

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AA6082-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ EROZİF AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

AYGEN AHSEN ERDOĞAN

KOCAELİ 2018

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AA6082-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ EROZİF AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

AYGEN AHSEN ERDOĞAN

**Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ekrem ALTUNCU
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi**



Tezin Savunulduğu Tarih: 12.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Katı partikül erozyonu, malzemelere katı partiküllerin çarpmasıyla ortaya çıkan bir aşınma şeklidir. Savunma, otomotiv, enerji, havacılık, gemi ve denizcilik gibi birçok endüstriyel alanda, katı partikül erozyonu nedeniyle oluşan hasarlar bileşenlerin ömürlerini azaltıcı yönde etki etmektedir. Katı partikül erozyonu, aşındırıcı partiküle ve hedef malzeme yüzeyinin özelliklerine bağlı olarak değişen farklı parametrelerin etkisi altında oluşum göstermektedir.

Öte yandan 6082 alüminyum alaşımı çekici mühendislik özellikleri sayesinde özellikle havacılık ve otomotiv yapılarında yaygın uygulamalarda kullanılmaya başlamış ve birçok alanda diğer 6000 serisi alaşımların yerini almıştır.

Bu çalışmada katı partikül erozyonu detaylı bir şekilde incelenirken, deneysel çalışmalarda hedef malzeme olarak AA6082-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyon davranışına etki eden parametrelere bağlı olarak aşınma oranı, yüzey morfolojisi ve pürüzlülük değerleri incelenerek alüminyum alaşımının katı partikül erozyon davranışı karakterize edilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca ilgi ve desteğini esirgemeyen, değerli fikirleri ve yönlendirmeleriyle çalışmalarına ışık tutan,engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın danışmanım Prof. Dr. Erol Feyzullahoğlu başta olmak üzere Prof. Dr. Tamer Sınmazçelik, Doç. Dr. Ioan Constantin Tarca ve Doç. Dr. Sinan Fidan hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım da katı partikül erozyon davranışını incelediğim AA6082-T6 alüminyum alaşımının üreticisi ASAŞ Alüminyum'a çalışmalarına olan katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Bu süreçte maddi manevi her türlü desteği sağlayarak yanımda olan anneme çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Hayatımın her zorlu sürecinde hedefe odaklanmamı sağlayan en büyük motivasyon kaynağım Mehmet Yıldırım'a desteği için sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs -2018

Aygen Ahsen ERDOĞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
GİRİŞ	1
1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	4
1.1. Alüminyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi.....	4
1.2. Alüminyum Alaşımının Genel Özellikleri	5
1.3. Alüminyum Alaşımının Sınıflandırılması.....	8
1.3.1. Dövme alüminyum alaşımları.....	9
1.3.1.1. Alaşımsız alüminyum (1xxx serisi)	13
1.3.1.2. Alüminyum - bakır alaşımları (2xxx serisi).....	14
1.3.1.3. Alüminyum - manganez alaşımları (3xxx serisi).....	14
1.3.1.4. Alüminyum - silisyum alaşımları (4xxx serisi).....	15
1.3.1.5. Alüminyum - magnezyum alaşımları (5xxx serisi).....	15
1.3.1.6. Alüminyum - magnezyum - silisyum alaşımları (6xxx serisi).....	16
1.3.1.7. Alüminyum-çinko-magnezyum ve alüminyum-çinko- magnezyum bakır alaşımları (7xxx serisi)	17
1.3.1.8. Alüminyum + açıklanan kalıplardan herhangi birine girmeyen diğer elementler (8xxx serisi)	17
1.3.2. Dökme alüminyum alaşımları.....	17
1.3.2.1. Ticari saflıktaki alüminyum	19
1.3.2.2. Alüminyum-bakır alaşımları	19
1.3.2.3. Alüminyum-silisyum alaşımları.....	19
1.3.2.4. Alüminyum-magnezyum alaşımları.....	19
1.3.2.5. Alüminyum-çinko-magnezyum alaşımları	20
1.3.2.6. Alüminyum-kalay alaşımları.....	20
1.4. Alüminyumun Fiziksel Özellikleri	20
1.4.1. İşleme sertleşmesi	20
1.4.2. Dağılma sertleşmesi	21
1.4.3. Katı çözeltili sertleşmesi	22
1.4.4. Çökeltme sertleştirilmesi.....	22
1.4.5. Isıl işlem uygulanmayan alaşımların temper gösterimi	23
1.4.6. Isıl işlem uygulanabilen alaşımlar için temper gösterimleri.....	24
2. AŞINMA.....	27
2.1. Kayma Mesafesi ile Aşınma Hacminin ve Aşınma Yüzey Pürüzlülüğünün Değişmesi	28
2.2. Sürtünme ve Aşınma Kaynaklı Enerji Kayıplarının Maliyeti	30
2.3. Aşınma Mekanizmasının Türleri.....	31

2.3.1. Adhezif aşınma	31
2.3.2. Abrasif aşınma	32
2.3.3. Korozyon aşınma.....	34
2.3.4. Yorulma aşınması	34
2.3.5. Erozyon aşınma	35
3. KATI PARTİKÜL EROZYONU	38
3.1. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Faktörler.....	40
3.1.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı.....	41
3.1.2. Aşındırıcı partiküllerin hızı.....	43
3.1.3. Aşındırıcı partiküllerin boyutu.....	44
3.1.4. Aşındırıcı partiküllerin debisi	45
3.1.5. Aşındırıcı partiküllerin karışım oranı	46
3.1.6. Hedef malzeme özellikleri	46
4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA EROZYON AŞINMA DAVRANIŞININ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	48
4.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	48
4.2. Aşındırıcı Partikül Boyutu Etkisi	48
4.3. Partikül Sertliği ve Şekil Faktörü	50
4.4. Partikül Çarpma Açısının Etkisi.....	50
4.5. Partikül Çarpma Hızının Etkisi	51
4.6. Çevresel Etkenler	52
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	53
5.1. 6082 Alüminyum Alaşımı	53
5.2. Alüminyum Oksit	56
5.2.1. Alüminyum oksit mineralinin fiziksel özellikleri.....	57
5.2.2. Alüminyum oksit mineralinin kimyasal özellikleri	58
5.3. Vakumlu Kumlama	59
5.4. NANOVA PS50 Temassız Profilometre	62
5.5. SEM ve EDS Analizleri	63
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	65
6.1. Katı Partikül Erozyon Aşınması	67
7. DENEYSEL BULGULAR	71
7.1. Kütleli Debilerin İncelenmesi	71
7.2. Katı Partikül Erozyonunun Aşındırıcı Partikül Boyutuna Bağlı Değişimi	73
7.2.1. Aşınma oranlarının incelenmesi	73
7.2.2. Aşınma izlerinin incelenmesi.....	79
7.2.3. Elementsel analizler	81
7.2.4. SEM fotoğraflarının incelenmesi.....	87
7.2.5. Farklı partikül boyutlarında aşınmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin incelenmesi	93
7.3. Katı Partikül Erozyonunun Partikül Hızına Bağlı Değişimi	95
7.3.1. Çift disk yöntemi ile aşındırıcı partiküllerin hızlarının ölçülmesi.....	96
7.3.2. Aşınma oranlarının incelenmesi	98
7.3.3. Aşınma izlerinin incelenmesi.....	104
7.3.4. Elementsel analizler	106
7.3.5. SEM fotoğraflarının incelenmesi.....	109
7.3.6. Farklı püskürtme basınçlarında aşınmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin incelenmesi	114

7.4. Katı Partikül Erozyonunun Partikül Çarpma Açısına Bağlı Değişimi	117
7.4.1. Aşınma oranlarının incelenmesi	117
7.4.2. EDS analizlerinin incelenmesi	119
7.4.3. SEM fotoğraflarının incelenmesi	122
7.4.4. Farklı çarpma açılarında aşınmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin incelenmesi	125
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	129
KAYNAKLAR	133
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	137
ÖZGEÇMİŞ	138



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Birim ağırlık başına hacim	8
Şekil 1.2.	Alüminyum alaşımlarının gösterim sistemi	10
Şekil 1.3.	Alaşım elemanlarının çekme dayanımı, sertlik, darbe duyarlılığı ve sünekliğe etkisi	11
Şekil 1.4.	Alaşım elemanlarının kaynaklanabilirlik ve anotlamaya etkisi	12
Şekil 1.5.	Alaşım elemanlarının korozyona direnç ve yorulma mukavemeti üzerindeki etkileri.....	12
Şekil 1.6.	Alaşım elemanlarının yoğunluk ve Young Modülü'ne etkisi	13
Şekil 1.7.	Uzay mekiklerinin yakıt tankları ve yükseltici roketleri	14
Şekil 1.8.	Otomotiv radyatör ısı eşanjörleri için kullanılan 3002 alaşımı	14
Şekil 1.9.	Kaynak teli için kullanılan 4043 alaşımı.....	15
Şekil 1.10.	Yüksek hızlı feribot.....	16
Şekil 1.11.	Ekstrüde edilmiş alüminyum profiller.....	16
Şekil 1.12.	6xxx serisi kullanılmış araba ve motosiklet iskeletleri	17
Şekil 1.13.	Alüminyumun işleme sertleştirilmesi.....	21
Şekil 2.1.	Tekrarlı temaslarda aşınma eğrilerinin üç temsili tipi.....	29
Şekil 2.2.	Tekrarlı temaslarda yüzey pürüzlülüğü değişiminin 3 temsili tipi.....	30
Şekil 2.3.	Bir arayüzün kesme sırasında iki kırılma (1 ve 2) olasılığını gösteren şema	32
Şekil 2.4.	Abrasif aşınma mekanizmaları; mikro kesme, kırılma, yorulma ve tane çıkarma.....	33
Şekil 2.5.	Çelik için devamlı kayma sırasında oluşan yorulma aşınması.....	35
Şekil 2.6.	Erozif aşınma mekanizması	36
Şekil 3.1.	Bir maden pompasının çarkındaki erozif aşınma	39
Şekil 3.2.	Petrol boru hattındaki erozif aşınma	39
Şekil 3.3.	Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler	40
Şekil 3.4.	Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri.....	41
Şekil 3.5.	Aşınma oranının (Ig) partiküllerin çarpma açısıyla (α) bağlantısı (partiküllerin çarpma hızı $v_0 = 120$ m/s, çapı 0,4 -0,6 mm)	42
Şekil 3.6.	Gevrek malzemelerin aşınma eğrileri	43
Şekil 3.7.	Partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi	44
Şekil 5.1.	AA6082-T6 alüminyum alaşımının otomotiv sektöründeki uygulama örnekleri.....	56
Şekil 5.2.	Kahverengi, beyaz ve pembe alüminyum oksit çeşitleri.....	56
Şekil 5.3.	Vakumlu kuşlama sistemi.....	60
Şekil 5.4.	Vakumlu kuşlama düzeneğinin şematik gösterimi	62
Şekil 5.5.	Optik profilometre cihazı	63
Şekil 5.6.	Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı	64
Şekil 6.1.	Deneysel çalışmada hedef malzeme olarak kullanılan numunelerin 3 boyutlu çizimi	65
Şekil 6.2.	60 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı.....	66

Şekil 6.3.	120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı.....	67
Şekil 6.4.	Numunenin yüzey pürüzlülüğü ölçümünün şematik gösterimi.....	69
Şekil 6.5.	Deneysel çalışmada kullanılan HP Scanjet G2710 tarayıcı	69
Şekil 7.1.	Kütlesel debinin aşındırıcı partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi	72
Şekil 7.2.	Katı partikül erozyonunda aşınma oranının farklı çarpma açılarında aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 1.5bar, aşınma süresi: 15 sn)	75
Şekil 7.3.	Katı partikül erozyonunda aşınma oranının farklı çarpma açılarında aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 3 bar, aşınma süresi: 15 sn)	79
Şekil 7.4.	120 mesh aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncı altında ve 15°,30°,45°,60°,75°,90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri	79
Şekil 7.5.	60 mesh aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncı altında ve 15°,30°,45°,60°,75°,90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri	80
Şekil 7.6.	120 mesh aşındırıcı partiküllerin 3 bar püskürtme basıncı altında ve 15°,30°,45°,60°,75°,90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri.....	80
Şekil 7.7.	60 mesh aşındırıcı partiküllerin 3 bar püskürtme basıncı altında ve 15°,30°,45°,60°,75°,90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri.....	80
Şekil 7.8.	Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 3 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh, aşınma süresi: 15 s)	81
Şekil 7.9.	SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi.....	82
Şekil 7.10.	Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 3 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh, aşınma süresi: 15 s)	83
Şekil 7.11.	SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 2 numaralı bölgeden alınan EDS analizi.....	83
Şekil 7.12.	3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı.....	84
Şekil 7.13.	SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi.....	85
Şekil 7.14.	3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı.....	86
Şekil 7.15.	SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 2 numaralı bölgeden alınan EDS analizi.....	86
Şekil 7.16.	120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)	88
Şekil 7.17.	120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma	

	açısı:30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar).....	88
Şekil 7.18.	120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar).....	89
Şekil 7.19.	120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı:30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar).....	90
Şekil 7.20.	120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı:30°, püskürtme basıncı: 3 bar).....	90
Şekil 7.21.	120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar).....	91
Şekil 7.22.	120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar).....	92
Şekil 7.23.	120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar).....	92
Şekil 7.24.	Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak ortalama pürüzlülük (R_a) değişimi.....	93
Şekil 7.25.	1,5 bar püskürtme basıncında ve 15° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	94
Şekil 7.26.	1,5 bar püskürtme basıncında ve 15° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	94
Şekil 7.27.	3 bar püskürtme basıncında ve 15° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	95
Şekil 7.28.	3 bar püskürtme basıncında ve 15° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	95
Şekil 7.29.	Çift disk deney düzeneğinin CAD çizimi ve gerçek resmi.....	96
Şekil 7.30.	Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler.....	97
Şekil 7.31.	60 mesh ve 120 meshteki aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar ve 3 bar basınç altında çarpma hızları.....	98
Şekil 7.32.	120 mesh partikül boyutu ile 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncında oluşan aşınma oranlarının karşılaştırılması.....	99
Şekil 7.33.	60 mesh aşındırıcı partikül ile 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basınçlarında oluşan aşınma oranlarının karşılaştırılması.....	101
Şekil 7.34.	1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 120 mesh aşındırıcı partiküllerin 15° ve 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri.....	105
Şekil 7.35.	1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 60 mesh aşındırıcı partiküllerin 15° ve 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri.....	105
Şekil 7.36.	Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM	

	fotoğrafi (Püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh, aşınma süresi: 15 sn).....	106
Şekil 7.37.	SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi.....	107
Şekil 7.38.	Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh, aşınma süresi: 15 sn).....	108
Şekil 7.39.	SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 2 numaralı bölgeden alınan EDS analizi.....	108
Şekil 7.40.	1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 120 mesh).....	109
Şekil 7.41.	1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 120 mesh).....	110
Şekil 7.42.	1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 120 mesh).....	110
Şekil 7.43.	1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 120 mesh).....	111
Şekil 7.44.	1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 60 mesh).....	112
Şekil 7.45.	1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede ve BSE modunda SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 60 mesh).....	112
Şekil 7.46.	1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 60 mesh).....	113
Şekil 7.47.	1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede ve BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 60 mesh).....	114
Şekil 7.48.	Püskürtme basıncına bağlı olarak ortalama pürüzlülük değerinin (R_a) değişimi.....	114
Şekil 7.49.	3 bar püskürtme basıncında ve 45° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	115
Şekil 7.50.	1,5 bar püskürtme basıncında ve 45° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	115
Şekil 7.51.	3 bar püskürtme basıncında ve 45° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	116
Şekil 7.52.	1,5 bar püskürtme basıncında ve 45° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	116
Şekil 7.53.	Farklı çarpma açılarında ve 1,5 bar basınç altında 120 mesh ve 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak meydana gelen aşınma	

oranlarının karşılaştırılması.....	118
Şekil 7.54. Farklı çarpma açılarında ve 3 bar basınç altında 120 mesh ve 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak meydana gelen aşınma oranlarının karşılaştırılması	118
Şekil 7.55. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi:15 s).....	119
Şekil 7.56. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi.....	120
Şekil 7.57. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi:15 s).....	121
Şekil 7.58. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 2 numaralı bölgeden alınan EDS analizi.....	121
Şekil 7.59. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)	122
Şekil 7.60. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede ve BSE modunda SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh).....	122
Şekil 7.61. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x1000 büyütmede SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)	123
Şekil 7.62. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x1000 büyütmede ve BSE modunda SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh).....	124
Şekil 7.63. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)	124
Şekil 7.64. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede ve BSE modunda SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh).....	125
Şekil 7.65. Aşındırıcı partikül çarpma açısına bağlı olarak ortalama pürüzlülük (R_a) değişimi (3 bar)	126
Şekil 7.66. 3 bar püskürtme basıncında ve 30° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	126
Şekil 7.67. 3 bar püskürtme basıncında ve 90° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	127
Şekil 7.68. Aşındırıcı partikül çarpma açısına bağlı olarak ortalama pürüzlülük (R_a) değişimi (1,5 bar)	127
Şekil 7.69. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 30° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	128
Şekil 7.70. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 90° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri.....	128

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösterimi	18
Tablo 1.2. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları için temper durumları	23
Tablo 1.3. Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının özellikleri ve ortak kullanımları	26
Tablo 3.1. Katı partikül erozyonuna maruz kalan bileşen örnekleri	38
Tablo 3.2. 80 m/s darbe hızında çeşitli aşındırıcılar kullanıldığında maksimum aşınma oranının yeri ve “k” oranı	43
Tablo 5.1. 6082 alüminyum alaşımının genel fiziksel özellikleri	54
Tablo 5.2. 6082 alüminyum alaşımının tipik kimyasal birleşimi	54
Tablo 5.3. 6082 alaşımının genel mekanik özellikleri.....	55
Tablo 5.4. Alüminyum oksit mineralinin fiziksel özellikleri	58
Tablo 5.5. Beyaz alüminyum oksit alaşımının kimyasal özellikleri.....	59
Tablo 5.6. Hava vasıtasıyla yapılan iki farklı kumlama yönteminin karşılaştırılması	61
Tablo 5.7. Optik profilometre cihazının özellikleri.....	63
Tablo 6.1. Deneysel çalışmada kullanılan aşındırıcı partikül boyutları	66
Tablo 6.2. Kumlama deneylerinde kullanılan parametreler	68
Tablo 7.1. 60 ve 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcıların 1,5 bar ve 3 bar basıncındaki kütleli debileri	72
Tablo 7.2. 1,5 bar ve 3 bar basınçları altında, 120 mesh ve 60 mesh partikül büyüklüklerinin hız ve kütleli debi oranları	78
Tablo 7.3. Spektrum 1 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları.....	82
Tablo 7.4. Spektrum 2 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları.....	84
Tablo 7.5. Spektrum 1 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları.....	85
Tablo 7.6. Spektrum 2 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları.....	87
Tablo 7.7. EDS analizi ile elde edilen elementsel analiz sonuçları	107
Tablo 7.8. EDS analizi ile elde edilen elementsel analiz sonuçları	108
Tablo 7.9. Elementsel analiz sonuçları	120
Tablo 7.10. Elementsel analiz sonuçları	121

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Aşındırıcı partiküllerin hız vektörü ile hedef yüzey arasındaki açı(°)
cm	: Santimetre
CO ₂	: Karbondioksit
Gpa	: Gigapascal
gr	: Gram
H ₂ O	: Su
H ₂ S	: Hidrojensülfür
J	: Joule
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
m	: Metre
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
Mpa	: Megapascal
N	: Newton
NH ₃	: Amonyak
Nm	: Newtonmetre
NO ₂	: Nitrojendioksit
nm	: Nanometre
O ₂	: Oksijen
θ	: İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı (°)
Ω	: Ohm
μ m	: Mikrometre
r	: Yarıçap
sn	: Saniye
SO ₂	: Kükürtdioksit
W	: Watt

Kısaltmalar

AA	: Aluminum Association (Alüminyum Birliği)
AB	: Ingots for Remelting (Tekrar Ergitme İçin İngotlar)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Cast Product (Döküm Alaşım)
AM	: Cast Master Alloy (Döküm Master Alaşım)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
AW	: Wrought Product (Dövme Alaşım)
BSE	: Back Scatter Electrons (Geri Saçılan Elektronlar)
CEN	: European Committee for Standardization (Avrupa Standartlar Komitesi)

DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
DM	: Deutsche Mark (Alman Markı)
EDS	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektroskopisi)
EN	: European Standards (Avrupa Standardı)
HB	: Hardness Brinell (Brinell Sertliği)
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
HVOF	: High Velocity Oxy Fuel (Yüksek Hızla Kaplama)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Örgütü)
SE	: Seconder Electrons (İkincil Elektronlar)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)



AA6082-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

6082 alüminyum alaşımı, çekici yüzey özellikleri, yüksek mukavemeti ve mükemmel korozyon direnci sayesinde özellikle uçak ve otomotiv sektöründe yaygın uygulama alanına sahiptir. Bununla birlikte AA6082-T6 alüminyum alaşımlarından üretilen yapısal bileşenler, kullanım ömürleri boyunca katı partiküllerin çarpmasına maruz kalabilirler. Katı partikül aşındırıcıların etkilerinden kaynaklanan aşınmanın değerlendirilmesi için AA6082-T6 alüminyum alaşımı, alüminyum oksit (Al_2O_3) aşındırıcı partikülleri ile aşındırılarak bu alaşımın katı partikül erozyonu davranışının ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda AA6082-T6 alüminyum alaşımı numuneler özel olarak hazırlanan erozif aşınma test düzeneğinde farklı partikül çarpma açıları (15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°), farklı püskürtme basınçları (1,5 bar, 3 bar) ve farklı boyutta (60 mesh ve 120 mesh) aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmıştır. Değişen erozyon parametrelerine bağlı olarak numune yüzeylerinde meydana gelen aşınma oranları hesaplanmıştır. Erozyona uğramış numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve morfolojisi bir temassız lazer profilometresi kullanılarak incelenmiştir. Aşınmış numunelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenerek enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile analizi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda farklı erozyon parametrelerinin, AA6082-T6 alüminyum alaşımının aşınma oranı, yüzey erozyon hasarı, krater morfolojisini ve yüzey pürüzlülüğünü etkilediği bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Alüminyum Alaşımları, Aşınma Oranı, Katı Partikül Erozyonu, Yüzey Morfolojisi, Yüzey Pürüzlülüğü.

THE INVESTIGATION OF EROSIIVE WEAR BEHAVIORS OF AA6082-T6 ALUMINUM ALLOY

ABSTRACT

AA6082-T6 aluminum alloys have found widespread application in aircraft and automotive structures, as they offer an attractive combination of surface properties, strength and corrosion resistance. Hence, structural components manufactured from AA6082-T6 aluminum alloys may be exposed to impingement of solid particles during their service life. For evaluation of erosive wear induced by solid particle impacts, a detailed study was carried out with AA6082-T6 aluminum alloy by using aluminum oxide (Al_2O_3) erodent particles. Two distinct particle sizes were used in solid particle erosion tests which are 60 mesh (212-300 μ m) and 120 mesh (90-125 μ m) respectively. Also, aluminum alloy samples were tested under acceleration pressures (1.5 bar and 3 bar). Erosion tests were carried out according to ASTM G76 standard at six various impact angles (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°). Surface roughness and morphology of eroded samples were analyzed by using a non-contact laser profilometer. It was found that erodent particle size affects the erosion rate, surface erosion damage, crater morphology and roughness. 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. Effects of different erosion parameters on AA6082-T6 erosion rate were also discussed in detail.

Keywords: Aluminum Alloy, Erosion Rate, Solid Particle Erosion, Surface Morphology, Roughness.

GİRİŞ

Son yıllarda alüminyum alaşımları yüksek spesifik özellikleri (özgül mukavemet, özel modül vb.), süneklik, termal ve elektrik iletkenliği, korozyon direnci ve mükemmel işlenebilirlikleri sayesinde birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları; presleme, dövme, haddeleme, kaynak, ekstrüzyon ve döküm gibi çok geniş işlenebilme yelpazesine sahiptir.

6082 alüminyum alaşımı, 6000 serisi alaşımların içerisinde en yüksek dayanıma sahip nispeten yeni bir alaşımdır. Sahip oldukları mühendislik özellikleri sayesinde 6082 alaşımı, özellikle havacılık ve otomotiv yapılarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve birçok alanda diğer 6000 serisi alaşımların yerini almıştır. Diğer 6000 serisi alaşımlar gibi, 6082 alaşımından üretilen yapısal bileşenler dış mekan uygulamaları için aday malzemelerdir bununla beraber hizmet ömürleri boyunca katı partikül erozyonuna maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle, bu alaşımın katı partikül erozyon davranışları yapısal bileşenler için büyük önem taşımaktadır.

Partikül erozyonu, hedef malzeme üzerine yüksek hızlı partiküllerin çarpması ile meydana gelmektedir ve bu durum yüzey hasarı ile sonuçlanmaktadır. Uzay ve havacılık uygulamalarında, jet motorlarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, helikopter rotor kanatlarında ve türbinlerde partikül erozyonunu yoğun olarak görmek mümkündür. Aşındırıcı partikülün her bir çarpması, hedef malzemede elastik/plastik deformasyonlara ve aşınmaya neden olmaktadır. Kullanım ömrünün sonunda yoğun partikül erozyonu hasarı, yapısal bileşenlerde ciddi kütle kaybına ve/veya hacim değişimine (kesit, şekil, boyut, tolerans vb.) yol açabilmektedir. Erozyon hasarının tahmin edilerek hedef malzemenin yapısal bütünlüğünün sağlanması ancak maruz bırakılan çalışma parametreleri altındaki malzemenin aşınma davranışı biliniyorsa mümkün olabilmektedir.

Partikül erozyonu sırasında hedef malzemelerin deformasyon ve hasar davranışının karmaşık doğası aşındırıcı partiküllerin, hedef malzemelerin ve operasyonel parametrelerin çeşitli özelliklerine bağlıdır. Bu karmaşıklıklar, 6000 serisi

alüminyum alaşımları gibi sünek malzemelerde erozyon mekanizmalarının anlaşılması için araştırmacılara yol açmıştır.

Öte yandan, sünek AA6082-T6 alüminyum alaşımı mekanizmalarını ve katı partikül erozyon davranışını tam olarak anlamak için tatmin edici çalışmalar sunulmamıştır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak adına yapılan bu çalışmada AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyon davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Katı partikül erozyonu; partikül hızı, partikül çarpma açısı, partikül büyüklüğü, partikül debisi, aşınan malzeme özellikleri gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu doğrultuda AA6082-T6 alaşımı farklı partikül çarpma açılarında, farklı püskürtme basınçlarında ve farklı boyutlarda aşındırıcı partiküller ile aşındırılmış ve her bir parametrenin AA6082-T6 alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda hesaplanan aşınma oranlarının irdelenmesi katı partikül erozyonuna maruz kalan uygulamalarda erozif aşınma hasarının minimuma indirilmesi için doğru tasarımların yapılması noktasında büyük önem taşımaktadır.

Hesaplanan aşınma oranları ile birlikte aşındırılan malzemelerin yüzey morfolojilerinin incelenmesi de oldukça önemlidir. Bu doğrultuda aşındırılan numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizleri ile yüzey morfolojileri incelenmiştir. Aşınma sonrası malzeme yüzeyinde oluşan hasarın analizi ile alüminyum alaşımında farklı parametrelerin ne tür hasarlara yol açtıkları yorumlanmıştır.

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

Tez çalışmasının ilk bölümlerinde literatür araştırılması yapılarak alüminyum ve alaşımlarının tarihçesi, dünyadaki önemi, genel özellikleri, sınıflandırılması, kullanım alanları, aşınma ve aşınma çeşitleri, katı partikül erozyonu ve katı partikül erozyonuna etki eden parametreler hakkında bilgiler verilmiştir.

Daha sonraki bölümlerde tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Deneysel çalışmalar bölümünde AA6082-T6 alüminyum alaşımının farklı erozif aşınma test parametreleri altındaki erozyon davranışı incelenerek her bir parametrede meydana gelen aşınma oranları hesaplanmış ve grafiksel olarak gösterilmiştir. Yüzey morfolojilerindeki değişimler ve malzemede görülen etkin aşınma mekanizmaları SEM ve EDS analizleri ile irdelenmiştir. Aşındırılmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri optik profilometre yardımı ile incelenmiş, 2 ve 3 boyutlu görüntüleri verilerek yorumlanmıştır. Tez çalışmasının son bölümünde ise yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.



1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Yüksek dayanım/ağırlık oranı nedeniyle alüminyum ve alaşımlarının kullanımı endüstride çok büyük öneme sahiptir. Alüminyum alaşımlarının yüksek korozyon direnci ve hafifliği bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [1]. İlerleyen bölümlerde alüminyum malzemesinin tarihçesi, alüminyum alaşımlarının genel özellikleri, alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ve bu malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerine değinilmiştir.

1.1. Alüminyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi

Alüminyum, yerkabuğunda bulunan en yaygın metal (%8) ve en bol bulunan 3. elementtir. Alüminyum elementinden daha çok bulunan elementler ise oksijen ve silisyumdur [2]. Oksijen ile yüksek kimyasal ilişkisi nedeniyle alüminyum doğada bir metal olarak mevcut değildir [3].

Antik çağda, alüminyum oksit killeri; ilkyardım, kumaş boyama ve yangın önleme gibi yöntemlerde kullanılmıştır. Bu önemli kilometre taşları, alüminyumun "Keşif Dönemi" sırasında ortaya çıkmıştır [4].

Alüminyumun metal saf formu ilk olarak 1825'te Danimarkalı kimyager Hans-Christian tarafından cevherden başarıyla çıkarılmıştır. 1886'da ise Oberlin College öğrencisi Charles Hall ve Fransız mühendisi Paul Heroult ayrı ayrı ve aynı zamanda alüminyum oksitten alüminyumun çıkartılabileceği ucuz bir elektroliz işlemi geliştirmiştir. Ancak elektrolitik süreci güçlendirmek için gereken elektrik miktarı, alüminyum üretimini sınırlamıştır. 1887'de ise Avusturyalı mühendis Karl Josef Bayer, alüminanın yaygın ve doğal olarak oluşan bir alüminyum cevheri olan boksitten elde edilebileceği bir kimyasal proses geliştirmiştir. Hem Bayer hem de Hall-Herout'ın geliştirdiği prosesler günümüzde neredeyse tüm dünyadaki alüminyumun üretiminde kullanılmaktadır [4].

1900'lerin başında, ABD'li iş dünyası liderleri ve sanayicileri, alüminyumun üstün özelliklerini hızla fark etmişlerdir. Enerji nakil hatları ve yüksek hızlı tren elektrik

hatları alüminyumun elektriksel avantajlarından ilk yararlananlar olmuştur. Alüminyum folyo 1910'da piyasaya girmiştir bununla birlikte 1911'de başlayan alaşım geliştirme, alüminyumun fiziksel özelliklerini geliştirmiş ve yeni endüstriyel alanlar açmıştır [4].

İkinci Dünya Savaşı'nın başlangıcında alüminyum önemli bir stratejik metal haline gelmiştir. O dönemde alüminyumun temel kullanım alanları; uçak iskeleti inşaatı, gemi altyapısı ve milyonlarca sefertası üretimini içermektedir. İkinci Dünya Savaşı sonrasında, Amerikan endüstrisi tüketim ürünleri üretimine doğru yönelmiştir. 1950'lerin başında beyaz emaye/alüminyum iskeletli yıkayıcıların ve kurutucuların gelişimi görülmüştür. 1980'lerde, uzay mekikleri, alüminyum oksit roket güçlendiricileriyle fırlatılmıştır [4].

Yakın geçmişe bakıldığında Steve Jobs, alüminyumun güzellik ve dayanıklılığını tanımış ve ince, hafif bir dizüstü bilgisayar, iPad ve iPhone ürünlerini üretmiştir. Yeryüzündeki en değerli metallere biri olan bu "Metaller Kralı" nın kullanımı halen artmaktadır. Alüminyum hava pilleri, nanoteknoloji, uzay araçları için geliştirilmiş alaşımlarla alüminyum endüstrisi dünyayı "Alüminyum Çağı" na yönlendirmektedir. Paketleme, otomotiv, enerji, inşaat, ulaşım, havacılık ve savunma uygulamaları için kullanılan alüminyumun etkisi, ileride tarihçilerin günümüze bakıp "Alüminyum Çağı" nı ilan edebilecek kadar derin olmaktadır [4].

1.2. Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri

Alüminyum genellikle "Mucize Metal" olarak adlandırılmaktadır. Alüminyumun doğasında olan uzun özellik listesi; hafiflik, korozyona dayanıklılık, kolayca şekillendirilebilme, yüksek iletkenlik, yüksek reflektiflik, toksik olmama, dayanıklılık ve geri dönüştürülebilirlik, üreticilere ve tasarımcılara ürün yeniliği ve proses iyileştirmeleri için çok çeşitli seçenekler sunmaktadır. Alüminyum kullanımı düzinelerce uygulama için enerji maliyetlerini ve karbon emisyonlarını düşürmektedir. Geri dönüştürülmüş ve hafif alüminyum ambalajlar nakliye maliyetlerini ve emisyonları azaltırken, alüminyum yoğunluklu bir araç, ömrü boyunca enerji tüketiminde %32'lik bir düşüş sağlamaktadır. Çevre şartlarının iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda hava kirliliğinin azaltılmasında, hafif taşıt üretimi önemli bir çözüm olarak görülmektedir. Hafif, dayanıklı ve geri

dönüştürülebilir olan alüminyum, günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir [4].

Otomobil üreticileri araçlarda mukavemet ve güvenliği korurken yakıt verimliliğini arttırmak adına çoklu malzeme karışımının bir parçası olarak alüminyuma yönelmektedirler. Alüminyum, çarpışma enerjisini emme, kaza anında yolcuları korumada oldukça etkilidir [5].

Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, uçaklardan trenlere, otobüslerden kamyonlara, hatta dünyanın en yüksek gökdelenlerinden bazılarına kadar gücün ve dayanıklılığın gerekli olduğu yüzlerce günlük uygulamada kullanılmaktadır. Saf Alüminyum içerisine silisyum, magnezyum ve lityum gibi elementler eklenerek ve özel işleme teknikleriyle çelik kadar güçlü olabilecek şekilde tasarlanabilmektedirler. Alüminyum-çinko alaşımları günümüzün en güçlü alaşımlarından bazılarıdır ve otomotiv ve havacılık endüstrileri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Birim alüminyum ağırlığı, birim çelik ağırlığının yaklaşık üçte biridir; yani, araçlarda ve diğer uygulamalarda ağırlık hala azaltılırken parçalar alüminyum ile daha kalın ve daha güçlü yapılabilmektedir [4].

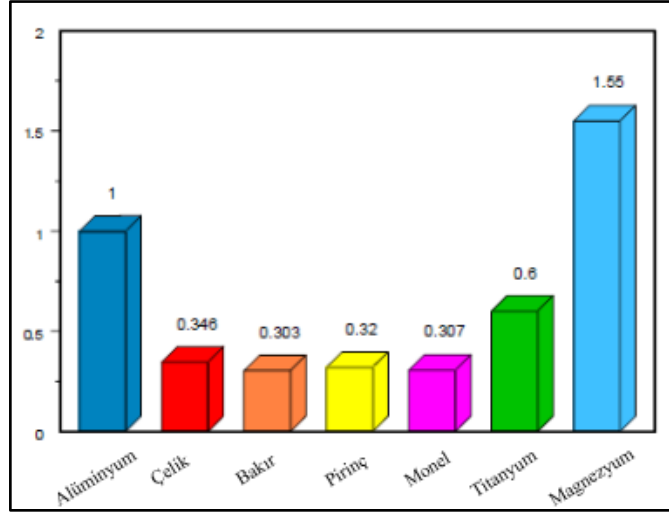
Temelde alüminyum üretiminde iki yöntem vardır. Birincil üretim, yeryüzünden boksit yatakları madenciliği ve nihai olarak alüminyum oluşturmak için elektrometalurjik işlemeyi içermektedir. İkincil üretim ise geri dönüştürülmüş hurda ürününden yeni alüminyum üretimidir. Buradan, alüminyumun istenilen şekle, mukavemete ve yoğunluğa getirilmesi için farklı işleme yöntemleri ve alaşımları kullanılmaktadır. Döküm veya erimiş alüminyumun bir kalıba dökülmesi, otomotiv parçaları gibi minimum talaş kaldırma gerektiren yüksek hacimli parçalar için kullanılmaktadır [2,4].

Alüminyum, sıcak haddeleme veya soğuk haddeleme yoluyla daha da güçlendirilebilmektedir. Bazı alaşımlar, ısıl işlemde geçirilip daha sonra hızlı soğutularak daha güçlü hale getirilebilmektedir. Alternatif olarak, bazı alaşımları daha güçlü hale getirmek için genellikle haddeleme, dövme veya çizme gibi soğuk işleme teknikleri de uygulanmaktadır [2,4].

Alüminyum elementinin kimyasal simgesi “Al”dir ve atom numarası 13’tür. Mevcut kavramlara göre bu, bir alüminyum atomunun 13'lük pozitif bir yüke sahip olan yüksek derecede konsantre bir çekirdeğinin etrafında üç yörüngede düzenlenmiş bir birim negatif elektrik yüküne sahip olan 13 elektrondan oluştuğu anlamına gelmektedir. Dış yörüngedeki üç elektron, alüminyum atomuna +3 ‘lük kimyasal birleşme gücü vermektedir [2].

Alüminyum gümüş beyaz renktedir. Hafiflik, alüminyumun en göze çarpan ve en iyi bilinen özelliğidir. Metal, 26,98'lik bir atom ağırlığına ve yaygın olarak kullanılan diğer metallerin (titanyum ve magnezyum hariç) ağırlığının yaklaşık üçte bir oranında 2.70'lik bir özgül ağırlığına sahiptir [6]. Çoğu metalde olduğu gibi yoğunluk sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Alüminyum alaşımlarına yaygın olarak kullanılan miktarlarda diğer metallerin ilave edilmesi, yoğunluğu önemli ölçüde değiştirmemektedir (+% 3, -% 2), ancak lityum ilavesinde alaşımın yoğunluğu %15 oranında azalmaktadır. Hareket içeren tüm uygulamalar için ağırlık önemlidir. Ağırlığı azaltmak; enerji tasarrufunu, titreşim kuvvetlerinin azalmasını, pistonlu ve hareketli parçaların performansının artmasını, elle çalıştırılan ekipman kullanıldığında yorgunluğun azalmasını ve daha düşük nakliye, taşıma, montaj maliyetlerinin sunulmasını sağlamaktadır. Düşük ağırlık ve özel alaşımlar ile mümkün olan en yüksek mukavemet, alüminyumun son 60 yıldır uçak yapımı için ana malzeme yapmaktadır. Ağırlık bazında satın alınsa da, metaller genellikle hacim bazında kullanılırlar, bu nedenle alüminyumun maliyetini diğer malzemelerle karşılaştırmak önemlidir [2].

Alüminyumun erime noktası alüminyumun saflığına duyarlıdır. Örneğin atmosferik basınçta %99,99 saf alüminyum için erime noktası 660°C'dir ancak %99,5 saf alüminyum için bu değer 635°C'ye düşmektedir [2]. Şekil 1.1'de alüminyum, bakır, çelik, bakır, pirinç, monel, titanyum ve magnezyum elementlerinin birim ağırlık başına hacim değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Alüminyum elementi magnezyumdan sonra 2. sırada yer almaktadır.



Şekil 1.1. Birim ağırlık başına hacim [2]

Alüminyum, geri dönüşüm konusunda oldukça ekonomik olma özelliği ile nispeten benzersizdir ve çevre üzerinde de olumlu etkileri vardır. Şimdiye kadar üretilen alüminyumun %75'i halen kullanımdadır. Alüminyum, cevherinden aynı miktarda alüminyum üretmek için gereken enerjinin sadece %5'i kadar bir enerji maliyetiyle tekrar kullanım için geri kazanılabilmekte ve rafine edilebilmektedir. Geri dönüştürülmüş metalin tekrar kullanılması için önemli örneklerinden biri Amerika Birleşik Devletleri'dir. ABD'de bira ve içecek kutuları için yıllık olarak kullanılan bir milyon ton alüminyum levha, %50'nin üzerinde kullanılmış kutu hurdalarından tedarik edilmektedir [2].

1.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Saf alüminyum sünek ve yumuşak özelliğe sahiptir. Belirli seviyede mekanik özellikler istenen kullanım alanları söz konusu olduğu zaman bu özellik saf metalin kullanım alanını belirli bir çember içine kısıtlamaktadır. Dolayısıyla mekanik, fiziksel ve işlenebilirlik özelliklerini geliştirebilmek adına diğer metallerle alaşımlandırılmaktadır [1].

Alüminyum alaşımları özelliklerine ve kullanım alanlarına göre dövme ve dökme olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Dövme alüminyum alaşımları dövme ve plastik şekil verme yöntemleri ile şekillendirilebilirken, dökme alüminyum alaşımları yalnızca döküm yolu ile şekillendirilebilmektedirler [1].

Bu iki grup kendi içinde ‘ısıt işlem uygulanabilir’ ve ‘ısıt işlem uygulanamaz’ olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Isıt işlem uygulanabilen alaşımların mekanik özellikleri soğuk şekil verme ve ısıt işlem ile iyileştirilebilirken, ısıt işlem uygulanamayan alaşımlarda ise yalnızca soğuk şekil verme yolu ile mukavemet artışı sağlanmaktadır [1,2].

Dövme alaşımların gösteriminde 4 hane kullanılmaktadır. Alaşım sistemleri:

- Alaşımsız alüminyum
- Alüminyum-bakır alaşımları
- Alüminyum-manganez alaşımları
- Alüminyum-silisyum alaşımları
- Alüminyum-magnezyum alaşımları
- Alüminyum-magnezyum-silisyum alaşımları
- Alüminyum-çinko-magnezyum ve Alüminyum-çinko-magnezyum-bakır alaşımları
- Alüminyum artı yukarıda özetlenen kalıplardan herhangi birine girmeyen diğer elementler [1]

Döküm alaşımlarının gösteriminde 5 hane kullanılmaktadır. Alaşım sistemleri:

- Alaşımsız alüminyum
- Alüminyum alaşımları, külçe ve döküm.

Alüminyumun efektif kullanılabilmesi için alaşım türünün özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [1]. Aşağıdaki kısımda ticari olarak kolayca temin edilebilen alüminyum alaşım ailesi anlatılmaktadır.

1.3.1. Dövme alüminyum alaşımları

Çoğu ülke, alüminyum ve alüminyum alaşımlı bileşimlerin uluslararası bazda gruplanmasına yönelik önemli bir adım olarak, dövme alaşımının bileşimi için 4 basamaklı sınıflandırmayı kabul etmiştir. Dövme alüminyum alaşımlarını tayin etmek için neredeyse tüm dünya çapında Amerikan sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem, "Uluslararası Alaşım Tanımları ve Dövme Alüminyum Alaşımları İçin Kimyasal Bileşim Sınırlarının Kaydı" nı derleyen, Aluminum Association (AA) tarafından yönetilmektedir. Alaşımlar için Avrupa referansı, Avrupa Normatif

Alüminyum Dövme alaşımlarını belirten EN ve AW önsözyle tanımlanmıştır. Diğer tüm açılardan alaşım numaraları ve bileşim sınırları, Alüminyum Birliği tarafından kayıtlı olanlar ile aynıdır. Şekil 1.2’de alüminyum alaşımlarının gösterim sistemi verilmektedir [2].

Alüminyum Alaşımlarının Gösterim Sistemi						
	Major alaşım elementi	Çözüldüdeki atomlar	İşleme sertleşmesi	Çökertme sertleşmesi		
Dövme Alaşım	1XXX	None (min. 99.00% Al)		X	Isıl işlem uygulanamayanlar	
	3XXX	Mn	X	X		
	4XXX	Si	X	X		
	5XXX	Mg	X	X		
EN AW-	2XXX	Cu	X	(X)	X	Isıl işlem uygulanabilirlir
	6XXX	Mg + Si	X	(X)	X	
	7XXX	Zn	X	(X)	X	
	8XXX	Other	X	(X)	X	
Döküm Alaşım	1XXX0	None (min. 99.00% Al)				
	2XXX0	Cu				
	4XXX0	Si				
	5XXX0	Mg				
	7XXX0	Zn				
	8XXX0	Sn				
	9XXX0	Master Alloys				

EN = Avrupa Standardı
A = Alüminyum
B = İngot
C = Döküm Alaşım
M = Master Alaşım
W = Dövme Alaşım

Şekil 1.2. Alüminyum alaşımlarının gösterim sistemi [2]

Tanımlamadaki dört rakamın ilki alaşım grubunu ana alaşım elementleri açısından gösterir, yani:

- 1xxx minimum %99,00 veya daha yüksek saflıkta alüminyum
- 2xxx Bakır
- 3xxx Manganez
- 4xxx Silisyum
- 5xxx Magnezyum
- 6xxx Magnezyum ve Silisyum
- 7xxx Çinko
- 8xxx Diğer elementler
- 9xxx Kullanılmayan seriler [2]

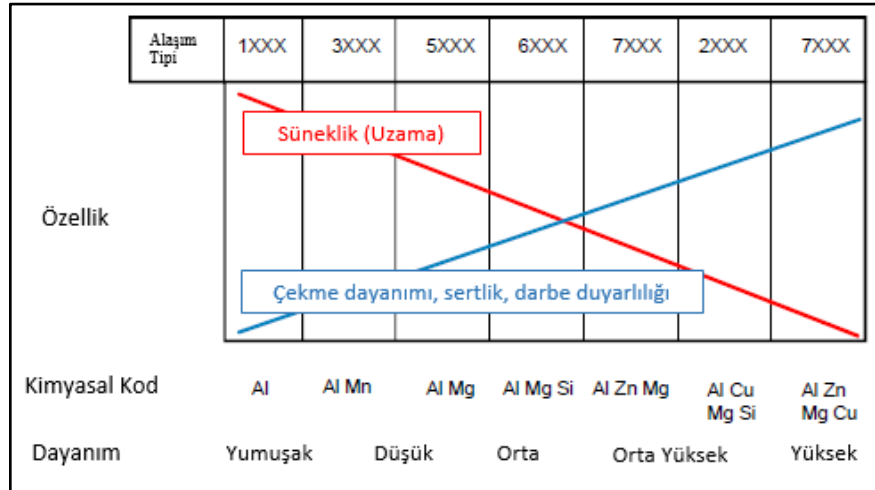
Minimum saflık derecesi %99,00 ve daha büyük olan 1xxx grubunda, dört rakamın son ikisi alüminyumun minimum yüzdesini belirtmektedir. Örneğin 1070 alaşımı, %99,70'lik alüminyum saflığını göstermektedir. İkinci basamak, katışıklık

sınırlarında veya alaşım elementlerinde yapılan değişiklikleri ifade etmektedir ve ikinci basamak sıfırsa, doğal katışıklık sınırlarına sahip alaşımsız alüminyum anlamına gelmektedir. 1-9 arasındaki tamsayılar, bir veya daha fazla yabancı madde veya alaşım elementinin olduğunu belirtmektedirler. Örneğin 1145 alaşımı, minimum saflığın %99,45 olduğu, ikinci basamaktaki 1 ise demir ve silisyumun varlığı anlamına gelmektedir.

2xxx'den 8xxx'e kadar olan gruplarda, dört basamağın son ikisi özel bir önem taşımamaktadır, yalnızca gruptaki farklı alaşımları tanımlamak için kullanılmaktadır. İkinci basamak alaşım değişikliklerini göstermekte ve eğer sıfır ise orijinal alaşım olduğu anlamına gelmektedir [2].

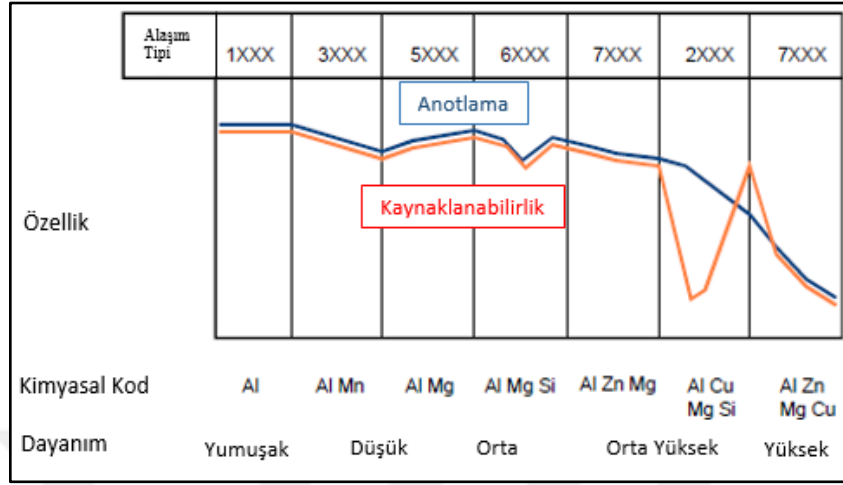
Sırasıyla aşağıda verilen 4 şekilde, çeşitli alaşım gruplarının özellikleri ve karakteristikleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Örneğin, doğal alaşımsız alüminyum yaklaşık 70 MPa nihai bir gerilme mukavemetine sahiptir ve bu da bazı 7xxx serileri için 700 MPa ve üzeri ile karşılaştırılmıştır [2].

Şekil 1.3'te alaşım elemanlarının çekme dayanımı, sertlik, darbe duyarlılığı ve süneklığe etkisi gösterilmiştir.



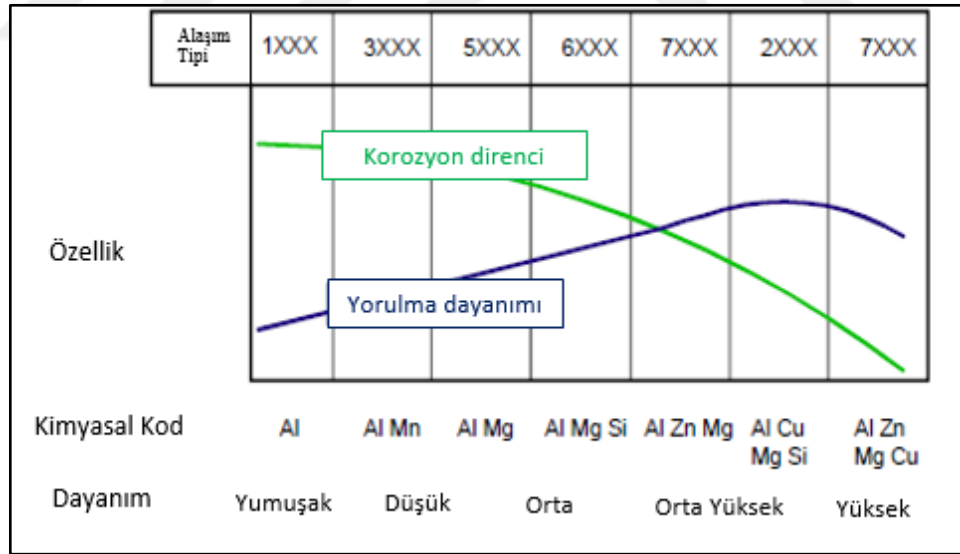
Şekil 1.3. Alaşım elemanlarının çekme dayanımı, sertlik, darbe duyarlılığı ve süneklığe etkisi [2]

Şekil 1.4'te alaşım elemanlarının kaynaklanabilirlik ve anotlamaya etkisi gösterilmiştir.



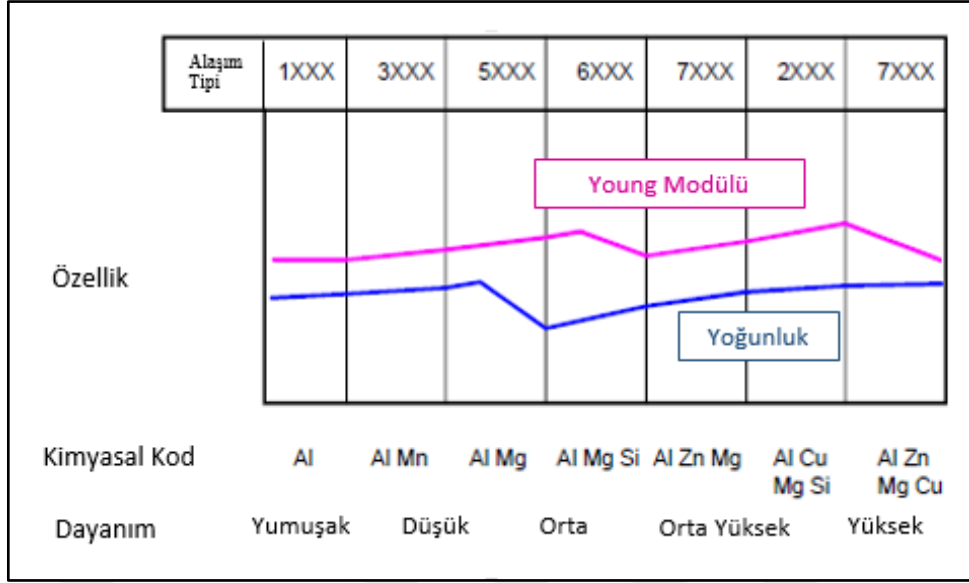
Şekil 1.4. Alaşım elemanlarının kaynaklanabilirlik ve anotlamaya etkisi [2]

Şekil 1.5'te alaşım elemanlarının korozyona direnç ve yorulma mukavemeti üzerindeki etkileri gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Alaşım elemanlarının korozyona direnç ve yorulma mukavemeti üzerindeki etkileri [2]

Şekil 1.6'da alaşım elemanlarının yoğunluk ve Young Modülü'ne etkisi gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Alaşım elemanlarının yoğunluk ve Young Modülü'ne etkisi [2]

Dövülmüş alüminyum alaşımları, dökme külçenin haddeleme, çekme, ekstrüzyon veya dövme gibi proseslerle mekanik olarak işlendiği alaşımlardır. Bu alaşımlar birkaç gruba ayrılmaktadır. Her grup, aşağıda daha detaylı olarak özetleneceği gibi bir ana alaşım oluşturucu madde ile ayırt edilmektedir. Tüm dövme alaşımları ayrıca "ısıl işlem uygulanabilir" ve "ısıl işlem uygulanamayan" alaşım olmak üzere iki genel sınıfa ayrılmıştır.

1.3.1.1. Alaşımsız alüminyum (1xxx serisi)

Ticari olarak saf alüminyum (%99,0 saf) yumuşak ve sünektir. Ancak özütlendiği şekilde başta demir ve silisyum olmak üzere genellikle %1,5'e kadar yabancı madde içermektedir. Bunlar, alüminyum metalinin özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir, böylelikle haddeleme esnasında elde edilen daha fazla sertlik ile ticari saflık derecesinde faydalı bir mukavemet derecesine sahip olması sağlanmakta ve yaygın şekilde tabaka halinde üretilmektedir. Tavlanmış durumda çok sünek olup mükemmel aşınma direncine sahiptir ayrıca gıda ve kimya endüstrilerinde kullanım için idealdir. Gıda, şekerleme ve sigara ambalajında folyo kalınlığına indirgenmektedir ve şekillendirme prosesleri için yüksek uzamanın birinci dereceden önemli olduğu araçlar için şekillendirilmiş paneller oluşturularak kullanılmaktadır. Örnek:1200 alaşımı [1,2].

1.3.1.2. Alüminyum - bakır alaşımları (2xxx serisi)

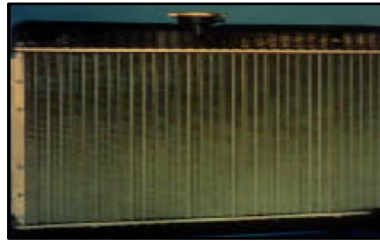
Bu serinin ana alaşım elementi bakırdır. Bu alaşım çözeltilerine ısıl işlem uygulanarak yumuşak çeliğinkinden daha fazla olabilecek optimum mekanik özellikler elde edilmektedir. Bu gruptaki tipik alaşımlar 2017, 2024, 2014, 2030 ve 2011'dir. Ayrıca kaynak edilebilirlikleri daha zordur. Bu ailenin alaşımları uçak ve askeri uygulamalar için özellikle kullanılmaktadır [2]. Şekil 1.7'de gösterilen uzay mekiklerinin yakıt tankları ve yükseltici roketlerinde 2xxx serisinden 2219, 2419, 2195 alaşımları kullanılmaktadır.



Şekil 1.7. Uzay mekiklerinin yakıt tankları ve yükseltici roketleri [1]

1.3.1.3. Alüminyum - manganez alaşımları (3xxx serisi)

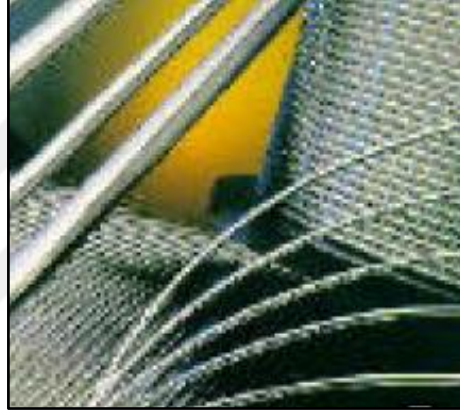
Yaklaşık %1 manganez ilavesi, 1200 alaşımı ile kıyaslandığında süneklikte büyük bir kayıp meydana getirilmeden mukavemeti yaklaşık %10-15 oranında arttırmaktadır. Bu alaşımların kullanım alanları arasında çatı kaplama sacları, yiyecek konserve kutuları, depolama tankları ve araç kaplamaları bulunmaktadır [2]. 3002 alaşımı Şekil 1.8'de görseli verilen otomotiv radyatör ısı eşanjörleri için kullanılabilir.



Şekil 1.8. Otomotiv radyatör ısı eşanjörleri için kullanılan 3002 alaşımı [1]

1.3.1.4. Alüminyum - silisyum alaşımları (4xxx serisi)

Silisyum, erime noktasının önemli ölçüde düşmesine neden olan miktarlarda alüminyum alaşımlarına eklenebilmektedir. Bu nedenle, bu alaşım sistemi ana metalden daha düşük erime noktaları gerektiren kaynaklama telleri ve lehim dolgu alaşımları için kullanılmaktadır. Bu alaşımlar kendiliğinden ısıyla muamele edilemez, ancak genel olarak sınırlı derecede ısı muamelesine tepki vermek için ana metalin alaşım bileşenlerini alırlar [2]. Şekil 1.9'da gösterilen kaynak telleri için 4043 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Alaşım 4043, en çok kullanılan kaynak tellerinden biridir.



Şekil 1.9. Kaynak teli için kullanılan 4043 alaşımı [1]

1.3.1.5. Alüminyum - magnezyum alaşımları (5xxx serisi)

Bu alaşım serisine ısıl işlem uygulanamaz. Bu seri korozyon direnci ile yüksek mukavemetin en iyi kombinasyonunu sergilemektedir (deniz/deniz suyu uygulamalarında sıklıkla kullanıldığı gibi). Aynı zamanda iyi kaynaklanabilirlik özelliği sergilemektedirler ancak Mg seviyesi %3'ü aştığında, kullanılan tempere ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak gerilme, korozyon direncinde azalma eğilimi vardır. Kullanım alanları; basınçlı kaplar, dökme yol ve demiryolu araçları, gemi yapıları, kimyasal tesisler [2]. Şekil 1.10'daki şekilde gösterildiği gibi tekli veya çoklu gövde yüksek hızlı feribotlarda, tüm kaynaklı yapı ile sac ve levha olarak birkaç Al-Mg alaşımı (5083 ve 5454, daha sonra açıklanacak 6xxx ekstrüzyon şekilleri ile birlikte) kullanılmaktadır [1].



Şekil 1.10. Yüksek hızlı feribot [1]

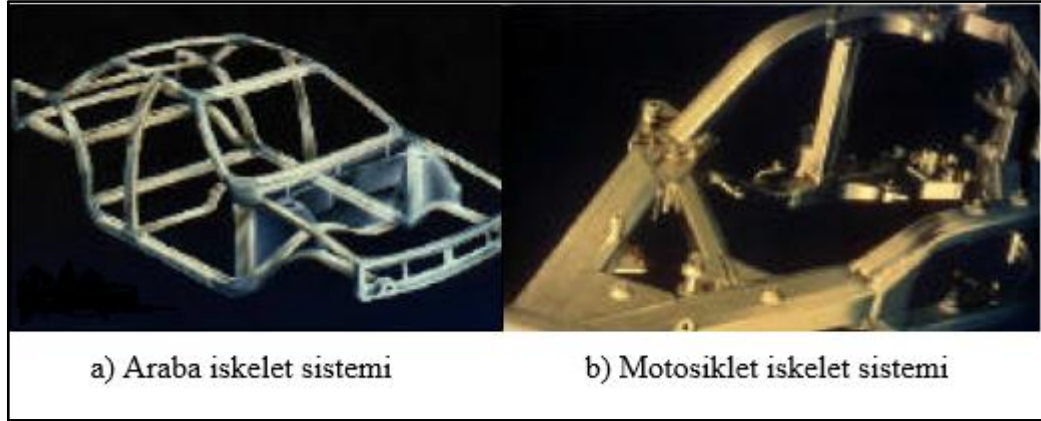
1.3.1.6. Alüminyum - magnezyum - silisyum alaşımları (6xxx serisi)

Isıl işlem uygulanabilen alaşım grubu, bu hale gelmek için magnezyum ve silisyum (magnezyum silisit) kombinasyonunu kullanmaktadır. Bu alaşımlar mükemmel korozyon direnci, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve güçlü dayanım özelliklerine sahiptir. Bu gruptaki tipik alaşımlar 6061, 6063 ve 6082'dir. Uygulama alanları; bina yapımı, kara ve deniz taşımacılığını içermektedir [2]. Şekil 1.11'de verilen ekstrüde edilebilir Al-Mg-Si alaşımlarının güçlü yanı, bu alaşımlara ve ekstrüzyon işlemine gereksinim duyulan her yerde uygulanabilme esnekliğidir [1].



Şekil 1.11. Ekstrüde edilmiş alüminyum profiller [1]

Şekil 1.12'de görüldüğü üzere ekstrüde edilmiş Al-Mg-Si alaşımları, motosikletlerin veya arabaların tümünün çerçevesini oluşturabilmektedir (alttaki araba iskelet sistemi resmi Audi A-8 gövdesi içindir).



Şekil 1.12. 6xxx serisi kullanılmış araba ve motosiklet iskeletleri [1]

1.3.1.7. Alüminyum-çinko-magnezyum ve alüminyum-çinko-magnezyum-bakır alaşımları (7xxx serisi)

Bu alaşım grubu alüminyum açısından en yüksek mukavemeti göstermektedir ve çoğu durumda çelikten daha üstündür. Çinko ve magnezyum kombinasyonu, 7xxx alaşımlarını ısıtılabilir hale getirmektedir ve çok yüksek dayanım sağlanabilmektedir. Tipik bir örnek burada 7075 bileşimidir ve 580 MPa'lık tipik bir gerilme mukavemetine sahiptir. Bununla birlikte, bu alaşım gruplarının imal edilmesi nispeten zordur ve üretmek için çok yüksek bir teknoloji seviyesi gerekmektedir. Özellikle askeri uygulamalarda kullanılmaktadır [2].

1.3.1.8. Alüminyum + açıklanan kalıplardan herhangi birine girmeyen diğer elementler (8xxx serisi)

8xxx serisi Fe, Ni ve Li gibi daha az kullanılan alaşım elementlerine sahip olan alaşımlar için kullanılmaktadır. Fe ve Ni elementlerinin iletkenlik kaybı azdır ve iletkenler için 8017 ile temsil edilen bir dizi alaşımda kullanılmaktadırlar. 8090 alaşımının içindeki Li, son derece yüksek mukavemet sağlamaktadır bu nedenle bu alaşım, rijitlikteki artışların yüksek mukavemetli bileşen ağırlığını azalttığı havacılık uygulamaları için kullanılmaktadır [1].

1.3.2. Dökme alüminyum alaşımları

Dökme alüminyum alaşımları genellikle pres döküm, kum döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak dökülmektedirler. Bu alaşımlar işlenmeye elverişli olup kaynak edilebilmektedirler [6,7].

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 devam ettirmesi, dökülebilirlik ise alaşımdan kolayca ve iyi bir döküm elde edebilme özelliği anlamına gelmektedir. Isıl işlem uygulanabilen dökme alüminyum alaşımlarında ısıl işlem uygulanarak mekanik özellikler iyileştirilmektedir. Isıl işlem, tek fazlı bölgede bir çözündürme işleminden sonra su verme ve doğal yaşlandırma veya yapay yaşlandırma işlemlerini kapsamaktadır.

Isıl işlem uygulanmayan dökme alüminyum alaşımları genellikle rijitlikleri, sıvı haldeki akışkanlıkları ve yüksek korozyon dirençleri sebebi ile tercih edilmektedirler. Dökme alüminyum ve alaşımları için kullanılan simgeleme şekli dövme alüminyum ve alaşımlarının simgelenmesine benzemektedir. Dört rakamlı simgelemede tek fark dördüncü rakamın üçüncü rakamdan bir nokta ile ayrılmasıdır. Tablo 1.1’de dökme alüminyum ve alaşımlarının simgeleme şekli verilmiştir. 1xx.x için ikinci ve üçüncü rakamlar alüminyumun %99,00’den daha yüksek olan saflık derecesini belirlemektedir. 2xx.x’den 9xx.x’e kadar olan dizilerde ilk rakam ana alaşım elementini belirtmektedir. Bu alaşımların tümünde son rakam 0 ise parça döküm, 1 ise ingot olduğu anlamına gelmektedir [2,6].

Tablo 1.1. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösterimi [6]

Dökme Alüminyum Alaşımları	Alaşım Elementi	Yaşlandırılabilme
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 seri yüksek saflıkta alüminyum içermektedir. Seride %99,0, %99,5 ve %99,7 saflık içeren alüminyum alaşımları yüksek elektriksel özellikleri sebebiyle bir transistör elemanı olan kollektor bileziği veya iletken çubuğu olarak kullanılmaktadır [6].

1.3.2.2. Alüminyum-bakır alaşımları

Alüminyum-bakır alaşımları, genellikle yüksek sıcaklıkta dayanım ve tokluk istenen uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bu amaçla yaygın kullanılan alaşımlar arasında 242.0 ve A242.0 alaşımları gösterilmektedir. Zaman zaman bakırın etkisini desteklemek amacıyla bu alaşımlarda nikel de ilave edilmektedir. İyi bir akışkanlığa ve dökülebilirliğe sahip bu alaşımların zayıf yönleri arasında katılma sırasında çatlama ve dendritler arasında çekinti oluşturma eğilimleri vardır. İstenmeyen elementlerin miktarları kontrol altında olduğu zaman oldukça yüksek süneklik sergileyebilen bu alaşımlar, yüksek çekme dayanımları ve sünekliklerinin bir sonucu olarak oldukça iyi düzeyde tokluk değerlerine sahip olmaktadır [6,8].

1.3.2.3. Alüminyum-silisyum alaşımları

Alüminyum-silisyum alaşımları, döküm sektöründe üretilen alaşımlar içerisinde en yüksek orana sahiptir. Silisyumun kazandırdığı yüksek akışkanlık sayesinde döküm kabiliyeti yüksek olan bir gruptur. Fiziksel ve mekanik özellikler açısından geniş bir ölçüde performans göstermektedirler. İkili Al-Si alaşımları yüksek korozyon direnci, iyi kaynaklanabilirlik ve düşük özgül ağırlık gibi önemli özellikleri bünyesinde barındırmaktadır. Mimari alanda dekoratif amaçlı, uçak ve otomobil parçaları olarak da üretilmektedir [6,8].

1.3.2.4. Alüminyum-magnezyum alaşımları

Özellikle korozyona karşı gösterdikleri yüksek dayanımla tanınan bu alaşımlar, mekanik özellikler açısından genellikle orta seviye düzeyde değerler sergilemektedirler. Korozyon yaratan ortamlarda iyi bir dayanım sergilemeleri nedeniyle, bu alaşımların gıda sektöründe, içecek kutularında kullanıldığı

görülmektedir. 535 gibi alaşımlar yüksek boyutsal kararlılık da sergileyebildiği için, elektronik cihazlarda da tercih edilebilmektedirler [6,8].

1.3.2.5. Alüminyum-çinko-magnezyum alaşımları

Çinko içeren alüminyum-magnezyum alaşımlarının özelliği, oda sıcaklığında doğal yaşlanma becerisine sahip olmalarıdır. Bu özellikleri sayesinde bu alaşımlar optimum mekanik özelliklerine üretimleri üzerinden yaklaşık 1 ay geçtikten sonra ulaşmaktadırlar. Bu özelliklerinin sağladığı bir diğer dikkat çeken fayda da, ısıl işlem ve su verme süreçlerinin getirdiği tüm olumsuz etkilerden muaf olmalarıdır. Maliyet avantajı bir yana, bu işlemleri gören parçalarda oluşabilecek çarpılma ve kalıntı gerilme gibi problemler, bu alaşımlarda görülmemektedir. Genellikle iyi çekme özellikleri sergileyen bu alaşımların dökülebilirlikleri pek iyi olmadığı için, iyi bir döküm pratiği gerekmektedir [6,8].

1.3.2.6. Alüminyum-kalay alaşımları

Alüminyum-kalay alaşımlarının yük taşıma kapasiteleri ve yorulma dayanımları yüksektir. İçten yanmalı motorlarda yağlama yağının yaptığı aşındırıcı etkiye dayanıklılık yatak malzemelerinde oldukça önemlidir ve bu alaşımlar, diğer bütün metallere göre bu konuda üstünlük sağlamaktadırlar [6,8].

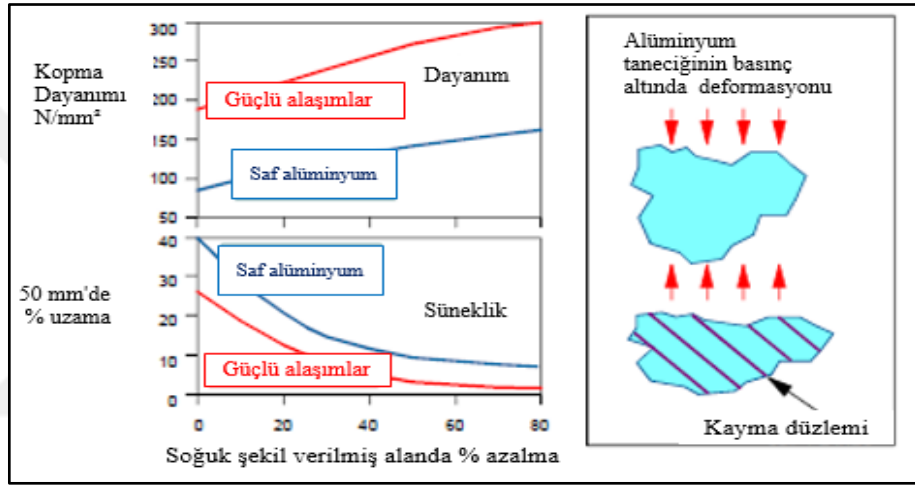
1.4. Alüminyumun Fiziksel Özellikleri

Alüminyumun güçlendirilebileceği dört temel yol vardır: İşleme sertleşmesi, dağılma sertleşmesi, katı çözelti sertleşmesi ve çökertme sertleştirilmesi. Bu sertleştirme işlemleri, yer değiştirmelerin hareketini engelleyen koşullar ürettikleri için etkilidir. Dislokasyonlar, metal kristallerinin, iki mükemmel kristal düzlemi birbirine sürüklemek için gerekli olanın çok altındaki gerilmelerde kaymasına olanak tanıyan hatalardır [2].

1.4.1. İşleme sertleşmesi

Alüminyum ürünler haddeleme, ekstrüzyon, çekme, bükme vb. ile imal edildiğinde, metal üzerinde işlem yapılmaktadır. Yapılan işlem, metalin yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılırsa (soğuk işleme) sadece metali biçimlendirmez, aynı

zamanda farklı kayma düzlemlerinde kaymaya çalışan yer değiştirmelerin etkileşime girerek hareket etmesini engelleyen bir "trafik sıkışıklığı"na neden olmasıyla gücü arttırmaktadır. Metalin yeniden kristalleştirme sıcaklığının üstünde (sıcak işleme) gerçekleştirilen fabrikasyon işlemleri normal olarak tavllanmış mukavemet koşulu üzerinde mukavemeti artırmaz. Isıl işlem uygulanmayan dövülmüş alaşımlarda soğuk işleme, mukavemeti artırmanın tek yoludur. Isıl işlem uygulanabilir alaşımda, ısıl işlem sonrası uygulanan soğuk işleme mukavemeti daha da arttırmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum-magnezyum ve saf alüminyumun işleme sertleştirilmesi Şekil 1.13'te gösterilmiştir [2].



Şekil 1.13. Alüminyumun işleme sertleştirilmesi [2]

1.4.2. Dağılma sertleşmesi

Çözülemez bir maddenin ince partikülleri, dislokasyonların hareketini engelleyecek şekilde (örn; 3000 serisi) kristal kafes boyunca eşit olarak dağılmaktadır. Alüminyum ile dağılma sertleştirilmesi iki şekilde başarılabilir:

- Matristen çökelen ince partiküller oluşturmak için kimyasal olarak metal veya birbirleriyle birleştirilen alaşım elementleri ilavesiyle.
- Uygun bir maddenin partiküllerinin (örneğin Al_2O_3) toz haline getirilmiş alüminyum ile karıştırılması ve daha sonra karışımın katı bir kütle halinde sıkıştırılmasıyla [2].

1.4.3. Katı çözeltili sertleşmesi

Çoğu alaşımlar, bir veya daha fazla metalin başka bir metalde çözülmüş katı çözeltileridir. Ya atomların alaşımlanması bazı ana metal atomlarının kafes konumlarını alır ya da taban metal arasındaki kafes boşluklarını işgal eder. Her iki durumda da, taban-metal örgüsü çarpıktır ve çıkıntının hareketini geciktirir ve böylece metali güçlendirir. Solüsyon olarak magnezyum içeren 5000 serisi iyi bir örnektir. Çoğu alüminyum alaşımı, alüminyum tabanda çözünen bir veya daha fazla element sonucunda bazı katı eriyik sertleşmesini yansıtır. Genellikle bu alaşımlar ısıtılma işlemi veya işleme sertleştirilmesi ile daha da güçlendirilmektedir [2].

1.4.4. Çökeltme sertleştirilmesi

Çökeltme sertleştirilmesi iki aşamalı bir ısıtılma işlemidir. Sadece ısıtılma işlemi uygulanan alaşım gruplarına uygulanabilmektedir. İlk olarak, çözeltili ısıtılma işlemi ile aşırı doymuş bir durum üretilmektedir. İkinci olarak, su vermeden sonra oluşan "yaşlandırma" işlemi tutarlı bir faz çökeltilene kadar alaşımın ısıtılmasıyla hızlandırılabilir. Bu tutarlı faz, dislokasyonların hareketlerini engelleyerek alaşımları güçlendirmektedir. Çözündürme işlemi, alaşımın en düşük erime noktasının hemen altındaki bir sıcaklığa ısıtılmasını ve bu sıcaklıkta ana metalin önemli miktarda alaşım elementi çözüne kadar tutulmasını içermektedir. Alüminyum, daha sonra mümkün olduğunca çok miktarda alaşım elementlerini çözeltili içerisinde tutmak için hızla soğutulmakta ve böylece bir aşırı doymuş katı çözeltili üretilmektedir. Bu aşırı doymuş durum genellikle kararsızdır ve bu nedenle ısıtılma işlemi uygulanabilen alaşımlar bu şartta kullanılmaktadır. Çözeltili ısıtılma işleminden sonra, ısıtılma işlemi uygulanabilen alaşımlar, oda sıcaklığında yaşlandırma sertleşmesi sergilemektedir. Oda sıcaklığında doğal yaşlandırma sertleşmesinin hızı ve derecesi alaşımdan alaşıma değişmektedir. Oda sıcaklığının üzerindeki ısıtılma, çökeltme reaksiyonunu hızlandırmaktadır bu nedenle çökeltme ile sertleştirilmiş alaşımlar mümkün olduğunca çabuk azami özellikler geliştirmek için genellikle yapay olarak yaşlandırılmaktadır. (çökeltme ısıtılma uygulanır). Çökeltme reaksiyonlarının kontrolü mümkün olan sıcaklık aralığı 120-180°C'dir [2].

1.4.5. Isıl işlem uygulanmayan alaşımların temper gösterimi

Standart olarak pekleştirilmiş alaşımların temper sertlikleri çeyrek, yarım, üç çeyrek ve tam sert ile ifade edilmektedir. Tablo 2.2’de ısıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının temper durumu gösterilmiştir. Tabloda H-sayı en yaygın kullanılan semboldür. Tabloda temper H-sayı ile ifade edilmektedir. H’den sonraki ikinci basamaktaki sayı sertliği gösterdiği için oldukça önemlidir. Buradaki sayı 8’e bölünerek sertlik ifade edilmektedir. Örneğin H16 ile temperlenmiş alaşım için $H16 = 6 \div 8 = \frac{3}{4}$ sertlikte denilmektedir. H’den sonraki ilk basamak ise son sertliği veren işlemi belirtmektedir [6, 9, 10].

Tablo 1.2. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları için temper durumları [6]

Kondüsyon	Temper Durumları		
	Soğuk Şekil Değiştirme	Soğuk Şekil Değiştirme Kısmen Tavlama	Dengelenmiş
Tamamen sert	H18	H28	H38
Üç çeyrek sert	H16	H26	H36
Yarım sert	H14	H24	H34
Çeyrek sert	H12	H22	H32
Tavlanmış	O		
Isıl işlem uygulanmış	F		

Tablo 1.2’de ısıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları temper durumları kısaltmaları ile birlikte verilmiştir. Aşağıda Tablo 1.2’de 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 [6-10].

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 [6, 10].

1.4.6. Isıl işlem uygulanabilen alaşımlar için temper gösterimleri

Bunlar mekanik özelliklerin ısıl işlemle değiştirilebildiği alaşımlardır. Isı, mukavemeti arttırmak için kullanılmaktadır ancak şekillendirmeye yardımcı olması amacıyla tavlama yoluyla mukavemeti azaltmak için de kullanılabilir. Bu alaşımlara, orijinal özelliklerini geri kazandırmak için tavlama veya şekillendirme işleminden sonra tekrar ısıl işlem uygulanabilir. Bu durum ısıl işlem uygulanamayan alaşımlara kıyasla büyük bir farktır.

Bu alandaki majör temperler uluslararası standartlara (AA, ISO, CEN) göre belirlenmiş ve tanımlanmıştır:

- 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, doğal yaşlandırılmış
- T4: Çözündürme uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış
- T5: Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş ve yapay olarak yaşlandırılmış [10].
- T6: Alüminyum alaşımlarının sertlik özelliklerini iyileştirmek amacıyla, çökme sertleşmesinin özel bir hali olan T6 ısıl işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemde ısıl işlem uygulanacak parçalar önce 510-540°C sıcaklıkta 4-6 saat bekletildikten sonra ani su verilerek 180-200°C sıcaklıkta 8-12 saat süreyle yapay yaşlandırılmaktadır. T6 ısıl işleminde, malzemede difüzyon, çözünme ve çökme oluşması için parçalar fırın içinde belirli bir sıcaklıkta toplamda 12-14 saat bekletilmektedir. Isıl işlem prosesinde; çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi, su verme süresi, su verme sıcaklığı, yapay yaşlandırma sıcaklığı, süresi ve parçaların ısıl işlem fırınına istiflenme biçimi nihai parçanın özelliklerini doğrudan etkileyen parametrelerdir [11].
- T7: Çözündürme uygulanmış ve aşırı yaşlandırma ile kararlı hale getirilmiş
- T8: Çözündürme uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
- T9: Çözündürme uygulanmış, yapay olarak yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş
- T10: Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış [10].

Aşağıda verilen Tablo 1.3'te, yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımların özellikleri ve ortak kullanımları kısaca belirtilmiştir.

Tablo 1.3. Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının özellikleri ve ortak kullanımları [2]

Alaşım	Alaşım Özellikleri	Genel Kullanım Alanları
1050/1200	Isıl işlem uygulanamaz. İyi şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci.	Gıda ve kimya endüstrisi
2014A	Isıl işlem uygulanabilir. Yüksek mukavemet. Kaynaklanamaz. Kötü korozyon direnci.	Uçak gövdesi
3103/3003	Isıl işlem uygulanabilir. Orta mukavemetli alaşım. İyi kaynaklanabilirlik, şekillendirilebilirlik ve korozyon direnci.	Araç panelleri, deniz havasına maruz kalmış yapılar, mayın kafesleri
*5454	Isıl işlem uygulanabilir. 650°C ile 200°C arasındaki sıcaklıklarda kullanılır. İyi kaynaklanabilirlik ve korozyon dayanımı.	Basınçlı kaplar, kara ve demiryolu tankerleri. Amonyum nitrat taşımacılığı, Petrol tankeri, Kimyasal tesisler.
*5083/5182	Isıl işlem uygulanabilir. İyi kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci. Deniz suyuna, endüstriyel atmosferlere karşı çok dirençlidir.	Basınçlı kaplar ve 65°C'nin altındaki karayolu taşımacılığı uygulamaları. Genel olarak gemi inşaatı yapıları.
*6063	Isıl işlem uygulanabilir. Orta mukavemetli alaşım. İyi kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci. Karmaşık profiller için kullanılır.	Mimari ekstrüzyon (iç ve dış) pencere çerçeveleri, sulama boruları.
*6061/*6082	Isıl işlem uygulanabilir. Orta mukavemet. İyi kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci.	Gerilmeye maruz kalan yapı elemanları, köprüler, vinçler, çatı makasları, bira fiçileri
7020	Isıl işlem uygulanabilir. doğal yaşlanmayla sertleştirilebilir, bu nedenle kaynaktan sonra ısıdan etkilenen bölgede özellikleri geri kazanılır. Stres korozyonuna duyarlı.	Zırhlı araçlar, askeri köprüler, motosiklet ve bisiklet gövdeleri
7075	Çok yüksek mukavemet. Isıl işlem uygulanabilir. Kaynaklanamaz. Kötü korozyon direnci.	Uçak gövdesi

* En sık kullanılan alaşımlar.

2. AŞINMA

Aşınma; kayma, yuvarlanma veya çarpma hareketinin etkisiyle birbirlerine göre izafi harekette bulunan iki katı yüzeyden birinin veya her ikisinin hasarı ya da istenmeyen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Birçok durumda aşınma pürüzlü yüzeylerde yüzey etkileşimleri yoluyla meydana gelmektedir. İzafi harekette, ilk olarak temas yüzeyindeki malzeme yer değiştirmektedir böylece o yüzeyin veya yüzeye yakın bölgenin özelliklerinde değişme olmaktadır ancak çok az miktarda malzeme kaybı görülmekte veya hiç görülmemektedir. Sonra, temas yüzeyindeki malzeme yüzeyden ayrılıp eşleşme yüzeyine transfer olabilir ya da aşınma parçacığı olarak kendini kurtarabilmektedir. Bir yüzeyden diğerine transfer durumunda, ara yüzeyin net hacim veya kütle kaybı sıfırdır ancak yüzeylerden bir tanesi aşınmıştır. Aşınma hasarı malzemenin gerçek kaybından önce gelir ve bağımsız olarak da gerçekleşebilir. Aşınmanın tanımı genel olarak malzeme kaybına dayanmaktadır fakat belirli bir gövde üzerindeki malzemenin (mikroskop kullanılarak gözlemlenir), ağırlıkta veya hacimde net bir değişiklik olmadan yer değiştirmesine bağlı hasarın da aşınmayı oluşturduğu vurgulanmalıdır [12].

Aşınma; sürtünme gibi malzemenin bir özelliği değildir, bir sistem tepkisidir. Çalışma koşulları aşınmayı etkiler. Bazen yüksek sürtünmeli ara yüzeylerin yüksek aşınma oranına sahip olduğu düşünülür. Bu her zaman doğru değildir. Örneğin, katı yağlayıcılar ve polimerler nispeten düşük sürtünme ve nispeten yüksek aşınma sergilerken, seramikler orta dereceli bir sürtünme ancak son derece düşük aşınma sergilemektedirler [12].

Aşınma iyi ya da kötü olabilmektedir. Kontrollü aşınma gerektiren kalem ile yazma, işleme, parlatma ve tıraşlama verimli aşınma örnekleridir. Rulmanlar, contalar, dişliler ve kamalar gibi neredeyse tüm makine uygulamalarında ise aşınma istenmeyen bir durumdur [12].

Hemen hemen tüm makineler aşınma nedeniyle dayanıklılıklarını ve güvenilirliklerini kaybederler ve aşınma sorunları nedeniyle yeni gelişmiş

makinelerin imkanları azalır. Bu nedenle, aşınma kontrolü, geleceğin ileri ve güvenilir teknolojisi için güçlü bir ihtiyaç haline gelmiştir. Aşınma oranı, malzeme seçimine ve çalışma koşullarına bağlı olarak 10^{-15} ile 10^{-1} mm³/Nm aralığında belirgin bir şekilde değişir. Bu sonuçlar, çalışma koşullarının tasarımı ve malzeme seçiminin, aşınmayı kontrol etmek için birer anahtar olduğu anlamına gelir. Bu gereksinimleri karşılamanın bir yolu olarak aşınma modlarının ve aşınma oranlarının tahmin edilmesi için aşınma haritaları önerilmiştir. Bir aşınma haritası, tribolojik koşulların en iyi tanımlarından biri olarak düşünülür ve çok çeşitli çalışma koşullarında malzeme seçimi için yararlıdır. Tribosistemleri tasarlamak ve aşınma haritasına dayalı materyalleri seçmek için aşınma oranını, aşınma modlarının çeşitlerini ve aşınma mekanizmalarını anlamak çok önemlidir [13].

İyi tasarlanmış tribolojik sistemlerde, malzemenin uzaklaştırılması oldukça yavaş bir prosestir ama çok stabil ve sürekli. Aşınma kalıntısının üretimi ve sirkülasyonu, özellikle boşlukların aşınma partikül boyutuna göre küçük olduğu makine uygulamalarında gerçek aşınma miktarından daha fazla problem olabilmektedir [12].

Aşağıda verilen şartların sağlanması halinde mühendislik malzemelerinde görülen yıpranma, aşınma olarak sayılabilir:

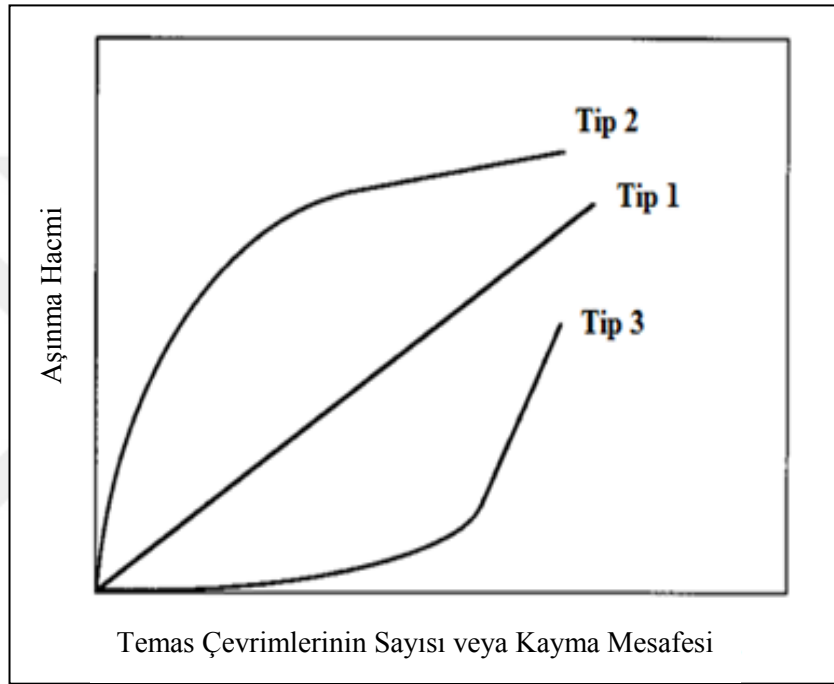
- Mekanik bir etkinin olması
- Sürtünmenin olması (bağlı hareket)
- Yavaş fakat devamlı olması
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi
- İsteğimiz dışında meydana gelmesi [14].

Bir aşınma sisteminde; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket unsurlarının oluşturduğu sistem 'Tribolojik Sistem' olarak adlandırılmaktadır [14].

2.1. Kayma Mesafesi ile Aşınma Hacminin ve Aşınma Yüzey Pürüzlülüğünün Değişmesi

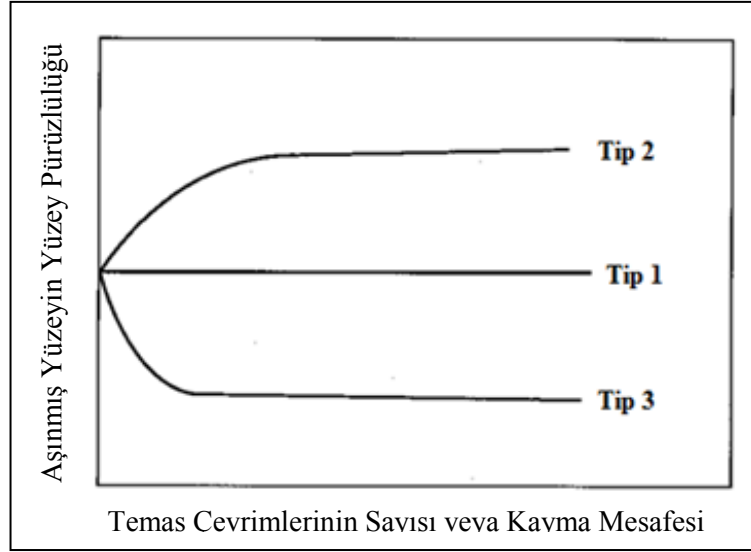
Aşınma hacmi, aşınma yüzey pürüzlülüğü ve aşınma partikül şekli bize aşınmayı karakterize ederken önemli bilgiler vermektedir. Aşınma hacmini temsil eden üç eğri Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Tip 1, tüm süreç boyunca sabit aşınma

oranını gösterir. Tip 2, başlangıçtaki yüksek aşınma hızından düşük bir oranda düzenli aşınmaya geçiş gösterir. Bu tür aşınma metallerde oldukça sık görülür. Tip 3, başlangıçtaki düşük aşınma oranından yüksek aşınma oranına yıkımsal geçişi gösterir (yorulma çatlakları gibi). Bu tür aşınma genellikle seramikte gözlenir. Yıkımsal aşınmadan önceki kayma miktarı, çatlak başlangıcının meydana geldiği periyottur ve başlangıç yüzey pürüzlülüğü, malzeme özellikleri ve sürtünme koşullarına bağlıdır [13].



Şekil 2.1. Tekrarlı temaslarda aşınma eğrilerinin üç temsilî tipi [13]

Öte yandan, aşınma yüzeylerinde pürüzlülük eğrilerinin üç temsilî türü Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Tip 1, yüzey pürüzlülüğünün başlangıç değerinden değişmediği sabit aşınma durumunu göstermektedir. Tip 2, yüzey pürüzlülüğünün belli bir değere arttığı ve orada kaldığı sabit aşınma durumunu göstermektedir. Tip 3, başlangıç sürecinde yüzey pürüzlülüğünün belirgin olarak azaldığı sabit aşınma durumunu göstermektedir. Genellikle yüzey bitirme işlemi için parlatma ve ince parlatmada görülmektedir [13].



Şekil 2.2. Tekrarlı temaslarda yüzey pürüzlülüğü değişiminin 3 temsili tipi [13]

2.2. Sürtünme ve Aşınma Kaynaklı Enerji Kayıplarının Maliyeti

Herhangi bir ulusal ekonomideki tribolojik eksikliklerin maliyeti, çoğunlukla büyük miktarda enerji ve maddi kayıpların neredeyse her mekanik aygıt üzerinde eş zamanlı olarak meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu oran tek bir makine temelinde gözden geçirildiğinde düşük olmasına rağmen aynı kayıplar milyonlarca mekanik aksam üzerinde gerçekleştiğinde çok büyük miktarlara ulaşmaktadır. 1966 yılında, Peter Jost triboloji tarafından yapılan bir araştırmada aşınmanın temel prensiplerinin uygulanması halinde İngiltere ekonomisinin yılda yaklaşık 515 milyon £ değerinde tasarruf edebileceği öne sürülmüştür. 1976'da Batı Almanya'da yapılan benzer bir çalışmada ise, 1975 yılına ait aşınma ve sürtünmenin yarattığı zarar yıllık 10 milyar DM olduğu belirtilmiştir ki bu değer Gayri Safi Milli Hasılanın %1'i olmaktadır. Bu kayıpların yaklaşık %50'si abrasif aşınma nedeniyle oluşmuştur. ABD'de ulaşım, turbo-makine, elektrik üretimi ve endüstriyel proseslerde tribolojik çözümler bulunabilirse toplam yıllık enerjinin yaklaşık %11'i kadar tasarruf edilebileceği tahmin edilmektedir. Tüm bu çalışmalar, aşınma ve sürtünme kaynaklı zararların ülkelerin ekonomilerine büyük ölçüde etki ettiğini ve tasarım esnasında uygun malzeme seçimine büyük önem verilmesi gerektiğini göstermektedir [15].

2.3. Aşınma Mekanizmasının Türleri

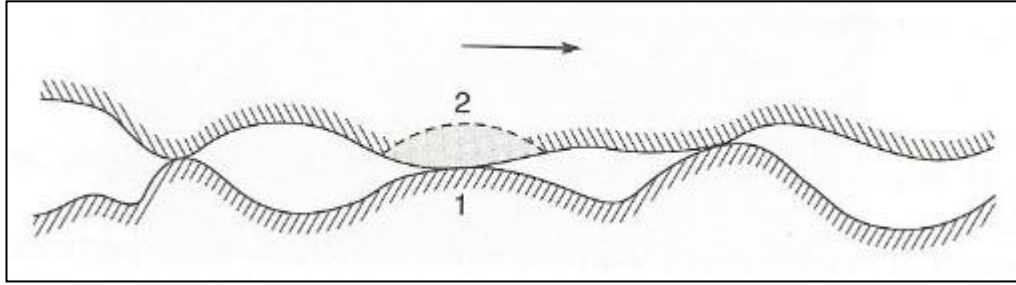
Aşınma mekanik ve/veya kimyasal yollarla gerçekleşmektedir ve genellikle sürtünme ısı ile hızlandırılmaktadır. Aşınma, sürtünme yüzeyinden katı malzeme çıkarma gibi tek bir ortak özelliğe sahip beş farklı esas içermektedir. Bunlar; adhezif, abrasif, yorulma, korozif ve erozif aşınma türleridir. Bazı tahminlere göre, endüstriyel durumlarda karşılaşılan tüm aşınmaların üçte ikisi adhezif ve abrasif aşınma mekanizması nedeniyle meydana gelmektedir. Yorulma mekanizması haricinde tüm mekanizmalarla aşınma, malzemenin aşamalı olarak çıkarılmasıyla oluşmaktadır [12].

Sözü edilen aşınma mekanizmalarının bir veya daha fazlası belirli bir makinede oluşabilir. Birçok durumda, aşınma bir mekanizma tarafından başlatılmakta ve diğer aşınma mekanizmaları ile ilerleyebilmektedir bu yüzden hasar analizini karmaşık hale getirmektedir [12].

2.3.1. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma, iki adet nominal olarak düz katı gövdenin kayma temasından oluşmaktadır. Adhezyon, ara yüzeydeki pürüzlü kontaklarda oluşur ve bu kontaklar kayma etkisi ile kesilir bu da bir parçanın bir yüzeyden ayrılmasına ve diğer yüzeyin üzerine yapışmasına neden olabilir. Kayma devam ettikçe, transfer edilen parçalar taşınacağı yüzeye aktarılabilir ve orijinal yüzeye geri transfer edilebilir veya gevşek aşınma partikülleri oluşabilir. Bazıları tekrarlanan yükleme ve yükün kaldırılması esnasında yorulma işlemi ile kırılarak serbest partiküllerin oluşmasına neden olur. Bir malzemenin bir parçasının ayrılması için birkaç mekanizma önerilmiştir. Başlangıçta kayma aşınması ile ilgili teorilerde, kesme işleminin orijinal ara yüzeyde ya da iki gövdenin birindeki en zayıf bölgede oluşabileceği öne sürülmüştür. Şekil 2.3'te bir arayüzün kesme sırasında iki kırılma (1 ve 2) olasılığını gösteren şema verilmiştir. Çoğu durumda, ara yüzey yapışma mukavemetinin çevreleyen yerel bölgelerin kopma mukavemetine kıyasla küçük olması beklenmektedir bu nedenle çoğu temasta ara yüzeyde kayma sırasında kırılma meydana gelmektedir (1) ve kayma yüzeyinde hiç aşınma oluşmamaktadır. Temasların küçük bir kesiminde, kırılma iki cisimden birinde meydana gelebilmektedir (2) ve şekildeki gölgeli bölüm,

diğer yüzeye bağlanabilmektedir. Bu transfer parçaları düzensizdir ve bloklar halinde bulunmaktadır [12].



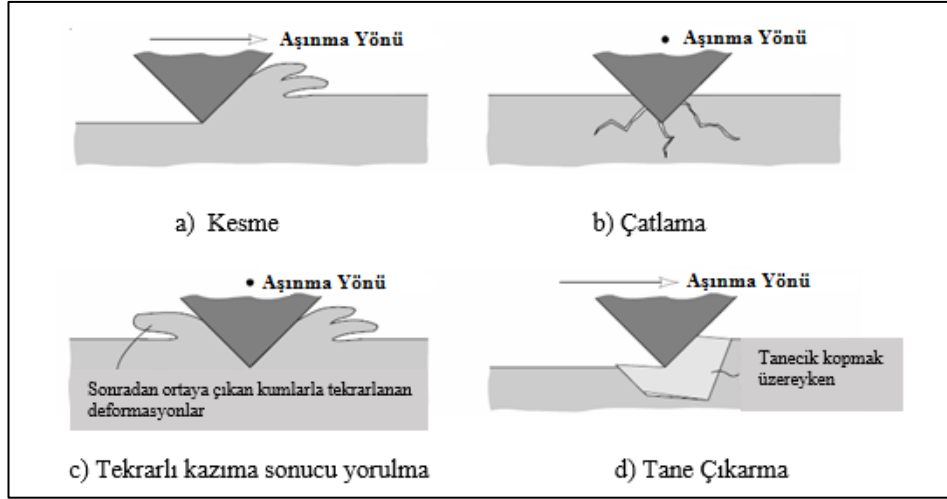
Şekil 2.3. Bir arayüzün kesme sırasında iki kırılma (1 ve 2) olasılığını gösteren şema [12]

Adhezif aşınma çoğunlukla metallerde görülmektedir. Seramiklerde ise daha az görülmektedir. Polimerlerde, eğer yük; geçiş sınırında ise adhezif aşınma meydana gelmemektedir ancak geçiş sınırından fazla ise plastik deformasyonların oluşması mümkündür ve adhezif aşınma oluşmaktadır.

2.3.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma katı bir cismin kendisiyle eşit sertlikte veya daha sert bir malzemenin partiküllerine karşı izafi hareketinde ortaya çıkmaktadır. Bu problemin en yaygın örneği, toprak kazıma makinelerindeki kepçelerin aşınmasıdır. Abrasif aşınma boyutu fark edilenden çok daha büyüktür. Herhangi bir malzeme esasen yumuşak bile olsa, eğer sert partiküller mevcutsa abrasif aşınma görülebilmektedir [15]. Sisteme dışarıdan giren toz partiküllerinin veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin neden olduğu aşınma türü bu mekanizmaya örnek olarak verilebilir [16]. Şekil 2.4'te abrasif aşınma mekanizmaları verilmiştir.

Aşağıda gösterilen ilk mekanizma Şekil 2.4 (a) kesme; keskin bir kum tanesinin veya sert pürüzün daha yumuşak yüzeyi kestiği klasik modeli temsil etmektedir. Kesilen malzeme aşınma kalıntısı olarak yüzeyden kaldırılmaktadır. Aşınmış malzeme kırılğan olduğunda, örn. seramik, yıpranmış yüzey kırılması oluşabilmektedir Şekil 2.4 (b).



Şekil 2.4. Abrasif aşınma mekanizmaları; mikro kesme, kırılma, yorulma ve tane çıkarma [15]

Bu örnekte aşınma kalıntısı yarılmaya yaklaşımın bir sonucudur. Sünek bir malzeme kör bir kum tanesiyle aşındırıldığında kesme olasılığı azdır ve aşınmış yüzey art arda deforme olmaktadır Şekil 2.4 (c). Bu örnekte ise, aşınma kalıntısı metal yorgunluğunun sonucu oluşmaktadır. Gösterilen son mekanizma Şekil 2.4 (d) tane ayrılmasını veya tane çıkarmayı temsil etmektedir. Bu mekanizma esas olarak taneler arasındaki sınırın nispeten zayıf olduğu seramikler için geçerlidir. Bu mekanizmada tüm tanecik aşınma kalıntısı olarak kaybolmaktadır [15].

Kum tanelerinin aşınmış yüzey üzerinden geçişi, abrasif aşınmanın türünü belirler. Literatür, abrasif aşınma için iki temel modu belirtir:

- İki cisimli abrasif aşınma
- Üç cisimli abrasif aşınma [15].

İki cisimli abrasif aşınma, bir zemindeki zımpara hareketi ile örneklendirilmektedir. Sert pürüzler ya da sıkı tutulan kumlar kendisinden daha yumuşak bir yüzey üzerinde kesici bir alet gibi davranarak yüzeyi çizerek tahrip eder. Sürtünen yüzeyler arasında yuvarlanan sert taneciklerin yüzeyleri çizerek tahrip etmesi şeklindeki aşınmaya üç cisimli abrasif aşınma denmektedir [15].

2.3.3. Korozif aşınma

"Korozif Aşınma" metal ya da metal alaşımlarının çevreleriyle (katı, sıvı ve gaz ortam) kimyasal, elektrokimyasal veya metalurjik ilişkileri sebebiyle, yüzeylerinde farklı yapıda tabakaların meydana gelmesi ve sürtünme hareketi ile bu tabakaların parçalanıp taşınması neticesinde meydana gelen hasardır. Korozyonun ve sürtünmenin olması korozif aşınma için gerekli şartlardandır. Sürtünmenin gaz veya sıvılı korozif etkisi yapan bir ortamda olmasıyla sürtünen yüzeylerde kimyasal reaksiyon sonucu reaksiyon ürünleri meydana gelmektedir. Bu artıklar yüzeylere çok zayıf tutunduğundan sürtünme sırasında tahrip olarak, yüzeyden taşınmaktadır. Bu olay sürekli tekrarlanır. Reaksiyon ürünleri ortamın bileşimiyle ilişkilidir. Normal havada bulunan O_2 ve H_2O buharı yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerek oksit ve hidroksit oluştururlar. Endüstriyel ortamlarda bulunan CO_2 , SO_2 , H_2S , NH_3 ve NO_2 gazları havadaki nemle birleşerek asitleri, asitler de metal yüzeylerle reaksiyona girerek ilgili bileşiklerini oluştururlar. Sonuçta böyle bir ortamda korozif aşınma oldukça hızlı gelişir. Ayrıca içinde erimiş olarak O_2 ve CO_2 gibi korozif etki yapan gazları içeren sıvı ortamlarda da bu tip aşınma görülmektedir. Yağlarda erimiş olarak bulunan korozif elementler zamanla çözünerek, yağların kalitesine etkide bulunurlar ve neticede korozif aşınmayı hızlandırırlar [17,18].

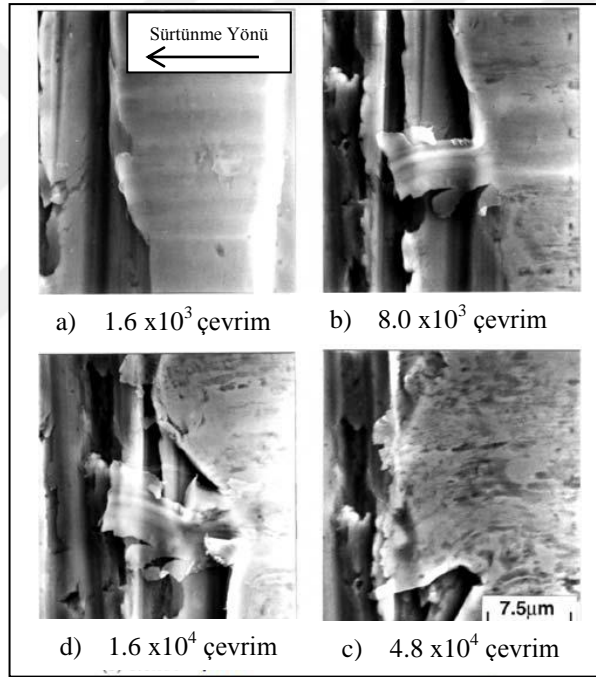
2.3.4. Yorulma aşınması

Adhesif ve abrasif aşınmada aşınma partiküllerinin üretimi için tekrarlı temaslar gerekli değildir. Fakat aşınma partikülleri üretmek için belirli sayıda tekrarlanan temasın gerekli olduğu başka aşınma mekanizmaları da vardır. Bu temas çevrimlerinden sonra oluşan aşınmaya yorulma aşınması denmektedir. Temas çevrimi sayısı yüksek olduğunda, yüksek çevrimli yorulma aşınması, çevrimi sayısı düşük ise düşük çevrimli yorulma aşınması olması beklenir [13].

Yorulma aşınması temas yüzeylerinde çok küçük çukurcuklar oluşturur ve özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında kendini gösterir. Bu gibi dönen yapı elemanlarında parçalar arası elastik bir temas söz konusudur [17].

Dönen yapı elemanları için genellikle parçalar arasında elastik bir temas söz konusudur. Temas noktasında, ana aşınma mekanizması yüksek çevrimli yorulma aşınmasıdır. Söz konusu temas altında ortaya çıkan gerilme, malzemenin akma dayanımından yüksek olmamasına rağmen, temas noktasındaki boşluk ve tane sınırı nedeniyle yerel olarak akma dayanımından yüksek gerilmeler oluşabilmektedir. Bu durumlarda, düşük çevrimli yorulma aşınması meydana gelebilmektedir [17].

Eğer, iki malzeme arasında plastik bir temas söz konusu ise, yorulma aşınması pullaşma olarak kendini gösterebilmektedir. Bu tip aşınma, yapı üzerinde tek bir çevrimde meydana gelmemekte, aşınmanın oluşabilmesi için Şekil 2.5'te gösterildiği gibi tekrarlı bir çevrim olması gerekmektedir [13].



Şekil 2.5. Çelik için devamlı kayma sırasında oluşan yorulma aşınması [13]

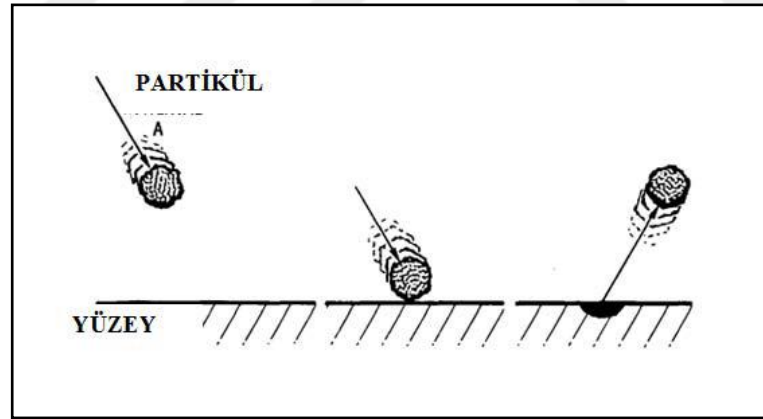
2.3.5. Eroziyon aşınma

Erozyon; rejeneratörler, helikopter rotor kanatları, rafineri ve gaz türbinleri gibi birçok mühendislik uygulamalarında ciddi bir malzeme aşınma problemidir. Bir sıvı ya da gaz akımıyla taşınan çeşitli boyutta ve yapıdaki partiküllerin katı yüzey üzerinde oluşturdukları hasar, erozyon aşınması olarak bilinmektedir. Şekil 2.6'da bu mekanizma şematik olarak görülmektedir [18]. Eroziyon aşınma gaz türbin bıçakları,

pompa pervaneleri gibi birçok alanda ortaya çıkabilmektedir [15]. Eroziyon aşınmayı başlatmak için çarpma enerjisi veya kinetik enerji gerekmektedir. Bu aşınma mekanizması temelde üç tip olarak sınıflandırılmaktadır; katı partikül erozyonu, sıvı erozyon ve kavitasyon erozyonu. Katı partikül erozyonu ise kendi içinde iki sınıfa ayrılmaktadır ve bunlar gaz-katı ve çamur erozyonlarıdır. Gaz-katı erozyonda katı partikül gaz ile süspansiyon edilirken çamur erozyonunda katı partiküller sıvı ile süspansiyon edilmektedir [18].

Katı-sıvı karışımı akışı ekipmanların/bileşenlerin aşınmaya maruz kalmasına ve ömürlerinin kısalmasına neden olmaktadır. Çamur erozyonu problemi, petrokimya endüstrisi, hidrolik ve termik santral, çamur taşıma ve taşıma ekipmanları, kömür sıvılaştırma işlemleri gibi birçok endüstriyel uygulamada ortaya çıkmaktadır; bu nedenle, katı-sıvı taşıma sisteminin tasarımı ve seçimi için çamur erozyon aşınmasının dikkate alınması gereklidir [18].

Erozyon aşınması, etkileyen parametrelerin düzenlenmesi veya kontrol edilmesi ile minimize edilebilen karmaşık bir olaydır [18].



Şekil 2.6. Eroziyon aşınma mekanizması [15]

Katı partikül nedeniyle oluşan aşınma; darbe açısı, katı konsantrasyon, darbe hızı ve partikül boyutu gibi parametrelerin kontrol edilmesiyle minimuma indirilebilmektedir [18]. Eroziyon aşınma, partikülün çarpma açısı, çarpma hızı ve partikül boyutu gibi birçok parametreye bağlıdır. Partikül katı ve sert halde ise abrasif aşınmaya benzer bir yapı meydana gelebilirken, partikül bir sıvı ise parça erozyona uğrar. Partikülün çarpma açısı, düşük ise abrasif aşınmaya benzer bir yapı görülürken, çarpma açısı yüksek ise malzeme yüzeyinde erozyon görülür [15].

Partikül düşük bir hızla yüzeye çarparsa, yüzeyde plastik deformasyon oluşturacak bir gerilme oluşmaz ve neticede statik yorulma oluşur. Fakat yüksek bir hızla çarparsa, yüzeyde plastik deformasyon oluşur. Hatta çok yüksek çarpma hızlarında, yüzeyde kısmi ergime meydana gelebilir. Partikül sertliğinin erozif aşınma üzerinde etkisi büyüktür. Sert partiküller, yumuşak partiküllere göre daha fazla aşınmaya sebep olmaktadır. Öte yandan, partiküllerin keskinliği de aşınma hızını arttırabilen bir etkidir [15].



3. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Katı partikül erozyonu; sıvı darbe erozyonu, çamur erozyonu ve kavitasyon erozyonu gibi diğer erozyon biçimlerinden farklıdır. Katı partikül erozyonuna bağlı yüzey üzerinden malzemenin kaldırılması, birbirinden bağımsız ancak benzer çarpım olaylarının bir sonucudur. Bu nedenle sert partiküller ile bileşen yüzeyleri arasındaki temas çok kısa sürede gerçekleşmektedir. Bu açıdan bakıldığında erozyon; kayma aşınması, abrazyon, taşlama ve makine ile işleme gibi alet/aşındırıcı ve hedef/iş parçası arasındaki temasın kesintisiz olduğu diğer yakın süreçlerden tamamen farklıdır. Oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta katı partikül erozyonu sebebiyle malzemelerin bozunması Tablo 3.1’de gösterildiği gibi çok sayıda çeşitli mühendislik endüstrisinde karşılaşılmaktadır [19].

Tablo 3.1. Katı partikül erozyonuna maruz kalan bileşen örnekleri [19]

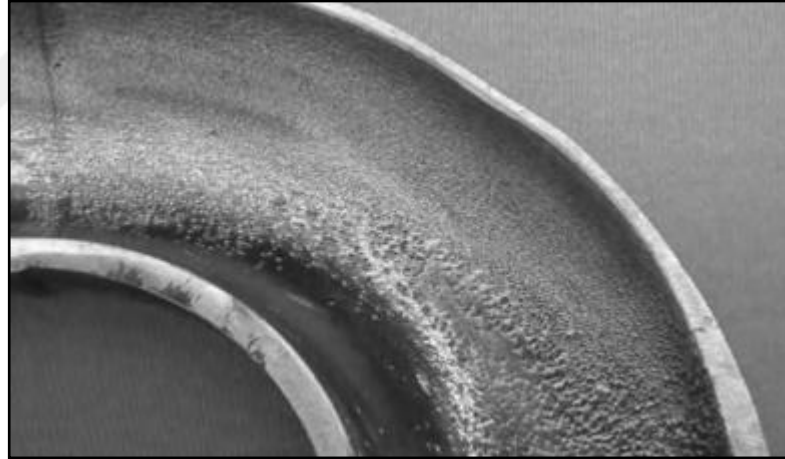
Sistem	Bileşenler
Kimya tesisi	Bir hava akımında aşındırıcı malzeme taşıyan taşıma tüpleri
Hidrolik maden makinaları	Pompalar ve valfler
İtici sistem	Roket motorları nozulu, silah namlusu
Yanma sistemi	Yakıcı memesi, ara ısıtıcı, süper ısıtıcı, ekonomizör boru banklar
Akışkan yataklı yakma	Kazan ısı eşanjör tüpleri, boru bankları ve genişletici türbin
Kömür gazlaştırma	Türbin, kilitli hazne valfleri
Kömür sıvılaştırma	Ürün sisteminin akışını engelleyen valf
Uçak motoru	Kompresör ve türbin kanatları
Helikopter motoru	Rotor ve gaz türbini kanatları

Şekil 3.1'de bir maden pompasının çarkında meydana gelen erozif aşınma gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Bir maden pompasının çarkındaki erozif aşınma [20]

Şekil 3.2 'de petrol boru hattında oluşan erozif aşınma örneği gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Petrol boru hattındaki erozif aşınma [20]

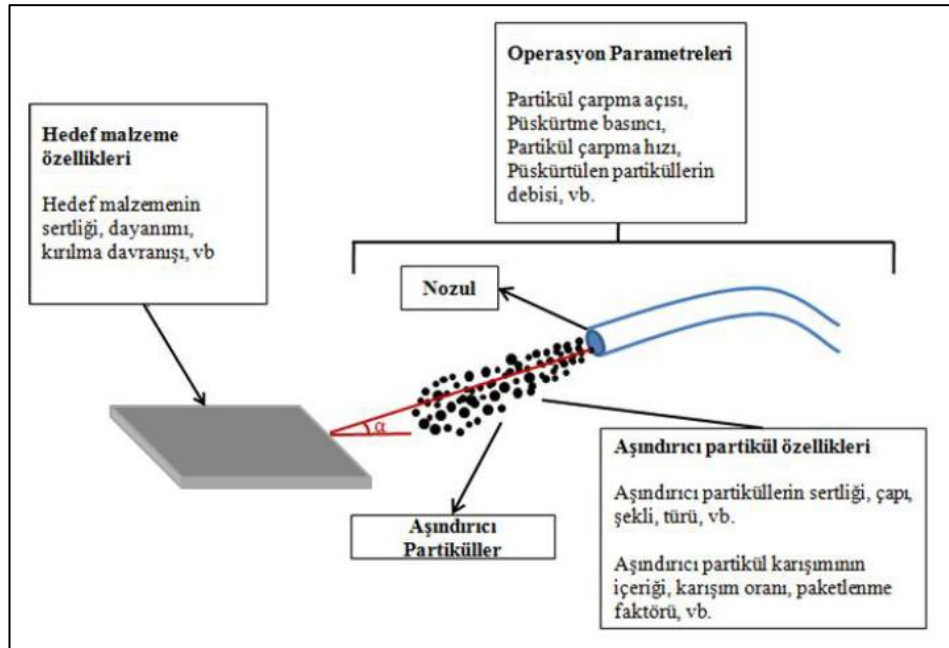
Katı partikül erozyonu mekanizması olumsuz ortam koşulları sonucunda makine ve komponentlerinin işlevini olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte erozyon prosesi, dökümlerin kum püskürterek temizlenmesi, sert ve gevrek malzemelerin aşındırıcı jetlerle kesilmesi ve kaya delinmesi işlemleri gibi birçok durumda avantajlı olarak kullanılabilir. Dolayısıyla, erozyonun teknolojik ve ticari önemi de göz ardı edilemez [19].

Malzemelerin küçük katı partikül erozyonu, bir yüzeyden mikromekanik deformasyon/kırılma işlemi ile malzeme çıkarılmasıyla oluşmaktadır. Sünek

malzemelerde aşındırıcı partiküller, deforme olmuş malzemedeki bozulmalar meydana getiren şiddetli ve bölgesel plastik gerilmeye neden olmaktadır. Kırılgan malzemelerde ise aşındırıcı partiküllerin kuvveti, mikro boyutlu parçaların çatlamasına ve parçalanmasına neden olmaktadır. Bu iki mekanizma küçük katı partikül erozyonunun özüdür. Partiküller genellikle 5 mm çapında veya daha küçüktür ancak çok daha büyük de olabilir ve neredeyse saniye başına binlerce metreye kadar değişen hızlarda hareket edebilirler [21].

3.1. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Faktörler

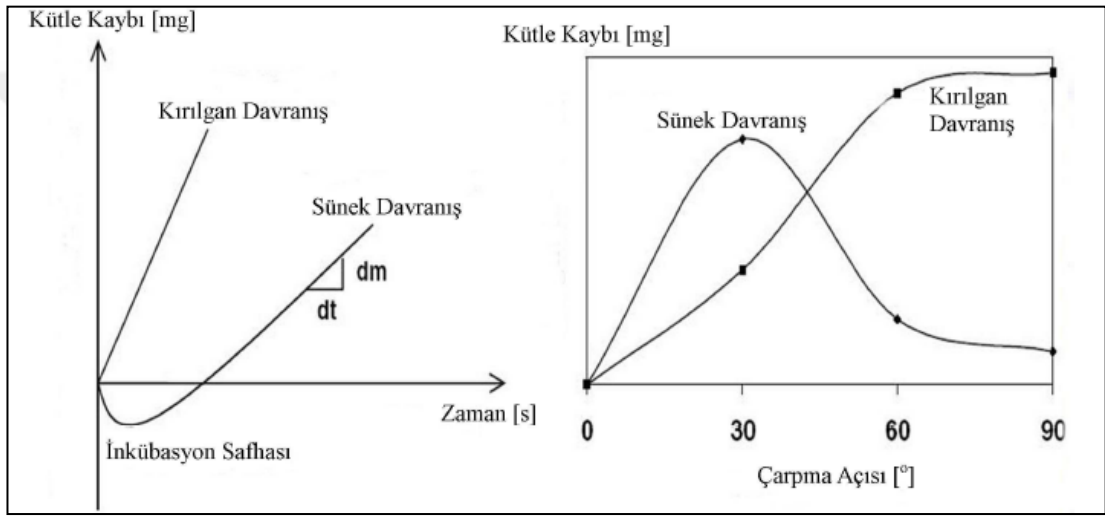
Katı partikül erozyonu ile oluşan değişimler çeşitli faktörlere bağlıdır. Aşındırıcının fiziksel ve kimyasal karakteristiği erozyon aşınması için önemli bir faktör olup, aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı, boyutu, karışım oranı, hızı, kütleli debisi gibi faktörler de katı partikül erozyonunda kritik parametrelerdir. Bununla birlikte hedef malzemenin özellikleri ve yapısı (boyut, yüzey, sertlik v.b) son derece önemlidir. Şekil 3.3'te katı partikül erozyonuna etki eden parametrelerin şematik görseli sunulmuştur.



Şekil 3.3. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler [6]

3.1.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı

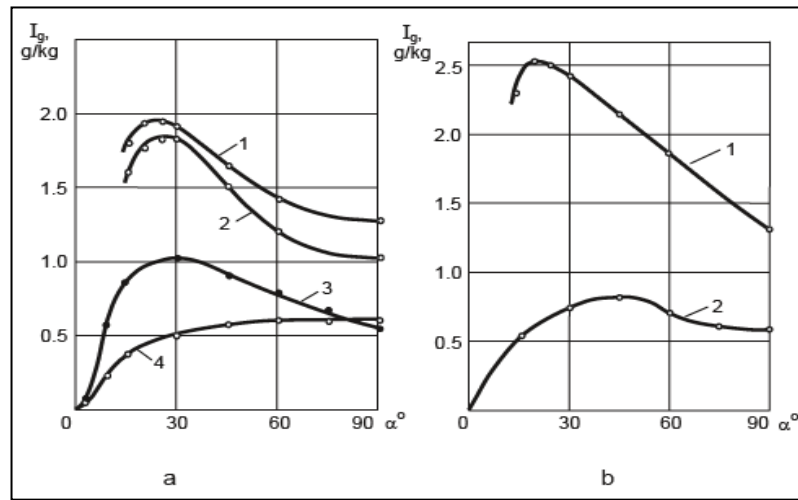
Aşınma oranını etkileyen parametrelerden bir tanesi, partiküllerin hız vektörü ile hedef yüzey arasındaki açıdır (α). Araştırmacılar farklı test cihazları türlerini kullanmış olmalarına rağmen, α 'nın etkisi konusunda tek bir maksimuma sahip benzer eğriler elde edilmiştir [16]. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi gevrek malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açıları meydana gelirken, sünek malzemelerde maksimum malzeme kaybının düşük çarpma açıları ($\sim 30^\circ$) ortaya çıktığı görülmektedir [22].



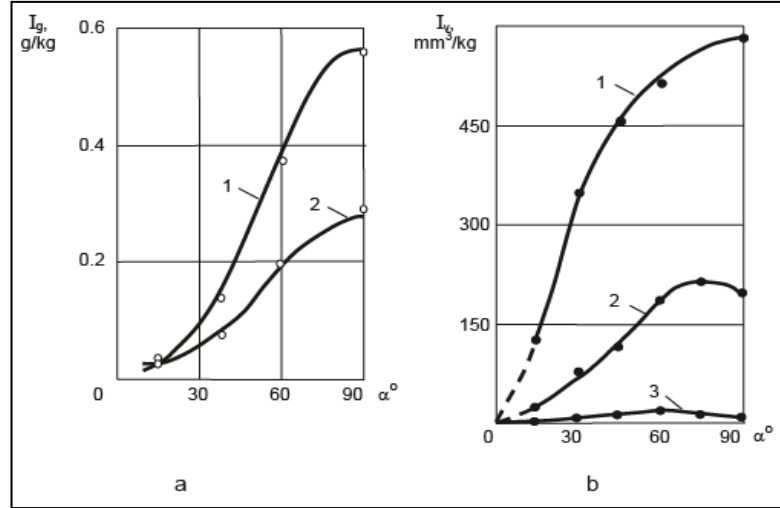
Şekil 3.4. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [22]

Bir vakum cihazı VK-1 üzerinde test edilen çelik eğrileri Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekil 3.5 (a)'daki grafikte; 1. 2. ve 3. eğriler yumuşak çeliğin farklı aşındırıcı partiküller altındaki aşınma oranını gösterirken 4. eğri sertleşmiş çeliğin aşınma oranını göstermektedir. Bu grafikte yumuşak çeliğin aşınma oranının, 17° ila 45° arasında, sertleşmiş çeliğin ise 60° – 90° arasında değişen darbe açıları maksimuma ulaştığını göstermektedir. 1. 2. ve 3. eğrilere bakıldığında, belirli bir darbe hızında, yumuşak çeliğin maksimumu öncelikli olarak partiküllerin şekline göre belirlenmektedir. Şekil 3.5 (b)'deki eğriler ise yumuşak çeliğin keskin kenarlı ve küresel aşındırıcı partiküller altındaki aşınma oranını göstermektedir. Partiküller ne kadar keskinleşirse eğrinin maksimuma ulaştığı darbe açısı daha küçük olmaktadır. Eğrinin şekli, aşınma hızının maksimum değeri ile normal darbedeki ($\alpha = 90^\circ$) değer arasındaki oran ile de gösterilmektedir, daha yuvarlak partiküller daha düz eğrinin oluşmasına neden olmaktadır. Böylece, Şekil 3.5 (b)'ye göre, keskin dökme

demir partikülleri için bu oran 1,9 iken, küresel partiküller için sadece 1,4'tür. Aşınma göz önüne alındığında, iki bileşenden, yani, yüzey boyunca ve yüzey karşısında hareket eden hız bileşenlerinden kaynaklandığı açıklanabilir. Bu yaklaşımı öne süren ilk kişiler Wellinger ve Uetz'dir. Bitter ve ardından Beckmann ve Gotzmann erozyon teorisinin geliştirilmesinde başarılı bir şekilde katkıda bulunmuşlardır. Bu nedenle, yumuşak ve plastik malzemelerde, keskin kenarlı partiküllerin yüzey boyunca hareket eden kesici bileşenin rolü önemli iken, sert ve gevrek malzemeler için yüzeye çapraz olan etki bileşeni baskın bir etkiye sahiptir. İkinci teori, saf metaller için Tadolder tarafından elde edilen verilerde de kanıtlanmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen bir tablo, Tablo 3.2'de sunulmuştur. Maksimum aşınma oranına ek olarak, tablo, eğrinin düzgünlüğünü belirten bir oran "k" verir ve maksimum aşınma oranının, $\alpha = 90^\circ$ 'de aşınma oranı değerine bölümü olarak bulunur. Metalik olmayan gevrek malzemeler için maksimum aşınma hızı genellikle normal darbeye görülür ($\alpha = 90^\circ$); sadece son derece ince taneli aşındırıcı erozyon sürecinde küçük açılarla değişebilir. Sertleştirilmiş çeliklerde de böyle bir azami bir değişim gözlemlenmiştir. Gevrek malzemeler için aşınma eğrileri örnekleri Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Şekil 3.6 (a)'da farklı iki gevrek malzeme kuvars kumu ile aşındırılmış ve maksimum aşınmanın normal darbeye ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Şekil 3.6 (b)'de de 1750 HV sertliğinde bir gevrek malzeme farklı çaplara sahip kum tanecikleri ile aşındırılmıştır ve partikül boyutu arttıkça aşınma oranının arttığı görülmüştür [23].



Şekil 3.5. Aşınma oranının (I_g) partiküllerin çarpma açısıyla (α) bağlantısı (partiküllerin çarpma hızı $v_0 = 120$ m/s, çapı 0,4 -0,6 mm) [23]



Şekil 3.6. Gevrek malzemelerin aşınma eğrileri [23]

Tablo 3.2. 80 m/s darbe hızında çeşitli aşındırıcılar kullanıldığında maksimum aşınma oranının yeri ve "k" oranı [23]

Metal	Pb	Sn	Cd	Al	Zn	Cu	Ni	Fe	Ti	Nb	Co	Mo	W
HV	4,5	11	20	24	35	86	97	120	160	171	196	248	496
α_{\max} kuvars kumu	20°	50°	20°	20°	45°	30°	40°	40°	60°	45°	75°	50°	75°
"k" oranı	3,5	1,5	3,1	4,1	2,8	2,4	1,8	1,7	1,2	1,7	1,2	1,3	1
α_{\max} cam tanesi	20°	40°	15°	20°	20°	20°	30°	30°	40°	40°	60°	30°	75°
"k" oranı	2,3	1,5	2	2,7	1,8	1,6	1,5	1,6	1,2	1,4	1,3	1,4	1,4

3.1.2. Aşındırıcı partiküllerin hızı

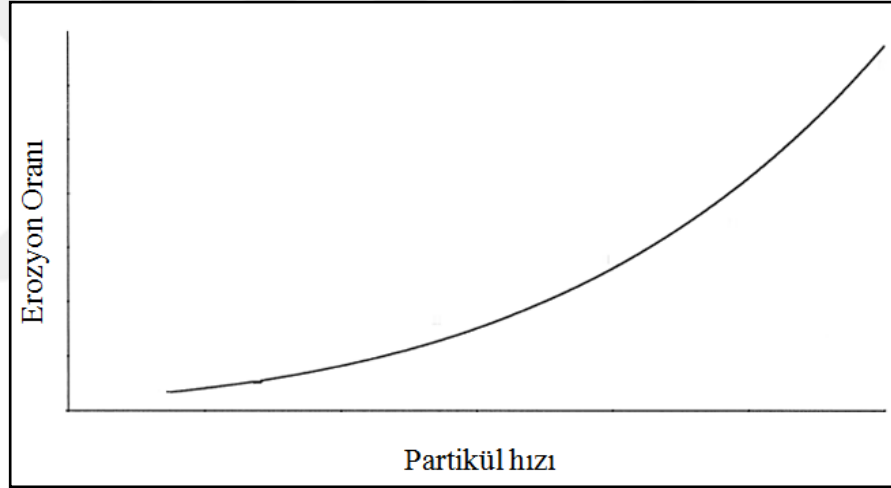
Aşındırıcı partiküllerin hızı aşınma sürecini oldukça güçlü etkileyen bir parametredir. Eğer hız çok düşük ise çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon meydana gelmesi için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder. Hız arttığında, hedef malzemede partikülün çarpmasına bağlı plastik deformasyon görülebilir. Aşınma, tekrarlı plastik deformasyonların etkisi ile oluşmaktadır. Kırılgan aşınma davranışında, aşınma alt yüzey kırılması şeklinde oluşmaktadır. Çok

yüksek çarpma hızlarında, darbeye maruz kalan bölgede ergime meydana gelebilir [15].

Orta hızdan yüksek hızlara doğru gidildikçe çarpma hızı ile aşınma oranı arasındaki ilişki Denklem (3.1)'de verilen güç kanunu ile açıklanabilir;

$$-\frac{dm}{dt} = kv^n \quad (3.1)$$

Bu denklemde 'm' aşınan numunenin kütesini, 't' işlemin devam etme süresini temsil etmektedir. Denklemdeki 'k' deneysel bir sabit olup, 'v' hız değeridir. 'n' üssünün değeri aşındırıcı ve hedef malzemenin karakteristik özellikleri ile tanımlanır [15]. Şekil 3.7'de partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi [24]

3.1.3. Aşındırıcı partiküllerin boyutu

Aşındırıcı partikül boyutunun aşınma üzerindeki etkisini belirlemek için birçok araştırmacı çalışmalar yapmıştır. Araştırmacılardan bazıları aşınma tahmininde korelasyonlar önermişlerdir [25].

Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde genellikle aşınmanın partikül boyutundaki artışla birlikte arttığı gözlemlenmektedir. Bu korelasyonların geliştirilmesinde veya uygulanmasında karşılaşılan en büyük zorluklardan biri etkin partikül boyutunun kullanılmasıdır. Birçok araştırmacı, Denklem (3.2)'deki gibi bir

kuvvet yasası ilişkisi geliştirmek için dar boyut aralığında toplanan partiküllerin ortalama boyutunu kullanmıştır [25];

$$\text{Aşınma oranı} = (\text{Partikül boyutu})^n \quad (3.2)$$

N üssünün değeri 0,3-2,0 aralığında değiştiği rapor edilmiştir. Bu üssün geniş aralığı, malzeme özelliklerinde, deney koşullarında, partikül boyutunda ve boyut dağılımlarındaki farklılıklara göre tanımlanmıştır [25].

Aşındırıcı partikül boyutlarına bağlı olarak değişen aşınma mekanizmaları incelendiğinde; küçük partikül boyutlarında malzemede hasarın mikro kesme mekanizması ile oluştuğu, büyük partikül boyutlarında ise hasarın mikro çatlama ve mikro kırılma mekanizmaları ile oluştuğu belirlenmiştir. Eğik açılı partikül erozyonunda gevrek malzemelerin yüzeylerinde radyal çatlaklar meydana gelmektedir [17, 26]. Malzemelerde radyal çatlak meydana gelmesi aşınma prosesini hızlandırmakta ve malzeme kaybını arttırmaktadır. Aşındırıcı partikül boyutlarının arttırılması ile malzemede daha derin radyal çatlakların meydana geldiği ve aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir [17, 27].

3.1.4. Aşındırıcı partiküllerin debisi

Aşındırıcı partiküllerin akış debisi (birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı partikül kütlesi) erozyon aşınmasını etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Teoride bütün aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye aynı açıyla ve hızla çarptıkları kabul edildiğinden aşınma miktarının aşındırıcı partiküllerin debisinden bağımsız olması beklenir ancak pratikte ölçülen aşınma miktarında aşındırıcı partikül debisinin önemli etkileri vardır. Erozyon aşınma miktarının akış debisi ile belirli bir akış oranı limit değerine kadar doğru orantılı olduğu rapor edilmiştir. Bu limit değer, hedef malzeme üzerine gelen ve geri seken aşındırıcı partiküller arasındaki girişimin sonucudur. Bu etki, malzeme yüzeyine çarpanların önceki partikülleri erozyon sürecinden uzaklaştırdığı birinci sırada partikül çarpma modeli ile rasyonalize edilmiştir. Bu çarpışma teorisi küçük değerli debi değerlerinde bile önemli rol oynayabilir. Partikül akış oranı sınırı elastomerler için 100 kg/m² gibi düşük bir değer olabilirken büyük ve hızlı partiküller ile metallerde oluşan erozyon için 1000

kg/m² gibi büyük bir değer olabilmektedir. Bu sınır değeri geçildiğinde aşınma oranı çok az düşmektedir [28].

Aşındırıcı akış debisinin etkisi yukarıda bahsedilenler etkileşimlere dayandırılrsa da, değişik mekanizmaların oluşması da mümkündür. Akış debisi arttığı zaman, ilgili yüzey üzerine partiküllerin çarpma zamanı azalacaktır ve bir sonraki çarpmadan önce bozulma reaksiyonu için az zaman kalacaktır. Böylelikle bozulmanın derecesi ve erozyon aşınması miktarı düşecektir [28].

Yukarıdaki analizlerden; seçilen malzemenin erozyon davranışını etkilememesi için çevresel bozulma etkileri ve partikül etkileşimini ortadan kaldıracak optimize bir debi miktarı seçilmelidir sonucu çıkmaktadır [28].

3.1.5. Aşındırıcı partiküllerin karışım oranı

Erozif aşınma mekanizması incelenirken çoğunlukla tek boyutta partiküllerin etkisi göz önüne alınmıştır ancak pratikte erozif aşınmanın farklı boyutlardaki partiküller etkisinde gerçekleşmesi mümkündür. Erozif aşınmayı etkileyen parametrelerden biri olan partiküllerin karışım oranı üzerinde yapılan çalışma sayısı az olmakla birlikte yapılan çalışmalar araştırıldığında; karışım içerisindeki yüksek aşınmaya neden olan partikül oranının artması karışımın aşınma performansını arttırdığı sonucu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte yapılan çalışmalar partikül karışımlarının aşınma performanslarının, partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumuna göre düşük olduklarını göstermektedir [17, 28].

3.1.6. Hedef malzeme özellikleri

Hedef malzemenin karakteristik özellikleri aşınmaya büyük ölçüde etki etmektedir. Aşınma mekanizması birçok parametreye bağlıdır ve aşınan malzemenin aşınma karakteristiğini net bir şekilde belirlemek amacıyla malzemelerin diğer parametreler (aşındırıcı partikülün hızı, debisi, karışım oranı, çarpma açısı vb) altında aşındırılması gerekmektedir. Hedef malzemenin kırılma davranışı, sertlik, tokluk, modül gibi parametreler etkin aşınma mekanizmasını belirleyen önemli faktörlerdir [17].

Yapılan deneysel çalışmalar araştırıldığında, sünek malzemelerin maksimum aşınma oranına düşük açılarda ($30^{\circ} \sim 45^{\circ}$) ulaşıkları görülmektedir. Sünek malzemelerde aşınma oranı yüksek açılarda büyük ölçüde azalmaktadır. (60° , 75° ve 90°). Bununla birlikte kırılğan malzemelerde, erozyon hasarı genellikle normal çarpışmada, yani 90° çarpma açısında meydana gelmektedir [29].



4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde alüminyum alaşımlarında erozif aşınma davranışını etkileyen çeşitli parametreler hakkında literatür araştırılması yapılmıştır.

4.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

K. Elleuch, S. Mezlini, N. Guermazi ve Ph. Kapsa yaptıkları deneysel çalışmalarda, farklı alüminyum esaslı alaşımların (tavlanmış 5xxx, H24 ile temperlenmiş 5xxx, 7xxx-T4 ve 7xxx-T6) aşındırıcı kum partikülleri ile temas halindeki aşınma davranışını analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmada aşındırıcı partikül tipi, partikül çarpma açısı ve hareket mesafesinin aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Keskin köşeli standart ocak kumu yerine keskin köşeli olmayan normalize edilmiş aşındırıcı kum ile test yapıldığında, aşınma hızının da arttığını tespit etmişlerdir. Bu durumun test esnasında keskin köşeli standart ocak kumunun hızlı bir şekilde parçalanarak dağılmasından kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Ancak sertlik ve aşınma oranı arasında bir korelasyon tespit edememişlerdir. 5xxx alüminyum alaşımına işleme sertleşmesi uygulanmasının, aşınma direncini iyileştiremediğini, 7xxx alüminyum alaşımına uygulanan ısı işleme sertleşmesinin aşınma direncini arttırabildiğini gözlemlemişlerdir. Ek olarak, kimyasal bileşimin, malzeme aşınma direncini tanımlamak için sertlikten daha önemli olabileceğini; aynı sertlikteki, Al-Zn-Mg alaşımının, Al-Mg alaşımından daha iyi bir aşınma direncine sahip olduğunu yaptıkları çalışmalar sonucunda belirtmişlerdir [30].

4.2. Aşındırıcı Partikül Boyutu Etkisi

Girish R. Desale, Bhupendra K. Gandhi, S.C. Jain tarafından yapılan deneysel çalışmalarda partikül boyutunun alüminyum alaşımının (AA6063) erozyon aşınması üzerindeki etkisi, bir çamur erozyonu test cihazında test edilmiştir. Boyutları 37,5 ile 655 µm arasında değişen sekiz farklı büyüklükte kuvars partikülleri kullanılmıştır. Aşınma numuneleri, 30° ve 90°'lik partikül çarpma açısı ile %20 konsantrasyonlu

kum-su karışımında 3 m/s partikül çarpma hızında pota içinde döndürülmüştür. Gerçekleştirdikleri deneyler sonrasında erozyon aşınmasının ortalama partikül büyüklüğünün artışıyla arttığını gözlemlemişlerdir [25].

Gandi ve Borse katı-sıvı karışımındaki katı partikül boyutu geniş bir aralıkta değiştiğinde aşınmayı değerlendirmek için ortalama partikül büyüklüğünün yerine kütle ortalama partikül boyutunu kullanmayı önermiştir [31].

Sabit katı konsantrasyonda partikül boyutundaki artış, karışımdaki askıda duran partikül sayısını azaltmakta aynı zamanda partikül çarpması başına kinetik enerjiyi arttırmaktadır. Bu nedenle partikül boyutundaki artışla aşınmanın artması genellikle erozyon için mevcut olan enerjideki artışa bağlanmaktadır [32].

Clark, partikül boyutunun çarpıcı verimlilik ve darbe hızı üzerindeki etkisini partiküllerin aşınma numuneleri üzerindeki etkisiyle oluşan kraterleri ölçerek araştırmıştır. Çarpıcı etkinliğin ve darbe hızının partikül boyutundaki azalma ile keskin bir şekilde azaldığını bildirmiştir [33].

Lynn ve arkadaşları küçük boyutlu partiküllerin daha çarpıcı etkinliğe sahip olduğunu ve çarpma esnasında daha büyük boyutlu partiküllerle karşılaştırıldığında daha düşük kinetik enerjiyi dağıttığını ve bu nedenle küçük boyutlu partiküllerin daha az aşınmaya neden olduğunu gözlemlemiştir. Daha zayıf partiküllerin yıpranması ve küçük boyutlu partiküllerin aşınmış yüzeyde tutunması, gelen parçacığın kinetik enerjisini düşürdüğü ve aynı zamanda uzun vadede erozyonda azalma meydana getirdiği bildirilmiştir [32].

Clark ve Wong, partikül boyutunun azaltılmasının erozyon üretmek için mevcut olan enerjiyi azalttığını ve küçük boyutlu partiküllerin etkisinin, düşük kinetik enerjisinden dolayı erozyon başlatmak için yeterli olmayabileceğini gözlemlenmiştir [34].

Clark ve Hartwich çelik ve siyah silisyum karbür partiküllü çelik için erozyon aşınma hızlarının değiştiği kritik partikül boyutunu 100µm olarak bildirmişlerdir. Kritik partikül boyutu sırasıyla sıvı elastomer, kauçuk ve poliüretan için Iwai ve Nambu tarafından 208µm, 91µm ve 42µm olarak gözlenmiştir. Partikül boyutlarının

kritik büyüklüğün üstünde artmasının erozyon hızını monoton olarak 415µm boyutuna kadar arttırdığını ve bunun aşılması durumunda aşınmanın partikül boyutundan bağımsız olacağını bildirmişlerdir [35].

Benzer şekilde, Stack ve Pungwiwat, erozyon hızının partikül boyutundaki artışla birlikte sürekli olarak artmadığını bildirmiştir. Onlara göre, partikül boyutunun neden olduğu aşınma partikül şekli ve darbe hızı ile değişmektedir. Bu olguyu, sıvı dinamik etkilere, diğer bir deyişle, farklı ebattaki partiküllerin süspansiyonunun karmaşık davranışlarına bağlamaktadırlar [36].

4.3. Partikül Sertliği ve Şekil Faktörü

J. E. Talia, Y. A. Ballout, R. O. Scattergood deneysel çalışmalarında saf Al ve Al-12Si alaşım yüzeylerinde oluşan dalgalanmayı incelemişlerdir. Basınçlı hava ile hızlandırılan sistemde aşındırıcı partikül olarak keskin köşeli alüminyum oksit ve küresel cam boncuklar kullanmışlardır. Farklı aşındırıcı partikül şekli, darbe açısı ve aşındırıcı partikül karışımları ile aşındırma işlemi yapmışlardır. Etkilenen yüzeylerin morfolojisini incelemek için taramalı elektron ve optik mikroskobu kullanılmış ve aşındırıcı olarak kullanılan küresel cam boncuklar ile Al-12Si üzerinde dalgalanma oluşumu gözlemlemişlerdir. Cam boncuklar ile karıştırılmış keskin köşeli alümina oranı arttıkça, Al-12Si üzerinde dalgalanma oluşumunun azaldığı tespit edilmiştir. Aşınmış numunelerin yüzey morfolojisinin araştırılması, dalgalanma mekanizmasının malzeme çıkarılması yerine malzeme yer değiştirmesine yani plastik deformasyona dayalı oluştuğuna kanıt sağlamıştır [37].

4.4. Partikül Çarpma Açısının Etkisi

C.K. Fang ve T.H. Chuang, 6063 alüminyum alaşımına silisyum karbür püskürterek bağlı nemin erozyona olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bununla birlikte çarpma açısının ve partikül büyüklüğünün, hedef malzeme üzerinde meydana gelen aşınmaya etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneyler kapsamında aşınacak numune yüzeyinden 20 mm uzaklıkta bir nozul yardımıyla çeşitli çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) erozif aşınma deneyini gerçekleştirmişlerdir. Maksimum aşınma oranı 30°'de meydana gelerek, çarpma açısı arttıkça aşınma oranında azalma gözlemlemişlerdir [38].

A.P. Harsha ve D. K. Bhaskar yaptıkları çalışmada demir ve demir dışı malzemelerin (alüminyum, düşük karbonlu çelik, paslanmaz çelik, pirinç, dökme demir, bakır) erozyon davranışını araştırarak Hutchings'in normal ve eğik darbe açıları için geliştirdiği erozyon modelini incelemiştir. Bu amaç doğrultusunda demir ve demir dışı malzemelerin erozyon çalışmaları farklı darbe açıları (15°, 30°, 60°, 90°) ve darbe hızlarında (24–52 m/s) gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda bütün malzemelerde en yüksek erozyon oranının yüksek hızlarda ve 60° partikül çarpma meydana geldiğini tespit etmişlerdir [39].

Y. W. Shin, G. A. Sargent ve H. Conrad yaptıkları deneysel çalışmada Al, Si ve Al-Si alaşımlarının 40µm boyutunda Al₂O₃ aşındırıcı partiküller kullanarak erozyon davranışlarını incelemiştir. Al ve Al-Si alaşımı farklı çarpma açıları sünük aşınma davranışı sergilerken, saf Si gevrek aşınma davranışı sergilemiştir. Saf Al'in aşınmış yüzeyinde, kraterler, kıvrımlar, üstüste çakışmalar tespit edilirken; Saf Si yüzeyinde çarpma alanında karmaşık radyal ve yatay çatlaklar tespit edilmiştir. 10° ile 90° çarpma açısı aralığındaki maksimum aşınma oranı Al ve Al-Si için 20°de meydana geldiğini gözlemlemiştir [40].

4.5. Partikül Çarpma Hızının Etkisi

K.S. Tan, R.J.K. Wood, K.R. Stokes deneysel çalışmalarında çamur erozyonu yöntemi ile erozif aşınma davranışını HVOF (High Velocity Oxy Fuel) püskürtülmüş alüminyum bronz kaplamalar üzerinde araştırmışlardır. Bu doğrultuda hedef mazleme üzerine farklı kinetik enerjilerde (0,1, 0,3, 0,5 ve 0,8µj) aşındırıcı partiküller göndermişlerdir. Aşındırıcı partiküllerin hızlarındaki artış ile aşınma oranının da arttığını tespit etmişlerdir. Yüksek kinetik enerjilerde oluşan aşınma oranına mikro-kesme izleri yaratan küçük partiküllerin hakim olduğu gözlemlenmiştir. Daha düşük enerjilerde ise çarpan tüm partiküllerin hasar oluşturmadığı fakat hasar mekanizmasında yine de küçük partiküllerin baskın olduğunu tespit etmişlerdir [41].

O. P. Modi, B. K. Prasad ve A. K. Jha yaptıkları deneysel çalışmada çinko bazlı alüminyum alaşımının ve alümina partiküllerine sahip kompozitinin erozif aşınma davranışını incelemiştir. Kompozitin takviyesiz matriks alaşımından daha yüksek aşınma direnci gösterdiği ve daha düşük aşınma oranı oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Numune yüzeylerinde meydana gelen aşınma oranının çarpma hızı ile arttığını tespit etmişlerdir. Aşındırıcı partiküller yüksek hızda daha büyük kinetik enerji ile numune yüzeyine çarparak daha büyük aşınma hasarı oluşturmuşlardır. Düşük çarpma hızında aşınma oranı çarpma açısı artışıyla beraber sürekli olarak azalmıştır. Aşınma oranının başlangıçta çarpma açısı ile artarak zirveye ulaştığını ve ardından yüksek çarpma hızlarında ve yüksek çarpma açılarında azaldığını gözlemlemişlerdir. Aşınma yüzeylerinde daha düşük çarpma açısında aşınma olduğu, daha yüksek çarpma açılarında ise daha büyük bir krater oluşumu eğilimi saptamışlardır. Maksimum aşınma oranının aşındırıcı partiküllerin hızının artmasıyla daha yüksek çarpma açılarına doğru kaydığını gözlemlemişlerdir [42].

4.6. Çevresel Etkenler

C.K. Fang ve T.H. Chuang yaptıkları deneysel çalışmada 6063 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmada hedef malzemenin ağırlık kaybını ve aşınma derinliğini farklı sıcaklıklarda (25°C, 35°C, 45°C, 55°C), farklı bağıl nem oranlarında (%50, %65, %80, %95) ve farklı partikül açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) incelemişlerdir. Deneysel çalışmaları sonucunda bağıl nem oranının maksimum çarpma açısında hedef malzemenin ağırlık kaybında çok az etkisi olduğunu bununla birlikte genel olarak meydana gelen hacim kaybında ve aşınma derinliğinde karmaşık bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir [38].

5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler ve yöntemler anlatılmıştır.

5.1. 6082 Alüminyum Alaşımı

6082 alüminyum alaşımı, mükemmel korozyon direncine sahip orta dayanımlı bir alaşımdır. 6000 serisi alaşımların içinde en yüksek mukavemete sahiptir. Alaşım 6082, yapısal bir alaşım olarak bilinir. Plaka biçimindeki 6082, talaşlı imalat için en yaygın kullanılan alaşımdır. Nispeten yeni bir alaşım olan 6082'nin daha yüksek mukavemeti birçok uygulamada 6061'in yerini almıştır. Büyük miktarda manganez ilavesi ile tane yapısı kontrol edilerek daha güçlü bir alaşım elde edilir. Ekstrüzyonlu yüzey seviyesi, 6000 serisindeki diğer benzer alaşımlar kadar pürüzsüz değildir. T6 ve T651 temperlerinde, 6082 alüminyum alaşımı güzel işlenmektedir ve talaş kırıcılar kullanıldığında sıkı talaş artıkları ortaya çıkmaktadır. 6082 alüminyum alaşımı, ayrıca aşağıdaki standart tanımlamalara ve spesifikasyonlara karşılık gelmekle birlikte, bu tanımlamaların doğrudan eşdeğeri olmayabilir:

- HE30
- DIN 3.2315
- AA6082
- EN AW-6082
- ISO: Al Si1MgMn
- A96082

6082 alüminyum alaşımı için en yaygın temperler aşağıdaki gibidir:

- T6: Isıl işlem görmüş ve yapay yaşlandırılmış çözelti
- Yumuşak
- T4: Isıl işlem görmüş ve esas olarak kararlı bir halde doğal olarak yaşlandırılmış çözelti

- T651: Isıl işlem görmüş, germe yoluyla stresi rahatlatılmış ve sonra yapay yaşlandırılmış çözelti [43].

Tablo 5.1’de 6082 alüminyum alaşımının genel fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1. 6082 alüminyum alaşımının genel fiziksel özellikleri [43]

Yoğunluk	2,70 g/cm ³
Erime Noktası	555°C
Isıl Genleşme	24 x10-6 /K
Elastiklik Modülü	70 GPa
Isıl İletkenlik	180 W/m.K
Özdirenç	0,038 x10-6 Ω .m

Tablo 5.2’de tipik 6082 alüminyum alaşımını oluşturan elementler yüzdeleri ile birlikte gösterilmiştir.

Tablo 5.2. 6082 alüminyum alaşımının tipik kimyasal birleşimi [43]

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
% Değeri	0,7-1,3	0,0 – 0,5	0,0 – 0,1	0,4 – 1,0	0,6 – 1,2	0,0 – 0,2	0,0 – 0,1	0,0 – 0,25	95,2-98,3

Magnezyumun alüminyum-silisyum alaşımlarına eklenmesi, ısıl işlem sonrası mükemmel özellikler ile üstün döküm karakteristiklerini birleştiren son derece önemli ve faydalı bir kompozisyon ailesinin temelini oluşturur. Bu alaşımların korozyon direnci de mükemmeldir ve düşük termal genleşme seviyesi korunur. Yüksek mukavemetli Al-Cu ve Al-Si-Cu alaşımları kadar güçlü olmasa da, çeşitli Al-Si-Mg alaşımlarının mekanik özellikleri, üstün dayanım aralığında mekanik özellikler sağlar. Berilyum ilaveleri, demir ihtiva eden intermetalik maddenin morfolojisini ve kimyasal özelliklerini etkileyerek mukavemeti ve sünekliği geliştirir. Tablo 5.3’te 6082 alaşımının genel mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.3. 6082 alaşımının genel mekanik özellikleri [43]

Rm Çekme muk. (N/mm ² min.)	270-290
Rp 0,2 Akma muk. (N/mm ² min.)	230-250
HBW değeri	95
Termik sıcaklığı (°C)	175-185
Termik süresi (saat)	8-6
Sertlik (Brinell HB)	85-90
A50 % Uzama min.	6

Alüminyum-magnezyum alaşım ikilisi, parlak bir yüzey kalitesi, korozyon direnci ve dayanıklılık ile süneklik kombinasyonlarının gerekli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın bileşimler %4 ila %10 Mg içerir ve % 7'den fazla Mg içeren bileşimlere ısıl işlem uygulanabilir. Yüksek magnezyum konsantrasyonlarında kararsızlık ve uzun süreli oda sıcaklığında yaşlanma, ısıl işleme önlenebilir [43].

Alüminyum alaşımlarındaki silisyumun üstün etkisi bu alaşımların döküm özelliklerini geliştirmesidir. Silisyum ilaveleri; akışkanlığı ve sıcak yırtılma direncini önemli ölçüde geliştirir. Tüm alüminyum döküm proseslerinde en göze çarpan kompozisyonlar, silisyumun önemli bir rol oynadığı bileşimlerdir. Silisyum içeriğinin artırılması akışkanlığı geliştirir ve ince duvarları doldurarak daha detaylı ve karmaşık tasarımlar üretilmesini sağlar. Alüminyum silisyum alaşımları tipik olarak katılaşma çatlağına karşı daha dirençlidir ve mükemmel döküm özellikleri gösterir. Silisyum ayrıca özgül ağırlığı ve termal genişleme katsayısını da azaltır [44].

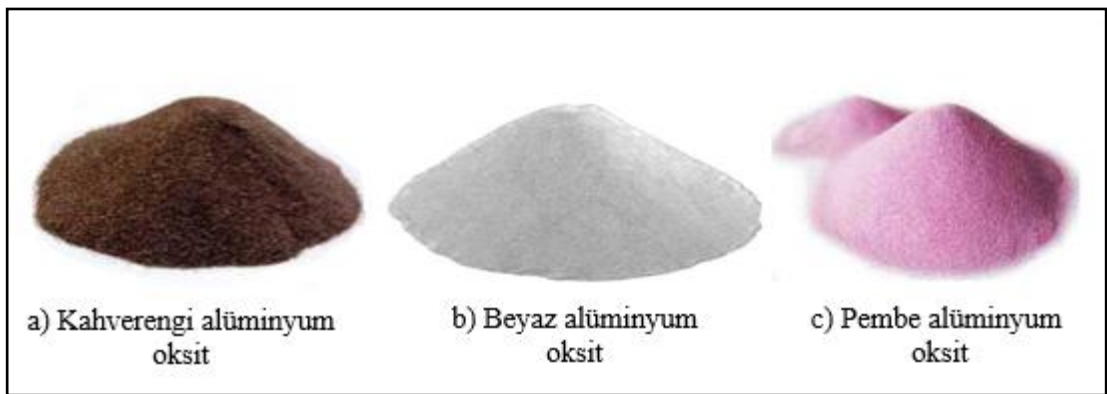
Al-Mg-Si sistemine ait olan AA6082 alüminyum alaşımı, mukavemet, şekillendirilebilirlik ve korozyon direnci gibi birçok özellik için yüksek performans gerektiren havacılık, inşaat ve otomobil endüstrisinde, demiryolu vagonlarında ağır yapılarda, köprülerde, hidrolik sistem ve parçalarda, gemi direkleri ve kirişlerinde, maden ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [44]. Ayrıca levha, çubuk, boru, lama, profil çeşitleri gibi ürün şekilleri bulunmaktadır. şekil 5.1'de AA6082-T6 alüminyum alaşımının otomotiv sektöründeki uygulama örnekleri verilmiştir.



Şekil 5.1 AA6082-T6 alüminyum alaşımının otomotiv sektöründeki uygulama örnekleri [45]

5.2. Alüminyum Oksit

Alüminyum oksit mineral içerikli bir saf malzemedir ve saflığına göre derecelendirilir. Piyasada alüminyum oksit, corund, korund, corondum, korondum, alüminyum oksit, alüminyumoksit, alumina ve alümina isimleriyle de adlandırılabilir. Saflık derecesine göre kahverengi, beyaz ve pembe renklerinde bulunur. Aşağıda verilen Şekil 5.2’de kahverengi, beyaz ve pembe alüminyum oksit çeşitleri gösterilmiştir [17,46].



Şekil 5.2 Kahverengi, beyaz ve pembe alüminyum oksit çeşitleri [46]

Alüminyum oksit minerali, alüminyumun oksijene karşı oldukça yüksek duyarlılık sergilemesi sebebiyle oluşmaktadır. Genellikle dayanım ömürlerinin uzun süreli olması ve de yüksek sertliğe sahip olmaları nedeni ile yüzey işleme sektöründe tercih

edilmektedirler. Pürüzlendirme ve boya çıkarma gibi uygulamalarda da kullanılmaktadırlar. Alüminyum oksit keskin köşeli yapıya sahiptir ve yüksek sertlikleri dolayısı ile kaplama öncesi pürüzlendirme işleminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yüzey üzerine basınçlı hava ile birlikte püskürtüldükleri zaman sarf malzemesinin boyutlarına bağlı olarak yüzeyde mikron seviyede yarıklar açmaktadırlar. Daha sonra bir kaplama uygulaması yapıldığında kaplama malzemesi açılan bu yarıklara yerleşmekte ve ana metale daha iyi tutunmaktadır. Dolayısı ile kaplama kalitesi ve ömrü iyi olmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi, alüminyum oksitin köşeli bir yapıya sahip olması sebebiyle aşındırma özelliği yüksektir. Bu özelliği de yüzey pürüzlendirilmesinde kullanılmasını sağlamaktadır. Eğer yüzey profili çok önem arz etmiyorsa hızlı bir temizleyici olarak da kullanılmaktadır. Paslanmazlık özelliği taşıyan malzemelerin kumlanması saflık değeri nedeniyle beyaz alüminyum oksit tercih edilmelidir. Beyaz alüminyum, kahverengi alüminyum oksite göre daha az toz çıkararak daha temiz ve kaliteli bir yüzey sunduğundan paslanmaz çelikler, bakır ve pirinç alaşımları, titanyum ve alüminyum alaşımları ve hatta porselen esaslı malzemelerin kumlanmasında tercih edilmektedir. Kahverengi alüminyum oksit serbest halde demir içermektedir ve yüzeyin paslanmazlık özelliğini zedelemektedir. Bunun yanısıra yoğun kullanımda renk değişimine de sebep olabilmektedir. Tüm bu sebeplerle kahverengi alüminyum oksit paslanmazlığın ve yüzey rengi kalitesinin gerekli olmadığı durumlarda tercih edilmelidir. Alüminyum oksit neme duyarlı bir malzemedir bu sebeple depolanmaları esnasında kesinlikle neme maruz kalmamaları gerekmektedir [17,46].

5.2.1. Alüminyum oksit mineralinin fiziksel özellikleri

Bu bölümde alüminyum oksit mineralinin fiziksel özellikleri Tablo 5.4 ile verilmiştir. Beyaz alüminyum oksit mineralinin özgül ağırlığı $3,92 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Deneysel hesaplamalarda aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjileri hesaplanırken bu değerden faydalanılmıştır. Ayrıca aşağıdaki tabloda verilen özelliklerden alüminyum oksitin keskin köşeli kristal bir yapıya sahip olduğu göze çarpmaktadır. Alüminyum oksitin keskin köşeli yapısı ilerleyen bölümlerde verilecek olan SEM fotoğrafları yardımıyla daha net bir şekilde görülecektir.

Tablo 5.4. Alüminyum oksit mineralinin fiziksel özellikleri [46]

Beyaz alüminyum oksitin özgül ağırlığı	3,92 g/cm ³
Ortalama dökme yoğunluğu	2,4 g/cm ³
Sertlik	9 (mohs scale)
Kristal Sistemi	Kübik
Kristal Şekil	Köşeli
Kırılma	Dökme mineralin preslenmesi suretiyle
Dayanıklılık	Yüksek
Akış Özelliği	97% minimum
Duyarlılık	Yoktur
Nem Çekme Özelliği	Vardır
Magnetiklik Özelliği	Çok hafif magnetiktir
Elektrik İletimi	100 microsiemens per meter
Radyoaktivite Özelliği	Tespit edilmemiştir
Patolojik Zarar Verme Özelliği	Yoktur

5.2.2. Alüminyum oksit mineralinin kimyasal özellikleri

Yapılan deneysel çalışmalarda AA6082-T6 alüminyum alaşımının aşındırılması için beyaz alüminyum oksit kullanılmıştır. Bu nedenle Tablo 5.5'te beyaz alüminyum oksitin kimyasal özellikleri verilmiştir. Alüminyum oksit mineralleri aşındırıcı partikül olarak birçok kumlama uygulamasında kullanılmaktadır.

Tablo 5.5. Beyaz alüminyum oksit alaşımının kimyasal özellikleri [46]

Al ₂ O ₃ : %99,7	Klor içeriği < 50 ppm
SiO ₂ : %0,02	Eriyebilen tuz içeriği < 100 ppm
Fe ₂ O ₃ : %0,02	Sulu ortamda pH 6,93
TiO ₂ : %2,60-3,20	Alçıtaşı içeriği yoktur
Na ₂ O: %0,20	Rutubet < 0,5%
Metal içeriği serbest Fe, Cu ve diğer ağır metaller eser oranda	Karbonat içeriği yoktur

5.3. Vakumlu Kumlama

Kumlama uygulaması basınçlı kumlama ve vakumlu kumlama olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada vakumlu kumlama yöntemi kullanılmıştır. Bu nedenle bu bölümde vakumlu kumlama yöntemi ve bu yöntemde kullanılan ekipmanlar anlatılacaktır.

Vakumlu kumlama sisteminde basınçlı havanın vakum etkisinden yararlanılmaktadır. Basınçlı hava, kumlama tabancası adı verilen bir ekipmanın içinden geçirilerek bu tabancanın alt kısmındaki boşluktan emiş sağlanmaktadır. Belirli bir yönde akmakta olan basınçlı havanın vakum etkisiyle emilen sarf malzemeleri yine bu tabancanın içinde hava ile karışarak yüzeye püskürtülmektedir. Hava sayesinde yüksek bir hızla ve dolayısıyla momentuma sahip olan bu kumlar yüzeye çarptıklarında mikron mertebesinde izler bırakmaktadırlar. Bu işlem hem açıkta hem de özel filtre sistemi ile donatılmış ve kumlama tabancası içeren bir kumlama kabini içinde yapılabilmektedir. Aşağıdaki Şekil 5.3'te basınçlı hava etkisiyle vakum yapılarak kumlama yapılan sistemin ekipmanları gösterilmiştir [17,47].



Şekil 5.3. Vakumlu kumlama sistemi [47]

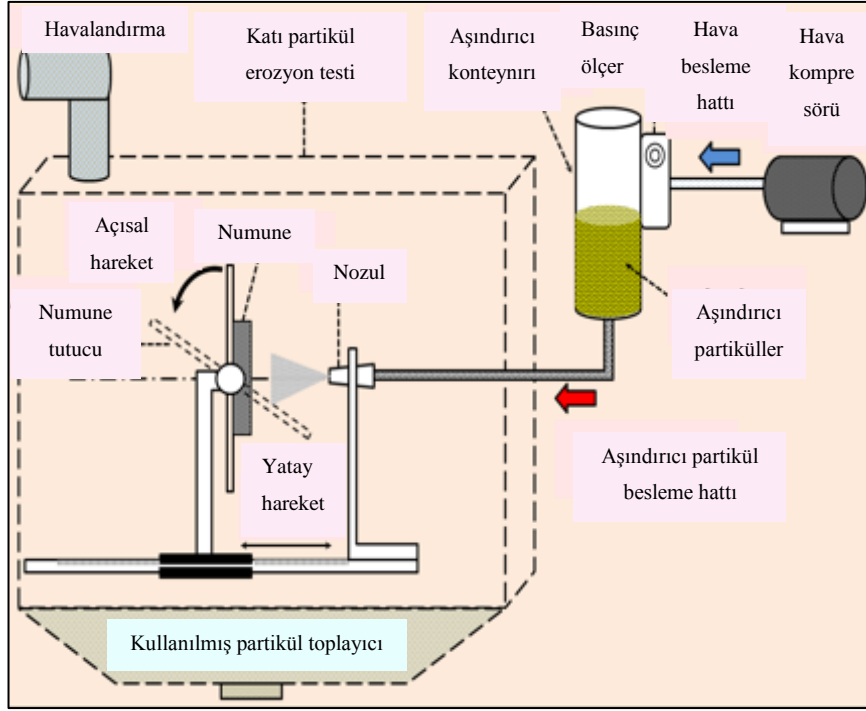
Kumlama kabinindeki ana prensip yerçekimi etkisiyle alt haznesinde biriken kumun, içinden basınçlı hava geçirilen bir kumlama tabancası vasıtasıyla emilerek püskürtülmesidir. Operatör kabinin içine koruyucu eldivenler yardımıyla ellerini sokar ve bir eliyle kumlanacak malzemeyi, diğer eliyle de kumlama tabancasını tutar böylelikle kumlama işlemini gerçekleştirir. Malzemeler kabinin içine yan taraftaki bölmelerden yerleştirilir ve havanın kontrolü ayak pedalı ile sağlanır. Bu tip kabinler özellikle elle tutulabilecek kadar küçük parçaların kumlanmasında oldukça pratiktir. İşlem basıncı 4-8 bar arasındadır. Kumlama işleminde önemli rol oynayan elemanlardan biri kum püskürtme nozullarıdır. Kumun çıkış yerinde yani kumlama hortumunun en uç noktasında bulunan ve yoğun aşınmaya maruz kalan bu ekipmanın mutlaka aşınmaya dayanabilecek özelliklerde olması gerekmektedir. Zaman içerisinde nozul çaplarının aşınarak genişlemesi, aşındırıcı partiküllerin debisinin ve hızının azalmasına sebep olabilir ve bu durum aşındırma süresi ve maliyetinde artışa oluşturabilir. Diğer bir önemli eleman ise daha önce de bahsedildiği üzere aşındırıcı malzemelerdir. Aşındırıcı malzemenin partikül büyüklüğü, şekli, sertliği gibi birçok özelliği kumlama işleminin verimliliğini ve başarısını doğrudan etkilemektedir. [17,47].

Tablo 5.6'da hava vasıtasıyla yapılan basınçlı kumlama yöntemi ile vakumlu kumlama yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Vakumlu kumlama yöntemi ile küçük parçaların kumlama prosesleri gerçekleştirilmektedir ve bu yöntem bize sürekli çalışma imkanı sağlamaktadır.

Tablo 5.6. Hava vasıtasıyla yapılan iki farklı kumlama yönteminin karşılaştırılması [47]

Kumlama Yöntemleri Karşılaştırması	Basıncılı Kumlama Yöntemi	Vakumlu Kumlama Yöntemi
Çalışma basıncı	5-8 bar	5-8 bar
Hava tüketimi (8 mm nozul) 5-8 bar	0,8 - 3,50 m ³ /dk	0,6 - 1,20 m ³ /dk
Parça büyüklüğü	Büyük parçalar	Küçük parçalar
Kum ve hava çıkış hızı	200-250 m/sn	60-100 m/sn
Kontrollü kumlama imkanı	Düşük	Yüksek
Yatırım maliyeti	Yüksek	Düşük
Seyyar kumlama imkanı	Var	Yok
Sürekli çalışma olanağı	Yok	Var
Kumlama süresi	Hızlı	Yavaş
Kumlama etkisi	Fazla	Az

Şekil 5.4'te deneylerde kullanılan vakumlu kumlama düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Katı partikül erozyonuna maruz bırakılacak hedef malzeme, ayarlanabilir fixtüre oturtularak bu fixtür sayesinde belirli açılarda ayarlanabilmektedir ve bu sayede aşındırıcı partiküller hedef malzeme yüzeyine farklı açılarda çarpabilmektedir. Sabit püskürtme basıncı altında belirli bir hıza ulaşan aşındırıcı partiküller bu basınç sayesinde nozuldan çıkarak hedef malzeme yüzeyini aşındırmaktadırlar.



Şekil 5.4. Vakumlu kuşlama düzeneğinin şematik gösterimi

5.4. NANOVA PS50 Temassız Profilometre

Metal imalatı; ham metal malzemeler, kesme, şekillendirme, kaynak gibi çeşitli işlemlerle makinaları ve yapıları oluşturmaktadır. Büyük bir metal yüzeyin düzlüğü, pürüzlülüğü ve dokusu son kullanımı için hayati önem taşımaktadır. Yüzey dokusunun, tutarlılığının, yönlü desenlerin ve diğerlerinin niceliksel ölçümü, imalat işleme ve kalite kontrol önlemlerinin iyileştirilmesinde kritik öneme sahiptir. İmalat atölyeleri ve makine atölyelerinde genellikle büyük miktarlarda metaller işlenir. Bu nedenle, 3D yüzey morfolojisinin hızlı ve kusursuz bir şekilde ölçülmesini ve kalite kontrolünde en dar toleransları sağlaması gereklidir. Metallerle ilaveten, seramik, plastik ve cam gibi farklı malzemelerden üretilen neredeyse her türlü yüzey Nanovea 3D temassız profilometre ile zamanında ölçülebilmektedir ve bu durum profilometreyi üretim/imalat hatlarında yüzey kontrolü için ideal bir araç haline getirmektedir. Yüksek çözünürlüklü 3D tarama, üretim işlemleri sırasında oluşan çukurlar, çatlaklar veya ekstrüzyonlar gibi tüm kusurları hızlı bir şekilde tespit ve rapor edebilmektedir [48].

Yapılan deneysel çalışmalar farklı operasyon parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacı ile aşındırılan numunelerin erozyon Nanovea PS50

temassız profilometre cihazı kullanılarak ve 0,1 μm hassasiyetle taranmıştır. Her bir yüzeye ait ortalama pürüzlülük değeri cihaz yardımı ile ölçülmüştür. Aşındırılan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.5'te deneysel çalışmalarda kullanılan Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazının görüntüsü ve Tablo 5.7'de cihaza ait özellikler verilmiştir [48].



Şekil 5.5. Optik profilometre cihazı [48]

Tablo 5.7. Optik profilometre cihazının özellikleri [48]

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

5.5. SEM ve EDS Analizleri

Deneysel çalışmalarda çeşitli parametreler altında aşındırılan hedef malzeme yüzeyleri JEOL JSM-6335F taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. JEOL JSM taramalı eletron mikroskobu 15kV'da 1,5nm, 1kV'da ise 5,0nm çözünürlüğe sahiptir ve Thermo Noran System Six EDS dedektörü ile entegredir [49].

Yukarıda özellikleri verilen SEM cihazı yardımıyla farklı parametrelerde aşınmış hedef malzeme yüzeyleri farklı modlarda (ikincil elektron (SE) ve geri saçılan elektron (Backscattering modu)) ve büyütmelerde (250x, 1000x, 3000x) görüntüleri alınarak, malzeme yüzeyine saplanan partiküller enerji dağılım spektrometresi analizleri (EDS) ile derinlemesine incelenmiştir. Şekil 5.6’da deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı görseli verilmiştir.

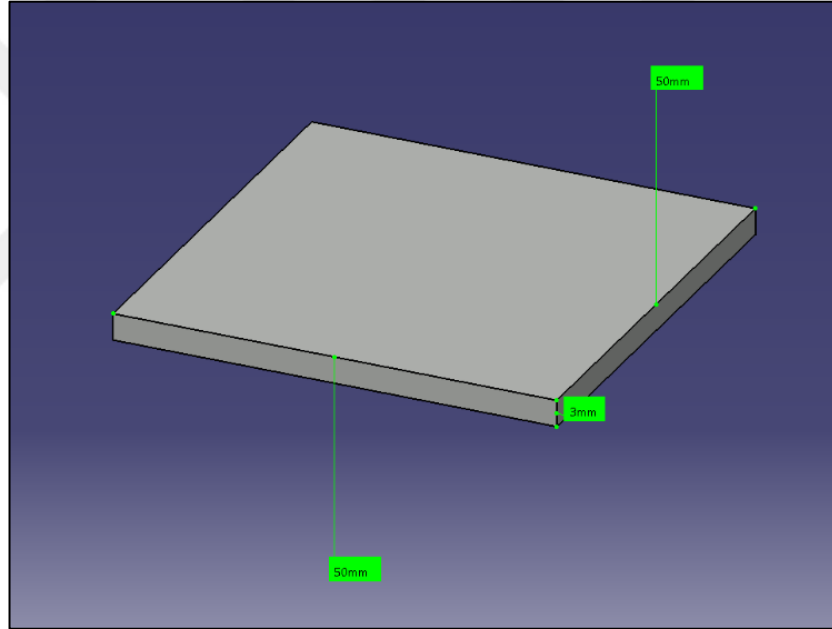


Şekil 5.6. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı [49]

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan tüm deneysel çalışmalarda, hedef malzeme olarak ASAŞ Alüminyum tarafından ekstrüzyon ile üretilmiş AA6082-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

3 mm x 200 mm x 6000 mm boyutuna sahip sac levha şeklindeki AA68082-T6 alüminyum alaşımı giyotin makas ile kesilerek 50 x 50 x 3 mm boyutlarında kare numuneler hazırlanmıştır. Şekil 6.1 'de deneysel çalışmada hedef malzeme olarak kullanılan numunelerin 3 boyutlu çizimi verilmektedir.



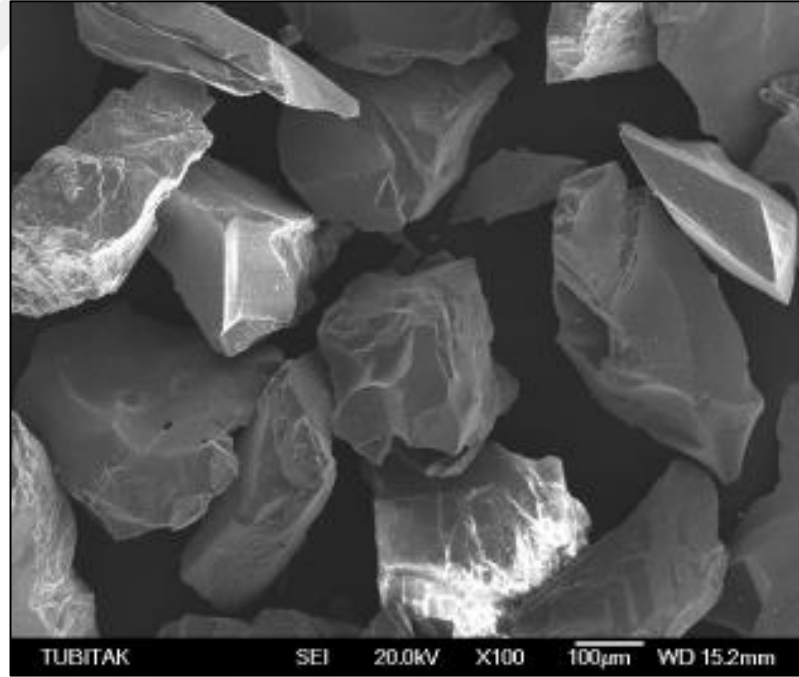
Şekil 6.1. Deneysel çalışmada hedef malzeme olarak kullanılan numunelerin 3 boyutlu çizimi

Yapılan deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak 2 farklı partikül boyutuna sahip alüminyum oksit kullanılmıştır. Malzeme ve Yöntem Bölümü'nde alüminyum oksit aşındırıcılar detaylı bir biçimde anlatılmıştır. Tablo 6.1'de deneysel çalışmalarda kullanılan alüminyum oksit partiküllerinin boyutları gösterilmektedir.

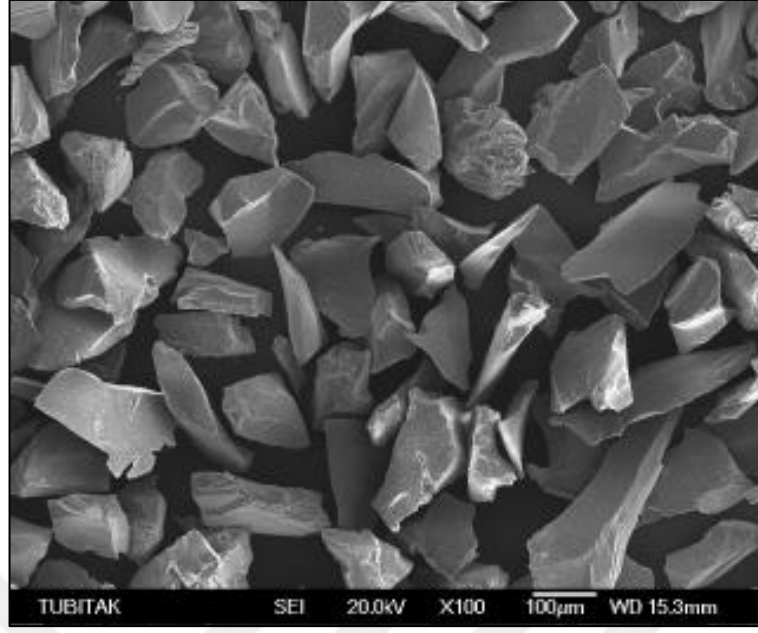
Tablo 6.1. Deneysel çalışmada kullanılan aşındırıcı partikül boyutları

Aşındırıcı Partikül Adı	Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
Beyaz Alüminyum Oksit F60	212 -300 μm
Beyaz Alüminyum Oksit F120	90 -125 μm

Aşındırıcı partiküllerin boyutu oldukça önemlidir. Eroziv aşınma problemlerinin büyük çoğunluğu 5-500 μm boyutlarındaki partikülleri içermektedir ancak erozyona sebep olan partiküllerin bu boyutla sınırlandırılmasının temel bir nedeni bulunmamaktadır. Şekil 6.2. ve 6.3'te deneysel çalışmalarda kullanılan 60 ve 120 mesh partikül boyutuna sahip alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi alüminyum oksit aşındırıcıların keskin köşeli bir şekle sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.2. 60 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı [17]



Şekil 6.3. 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin x100 büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı [17]

6.1. Katı Partikül Erozyon Aşınması

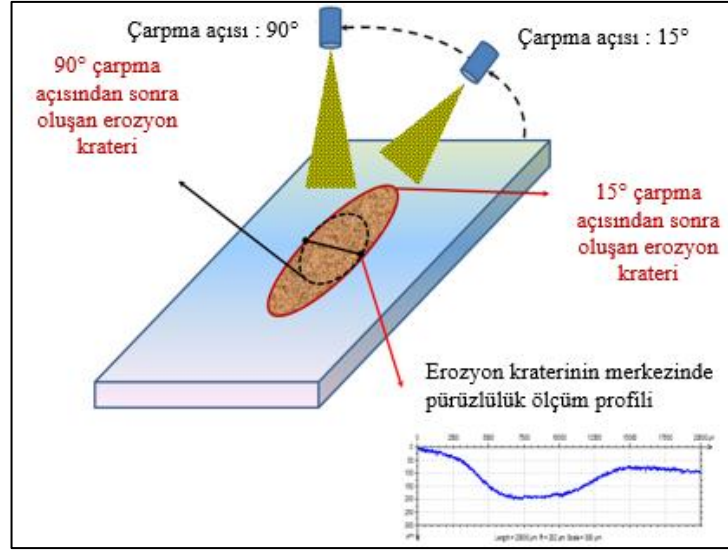
Bu çalışmada, partikül erozyon testleri ASTM G76 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak kare plakalar şeklinde hazırlanan AA6082-T6 numunelerinin yüzeyleri temiz bir yüzey elde etmek amacı ile hava püskürtülerek ve aseton yardımıyla temizlenmiştir. Daha sonra yüzeyleri hazırlanan numuneler vakumlu kumlama yöntemi ile farklı parametreler altında aşındırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, AA6082-T6 numuneleri 2 farklı partikül boyutuna sahip (60 mesh, 120 mesh) alüminyum oksit aşındırıcılar ile 1,5 bar ve 3 bar basınç altında 15 saniye süre boyunca ve 6 farklı açıda (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) özel olarak hazırlanan kumlama düzeneği kullanılarak aşındırılmıştır. Daha sağlıklı deneysel sonuçlar elde etmek amacıyla her bir parametre için 3'er adet numune aşındırılmış olup aşınma oranı sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmış ve bu 3 sonucun aritmetik ortalaması alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı karakterize edilmiştir. Tablo 6.2'de kumlama deneyinde kullanılan parametreler verilmiştir.

Tablo 6.2. Kumlama deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı Partikül Boyutu (mesh)	Püskürtme Basıncı (bar)	Aşındırıcı Partikül Çarpma Açısı	Süre (sn)
60 mesh	1,5 bar	15°, 30°,45°,60°,75°,90°	15
60 mesh	3 bar	15°,30°, 45°,60°,75°,90°	15
120 mesh	1,5 bar	15°,30°, 45°,60°,75°,90°	15
120 mesh	3 bar	15°,30°, 45°,60°,75°,90°	15

Kumlama işlemleri özel olarak tasarlanmış kumlama düzeneğinde yapılmıştır. Kumlama düzeneği; basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kumlama kabini, numune fikstürü ve de nozul ekipmanlarından oluşmaktadır. Nozul, kumlama kabini içerisine sabitlenmiş olup, iç çapı 7 mm'dir. Kabin dışarıdan bir pedal yardımı ile kontrol edilebilmektedir. Kumlama basıncı da kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir. Kumlama kabini içerisindeki numune fikstürü yardımı ile numune yüzeyine istenilen açılarda kum püskürtülmesi sağlanmaktadır. Bu düzenek sayesinde yapılan deneysel çalışmada kabin içerisinde sabitlenmiş nozul, numunenin 15'er derece ile döndürülmesine olanak veren fikstürün hareketi ile 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° açılarda kum püskürtmüştür. Kumlama işlemleri sırasında numuneler bu fikstür kullanılarak nozuldaki 20 mm uzaklıkta tutulmuştur. Testler her numune için 3'er kez tekrarlı yapılmış olup, 3 tekrar sonucunda bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır.

Katı partikül erozyon testleri tamamlandıktan sonra, AA6082-T6 numunelerinin yüzeylerinde erozyon krateri meydana gelmiştir. Erozyon krateri merkezinden 20 mm uzunluğundaki profil çizgisi Nanovea PS50 temassız 3D profilometre ile 0,1 µm hassasiyetle taranmıştır. Şekil 6.4'te numunenin yüzey pürüzlülüğü ölçümünün şematik gösterimi verilmiştir. İlerleyen bölümlerde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucunda ortaya çıkan ortalama pürüzlülük değerleri (R_a) karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.4. Numunenin yüzey pürüzlülüğü ölçümünün şematik gösterimi

Ayrıca numuneler farklı parametreler altında erozyona uğradıktan sonra hedef malzeme yüzeyinde oluşan aşınma izleri 50 mm x 50 mm'lik bir alanda, 1200 dpi çözünürlükte HP Scanjet G2710 tarayıcı kullanılarak taranmıştır. Farklı püskürtme açılarında numune yüzeyinde oluşan aşınma izleri yorumlanarak AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyon davranışı karakterize edilmiştir. Şekil 6.5'te deneysel çalışmalarda kullanılan HP Scanjet G2710'un fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.5. Deneysel çalışmada kullanılan HP Scanjet G2710 tarayıcı

Farklı parametreler altında aşındırılan hedef mazleme yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 250x, 1000x, 3000x büyütmelerde görüntüleri alınarak EDS analizleri yapılmıştır.

7. DENEYSEL BULGULAR

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilen deneysel bulgular bu bölüm başlığı altında açıklanmıştır.

7.1. Kütlesel Debilerin İncelenmesi

Yapılan deneysel çalışmanın ilk aşamasında farklı partikül boyutlarına sahip aşındırıcıların farklı basınçlardaki kütlesel debileri hesaplanmıştır. Kütlesel debiyi hesaplamak için; kum tankına koyulan aşındırıcı partiküller, 1,5 bar ve 3 bar basınç altında 15 saniye süre boyunca püskürtülerek, püskürtülen aşındırıcı partiküller özel bir kaptan toplanmıştır. 15 saniye sonunda kaptan biriken aşındırıcı partiküller tartılarak püskürtme zamanına bölünmüş ve kütlesel debileri bulunmuştur. Her farklı deney parametresi için, işlem 10 kez tekrarlanarak yapılan deney sonuçlarının doğruluğu teyit edilmiştir. Tablo 7.1’de 60 ve 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcıların kütlesel debilerinin hesaplanması adına yapılan testlerin sonuçları verilmektedir. Kütlesel debi Denklem (7.1) yardımıyla hesaplanmıştır [50];

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (7.1)$$

\dot{m} = Kütlesel debi (gr/sn)

m = Püskürtülen partiküllerin ağırlığı (gr)

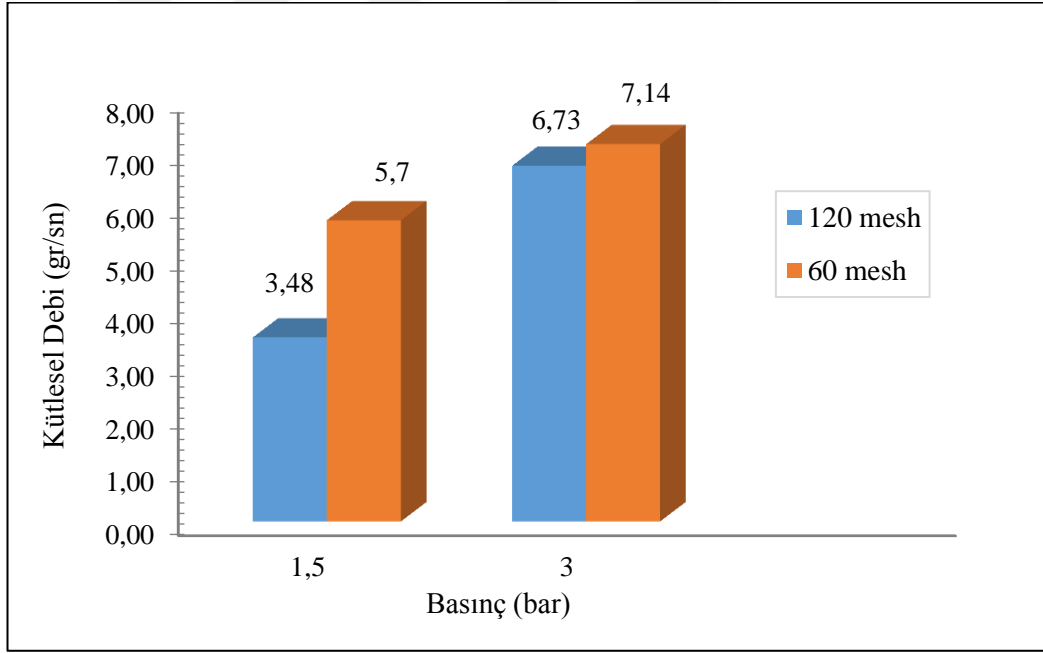
t = Püskürtme zamanı (sn).

Tablo 7.1’deki verileri incelediğimiz zaman kütlesel debinin püskürtme basıncı ve partikül boyutu ile birlikte arttığını görmekteyiz. Daha yüksek püskürtme basıncı (3 bar) ve daha büyük partiküllerin (60 mesh) kullanılmasıyla gerçekleştirilen 2 numaralı deney şartlarında en büyük kütlesel debi elde edilmiştir.

Tablo 7.1. 60 ve 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcıların 1,5 bar ve 3 bar basıncındaki kütleli debileri

No	Aşındırıcı Partikül Boyutu (mesh)	Püskürtme Basıncı (bar)	Süre (sn)	Kullanılan Aşındırıcı Miktarı (gr)	Hesaplanan Kütleli Debi (gr/s)
1	60	1,5	15	85,5	5,7
2	60	3	15	107,1	7,14
3	120	1,5	15	52,2	3,48
4	120	3	15	100,95	6,73

Şekil 7.1'deki grafikte kütleli debinin aşındırıcı partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Şekil 7.1. Kütleli debinin aşındırıcı partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalardan iki sonuca ulaşılabilir:

- Aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri püskürtme basıncı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.
- Aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri aşındırıcı partikül boyutu ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

7.2. Katı Partikül Erozyonunun Aşındırıcı Partikül Boyutuna Bağlı Değişimi

Malzeme yüzeyine çarpan partikül boyutu katı partikül erozyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan bu deneysel çalışmada aşındırıcı partikül boyutunun katı partikül erozyonu üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır.

Bir malzemenin aşınma oranı, hedef malzemenin ağırlık kaybının (mg) erozyon süresi boyunca hedef malzemeye çarpan aşındırıcı partiküllerin ağırlığına (gr) bölünmesi ile bulunmaktadır. Aşınma oranı hesabı Denklem (7.2)'de verilmiştir;

$$A = \frac{\Delta m}{m} \quad (7.2)$$

A = Aşınma oranı (mg/gr)

Δm = Hedef malzemenin ağırlık kaybı (mg)

m = Aşındırıcı partiküllerin ağırlığı (gr)

7.2.1. Aşınma oranlarının incelenmesi

Şekil 7.2'de 60 mesh ve 120 mesh aşındırıcı partikül büyüklüklerinin erozif aşınma oranı sonuçları verilmiştir. Her iki farklı partikül grubu (60 mesh ve 120 mesh) hedef malzemedan 20 mm uzaklıkta olan bir nozul yardımı ile 1,5 bar basınç altında hedef malzemeye püskürtülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 1,5 bar basınç altında püskürtülen partiküllerin çarpma hızlarında küçük bir değişim meydana geldiği söylenilebilir. 90 – 125 μm aralığındaki küçük partiküllerin (120 mesh) deney boyunca daha büyük hıza ulaştığı görülmüştür. Basınçlı hava, bir konteynırda sıfır hıza sahip olan partikülleri nozula doğru hızlandıran ve nozul ucundan hedef malzemeye doğru iterek çarpmasını sağlayan bir momentum verir. Küçük partiküller büyük partiküllere kıyasla ivme ve momentum kazanmaya daha uygundur. Bir sonraki bölümde detaylı anlatılacak olan çift disk metodu yardımı ile yapılan deneysel çalışmalarda küçük partiküllerin hızı 67 m/sn, büyük partiküllerin hızı ise 56 m/sn olarak ölçülmüştür. Öte yandan, küçük partiküllerin kütleli debisi 3,48 g/s ve büyük partiküllerin kütleli debisi 5,7 g/s olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, küçük partiküllerin büyük partiküllere kıyasla daha yüksek hız ve daha düşük kütleli debi ile hedef malzemeye çarptığını söylemek mümkündür.

- 1,5 bar püskürtme basıncında, 120 mesh ve 60 mesh büyüklüklerindeki partiküllerin hızları arasındaki oran Denklem (7.3) ile verilmiştir;

$$V_x = \frac{V_1}{V_2} \quad (7.3)$$

V_x = Hız Oranı

V_1 = Büyük hız (m/sn)

V_2 = Küçük hız (m/sn).

$$\text{Hız Oranı} = \frac{67 \text{ m/sn}}{56 \text{ m/sn}} = 1,2$$

- 1,5 bar püskürtme basıncında, 120 mesh ve 60 mesh büyüklüklerindeki partiküllerin kütleli debileri arasındaki oran Denklem (7.4) ile verilmiştir;

$$\dot{m}_x = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \quad (7.4)$$

\dot{m}_x = Kütleli debi oranı

\dot{m}_1 = Büyük kütleli debi (gr/sn)

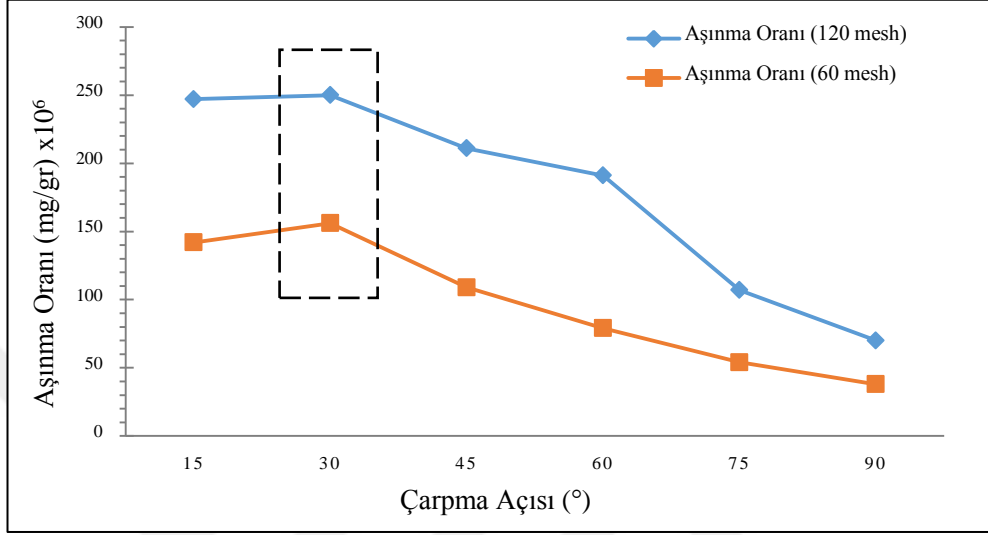
\dot{m}_2 = Küçük kütleli debi (gr/sn).

$$\text{Kütleli Debi Oranı} = \frac{5,7 \text{ gr/sn}}{3,48 \text{ gr/sn}} = 1,64$$

Yukarıdaki oranlar karşılaştığında; partikül büyüklüğünün partikül hızından ziyade kütleli debi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 7.2’de verilen aşınma oranı grafiğinde, en yüksek aşınma oranlarının 30° çarpma açısında meydana geldiği tespit edilmiştir. Beklendiği gibi, sünek alüminyum malzemesinin düşük çarpma açılarında daha yüksek aşınma oranları verdiği görülmüştür. 30° çarpma açısının üzerindeki çarpma açılarında aşınma oranları azalmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Şekil 7.2 incelendiğinde, 30°’de 120 mesh’teki aşınma oranı, 60 mesh’teki aşınma oranının 1,77 katı olarak hesaplanmıştır. Bu değer çok ilginçtir çünkü 1,77, büyük ve küçük partiküller

arasındaki kütle akış oranlarının oranından (1,64) daha yüksektir. Hatırlandığı üzere, küçük ve büyük partiküllerin (120 mesh/60 mesh) hızları oranı $67/56 = 1,2$ 'dir. Bu noktada 1,5 bar'lık aynı püskürtme basıncında ve 56-67 m/s aralığındaki çarpma hızlarında, küçük partiküller daha yüksek aşınma oranlarıyla sonuçlanır.



Şekil 7.2. Katı partikül erozyonunda aşınma oranının farklı çarpma açılarında aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşınma süresi: 15 s)

Partiküllerin kinetik enerjisi Denklem (7.5) ile hesaplanmıştır;

$$E_k = \frac{1}{2} \times m \times V^2 \quad (7.5)$$

E_k = Kinetik enerji (Joule)

m = Aşındırıcı partikül ağırlığı (gr)

v = Aşındırıcı partikül hızı (m/sn)

Kinetik enerji formülünde gerekli olan ' $m =$ Aşındırıcı partikül ağırlığı (gr)' Denklem (7.6) yardımı ile hesaplanmıştır;

$$m = V \times d \quad (7.6)$$

m = Aşındırıcı partikül ağırlığı (gr)

V = Aşındırıcı partikül hacmi (cm³)

d = Aşındırıcı partikül yoğunluğu (gr/cm³)

Denklem (7.7) yardımıyla kürenin hacmi hesaplanmıştır;

$$V_{\text{küre}} = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3 \quad (7.7)$$

$$d = 3,92 \text{ gr/cm}^3 \text{ (alüminyum oksit)}$$

Küçük partikülleri bir küre olarak düşünürsek ve ortalama çap değerini 108 μm , büyük partiküllerin ortalama çap değerini ise 256 μm olarak ele alırsak partiküllerin kinetik enerjileri:

$$E_{k(120 \text{ mesh})} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times (54\mu\text{m})^3 \right] \times (3,92\text{g/cm}^3) \times (67\text{m/sn})^2 = 5,80 \times 10^{-6} \text{ J}$$

$$E_{k(60 \text{ mesh})} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times (128\mu\text{m})^3 \right] \times (3,92\text{g/cm}^3) \times (56\text{m/sn})^2 = 5,39 \times 10^{-5} \text{ J}$$

Kinetik enerjiler oranı Denklem (7.8) yardımıyla bulunmuştur;

$$E_{kx} = \frac{E_{k1}}{E_{k2}} \quad (7.8)$$

E_{kx} = Kinetik enerjiler oranı

E_{k1} = Büyük kinetik enerji

E_{k2} = Küçük kinetik enerji

$$\text{Kinetik Enerjiler Oranı} = \frac{5,39 \times 10^{-5}}{5,80 \times 10^{-6}} = 9,3$$

Daha büyük ve daha küçük partiküllerin arasındaki kinetik enerjinin oranı 9,3 olarak hesaplanmıştır. Ancak sonuçları incelediğimizde, daha küçük partiküllerin daha yüksek partikül erozyonu ile sonuçlandığı görülmektedir. Daha büyük partiküllerin 9,3 kat daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmasına rağmen, daha küçük partiküller daha büyük partiküllere kıyasla 1,77 kat daha yüksek aşınma oranına yol açmaktadır. Daha küçük partiküller, daha büyük partiküllere kıyasla daha yüksek bir çarpışma hızında daha yüksek kırılma dayanıklılığı veren daha kompakt bir yapıya sahiptir. Erozyon süreci boyunca, daha küçük partiküller yapısal bütünlüklerini korur ve enerjilerini hedef malzemeye aktarırlar. Kırılma ve rotasyon eğilimi daha büyük partiküllere göre daha düşüktür. Bu durum, büyük partiküllere kıyasla hedef malzeme üzerinde daha yüksek aşınma oranları veren daha yüksek plastik deformasyonlara neden olmaktadır. Partikül erozyonu sırasında büyük partiküllerin

bazı dezavantajları vardır. Büyük partiküller daha yüksek kinetik enerjiye ve daha büyük kütleli debiye sahip olmakla birlikte, hedef malzemeye çarptıktan sonra kırılma eğilimi ve rotasyon eğilimi küçük partiküllere göre daha yüksektir. Bu olası nedenler, büyük partiküllerin sahip oldukları kinetik enerjisinin hedef malzemeye transferini engeller. Öte yandan, koruyucu kalkan etkisi, daha büyük partiküllerin daha düşük aşınma oranlarına ulaşması için başka bir sebep olabilir. Büyük partiküller daha büyük boyutlara sahip oldukları için, nozuldan hedef malzeme yüzeyine transferleri sırasında birbirlerine çarpma olasılıkları daha yüksektir. Çarpışmadan sonra, partiküller orijinal rotalarından saparak hedef malzemede daha düşük bir aşınma oranı meydana getirecek farklı bir çarpma açısında çarpabilirler. Başka bir koruyucu kalkan etkisi, çarpışmadan sonra yüzeyden seken partiküller ile yüzeye çarpacak olan partiküller arasında meydana gelir. İstatistiksel olarak, nozul ile hedef malzeme arasında uçan büyük partiküller, geri seken partiküller ile büyük oranda çarpışma olasılığına sahiptir. Bu olay partiküllerin orijinal uçuş yönünden sapıtılmasıyla sonuçlanır, hatta bu sebeple partiküllerin hedef malzeme yüzeyine ulaşması engellenir. Bu mekanizma, büyük partiküllerin aşınma oranlarını kuvvetli bir şekilde etkiler. Kompakt bir yapıya ve daha yüksek hıza sahip daha küçük partiküller enerjilerini hedef malzemeye kolayca aktarırlar, böylelikle hedef malzemenin yüzeyinde büyük plastik deformasyona neden olurlar. Küçük partiküller daha yüksek hız ve daha yüksek deformasyon oranlarında daha yüksek çatlak oluşumuna neden olurlar.

Yapılan diğer çalışmada ise, her bir partikül grubu (60 mesh ve 120 mesh) 3 bar basınç altında hedef malzeme yüzeyine püskürtülmüştür. 3 bar basınç altında püskürtülen partiküllerin hedef malzeme yüzeyinde sebep olduğu aşınma oranları Şekil 7.3'te verilmiştir. Şekil 7.3'teki grafik incelendiğinde her çarpma açısı için aşınma oranının Şekil 7.2'de verilen sonuçların yaklaşık iki katı olduğu görülmüştür. Şekil 7.2'deki gibi, 90-125 µm arasında bir boyuta sahip olan küçük partiküller (120 mesh), deney sırasında daha yüksek bir hız kazanmıştır. Küçük partiküllerin (120 mesh) hızı 70 m/s, büyük partiküllerin hızı ise (60mesh) 64 m/s olarak ölçülmüştür. Küçük partiküllerin kütleli debisi 6,73 g /s, büyük partiküllerin kütleli debisi ise 7,15 g/s olarak hesaplanmıştır.

- 3 bar püskürtme basıncında, 120 mesh ve 60 mesh büyüklüklerindeki partiküllerin hızları arasındaki oran:

$$\text{Hız Oranı} = \frac{70 \text{ m/sn}}{64 \text{ m/sn}} = 1,09$$

- 3 bar püskürtme basıncında, 120 mesh ve 60 mesh büyüklüklerindeki partiküllerin kütleli debileri arasındaki oran:

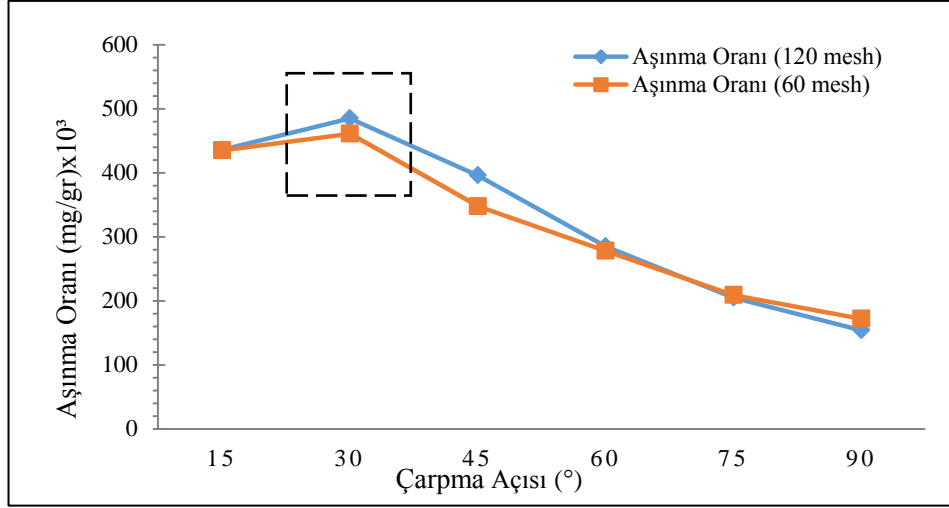
$$\text{Kütleli Debi Oranı} = \frac{7,15 \text{ g/sn}}{6,73 \text{ g/sn}} = 1,06$$

1,5 bar ve 3 bar basınçları altında, 120 mesh ve 60 mesh partikül büyüklüklerinin hız ve kütleli debi oranları bir tablo halinde Tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo 7.2. 1,5 bar ve 3 bar basınçları altında, 120 mesh ve 60 mesh partikül büyüklüklerinin hız ve kütleli debi oranları

	Hız Oranı	Kütleli Debi Oranı
1,5 Bar	1,2	1,64
3 Bar	1,09	1,06

Partikül büyüklüğü farkı, partikül hızından ziyade kütle akış hızını kuvvetle etkilemektedir. Şekil 7.2’de olduğu gibi, en yüksek aşınma oranları 30° çarpma açısında görülmüştür. 30° çarpma açılarından yüksek çarpma açılarında, aşınma oranları düşmüştür. 30°’de, 120 mesh ve 60 mesh arasındaki aşınma oranları yaklaşık 1 dir. Diğer çarpma açılarında da aşınma oranlarında anlamlı bir farklılık olmamıştır.

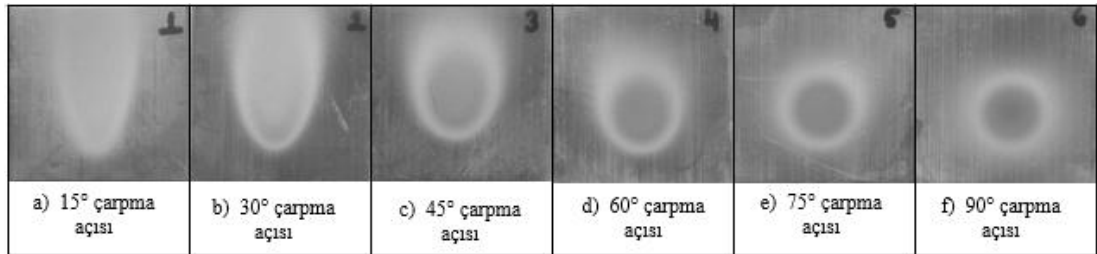


Şekil 7.3 Katı partikül erozyonunda aşınma oranının farklı çarpma açılarında aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: 3 bar, aşınma süresi: 15 s)

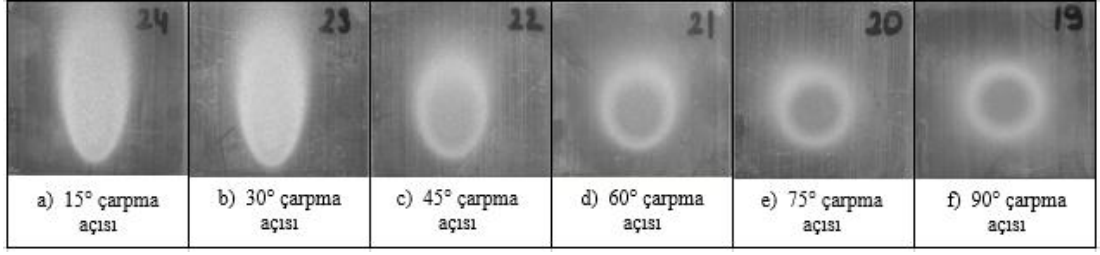
7.2.2. Aşınma izlerinin incelenmesi

HP Scanjet G2710 tarayıcısı yardımıyla, Şekil 7.4'te 120 mesh aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncı altında ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 7.5'te ise 60 mesh aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncı altında ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri gösterilmiştir.

Şekil 7.4 (f) ve 7.5 (f) 'de ana aşınma bölgesini daha koyu bir bölge olarak görmek mümkündür. Bu koyu bölgenin çevresinde daha açık renkli ikincil bölge vardır. 1,5 barda, normal çarpma açısında (90°) ve alt açılarda (30°) bu birincil ve ikincil bölgeler görülmektedir.

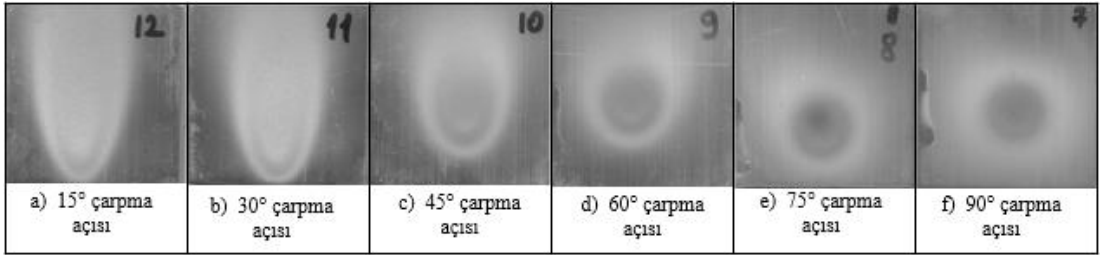


Şekil 7.4. 120 mesh aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncı altında ve 15°,30°,45°,60°,75°,90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri

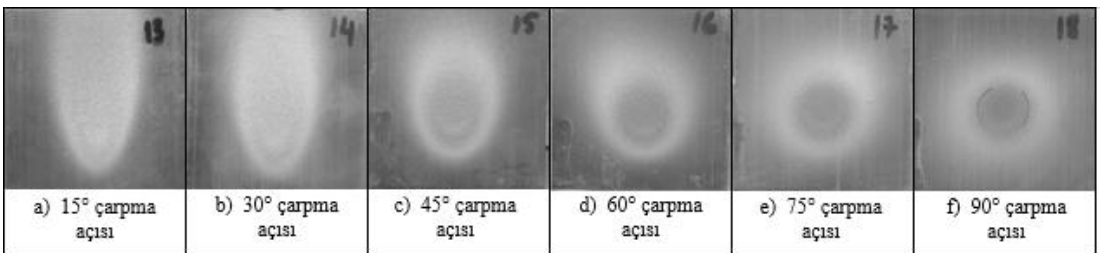


Şekil 7.5. 60 mesh aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncı altında ve 15°,30°,45°,60°,75°,90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri

Şekil 7.6'da 120 mesh aşındırıcı partiküllerin 3 bar püskürtme basıncı altında ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri verilmiştir. Şekil 7.7'de ise 60 mesh aşındırıcı partiküllerin 3 bar püskürtme basıncı altında ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri verilmiştir. Şekil 7.6 ve 7.7'deki karanlık bölgeler aynı kalmaktadır. Ancak ikincil alana odaklandığımızda, ikincil alanın Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'e kıyasla daha büyük olduğu açıkça görülmektedir. Yönlendirilmiş (çarpışmadan sonra) ve enerji kaybetmiş büyük partiküller, erozyona neden olacak kadar hızlı bir şekilde 3 bar altında 64 m/s hızla püskürtülmüştür. Bu sayede, 3 bar'lık basınç altında püskürtülen ve 64 m/s hıza sahip olan büyük partiküller için etkili olmayan koruyucu etki, hedef malzemelerin büyük ölçüde aşınmasına neden olmuştur.



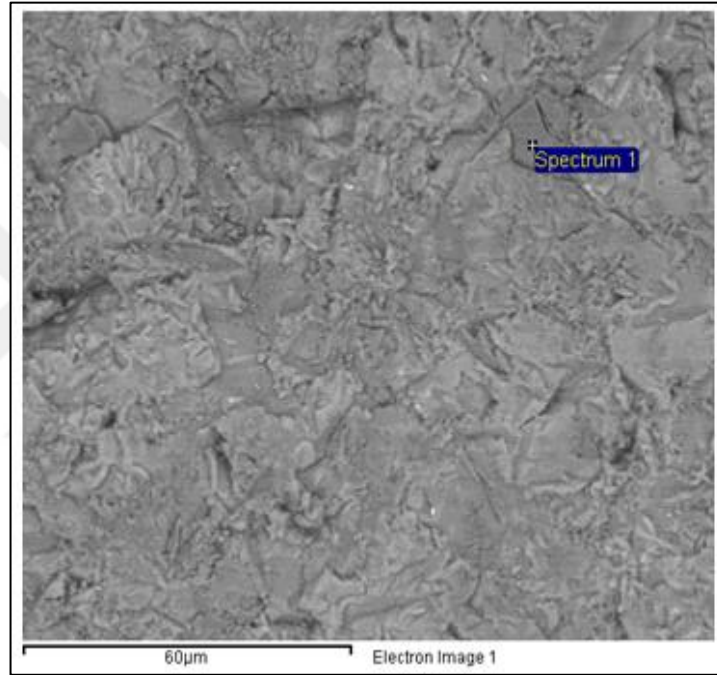
Şekil 7.6. 120 mesh aşındırıcı partiküllerin 3 bar püskürtme basıncı altında ve 15°,30°,45°,60°,75°,90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri



Şekil 7.7. 60 mesh aşındırıcı partiküllerin 3 bar püskürtme basıncı altında ve 15°,30°,45°,60°,75°,90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri

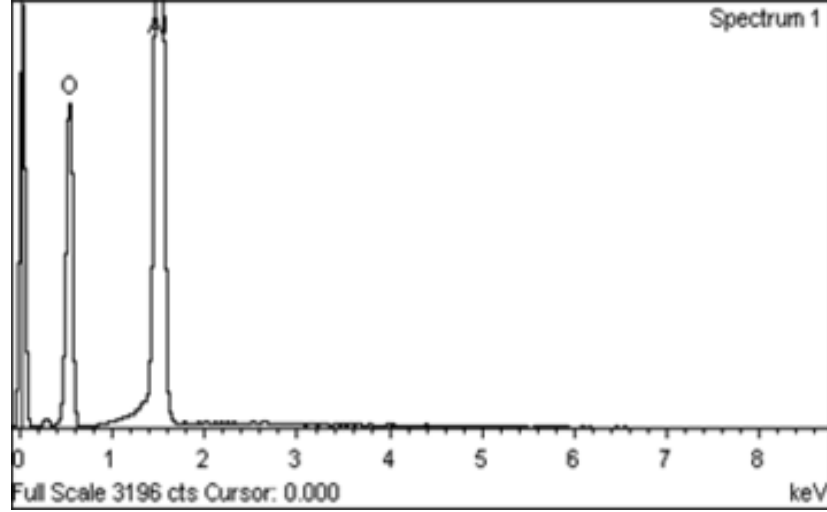
7.2.3. Elementsel analizler

Bu bölümde 1,5 bar ve 3 bar basınç altında 120 mesh ve 60 mesh boyutunda partiküller kullanılarak aşındırılmış AA6082-T6 alaşımının elementsel analizlerine yer verilmiştir. Elementsel analizler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile alınmıştır. Numunelerin elementsel analizleri SEM fotoğrafları ile beraber gösterilmiştir. Şekil 7.8’de 3 bar püskürtme basıncında ve 90° çarpma açısındaki 120 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 7.8. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 3 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh, aşınma süresi: 15 s)

Spektrum 1 ile gösterilen noktanın, AA6082-T6 alaşımına saplanan bir aşındırıcı partikül olduğu konusunda fikir yürütülmüştür. Bu doğrultuda, spektrum 1 ile gösterilen noktanın elementsel analizi yapılmıştır. Şekil 7.9’da belirtilen noktanın EDS spektrumu, Tablo 7.3’te ise elde edilen elementsel analiz sonuçları verilmiştir.



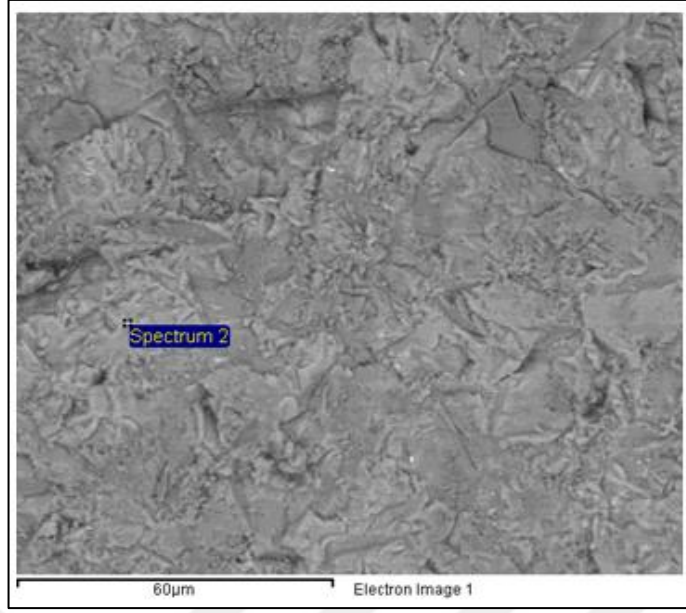
Şekil 7.9. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

Tablo 7.3. Spektrum 1 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları

Element	Kütlesel(%)	Atomik(%)
Oksijen (O)	43,57	56,56
Alüminyum (Al)	56,43	43,44
Toplam	100	100

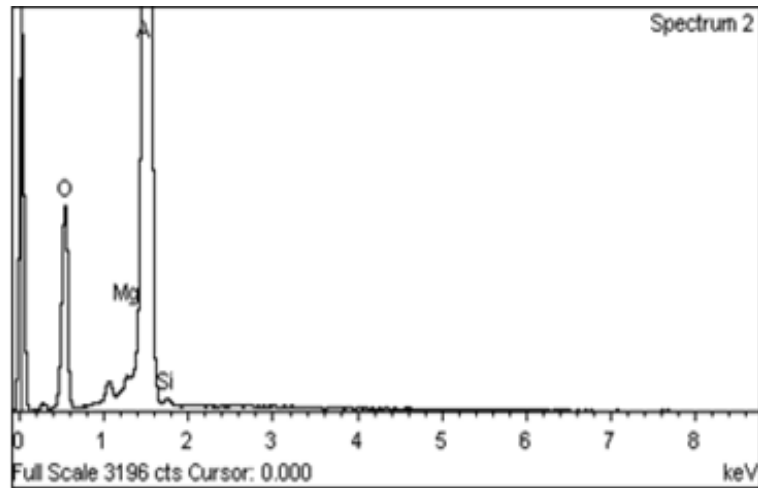
Elementsel analizler ve EDS spektrumu incelendiğinde, bu bölgede alüminyum ve oksijen elementlerinin bulunduğu görülmüştür. Bu doğrultuda SEM fotoğrafında gösterilen yapının, hedef malzeme yüzeyine saplanan bir alüminyum oksit partikülü olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 7.10'da da yine 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında 120 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı verilmiştir. SEM fotoğrafında spektrum 2 ile gösterilen açık gri renkli bölgenin EDS analizi alınmıştır.



Şekil 7.10. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 3 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh, aşınma süresi:15 s)

Spektrum 2 ile gösterilen noktanın, AA6082-T6 alaşımı olduğu konusunda fikir yürütülmüştür. Bu doğrultuda, spektrum 2 ile gösterilen noktanın elementsel analizi yapılmıştır. Şekil 7.11’de bu noktanın EDS spektrumu, Tablo 7.4’te ise elde edilen elementsel analiz sonuçları verilmiştir.



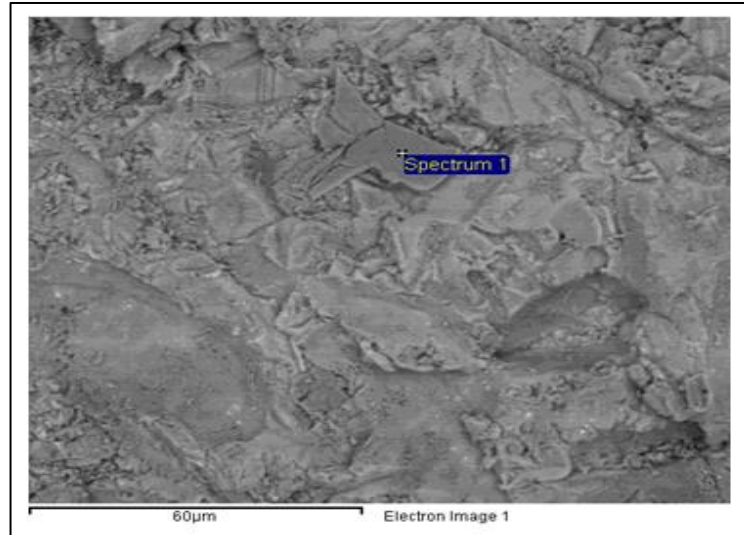
Şekil 7.11. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 2 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

Tablo 7.4. Spektrum 2 numaralı bölgenin elementel analiz sonuçları

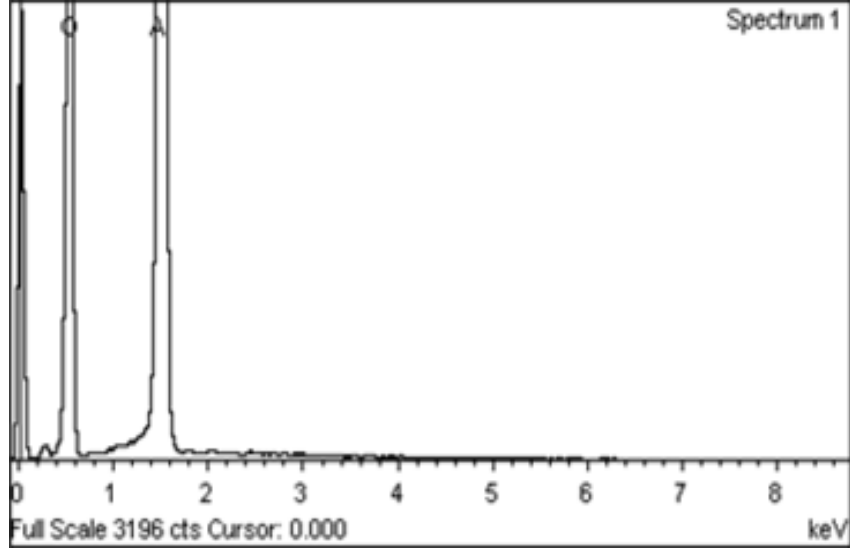
Element	Kütlesel %	Atomik %
Oksijen (O)	27,76	39,32
Magnezyum (Mg)	0,44	0,41
Alüminyum (Al)	71,20	59,79
Silisyum (Si)	0,59	0,48
Toplam	100	100

Yukarıda verilen analiz sonuçlarına istinaden bu fazın AA6082-T6 alüminyum alaşımı olduğu söylenilebilir.

Şekil 7.12’de 3 bar püskürtme basıncında ve 90° çarpma açısında 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı verilmiştir. SEM fotoğrafında spektrum 1 ile gösterilen koyu renkli bölgenin EDS analizi alınmıştır. Şekil 7.13’te bu noktanın EDS spektrumu, Tablo 7.5’te ise elde edilen elementel analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.12. 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı



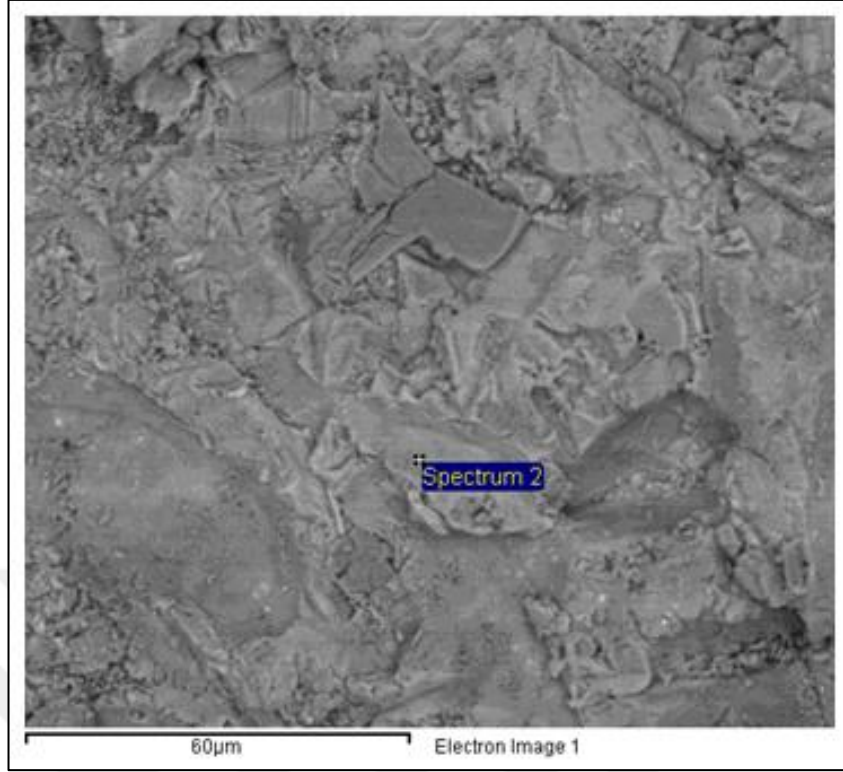
Şekil 7.13. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

Tablo 7.5. Spektrum 1 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları

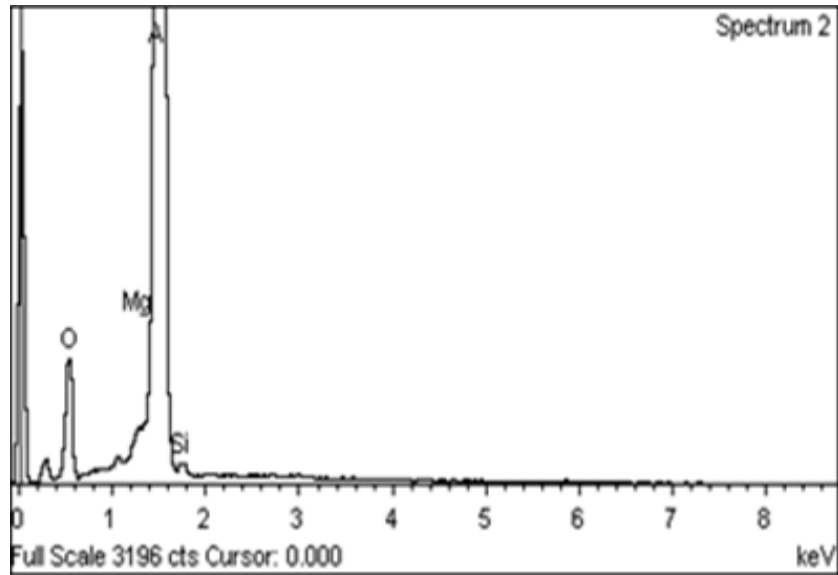
Element	Kütlesel %	Atomik %
Oksijen (O)	52,44	65,03
Alüminyum (Al)	47,56	34,97
Toplam	100	100

EDS analizi sonuçları bu yapının yüksek oranda alüminyum ve oksijen içerdiğini göstermektedir. Bu sonuç bu bölgenin alüminyum oksit partikülü olduğu anlamına gelmektedir.

Şekil 7.14'te 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı verilmiştir. SEM fotoğrafında spektrum 2 ile gösterilen açık gri renkli fazın EDS analizi alınmıştır. Şekil 7.15'te bu noktanın EDS spektrumu, Tablo 7.6'da ise elde edilen elementsel analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.14. 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı



Şekil 7.15. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 2 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

Tablo 7.6. Spektrum 2 numaralı bölgenin elementsel analiz sonuçları

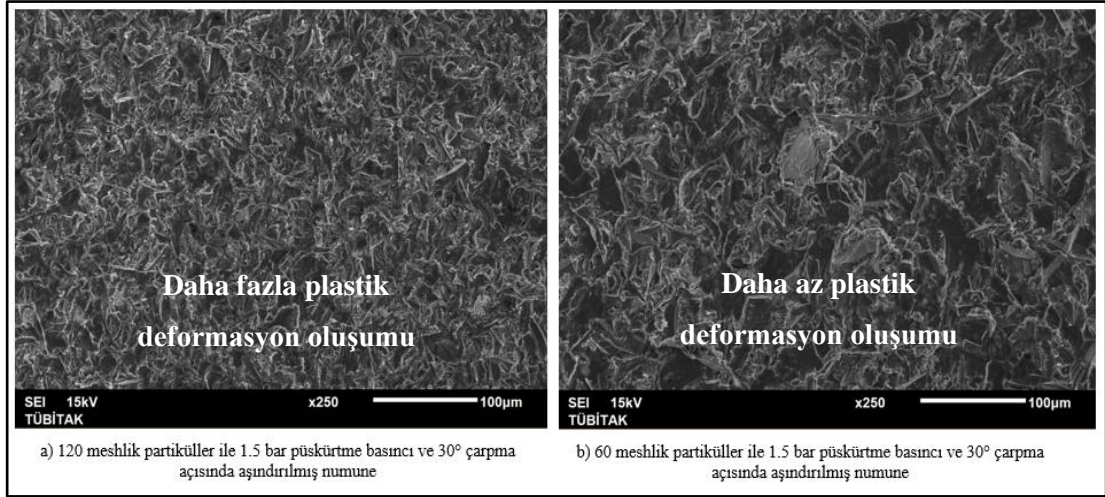
Element	Kütlesel(%)	Atomik(%)
Oksijen (O)	14,35	22,02
Magnezyum (Mg)	0,48	0,49
Alüminyum (Al)	84,32	76,74
Silisyum (Si)	0,85	0,75
Toplam	100	100

Bir önceki elementsel analiz sonuç tablosuna göre fotoğrafta koyu renkte görülen fazın alüminyum oksit partikülleri olduğu belirlenmiştir. Bu durumda EDS analizi yapılacak olan açık gri renkli fazın AA6082-T6 alaşımı olduğu düşünülmektedir. EDS analizi sonrasında yapının içerdiği element yüzdeleri incelendiğinde bu fazın AA6082-T6 alaşımı olduğu sonucuna varılmıştır.

7.2.4. SEM fotoğraflarının incelenmesi

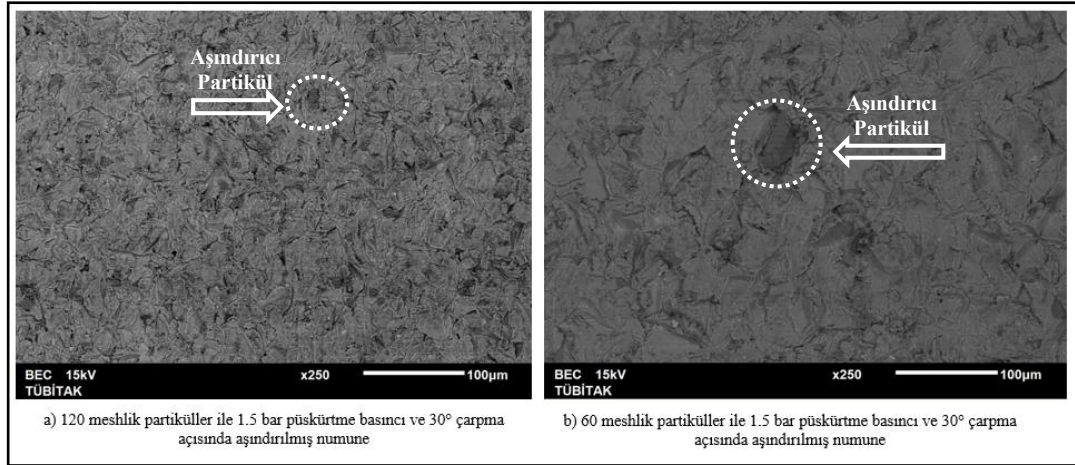
AA6082- T6 alüminyum alaşımı farklı partikül boyutları altında aşındırıldıktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve SEM fotoğrafları yardımıyla morfolojik analizler yapılarak aşınma davranışları irdelenmiştir.

Katı partikül erozyon deneylerinde AA6082-T6 malzemesindeki aşınma oranının partikül boyutu ile ters orantılı olarak değiştiği saptanmıştır. Partikül boyutundaki artış ile birlikte aşınma oranı azalmıştır. Bunun sonucunda 1,5 bar püskürtme basıncı altında maksimum aşınma oranı 30° çarpma açısında 120 mesh'lik partiküller ile aşındırılan numunede gerçekleşmiştir. Şekil 7.16 ve 7.17'de 120 mesh ve 60 mesh'lik partiküller ile 1,5 bar püskürtme basıncı altında ve 30° çarpma açısında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmedeki SEM fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar dikkatle incelendiğinde 120 meshlik partiküller kullanılarak yapılan aşındırmada hedef malzeme yüzeyinde daha fazla çatlak oluşumu ve plastik deformasyon görülmektedir.



Şekil 7.16. 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)

Şekil 7.16'daki SEM fotoğrafları incelendiğinde yüzey üzerinde görülen beyaz çizikler bize plastik deformasyon izlerini göstermektedir. Bu doğrultuda, 120 mesh boyutunda aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılmış yüzeyde daha fazla plastik deformasyon oluşumu tespit edilmektedir. Bununla birlikte 120 mesh'lik aşındırıcılar ile aşındırılmış yüzeyde oluşan plastik deformasyon izleri arasındaki mesafeleri daha az görülmektedir.

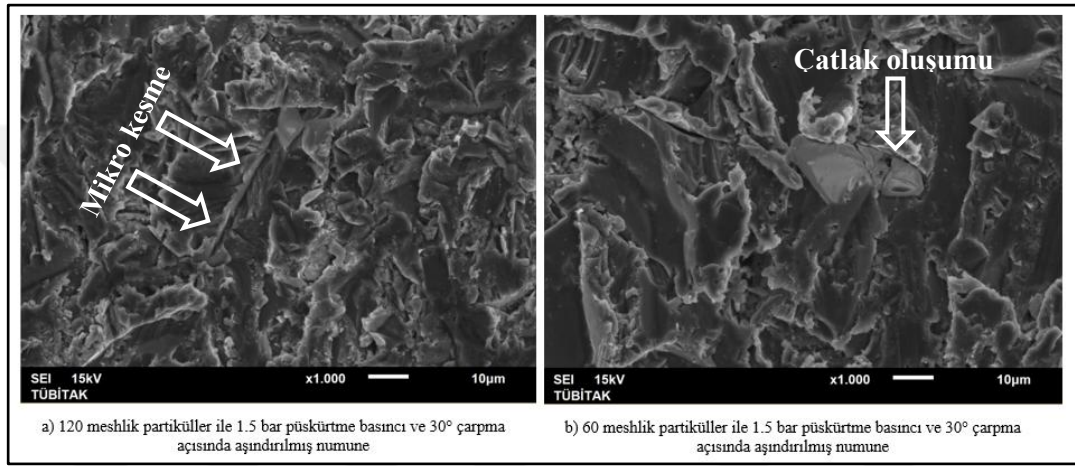


Şekil 7.17. 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı:30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)

Şekil 7.17'deki SEM fotoğrafları incelendiğinde 120 meshlik partiküller ile aşındırılan numune yüzeyine daha çok alümina partikülü saplandığı BSE modunda net bir şekilde anlaşılmaktadır. 60 meshlik partiküllerin 120 meshlik partiküllere

kıyasla, kırılma olasılığına sahip olmaları ve rotasyon eğilimlerinin daha fazla olması nedeniyle hedef yüzeye ulaşan partikül sayısı daha az olmuştur. Şekil 7.16'daki SEM fotoğrafına göre küçük partiküllerin daha kompakt yapıda hedef malzeme yüzeyine ulaşmış olduğu görülmüştür.

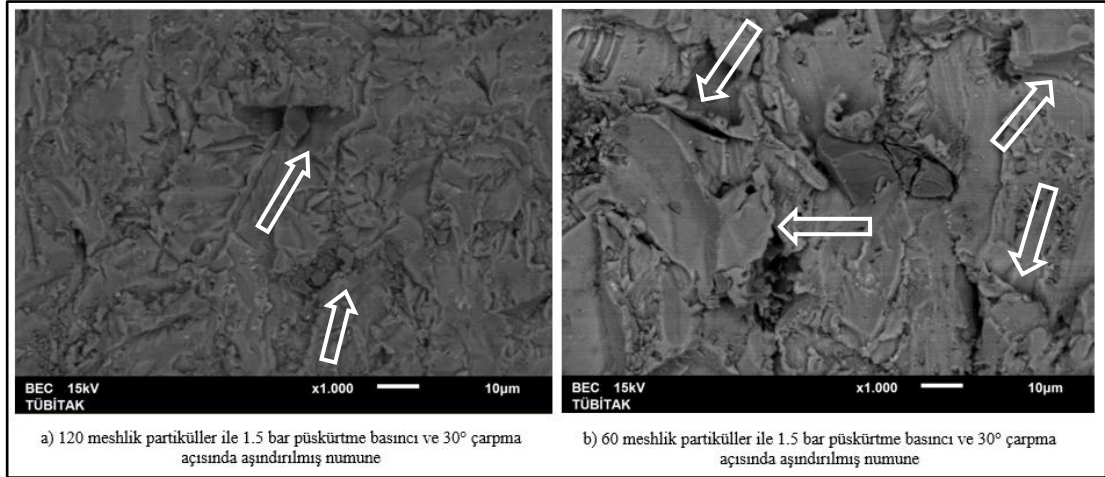
Şekil 7.18 ve 7.19'da 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmedeki SEM fotoğrafları (çarpma açısı:30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar) görülmektedir.



Şekil 7.18. 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)

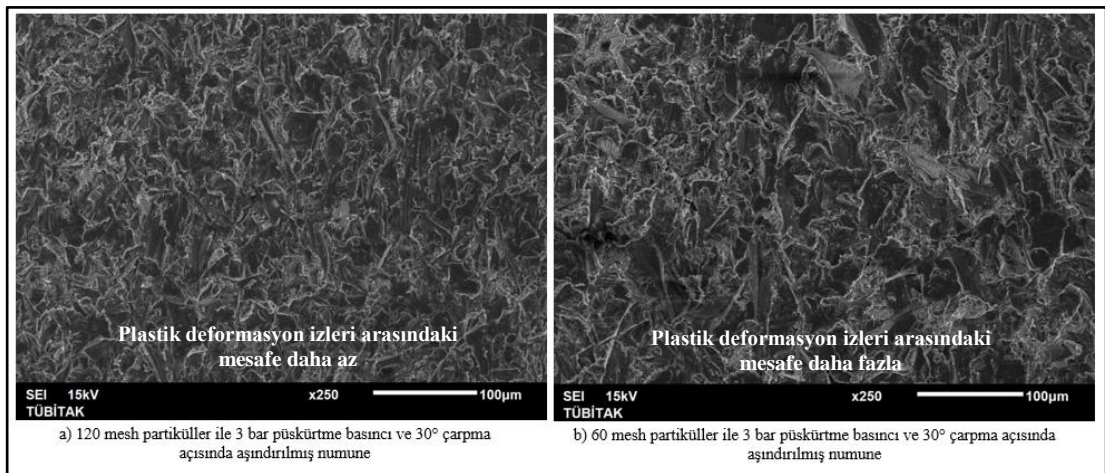
Şekil 7.18 (a)'daki SEM fotoğrafı incelendiğinde düşük çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin yüzeyi kazıyarak mikro kesme modu oluşturdukları görülmektedir. Şekil 7.18 (b)'de ise 60 mesh'lik partikülde yüzeye çarpma sonrası çatlak oluşumu saptanmıştır. Bu oluşum, büyük boyuttaki partiküllerin kompakt yapıda olmamaları nedeniyle kırılmaya eğilimli olduklarını kanıtlar niteliktedir.

Şekil 7.19'da verilen BSE modundaki SEM fotoğrafı dikkatle incelendiğinde 60 mesh'lik büyük partikülün hedef malzeme yüzeyine çarpıp parçalandığı daha net görülmektedir. Ayrıca rotasyon eğilimlerinden dolayı resim üzerinde ok işaretleriyle belirtildiği gibi farklı yönlerde deformasyon oluşturdukları tespit edilmiştir. 120 mesh'lik küçük partiküller ise benzer yönlerde mikro kesme mekanizmaları meydana gelmiştir.



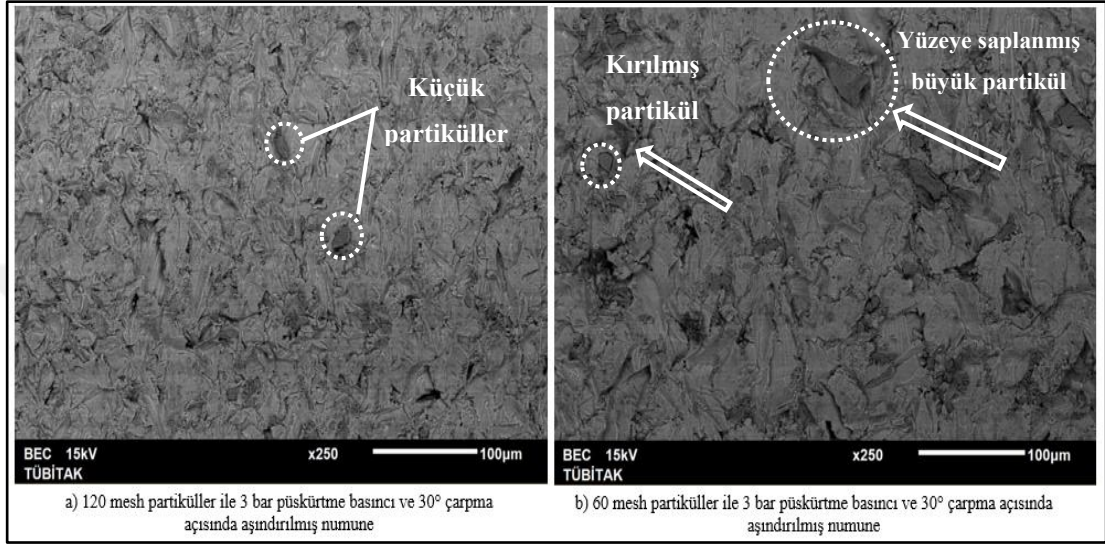
Şekil 7.19. 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı:30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)

Şekil 7.20’de 120 mesh ve 60 meshlik partiküller kullanılarak, 30° çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncı altında aşındırılmış numunelerin x250 büyütme altındaki SEM fotoğrafları verilmiştir. Şekil 7.21’de ise aynı şartlar altında aşındırılmış numelerin BSE modundaki SEM fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde partikül boyutuna bağlı olarak hedef malzeme yüzeyinde izler oluştuğu ve oluşan izlerin partikül boyutuna göre değişiklik gösterdiği saptanmıştır. Küçük boyutlu aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde yüzeyde meydana gelen mikro sürülme ve mikro kesme mekanizmaları sık ve derin izler olarak karşımıza çıkarken, büyük boyutlu partiküller kullanıldığında aynı mekanizmanın daha kaba olarak gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 7.20. 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı:30°, püskürtme basıncı: 3 bar)

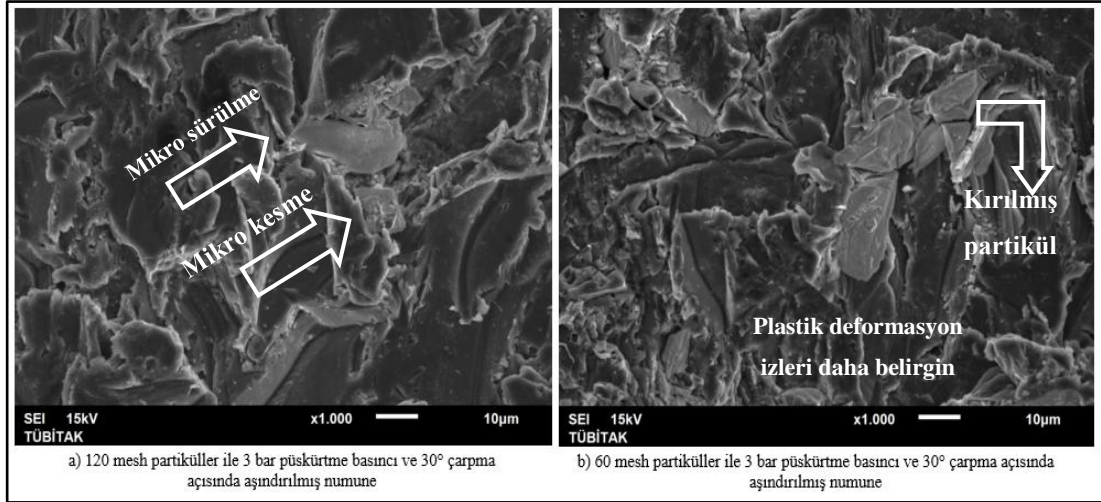
Şekil 7.20'deki SEM fotoğrafları incelendiğinde yine küçük partiküller ile aşındırılmış numune yüzeyinde, büyük partiküller ile aşındırılmış yüzeye nazaran daha fazla plastik deformasyon oluşumu gözlemlenmiştir. Küçük partiküller ile aşındırılmış numune yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyon izleri arası mesafe daha azdır.



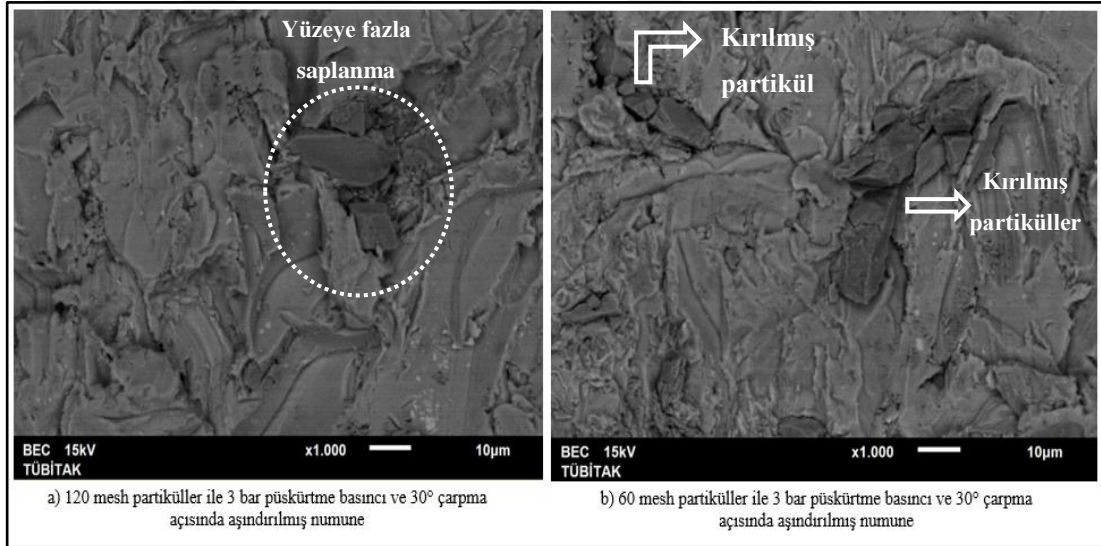
Şekil 7.21. 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x250 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar)

Şekil 7.21'de verilen BSE modundaki SEM fotoğrafları incelendiğinde 60 mesh ile aşındırılmış numune yüzeyine sapanan partiküller net bir şekilde görülmektedir. Büyük boyutlu partiküllerin kırılma zayıflığına sahip oldukları daha önceden belirtilmişti. Şekil 7.21 (b)'de hedef malzeme yüzeyinde kırılan partikül parçası görülmektedir.

Şekil 7.22'de 120 mesh ve 60 mesh'lik partiküller kullanılarak, 30° çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncı altında aşındırılmış numunelerin x1000 büyütmede SEM fotoğrafları verilmiştir. Şekil 7.23'de ise aynı şartlar altında aşındırılmış numelerin BSE modundaki SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.22. 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar)

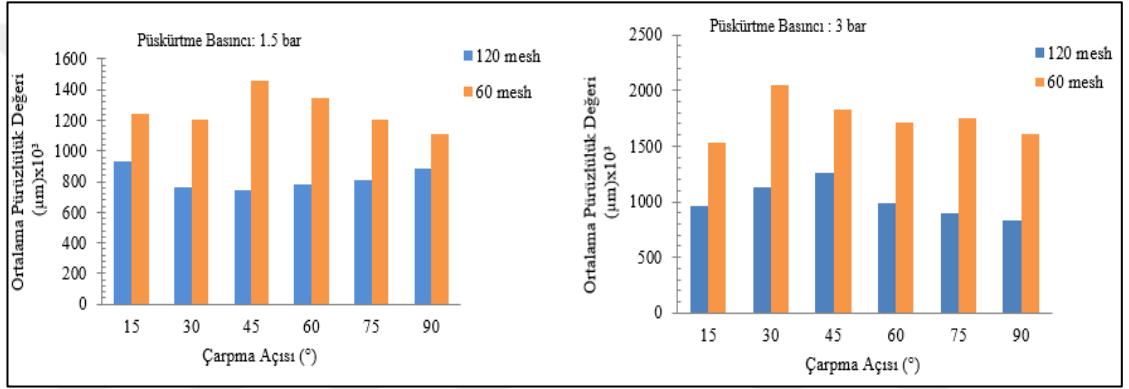


Şekil 7.23. 120 mesh ve 60 meshlik partiküller ile aşındırılmış numunenin x1000 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar)

Şekil 7.22 ve 7.23'te verilen SEM görüntüleri incelendiğinde büyük partiküller ile aşındırılmış yüzeylerde genel anlamda yüzeye çarpan partiküllerde meydana gelen çatlak oluşumundan ve daha belirgin plastik deformasyon izlerinden bahsedilebilir. Küçük partiküller ile aşındırılmış yüzeyde mikro kesme ve mikro sürülme modları karşımıza çıkmaktadır bununla birlikte BSE modunda partiküllerin yüzeye çok saplandığı tespit edilmiştir.

7.2.5. Farklı partikül boyutlarında aşınmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin incelenmesi

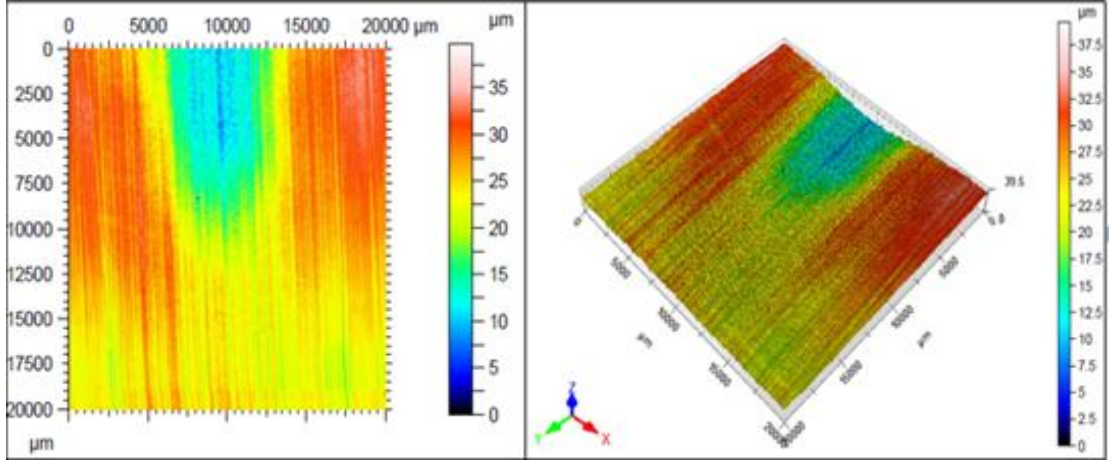
Şekil 7.24'te aşındırıcı partikül boyutunun ortalama pürüzlülük değerine etkisi grafikler halinde gösterilmiştir. Verilen grafiklerde 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı ayrı ayrı gösterilmiş olup bu basınç değerlerinde farklı çarpma açılarında, 60 ve 120 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan malzemelerin ortalama pürüzlülük değerleri kıyaslanmıştır. Veriler incelendiğinde her iki basınç değerinde ve her çarpma açısında 60 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan malzemenin ortalama yüzey pürüzlülüğünün 120 mesh boyutundakiler ile aşındırılana göre daha yüksek olduğu saptanmıştır.



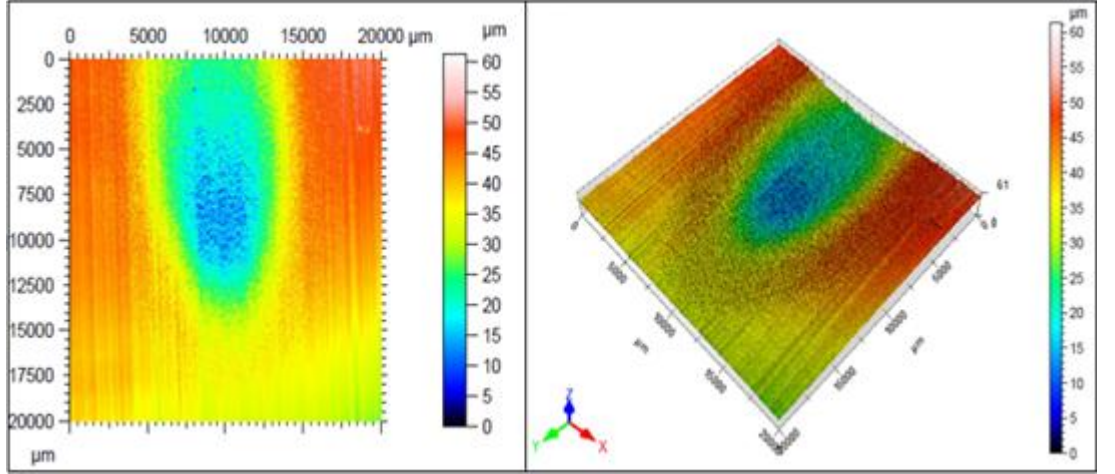
Şekil 7.24. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak ortalama pürüzlülük (R_a) değişimi

Şekil 7.25 ve 7.26'da 1,5 bar püskürtme basıncında, 15° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde 60 ve 120 mesh boyutlarında aşındırıcı partiküller kullanılmış, aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre cihazı yardımıyla alınmıştır. Şekiller incelendiğinde 60 mesh aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeyde, 120 mesh aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeye kıyasla daha fazla kırmızı yüzey (pürüzlülük miktarı fazla) oluşumu görülmüştür.

Ortalama pürüzlülük değerini gösteren skalalar incelendiğinde de, en yüksek pürüzlülük değerinin büyük boyutlu aşındırıcı (60 mesh) kullanıldığında oluştuğu gözlemlenmiştir.

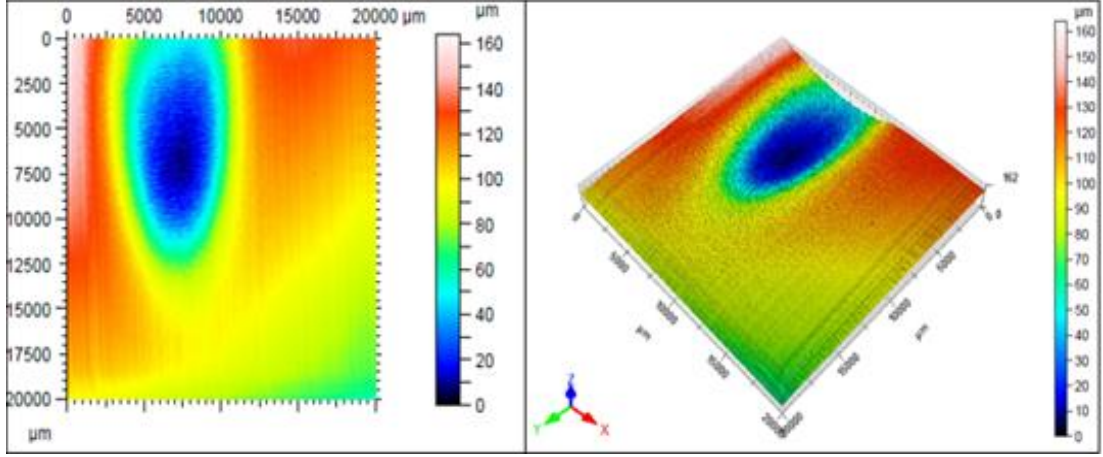


Şekil 7.25. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 15° çarpma açısında 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri

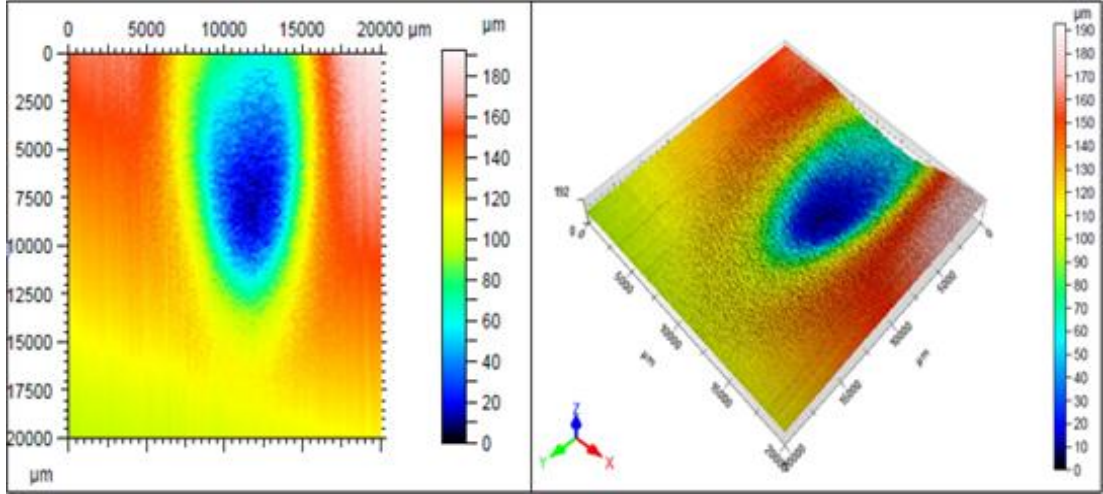


Şekil 7.26. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 15° çarpma açısında 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri

Şekil 7.27 ve 7.28’de 3 bar püskürtme basıncında, 15° çarpma açısında, 60 ve 120 mesh boyutunda aşındırıcılar ile aşındırılmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri verilmiştir. Görüntüler optik profilometre cihazı kullanılarak alınmıştır. Görüntüler incelendiğinde 60 mesh boyutunda aşındırıcı kullanımı ile görülen kırmızı bölgenin ve ortalama pürüzlülük değerinin, 120 mesh boyutunda aşındırıcı kullanımına kıyasla daha yüksek değerde olduğu görülmüştür.



Şekil 7.27. 3 bar püskürtme basıncında ve 15° çarpma açısında 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri



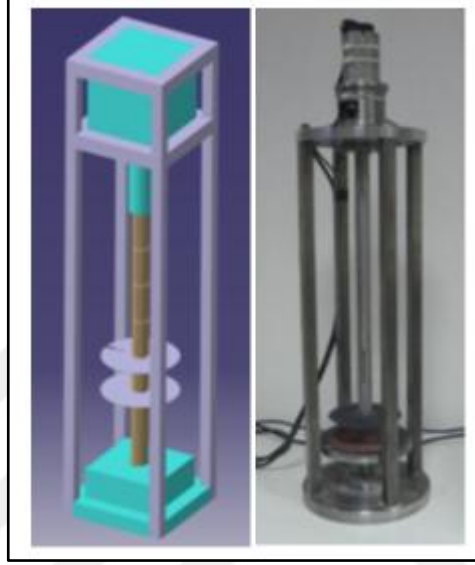
Şekil 7.28. 3 bar püskürtme basıncında ve 15° çarpma açısında 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri

7.3. Katı Partikül Erozyonunun Partikül Hızına Bağlı Değişimi

Bu bölümde AA6082-T6 alüminyum alaşımının farklı partikül hızlarındaki katı partikül erozyonu değişimi incelenmiştir. Farklı aşındırıcı partikül hızları, püskürtme basıncının değiştirilmesiyle elde edilmiştir. 1,5 bar ve 3 bar'lık püskürtme basınçları kullanılarak, 60 mesh (212-300 μm) ve 120 mesh (90-125 μm) boyutlarındaki Al_2O_3 aşındırıcı partiküllerin farklı hızlara ulaşması sağlanmıştır. Partikül erozyon testi 6 farklı çarpma açısında (15°,30°,45°,60°,75°,90°) gerçekleştirilmiş olup her numune 15 saniye aşındırılmıştır.

7.3.1. Çift disk yöntemi ile aşındırıcı partiküllerin hızlarının ölçülmesi

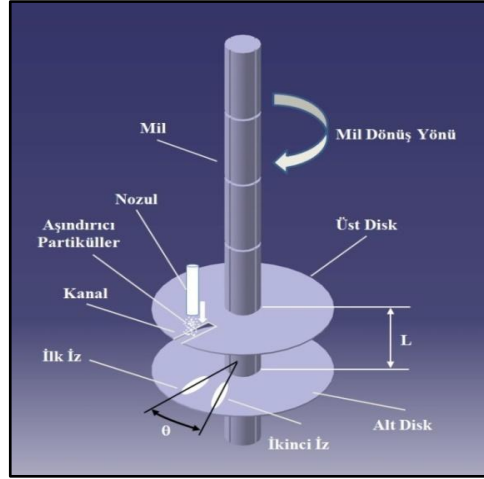
Deneysel çalışmada aşındırıcı partiküllerin hızları çift disk yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Bu yöntemde kullanılan deneysel cihaz matematiksel hesaplamalara göre imal edilmiş ve hız ölçümleri yapılmıştır. Şekil 7.29'da çift disk yöntemi deney düzeneğinin CAD çizimi ve gerçek resmi verilmiştir.



Şekil 7.29. Çift disk deney düzeneğinin CAD çizimi ve gerçek resmi [6]

Bu deney düzeneğinde bir mile kaynaklanmış alt alta iki adet disk bulunmaktadır. Üst diske aşındırıcı partiküllerin geçmesi için bir yarık açılmış, aynı izdüşümde alt disk de yarık şeklinde çizilmiştir. Diskler belirli bir devirde dönerken, nozul vasıtasıyla aşındırıcı partiküller üst diskteki yarıktan alt diske doğru püskürtülmüştür. Püskürtülen aşındırıcı partiküller dönme hareketinin etkisiyle alt disk üzerinde ikinci bir aşınma izini oluşturmuştur. İlk iz ile ikinci iz arasında oluşan açı (θ), aşağıda verilen formülde kullanılarak aşındırıcı partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresini hesaplamayı sağlamıştır. Bulunan süre değeri, iki disk arasındaki mesafeye bölünerek hız hesabı yapılmıştır.

Şekil 7.30'da partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler cihazın CAD çizimi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 7.30. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler [6]

Aşındırıcı partikül hızlarının hesaplanması için öncelikle disklerin dönüş hızı (n) ve aşınma izleri arasındaki açı (θ) ölçülerek partiküllerin birinci diskten ikinci diske ulaşma süresi (t) Denklem (7.9) yardımı ile hesaplanmıştır [6];

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (7.9)$$

t = Aşındırıcı partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi (sn)

θ = İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı (°)

n = Devir hızı (d/dk) 'nı temsil etmektedir. (Deneylerde 2000 d/dk kullanılmıştır).

Daha sonra hesaplanan süre, aşağıdaki Denklem (7.10)'da yerine koyularak aşındırıcı partiküllerin hızı bulunmuştur;

$$V = \frac{L}{t} \quad (7.10)$$

V = Aşındırıcı partiküllerin hızı (m/sn)

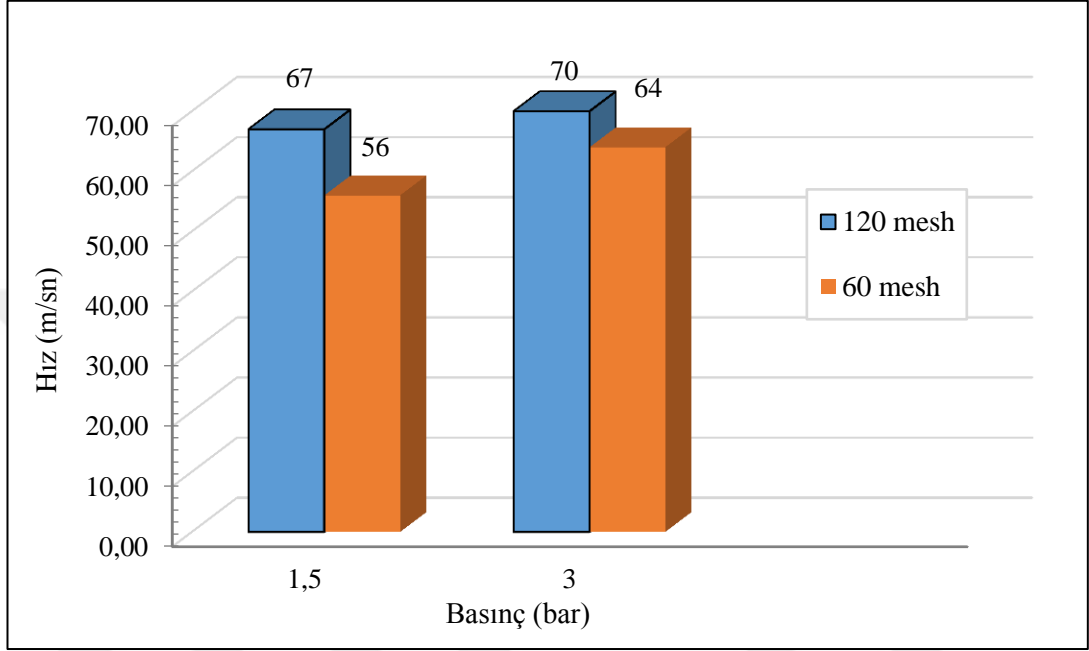
L = Diskler arası mesafe (m)

t = Aşındırıcı partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi (sn).

Yapılan hesaplamalar sonucunda; 60 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcının çarpma hızı 1,5 bar basınç altında 56 m/s, 3 bar basınç altında ise 64 m/s olarak

hesaplanmıştır. 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcının çarpma hızı ise 1,5 bar altında 67 m/s, 3 bar altında 70 m/s olarak hesaplanmıştır.

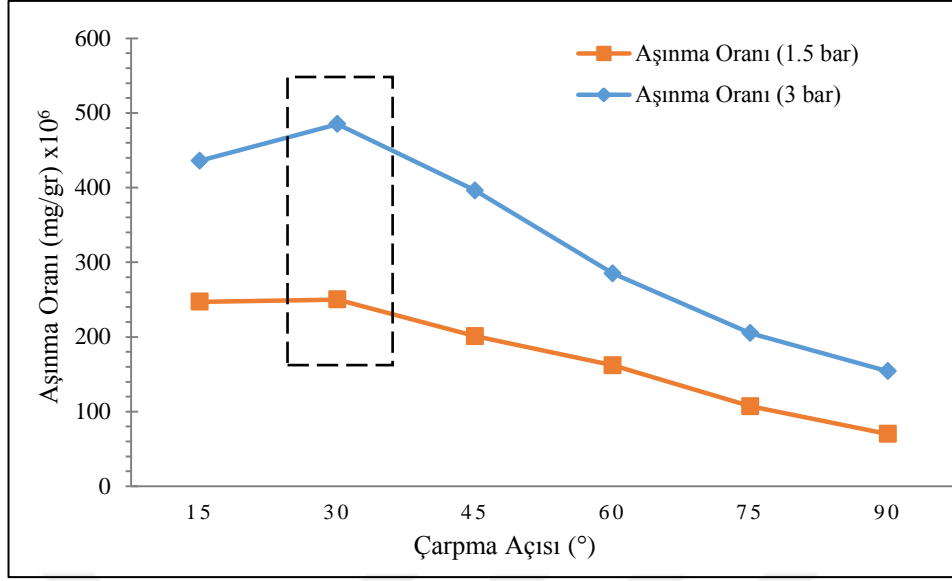
Şekil 7.31’de 60 mesh ve 120 meshteki aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar ve 3 bar basınç altında çarpma hızları grafik yardımıyla gösterilmiştir.



Şekil 7.31. 60 mesh ve 120 meshteki aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar ve 3 bar basınç altında çarpma hızları

7.3.2. Aşınma oranlarının incelenmesi

Bahsedildiği üzere, bu çalışmada aşındırıcı partikül hızının erozif aşınmaya ve malzemenin yüzey pürüzlülüğüne etkileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Malzemenin aşınma oranı daha önce bahsedildiği üzere hedef malzemenin ağırlık kaybını (mg) hedef malzeme üzerine aşınma süresi boyunca çarpan aşındırıcı partikül ağırlığına (g) bölünmesiyle bulunmaktadır. Şekil 7.32’de, aşınma oranları sonuçları sunulmuştur. Aynı boyutlara sahip partikül grubunun (120 mesh) 1,5 ve 3 bar’lık iki farklı basınç altında püskürtülmüştür. Bu da bize 67 ve 70 m/sn olarak iki farklı partikül hızı vermektedir.



Şekil 7.32. 120 mesh partikül boyutu ile 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncında oluşan aşınma oranlarının karşılaştırılması

İlk olarak, aynı büyüklüğe sahip olan partiküllerin çarpma hızlarında küçük bir farkın olduğunu söylemek mümkündür. 120 mesh boyutundaki partiküller 3 bar'lık hava basıncı altında, 1,5 bar'lık hava basıncı ile kıyaslandığında daha yüksek çarpma hızına sahiptir.

Beklendiği gibi, daha yüksek püskürtme basıncı, daha düşük püskürtme basıncına kıyasla aynı büyüklükteki partiküllere daha fazla momentum ve ivme kazandırmak için daha uygundur. Sonuç olarak, aynı boyutta (120 mesh) iki farklı partikül grubu oluşturulmuştur. Birinci gruptaki partiküller 67 m/sn'lik bir çarpma hızına sahip, ikinci gruptaki partiküller ise 70 m/s'lik bir çarpma hızına sahiptir. Öte yandan, yüksek hızlı partiküller 6,73 g/s'lik bir kütleli debiye sahipken düşük hızdaki partiküller 3,48 g/s'lik bir kütleli debiye sahiptir. Sonuç olarak, düşük püskürtme basıncının düşük partikül hızına ve düşük kütleli debiye neden olduğunu söylemek mümkündür. Öte yandan, 3 bar'lık yüksek püskürtme basıncı, yüksek partikül hızına ve yüksek kütleli debiye neden olmaktadır.

- 120 mesh partikül büyüklüğündeki partiküllerin 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncında hızları arasındaki oran:

$$\text{Hız Oranı} = \frac{70 \text{ m/sn}}{67 \text{ m/sn}} = 1,04$$

- 120 mesh partikül büyüklüğündeki partiküllerin 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncında kütleli debileri arasındaki oran:

$$\text{Kütleli Debi Oranı} = \frac{6,7 \text{ g/sn}}{3,48 \text{ g/sn}} = 1,93$$

Bu nedenle partiküllerin hızında büyük bir değişikliğin olmadığını ancak malzemelerin aşınma oranlarındaki ana farklılık nedeninin, aynı büyüklüğe sahip partiküllerin kütleli debi oranlarındaki farklılıktan kaynaklandığını söylemek mümkün olabilir. Şekil 7.26'da, en yüksek aşınma oranlarının 15° ve 30° arasındaki çarpma açılarında olduğu görülmüştür. Beklendiği gibi, sünek alüminyum düşük çarpma açılarında daha yüksek aşınma oranları vermektedir. 30°den yüksek çarpma açılarında, aşınma oranları daha düşük değerlere sahiptir.

30°de, yüksek partikül hızındaki aşınma oranı düşük partikül hızındaki aşınma oranının 1,94 katıdır. Bu değer çok ilginçtir, çünkü 1,94, hızlar oranı 1,04'ten büyük ölçüde daha yüksektir. Yüksek hızlı partiküller, düşük hızlı partiküllere kıyasla büyük ölçüde daha yüksek aşınma oranına yol açar. Partiküllerin geometrisinin küre olduğunu ve 120 mesh'lik küre partiküllerinin çapının 108 µm olduğunu varsayarsak, yüksek ve düşük hız arasındaki kinetik enerjinin oranı 1,09 olarak hesaplanır.

$$E_{k(3 \text{ bar})} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times (54 \mu\text{m})^3 \right] \times (3,92 \text{ g/cm}^3) \times (70 \text{ m/sn})^2 = 6,33 \times 10^{-6} \text{ J}$$

$$E_{k(1,5 \text{ bar})} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times (54 \mu\text{m})^3 \right] \times (3,92 \text{ g/cm}^3) \times (67 \text{ m/sn})^2 = 5,80 \times 10^{-6} \text{ J}$$

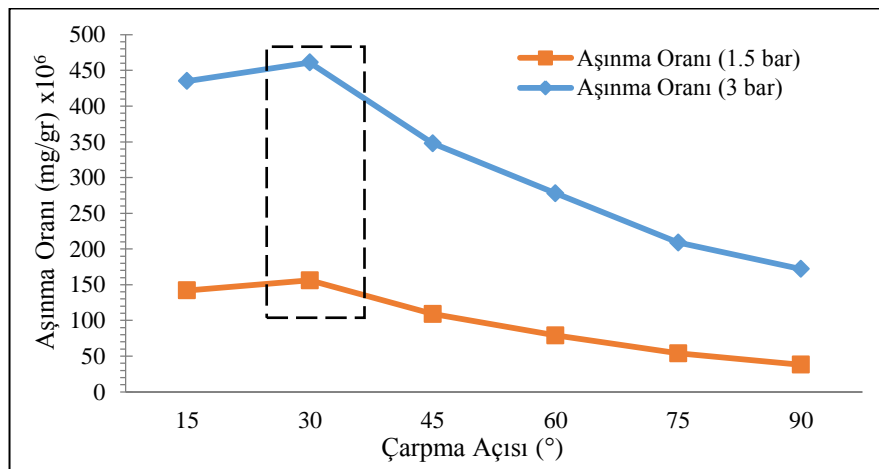
$$\text{Kinetik Enerji Oranı} = \frac{6,33 \times 10^{-6}}{5,80 \times 10^{-6}} = 1,09$$

Sonuç olarak, yüksek ve düşük hızdaki partiküllerin kinetik enerjileri arasındaki oranın çok büyük olmamasına rağmen, aşınma oranlarında önemli bir farkın olduğunu söylemek mümkündür. Bu noktada partiküllerin kütleli debilerinin aşınma oranları üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu yorumu yapılabilir. 1,5 bar'lık basınç altında püskürtülen 120 mesh'lik (küçük partikül) tanecikler, 67 m/s'lik bir hızla 3,48 g/s'lik bir kütleli debi elde etmiştir. Diğer taraftan, 3 bar'lık basınç altında püskürtülen aynı partiküller 70 m/s'lik bir hızla 6,73 g/s'lik bir kütleli

debi elde etmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi, partiküllerin kütleli debileri arasındaki oran 1,93'tür. Bu sonuç malzemelerin aşınma oranlarına çok yakındır. Daha yüksek kütle akışı, daha yüksek erozyon anlamına gelir. Katı partikül erozyonunu aşındırıcı partiküller ile etkileşimden sonraki aşınma olarak tanımladığımızda, yüksek kütleli debide yüksek aşınma oranlarının elde edilmesi normaldir.

Daha yüksek bir kütleli debiye sahip olan partiküller aynı zamanda daha yüksek bir hıza sahiptir. Yani çok fazla sayıda partikül yüksek kütleli debiyle ve daha yüksek bir hız ile tekrar tekrar hedef malzemeye çarpmaktadır. Bu iki etki, Şekil 7.32'de görülen iki aşınma oranı arasında daha yüksek aşınma oranlarının elde edilmesinin ana sebebidir.

Şekil 7.33'te, 60 mesh partikül boyutuna sahip partiküllerin aşınma oranları gösterilmektedir. Bu partiküller 1,5 ve 3 bar'lık hava basıncı altında püskürtülmüştür. Bu basınçlar altında püskürtülen partiküllerin çarpma hızları sırasıyla 56 m/s ve 64 m/s olarak bulunmuştur. Ayrıca partiküllerin kütle akış hızları sırasıyla 5,70 g/s ve 7,15 g/s olarak hesaplanmıştır. Maksimum aşınma oranları, 64 m/s hıza sahip partiküller için 15° - 30° arasındaki çarpma açılarındadır. 56 m/s hıza sahip partiküller için benzer sonuçlar çıkarılmıştır ve 15° - 30° arasındaki çarpma açılarındadır maksimum aşınma oranı tespit edilmiştir. Genel olarak, en yüksek aşınma oranı sünek malzemeler için 15° - 30° bandında olduğu görülmüştür, bu nedenle elde edilen sonuçların sünek malzeme için önceki çalışma ile aynı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7.33. 60 mesh aşındırıcı partikül ile 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basınçlarında oluşan aşınma oranlarının karşılaştırılması

Şekil 7.33'te 30° de 3 bar püskürtme basıncı altında meydana gelen aşınma oranı, 1,5 bar püskürtme basıncı altında meydana gelen aşınma oranının 3,16 katıdır. Bu oran, Şekil 7.33'teki her çarpma açısı için yaklaşık aynıdır.

- 60 mesh partikül büyüklüğündeki partiküllerin 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basınçlarında hızlar arasındaki oran:

$$\text{Hız Oranı} = \frac{64 \text{ m/sn}}{56 \text{ m/sn}} = 1,14$$

- 60 mesh partikül büyüklüğündeki partiküllerin 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basınçlarında kütleli debileri arasındaki oran:

$$\text{Kütleli Debi Oranı} = \frac{7,15 \text{ g/sn}}{5,70 \text{ g/sn}} = 1,25$$

Partiküllerin geometrisinin küre olduğunu ve 60 mesh küre partiküllerinin çapının 256 µm olduğunu varsayarsak, yüksek ve düşük hız arasındaki kinetik enerjinin oranı 1,3 olarak aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$E_{k(3 \text{ bar})} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times (128 \mu\text{m})^3 \right] \times (3,92 \text{ g/cm}^3) \times (64 \text{ m/sn})^2 = 7,05 \times 10^{-5} \text{ J}$$

$$E_{k(1,5 \text{ bar})} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times (128 \mu\text{m})^3 \right] \times (3,92 \text{ g/cm}^3) \times (56 \text{ m/sn})^2 = 5,39 \times 10^{-5} \text{ J}$$

$$\text{Kinetik Enerji Oranı} = \frac{7,05 \times 10^{-5}}{5,39 \times 10^{-5}} = 1,3$$

Yukarıda belirtildiği gibi, yüksek ve düşük hızların aşınma oranları arasındaki oran 3,16'dır. Bu oran, hızlar ve kütleli debiler arasındaki orandan çok farklıdır. Dolayısıyla bu oranlar ile aşınma oranları arasında yakın bir ilişki olduğunu söylemek mümkün değildir.

Şekil 7.33'teki aşınma oranları arasındaki orantının sebebini anlamak için, Şekil 7.32 ve Şekil 7.33'ün sonuçları karşılaştırılmalıdır. Şekil 7.32'deki sonuçları incelediğimizde; 3 bar'da püskürtülen 120 mesh partiküller 70 m/s'lik bir hızla yaklaşık olarak maksimum 485×10^{-6} mg/g aşınma oranına neden olduğu görülmektedir. Aynı durum Şekil 7.33'te incelendiğinde, 60 mesh büyüklüğünde

partiküller, 3 bar'da püskürtüldüğünde, 64 m/s'lik bir hızla, yaklaşık olarak 470×10^{-6} mg/g civarında aşınma oranına neden olduğu görülmüştür. Bu sonuç 120 mesh büyüklüğündeki partiküllerin aşınma oranıyla hemen hemen aynıdır.

Her bir parçacığın kinetik enerjisini karşılaştırdığımızda, bu iki partikül arasındaki oran yaklaşık 11,13 olarak aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$Ek_{(60 \text{ mesh})} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times (128 \mu\text{m})^3 \right] \times (3,92 \text{g/cm}^3) \times (64 \text{m/sn})^2 = 7,05 \times 10^{-5} \text{J}$$

$$Ek_{(120 \text{ mesh})} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times (54 \mu\text{m})^3 \right] \times (3,92 \text{g/cm}^3) \times (70 \text{m/sn})^2 = 6,33 \times 10^{-6} \text{J}$$

$$\text{Kinetik Enerji Oranı} = \frac{7,05 \times 10^{-5}}{6,33 \times 10^{-6}} = 11,13$$

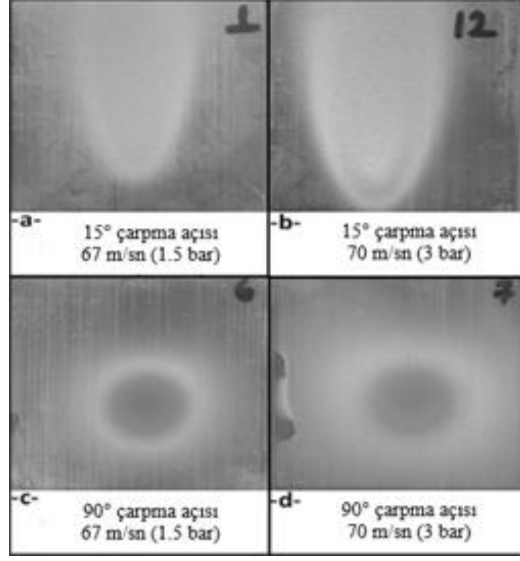
Her büyük partikül, küçük partiküllere kıyasla 11,13 kat daha yüksek kinetik enerjiye sahiptir. Bu oran çok büyük bir fark olmasına rağmen aşınma oranlarının sonuçları yaklaşık olarak aynıdır. Dolayısıyla, büyük ölçüde daha yüksek kinetik enerjiye sahip olan daha büyük partiküllerin, yüksek kinetik enerjileri kadar etkili bir şekilde hedef numuneyi erozyona uğratmadığını söylemek mümkündür. Diğer duruma baktığımızda daha ilginç bir sonuç gözlemlenir. Şekil 7.32'de, 1,5 bar'da püskürtülen 120 mesh'lik küçük partiküller, 67 m/s'lik bir hızla, yaklaşık 250×10^{-6} mg/g maksimum aşınma oranına neden olur. Aynı durum Şekil 7.33'te araştırıldığında, 60 mesh'lik büyük partiküller, 1,5 bar'da püskürtüldüğünde, 56 m/s'lik bir hızla, yaklaşık olarak 150×10^{-6} mg/g'lik maksimum aşınma oranına neden olduğu görülmektedir. Bu ikinci sonuç, Şekil 7.32'de fikir ayrılığının ana sebebini verir. 1,5 bar'da, daha büyük partiküller küçük partiküllere kıyasla çok küçük aşınma oranına neden olur.

Daha küçük partiküllerin, daha büyük olanlara kıyasla daha yüksek bir çarpışma hızında yüksek kırılma dayanıklılığı veren daha kompakt bir yapıya sahip olduğu daha önce belirtilmişti. Katı partikül erozyonu süresince, küçük partiküllerin yapısal bütünlüklerini koruyarak enerjilerini hedef malzemeye aktarmaları, kırılma ve rotasyon eğilimlerinin büyük partiküllerden daha düşük olması sebebiyle hedef malzemede büyük partiküllere kıyasla daha yüksek aşınma oranları veren daha yüksek plastik deformasyonlara neden olmaktadır. Büyük partiküllerin daha büyük kinetik enerjiye sahip olmasına rağmen kırılma ve rotasyon eğilimi bir dezavantajdır.

Bunlar, kinetik enerjisinin hedef malzemeye aktarılmasını engelleyen olası nedenlerdir. Öte yandan diğer bir etki olarak da hedef malzeme yüzeyine çarpan partiküllerin geri sekerek hedef malzeme yüzeyine gönderilen yeni partiküllerle çarpışması “koruyucu kalkan etkisi”nden bahsedilebilir.

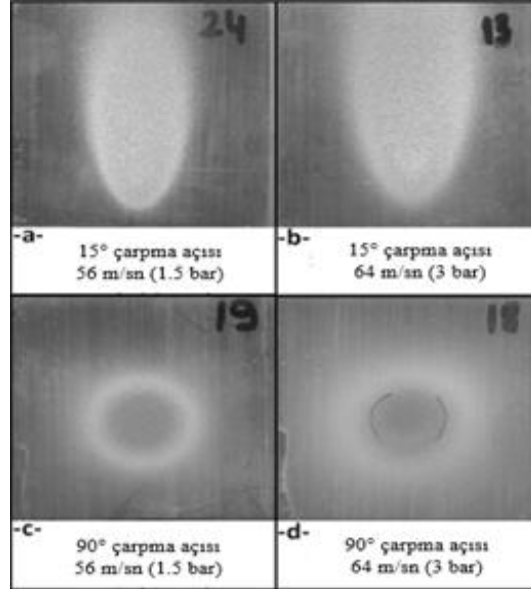
7.3.3. Aşınma izlerinin incelenmesi

Katı partikül erozyonunun aşındırıcı partikül boyutuna bağlı değişimi anlatılırken 1,5 ve 3 bar’lık püskürtme basınçlarında 120 mesh ve 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak erozyona uğratılmış numunelerin yüzeylerindeki aşınma izleri tüm çarpma açıları için verilmişti. Bu bölüm özelinde hız değişiminin aşınma izleri üzerindeki etkisine değinmek amacı ile yalnızca minimum ve maksimum açılardaki (15° ve 90°) görüntüleri verilecektir. Şekil 7.34’te 1,5 ve 3 bar’lık püskürtme basıncı altında, 120 mesh aşındırıcı partiküllerin 15° ve 90° ’lik çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyinde oluşturduğu aşınma izleri verilmiştir. Şekil 7.34’te ana aşınma bölgesini daha koyu olarak görmek mümkündür ve bu bölgenin çevresinde daha açık renkli ikincil bölge bulunmaktadır. Şekil 7.34 (c) ve Şekil 7.34 (d)’de, 1,5 ve 3 bar’lık püskürtme basıncında ve normal çarpma açısında (90°) erozyon şartları altında, bu iki farklı bölge açıkça görülebilir. Şekil 7.34 (c) ‘de koyu alanın sınırı daha belirgindir ve açık renkte olan ikincil bölgenin kalınlığı, Şekil 7.34 (d)’ye kıyasla daha küçüktür. Öte yandan, erozyon süresince saçılan partiküller hakkında daha fazla kanıt göstermektedir. Çünkü koyu alanlar aynı çapa sahipken, bu alanın sınırı Şekil 7.34 (c)’deki gibi belirgin değildir. Ayrıca ikincil bölge, Şekil 7.34 (c)’ye kıyasla daha yüksek bir kalınlığa sahiptir. Bu birincil koyu bölge alanı aynı zamanda Şekil 7.35’te 1,5 bar’da da aynı kalır. İkincil alana odaklandığımızda, ikincil alanın Şekil 7.35’te Şekil 7.34’e kıyasla büyük ölçüde daha büyük olduğu açıkça görülmektedir. Bu bölge erozyon sırasında partiküllerin saçılmasının sonucudur. 1,5 bar altında püskürtülen ve çarpışma sonrası enerji kaybetmiş ve yön değiştirmiş bu büyük partiküller bu bölgeyi oluşturmuştur. Şekil 7.34 (a) ve 7.34 (b)’de, Şekil 7.34 (c) ve 7.34 (d)’de olduğu gibi aynı durum gözlemlenmiştir. Şekil 7.34 (d)’deki erozyon sırasında daha geniş ve uzun elips krater oluşmuştur. Yukarıda açıklandığı gibi, daha açık renkli daha geniş ikincil bölge, belirsiz bir sınırla koyu bölgeyi kaplamaktadır. Şekil 7.34 (d)’deki resim, partikül erozyonu sırasında koruyucu kalkan etkisinin ve saçılmanın kanıtıdır.



Şekil 7.34. 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 120 mesh aşındırıcı partiküllerin 15° ve 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri

Şekil 7.35'te 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altındaki, 60 mesh aşındırıcı partiküllerin 15° ve 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri verilmiştir.

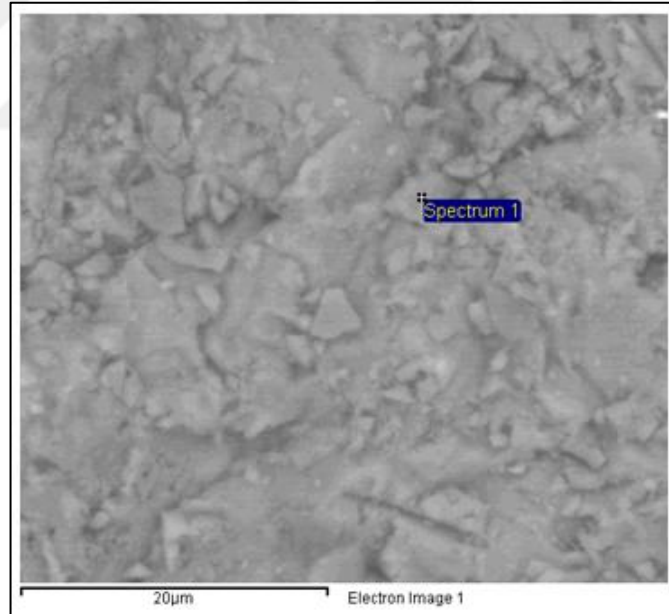


Şekil 7.35. 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 60 mesh aşındırıcı partiküllerin 15° ve 90° çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyindeki aşınma izleri

Benzer sonuçlar Şekil 7.35'te de görülür. Daha yüksek püskürtme basıncı altında nozuldan püskürtülen partiküllerin saçılmasının daha büyük bölgede olması beklenir. Bu durumda, 3 bar basınç altında püskürtülen numunelerde daha büyük ikincil alan elde etmek normaldir. Ancak, özellikle, Şekil 7.35 (a), büyük partiküllerin koruyucu kalkan etkisine önemli bir kanıt oluşturan açık bir dar alana sahiptir.

7.3.4. Elementsel analizler

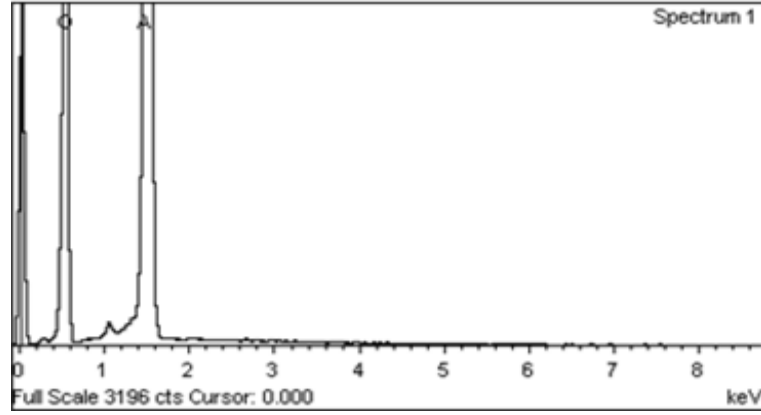
Bu bölümde 1,5 bar altında 120 mesh boyutunda partiküller kullanılarak aşındırılmış AA6082-T6 alaşımının elementsel analizlerine yer verilmiştir. Elementsel analizler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile alınmıştır. Numunelerin elementsel analizleri SEM fotoğrafları ile beraber gösterilmiştir. Şekil 7.36'da 1,5 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında 120 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 7.36. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh, aşınma süresi: 15 sn)

Fotoğrafta spektrum 1 ile işaretlenen bölgenin AA6082-T6 numune yüzeyine saplanmış bir aşındırıcı partikül olduğu düşünülmüştür. Bu doğrultuda SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 ile gösterilen noktanın EDS analizi yapılmıştır. Şekil 7.37'de bu

noktanın EDS spektrumu, Tablo 7.7’de ise EDS analizi ile elde edilen elementsel analiz sonuçları verilmiştir.

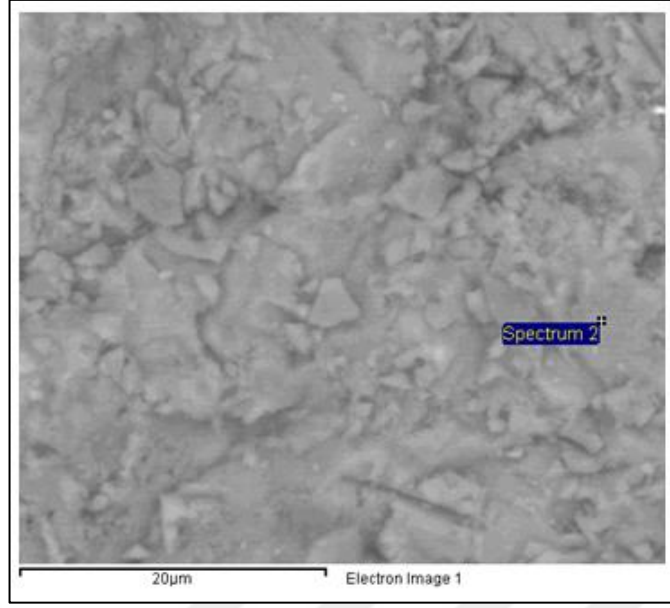


Şekil 7.37. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

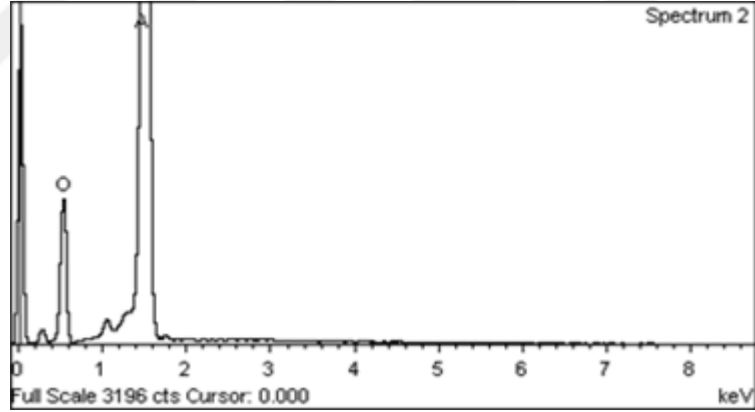
Tablo 7.7. EDS analizi ile elde edilen elementsel analiz sonuçları

Element	Kütle %	Atomik %
Oksijen (O)	48,29	61,16
Alüminyum (Al)	51,71	38,84
Toplam	100	100

EDS spektrumu ve elementsel analiz sonuçları incelendiğinde, bu bölgede alüminyum ve oksijen elementlerinin varlığından söz edilebilir. Aşındırıcı partikül olarak alüminyum oksit kullanıldığı göze alınırsa, SEM fotoğrafında görülen yapının numune yüzeyine saplanmış bir alüminyum oksit partikülü olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 7.38’de 1,5 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında 120 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 15 sn boyunca aşındırılan numunenin SEM fotoğrafı verilerek, SEM fotoğrafında spektrum 2 ile gösterilen açık gri renkli fazın EDS analizi alınmıştır. Şekil 7.39’da bu noktanın EDS spektrumu, Tablo 7.8’de ise EDS analizi ile elde edilen elementsel analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.38. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh, aşınma süresi: 15 sn)



Şekil 7.39. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 2 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

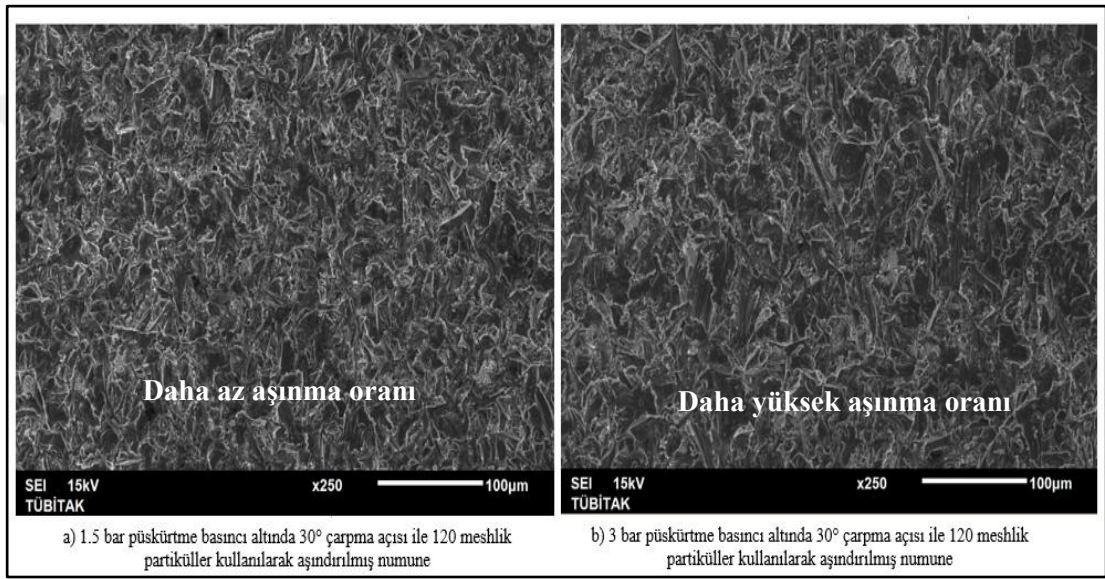
Tablo 7.8. EDS analizi ile elde edilen elementsel analiz sonuçları

Element	Kütle %	Atomik %
Oksijen (O)	24,59	35,49
Alüminyum (Al)	75,41	64,51
Toplam	100	100

EDS analizi sonuçları incelendiğinde bu yapının büyük oranda alüminyum ve oksijen içerdiğini görülmektedir. Bu sonuçlara göre bu yapının numune yüzeyine saplanmış alüminyum oksit partikülü olduğu söylenebilir.

7.3.5. SEM fotoğraflarının incelenmesi

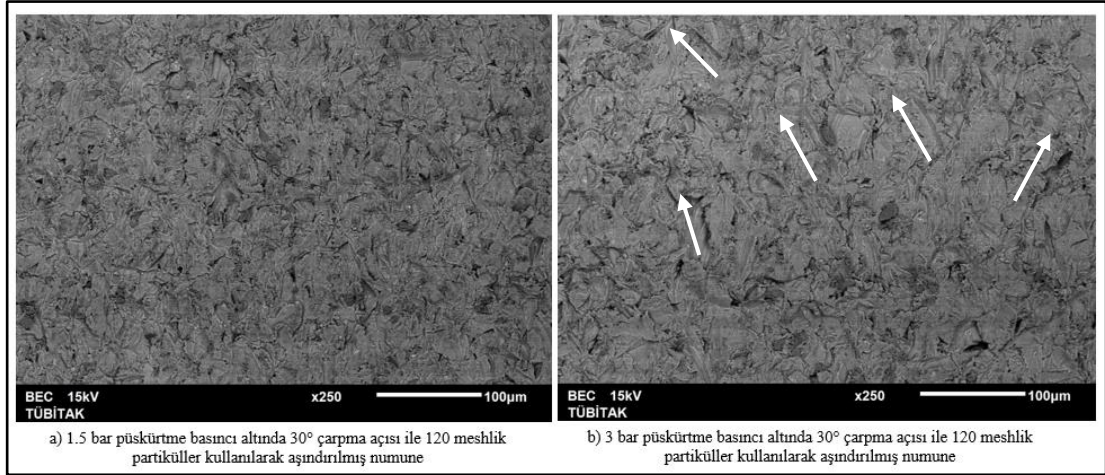
Şekil 7.40'ta 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 120 meshlik partiküller ve 30° çarpma açısı kullanılarak aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.40. 1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 120 mesh)

Şekil 7.40'daki SEM fotoğrafları incelendiğinde 3 bar basınç ile püskürtülen aşındırıcı partiküllerin daha yüksek aşınma oranına neden olduğu görülmektedir. Daha yüksek aşınma oranı, basıncın artması ile artan kütleli debi ile ilişkilidir.

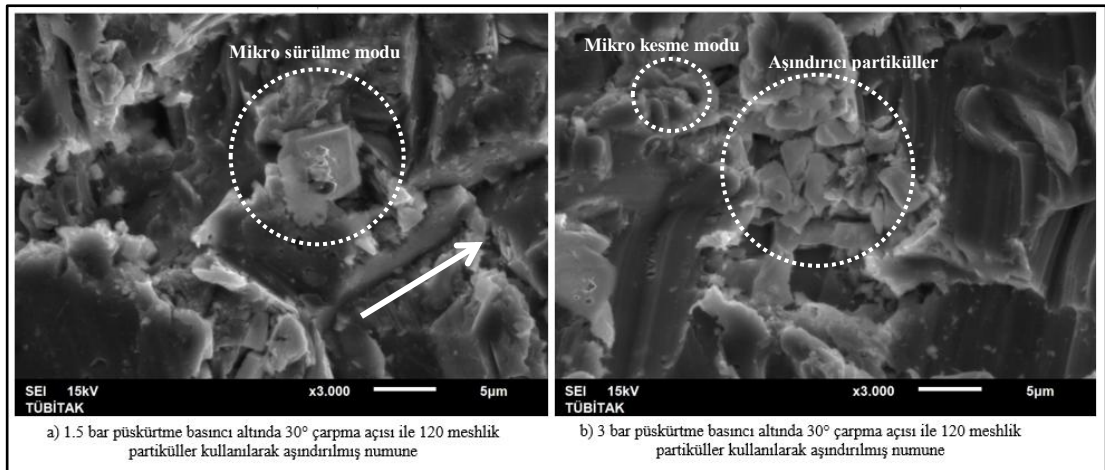
Şekil 7.41'de 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 120 meshlik partiküller ve 30° çarpma açısı kullanılarak aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.41. 1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 120 mesh)

Şekil 7.41’de BSE modundaki SEM fotoğrafları incelendiğinde 1,5 bar ve 3 bar basınç altında malzeme yüzeyine püskürtülen aşındırıcı partiküller net bir şekilde görülmektedir. Şekil 7.41 (b)’de ok işaretleri yardımıyla mikro sürülme mekanizmaları gösterilmiştir.

Şekil 7.42’de 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 120 meshlik partiküller ve 30° çarpma açısı kullanılarak aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları verilmiştir.

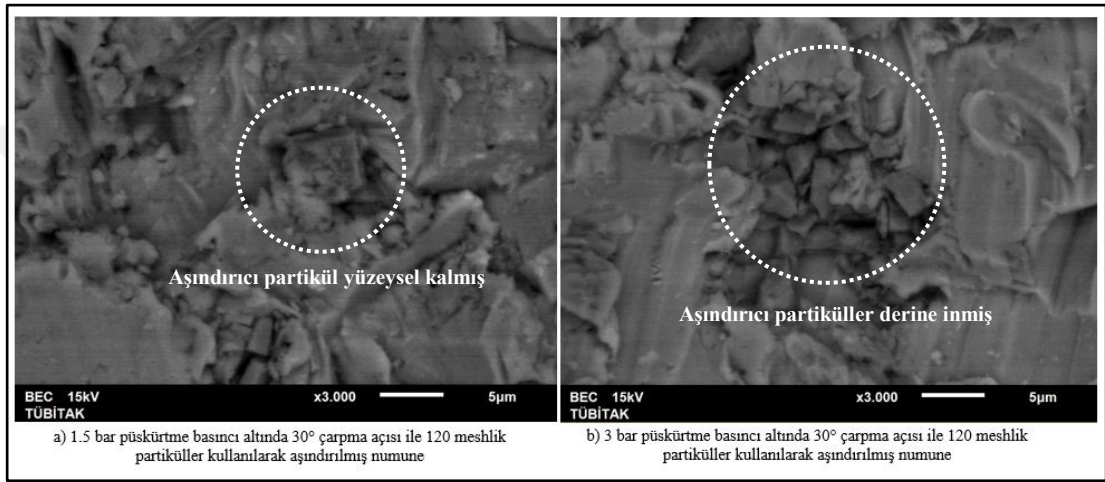


Şekil 7.42. 1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 120 mesh)

Şekil 7.42’deki SEM fotoğrafları incelendiğinde mikro sürülme ve mikro kesme modları daha net bir şekilde görülmektedir. Şekil 7.42 (a)’da aşındırıcı partikülün

mikro sürülme mekanizması ile hedef malzeme yüzeyini aşındırdığı görülmüştür ve bir başka aşınma izi de ok işareti ile gösterilmiştir. Bununla beraber Şekil 7.42 (b)'de hedef malzeme yüzeyinde daha fazla aşınma oranına neden olabilecek bir çok aşındırıcı partikül göze çarpmaktadır.

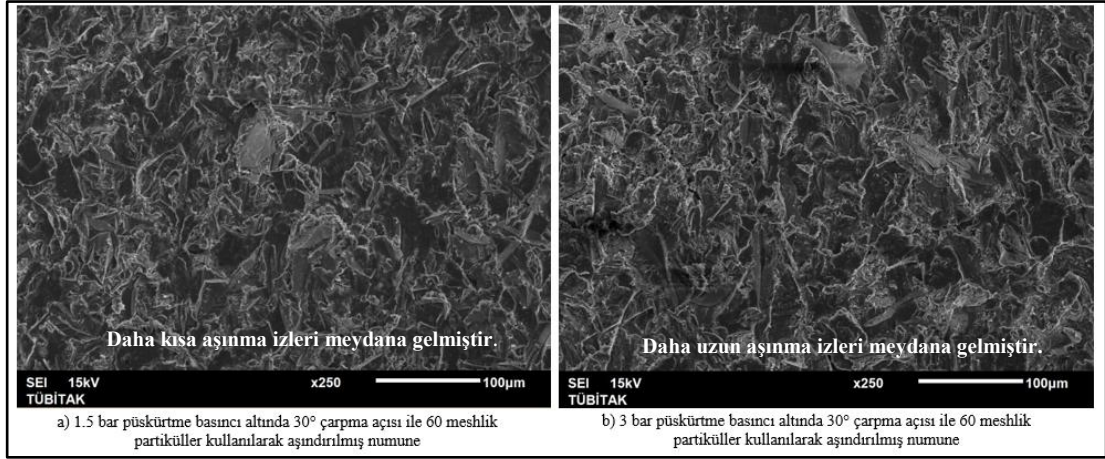
Şekil 7.43'te 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 120 meshlik partiküller ve 30° çarpma açısı kullanılarak aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.43. 1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 120 mesh)

Şekil 7.43'teki BSE modu incelendiğinde ise, 3 bar basınç ile püskürtülen aşındırıcı partiküllerin 1,5 bar basınç ile püskürtülen aşındırıcı partiküllere göre yüzeyde daha fazla aşınma oranına ve plastik deformasyona neden olacak şekilde daha derine ulaştıkları farkedilmiştir. 1,5 bar altında aşındırılan numunenin aşınma izleri 3 bar basınç altında aşındırılan numunedeki aşınma izlerine göre daha kısadır. SEM fotoğrafları ile elde edilen tespitler doğrultusunda 1,5 bar'lık basınç altında numunenin daha az aşındığı ve basınç artışı ile birlikte aşınma miktarının arttığı söylenilebilir.

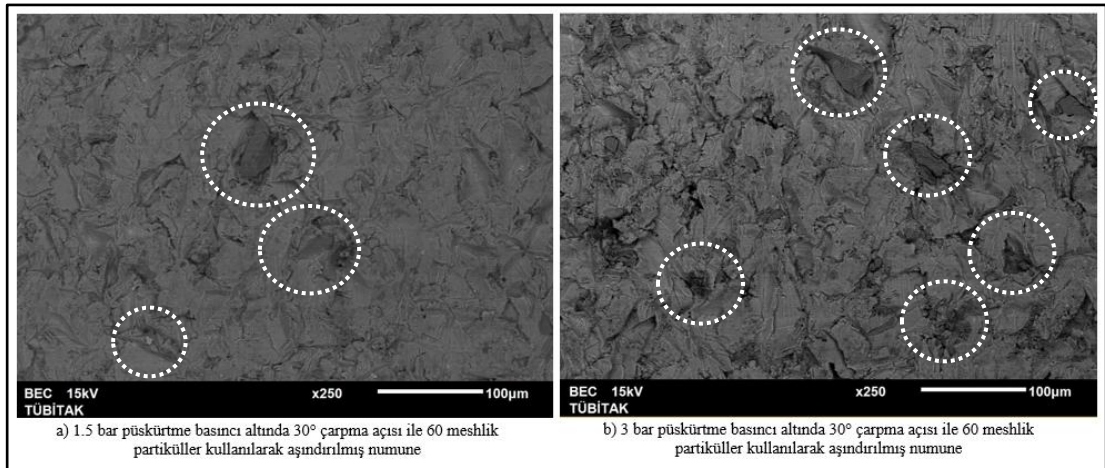
Şekil 7.44'te 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 60 meshlik partiküller ve 30° çarpma açısı kullanılarak aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.44. 1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 60 mesh)

Şekil 7.44'te verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde 3 bar basıncı altında aşındırılan numune yüzeyinde, 1,5 bar altında aşındırılan numuneye göre daha uzun aşınma izleri meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca 3 bar basınçta altında oluşan aşınma oranı daha fazladır.

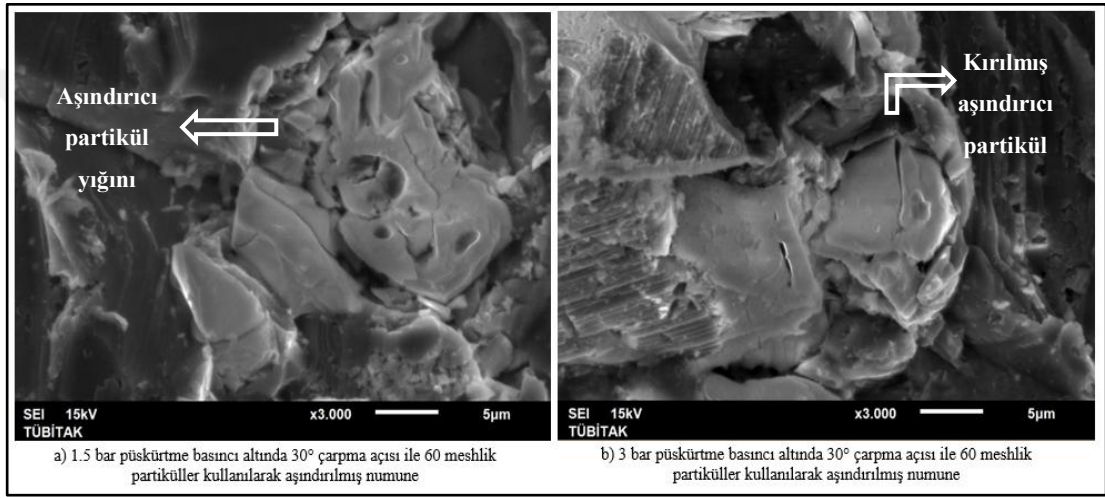
Şekil 7.45'te 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 60 meshlik partiküller ve 30° çarpma açısı kullanılarak aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.45. 1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede ve BSE modunda SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 60 mesh)

Şekil 7.45'teki SEM görüntüleri incelendiğinde 3 bar püskürtme basıncı altında aşındırılmış hedef malzeme yüzeyinde, 1,5 bar püskürtme basıncı altında aşındırılmış malzeme yüzeyine kıyasla daha fazla partikül olduğu ve yüzeyde daha fazla deformasyon meydana geldiği açıkça görülmektedir. Hedef malzeme yüzeylerine saplanan partiküllerden bazıları daire içinde gösterilmiştir.

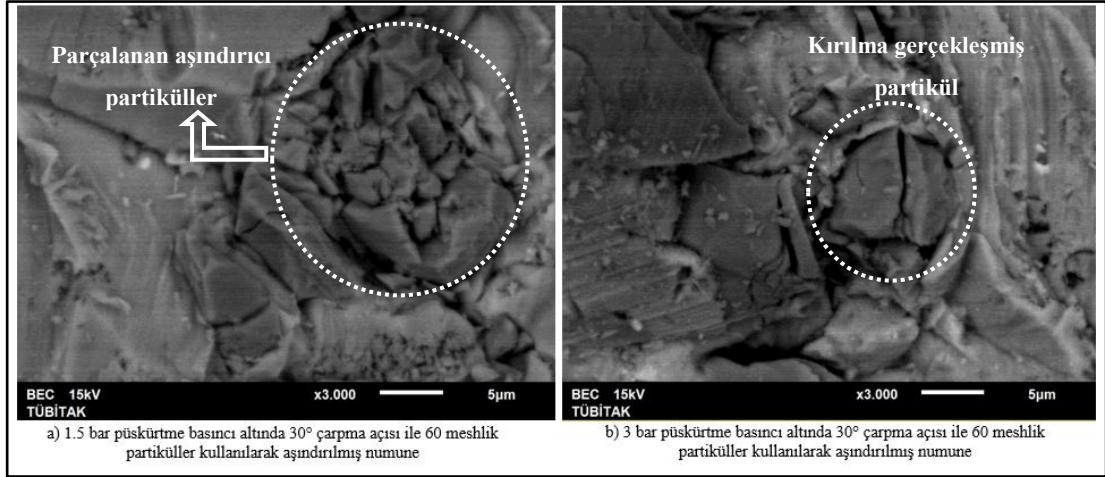
Şekil 7.46'da 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 60 meshlik partiküller ve 30° çarpma açısı kullanılarak aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.46. 1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 60 mesh)

Şekil 7.46'da verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde 3 bar basınç altında yüksek bir hızla hedef malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı partikülün malzeme yüzeyine çarptığı anda veya aşındırma esnasında kırıldığı söylenilebilir. 60 meshlik büyük partikülün hedef malzeme yüzeyine çarptığı göz önünde bulundurulduğunda, büyük partiküllerin kırılma zafiyetleri sebebiyle bu davranış biçimi beklenen bir durumdur.

Şekil 7.47'de 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında, 60 meshlik partiküller ve 30° çarpma açısı kullanılarak aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede BSE modundaki SEM fotoğrafları verilmiştir. BSE modundaki SEM fotoğraflarında aşındırıcı partiküller daha net bir şekilde görülebilmektedir.

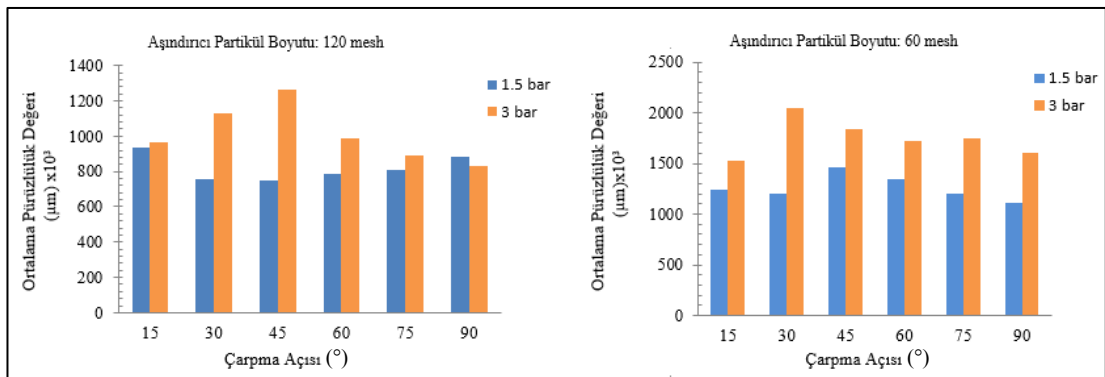


Şekil 7.47. 1,5 ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede ve BSE modundaki SEM fotoğrafları (çarpma açısı: 30°, partikül büyüklüğü: 60 mesh)

Şekil 7.47’deki BSE modunda ise parçalara ayrılan aşındırıcı partikülleri daha net bir şekilde görmek mümkündür. Ayrıca yine 3 bar basıncı altında aşındırıcı partiküllerin numune yüzeyini daha derinden aşındırarak daha yüksek aşınma oranına neden olduğu söylenilebilir.

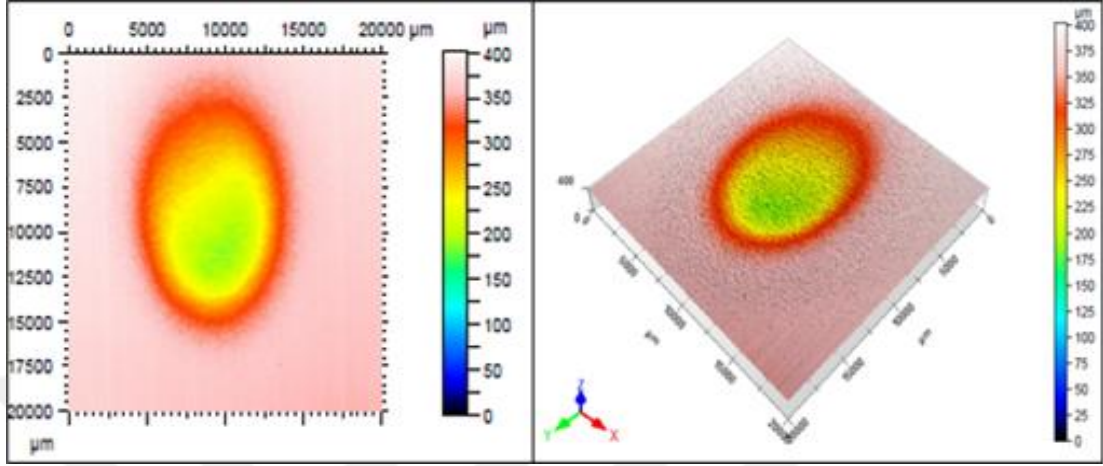
7.3.6. Farklı püskürtme basınçlarında aşınmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin incelenmesi

Şekil 7.48’de aşındırıcı partikül püskürtme basıncının ortalama pürüzlülük değerine olan etkisi grafikler şeklinde verilmiştir. Grafikte 60 mesh ve 120 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak yapılan deneyler farklı çarpma açılarına bağlı olarak verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde her iki grafikte de tüm çarpma açılarında basınç artışıyla birlikte ortalama yüzey pürüzlülüğünde de artış gözlemlenmiştir.

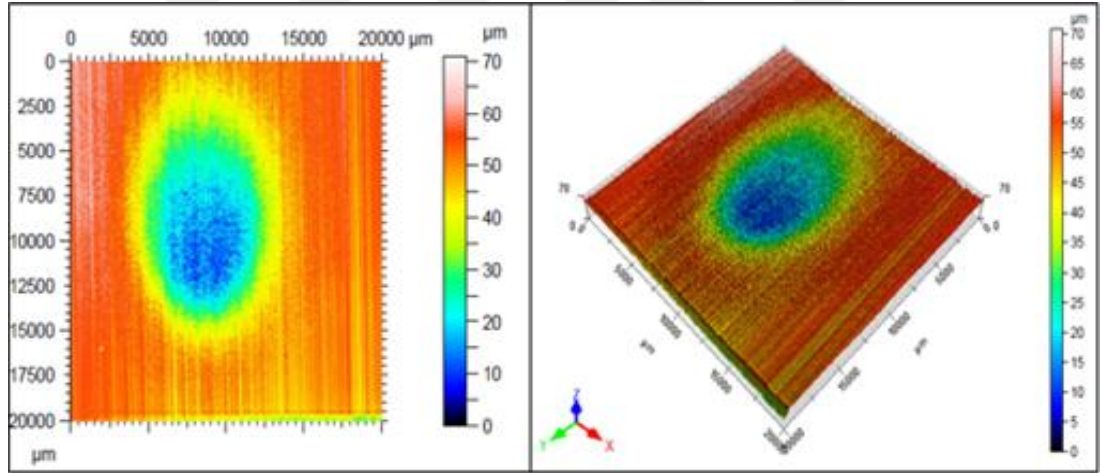


Şekil 7.48. Püskürtme basıncına bağlı olarak ortalama pürüzlülük (R_a) değerinin değişimi

Şekil 7.49 ve 7.50’de 60 mesh boyutunda partiküller kullanılarak 45 derece çarpma açısında 1,5 bar ve 3 bar basınç altında aşındırılmış yüzeylerin optik profilometre cihazı yardımı ile alınmış 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri verilmiştir.

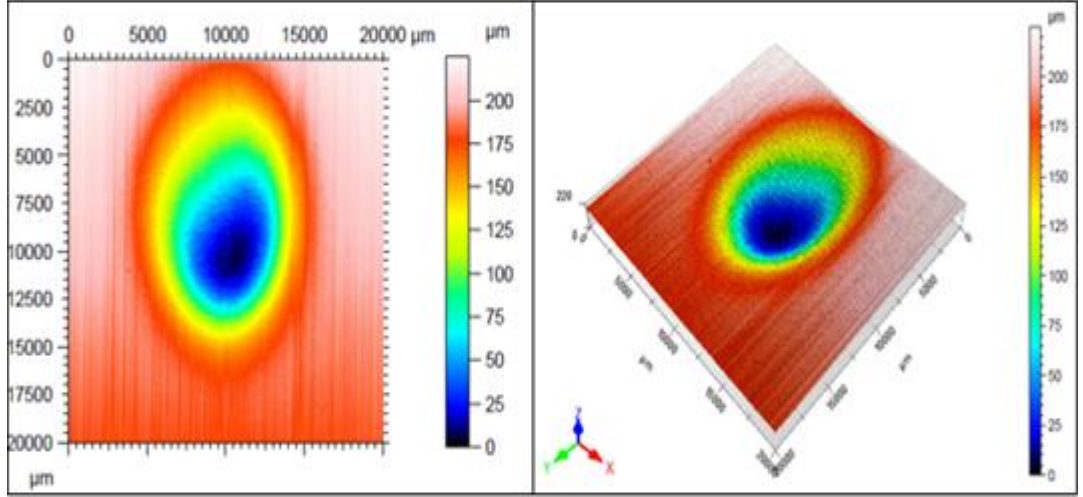


Şekil 7.49. 3 bar püskürtme basıncında ve 45° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı pariküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri

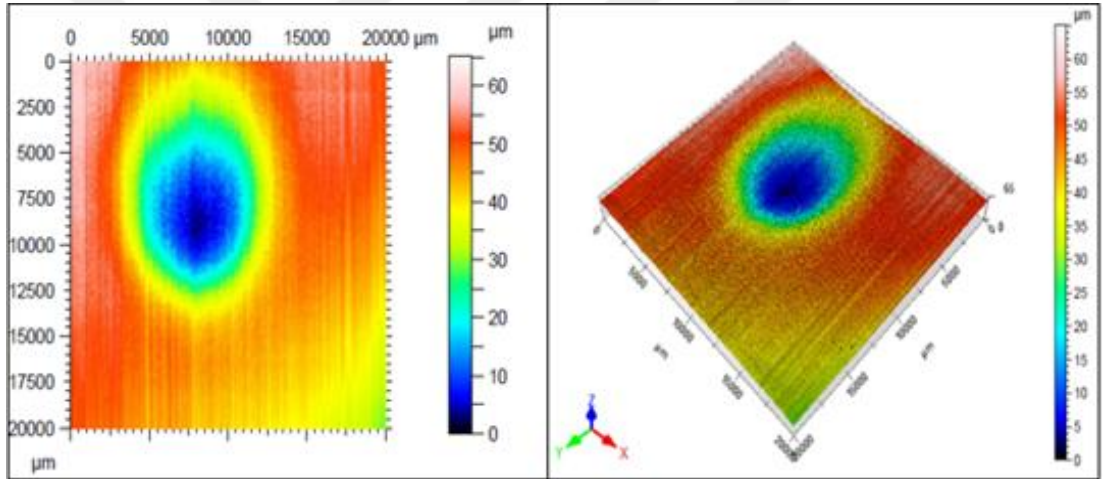


Şekil 7.50. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 45° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri

Şekil 7.51 ve 7.52’de 120 mesh boyutunda partiküller kullanılarak 45 derece çarpma açısında 1,5 bar ve 3 bar basınç altında aşındırılmış yüzeylerin optik profilometre ile alınmış 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.51. 3 bar püskürtme basıncında ve 45° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri



Şekil 7.52. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 45° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri

Profilometre görüntüleri incelendiğinde püskürtme basıncının artması ile birlikte her iki partikül boyutunda da yüzey üzerindeki kıvrımlığın yani yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Aşındırıcı partiküller üzerindeki püskürtme basıncının artması ile beraber partikülün kinetik enerjisi artmaktadır. Dolayısıyla hedef malzeme yüzeyine çarpma esnasında yüzeyden malzeme koparma enerjisinde de artış olmaktadır ve bununla birlikte yüzey üzerinde daha pürüzlü bir yapı oluşmaktadır.

7.4. Katı Partikül Erozyonunun Partikül Çarpma Açısına Bağlı Değişimi

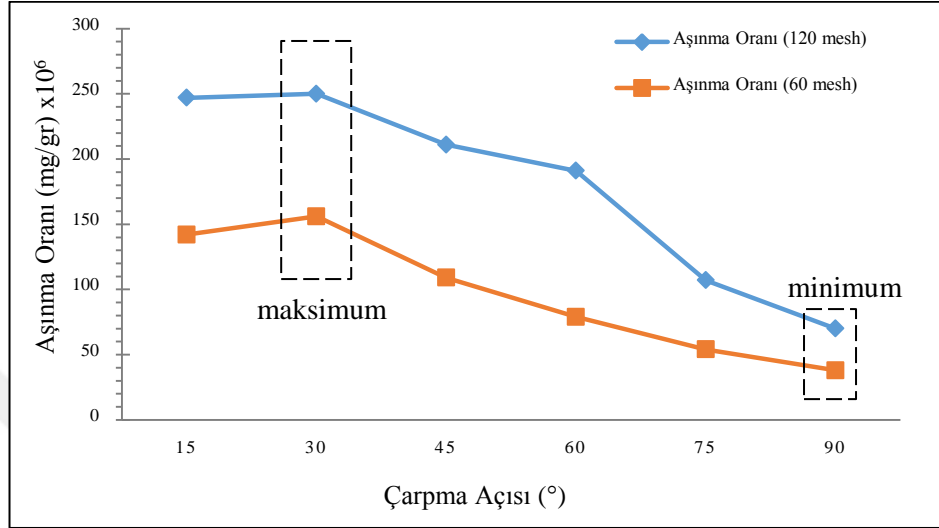
Bu bölümde AA6082-T6 alüminyum alaşımının farklı partikül çarpma açılarında katı partikül erozyonu davranışının değişimi incelenmiştir. Alüminyum alaşımı ile ilgili literatür tarandığında alüminyum alaşımının sünek bir aşınma davranışı izlediği tespit edilmiştir. Sünek erozif aşınma davranışında düşük çarpma açılarında (15° - 45° arası) maksimum miktarda aşınma oranının olduğu normale yakın çarpma açılarında ise aşınma oranının önemli miktarda azaldığı bilgilerine ulaşılmıştır. Bu bilgiler ışığında 60 mesh ve 120 mesh boyutlarında aşındırıcı partiküller kullanılarak 1,5 bar ve 3 bar basınç altında 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° çarpma açılarında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm deneysel numuneler 15 sn aşındırılmıştır.

7.4.1. Aşınma oranlarının incelenmesi

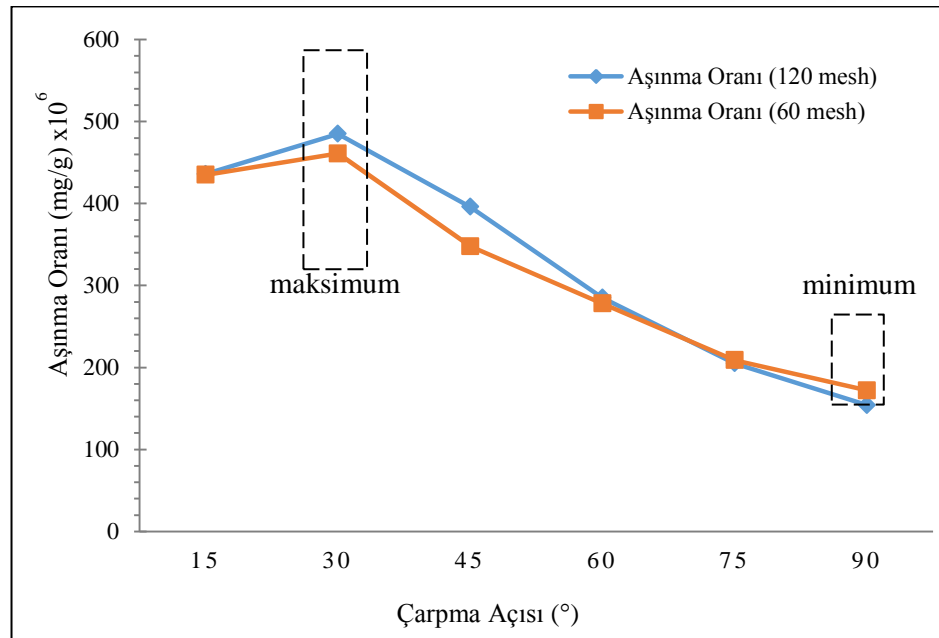
Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında hesaplanan aşınma oranları grafiğe dökülerek alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Şekil 7.53'teki aşınma oranı grafiği incelendiğinde tüm basınç değerlerinde aşınma oranının katı partikül çarpma açısına bağlı olarak büyük değişim gösterdiği görülmektedir. En yüksek aşınma oranı genel anlamda 30° 'de, en düşük aşınma ise her iki basınç için de 90° 'de meydana gelmektedir. Bu durum AA6082-T6 alüminyum alaşımının sünek karakteri ile bağdaştırılabilir. Literatürde de anlatıldığı üzere sünek malzemelerde en fazla malzeme kaybının düşük derecelerde ($\sim 30^{\circ}$) meydana geldiği bilinmektedir. Sert bir malzeme olan alüminyum oksit düşük çarpma açılarındaki yatay hız bileşeni malzeme yüzeyini çizerek ve keserek aşındırır. Yapılan tüm deneysel çalışmalarda en yüksek aşınma miktarının düşük çarpma açılarında meydana geldiği ve çarpma açısının büyümesi ile aşınma miktarının düştüğü görülmektedir. Çarpma açısı büyüdükçe aşındırıcı partiküllerin yatay hız bileşeni küçülür ve bu durum ortaya çıkar.

Deney sonuçları incelendiğinde düşük çarpma açılarında keskin köşeli aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyini mikro kesme ve mikro sürülme mekanizmaları ile yoğun miktarda aşındırdığı söylenebilir. Yüksek çarpma açılarında aşındırıcı

partiküller hedef malzeme yüzeyini mikro çatlak mekanizmaları oluşturarak aşındırmaktadır. Şekil 7.53'te farklı çarpma açılarında 120 mesh ve 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak meydana gelen aşınma oranlarının karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 7.53. Farklı çarpma açılarında ve 1,5 bar basınç altında 120 mesh ve 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak meydana gelen aşınma oranlarının karşılaştırılması

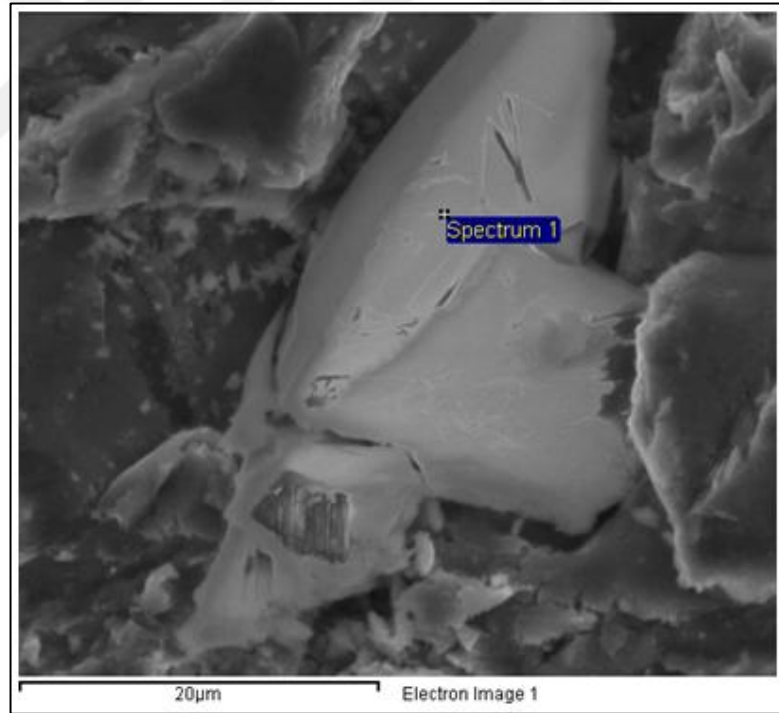


Şekil 7.54 Farklı çarpma açılarında ve 3 bar basınç altında 120 mesh ve 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak meydana gelen aşınma oranlarının karşılaştırılması

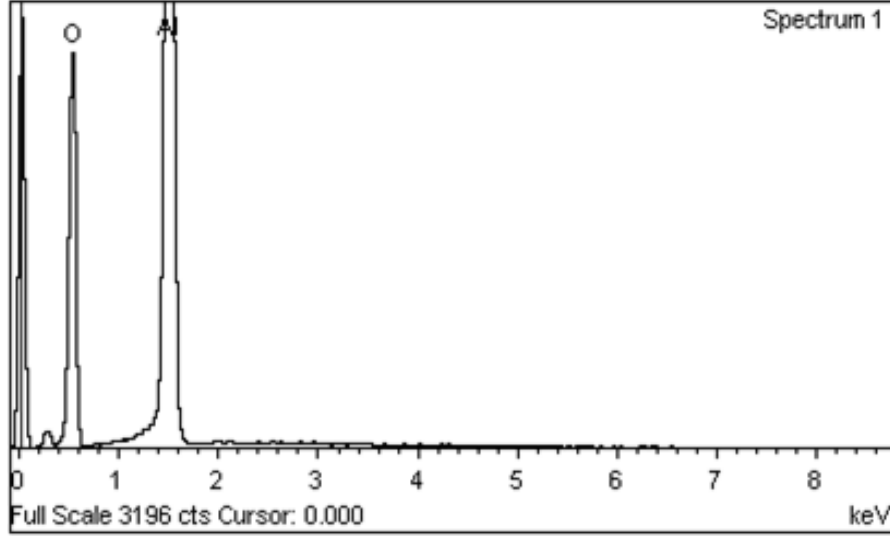
Şekil 7.53 ve 7.54'teki aşınma oranı grafiği incelendiğinde ve daha önce verilen aşınma oranı grafikleri göz önünde bulundurulduğunda alüminyumun sünek malzeme yapısından dolayı maksimum aşınma oranının 30° , minimum aşınma oranının 90° dolaylarında meydana geldiği görülmüştür.

7.4.2. EDS analizlerinin incelenmesi

Bu bölümde partikül çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi EDS (Enerji Dağılımı Spektrometresi) analizi yardımı ile açıklanacaktır. Şekil 7.55'te 1,5 bar püskürtme basıncı ile 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak 90° çarpma açısında aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı verilmiştir. Verilen fotoğrafta Spektrum 1 olarak gösterilen bölgenin numune yüzeyine saplanmış bir aşındırıcı partikül olduğu tahmin edilerek bu bölge üzerinde EDS analizi yapılmıştır. Şekil 7.56'da EDS spektrumu, Tablo 7.9'da ise elde edilen elementsel analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.55. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 90° , aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi: 15 s)



Şekil 7.56. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 1 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

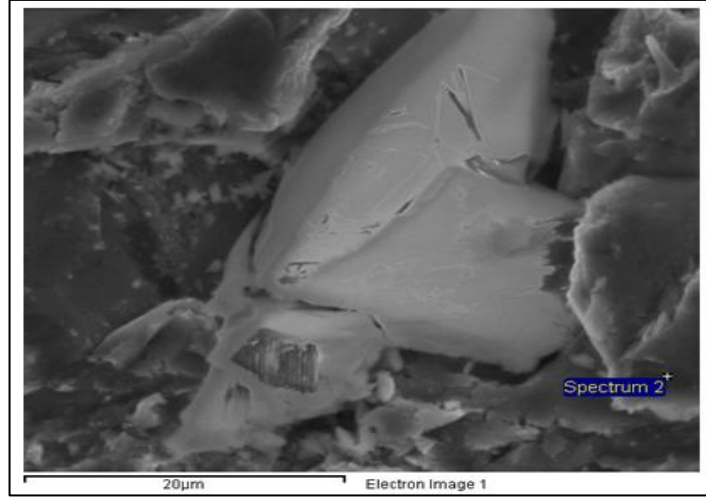
Tablo 7.9. Elementsel analiz sonuçları

Element	Kütlesel %	Atomik %
Oksijen (O)	46,59	59,54
Alüminyum (Al)	53,41	40,46
Toplam	100	100

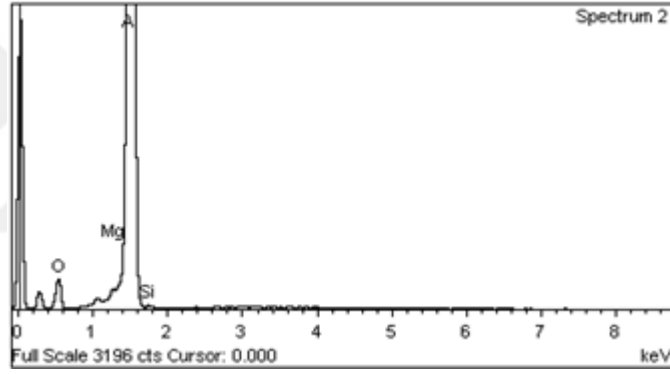
Sonuçlar incelendiğinde bu bölgenin hedef malzeme yüzeyine saplanan bir Al_2O_3 aşındırıcı partikülü olduğunu görmekteyiz.

Şekil 7.57’de SEM fotoğrafı verilen aynı numunenin farklı bir lokasyonunda EDS analizi yapılarak Şekil 7.58’de EDS spektrumu, Tablo 7.10’da ise elde edilen elementsel analiz sonuçları verilmiştir.

Spektrum 2 olarak analiz edilen açık renkli fazın EDS sonuçları incelendiğinde yapının; % 88,98 Al, % 10,04 O, % 0,45 Mg ve % 0,53 Si içerdiği tespit edilmiştir ve bu fazın hedef numunenin kendisi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.57. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunenin SEM fotoğrafı (Püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, aşınma süresi:15 s)



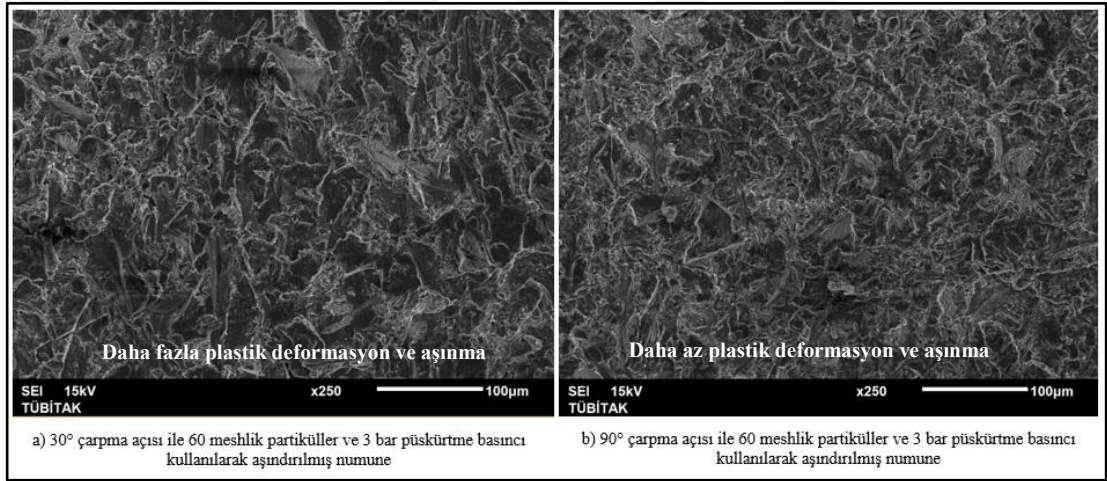
Şekil 7.58. SEM fotoğrafı üzerinde spektrum 2 numaralı bölgeden alınan EDS analizi

Tablo 7.10. Elementsel analiz sonuçları

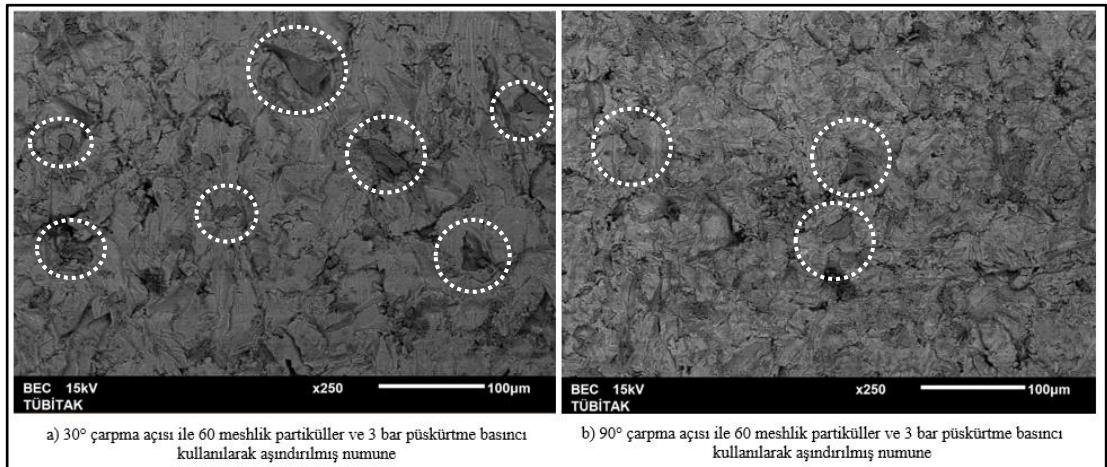
Element	Kütleli %	Atomik %
Oksijen (O)	10,04	15,84
Magnezyum (Mg)	0,45	0,46
Alüminyum (Al)	88,98	83,22
Silisyum (Si)	0,53	0,48
Toplam	100	100

7.4.3. SEM fotoğraflarının incelenmesi

Yapılan katı partikül erozyonu deneysel çalışmalarında AA6082-T6 alüminyum alaşımı 60 ve 120 mesh boyutlarında Al_2O_3 aşındırıcı partikülleri kullanılarak çeşitli basınç ve partikül çarpma açılarında aşınmaya maruz bırakılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar tüm partikül boyutlarında ve basınçlarda, maksimum aşınmanın düşük çarpma açılarında ($\sim 30^\circ$), minimum aşınmanın ise yüksek çarpma açılarında ($\sim 90^\circ$) olduğunu göstermiştir. Aşağıda verilen SEM fotoğrafları ile bu sonucun nedenleri incelenmiştir. Şekil 7.59’da 60 meshlik partiküller ile 3 bar püskürtme basıncı altında aşındırılan numunenin 30° ve 90° ’deki çarpma açılarındaki SEM fotoğrafları verilmiştir.

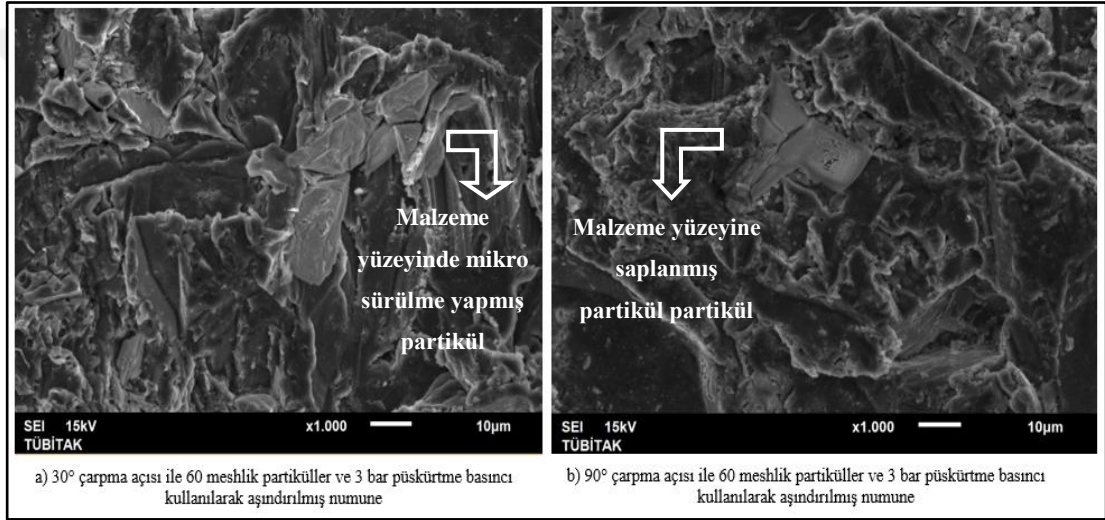


Şekil 7.59. 30° ve 90° derece çarpma açılarındaki aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)



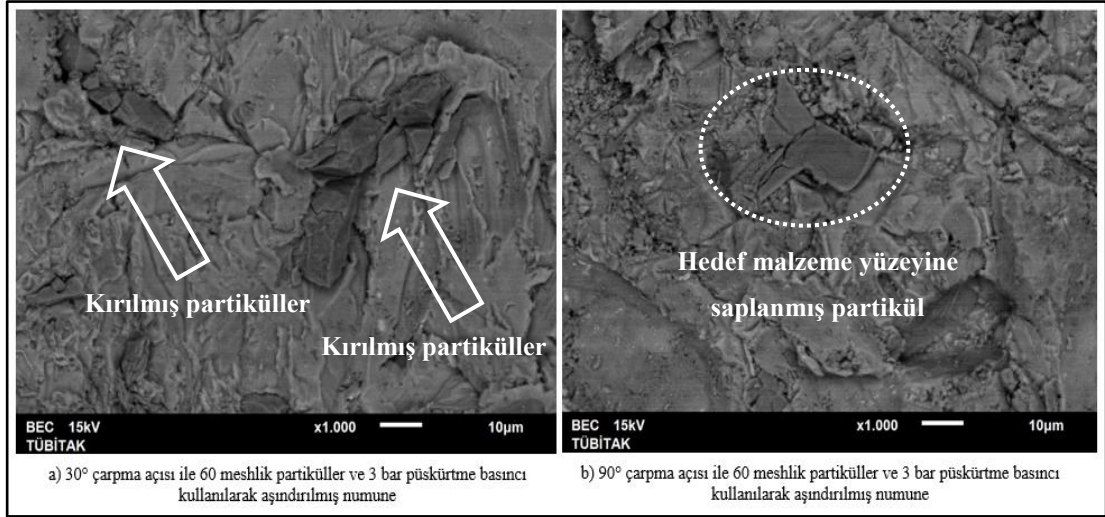
Şekil 7.60. 30° ve 90° derece çarpma açılarındaki aşındırılmış numunelerin x250 büyütmede ve BSE modunda SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)

Fotoğraflar incelendiğinde 30° çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyini mikro kesme ve mikro sürülme mekanizmaları ile yoğun bir şekilde aşındırdıkları tespit edilmiştir. Yüzeyin tamamının plastik deformasyona uğradığı ve Al₂O₃ partiküllerinin hedef malzeme yüzeyini sürerek aşınma izleri oluşturduğu görülmektedir. Elementsel analizler bölümünde gerçekleştirilen EDS analizleri ile fotoğraflar üzerinde siyah renkte görülen fazların, alüminyum oksit partikülleri olduğu belirlenmiştir ve Şekil 7.60'da hedef malzeme yüzeyindeki alüminyum oksitlerin bir kısmı beyaz daire içine alınarak gösterilmiştir. Resimde görülen açık gri renkteki faz ise AA6082-T6 alaşımıdır.



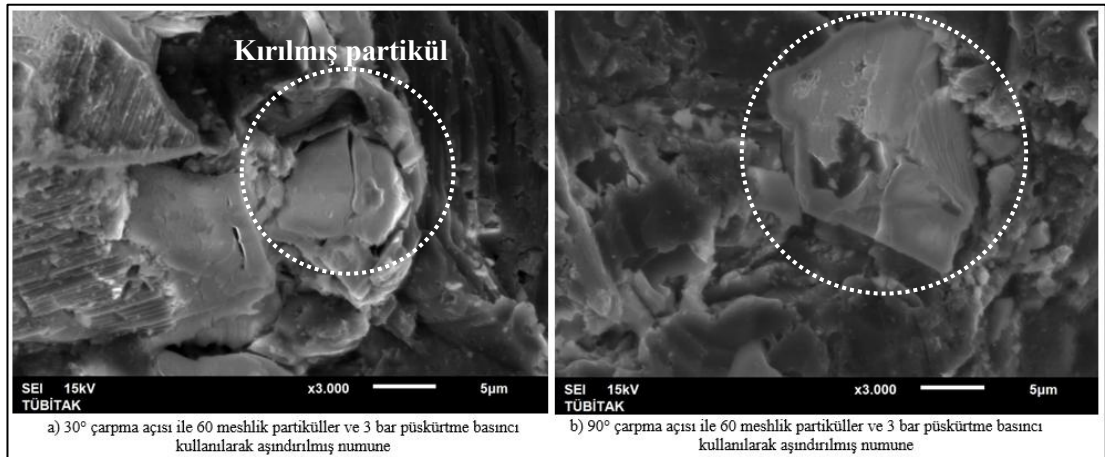
Şekil 7.61. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x1000 büyütmede SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)

Şekil 7.61 (a)'da hedef malzeme yüzeyini sürerek aşındırdıktan sonra malzeme yüzeyine saplanan partiküller ok işaretiyle gösterilmiştir. Yüksek bir hıza ve enerjiye sahip olan partiküllerin hedef malzeme yüzeyine çarptıkları anda veya malzeme yüzeyinin aşındırmaları esnasında parçalara ayrıldıkları söylenebilir. Partiküllerin yüzeye saplanmalarından sonra arkalarından gelen diğer partiküllerin darbeleri sonrasında da parçalandıkları düşünülebilir.

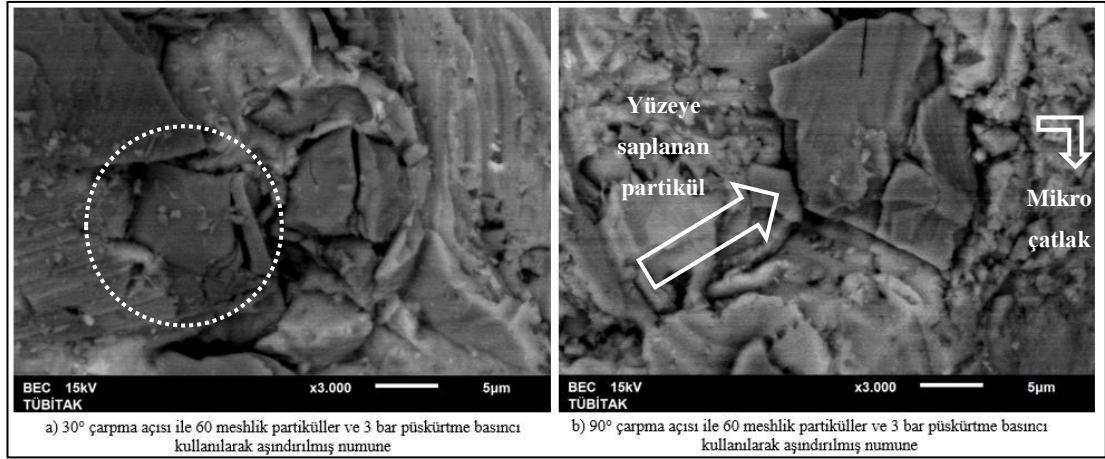


Şekil 7.62. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x1000 büyütmede ve BSE modunda SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)

SEM fotoğrafları verilen hedef malzeme yüzeyi 60 mesh (212 - 300 µm) boyutuna sahip partiküller ile aşınmaya maruz bırakılmıştır. Ancak hedef malzeme yüzeyine saplanan partiküllerin boyutlarının 60 mesh'ten çok daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum partiküllerin hedef malzeme yüzeyine püskürtülmesi esnasında birbirlerine çarparak kırılmaları sebebiyle meydana gelmektedir. Şekil 7.62'de hedef malzeme yüzeyine saplanan partiküllerin kırılarak çok sayıda küçük parçacığa ayrıldıkları gözlemlenmektedir. Şekil 7.63'te 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh) verilmiştir. Şekil 7.64'te ise aynı parametrelerin BSE modundaki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.63. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)



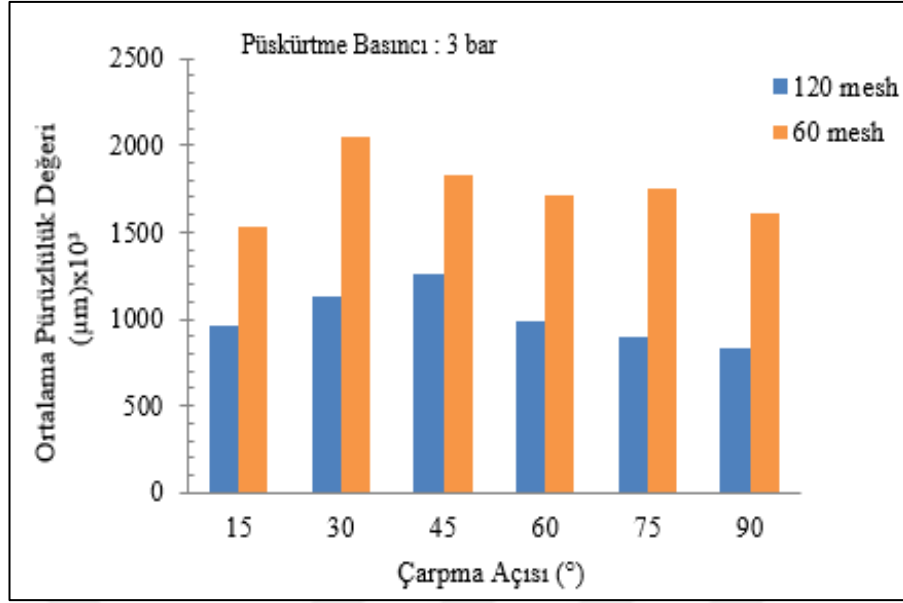
Şekil 7.64. 30° ve 90° derece çarpma açılarında aşındırılmış numunelerin x3000 büyütmede ve BSE modunda SEM fotoğrafları (püskürtme basıncı: 3 bar partikül büyüklüğü: 60 mesh)

90° çarpma açısı ile aşındırılan hedef malzeme yüzeyinin SEM fotoğrafları incelendiğinde, 30° çarpma açısı ile aşındırılan yüzeyden oldukça farklı olduğu görülmektedir. 30° çarpma açısında gözlemlenen aşınma izlerine bu hedef malzeme yüzeyinde rastlanmamaktadır. Hedef malzeme yüzeyinin mikro çatlak mekanizmaları ile plastik deformasyona uğradığı yorumu yapılabilir.

Şekil 7.63 ve 7.64'teki x3000 büyütme fotoğraflarda, 90° çarpma açısında alüminyum oksit partiküllerinin hedef malzeme yüzeyine saplandıkları görülmektedir. Aşındırıcı partiküller, yüzeyi plastik deformasyona uğratarak yüzeyde tepecikler oluşturmuşlardır. Bu durum AA6082-T6 alüminyum alaşımının sünek karakteristiğinden ileri gelmektedir.

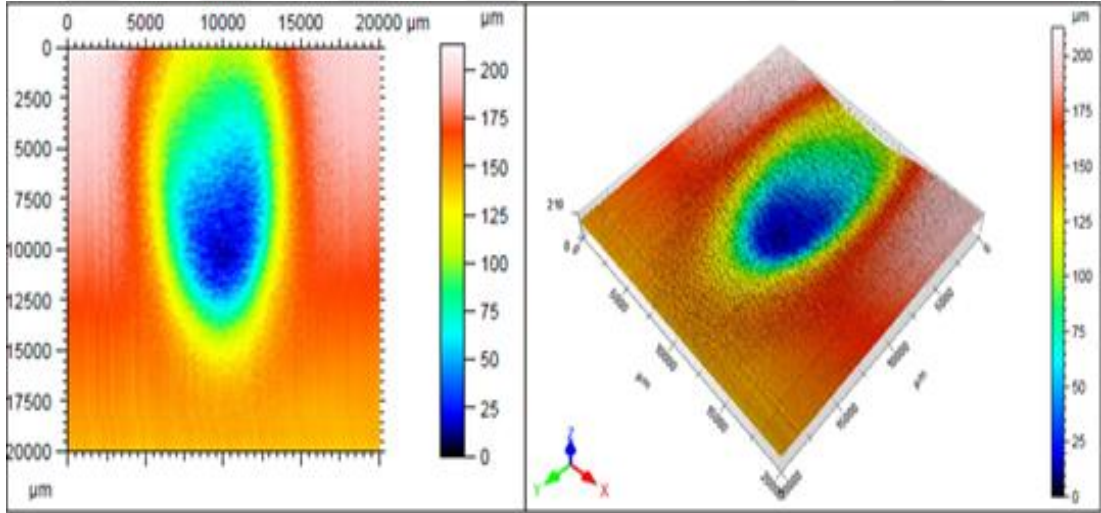
7.4.4. Farklı çarpma açılarında aşınmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin incelenmesi

Şekil 7.65'te 3 bar partikül püskürtme basıncında, 60 ve 120 mesh boyutlarında aşındırıcı partiküller kullanılarak farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) gerçekleştirilen deneyler sonucu erozif aşınmaya maruz kalan yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerleri (R_a) grafik şeklinde verilmiştir.

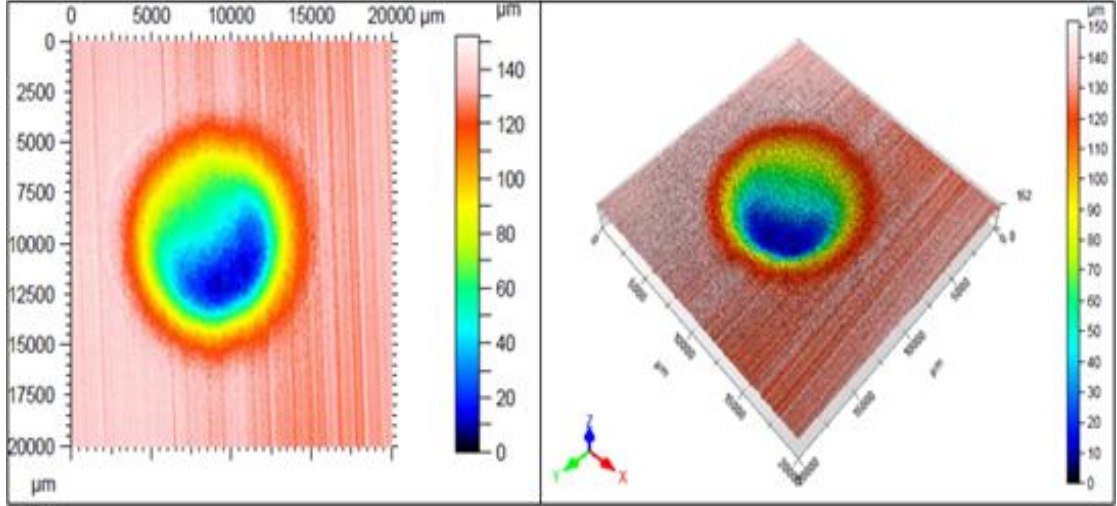


Şekil 7.65. Aşındırıcı partikül çarpma açısına bağlı olarak ortalama pürüzlülük (R_a) değişimi (3 bar)

Şekil 7.66 ve 7.67’de 30° ve 90° çarpma açılarında oluşan aşınma yüzeylerinin optik profilometre ile 2 ve 3 boyutlu görüntüleri elde edilmiş ve görüntüler skalaları ile birlikte verilmiştir.

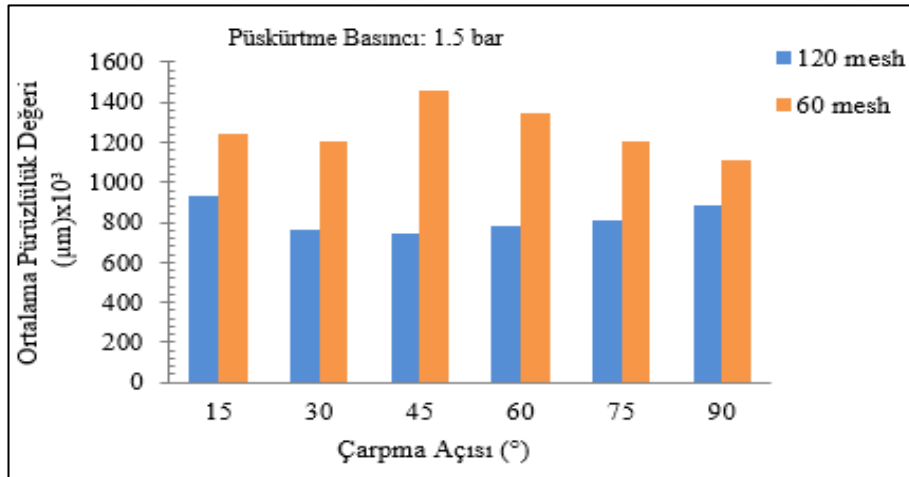


Şekil 7.66. 3 bar püskürtme basıncında ve 30° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri



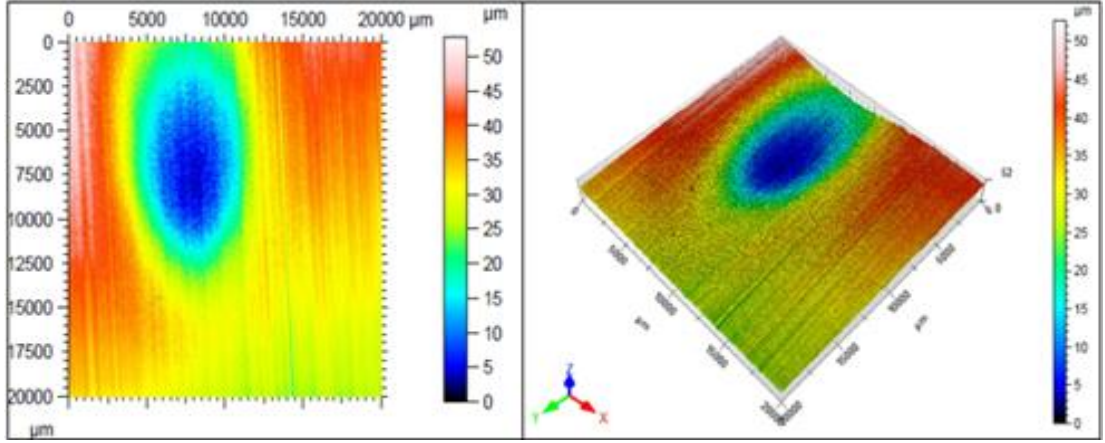
Şekil 7.67. 3 bar püskürtme basıncında ve 90° çarpma açısında, 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri

Şekil 7.68'de 1,5 bar partikül püskürtme basıncında, 60 ve 120 mesh boyutlarında aşındırıcı partiküller kullanılarak farklı çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) gerçekleştirilen deneyler sonucu erozif aşınmaya maruz kalan yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerleri (R_a) grafik şeklinde verilmiştir.

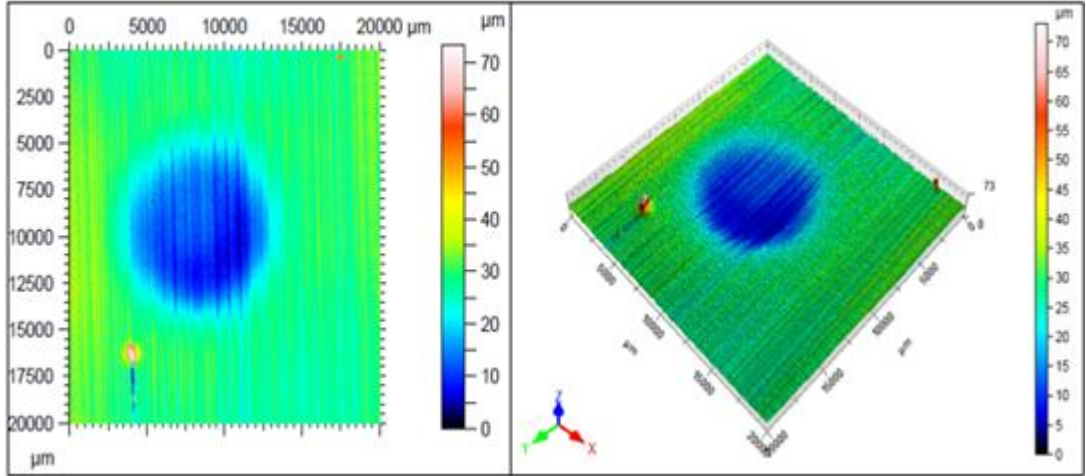


Şekil 7.68. Aşındırıcı partikül çarpma açısına bağlı olarak ortalama pürüzlülük (R_a) değişimi (1,5 bar)

Şekil 7.69 ve 7.70'de 30° ve 90° çarpma açılarında oluşan aşınma yüzeylerinin optik profilometre cihazı yardımı ile 2 ve 3 boyutlu görüntüleri elde edilmiş ve görüntüler skalaları ile birlikte verilmiştir.



Şekil 7.69. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 30° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri



Şekil 7.70. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 90° çarpma açısında, 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak aşındırılmış yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri

Şekil 7.69 ve 7.70 incelendiğinde 90° çarpma açısında aşındırıcı partiküller, 30° çarpma açısında aşındırıcı partiküllere nazaran hedef malzeme yüzeyine dik bir şekilde ulaşarak yüzeye saplanma eğilimindedirler. Bu eğilimleri sebebiyle yüksek çarpma açılarında aşındırıcı partiküller hedef malzeme yüzeyinde dövme işlemi yaparak plastik deformasyona sebep olmaktadır. Bu plastik deformasyonlar nedeniyle yüksek çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyinde yüksek yüzey pürüzlülük değerleri meydana gelmektedir yorumu yapılabilir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Katı partikül erozyonu prosesi çeşitli parametrelerden etkilenen karmaşık bir tribolojik prostestir. Bu çeşitli parametreler; aşınan malzemenin özellikleri, aşındırıcı partiküllerin boyutu, çarpma açısı, çarpma süresi, püskürtme basıncı gibi değişkenlerdir.

Tez çalışması kapsamında AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyon davranışı, farklı partikül püskürtme basınçları (1,5 bar, 3 bar), çarpma açıları ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) ve partikül boyutları (60 mesh, 120 mesh) kombinasyonlarıyla aşındırılarak karakterize edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda aşındırılmış numunelerin aşınma oranı değerleri hesaplanmış ve katı partikül erozyonu prosesi parametrelerinin aşınma oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aşındırılmış numune yüzeylerine saplanan partiküller EDS analizi ile analiz edilmiştir ve numunelerin SEM fotoğrafları çekilerek farklı parametrelerin yüzey morfolojisine etkileri irdelenmiştir. Ayrıca katı partikül erozyonuna uğrayan numuneler tarayıcı ile taranarak numune yüzeylerinde oluşan aşınma izleri kıyaslanmıştır. Son olarak optik profilometre yardımı ile tüm aşındırılmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınarak, ortalama pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, AA6082-T6 alüminyum alaşımının sünek aşınma karakteristiği göstererek düşük çarpma açılarında (15° ve 30°) daha yüksek aşınma oranı sergilediği görülmüştür. Çarpma açısının artışı ile birlikte aşınma oranında azalma meydana gelmiş ve en düşük aşınma oranı ise 90° 'de gerçekleşmiştir. Literatür taramasında bahsedildiği üzere, C.K. Fang ve T.H. Chuang tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, 6063 alüminyum alaşımına silisyum karbür püskürtülerek en yüksek aşınma oranının 30° 'de meydana geldiği ve çarpma açısı arttıkça aşınma oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu gözlem, deneysel çalışma sonrası elde edilen sonucu destekler niteliktedir. 3 bar püskürtme basıncında 60 mesh aşındırıcı partiküller ile 30° ve 90° çarpma açılarındaki aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları incelendiğinde 30° çarpma açısı ile aşındırılan numunelerin yüzeylerinde

mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmaları meydana geldiği, 90° çarpma aşısında aşındırılan numunelerin yüzeylerinde ise mikro kesme ve mikro sürmeden ziyade mikro dövme mekanizmalarının meydana geldiği görülmüştür.

1,5 bar püskürtme basıncında aşındırılan AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı incelendiğinde, 120 mesh partiküller ile aşındırılan numunelerde 60 mesh ile aşındırılan numunelere kıyasla daha fazla aşınma oranı meydana geldiği görülmüştür. 1,5 bar basınç altında 120 mesh ve 60 mesh partiküllerin kütleli debileri ve hızları hesaplandığında küçük partiküllerin büyük partiküllere göre daha yüksek hıza ulaştığı fakat daha düşük kütleli debiye sahip oldukları hesaplanmıştır. Küçük partiküller ivme ve momentum kazanmaya daha elverişlidir ve yüksek kırılma dayanıklılığı veren kompakt yapıya sahiptirler. Bu kompakt yapıları itibari ile hedef malzeme yüzeyinde daha çok çatlak oluşumuna neden oldukları tespit edilmiştir. Büyük partiküllerin ise küçük partiküllere kıyasla daha büyük kinetik enerjiye ve kütleli debiye sahip olmalarına rağmen rotasyon eğilimleri ve kırılma zayıflıkları sebebiyle bu enerjilerini hedef malzeme yüzeyine aktaramadıkları ve daha düşük aşınma oranına neden oldukları tespit edilmiştir. Büyük partiküllerin daha düşük aşınma oranına sebep olmalarının bir diğer nedeni de nozuldan hedef malzeme yüzeyine ulaşma esnasındaki koruyucu kalkan etkisidir. Partiküllerin uçuş esnasında birbirlerine çarparak rotalarından sapmaları veya hedef malzeme yüzeyine çarptıktan sonra arkalarından gelen partiküllerin yüzeye ulaşmasını engellemeleri düşük aşınma oranının nedenidir.

3 bar püskürtme basıncında aşındırılan AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı incelendiğinde, küçük partiküllerin büyük partiküllere göre yine daha fazla aşınma oranına sebep oldukları fakat büyük partiküllerin 3 bar püskürtme basıncının etkisiyle daha çok ivme kazanarak enerjilerini hedef malzemeye yüzeyine daha iyi aktarabildikleri ve küçük partiküllerin aşınma oranına yaklaştığı tespit edilmiştir.

Aşınmış yüzeylerin SEM fotoğrafları incelendiğinde, büyük boyutlu aşındırıcı partiküller (60 mesh) ile aşındırılan yüzeylerde daha kaba aşınma izleri oluşurken, küçük boyutlu partiküller (120 mesh) kullanılarak aşındırılan numunelerde daha küçük ancak daha sık aşınma izlerinin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca büyük

partiküllerin kırılma zayıflıkları sebebiyle hedef malzeme yüzeyine çarparak kırıldıkları tespit edilmiştir. Aşındırılmış yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerleri incelendiğinde büyük partiküller ile aşındırılmış yüzeyde oluşan pürüzlülük değerinin küçük partiküller kullanılarak aşındırılan yüzey pürüzlülüğünden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum büyük partiküllerin (60 mesh) küçük partiküllere (120 mesh) göre erozif aşınma sonrası daha kaba ve daha derin izler bırakması ile açıklanabilir.

1,5 bar püskürtme basıncında aşındırılan hedef malzeme yüzeylerinde meydana gelen aşınma izleri incelendiğinde düşük açılarda 120 mesh'lik partiküllerin 60 mesh'lik partiküllere göre daha geniş aşınma izleri oluşturdukları ve yüksek açılarda ise daha geniş ikincil aşınma bölgesi meydana getirdikleri görülmüştür. Benzer durum 3 bar püskürtme basıncında da tespit edilmiştir.

120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncıyla aşındırılan AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı incelendiğinde, öncelikle basınç artışıyla birlikte partiküllerin hızlarında, kütleli debilerinde ve kinetik enerjilerinde artış olduğu hesaplanmıştır. Aşınma oranları hesaplandığında püskürtme basıncının artmasıyla birlikte aşınma oranının da arttığı tespit edilmiştir. Bu durum püskürtme basıncının artırılması ile aşındırıcı partiküllerin hızlarının ve enerjilerinin de artmasıyla açıklanabilir. Daha yüksek hız ve enerjiye sahip partiküllerin malzeme yüzeyinde daha fazla aşındırma oranına neden olması tahmin edilen bir sonuçtur.

60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncıyla aşındırılan AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı incelendiğinde, yine büyük püskürtme basınçlarında daha yüksek aşınma oranları görülmüştür. Öte yandan literatür taramasında bahsedildiği üzere O. P. Modi, B. K. Prasad ve A. K. Jha gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada partikül hızının artmasıyla aşınma oranının arttığını tespit etmişlerdir. Morfolojik incelemelerde 30° çarpma açısında 120 mesh ve 60 mesh partikül boyutuna sahip partiküllerin 1,5 bar ve 3 bar basınç altındaki aşındırma yüzeyleri SEM fotoğrafları ile analiz edilmiştir. 30° çarpma açısında numune yüzeyini mikro kesme ve mikro sürme mekanizmalarıyla aşındıran aşındırıcı partiküllerin 3 bar püskürtme basınç altında aşınma yüzeyinde

daha fazla plastik deformasyon oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ortalama pürüzlülük değerleri incelendiğinde püskürtme basıncının artması ile birlikte her iki partikül boyutunda da pürüzlülük değerlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Basıncı artışıyla partiküllerin kinetik enerjilerinde artış meydana gelmekte ve dolayısıyla aşındırıcı partiküllerin malzemeden kopardıkları malzeme miktarı ve oluşturdukları plastik deformasyon artmaktadır.

Hedef malzemeler yüzeyinde meydana gelen aşınma izleri kıyaslandığında 3 bar püskürtme basıncıyla aşındırılan hedef malzeme yüzeyinde 1,5 bar püskürtme basıncıyla aşındırılan hedef malzeme yüzeyine kıyasla düşük çarpma açılarında daha geniş ve daha uzun aşınma izi, yüksek çarpma açılarında ise ikincil aşınma bölgesinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

Yapılan tüm deneysel çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda AA6082-T6 alüminyum alaşımının 30° çarpma açısında, 3 bar püskürtme basıncında ve 120 mesh aşındırıcı partiküller kullanıldığında maksimum aşınma oranına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmaları neticesinde AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı erozyon oranı, SEM görüntüleri, EDS analizleri ve optik profilometre cihazı ile bulunan ortalama pürüzlülük değerleri, 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri beraber kullanılarak karakterize edilmeye çalışılmıştır. Alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına etki eden partikül çarpma açısı, partikül boyutu, püskürtme basıncı ve püskürtme basıncıyla değişen partikül hızı parametrelerinin etkileri, gerçekleştirilen katı partikül erozyonu deneyleri ile incelenmiştir. Çalışma şartları süresince alüminyum alaşımının katı partikül erozyonuna uğradığı endüstriyel uygulamalar bu sonuçlar dikkate alınarak çalışma ömrünü arttırma yönünde gözden geçirilebilir. Alüminyum alaşımına uygun çalışma koşulları minimum aşınmanın gerçekleştiği parametreler doğrultusunda sağlanabilir. Bununla birlikte 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] The Aluminum Association, Inc., Aluminum Alloy Selection and Applications, <http://www.calm-aluminium.com.au/documents/aluminium-alloys.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 22 Eylül 2017).
- [2] Cobden R., Aluminium Physical Properties, Characteristics and Alloys, Training in Aluminum Applications Technologies, <https://docplayer.net/20837071-Aluminium-physical-properties-characteristics-and-alloys.html>, (Ziyaret Tarihi: 25 Eylül 2017).
- [3] MacKenzie S. D., Totten E. G., *Handbook of Aluminum*, 1st ed., Marcel Dekker Inc., New York, 2003.
- [4] The Aluminum Association, <http://www.aluminum.org/aluminum-advantage/history-aluminum>, (Ziyaret tarihi: 1 Ekim 2017).
- [5] Hirsch J., Recent Development in Aluminium for Automotive Applications, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63305-7.
- [6] Yıldırım Y., 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342538.
- [7] Yetiştiren H., 2024 Alüminyum Alaşımında RRA İşleminin GKÇ Direncine Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994, 29186.
- [8] Çetin A., *Alüminyum Döküm Alaşımları*, 4th ed., Sektör D, Ankara, 2017.
- [9] Dwight J., *Aluminium Design and Construction*, 1st ed., E & FN Spon, London, 1999.
- [10] 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.
- [11] Akdı S., Küçükyalıoğlu G., Birol Y., Alüminyum T6 Isıl İşlemi İçin Geliştirilen Sepet Tasarımı ile Zaman ve Enerji Tasarrufu Sağlanması, Aydınlar Yedek Parça San. ve Tic. A.Ş., http://www.verimlilikkongresi.gov.tr/alimunyum_t6.pdf, (Ziyaret tarihi: 12 Şubat 2018).

- [12] Bhushan B., *Principle and Applications of Tribology*, 1st ed., John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [13] Koji K., Adachi K., *Modern Tribology Handbook*, 2nd ed., Boca Raton, New York., 2000.
- [14] Aşınma Hasarları, <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ha/lecture2.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 05 Ekim 2017).
- [15] Stachowiak G.W., Batchelor A.W., *Engineering Tribology*, 1st ed., Butterworth-Heinemann Publications, Massachusetts, 1993.
- [16] Burwell J. T., Survey of Possible Wear Mechanisms, *Wear*, DOI: 10.1016/0043-1648(57)90005-4.
- [17] Avcu E., Farklı Büyüklüklere Sahip Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Erozif Aşınma Davranışına Etkiler, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 348736.
- [18] More R. S., Bhatt V. D., Menghani V. J., Recent Research Status on Erosion Wear – An Overview, *Materials Today Proceedings*, DOI:10.1016/j.matpr.2017.01.020.
- [19] Sundararajan G., Roy M., Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, *Tribology International*, DOI:10.1016/S0301-679X(96)00064-3.
- [20] Temiz V., Triboloji-Makine Elemanları 1, İstanbul Teknik Üniversitesi, <http://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Triboloji.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 25 Ekim 2017).
- [21] Levy V. A., *Solid Particle Erosion and Erosion-Corrosion of Materials*, 2nd ed., ASM International, United States of America, 1997.
- [22] 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*, DOI:10.1016/S0266-3538(02)00210-5.
- [23] Kleis I., Kulu P., *Solid Particle Erosion*, 1st ed., Verlag London Limited, London, 2008.
- [24] 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 Ağustos 1995.
- [25] Desale R. G., Gandhi K. B., Jain S. C., Particle Size Effects on the Slurry Erosion of Aluminium Alloy (AA 6063), *Wear*, DOI:10.1016/j.wear.2009.01.002.

- [26] Scattergood R.O., Routbort J. L., Turner A. P. L., Velocity and Size Dependence of the Erosion Rates in Silicon, *Wear*, DOI:10.1016/0043-1648(81)90106-X.
- [27] Amirthan G., Udayakumar A., Prasad B., Balasubramanian M., Solid Particle Erosion Studies on Biomorphic Si/SiC Ceramic Composites, *Wear*, DOI:10.1016/j.wear.2009.07.007.
- [28] 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.
- [29] Laguna-Camacho J. R., Vite-Torres M., Gallardo-Hernández E.A., Vera-Cárdenas E. E., Solid Particle Erosion on Different Metallic Materials, *Tribology in Engineering*, DOI: 10.5772/51176.
- [30] Elleuch K., Mezlini S., Guermazi N., Kapsa P., Abrasive Wear of Aluminium Alloys Rubbed Against Sand, *Wear*, DOI:10.1016/j.wear.2006.03.016.
- [31] Gandhi B. K., Borse S. V., Nominal Particle Size of Multi-Sized Particulate Slurries for Evaluation of Erosion Wear and Effect of Fine Particles, *Wear*, DOI:10.1016/j.wear.2003.10.013.
- [32] Lynn R. S., Wong K. K., Clark H. M., On the Particle Size Effect in Slurry Erosion, *Wear*, DOI:10.1016/0043-1648(91)90364-Z.
- [33] Clark H. M., On the Impact Rate and Impact Energy of Particles in a Slurry Pot Erosion Tester, *Wear*, DOI:10.1016/0043-1648(91)90127-G.
- [34] Clark H. M., Wong K.K., Impact Angle, Particle Energy and Mass Loss in Erosion by Dilute Slurries, *Wear*, DOI:10.1016/0043-1648(95)07120-2.
- [35] Clark H. M., Hartwich R.B., A Re-examination of the 'Particle Size Effect' in Slurry Erosion, *Wear*, DOI:10.1016/S0043-1648(00)00556-1.
- [36] Stack M.M., Pungwiwat N., Slurry Erosion of Metallics, Polymers, and Ceramics: Particle Size Effects, *Materials Science and Technology*, DOI:10.1179/026708399101505770.
- [37] Talia J. E., Ballout Y. A., Scattergood R. O., Erosion Ripple Formation Mechanism in Aluminum and Aluminum Alloys, *Wear*, DOI:10.1016/0043-1648(96)06928-1.
- [38] Fang C. K., Chuang T. H., The Effect of Humidity on the Erosive Wear of 6063 Al Alloy, *Wear*, DOI:10.1016/S0043-1648(99)00271-9.
- [39] 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*, DOI:10.1016/j.matdes.2008.03.016.

- [40] Shin Y. W., Sargent G. A., Conrad H., Effects of Microstructure on the Erosion of Al-Si Alloys by Solid Particles, *Metallurgical Transactions A*, DOI:10.1007/BF02648805.
- [41] 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*, DOI:10.1016/S0043-1648(03)00088-7.
- [42] Modi O. P., Prasad B. K., Jha A. K., Influence of Alumina Dispersoid and Test Parameters on Erosive Wear Behaviour of a Cast Zinc–Aluminium Alloy, *Wear*, DOI:10.1016/j.wear.2005.06.015.
- [43] Kaufman G. J., Rooy E. L., *Aluminum Alloy Castings Properties, Process and Applications*, 1st ed., ASM International, Materials Park, Ohio, 2004.
- [44] Li X., Wu L., Chen J., Zhang B., Static Softening Characteristics and Static Recrystallization Kinetics of Aluminum Alloy A6082 After Hot Deformation, *Journal of Shanghai Jiaotong University*, DOI: 10.1007/s12204-010-1008-0.
- [45] Aluminum Technologies, <https://www.slideshare.net/rizuwan96/aluminium-technologies-week-12>, (Ziyaret Tarihi: 12.12.2018).
- [46] Saylan U., Alüminyum Oksit Minerali, <http://www.saykar.net/aluminyum oksit>, (Ziyaret Tarihi: 02.03.2018).
- [47] Saylan U., Basınçlı Kumalama, http://www.saykar.net/basincli_kumlama_kabini, (Ziyaret Tarihi: 03.03.2018).
- [48] Li D., Fast & High Resolution Large Surface Measurement with 3D Profilometry, Nanovea, <http://nanovea.com/App-Notes/measure-large-surface.pdf>, (Ziyaret Tarihi : 21.04.2018).
- [49] Institute of Materials Science, <https://www.ims.uconn.edu/microscopy/>, (Ziyaret Tarihi: 22.03.2018).
- [50] Golijanek-Jędrzejczyk A., Świsulski D., Hanus R., Zych M., Petryka L., Uncertainty of the Liquid Mass Flow Measurement Using the Orifice Plate, *Flow Measurement and Instrumentation*, DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.05.012.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Erdoğan A. A.**, Feyzullohoğlu E., Farklı alışma Koşullarında alışan Plastik Esaslı Konveyör Bant Malzemelerindeki Aşınmanın Deneysel Olarak İncelenmesi, *Pagev Plastik Dergisi*, 2017, 139, 252-262.
- [2] **Erdoğan A. A.**, Feyzullohoğlu E., Fidan S., Sınmazelik T., Effect of Erodent Particle Velocity on Erosive Wear Behavior of AA6082-T6 Aluminum Alloy, *International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyon, Türkiye, 21-22 Nisan 2016.
- [3] **Erdoğan A. A.**, Feyzullohoğlu E., Fidan S., Sınmazelik T., Effect of Erodent Particle Size on Erosive Wear Behavior of AA6082-T6 Aluminum Alloy, *International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyon, Türkiye, 21-22 Nisan 2016.

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Kocaeli’de doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimi Kocaeli’de tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2015 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimi esnasında kazandığı erasmus bursu ile 2016-2017 eğitim öğretim yılı güz dönemini Universitate din Oradea/Romanya’da tamamladı.

2015-2016 yılları arasında Öz Asansör İnş. San. Tic. Ltd. Şti’de Ar-Ge mühendisi olarak görev aldı. 2017 Temmuz ayından bu yana Ford Otosan Ürün Geliştirme departmanında Araç Mühendisi olarak görev yapmaktadır.