındırılan numunelerin yüzeyleri SEM yardımı ile incelenmiştir. SEM çalışmalarının nasıl gerçekleştirildiği “Yöntem” bölümünde açıklanmıştır. Ancak bu bölüm içerisinde de bu çalışmalar ile ilgili özet bilgiler verilmiştir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin farklı detektörler ile farklı modlarda (SE ve BSE) görüntüleri alınmıştır. Aşınma parametrelerinin etkisi aşınmış yüzeylerden farklı çalışma açılarında görüntüler alınarak incelenmiştir.

Ayrıca malzeme yüzeyine saplanan partiküller enerji dağılım spektrometresi analizi (EDS) ile derinlemesine incelenmiştir. Farklı partikül çarpma açılarında, basıncında ve boyutunda partiküller ile gerçekleştirilen aşınma sonucunda malzeme yüzeyine saplanan partiküller incelenmiştir. Saplanmanın hangi parametrenin etkisi ile daha yüksek oranda meydana geldiği, saplanma sonucunda yüzeyde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

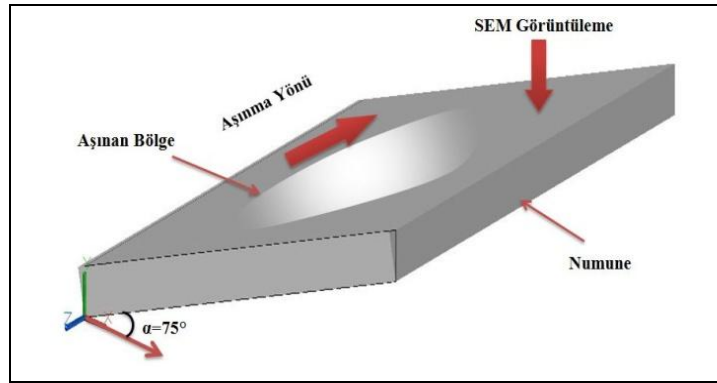
Şekil 6.9’ da 3003 H14 alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen SEM ve EDS çalışmaları özetlenmiştir.



Şekil 6.9. SEM çalışmaları

Bu bölüm içerisinde tüm bu çalışmaların sonuçları ayrı ayrı değerlendirilerek alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışı yorumlanmıştır. Bölüm içerisinde özellikle farklı görüntüleme açılarında alınan aşınmış yüzey morfolojilerinin görüntüleri özgünlük taşımaktadır. Bu görüntülerin farklı modlarda çekilen görüntüler ve EDS analizi sonuçları ile ayrı ayrı değerlendirilmeleri ile malzemelerin erozif aşınma davranışlarının elektron mikroskopisi ile incelenmesine özgün bir bakış açısı kazandırılmıştır. Şekil 6.10' da farklı görüntüleme açılarında gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi verilmiştir.

Tez çalışması kapsamında aşındırılmış numuneler SEM numune kabini içerisinde şekilde gösterildiği gibi döndürülmüş ve aşınma yönüne tersten bakılarak fotoğraflar alınmıştır.



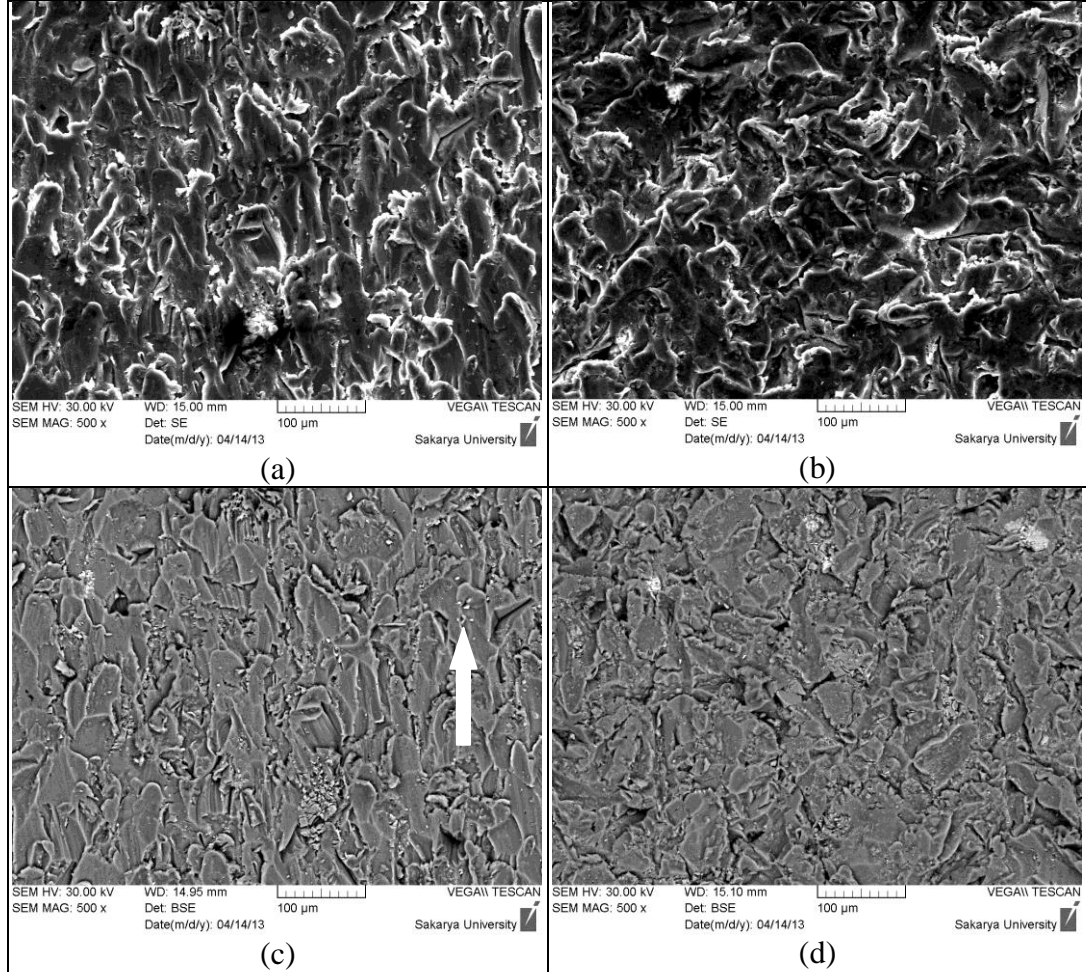
Şekil 6.10. Farklı çalışma açısında gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi

Bu bölüm içerisinde SEM ve EDS analizleri ana başlıkları altında partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, aşındırıcı partikül boyutunun 3003 H14 alüminyum alaşımının yüzey morfolojisine ve malzemede görülen erozif aşınma mekanizmalarına olan etkileri ayrı ayrı başlıklar altında açıklanacaktır.

6.3.1. SEM çalışmaları sonuçları

6.3.1.1. Partikül çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi

Farklı çarpma açılarında 3003 H14 alüminyum alaşımının yüzeyinde oluşan hasar bölgeleri ve morfolojileri ile ilgili SEM inceleme örnekleri SE ve BSE modunda Şekil 6.11’de verilmiştir. Şekilde beyaz ok ile aşınma yönü belirtilmiştir.



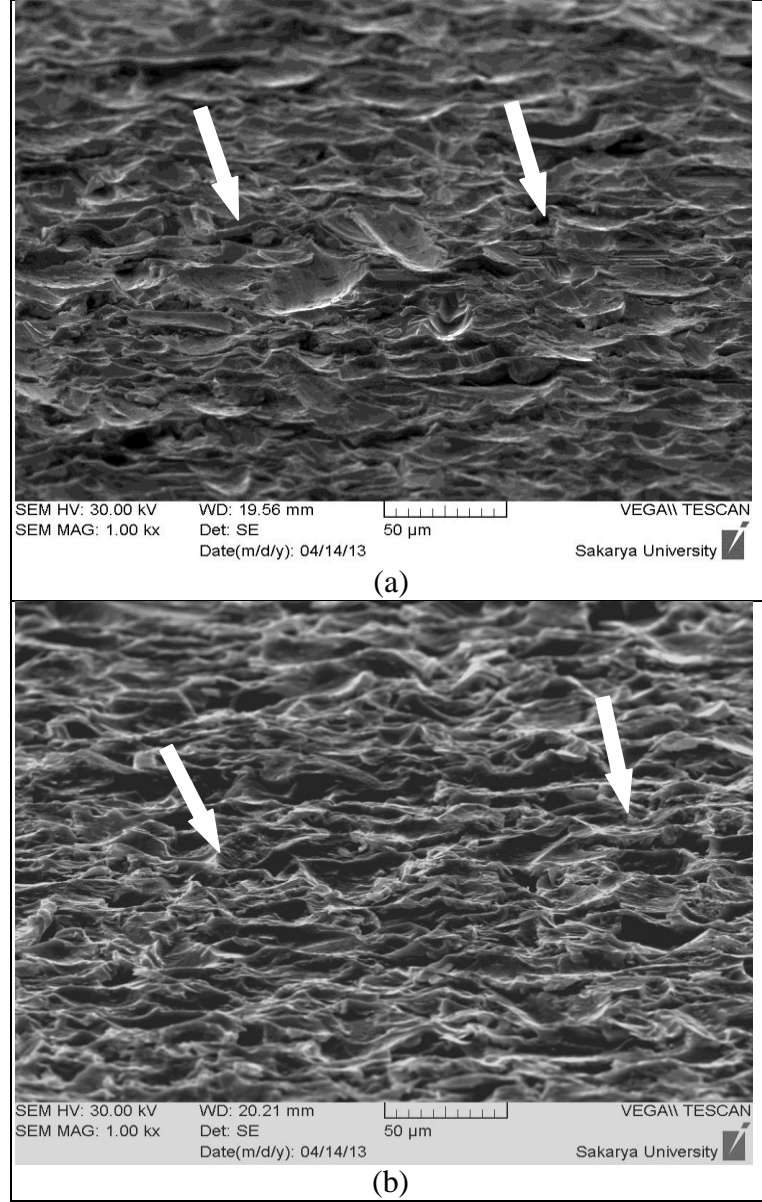
Şekil 6.11. a) 15°, b) 60°, c) 15°, d) 60° çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)

Şekil 6.11-a ve c’ de alüminyum alaşımında maksimum aşınmanın olduğu 15° çarpma açısında yüzeyde mikro sürme izleri ve bu izlerin sonunda malzeme kopmasıyla sonuçlanan aşınma izleri net bir şekilde gözlemlenmektedir. 80 mesh partiküller malzeme yüzeyinde çok fazla sayıda darbe izi bırakmış, bu darbelerin enerjisi yüksek olduğu için malzeme kaybı ileri derecede gerçekleşmiştir. Şekil 6.11-b ve d’ de ise 60° çarpma açısında aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları

verilmiştir. SEM görüntülerinde aşındırıcı partiküllerin çarpması sonucu ortaya çıkan plastik şekil değiştirmenin baskın olduğu, fakat bu şekil değişimlerinin malzeme kaybıyla sonuçlanmadığı gözlemlenmektedir. Dikleşen çarpma açısı malzemede mikro sürmeden ziyade mikro dövme etkisi yaparak malzeme yüzeyinin pekleşmesine yol açmakta ve bu mekanizmalar sonucu Şekil 6.11-b ve d' de verilen yüzey morfolojileri ortaya çıkmaktadır.

Şekil 6.12' de 15° ve 60° çarpma açılarında SEM incelemelerini farklı bir perspektiften bakmak amacıyla aşınma yönüne 75° tersten bakılarak SEM görüntüleri elde edilmiştir. Bu açıda SEM görüntüsü elde ederek katı partikül erozyonu sonrası 3003 H14 alüminyum malzeme yüzey topografyasındaki hasar mekanizması görüntüsünden 3 boyutlu bir görüntü elde edilmeye çalışılmıştır. Bu açıda bakılarak yüzeyde oluşan hasar kraterleri derinlik algısı güçlendirilmeye çalışılmıştır. Şekilde beyaz oklar ile çarpma açısına bağlı olarak aşındırıcıların oluşturduğu izler gösterilmiştir. Şekil 6.12-a' da yüzey görüntülerinde maksimum aşınmanın olduğu 15° çarpma açısında parça kopmalarıyla sonuçlanan geniş ve derin hasar kraterleri olduğu ve yüzeydeki dalga etkisinin bütün yüzeye yayılarak geniş alanlı bir malzeme kaybına yol açtığı görülmektedir.

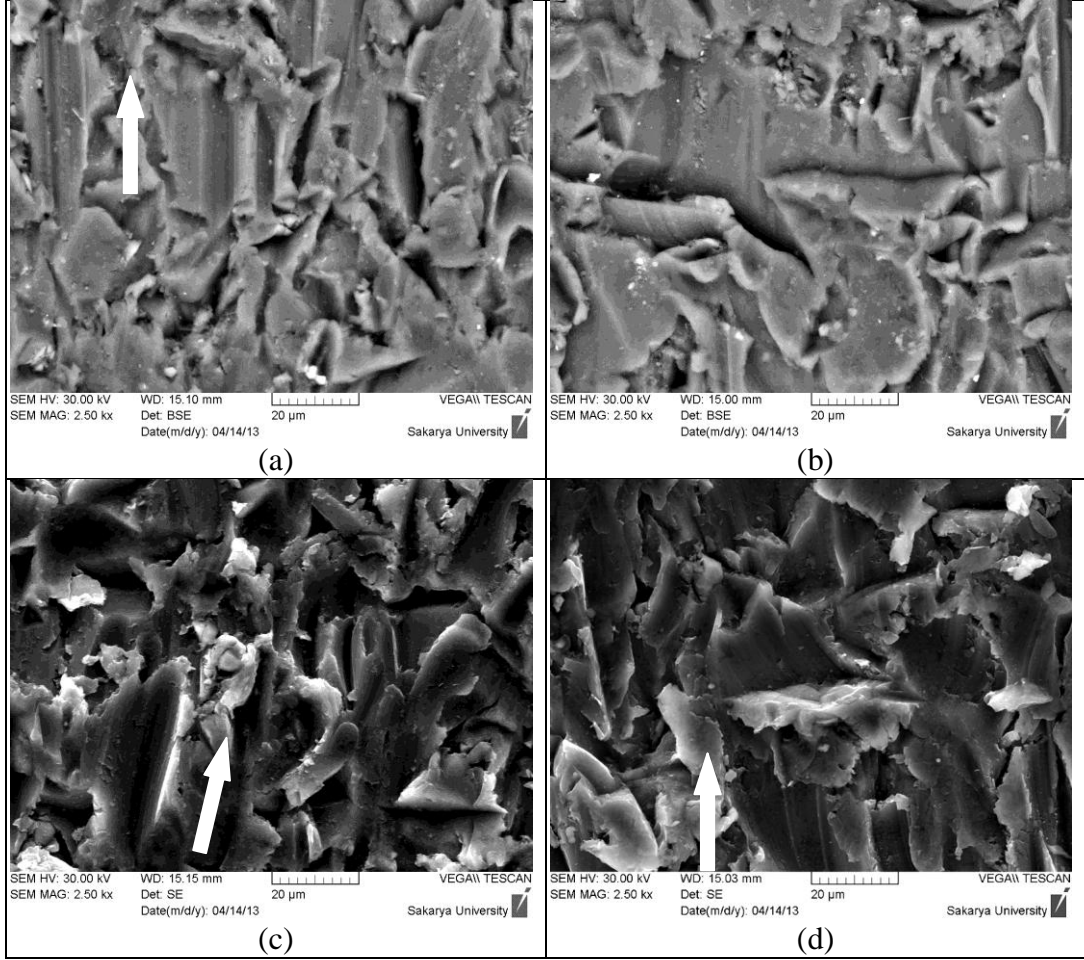
Diğer taraftan çarpma açısı dikleşerek 60°' ye geldiğinde (Şekil 6.12-b), yüzeyde mikro dövme ve buna bağlı plastik deformasyonların öne çıktığı gözlemlenmektedir. Yüzeyde dalgalanma şeklindeki plastik yer değiştirmelerin birim alandaki sayısı artmış fakat buna bağlı malzeme kaybı azalmıştır. 15° çarpma açısında büyük alanlı dalga formundaki yer değiştirmeler 60° çarpma açısında küçük alanlı dalga formunda yer değiştirmelere dönüşmüştür. Bu görüntü maksimum aşınmanın 15°' de ve minimum aşınmanın 60° ortaya çıkması verileriyle örtüşmektedir.



Şekil 6.12. a) 15°, b) 60° çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerin 1kx büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)

6.3.1.2. Partikül püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkisi

Partikül püskürtme basıncının etkilerini gözlemlemek amacıyla deneyler sırasında aşındırıcılar farklı basınçlarda püskürtülerek malzeme aşındırılmış ve yüzeyde görülen hasar mekanizmaları SEM görüntüleri ile incelenmiştir. Şekil 6.13' te farklı püskürtme basınçlarında aşındırılan numunelerin SE ve BSE modda çekilmiş SEM fotoğrafları verilmiştir.



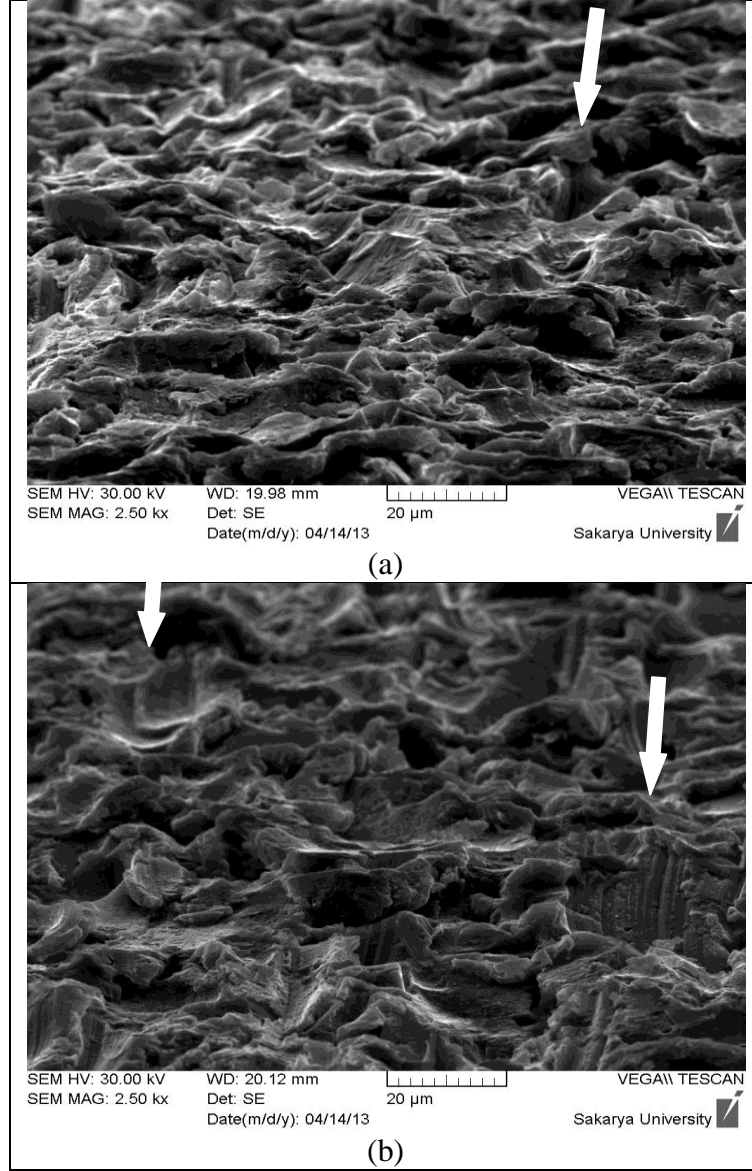
Şekil 6.13. a) 1,5 bar, b) 4 bar, c) 1,5 bar, d) 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)

Basıncın artması partikül hızlarını doğrudan etkilemekte, bu sebeple aşındırıcının hedef malzeme üzerinde oluşturduğu hasar görüntüsü de değişmektedir. Şekil 6.13'te partikül püskürtme basıncına bağlı olarak yüzeyde oluşan aşınma mekanizmaları beyaz oklar yardımı ile gösterilmiştir. Şekil 6.13-a ve c' de 1,5 bar püskürtme basıncında 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküllerin 3003 H14 alüminyum malzeme yüzeyinde oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.13-b ve d' de ise aynı parametrelerde 4 bar püskürtme basıncındaki SEM görüntüleri verilmiştir. 1,5 bar basınçta aşınma izleri derinliği daha az iken 4 bar püskürtme basıncına çıkıldığında 3003 H14 alüminyum alaşımı yüzeyindeki malzeme kopması izleri ağırlık kazanmıştır. 4 bar basınçta aşındırıcı partiküllerin hızları, plastik deformasyon izlerini ve bu izlerin derinliğini artırmıştır. Partiküllerin yüzeydeki aşınma izlerini derinleştirmesi, püskürtme basıncının hasar

mekanizması üzerindeki etkisini net olarak ortaya koymaktadır. 1,5 bar basınçta aşındırıcı garnet partiküller daha çok mikro sürme ve buna bağlı yüzeyde plastik deformasyonlar oluştururken, 4 bar basınca çıkıldığında malzeme yüzeyinde koparak ayrılmalara bağlı düzlemsel alanlar görülmektedir.

Şekil 6.14' te 75° görüntüleme açısında 1,5 ve 4 bar püskürtme basınçlarında çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde gerçekleşen hasar mekanizmaları beyaz oklar yardımı ile belirtilmiştir. Her iki fotoğraf da 15° partikül çarpma açısında 180 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılan numunelerin farklı basınçlarda aşındırılması ile oluşan yüzey morfolojilerini yansıtmaktadır. Şekil incelendiğinde her iki görüntüde de malzeme yüzeyinde mikrosürme ve mikrokesme erozif aşınma mekanizmalarının etkin olduğu ve bu mekanizma sonucunda yüzeyde aynı doğrultuya sahip aşınma izleri oluştuğu söylenebilir.

Ancak basınç artışı ile oluşan bu izlerin derinliğinin arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.14-a' da Şekil 6.14-b' ye kıyasla daha yüzeysel izlerin oluştuğu açık bir şekilde gözlenmektedir. Şekil 6.14-a' da oluşan izlerin yüzeylerinin düzlemsel olduğu, oluşan hasar yüzeylerinde çok küçük pürüzlülüklerin yer aldığı görülmektedir. Buna karşın 4 bar püskürtme basıncında aşındırılan numunede oluşan hasar izlerinde aşındırıcı partiküllerin oluşturduğu çizikler ve yüksek pürüzlülükler dikkat çekmektedir. Aşındırıcı partikül sahip olduğu yüksek kinetik enerji sayesinde malzeme yüzeyinde oluşturmuş olduğu hasar kraterinin yüzeyinde aşınma doğrultusunda derin izler meydana getirmiştir. Aşındırıcı partiküllerin yüzeylerindeki keskin köşelerin aşınma kraterlerinin oluşması esnasında malzeme yüzeyini adeta kazıyarak tahribata ve yüksek malzeme kayıplarına yol açtıkları söylenebilir. Bu görüntüleme açısı bu tarz oluşumların incelenmesi ve anlaşılabilmesi için eşsiz bir çalışma imkanı sunmaktadır.



Şekil 6.14. a) 1,5 bar, b) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı:15 derece, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)

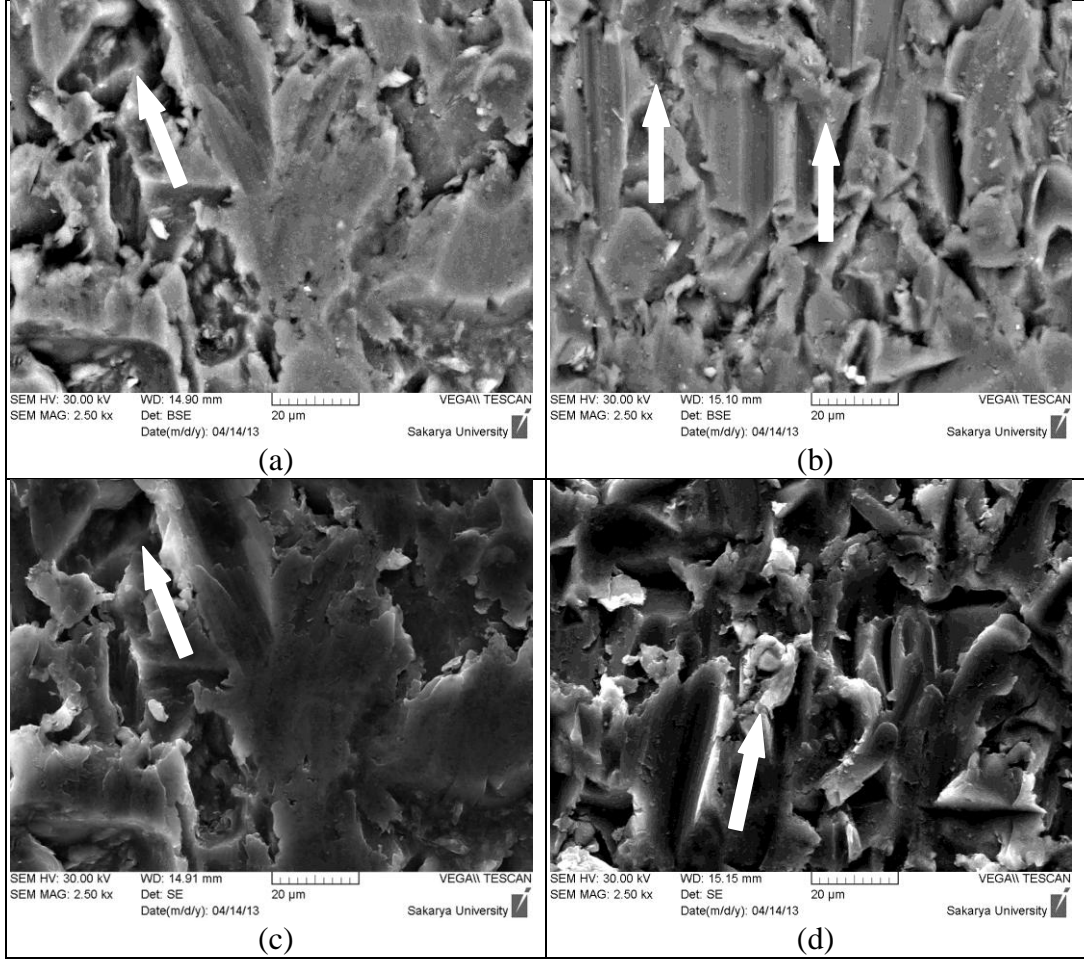
Şekil 6.14' te bu detayların yanı sıra mikro sürme aşınma mekanizması sonucu malzeme yüzeyinin aşındırıcı partiküller ile sürülmeleri neticesinde oluşan tepecikler dikkat çekmektedir. Aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyini sürerek şekillendirmiş ve alüminyum alaşımı sünek erozif aşınma davranışı nedeniyle yüksek oranda plastik deformasyona uğramıştır. Plastik deformasyona uğrayan ve pekleşerek kırılğanlaşan bu alanların mikrokese erozif aşınma mekanizması ile kesilerek yüzeyden malzeme uzaklaştığı söylenebilir. Alüminyum alaşımlarında erozif aşınmanın bu iki mekanizmanın kombine bir şekilde meydana gelmesi ile

efektif bir şekilde gerçekleştiği sonucuna varılabilir. Tez çalışmasında özellikle açılı SEM görüntüleme metodu kullanılarak bu mekanizmalar bu kadar net ve ayrıntılı bir şekilde incelenebilmiştir. Tez alışması kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmalar bu açıdan büyük bir özgünlük içermektedir.

6.3.1.3. Aşındırıcı partikül boyutunun yüzey morfolojisine etkisi

Bu bölüm içerisinde aşındırıcı partikül boyutunun malzemenin yüzey morfolojisine ve erozif aşınma sırasında görülen erozif aşınma mekanizmalarına olan etkileri irdelenmiştir. Şekil 6.15' te 15° partikül çarpma açısında 1,5 bar püskürtme basıncında 80 ve 180 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılan numunelerin SE ve BSE modlarında çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde ayrıca yüzeyde oluşan hasar mekanizmaları beyaz oklar yardımı ile belirtilmiştir. Şekil 6.15-a ve c' de büyük aşındırıcı partiküllerin (80 mesh) meydana getirdiği derinliği yüksek ve geniş aşınma vadileri görülmektedir. Şekil 6.15-b ve d' de ise kk partiküllerin (180 mesh) meydana getirdiği dar ve nispeten daha az derin vadiler gözlenmektedir.

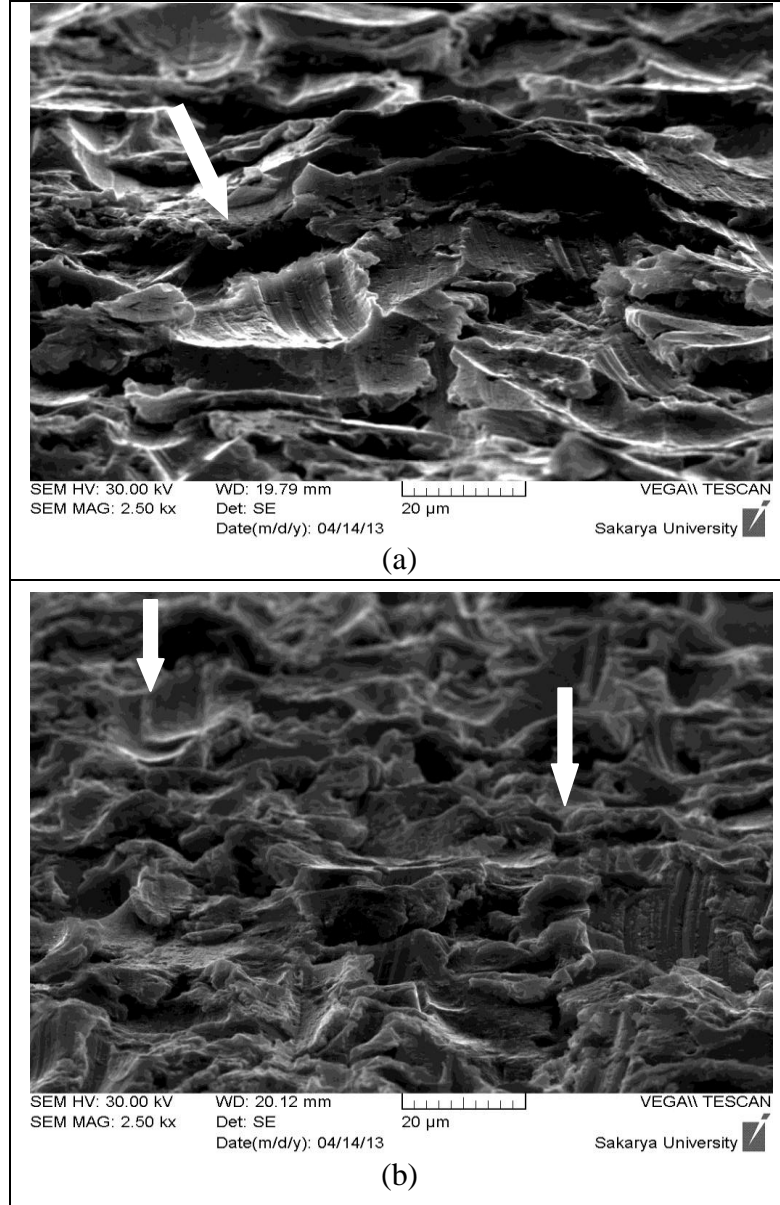
Erozyon oranı bölümünde kk partiküllerin alüminyum alaşımlarını büyük partiküllere kıyasla daha fazla aşındırdıkları sonucuna varılmıştır. Ancak 6.15' de verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde büyük partiküllerin malzeme yüzeyinde daha ağır bir tahribata yol açtıkları görülmektedir. Buna karşın Şekil 6.15-b ve d' de aşınma hasarının Şekil 6.15-a ve c' ye kıyasla daha az olmasına rağmen aşınma izlerinin çok daha fazla sayıda oldukları göze batmaktadır. Kk partiküller yüzeyde derinliği ve genişliği daha düşük izler oluşturmasına rağmen yüzeyde çok sayıda aşınma izine ve hasarına yol açmaktadırlar. Özellikle Şekil 6.15-b' de aşınma yönüne paralel çok sayıda aşınma izinin görülmesi bu sonucu desteklemektedir. Bu durumda kk partiküller tek başlarına büyük partiküllere kıyasla daha az aşınma meydana getirsede büyük partiküller ile karşılaştırıldığında birim zamanda yüzeye çok daha fazla kk partikülün çarptığı ve bunun sonucu olarak yüzeyde daha fazla miktarda hasarın ve aşınmanın meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 6.15. a) 80 mesh, b) 180 mesh, c) 80 mesh, d) 180 mesh aşındırıcı boyutu ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 15°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)

Şekil 6.16'da aşındırıcı partikül boyutunun yüzey morfolojine etkisini daha iyi incelemek amacı ile aşındırılmış numunelere 75° eğimle bakılmıştır. Şekil 6.16-a'da 80 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile, Şekil 6.16-b'de 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile 15° partikül çarpma açısında, 4 bar püskürtme basıncında gerçekleştirilen erozif aşınmaların yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekilde beyaz oklar yardımı ile oluşan hasar gösterilmiştir. Farklı boyutlardaki aşındırıcılar ile aşındırılan malzemelerin yüzey morfolojisi incelendiğinde aşınma mekanizmalarının benzer şekilde gerçekleştiği, malzeme yüzeyinde partikül çarpma açısına bağlı olarak mikro sürme ve mikro kesme oluştuğu görülmüştür. Aşındırıcının boyutuna bağlı olarak aşınan yüzeylerde meydana gelen izler oluştuğu ve bu izlerin aşındırıcı boyutuna göre değişim gösterdiği görülmüştür. Küçük boyutlu patikül kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde yüzeyde oluşan

mikro sürme ve mikro kesme mekanizması sık ve derin izler olarak rastlanırken, büyük boyutlu partiküller kullanılması ile aynı mekanizmanın daha kaba olarak gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 6.16. a) 80 mesh, b) 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 15°, püskürtme basıncı: 4 bar)

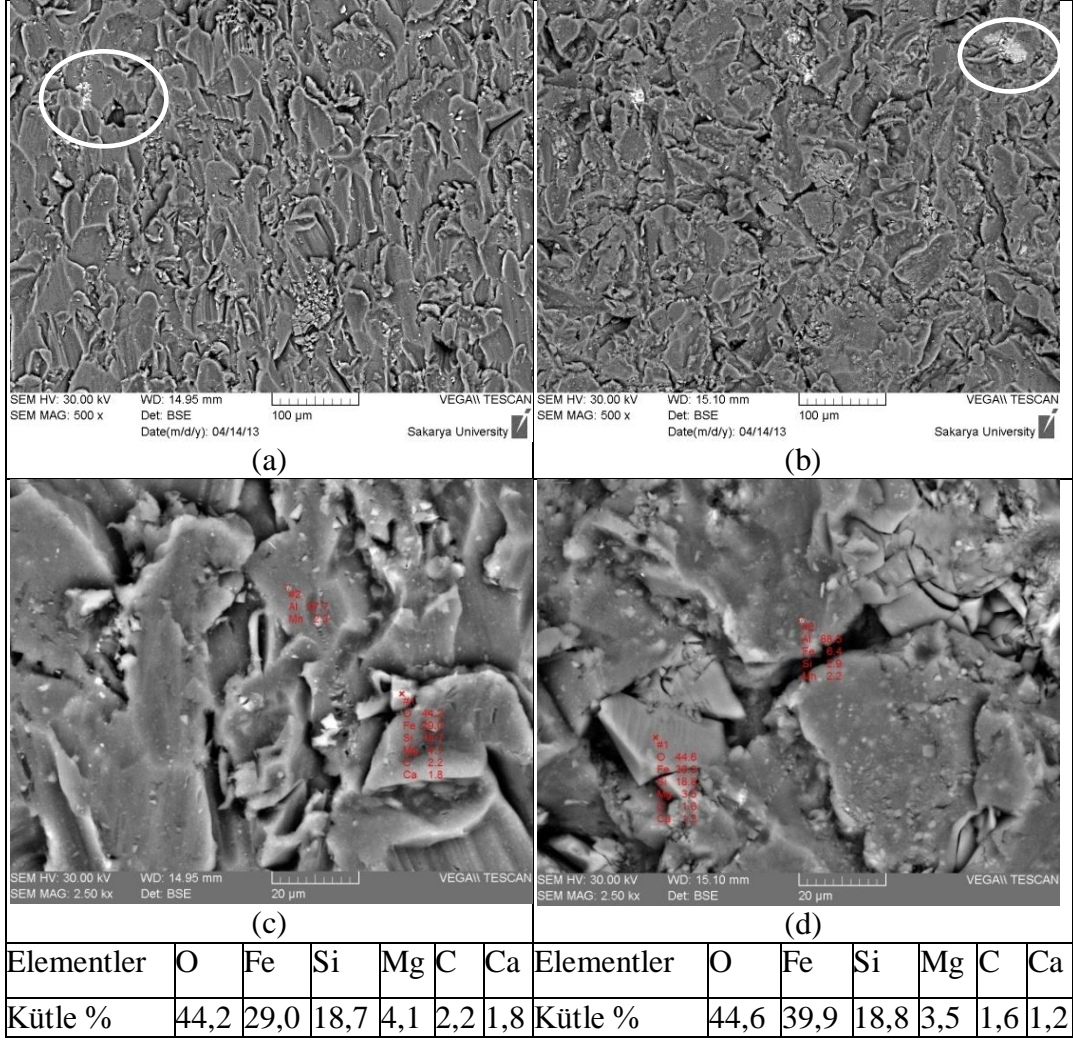
6.3.2. EDS çalışmaları sonuçları

6.3.2.1. Partikül çarpma açısının etkisi

Bu bölümde partikül çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi EDS analizi yardımı ile açıklanacaktır. Bu bölümdeki şekiller incelendiğinde, şekillerin üst yarısında aşındırılmış yüzeylere genel olarak bakılarak 500 büyütmede BSE modunda görüntüleri verilirken, şekillerin alt yarılarında üst yarılarda farklı renklerde gözükken ve yuvarlak içine alınan bölgelerin 2500 büyütmede EDS analizi yapılmış görüntüleri verilmiştir. 2500 büyütmede, aşındırılan malzemeye göre farklı renkte ve keskin köşelere sahip olan yapıların saplanan partiküller (garnet) olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.17'de 15° ve 60° çarpma açılarında, 4 bar püskürtme basıncında, 80 mesh boyutunda partiküller kullanılarak aşındırılan malzemelerinin SEM ve EDS görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.17-a, b incelendiğinde partikül çarpma açısına bağlı olarak düşük çarpma açılarında (Şekil 6.17-a) yüzeye saplanan partiküller homojene yakın bir dağılıma sahipken, yüksek çarpma açılarında (Şekil 6.17-b) saplanan partiküllerin kümeler oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 6.17 c ve d'de 3003 H14 alüminyum alaşımı yüzeyine 15° ve 60°'lik açılarda çarpma sonrası aşındırıcı partikül gömülmesinin incelenmesi için EDS analizi uygulanmıştır. EDS analizinde bu çarpma açılarında malzeme yüzeyine gömülen aşındırıcı partiküllerin varlığı net olarak ortaya konmuştur. 80 mesh boyutundaki partiküller çarpma esnasında sahip oldukları yüksek kinetik enerjilerini gömülme ile sonlandırmışlardır. Bu çarpma açısında mikro sürme gibi hasar mekanizmaları etkin olmadığından gömülme gerçekleşmiş ve sonrasında aşındırıcı kırılğan doğası gereği parçalara ayrılarak enerjisini kendi içinde soğurmuştur. Yapıda gözlemlenen gömülmüş aşındırıcı partikül görüntüsü; hasar mekanizmasının aynı zamanda aşındırıcı partikül iç yapısında da ortaya çıktığını göstermektedir. Aşındırıcı garnet parçacığının çatlak izi incelendiğinde boylamasına eksende tek büyük bir çatlak çizgisi gözlemlenmektedir. Aşındırıcı partikül sahip olduğu enerjinin çatlak oluşum eşik enerjisi kadar olan miktarını kendi içinde soğurmuş; kalan bütün enerjisini hedef malzemeye aktarmıştır. Buna kanıt olarak gömülü parçacığın etrafında derin aşınma ve çatlak izleri şeklinde gözlemlenen hasar oluşumları gösterilebilir.

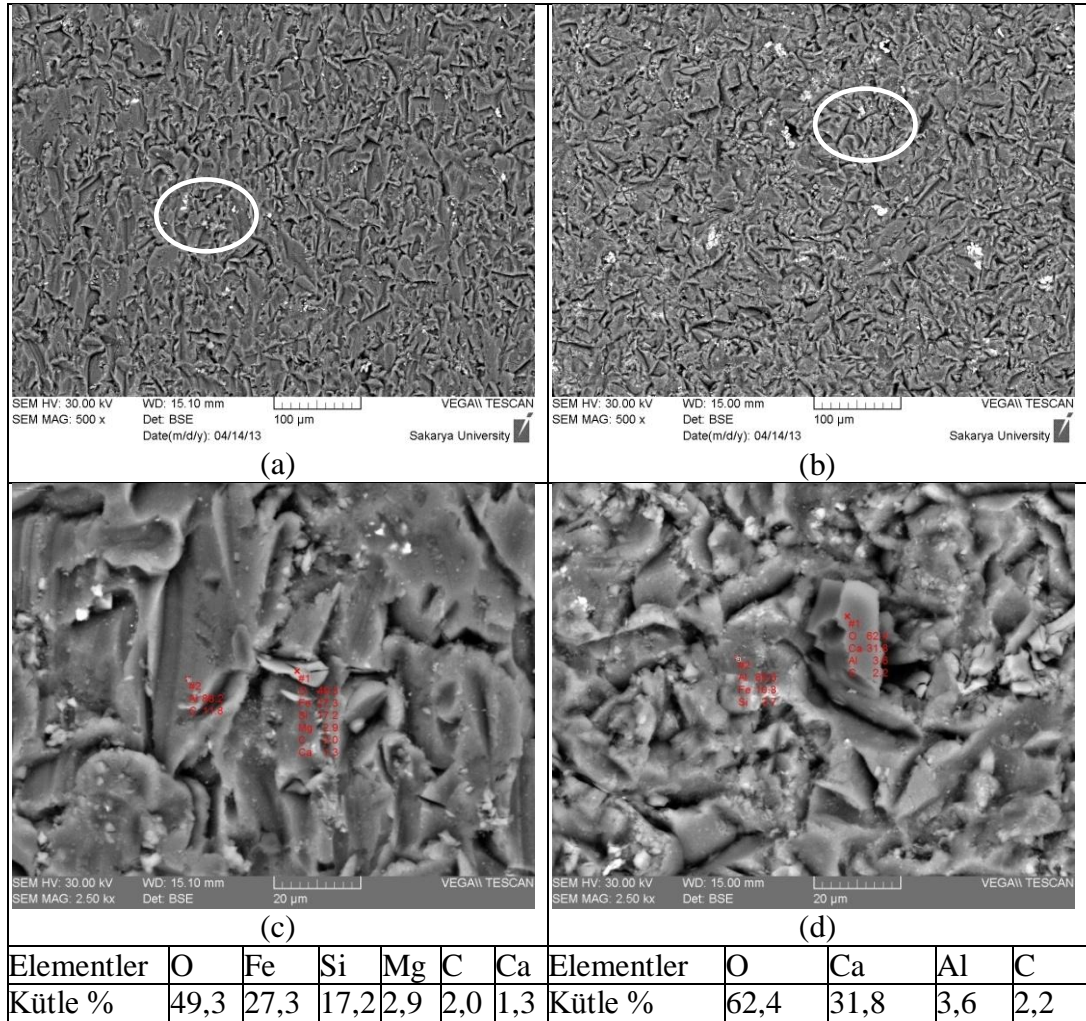


Şekil 6.17. a) 15° çarpma açısı x500 büyütme, b) 60° çarpma açısı x500 büyütme, c) 15° çarpma açısı x2500 büyütme, d) 60° açısı x 2500 büyütme

Şekil 6.17 c ve d'de 3003 H14 alüminyum alaşımı yüzeyine 15° ve 60° çarpma sonrası aşındırıcı partikül gömülmesinin incelenmesi için EDS analizi uygulanmıştır. EDS analizinde bu çarpma açısında malzeme yüzeyine gömülen aşındırıcı partiküllerin varlığı net olarak ortaya konmuştur. 80 mesh boyutundaki partiküller çarpma esnasında sahip oldukları yüksek kinetik enerjilerini gömülme ile sonlandırmışlardır. Bu çarpma açısında mikro sürme gibi hasar mekanizmaları etkin olmadığından gömülme gerçekleşmiş ve sonrasında aşındırıcı kırılğan doğası gereği parçalara ayrılarak enerjisini kendi içinde soğurmuştur. Yapıda gözlemlenen gömülmüş aşındırıcı partikül görüntüsü; hasar mekanizmasının aynı zamanda aşındırıcı partikül iç yapısında da ortaya çıktığını göstermektedir. Aşındırıcı garnet parçacığının çatlak izi incelendiğinde boylamasına ekseninde tek büyük bir çatlak çizgisi gözlemlenmektedir. Aşındırıcı partikül sahip olduğu enerjinin çatlak oluşum

eşik enerjisi kadar olan miktarını kendi içinde soğurmuş; kalan bütün enerjisini hedef malzemeye aktarmıştır. Buna kanıt olarak gömülü parçacığın etrafında derin aşınma ve çatlak izleri şeklinde gözlemlenen hasar oluşumları gösterilebilir.

Şekil 6.18’de 1,5 bar püskürtme basıncında, 180 mesh boyutunda aşındırıcı partikül kullanılarak, 15° ve 60° çarpma açısında aşındırılan malzemenin SEM ve EDS analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.18. a) 15° çarpma açısı x500 büyütme, b) 60° çarpma açısı x500 büyütme, c) 15° çarpma açısı x2500 büyütme, d) 60° çarpma açısı x2500 büyütme açısı ile aşındırılmış numunelerin x2500

Şekil 6.18-c’de partikül çarpma açısına bağlı olarak mikro sürme ve mikro kesme şeklinde aşındırılmış yüzey morfolojisi gözlenmiştir. Aşınmış yüzeyde bu oluşumdan farklı olarak gevrek şekilde kırılmış yüzeyler olduğu farkedilmiştir. EDS analizi ile bu bölümler incelendiğinde bu gevrek oluşumların aşındırıcı

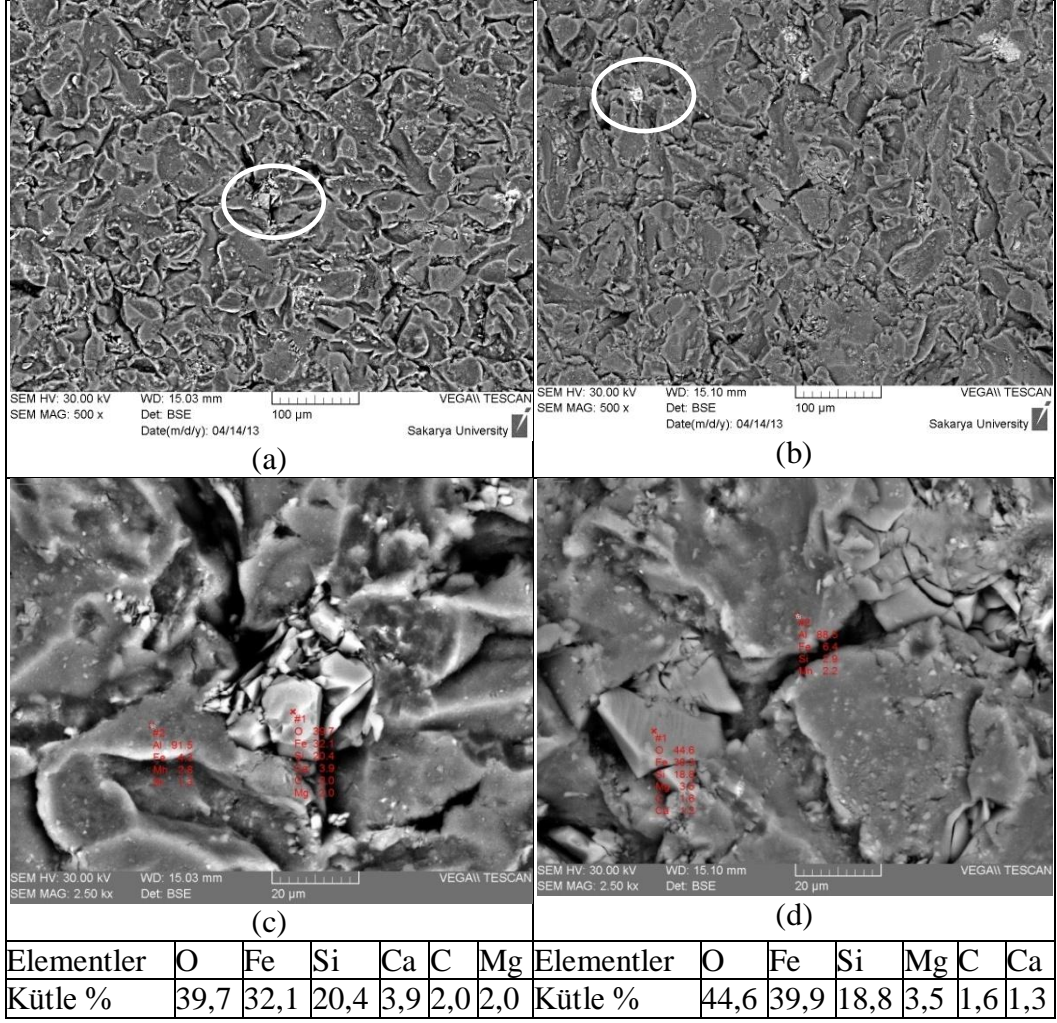
partiküller olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.18-d'de partikül çarpma açısına bağlı olarak mikro sürme ve mikro kesme şeklinde aşındırılmış yüzey morfolojisi gözlenmemiştir. Çarpma açısının etkisi ile yüzey plastik şekil değiştirmeye ve mikro dövme maruz kaldığından partikül saplanması daha yüksek oranda meydana geldiği görülmüştür. Açının büyümesi ile (60 derece) partiküllerin neredeyse tüm enerjilerini açığa bağlı olarak hedef malzeme yüzeyine saplanma şeklinde gerçekleştirdiği söylenebilir.

6.3.2.2. Partikül püskürtme basıncının etkisi

Bu bölümde partikül püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkisi EDS analizi yardımı ile açıklanacaktır. Bu bölümdeki şekiller incelendiğinde, şekillerin üst yarısında aşındırılmış yüzeylere genel olarak bakılarak 500 büyütmede BSE modunda görüntüleri verilirken, şekillerin alt yarılarında üst yarılarda farklı renklerde gözüken ve yuvarlak içine alınan bölgelerin 2500 büyütmede EDS analizi yapılmış görüntüleri verilmiştir. 2500 büyütmede, aşındırılan malzemeye göre farklı renkte ve keskin köşelere sahip olan yapıların saplanan partiküller (garnet) olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.19'da 60° çarpma açısında, 80 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller kullanılarak 1,5 ve 4 bar püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkisi incelenmiştir.

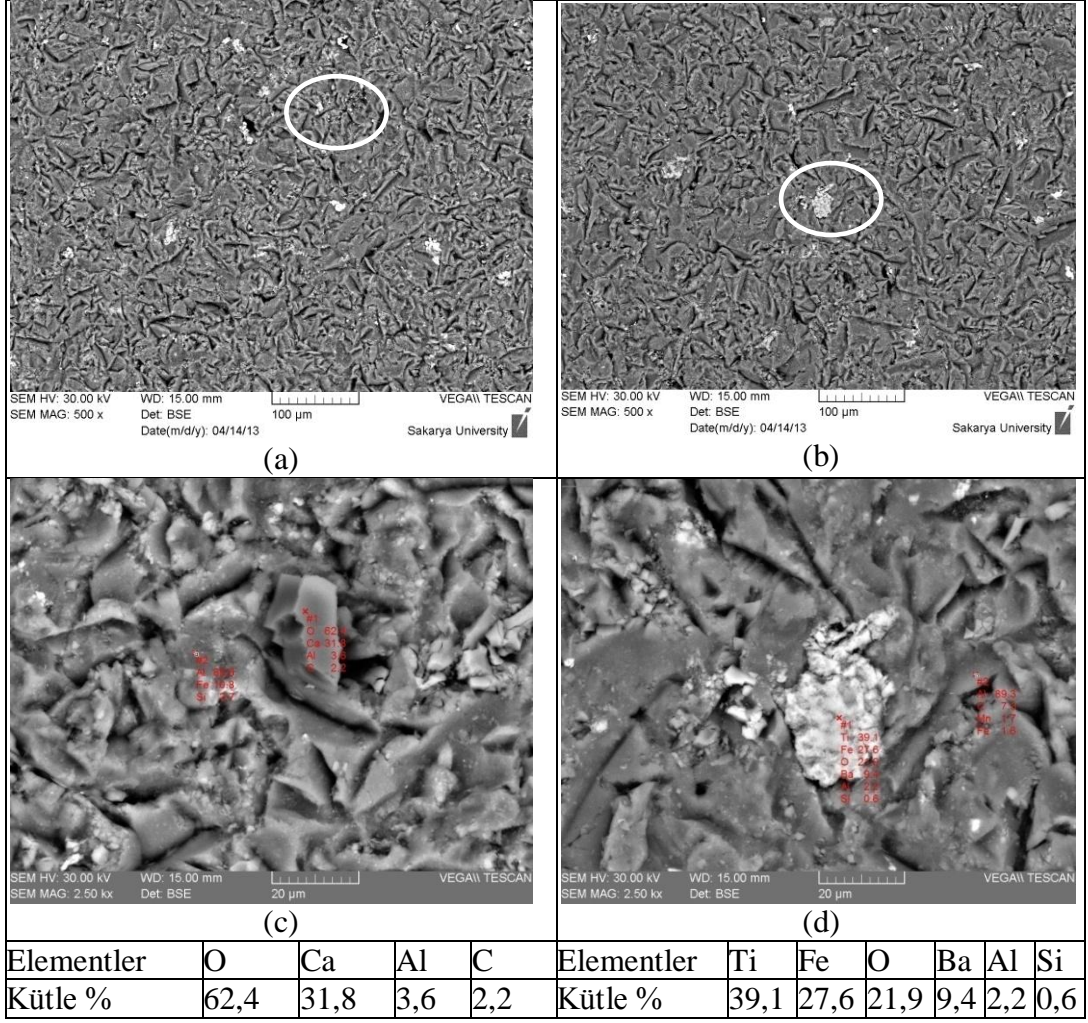
Şekil 6.19 incelendiğinde aşındırıcı partikülün püskürtme basıncının etkisi ile hedef malzemeye saplandığı, saplandıktan sonra aşındırıcı taneciğin sahip olduğu bu enerjisi ile kırıldığı, kalan enerjisi ile de malzemede çatlak oluşturduğu söylenebilir. Şekil 19-d'de ise Şekil 6.19-c'ye kıyasla artan püskürtme basıncının etkisi ile aşındırıcı partikülün malzemeye daha derin saplandığı ve daha derin izler bıraktığı söylenebilir.



Şekil 6.19. a) 1,5 bar püskürtme basıncı x500 büyütme, b) 4 bar püskürtme basıncı x500 büyütme, c) 1,5 bar püskürtme basıncı x2500 büyütme, d) 4 bar püskürtme basıncı x2500 büyütme

Şekil 6.20'de 60° partikül çarpma açısında, 180 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile 1,5 bar ve 4 bar partikül püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin BSE modunda SEM görüntüleri verilmiştir.

Şekil 6.20-c ve d incelendiğinde EDS analizi sonucunda malzemeye saplanan partiküller tespit edilmiştir. Şekil 6.20-d'deki saplanan partikülün, Şekli 6.20-c'deki saplanan partiküle kıyasla daha derinlemesine malzemeye saplandığı görülmektedir. Püskürtme basıncının artması ile aşındırıcı partiküllerin sahip olduğu kinetik enerjinin artması ile aşındırıcı taneciğin yüzeye daha derin saplandığı söylenebilir.

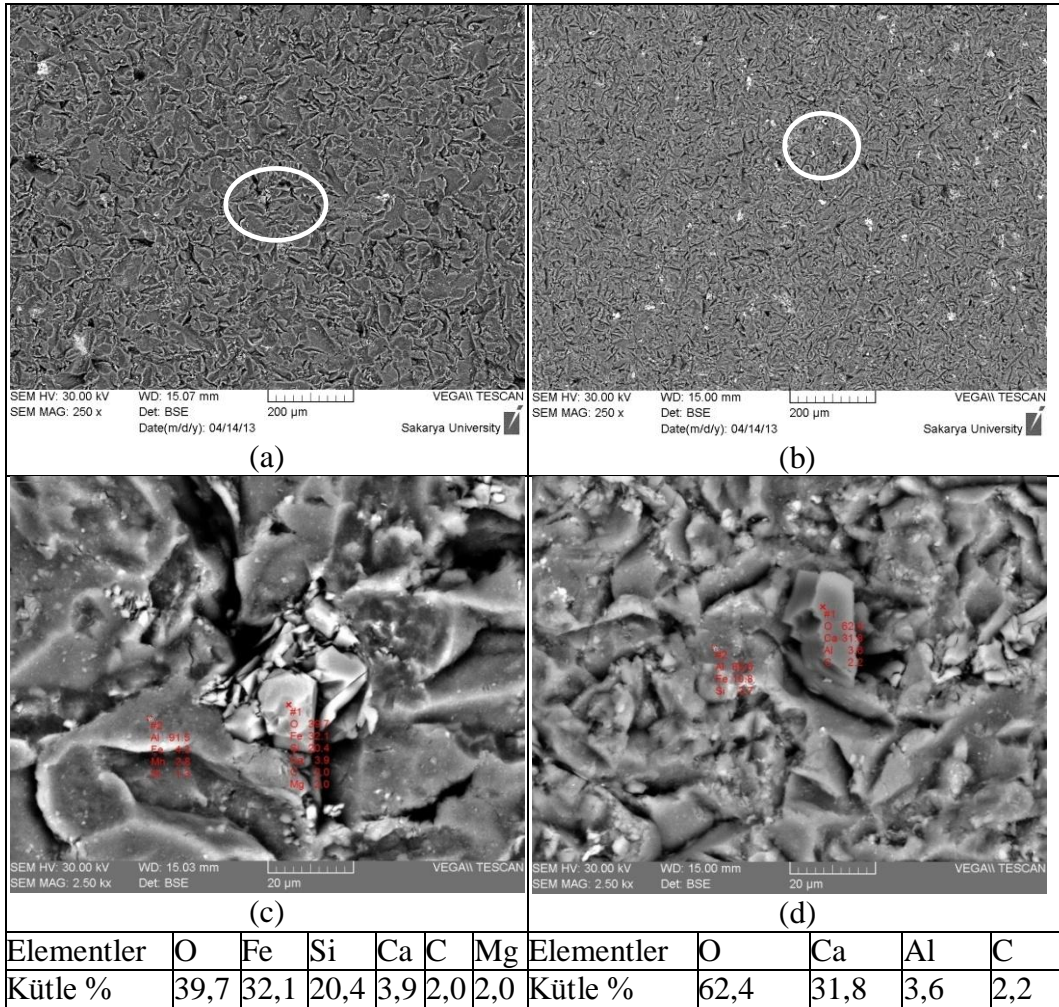


Şekil 6.20. a) 1,5 bar püskürtme basıncı x500 büyütme, b) 4 bar püskürtme basıncı x500 büyütme, c) 1,5 bar püskürtme basıncı x2500 büyütme, d) 4 bar püskürtme basıncı x2500 büyütme

6.3.2.3. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisi

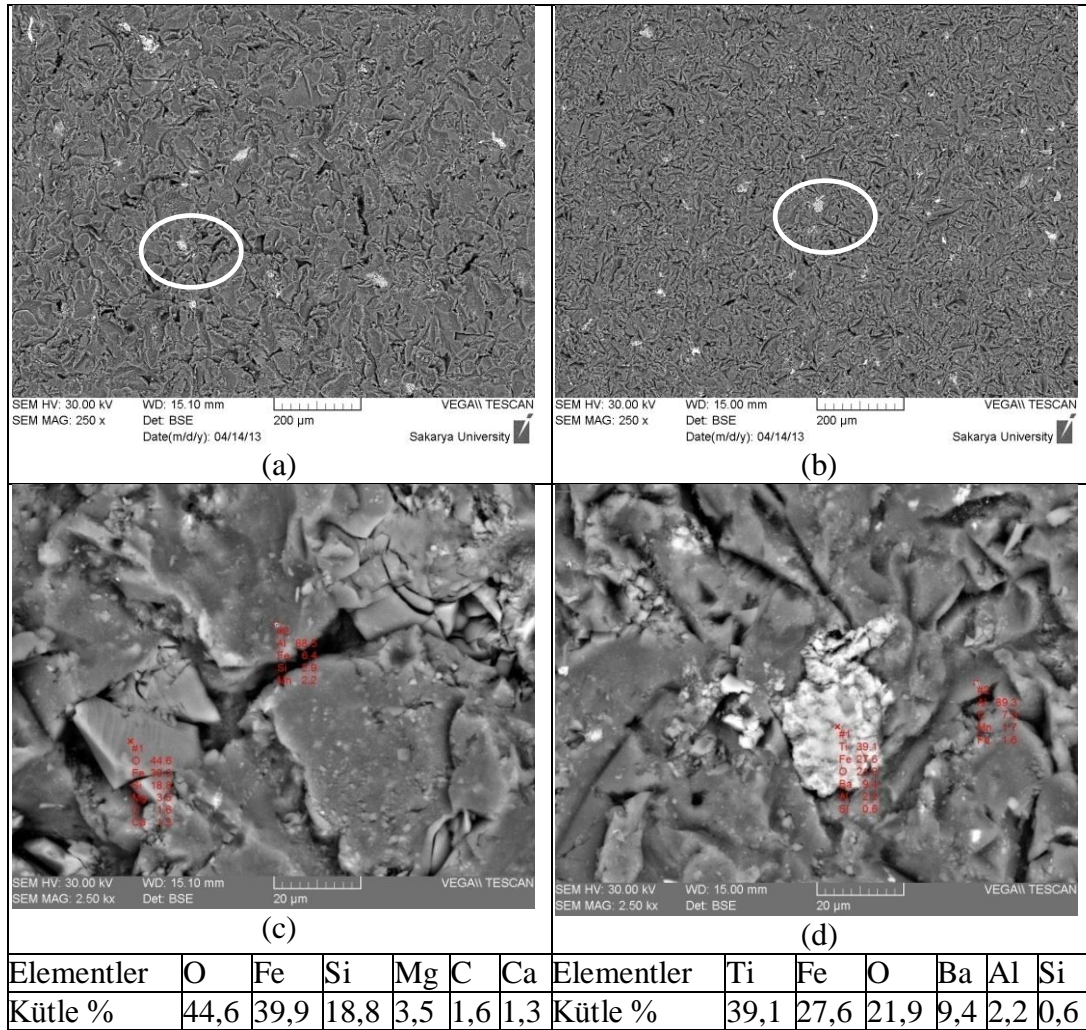
Bu bölümde aşındırıcı partikül boyutunun yüzey morfolojisine etkisi EDS analizi yardımı ile açıklanacaktır. Bu bölümdeki şekiller incelendiğinde, şekillerin üst yarısında aşındırılmış yüzeylere genel olarak bakılarak 250 büyütmede BSE modunda görüntüleri verilirken, şekillerin alt yarılarında üst yarılarında farklı renklerde gözükten ve yuvarlak içine alınan bölgelerin 2500 büyütmede EDS analizi yapılmış görüntüleri verilmiştir. 2500 büyütmede aşındırılan malzemeye göre farklı renkte ve keskin köşelere sahip olan yapıların saplanan partikül (garnet) olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.21’de aşındırıcı partikül boyutunun, partiküllerin hedef malzeme yüzeyine saplanmasına etkisini incelemek amacı ile 80 ve 180 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller kullanılarak 1,5 bar püskürtme basıncında, 60° çarpma açısında aşındırılmış yüzeylerin BSE modunda SEM görüntüleri alınmıştır. Görüntülerde farklı renklerde belirlenen bölgeler çember içine alınmış, büyütülmüş ve bu bölgelere EDS analizi yapılmıştır. Şekil 6.21-c incelendiğinde görüntüde açık renkte olan ve çatlaklar oluşmuş bölgenin EDS analizi ile incelenmesi sonucunda aşınmış malzemeye saplanmış partikül olduğu tespit edilmiştir. 80 mesh boyutundaki aşındırıcı partikülün hedef malzemeye saplanması ile taşıdığı yüksek enerji ile çatladığı daha sonra bu enerjinin kalanı ile malzeme yüzeyde çatlak meydana getirdiği söylenebilir. Şekil 6.21’ d incelendiğinde ise yüzeye saplanan keskin köşeli yapının aşındırıcı partikül olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.21. a) 80 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme, b) 180 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme, c) 80 mesh boyutunda aşındırıcı x2500 büyütme, d) 180 mesh boyutunda aşındırıcı x2500 büyütme

Şekil 6.22'de 60° çarpma açısında, 4 bar püskürtme basıncında 80 ve 180 mesh boyutunda partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeylerin BSE modunda SEM görüntüleri ve EDS analizi sonuçları verilmiştir. Şekil 6.22-c ve d incelendiğinde büyük boyutlarda aşındırıcı taneciklerin saplanması ile daha derin çukurcuklar oluştuğu ve bu büyük oyuklara büyük boyutlu partiküllerin saplandığı, küçük boyutlu aşındırıcılarda ise partiküllerin etrafında bu çukurcukların ve oyuklaşmanın görülmediği saptanmıştır.



Şekil 6.22. a) 80 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme, b) 180 mesh boyutunda aşındırıcı x250 büyütme, c) 80 mesh boyutunda aşındırıcı x2500 büyütme, d) 180 mesh boyutunda aşındırıcı x2500 büyütme

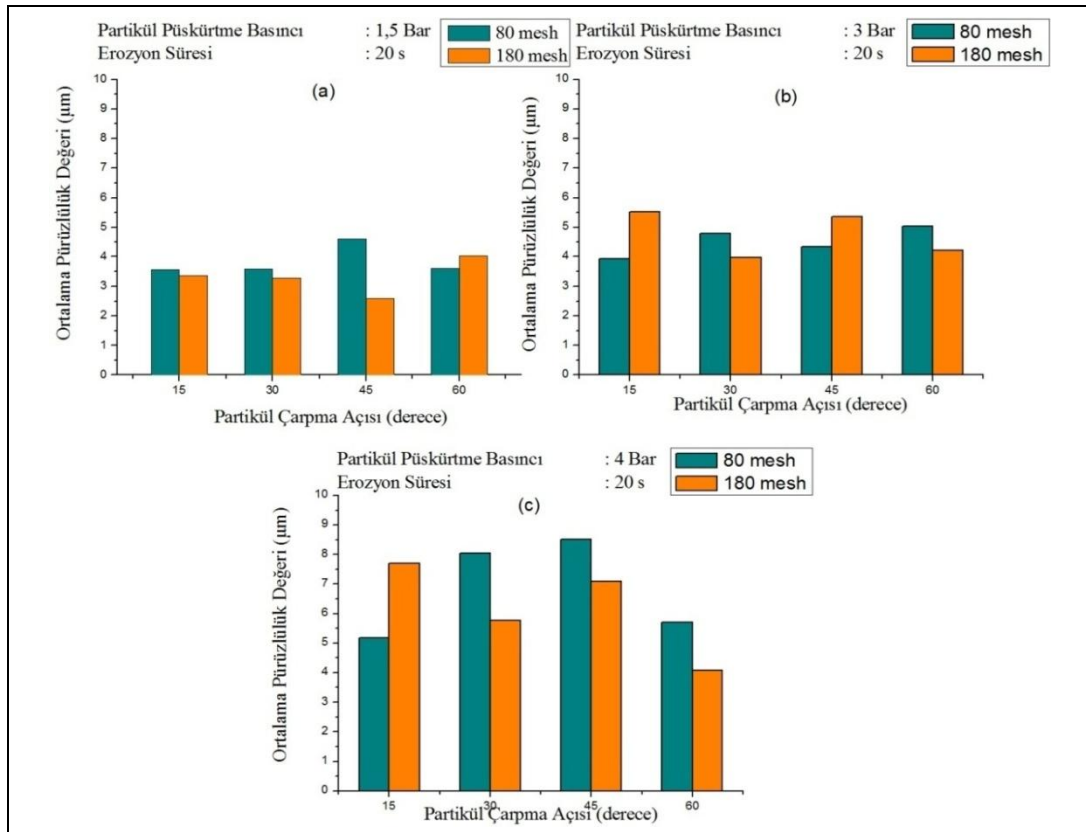
6.4. Aşınmış Yüzeylerin Pürüzlülük Değerlerinin Değişimi

Bu bölümde farklı operasyon parametleri (farklı açı, farklı basınç ve farklı aşındırıcı boyutu) ile aşındırılan yüzeylerin pürüzlülüğü ölçülmüştür. Operasyon

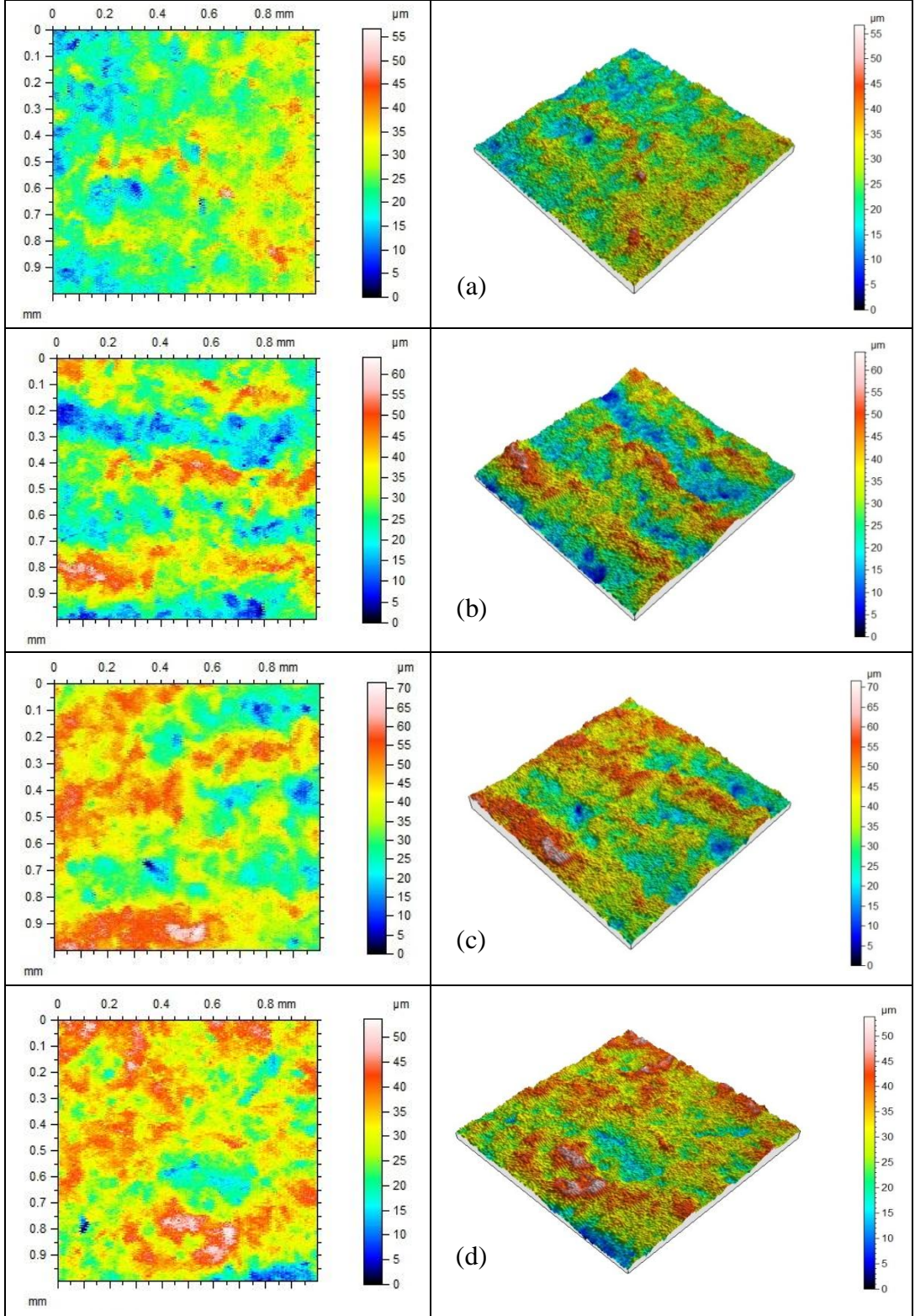
parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi bölüm içinde ayrı ayrı başlıklar altında verilmiştir. Ölçümler optik profilometre cihazı ile yapılmıştır. Cihaz yardımı ile aşınmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmıştır. Görüntülerde yüksekliklerin değerleri farklı renklerde verilmiş ve bu renklere bağlı skala oluşturulmuştur. Ayrıca cihazda okunan yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerine (Ra) bağlı olarak grafikler çizilmiştir.

6.4.1. Partikül çarpma açısının etkisi

Şekil 6.23'te çarpma açısının (15° , 30° , 45° ve 60°) ortalama pürüzlülük değerine (Ra) etkisi tüm basınç değerlerinde (1,5, 3 ve 4 bar) ve tüm partikül boyutlarında (80 ve 180 mesh) ayrı ayrı verilmiştir. Partikül çarpma açısına bağlı olarak Ra (ortalama pürüzlülük) değerleri incelendiğinde, 80 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ortalama pürüzlülük değerinin 30° ve 45° çarpma açılarında en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 6.23. Partikül çarpma açısına bağlı olarak ortalama pürüzlülük değişimi a) 1,5 bar, b)3 bar, c) 4 bar



Şekil 6.24. 80 mesh boyutundaki aşındırıcı, 4 bar püskürtme basıncı, partikül çarpma açısı a) 15 derece, b) 30 derece, c) 45 derece d) 60 derecede

Şekil 6.24'te 4 bar partikül püskürtme basıncında, 80 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller kullanılarak farklı çarpma açılarında (15°, 30°, 45° ve 60°)

gerçekleştirilen deneyler sonucu erozif aşınmaya maruz kalan yüzeylerin optik profilometre ile 2 ve 3 boyutlu görüntüleri elde edilmiş, görüntüler skalaları ile verilmiştir.

Şekil 6.24 incelendiğinde çarpma açısının artması ile görüntüdeki kırmızı tepecik (yükseklik) oluşumunda da artış meydana geldiği görülmektedir. 45° çarpma açısında 3 boyutlu görüntü incelendiğinde skaladaki değerlerin en yüksek değerde olduğu ayrıca bu yüksek değeri belirten kırmızı rengin de en fazla görüldüğü saptanmıştır. Düşük çarpma açılarında malzeme yüzeyinde yüksek çarpma açlarına kıyasla daha küçük tepecikler ve vadiler oluştuğu gözlenmektedir. Bu durum düşük çarpma açılarında aşındırıcı partiküllerin sahip oldukları büyük yatay kuvvet bileşeni ve küçük dikey kuvvet bileşeni nedeniyle malzeme yüzeyini çizme eğiliminde olmalarından kaynaklanmaktadır.

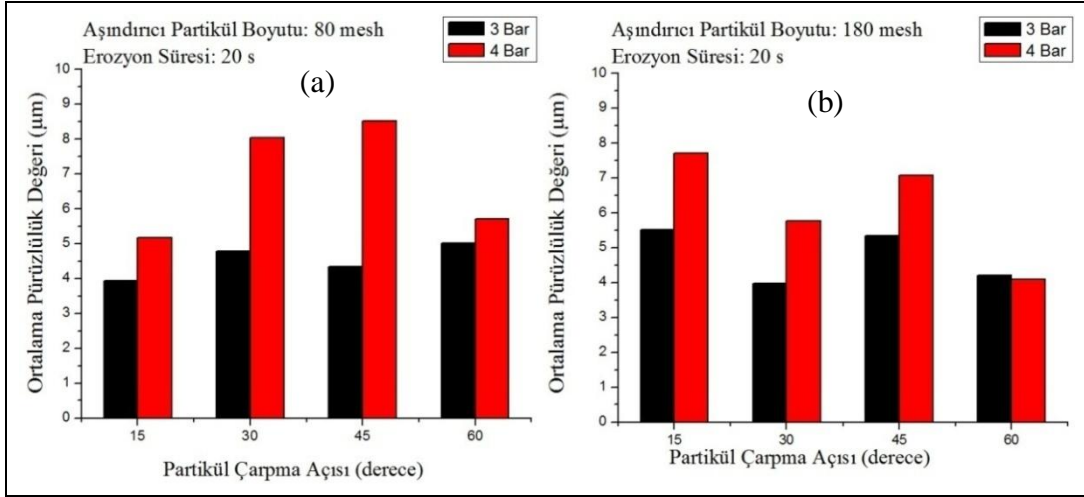
Yüksek çarpma açılarında ise aşındırıcı partiküller büyük dikey kuvvet bileşeni ve düşük yatay kuvvet bileşeni nedeniyle malzeme yüzeyine saplanma eğilimindedirler. Bu eğilimleri nedeniyle yüksek çarpma açılarında aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyini adeta döverek plastik deformasyona neden olmaktadır. Bu deformasyonlar sonucunda yüksek partikül çarpma açılarında malzeme yüzeyinde yüksek pürüzlülük değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlar daha önceki bölümlerde aktarılan erozyon oranı sonuçları ve SEM analizleri sonuçları ile birebir örtüşmektedir.

6.4.2. Partikül püskürtme basıncının etkisi

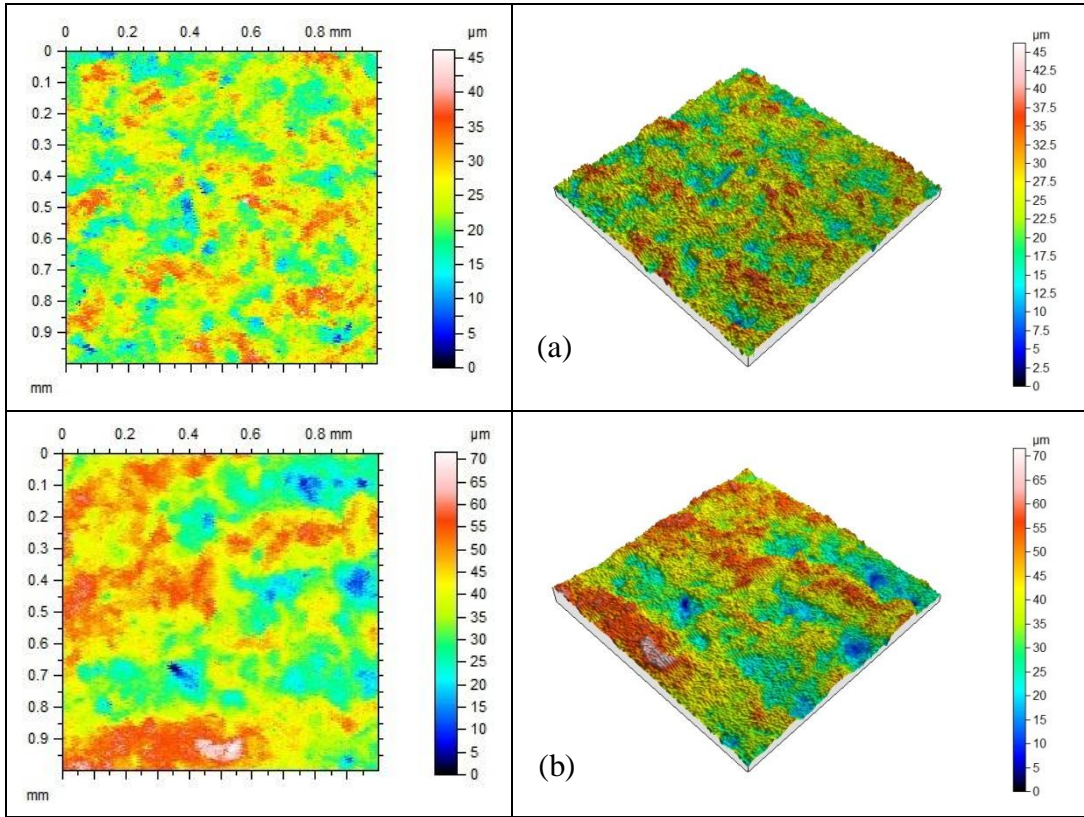
Şekil 6.25' te partikül püskürtme basıncının ortalama pürüzlülük değerine olan etkisi incelenmiştir. Şekilde 80 ve 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar ile gerçekleştirilen deneyler ayrı ayrı grafikte, çarpma açısına bağlı olarak verilmiştir. Şekilde tüm çarpma açılarında püskürtme basıncının artması ile ortalama yüzey pürüzlülüğünde artış meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 6.26'da 45° çarpma açısında, 80 mesh boyutunda aşındırıcı partikül kullanarak 3 ve 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış yüzeylerin optik profilometre ile alınmış 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekilde

püskürtme basıncının artması ile kırmızı tepeciklerin sayısında artış meydana geldiği görülmektedir.



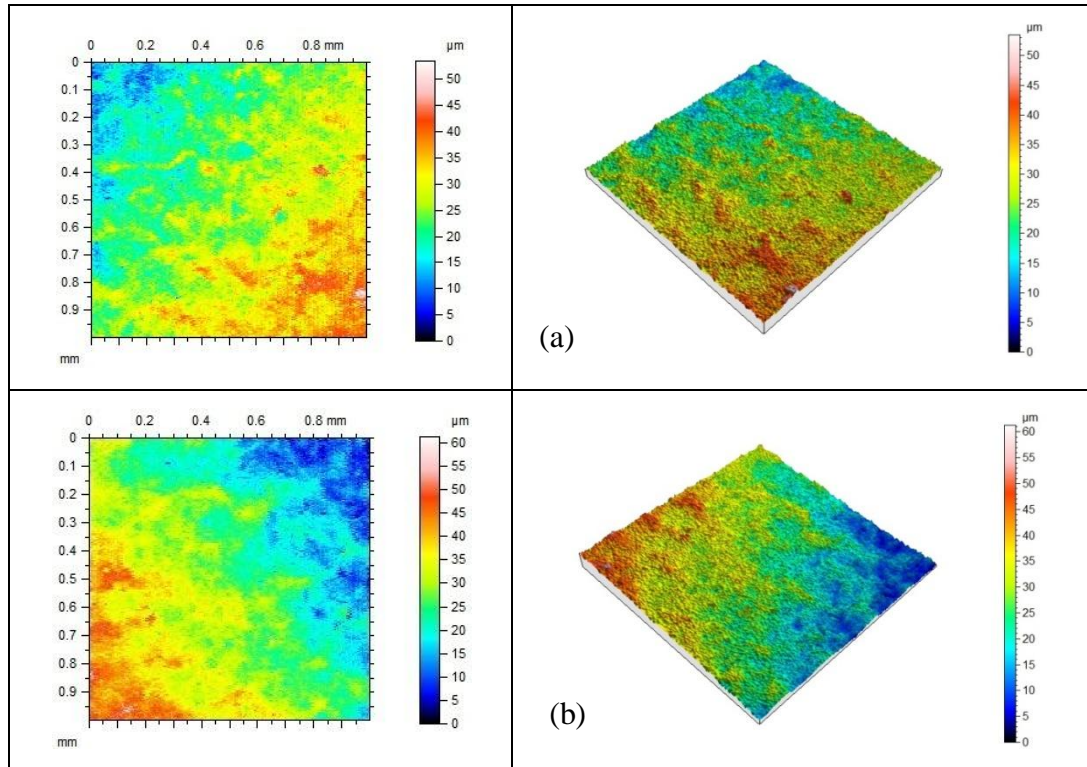
Şekil 6.25. Püskürtme basıncına bağlı olarak ortalama pürüzlülük değişimi a) 80 mesh, b) 180 mesh



Şekil 6.26. 80 mesh boyutundaki aşındırıcı, 45 derece çarpma açısında, püskürtme basıncı a)3 bar, b) 4 bar

Şekil 6.27’de partikül püskürtme basıncının etkisi 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile 15° çarpma açısında incelenmiştir. Aşınmış yüzeylerin görüntüsü 3 ve 4 bar püskürtme basıncında optik profilometre ile 2 ve 3 boyutlu olarak alınmıştır. Püskürtme basıncının artması ile ortalama pürüzlülük değeri artmıştır. Görüntülerdeki skaladaki değerlerde en yüksek pürüzlülük değerinin 4 bar püskürtme basıncında gerçekleştiği ayrıca kırmızı tepelik oluşumunun da bu basınç değerinde daha fazla gerçekleştiği görülmektedir.

Aşındırıcı partiküllere uygulanan püskürtme basıncının artması ile partikülün sahip olduğu kinetik enerji artmaktadır. Böylece hedef malzemeye çarpma anında yüzeyden malzeme koparmak için uygulanan enerjide de artış meydana gelmektedir. Kısaca partikülün yüzeyden kopardığı yani aşındırdığı malzemede artış meydana gelmekte ve böylece daha pürüzlü bir yüzey oluşmaktadır.

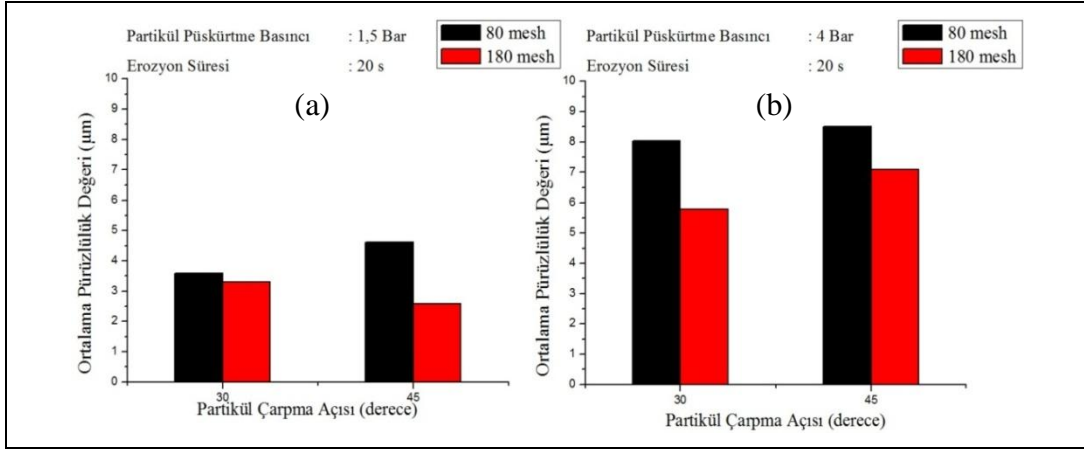


Şekil 6.27. 180 mesh boyutundaki aşındırıcı,15 derece püskürtme açısında püskürtme basıncı a) 3 bar, b) 4 bar

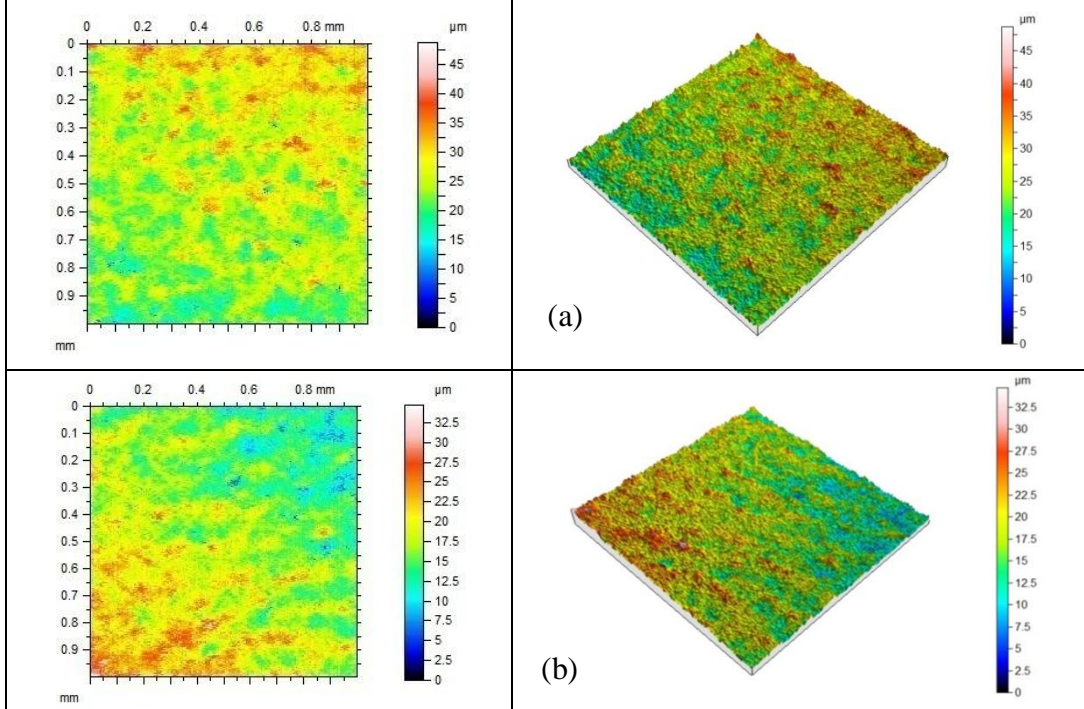
6.4.3. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisi

Şekil 6.28’de aşındırıcı partikül boyutunun ortalama pürüzlülük değerine etkisi gösterilmiştir. Şekilde 1,5 bar ve 4 bar püskürtme basıncı ayrı ayrı gösterilmiş, bu

basınç değerlerinde 30° ve 45° çarpma açılarında, 80 ve 180 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan malzemelerin ortalama pürüzlülük değerleri kıyaslanmıştır. Şekilde her iki basınç ve açı değerinde 80 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan malzemenin ortalama yüzey pürüzlülüğünün 180 mesh boyutunda aşındırıcı ile aşındırılana göre daha yüksek olduğu görülmüştür.



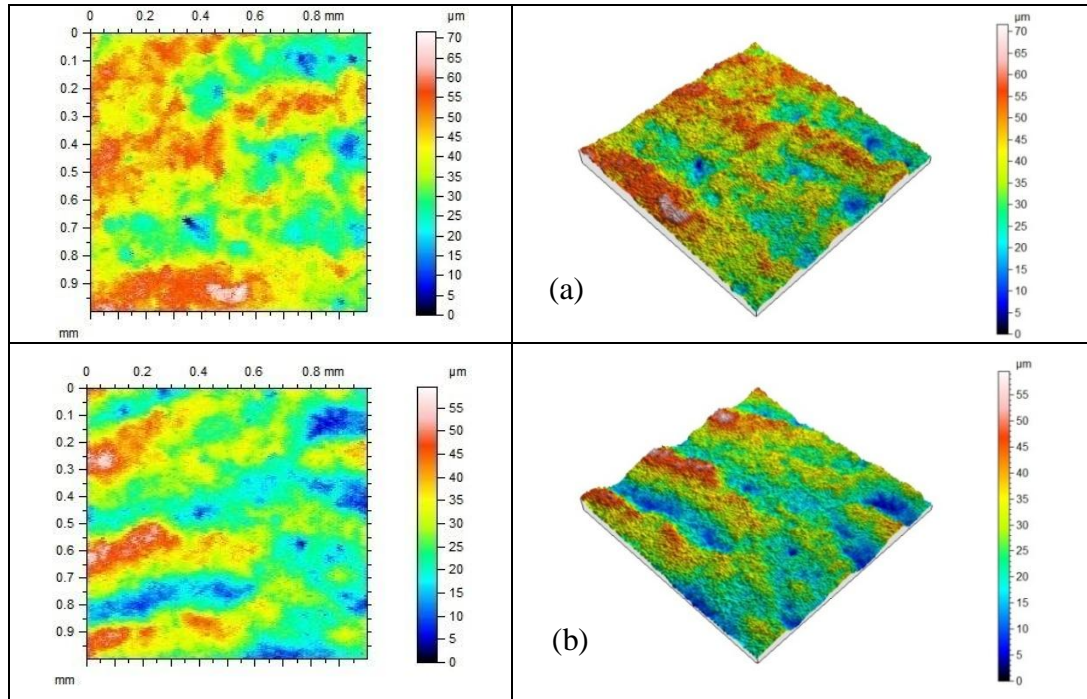
Şekil 6.28. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak pürüzlülük değişimi a) 1,5 bar, b) 4 bar



Şekil 6.29. 1,5 bar püskürtme basıncında, 30 derece çarpma açısında, aşındırıcı boyutu a) 80 mesh, b) 180 mesh

Şekil 6.29'da 1,5 bar püskürtme basıncında, 30° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde 80 ve 180 mesh aşındırıcı partiküller kullanılmış, aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil incelendiğinde 80 mesh aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeyde kırmızı tepecik oluşumununun 180 mesh boyutundaki aşındırıcı kullanımına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Ortalama pürüzlülük değerini gösteren skalalar incelendiğinde de, en yüksek pürüzlülük değerinin büyük boyutlu aşındırıcı (80 mesh) kullanıldığında oluştuğu görülmüştür.

Şekil 6.30'da 4 bar püskürtme basıncında, 45° çarpma açısında, 80 ve 180 mesh boyutunda aşındırıcılar ile aşındırılmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri verilmiştir. Görüntüler optik profilometre cihazı kullanılarak alınmıştır. Görüntüler incelendiğinde 80 mesh boyutunda aşındırıcı kullanımı ile görülen kırmızı tepecik sayısının ve ortalama pürüzlülük değerinin, 180 mesh boyutunda aşındırıcı kullanımına kıyasla daha çok ve yüksek değerde olduğu görülmüştür. Büyük boyutlu taneciklerin (80 mesh) yüksek tepeciklere ve vadilere, küçük boyutlu taneciklerin (180mesh) ise daha küçük tepeciklere ve vadilere neden olduğu görülmüştür.



Şekil 6.30. 4 bar püskürtme basıncında, 45 derece çarpma açısında, aşındırıcı boyutu a) 80 mesh, b) 180 mesh

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Katı partikül erozyonu kompleks bir süreçtir. Bu süreç aşındırılan malzeme özellikleri (malzeme mikro yapısı), aşındırıcı malzeme özellikleri (aşındırıcı partikül boyutu, sertliği, şekil faktörü), operasyon parametrelerinin etkisi (partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, kütleli debi, partikül karışımlarının etkisi) ve çevresel etkenlere (sıcaklık, nem vb.) bağlıdır.

Yüksek lisans tezi kapsamında 3003 H14 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu mekanizmasına etki eden operasyon parametrelerinden; partikül çarpma açısının etkisi, püskürtme basıncının etkisi, aşındırıcı partiküllerin boyutunun etkisi ve aşındırıcı partiküllerin hızının etkisi incelenmiştir.

Farklı partikül çarpma açıları (15°, 30°, 45° ve 60°), farklı partikül püskürtme basınçlarında (1,5, 3 ve 4 bar) ve farklı boyutlarda aşındırıcı partiküller (80 ve 180 mesh) kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı karakterize edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla aşındırılan numunelerin ilk olarak erozyon oranı değerleri hesaplanmış, böylelikle operasyon parametrelerinin erozyon oranına etkisi incelenmiştir. Aşındırılan yüzeylerin SEM görüntüleri alınarak operasyon parametrelerinin yüzey morfolojisine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca yapılan EDS analizleri ile aşınmış yüzeylere saplanmış partiküller analiz edilmiştir. Son olarak optik profilometre yardımı ile tüm aşındırılmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmış, ortalama pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır.

Bu bölüm içerisinde Yüksek Lisans Tezi kapsamında gerçekleştirilen deneyler ve bunların sonuçları yapılaş sırasına bağlı olarak açıklanacaktır.

Partikül çarpma hızlarının ve kütleli debilerin incelenmesi;

Tez çalışmasında çift disk metodu ile farklı boyuttaki aşındırıcı partiküllerin hızları püskürtme basıncına bağlı olarak hesaplanmıştır. Her iki partikül boyutunda (80 ve 180 mesh) basıncın artması ile (sırası ile 1,5, 3 ve 4 bar) partikül hızının arttığı ve

her basınç değeri için küçük boyutlu partikülün (180 mesh) büyük boyutlu partiküle (80 mesh) kıyasla daha hızlı olduğu hesaplanmıştır. 80 mesh boyutuna sahip partikülün artan basınçlarda hızları sırası ile 30, 50 ve 60 m/s, 180 mesh boyutundaki partiküllerin hızları ise artan basınçlarda sırası ile 64, 75 ve 81 m/s olarak hesaplanmıştır.

Erozyon oranını hesaplamak amacı ile farklı boyuttaki aşındırıcı partiküllerin debileri hesaplanmıştır. Aşındırıcı partiküllerin debilerinin partikül püskürtme basıncı ile arttığı bulunmuştur. Ayrıca büyük boyutlu aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin küçük boyutlu aşındırıcıların kütleli debilerine göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar erozyon oranı hesabında, her bir partikül taneciğinin hedef malzemeden ne kadar miktarda malzeme aşındırdığını saptamak amacı ile kullanılmıştır.

Erozyon oranı sonuçlarının operasyon parametrelerine bağlı olarak incelenmesi;

Erozyon oranına partikül çarpma açısının etkisi:

15°, 30°, 45° ve 60° partikül çarpma açılarında tüm basınç değerlerinde ve aşındırıcı partikül boyutlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm basınç değerlerinde ve aşındırıcı boyutlarında en yüksek erozyon oranı 15° çarpma açısında meydana gelmiştir. Çarpma açısının artışı ile birlikte erozyon oranında azalma meydana gelmiş, en düşük erozyon oranı 60° çarpma açısında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar ile alüminyum alaşımının sünek erozif aşınma davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Erozyon oranına partikül püskürtme basıncının etkisi:

1,5, 3 ve 4 bar partikül püskürtme basıncında tüm açı değerlerinde ve aşındırıcı boyutlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm açı değerlerinde ve aşındırıcı partikül boyutlarında erozyon oranının püskürtme basıncının artması ile artış gösterdiği hesaplanmıştır. En yüksek erozyon oranı 4 bar püskürtme basıncında meydana gelmiştir.

Erozyon oranına aşındırıcı partikül boyutunun etkisi:

80 ve 180 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile tüm açı değerlerinde ve püskürtme basınçlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm açı değerlerinde ve püskürtme basınçlarında küçük boyutlu aşındırıcının (180 mesh) en yüksek erozyon oranına sahip olduğu görülmüştür.

Erozyon oranına aşındırıcı partikül hızının etkisi:

Çift disk metodu ile farklı büyüklüklerdeki aşındırıcıların hızları hesaplanmıştır. Her iki boyuttaki partikül için de partikül hızının artması ile erozyon oranında artış meydana geldiği görülmüştür.

Tüm parametrelerin etkileri göz önüne alınacak olursa; çarpma açısının 15° , püskürtme basıncının 4 bar ve aşındırıcı partikül boyutunun 180 mesh olduğu durumda en yüksek erozyon oranı gerçekleşirken, 60° çarpma açısında, 1,5 bar püskürtme basıncında, 80 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller kullanılarak en düşük erozyon oranının gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Katı partikül erozyonu operasyon parametrelerinin yüzey morfolojisine etkilerini incelemek amacı ile aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır.

Partikül çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi:

SEM görüntüleri ile 15° ve 60° çarpma açılarında gerçekleşen hasar mekanizmaları incelenmiştir. 15° çarpma açısında aşınmış yüzeylerde mikro sürme ve mikro kesme şeklinde aşınma mekanizmaları gözlenirken, 60° çarpma açısında ise yüzeylerde çukurcuk oluşumları ve plastik deformasyonlar meydana gelmiştir. Dikleşen çarpma açılarında mikro sürmeden ziyade mikro dövme erozif aşınma mekanizması gerçekleşerek malzeme yüzeyinin pekleşmesine yol açtığı söylenebilir. 15° çarpma açısında SEM görüntülerinde meydana gelen mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları bu açıda gerçekleşen yüksek erozyon oranını destekleyen niteliktedir. Yapılan EDS analizi sonuçlarında aşınan yüzeylere aşındırıcı partiküllerin 15° ve 60° çarpma açılarında saplandıkları belirlenmiştir. Dikleşen çarpma açısı ile yüzeye daha fazla partikülün saplandığı belirlenmiştir.

Partikül püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkisi:

Partikül püskürtme basıncının artması ile yüzeydeki hasar mekanizması değişmezken, oluşan tepeciklerin yüksekliklerinde ve vadilerin derinliklerinde artış meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Yapılan EDS analizlerinde ise püskürtme basıncının artması ile aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine daha fazla saplandıkları tespit edilmiştir.

Aşındırıcı partikül boyutunun yüzey morfolojisine etkisi:

Büyük boyutlu aşındırıcı partiküller (80 mesh) ile aşındırılan yüzeylerde daha kaba aşınma izleri gerçekleşirken, küçük boyutlu partiküller (180 mesh) kullanılarak aşındırılan numunelerde daha küçük ancak daha sık aşınma izlerinin meydana geldiği görülmüştür. Küçük boyutlu taneciklerin sahip oldukları yüksek enerjileri ile büyük boyutlu taneciklere göre daha yüksek oranda malzemeyi yüzeyden aşındırdığı görülmüştür.

3003 H14 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışını daha detaylı inceleyebilmek için aşınmış yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerleri optik profilometre yardımı ile hesaplanmış, 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmıştır. Partikül çarpma açısının, püskürtme basıncının ve aşındırıcı partikül boyutunun ortalama yüzey pürüzlülüğüne ve yüzey morfolojisine etkileri incelenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisine partikül çarpma açısının etkisi:

Partikül çarpma açısının artması ile ortalama pürüzlülük değerlerinde artış meydana geldiği görülmüştür. 15° çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyini çizerek aşındırdıkları ve bunun sonucunda yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük oldukları belirlenmiştir. Dikleşen çarpma açılarında ise yüzeyde plastik deformasyonların oluşması ile ortalama pürüzlülük değerinde artış meydana geldiği söylenebilir.

Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisine partikül püskürtme basıncının etkisi:

Püskürtme basıncının artması ile tüm çarpma açısı değerlerinde ve her iki partikül boyutunda ortalama pürüzlülük değerlerinde artış meydana geldiği görülmüştür. Püskürtme basıncının artması ile partiküllerin sahip olduğu kinetik enerjide artış meydana gelmekte ve bunun sonucunda aşındırıcı partiküllerin malzemedan

kopardıkları malzeme miktarı ve oluşturdıkları plastik deformasyon artmaktadır. Diğer yandan EDS analizlerinde de görüldüğü gibi püskürtme basıncının artışı malzeme yüzeyine saplanan partikül miktarını arttırmaktadır. Bu sonuçlar püskürtme basıncı artışı ile aşındırılan yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerlerinin artmasına açıklık getirmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisine aşındırıcı partikül boyutunun etkisi:

Büyük boyutlu partikül (80 mesh) ile aşındırılmış yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerinin, küçük boyutlu (180 mesh) partiküller ile aşındırılan yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum büyük partiküllerin (80 mesh) küçük partiküllere (180 mesh) göre erozif aşınma sonrası daha kaba ve daha derin izler bırakması ile açıklanabilir.

Yüksek lisans tez çalışmaları sonucunda 3003 H14 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı erozyon oranı, SEM görüntüleri, daha önce yapılmayan açılı SEM görüntüleri, EDS analizleri ve optik profilometre cihazı ile bulununan ortalama pürüzlülük değerleri, 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri beraber kullanılarak karakterize edilmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen katı partikül erozyonu deneyleri ile alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına etki eden partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül hızının etkileri incelenmiştir. Çalışma şartlarında alüminyum alaşımının katı partikül erozyonuna uğradığı endüstriyel uygulamalar bu sonuçlar dikkate alınarak gözden geçirilebilir. Minimum aşınmanın gerçekleştirdiği parametreler doğrultusunda alüminyum alaşımına uygun çalışma koşulları sağlanabilmektedir. Ayrıca maksimum erozyon oranının gerçekleştiği operasyon parametreleri kullanılarak katı partikül erozyonu temel prensibi ile çalışan su jeti ile alüminyum alaşımını kesme, kumlama ve yüzey işleme işlemleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Güteryüz K., Deformasyon Yaşlanması AA7075 Alaşımının Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2011, 284274.
- [2] Aktuğ S. L., İkiz Merdane Döküm Yöntemiyle Üretilmiş AA1050 ve AA3003 Alüminyum Alaşımlarının Termomekanik İşlemler Sonrası Mikro Yapı İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 2009, 245291.
- [3] Yetiştiren H., 2024 Alüminyum Alaşımında RRA işleminin GKÇ direncine etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994, 29186.
- [4] Dwight J., *Aluminium Design and Construction*, 1st ed., E & FN Spon, London, 1999.
- [5] Bayındır M. K., Katı Parçacık Erozyon Aşınmasının Alüminyum Alaşımları Üzerinde Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009, 237493.
- [6] Binal A., AA 2024-T3 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında Slem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006, 184134.
- [7] Başer T. A., Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, *Mühendis ve Makina*, 2012, **635**, 51-58.
- [8] Miller W. S., Zhuang L., Bottema J., Wittebrood A. J., Smet P., Haszler A., Vieregge A., Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, *Materials Science and Engineering*, 2000, **A280**, 37-49.
- [9] <http://www.assan.com.tr/NDC/Generic/Content/Uygulama/Details.aspx?ID=41>, (Ziyaret Tarihi: 29.04.2013)
- [10] Demir E., Alüminyum Alaşımlarda Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008, 244006.
- [11] Tımaç G., Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının TiG Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 185281.
- [12] Rana F., Stefanescu D. M., Frictionproperties of Al 1.5PctMg/SiC particulate metal-matrix composites, *Metallurgical Transactions A*, 1989, **20**, 1564-1566.

- [13] Vingsbo O., Wear and wear mechanisms, *Proc. Intl. Conf. Wear of Materials, ASME*, New York, 1979.
- [14] Sundararajan G., Roy M., Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures, *Tribology International*, 1997, **30**, 339-359.
- [15] Bağcı M., İmrek H., CuZn10 ve CuSn10 Bakır alaşımlarının eroziv aşınması, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [16] Finnie I., Some reflections on the past and future of erosion: Part I, *Wear*, 1995, **186-187**, 1-10.
- [17] Veinthal R., Tarbea R., Kulua P., Kaerdi H., Abrasive erosive wear of powder steel sand cermets, *Wear*, 2009, **267**, 1838–1844.
- [18] Czichos H., Habig K. H., Reibung und Verschleiß, Systemanalyse, Pruftechnik, Werkstoffe und Konstruktions element, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, *Tribologie-Handbuch*, Wiesbaden, 128, 1992.
- [19] Tsiang T. H., Survey of sand and rain erosion of composite materials, *Journal of Composite Technology and Research*, 1986, **8**, 154.
- [20] Liebhard M., Levy A., The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals, *Wear*, 1991, **151**, 381-390.
- [21] Tilly G. P., Erosion Caused by Airborne Particles, *Wear*, 1969, **14**, 63-79.
- [22] Arnold J. C., Hutchings M., A model for the erosive wear of rubber at oblique impact angles, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1992, **25**, A222-A229.
- [23] Yerramareddy S., Bahadur S., Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V, *Wear*, 1990, **142**, 253-263.
- [24] Zhou J., Bahadur S., Erosion-corrosion of Ti-6Al-4V in elevated temperature air environment, *Wear*, 1995, **186**, 332-339.
- [25] Harsha A. P., Bhaskar D. K., Solid Particle Erosion Behaviour Of Ferrous And Non-ferrous Materials And Correlation Of Erosion Data With Erosion Models, *Materials And Design*, 2008, **29**, 1745–1754.
- [26] 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*, 2003, **63**, 549-557.
- [27] Hager A., Friedrich K., Dzenis Y. A., Paipetis S. A., Study of erosion wear of advanced polymer composites, *International Committee on Composites Materials (ICCM-10)*, Whistler, Canada, 14-18 August 1995.

- [28] Stachowiak G. W., Batchelor A. W., Engineering Tribology, *Tribology Series*, 1993, **24**, 577-586.
- [29] Heuer V., Walter G., Hutchings I. M., A study of the erosive wear of fibrous ceramic components by solid particle impact, *Wear*, 1999, **225–229**, 493–501.
- [30] Harsha A. P., Kumarjha S., Erosive wear studies of epoxy-based composites at normal incidence, *Wear*, 2008, **265**, 1129–1135.
- [31] Ahmad M., Casey M., Sürken N., Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials, *Wear*, 2009, **267**, 1605-1618.
- [32] Barkoula N. M., Kocsis J. K., Processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymer sand their composites, *Journal of Materials Science*, 2002, **37**, 3807-3820.
- [33] Shipway P. H., Hutchings I. M., Wear resistant materials—into the next century Materials in erosion testing with a gas-blas apperatus, *Wear*, 1994, **174**, 169-175.
- [34] Anand K., Hovis S. K., Conrad H., Scattergood R. O., Flux effect in solid particle erosion, *Wear*, 1987, **118**, 243-257.
- [35] Mondal D. P., Das S., Jha A. K., Yegneswaran A. H., Abrasive wear of Al alloy–Al₂O₃ particle composite: a study on the 2 3 combined effect of load and size of abrasive, *Wear*, 1998, **223**, 131–138.
- [36] Mondal D. P., Das S., High stres abrasive wear behaviour of aluminium hard particle composites: Effect of experimental parameters, particle size and volume fraction, *Tribology International*, 2006, **39**, 470–478.
- [37] Dundar M., Inal O. T., Solid particle erosion of a-brass with 5 and 25 mm particles at normal Incidence, *Wear*, 1999, **224**, 226–235.
- [38] Amirthan G., Udayakumar A., Prasad B., Balasubramanian M., Solid particle erosion studies on biomorphic Si/SiC ceramic composites, *Wear*, 2010, **268**, 145–152.
- [39] Chen Q., Li D. Y., Computer simulation of solid-particle erosion of composite materials, *Wear*, 2003, **255**, 78–84.
- [40] Tabakoff W., Vittal B. V. R., High Temperature Erosion Study of INCO 600 Metal, *Wear*, 1983, **86**, 89-99.
- [41] Fowler G., Shipway P. H., Pashby I. R., Abrasive water-jet controlled depth milling of Ti-6Al-4V alloy- an investigation of the role of jet-work piece traverse speed and abrasive grit size on the characteristics of the milled material, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **161**, 407-414.
- [42] Sinmazcelik T., Sari N. Y., Erodent Size Effect on the Erosion of

Polyphenylene Sulfide Composite, *Polymer Composites*, 2010, **31**, 985-994.

- [43] Scattergood R.O., Routbort J. L., Turner A. P. L., Velocity and size dependence of the erosion rates in silicon, *Wear*, 1981, **67**, 227-232.
- [44] Sinmazcelik T., Fidan S., Polimerler ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonun Mekanizmaları ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler, *13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 9-11 Kasım 2006.
- [45] Speyer A. J., Wood R. J. K., Stokes K. R., Erosion of aluminium-based claddings on steel by sand in water, *Wear*, 2001, **250**, 802–808.
- [46] Fang Q., Sidky P., Hocking M. G., Erosive wear behaviour of aluminium based Composites, *Materials and Design*, 1997, **18**, 389-393.
- [47] Elleuch K., Mezlini S., Guermazi N., Kapsa P., Abrasive wear of aluminium alloys rubbed against sand, *Wear*, 2006, **261**, 1316–1321.
- [48] Li Y., Burstein G. T., Hutchings I. M., The influence of corrosion on the erosion of aluminium by aqueous silica Slurries, *Wear*, 1995, **186-187**, 515-522.
- [49] Desale G. R., Gandhi B. K., Jain S. C., Particle size effects on the slurry erosion of aluminium alloy (AA 6063), *Wear*, 2009, **266**, 1066-1071.
- [50] Talia J. E., Ballout Y. A., Sacttergood R. O., Erosion ripple formation mechanism in aluminum and aluminum alloys, *Wear*, 1996, **196**, 285-294.
- [51] Jha A. K., Batham R., Ahmed M., Majumder A. K., Modi O. P., Chaturvedi S., Gupta A. K., Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum, *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 2011, **21**, 32-38.
- [52] Tan K. S., Wood R. J. K., Stokes K. R., The slurry erosion behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF) sprayed aluminium bronze coatings, *Wear*, 2003, **255**, 195–205.
- [53] Shin Y. W., Sargent G. A., Conrad H., Effects of Microstructura on the Erosion of Al-Si Alloys by Solid Particles, *Metallurgical Transactions A*, 1987, **18A**, 437-450.
- [54] Das S., Mondal D. P., Sawla S., Solid particle erosion of Al alloy and Al-alloy composites: Effects of heat treatment and angle of impingement, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, **35A**, 1369-1379.
- [55] Fang C. K., Chuang T. H., The effect of humidity on the erosive wear of 6063 Al alloy, *Wear*, 1999, **236**, 144–152.

- [56] Avcu E., Fidan S., Karabay S., Sınmazçelik T., Türkiye’de Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan AA-1070 İle AA-6101 Alaşımlarının Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Karşılaştırılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2012, **27**, 865-874.
- [57] Sahu P. S., Satapathy A., Patnaik A., Sreekumar K. P., Ananthapadmanabhan P. V., Development, characterization and erosion wear response of plasma sprayed flyash–aluminum coatings, *Materials and Design*, 2010, **31**, 1165–1173.
- [58] Gültekin A. H., Garnet, Madencilik Rehberi, <http://madencilikrehberi.wordpress.com/2012/02/17/mta-kayitlarinda-cesitli-minerallere-ait-bilgiler-2>, (Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2013)
- [59] Hight R., Industrial Minerals and Rocks, *Abrasives*, 1983, **18**, 11-12.
- [60] Wellborn W. W., Synthetics cut natural products down to size, *Industrial Minerals Abrasives*, 1996, **347**, 31-44.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Yıldırım Y.**, Avcu E., Şahin A. E., Fidan S., Yetiştiren H., Sınmazçelik T., Effect of Particle Impact Angle, Erodent Particle Size and Acceleration Pressure on The Solid Particle Erosion Behavior of 3003 Aluminum Alloy, *3rd International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Turkey, 24-28 April 2013.
- [2] Avcu E., **Yıldırım Y.**, Şahin A. E., Fidan S., Sınmazçelik T., The Influences of the Particle Impingement Angle and Velocity on the Surface Roughness, the Erosion Rate and the 3D Surface Morphology of the Solid Particle Eroded Ti6Al4V, *3rd International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Turkey, 24-28 April 2013.
- [3] Şahin A. E., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Mechanical and Thermal Properties of Pumice Powder Filled PPS Composites, *3rd International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Turkey, 24-28 April 2013.
- [4] **Yıldırım Y.**, Şahin A. E., Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Aşındırıcı Partikül Boyutu ve Püskürtme Basıncının Ti6Al4V Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışına Etkileri, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [5] Şahin A. E., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Günay V., Aşındırıcı Partikül Boyutu, Partikül Çarpma Açısı ve Püskürtme Basıncının Alümina Seramik Malzemenin Katı Partikül Erozyonu Davranışına Etkileri, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Turkey, 10-12 October 2012.
- [6] **Yıldırım Y.**, Şahin A. E., Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Cam Keçe Takviyeli Polifenilen Sulfid Matrisli Kompozitlerin Katı Partikül Erozyon Davranışlarına Etkileri, *IV. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 12-14 Eylül 2012.
- [7] Şahin A. E., **Yıldırım Y.**, Fidan S., Avcu E., Sınmazçelik T., Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışına Etkileri, *IV. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 12-14 Eylül 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Kırklareli’de doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2007 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2012 yılından itibaren Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.