

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AA 6082-T6 ALAŞIMINDA FARKLI AŞINDIRICILARIN KATI  
PARTİKÜL EROZYONUNA ETKİLERİ**

**HAKAN SEZER**

**KOCAELİ 2017**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



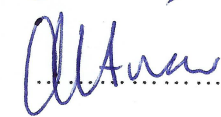
**HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AA 6082-T6 ALAŞIMINDA FARKLI AŞINDIRICILARIN KATI**  
**PARTİKÜL EROZYONUNA ETKİLERİ**

**HAKAN SEZER**

**Yrd. Doç. Dr. Sinan FİDAN**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**  
**Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**  
**Yrd. Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU**  
**Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 29.12.2017**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüz şartlarında katı partikül erozyonu uzay ve havacılık, savunma, otomotiv, denizcilik ve gemi sanayi gibi birçok endüstriyel alanda çok çalışılan popüler konulardan biridir. Katı partikül erozyonu kaynaklı hasarlar malzemenin ve bileşenlerinin kullanım koşulları ve çevresel faktörler altında ömürlerini azaltıcı yönde bir etkiye sahiptir. Bu nedenle erozif aşınmaya ilişkin çalışmalar aşındırıcı partikül ve aşınan malzemenin özelliklerine bağlı olarak iki ana başlık altında yürütülmektedir. Birincisi katı partikül erozyonuna maruz kalacak makine, makine parçaları veya malzemelerin aşınma karakteristiklerinin belirlenmesi, mevcut aşınma riskleri göz önünde bulundurularak makine, malzeme ve parça tasarımlarının yapılması ve mevcut aşınma davranışının giderilmesine yönelik tedbirler alınmasıdır. İkincisi ise malzeme yüzeylerinde istenilen pürüzlülüğün elde edilebilmesi için malzemenin hangi parametreler ve şartlar altında aşındırılması gerektiğinin belirlenmesidir. Diğer yandan katı partikül erozyonu, bir anlamda makine veya malzemeyi aşındırıp kullanılmaz hale getiren bir faktör iken etkilerini bilerek ve kontrollü bir şekilde bir makine parçasına istediğimiz yüzey pürüzlülüğünü de elde edebildiğimiz bir yöntemdir. Bu tez çalışmasında yukarıda belirtilen amaçlar doğrultusunda AA 6082-T6 Alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı karakterize edilmeye çalışılmıştır.

Yüksek Lisans Tez çalışmalarım boyunca her türlü katkı ve yardımlarını esirgemeyen, değerli fikirleri, bilgi birikimleri ve tecrübeleriyle çalışmalarımı yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e ve değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Sinan FİDAN'a sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca yardım ve desteklerini hiç esirgemeyen anne ve babama, karşılaştığım her türlü zorluk karşısında dimdik ayakta kalmamı sağlayan, beni cesaretlendiren ve hertürlü şartta yanımda olan eşim Dizem SEZER'e ve biricik oğlum Ege SEZER'e en içten sevgilerimi sunarım.

Yüksek Lisans Tez çalışmalarında yardımlarını ve değerli fikirlerini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı'nda görev yapmakta olan Yrd. Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU'ya çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın gerçekleşmesine katkıda bulunan ASAŞ Alüminyum ARGE departmanında çalışmakta olan Onur BİRBAŞAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık-2017

Hakan SEZER

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ .....	1
1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	6
1.1. Alüminyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi.....	6
1.2. Alüminyum ve Alaşımının Genel Özellikleri .....	8
1.3. Alüminyum ve Alaşımının tipleri .....	10
1.3.1. 1XXX serisi alaşımlar .....	14
1.3.2. 2XXX serisi alaşımlar .....	15
1.3.3. 3XXX serisi alaşımlar .....	15
1.3.4. 4XXX serisi alaşımlar .....	15
1.3.5. 5XXX serisi alaşımlar .....	15
1.3.6. 6XXX serisi alaşımlar .....	16
1.3.7. 7XXX serisi alaşımlar .....	16
1.3.8. 8XXX serisi alaşımlar .....	16
1.4. Alüminyum ve Alaşımının Kullanım Alanları.....	17
1.4.1. Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde kullanımı.....	17
1.4.2. Alüminyum ve mimari .....	20
1.4.3. Alüminyum ve ambalaj .....	21
1.4.4. Alüminyum ve elektrik - elektronik .....	22
1.4.5. Alüminyum ve havacılık - uzay sanayi .....	23
2. KATI PARTİKÜL EROZYONU .....	28
2.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı .....	29
2.2. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı .....	32
2.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütleli Debişi .....	32
2.4. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu .....	33
2.5. Aşındırıcı Partikül Sertliği.....	35
2.6. Aşındırıcı Partikül Şekli .....	35
2.7. Hedef Malzeme Özellikleri .....	35
2.8. Sıcaklık.....	36
3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ EROZYON DAVRANIŞININ LİTERATÜR TARAMASI.....	37
3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	37
3.2. Aşındırıcı Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	37
3.2.1. Aşındırıcı partikül boyutu ve sertliği etkisi.....	38
3.2.2. Partikül şekil etkisi .....	39
3.3. Operasyon Parametrelerinin Etkisi .....	40
3.3.1. Partikül çarpma açısının etkisi .....	40

3.3.2. Partikül çarpma hızının etkisi.....	43
3.4. Çevresel Etkenler .....	44
4. MALZEME .....	46
4.1. Aşındırıcı Partikül Özellikleri .....	46
4.1.1. Alümina mineralinin özellikleri .....	46
4.1.2. Alümina mineralinin kullanım alanları .....	47
4.1.3. Garnet mineralinin özellikleri .....	48
4.1.4. Garnet mineralinin kullanım alanları .....	49
4.1.5. Cam küre özellikleri .....	50
4.1.6. Cam küre kullanım alanları .....	51
4.1.7. Çelik bilya özellikleri .....	52
4.1.8. Çelik bilya kullanım alanları .....	53
4.2. Deney Numuneleri .....	54
4.2.1. AA6082-T6 alaşımı özellikleri.....	54
4.2.2. AA6082-T6 alaşımı kullanım alanları.....	55
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	59
5.1. Hedef Malzeme .....	59
5.2. Aşındırıcı Malzemeler .....	59
5.3. Yöntem .....	64
5.3.1. Partiküllerin stereo mikroskop ile görüntülerinin alınması.....	65
5.3.2. Çift disk yöntemi ile partiküllerin çarpma hızlarının ölçülmesi .....	71
5.3.3. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin hesaplanması.....	76
5.3.4. Erozyon aşınma deneyleri.....	78
5.3.5. SEM analizleri.....	80
5.3.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	82
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME .....	83
6.1. Aşındırıcı Partiküllerin Kütleli Debileri ve Hızlarının Değişimi .....	83
6.2. Erozyon Aşınma Deneylerinin Sonuçları .....	88
6.2.1. Erozyon oranının partikül tür ve boyutuna göre değişimi.....	91
6.2.2. Kütle kaybının partikül boyutuna göre değişimi.....	95
6.3. SEM Çalışmaları .....	98
6.3.1. SEM çalışmaları sonuçları .....	99
6.3.1.1. Partikül türü ve boyutunun yüzey morfolojisine etkisi .....	99
6.4. Aşınmış Yüzeylerin Pürüzlülük Değerlerinin Değişimi .....	105
6.4.1. Aşındırıcı partikül türü ve boyutunun etkisi .....	106
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	117
KAYNAKLAR .....	121
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	125
ÖZGEÇMİŞ .....	126

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Alaşım elementleri ile alüminyumun yaptığı alaşımlar .....	10
Şekil 1.2.	Alüminyum alaşımını solüsyon haline getirme, doğal ve yapay yaşlandırma. ....	14
Şekil 1.3.	Audi A8alüminyum iskelet. ....	19
Şekil 1.4.	Mimari alanda kullanılan alüminyum örnekleri.....	21
Şekil 1.5.	Ambalajlama alanında kullanılan alüminyum örnekleri .....	22
Şekil 1.6.	Elektrik-Elektronik alanında kullanılan alüminyum örnekleri.....	23
Şekil 1.7.	Hava aracı üzerinde kullanılan malzemelerin dağılımı.....	24
Şekil 1.8.	Hava aracına etki eden kuvvetler .....	25
Şekil 1.9.	Döküm alaşımlı malzeme örnekleri .....	26
Şekil 1.10.	Haddeleme yöntemi ile üretilen malzeme örnekleri. ....	27
Şekil 2.1.	Farklı türlerdeki katı partikül erozyonu .....	28
Şekil 2.2.	Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı (a).....	30
Şekil 2.3.	Katı partikül erozyonuna çarpma açısının etkisi a küçük açı, b büyük açı .....	30
Şekil 2.4.	Sünek ve gevrek malzemelerin katı partikül erozyonu karakteristikleri .....	31
Şekil 3.1.	Farklı boyutlarda aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüleri .....	38
Şekil 3.2.	AL-12Sİ alaşımının alümina (c), alümina + cam boncuk karışımı (b), cam boncuk (a) ile aşınma görüntüleri .....	39
Şekil 3.3.	(a) SPS (b) NAS aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri .....	40
Şekil 3.4.	(a) SPS (b) NAS ile aşındırılmış numuneler .....	40
Şekil 3.5.	2.93 m/s hız ve (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 90° çarpma açılarında yapılmış deney görüntüleri .....	41
Şekil 3.6.	(a) 30°, (b) 45°, (c) 60°, (d) 90° çarpma açılarında yapılmış deney görüntüleri .....	42
Şekil 3.7.	(a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 75°, (f) 90° çarpma açılarında yapılmış deney görüntüleri .....	43
Şekil 3.8.	Erozyon oranı-kinetik enerji grafiği .....	44
Şekil 3.9.	(a) Ek=0.1, (b) Ek=0.3, (c) Ek=0.5, (d) Ek=0.8 enerjiler ile gerçekleşen deney sonuçları .....	44
Şekil 3.10.	Nem oranı-Hacim kaybı grafikleri .....	45
Şekil 4.1.	Alümina minerali ve doğadaki görünümü.....	46
Şekil 4.2.	Garnet mineralinin görünümü .....	48
Şekil 4.3.	Cam küre görüntüleri .....	50
Şekil 4.4.	Çelik bilya görüntüleri .....	52
Şekil 4.5.	AA6082 T6 alüminyum alaşımı plaka örnekleri.....	55
Şekil 4.6.	Airbus A380 yolcu uçağı.....	56
Şekil 4.7.	The Eagle Eye 1 uçağı.....	57
Şekil 4.8.	Eurofly firmasının flash light uçağı .....	57
Şekil 5.1.	AA6082 T6 numunelerin boyutları ve örnek hedef malzeme.....	59
Şekil 5.2.	Alumina a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 120 mesh aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri.....	61

Şekil 5.3.	Garnet a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 180 mesh aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri.....	62
Şekil 5.4.	Cam küre a)-b) 100-200 mesh, c)-d) 200-300 mesh, e)-f) 300-400 mesh aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri .....	63
Şekil 5.5.	Çelik bilya aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri .....	63
Şekil 5.6.	Deneylerde kullanılan aşındırıcıların partikül ağırlıkları .....	64
Şekil 5.7.	Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması.....	65
Şekil 5.8.	Alümina aşındırıcı partiküllerinin boyut ölçüm görüntüleri .....	66
Şekil 5.9.	Çelik bilya aşındırıcı partiküllerinin boyut ölçüm görüntüleri.....	66
Şekil 5.10.	Garnet aşındırıcı partiküllerinin boyut ölçüm görüntüleri .....	67
Şekil 5.11.	Cam küre aşındırıcı partiküllerinin boyut ölçüm görüntüleri.....	67
Şekil 5.12.	Aşındırıcı partikül ölçümlerine göre ortalama alan.....	69
Şekil 5.13.	Nikon SMZ 745T marka stereo mikroskop görüntüsü .....	70
Şekil 5.14.	Döner disk partikül hızı ölçme sisteminin çizim ve gerçek resimleri.....	71
Şekil 5.15.	Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler .....	72
Şekil 5.16.	Disklerin dönüş hızı ( $n$ ) ölçümü.....	73
Şekil 5.17.	İkinci iz oluşumu için yapılan çalışmalar.....	74
Şekil 5.18.	Çift disk yöntemi ile yapılan çalışmalar.....	74
Şekil 5.19.	MB-Ruler programı kullanılarak yapılan açı ölçümü .....	75
Şekil 5.20.	Katı partikül erozyonu test düzeneği.....	78
Şekil 5.21.	DeneySEL çalışmalarda kullanılan SEM cihazı .....	80
Şekil 5.22.	Nanovea PS50 marka 3D optik profilometere cihazı.....	82
Şekil 6.1.	Ortalama partikül çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi .....	84
Şekil 6.2.	Alümina 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh partiküllerinin çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi .....	85
Şekil 6.3.	Garnet 60 mesh, 80 mesh ve 180 mesh partiküllerinin çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi .....	86
Şekil 6.4.	Cam küre 100-200 mesh, 200-300 mesh ve 300-400 mesh partiküllerinin çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi .....	87
Şekil 6.5.	Aşındırıcı partiküllerin ortalama kütleSEL debilerinin partikül boyutuna bağlı olarak değişimi. ....	88
Şekil 6.6.	Aşındırıcı partikül ağırlığı sabit tutulduğunda erozyon oranının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi.....	92
Şekil 6.7.	Erozyon süresi sabit tutulduğunda erozyon oranının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi. ....	93
Şekil 6.8.	Aşındırıcı partikül ağırlığı sabit tutulduğunda kütle kaybının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi.....	96
Şekil 6.9.	Erozyon süresi sabit tutulduğunda kütle kaybının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi .....	97
Şekil 6.10.	a) 60 mesh, b) 120 mesh boyutundaki alumina ile aşındırılmış numunelerin 500x büyütmede SEM fotoğrafı.....	100
Şekil 6.11.	a) 60 mesh, b) 180 mesh boyutundaki garnet ile aşındırılmış numunelerin 500x büyütmede SEM fotoğrafı.....	101

Şekil 6.12. a) 60 mesh, b) 120 mesh boyutundaki alümina, c) 60 mesh, b) 180 mesh boyutundaki garnet ile aşındırılmış numunelerin 1kx büyütmede SEM fotoğrafları.....	103
Şekil 6.13. a) 100-200 mesh, b) 300-400 mesh boyutundaki cam küre ile aşındırılmış numunelerin 500x büyütmede SEM fotoğrafı.....	104
Şekil 6.14. Çelik bilya aşındırıcı partikülleri ile aşındırılmış numunelerin 250x büyütmede SEM fotoğrafı.....	105
Şekil 6.15. Nanovea PS50 marka 3D optik profilometrede okunan pürüzlülük değerlerinin tanımları.....	106
Şekil 6.16. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak partikül ağırlığı sabit tutulan deneylerde ortalama pürüzlülük değişimi. ....	107
Şekil 6.17. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, alümina aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 120 mesh. ....	108
Şekil 6.18. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, garnet aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 180 mesh .....	109
Şekil 6.19. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, cam küre aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 100-200 mesh, c)-d) 200-300 mesh, e)-f) 300-400 mesh.....	110
Şekil 6.20. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, çelik bilya aşındırıcı partikülü.....	111
Şekil 6.21. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak aşınma süresi sabit tutulan deneylerde ortalama pürüzlülük değişimi. ....	111
Şekil 6.22. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, alümina aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 120 mesh .....	112
Şekil 6.23. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, garnet aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 180 mesh .....	113
Şekil 6.24. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, cam küre aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 100-200 mesh, c)-d) 200-300 mesh, e)-f) 300-400 mesh.....	114
Şekil 6.25. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, çelik bilya aşındırıcı partikülü.....	115
Şekil 6.26. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak partikül ağırlığı sabit tutulan deneylerde krater hacim değişimi. ....	115
Şekil 6.27. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak aşınma süresi sabit tutulan deneylerde krater hacim değişimi. ....	116



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Yeryüzünde en çok bulunan elementlerin kimyasal sembolleri ve bulunma sıklıkları.....	6
Tablo 1.2. Alüminyumun genel özellikleri.....	9
Tablo 1.3. Farklı alüminyum alaşım belirtme sistemleri.....	11
Tablo 1.4. Amerikan sistemi alüminyum alaşım elementlerini tanımlama.....	12
Tablo 1.5. İşlem alaşımlarının AA standartlarına gösteriliş biçimleri .	14
Tablo 1.6. Alüminyum ve alaşımlarının kullanım alanlarına göre dağılımları.....	17
Tablo 1.7. Otomotiv endüstrisinde kullanılan Alüminyum alaşımlı malzemeler ve ağırlıkları.....	20
Tablo 2.1. Katı partikül erozyonuna etki eden faktörler .....	29
Tablo 4.1. Alümina mineralinin özellikleri .....	47
Tablo 4.2. Garnet mineralinin özellikleri .....	49
Tablo 4.3. Cam küre özellikleri.....	51
Tablo 4.4. Çelik bilya özellikleri.....	53
Tablo 4.5. Çelik bilyaların uygulama alanlarına göre çeşitleri.....	53
Tablo 4.6. AA6082 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu .....	54
Tablo 4.7. AA6082 T6 alüminyum alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	55
Tablo 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları.....	60
Tablo 5.2. IMAGEJ programı kullanılarak yapılan aşındırıcı partikül ölçüm sonuçları.....	68
Tablo 5.3. Nikon SMZ 745T stereo mikroskop özellikleri.....	70
Tablo 5.4. Aşındırıcı partiküllerin hız ölçümü sonuçları.....	76
Tablo 5.5. Aşındırıcı partiküllerin debi ölçümü sonuçları.....	77
Tablo 5.6. Erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler.....	79
Tablo 5.7. SEM cihazının özellikleri.....	80
Tablo 5.8. Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazının özellikleri .....	82
Tablo 6.1. Erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler.....	90

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$\theta$	: İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı, ( $^{\circ}$ )
$\Delta m_s$	: Hedef numunenin kütle kaybı, (mg)
a	: Aşındırıcı partikül çarpma açısı, ( $^{\circ}$ )
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
E	: Erozyon oranı, (g/g)
L	: Diskler arası mesafe, (m)
$m_e$	: Aşındırıcı partikül kütlesi, (mg)
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
n	: Disklerin devir hızı, (rpm)
Ra	: Seçili yüzeyin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Rp	: Seçili yüzeyin Maksimum Tepe Yüksekliği
Rv	: Seçili yüzeyin Maksimum Vadi Derinliği
Sa	: Bütün yüzeyin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Si	: Silisyum
Sp	: Bütün yüzeyin Maksimum Tepe Yüksekliği
Sv	: Bütün yüzeyin Maksimum Vadi Derinliği
t	: Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşması esnasında geçen süre, (s)
V	: Partikül çarpma hızı, ( $ms^{-1}$ )

### Kısaltmalar

BSE	: Back Scatter Electrons (Geri Saçılan Elektron)
HVOF	: High Velocity Oxy-Fuel (Yüksek Hızla Kaplama)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

## AA 6082-T6 ALAŞIMINDA FARKLI AŞINDIRICILARIN KATI PARTİKÜL EROZYONUNA ETKİLERİ

### ÖZET

Bu çalışmanın amacı katı partikül erozyonundan sonra AA 6082-T6 alüminyum alaşımında oluşan yüzey hasarının ve plastik deformasyonların karakterize edilmesidir. Alüminyum alaşımları, uçak yapısal parça üretiminde kullanılan en yaygın malzemelerden biridir. Atmosferik hava konsantrasyonunda yer alan sert parçacıklar, yüzey üzerinde tekrarlanan darbelere neden olur. Dolayısıyla, katı parçacıkların tekrarlanan çarpmalarından kaynaklanan yüzey kaynaklı hasarları araştırmak çok önemlidir. Ekstrüde AA6082-T6 alüminyum alaşım tabakaları katı parçacık erozyon testlerine tabi tutuldu. Katı parçacık erozyon testleri ASTM G 76 standardına göre gerçekleştirildi. Çeşitli parçacık boyutlarına sahip aşındırıcı parçacıklar, AA6082-T6 alüminyum alaşım test kuponlarının yüzeylerine püskürtüldü. Katı parçacık erozyon testleri, 3 Barlık patlama basıncı ile normal insidansa (darbe açısı: 90 °) ulaşıldı. Testlerden sonra hasar mekanizmaları ve kütle kaybı ve erozyon hızı ölçümleri tartışılmıştır. Katı partikül erozyon testlerinden önce ve sonra yapılan numunelerin yüzey pürüzlülüğü analizi, 3D temassız lazer profilometre kullanılarak gerçekleştirildi. AA6082-T6 alüminyum alaşım test kuponlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), her örnekleme uzunluğundaki (Rz) en yüksek tepe ve en düşük vadiye arasındaki ortalama mesafe ve 3D yüzey topoğrafya haritaları ve eroziv aşınma oranları katı partikül erozyon testlerinden önce ve sonra elde edildi. Erozyon kraterinin 3D topoğrafya incelemeleri, materyal kopma bölgelerine odaklanmıştır. Erozyon krater hacmi ile kütle kaybı arasındaki korelasyonlar tartışıldı. Katı partikül erozyon testlerinden sonra örnek yüzeylerde oluşan plastik deformasyonlar 3D optik temassız lazer profilometre taramaları ve SEM kullanılarak araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum Alaşımı, Erozyon Hızı, Katı Partikül Erozyonu, Plastik Deformasyon, Yüzey topoğrafyası.

## **THE EFFECTS OF VARIOUS ABRASIVES ON SOLID PARTICLE EROSION IN AA 6082-T6 ALLOY**

### **ABSTRACT**

The aim of this study is to characterize the surface damage and plastic deformations occurred in AA 6082-T6 aluminum alloy after solid particle erosion. Aluminum alloys are one of the most common materials used in aircraft structural part production. Hard particles involved in atmospheric air concentration cause repeated impacts on surface. Hence, it is crucial to investigate the surface induced damages due to repeated impacts of solid particles. Extruded AA6082-T6 aluminum alloy sheets were subjected to solid particle erosion tests. Solid particle erosion tests were performed according to ASTM G 76 standard. Abrasive particles with various particle sizes blasted to surfaces of AA6082-T6 aluminum alloy test coupons. Solid particle erosion tests accomplished at normal incidence (impact angle: 90°) with blast pressure of 3 Bar. Mass loss and erosion rate measurements after tests were done and damage mechanisms were discussed. Surface roughness analysis of specimens before and after solid particle erosion tests were performed by using 3D non-contact laser profilometer. Average roughness (Ra), average distance between the highest peak and lowest valley in each sampling length (Rz) and 3D surface topography maps and erosive wear rates of AA6082-T6 aluminum alloy test coupons were obtained before and after solid particle erosion tests. The erosion crater 3D topography investigations were focused on material removal regions. Correlations between erosion crater volume and mass loss were discussed. Plastic deformations occurred in sample surfaces after solid particle erosion tests were investigated by using 3D optical non-contact laser profilometer scans and SEM.

**Keywords:** Aluminum Alloy, Erosion Rate, Plastic Deformation, Solid Particle Erosion, Surface Topography.

## GİRİŞ

Çalışma şartları altında mühendislik malzemeleri birçok zararlı dış etkiye maruz kalmaktadır. Tozlu çalışma şartları altında katı partiküllerin ve parçacıkların yüksek hızlarda tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarpmaları sonucunda erozif aşınma meydana gelmekte ve malzemelerin hasara uğramasına sebep olmaktadır. Havacılık alanında büyük bir sorun olan aşınma; uçak, helikopter ve diğer hava araçlarının yüksek seyir hızı, toz, uçucu küller, darbe buzu ve yağmur damlacıkları gibi mikro sert parçacıkların yüksek hızla darbeleriyle çok daha belirgin bir sorun haline gelmiştir. Atmosferde yer alan bu sert parçacıklar, yüzey üzerinde tekrarlanan darbeye neden olur ve bu durum malzeme ömrünün kısılması, maddi kayıplar ve hatta hava aracının kırım geçirmesine bile sebep olabilir. Dolayısıyla katı parçacıkların tekrarlanan çarpmalarından kaynaklanan zararları araştırmak çok önemlidir. Eroziyon aşınma ile ilgili literatürde bulunan kaynaklar incelendiğinde; ilk çalışmalar 1950'lerin başlarında başlamış ve günümüze kadar malzemelerin erozif aşınma davranışları ile ilgili çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir.

Katı partikül erozyonu yukarıdaki paragrafta da kısaca açıklandığı gibi havacılık alanında kullanılan malzemelere zarar veren ve malzeme kayıplarına yol açan bir süreçtir. Bu süreç ile alakalı literatürde gerçekleştirilen araştırmaların büyük çoğunluğu oluşan zararların en aza indirilebilmesi, giderilmesi ve önlenmesine yönelik çalışmalardır. Katı partikül erozyonu diğer aşınma süreçlerinde olduğu gibi birçok farklı parametrenin etkisi altında gerçekleşen karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle katı partikül erozyonu ile ilgili yapılan birçok çalışma farklı mühendislik malzemelerinin farklı parametreler altında aşınma davranışının anlaşılmasına yönelik gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan malzemelerin yüzeylerinin temizlenmesi için uygulanan kumlama işleminin ve malzemelere talaşlı şekil verilmesi için kullanılan su jeti işlemlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu işlemlerde hedef malzemeler istenilen parametreler altında erozif aşınma ile işlenmektedir. Bu şekilde bakıldığında katı partikül erozyonu mühendislik malzemelerine zarar veren bir süreç

olmasının yanında hedef malzemeye istenilen şeklin verildiği ve malzemelerin yüzeylerinin temizlendiği bir uygulamadır.

Alüminyum ve alaşımlarının kullanımı; yüksek dayanımı, korozyona mukavemeti, ağırlık oranı ve kolay işlenebilirliği ile özellikle havacılık endüstrisinde çok büyük önem taşır. Bütün olumlu özelliklerinin yanısıra alüminyum alaşımları, zayıf aşınma özellikleri sebebiyle hareketli veya temasın gerçekleştiği uygulama alanlarında yetersiz kalmaktadır. Eroziyon aşınma sonucunda kullanılan alüminyum alaşımlı malzemeler de enerji ve parçacık kaybı olduğu gözlemlenmektedir. Tüm bunlara ek olarak eroziyon aşınma sonucunda alüminyum malzeme üzerindeki korozyon direncini sağlayan oksit yapının bozulmakta olduğu ve eroziyon aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyonun da meydana geldiği gözlenmektedir. Bu durumda hava aracı üzerinde bulunan alüminyum ve alaşımlı malzemeleri özellikle tozlu şartlar altında çalışması, bu malzemelerin katı partikül erozyonuna maruz kalmasını ve zarar görmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Havacılık alanında; hava aracının ağırlığı, kaldırma kuvveti, hızlanma, yavaşlamalar ve irtifa değişiklikleri, bunlarla birlikte aksi yönde oluşan sürtünme kuvveti gibi birçok kuvvet altında çalışan hava araçlarında emniyet ve güvenlik çok önemli iki unsurdur. Bu noktada emniyet/güvenlik zaafiyeti, can ve mal kaybının yaşanmaması için son yıllarda özellikle havacılıkta kullanılan alüminyum alaşımlarının eroziyon aşınma davranışına yönelik çalışmalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu durumda alüminyum alaşımlarının eroziyon aşınma davranışlarının detaylı bir biçimde incelenmesi hem bu havacılık malzemelerinin aşınma nedeniyle oluşabilecek hasarların azaltılması veya önlenmesi, hem de bu malzemelerin işlenmesi ve istenilen yüzey özelliklerinin kazandırılabilmesi aşamasında büyük önem arz etmektedir. Tez çalışması kapsamında bu durumlardan hareketle AA 6082-T6 alüminyum alaşımlarının farklı eroziyon aşınma parametreleri altında eroziyon aşınma davranışlarının deneysel olarak araştırılması ve çıkan sonuçların anlaşılması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında AA6082-T6 alüminyum alaşımı, 90° partikül çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncında farklı boyutlarda ve türlerde aşındırıcı partiküller ile aşındırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda bütün parametrelerin alüminyum alaşımlarının eroziyon aşınma davranışına olan etkileri deneysel çalışmalar sonrasında hesaplanan erozyon oranları yorumlanarak irdelenmiştir. Tez çalışmam kapsamında farklı boyutlarda ve türlerde aşındırıcı partiküller ile alüminyum alaşımlarının

göstermiş olduğu erozif aşınma davranışları derinlemesine incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda çıkan veriler katı partikül erozyonuna maruz kalan uygulamalarda erozif aşınma hasarının en aza indirilmesi için doğru tasarımların gerçekleştirilmesi noktasında büyük önem arz edecek, mühendislere havacılık alanında ışık tutacaktır. Diğer yandan tez çalışmamdan ortaya çıkan veriler ile alüminyum ve alaşımlarının yüzeylerinin işlenmesi esnasında işlem parametrelerin seçimi, kullanılacak aşındırıcı partikülün seçimi ve optimizasyonuna katkı sağlayacaktır.

Yukarıda özetlenen verilere ulaşılabilmesi aşamasında erozyon oranlarının yanı sıra aşındırılan malzemelerin yüzey morfolojilerinin incelenmesi de çok önemlidir. Bu amaçla tez çalışmam kapsamında aşındırılan numunelerin lazer profilometre ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile yüzey morfolojileri detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Aşınma deneyleri sonrası malzeme yüzeyinde meydana gelen hasarların analizi ile alüminyum alaşımında hangi aşındırıcı partikülün ne tür bir hasara yol açtıkları ve oluşan bu hasarın hangi aşınma mekanizmaları ile meydana geldiğinin belirlenmesi önemli bir husustur. Tez çalışması esnasında gerçekleştirilen çalışmalarda özellikle Alüminyum numunede görülen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında birçok farklı aşındırıcı partikülün AA6082-T6 Alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan numunelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM ve Lazer Profilometre çalışması gerçekleştirilmiştir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin farklı detektörler ile BSE modunda aşınmış yüzeylerden farklı yaklaşımlarda görüntüler alınarak incelenmiştir. Tez çalışmamda Alüminyum numune üzerinden farklı yaklaşımlarda alınan aşınmış yüzey morfolojilerinin görüntüleri büyük bir özgünlük taşımaktadır. Bu görüntülerin analiz sonuçlarının değerlendirilmeleri ile malzemelerin erozif aşınma davranışlarının incelenmesine özgün bir bakış açısı kazandırılmıştır. Ayrıca tez çalışmam kapsamında aşındırılmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Lazer Profilometre yardımı ile incelenmiş, yüzey görüntülerinin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmıştır. Farklı boyut ve türlerdeki aşındırıcıların yüzey

pürüzlülük değerlerine etkisi araştırılmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen bu çalışma teze büyük özgünlük katmıştır.

Yüksek Lisans Tez çalışmasında ilk bölümlerde Alüminyum alaşımları, katı partikül erozyonu, Alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışları ve tezde kullanılan aşındırıcı mineraller (Alümina, Garnet, Cam Küre, Çelik Bilya) ile ilgili literatür bilgileri verilmiştir. Bu bölümlerden sonra tez çalışmasında kullanılan malzeme, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu bölümden sonra gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları üç ayrı bölüm içerisinde verilmiştir. Birinci bölümde Alüminyum alaşımının erozyon oranının aşındırıcı partikül türü ve boyutuna bağlı olarak değişimleri irdelenmiştir. İkinci aşamada ise aşındırılmış yüzeylerin morfolojilerindeki değişimler ve malzemede görülen etkin aşınma mekanizmaları SEM analizleri yardımıyla elde edilen sonuçlar ile verilmiştir. Üçüncü aşamada ise aşındırılmış yüzeylerin optik profilometre ile pürüzlük değerleri ölçülmüş, bu yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmıştır. Son bölümde tez çalışmasının sonuçları akademik ve endüstriyel bakış açıları ile genel hatları ile ortaya konmuştur.

Yüksek Lisans Tez çalışmamda alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışının 90° partikül çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncında farklı boyutlarda ve türlerde aşındırıcı partiküllere bağlı olarak değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Alüminyum alaşımının erozyon oranının bu parametrelere bağlı olarak değişimi derinlemesine irdelenmiştir. Erozyon oranı sonuçlarının yanı sıra alüminyum alaşımının yüzey morfolojisinin farklı boyutlarda ve türlerde aşındırıcı partiküller altında değişimi ve farklı boyutlarda ve türlerde aşındırıcı partiküller altında ortaya çıkan erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tespiti tez çalışmasının diğer önemli amaçlarını oluşturmaktadır. Bu amaçları gerçekleştirmek için tez çalışmasında her bir aşındırıcı partikül için en az üçer tekrarlı erozif aşınma deneyi, çok detaylı bir SEM çalışması ve detaylı pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Katı partikül erozyonu ile hasara uğramış yüzeylerin karakterizasyonunda detaylı SEM analizleri gerçekleştirilmesi ve aşınmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi, yüzey pürüzlülüğünün 2 ve 3 boyutlu görüntülerinin alınması ile malzemelerin katı partikül erozyonu davranışlarının



karakterizasyonuna farklı ve özgün bir bakış açısı geliştirilmesi tez çalışmasının önemli amaçlarından biridir.

Giriş bölümünde özetlenen bütün bu çalışmalar başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir ve yukarıda belirtilen amaçlara ulaşılmıştır. Tez çalışmasında AA6082-T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışlarının 90° partikül çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncında farklı boyutlarda ve türlerde aşındırıcı partiküllere bağlı olarak değişimi, bu parametreler altında ortaya çıkan yüzey morfolojilerinin, hasar mekanizmalarının belirlenmesi ve aşınmış yüzeylerdeki pürüzlülüğün incelenmesi ile karakterizasyonu amaçlanmıştır.



## 1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

### 1.1. Alüminyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi

Alüminyum yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biridir, mühendislik alanında çelikten sonra en çok kullanılan metaldir ve yeryüzünün bileşiminde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. Ancak bu kadar önemli bir element olmasına rağmen, endüstriyel çapta üretimi 1886 yılında elektroliz yönteminin kullanıma başlanması ile gerçekleşmiştir. Tablo 1.1’de doğada en çok bulunan elementler verilmiştir.

Tablo 1.1. Yeryüzünde en çok bulunan elementlerin kimyasal sembolleri ve bulunma sıklıkları [1].

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

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

Bir alüminyum minerali olan alum eski Yunanlılar ve Romalılar tarafından kan durdurucu, boyaların renklerini sabitleştirmede ve harç olarak kullanıldığı bilinmektedir. 1746 yılında J.H.Pottalumdan alüminayı ( $Al_2O_3$ ) ayırmıştır [1-2]. O zamanlar içerisinde A.L. Laosier'inde olduğu birkaç bilim adamı alüminanın bilinmeyen bir metalin oksidi olduğuna inanmışlardır.

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

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

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

1854 yılından sonra alüminyum üretim teknolojisi sürekli iyileştirilerek kalite ve üretimi artırma, üretim maliyetini düşürme çalışmaları yapılmıştır. Fransa'da ilk

kurulan tesiste günde 2 kg alüminyum üretilirken, 1857'de bu miktar 50kg/gün'e saflığı da % 96-97'ye erişmiştir. Tüm kimyasal yöntemlere rağmen, ikinci dönemde alüminyum üretimi istenilen düzeylere erişememiştir.

Üçüncü dönem, bugünkü endüstriyel alüminyum üretiminin temeli olan süreç için 23Nisan 1886'da P.L.T. Heroult ve aynı yılın 9 Temmuz'unda Amerika'da C.M.Halltarafından, birbirlerinden habersiz olarak, ergimiş kriyolit içerisinde çözünen alüminadan elektroliz yoluyla alüminyum üretimi için patent istemeleri ile başlamıştır. Bu nedenle Hall-Heroult olarak adlandırılan bu yöntemin endüstriye uygulanmasıyla alüminyum üretimi ani olarak artış göstermeye başlamıştır. Bu yöntem günümüzde birincil alüminyum üretiminde halen kullanılmaktadır. Busebeple 1886 yılı alüminyum endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilir. 1886yılında WernerVon Siemens'in dinamoyu keşfi ve 1892 yılında K.J.Bayer'in, boksitten alümina eldesini sağlayan Bayer prosesini bulması ile alüminyumun endüstriyel çapta üretimi kolaylaşmış ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu sayede alüminyum, demir çelikten sonra dünyada en çok kullanılan ikinci metal olmuştur [3].

## **1.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri**

Alüminyum ve alüminyum alaşımları dünyada demir esaslı malzemelerden sonra en önemli metal grubunu oluşturur. Alüminyum alaşımlar demir esaslı metallere göre korozyona dayanıklılık, hafiflik, kolay işlenebilirlik, yüksek ısıl ve elektriksel iletkenlik gibi bazı üstün özellikleri nedeniyle endüstride önemli kullanım alanına sahiptirler. 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, diğer metallerle karşılaştırıldığında, alüminyum endüstriyel çapta üretimi yapılan yeni metallere biri olmasına rağmen, bugün bakır, kurşun, kalay ve çinko gibi tüm demir dışı metallerin toplam kullanımından daha fazla miktarda kullanılır.

Tablo 1.2. Alüminyumun genel özellikleri.

Özgül ağırlık	2,7 g / cm <sup>3</sup>
Ergime sıcaklığı	660 °C
Ergime ısı	386 kJ / kg
Elastiklik modülü	65 Gpa
Özgül ısı	0,90 kJ / kg. K (18 °C )
Isı iletme katsayısı	0,94 kJ / kg. K ( 100 °C )
Elektrik iletme kabiliyeti	39 m / Ω . mm <sup>2</sup>
Çekme mukavemeti	44.8 MPa
Akma sınırı	17.2 MPa
Kopma uzaması	30 – 38 %
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	250 – 300 °C
Kristal çeşidi	KYM

Tablo 1.2’de görüldüğü gibi Alüminyumun kullanımını arttıran özelliklerinin başında hafifliği gelmektedir. Özgül ağırlığı 2,7 gr/cm<sup>3</sup> olup demirinkinin üçte biri kadardır. Alaşımız halde çekme mukavemeti 44,8 MPa civarında olmasına karşın alaşımlandırma ile kolayca 110 MPa ve ısıl işleme (çökeltme sertleştirilmesi) 220 MPa’ya yükseltilebilir. Bu değer yapı çeliğinin mukavemetine yakındır. Özgül mukavemetin; çekme mukavemeti/özümlü ağırlık olarak tanımlandığı bilinmektedir. Buna göre alüminyum alaşımlarının özgül mukavemetinin yapı çeliklerinin üç katına yakın olduğu kolayca görülür. Bu nedenle alüminyum alaşımları hafifliğin önemli olduğu taşıt araçları ve havacılık endüstrisi için çok elverişlidir.

Saf alüminyumun elektriksel iletkenliği Tablo 1.2’de de görüldüğü gibi yüksek olduğu bilinmektedir ve bakırın elektriksel iletkenliğinin %60’ı kadardır. Diğer taraftan bakırın özgül ağırlığının alüminyumun özgül ağırlığının üç katından fazla olduğu göz önüne alınırsa birim ağırlık başına düşen iletkenlik yönünden bakırdan daha üstün olduğu görülür. Bu nedenle geniş açıklıklı yüksek gerilim hatlarında çelik taşıyıcılarla birlikte en uygun iletken alüminyumdur.

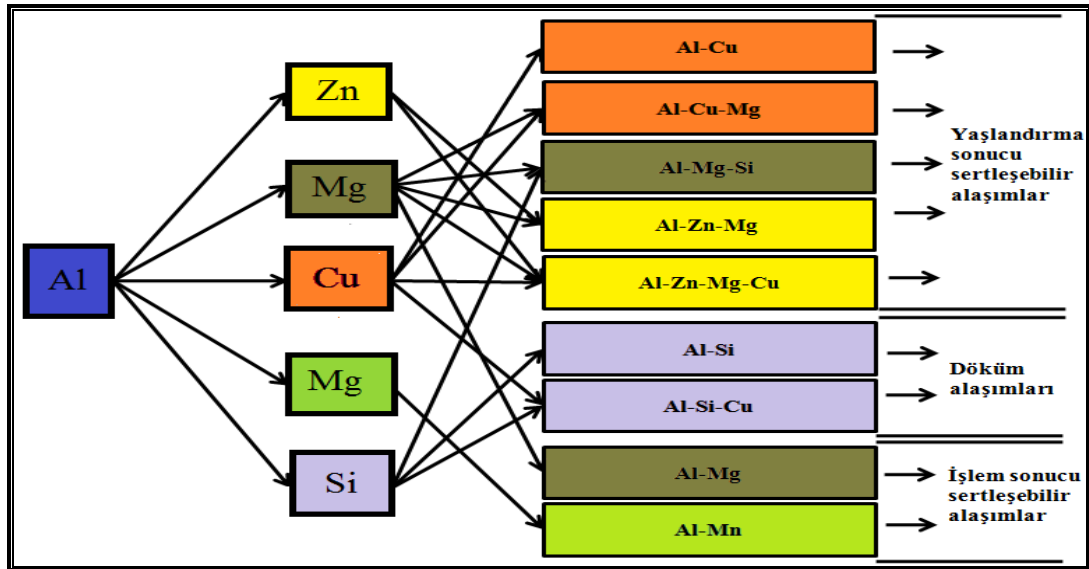
Alüminyumun bir diğer üstün özelliği korozyona karşı mukavemetliliğidir. Yüzeyinde oluşan oksit tabakası alüminyumu korozyona karşı korur. Ayrıca anodizasyon veya eloksal işlemi ile bu koruyucu tabakalarının kalınlığı artırılabilir. Ancak alkali eriyikler bu oksit tabakasını bozduğundan koruyuculuk etkisi kaybolur. Bu nedenle yapılarda harç, sıva gibi kireç içeren malzemelerin alüminyum

elemanlara sürülmemesi gerekir. İnşaat süresinde bu elemanların üzeri bir bantla örtülmelidir [2].

### 1.3. Alüminyum ve Alaşımlarının tipleri

Doğada bulunan saf Alüminyum yumuşak ve sünektir. Mekanik özellikler istenilen ana kullanım alanları söz konusu olduğunda saf bir metalin sağlayabileceği belirli sınırlar içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla farklı elementlerle alaşımlandırılmıştır. Alüminyum alaşımlarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri alaşımda kullanılan elemanlarına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Farklı birçok metalik element tarih içinde alüminyum ile alaşım yaptırılmıştır. Bakır, Magnezyum, Manganez, Silikon ve Çinko alüminyum alaşımları büyük bileşenlerin sınırlayıcısı olarak kullanılır. Krom, Kurşun, Nikel ve diğer öğeleri küçük alaşım bileşenlerinin özel amaçları için kullanılır. Fakat bunların sadece bir kısmı ticari olarak kullanılabilen alaşımlardır. En çok kullanılan alaşım elementleri Cu, Si, Zn, Mg ve Mn'dır. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi alaşım elementleri alüminyumun ana özelliklerini geliştirmek amacıyla yalnız başlarına veya çeşitli kombinasyonlarla ilave edilirler [2].



Şekil 1.1. Alaşım elementleri ile alüminyumun yaptığı alaşımlar [2]

Alüminyum alaşımlar dövme ve dökme olarak iki kategoriye ayrılırlar. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyetleri iyidir ve kolayca şekillendirilebilirler. Tablo 1.3'te de gösterildiği gibi en az dokuz alüminyum ve

alüminyum alaşımları şartname sistemi vardır. Bu sistemlerin içinde en yaygın kullanılanı AA/IADS'dır.

Tablo 1.3. Farklı alüminyum alaşım belirtme sistemleri.

AA/ IADS	Metaller veya alaşımlar, uluslararası alaşım belirleme sistemi (IADS) temelli malzemeleri sınıflandıran Birleşik Devletler'in (AA) alüminyum birliği tarafından oluşturulan bileşim standartlarına uygundur.
BS	İngiliz standardı (BS), alüminyum için en eski belirleme standartlarından biridir.
AMS	Metaller veya alaşımlar, otomotiv mühendisleri topluluğu tarafından kurulan belirli havacılık ve uzay materyali yönergelerine uygundur.
ASTM/ASME	Amerikan test ve materyaller topluluğu (ASTM) kar amacı gütmeyen bir organizasyon olup, ürün, sistem ve çoğu için gönüllü standartların geliştirilmesi ve yayılması için forum Amerikan makine mühendisleri topluluğu (ASME) spesifikasyonları ASTM spesifikasyonlarına benzer
Casting Gare (ICI, etc.)	Enstrüman ve alaşım şekilleri döküm enstitü (ACI), Amerikan döküm enstitü(ADCU), test ve malzemelerinin Amerikan topluluğu(ASTM) ve envanter atma enstitüsü (ICI) için gereksinimi karşılamaktadır.
EN	Avrupa norm ya da EuroNorm (EN) özellikleri birkaç büyük, ulusal tayin yerini BS, DIN, NS ve SS gibi sistemleri.
MIL-SPEC/Federal (QQS)	MIL-SPEC metaller ABD hükümeti standartlara uygun ve askeri uygulamalar için uygundur. QQ ve QQS örnekleri belirli metaller atamak için kullanılır.
JIS	Japon endüstri standartları (IS) Japonya'da endüstriyel faaliyetler için kullanılan standartları belirtir. Standartlaştırma işlemi Japon endüstristandartları komitesi tarafından koordine edilmektedir ve Japon standartları derneği yayınlamaktadır.
SAE	otomotiv mühendisleri toplumu (SAE) tarafından ürünleri alaşım sınıflarda karşılamak için
UNS	Metaller veya alaşımları içinde birleştirilmiş numaralandırma sistemi (UNS), kompozisyon standartlarına uygun ASTM, SAE ve birkaç metal ticaret birlikleri ve toplumlar tarafından kuruldu.

1970'e kadar bilinen işlenmiş alüminyum alaşımlarında bir karmaşa vardı ve pek çok ülkede sadece gelişimleri sırasına göre numaralandırılırlardı. 1970 yılında piyasaya sürülen ve şuanda yaygın kabul gören uluslararası alaşım tasarım sistemi (IADS), birleşik devletler alüminyum derneği tarafından geliştirilen bir sınıflandırmayı kullanmaktadır.

Tablo 1.4. Amerikan sistemi alüminyum alaşım elementlerini tanımlama.

1xxx	%99 ve daha fazla saflıkta alüminyum içerir.
2xxx	Ana alaşım elementi bakırdır.(Cu)
3xxx	Ana alaşım elementi mangandır.(Mn)
4xxx	Ana alaşım elementi silisyumdur.(Si)
5xxx	Ana alaşım elementi magnezyumdur.(Mg)
6xxx	Ana alaşım elementi magnezyum ve silisyumdur.( Mg <sub>2</sub> Si)
7xxx	Ana alaşım elementi çinkodur.(Zn)
8xxx	Alüminyum ön alaşımları olarak adlandırılır.

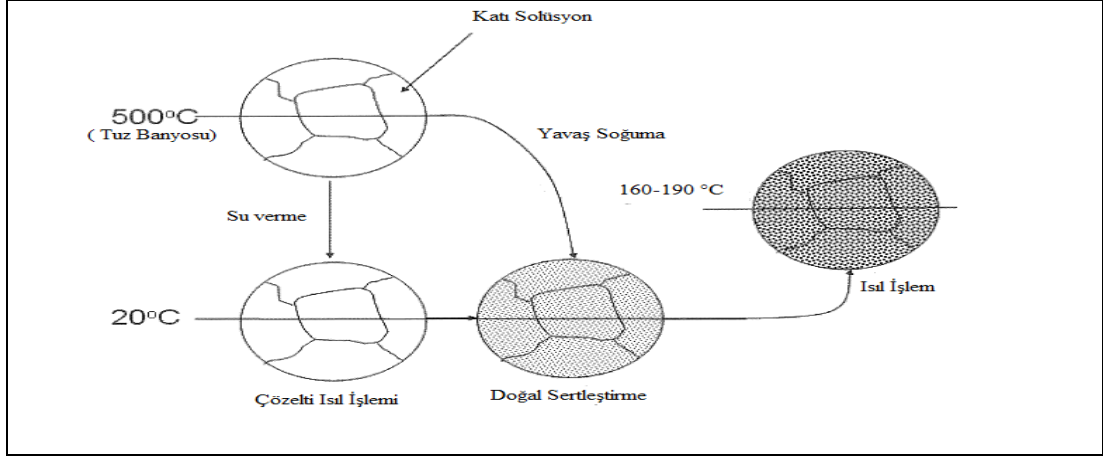
Tablo 1.4’de belirtildiği gibi tanımlanan alaşımlarda ilk basamak hangi seride alaşım olduğunu ve temel alaşım elementini belirtmektedir. 2. Basamak, alüminyumun saflığını ve alaşımda yapılan bileşim değişikliğini veya yabancı madde limitlerini belirtir.

- “0” olması kontrol olmadığını
- “1” ve “9” arası olması değirmende farklı kontrol seviyelerini belirtir. Bu kontroller IADS’e kayıtlıdır.
- 2. ve 4. Basamağın iki anlamı vardır.
- 1xxx ise son iki basamak %99’un üzerindeki alüminyum miktarını gösterir. Örneğin 1025 için, %99.25 saf alüminyumu, geri kalan 0.75 ise kontrolsüz safsızlığı ifade etmektedir.
- Alüminyum 1xxx’den farklı ise, son iki hane IADS’e kayıtlıdır ve başka türlü bir anlamı yoktur.
- Bazen temper denilen öğütülmüş alüminyumun muamele edilmesi dört haneli IADS numarasını takip eden bir harf ile gösterilir.
- F imal edildiği gibi anlamına gelir, rakam eklenmemiştir
- W ısıyla işlem görmüş anlamına gelir, rakam eklenmemiştir
- Tavlama işlemi görmüş anlamına gelir, rakam eklenmemiştir
- H sertleşme sertliği anlamına gelir
- H1 sadece gerilmiş sertleştirilmiş
- H2 gerilmiş sertleştirilmiş ve tavllanmış
- H3 gerilmiş sertleştirilmiş ve termal olarak stabilize edilmiş
- Sertlik belirten ek bir rakamda olabilir



- H\_2 çeyrek sert
- H\_4 yarı sert
- H\_6 üç çeyrek sert
- H\_8 tam sert
- T termal olarak işlem görmüş anlamına gelir
- T1 Sıcak işlerden soğutulmuş, doğal olarak yaşlanmış
- T2 Tavlanmış
- T3 Çözelti ile işleme tabi tutulmuş ve soğuk işlenmiş
- T4 Çözelti ile işleme tabi tutulmuş ve doğal olarak yaşlanmış
- T5 Sıcak işlerden soğutulur ve fırında yaşlandırılır
- T6 Çözelti ile işleme tabi tutulmuş ve fırında yaşlandırılır
- T7 Çözelti ile işleme tabi tutulmuş ve stabilize edilmiş
- T8 Çözelti ile işleme tabi tutulmuş, soğuk işlenmiş ve fırında yaşlandırılır
- T9 Çözelti ile işleme tabi tutulmuş, fırında yaşlandırılır ve soğuk işlenmiş
- T10 Sıcaklığından soğutulur, fırında yaşlandırılır ve soğuk işlenmiş
- T51 Gerilerek rahatlatılan stres
- T510 Gerilme ile daha fazla işlem yapılmaksızın gerilme azaltılır
- T511 Gerilme hafif düzeltme ile hafifletilen stres
- T52 Sıkıştırma ile giderilen stres
- T54 Gerilmeden kurtulma ve sıkıştırma
- T42 O veya F temperli ve doğal olarak yaşlandırılmış çözelti
- T62 O veya F ile muamele edilmiş çözelti

Alüminyum alaşımlara uygulanan termal işlemler sırasıyla solüsyon haline getirme, doğal yaşlandırma ve yapay yaşlandırma olarak Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Alüminyum alaşımlarını solüsyon haline getirme, doğal ve yapay yaşlandırma.

Tablo 1.5’de alüminyumun içerdiği alaşım elementlerine göre dizilişi bulunmaktadır. İşlem alaşımları, döküm alaşımlarına nazaran belirgin bir biçimde kompozisyon ve mikro yapısal özellikleri bakımından farklıdır [ 2, 3].

Tablo 1.5’de de görüldüğü gibi bütün işlem alaşımlarına yaşlandırma işlemi uygulanamamaktadır. 1XXX, 3XXX ve 5XXX serisi alaşımlar yaşlandırma işlemlerine tabi tutulamazken 2XXX, 4XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi alaşımlar yaşlandırma işlemlerine tabi tutulabilmektedir.

Tablo 1.5. İşlem alaşımlarının AA standartlarına gösteriliş biçimleri [2, 3].

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

### 1.3.1. 1XXX serisi alaşımlar

Bu seri ticari olarak yüksek saflıkta (%99 saflığın üzerinde) alüminyum içerir. 1XXX serisi alaşımlar mükemmel korozyon direnci, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği ve mükemmel işlenebilirlik özelliklerine sahiptirler. Fakat bu özelliklerinin yanı sıra düşük mekanik özelliğe sahiptir ve güçsüzdür. %99 ve daha yüksek saflıktaki

alüminyum içeren 1XXX serisi alaşımlar elektrik ve kimya endüstrisinde önemli rol oynar [2, 4].

### **1.3.2. 2XXX serisi alaşımlar**

2XXX serisinin ana alaşım elementi olarak bakır kullanılır. Bu alaşımlarda bakırın en büyük yararı, mukavemette büyük bir artış sağlamasıdır. Ancak alaşım doğru ısıyla muamele edilmediğinde, metal içindeki alüminyum ve bakır taneleri arasında taneler arası korozyon oluşur. 2XXX serisi alaşımlara genelde çözelti ısıl işlemi uygulanması ile karbonlu çeliklerin mekanik özelliklerine benzer özellik elde edilebilir. Bu seri genelde hava aracı imalatında ve uçak kanat yüzeylerinde kullanılır [2, 4].

### **1.3.3. 3XXX serisi alaşımlar**

3XXX serisinin ana alaşım elementi olarak mangan kullanılır ve ısıyla muamele edilmesi mümkün değildir. Bu alaşımlara ısıl işlem uygulanmadığında 1XXX serisi alaşımlardan %20 oranında daha mukavemettirler. Bu seri alaşımlar yiyecek konserve kutularında, mutfak takımlarında, depolama tanklarında kullanılmaktadır [2, 4].

### **1.3.4. 4XXX serisi alaşımlar**

4XXX serisinin ana alaşım elementi olarak silisyum kullanılır ve bu erime noktasını düşürür, kaynak ve lehimleme kabiliyetlerini geliştirir. Silisyum yeterli miktarda eklendiğinde (%12 civarında) gevreklik oluşturmadan ergime aralığının daralmasına neden olur. Bu sebepten dolayı alüminyum bağlamak üzere kaynak teli ve sert lehim alaşımları kullanılır [2, 4].

### **1.3.5. 5XXX serisi alaşımlar**

5XXX serisinin ana alaşım elementi olarak magnezyum kullanılmıştır. Alaşım elementi olarak magnezyumun kullanılması, deniz suyu korozyonuna karşı yüksek mukavemet, iyi kaynak yapılabilme özelliği, çekme ve yorulma mukavemetlerinde iyileşme de dahil olmak üzere arzu edilen birçok özellik kazandırır. Ancak yüksek sıcaklığa maruz kalırsa veya soğuk işleme tabi tutulursa oldukça kötü bir şekilde

aşınabilir. Daha çok gemilerde, vinç parçalarında ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [2, 4].

#### **1.3.6. 6XXX serisi alaşımlar**

6XXX serisinin alaşımları alaşım elementleri olarak yapısında silisyum ve magnezyum ( $Mg_2Si$ ) kullanılmıştır. Bu alaşım ısıl işlemle muamele edilebilir hale getirilir, iyi şekillendirilebilen ve yüksek aşınma direnci özelliklerine sahiptir. 2XXX ve 7XXX serisi alaşımları ile aynı mukavemet değerine sahiptirler fakat 6XXX serisi alaşımları şekillenebilme, kaynaklanabilirlik, işlenebilme ve korozyon dirençleri açısından daha iyidirler. Bu alaşımların korozyona gösterdikleri direnç, saf alüminyumun gösterdiği dirence kıyasla daha düşüktür. Mimari uygulamalarda, havacılık endüstrisinde, köprü korkuluklarında ve kaynaklı yapılar kullanım alanlarına örnektir [2, 4].

#### **1.3.7. 7XXX serisi alaşımlar**

7XXX serisinin ana alaşım elementi olarak %1 ile %8 aralığında değişen çinko kullanılmıştır. Bu alaşımlar çinko ilave ederek sertleştirilir ve katlanır hale getirilir. Bunların bükülmesi zordur ve düz plakaların gerekli olduğu durumlarda daha sık kullanılır. Küçük oranlarda magnezyum ilavesi ile ısıl işlem yapabilme kabiliyeti kazandırılır ve bu alaşımlara ısıl işlem yapılması mukavemet değerlerini en yüksek alaşım haline getirmiştir. 2. Dünya savaşı esnasında hava kuvvetlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir[2, 4].

#### **1.3.8. 8XXX serisi alaşımlar**

8XXX serisi alaşımlar alüminyum alaşımların ön alaşımları olarak adlandırılırlar. Alaşım elemanlarının saf metal durumunda sıvı alüminyum içinde ergitilmesi ergime derecelerinin farklılığı sebebiyle zorluk yaratmaktadır. 8XXX serisi Alüminyum ön alaşımlarının bir diğer faydası da az olanlardan katılan alaşım elemanlarının homojen olarak dağılımının kolayca sağlanabilmesidir [2, 4].

#### 1.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Günümüz dünyasında artarak devam eden ekolojik kaygılar ve hammadde ihtiyacı otomotiv, havacılık, denizcilik ve inşaat sektörlerinde yer kabuğunda en çok bulunan ikinci metal element olan alüminyuma yöneltmiştir. Halihazırda dünyada kullanılan alüminyum ve alaşımlarının kullanım alanlarına göre yüzdelerle dağılımı Tablo 1.6'da gösterildiği gibidir [6]. Alüminyumun tercih edilmesinin bir diğer sebebidir geri dönüşüm çemberiyle tekrar geri kazanılabilmesidir. Alüminyum, hammaddeden üretim için gerekli enerjinin sadece %5'i kadar bir enerjiyle tekrar ergitilebilir ve yepyeni ürünler için kullanılabilir. İhtiyaca ve kullanım yerlerine göre Hafif olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri gibi özellikleri nedeniyle otomotiv endüstrisi için alüminyumun tercih edilmesinin diğer nedenlerindedir.

Tablo 1.6. Alüminyum ve alaşımlarının kullanım alanlarına göre dağılımları [6].

Sektörler	Oran %
İnşaat	25
Ulaşım	24
Ambalaj	15
Elektirik/Elektronik	10
Genel mühendislik	9
Mobilya, Ofis eşyaları	6
Demir çelik, Metalurji	3
Kimya ve tarım ürünleri sanayi	1
Diğer	7
Toplam	100

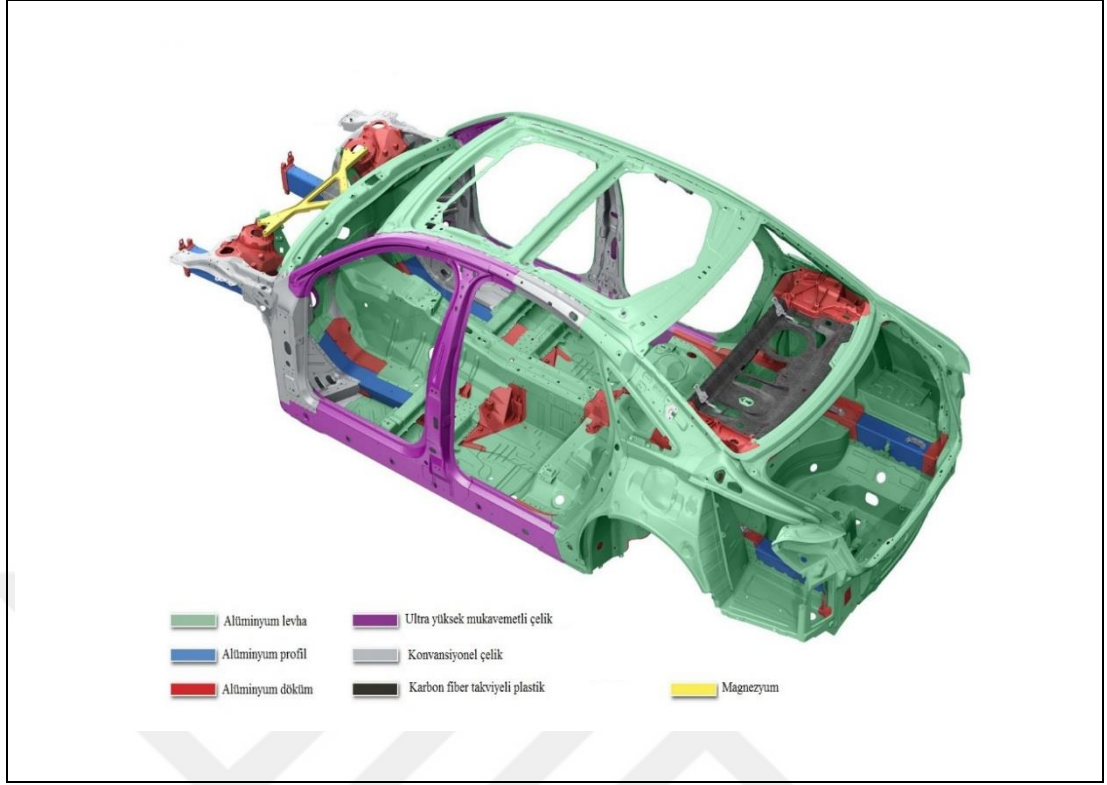
##### 1.4.1. Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde kullanımı

Özellikle son yıllarda alüminyum alaşımları, güvenlikten ödün vermeden ve konfordan vazgeçmeden enerji tasarrufuna dönük, az yakıt tüketen araçlar için hafif ama mukavemeti yüksek alaşımlarının geliştirilmesi, otomobillerde, otobüslerde, trenlerde, deniz taşıtları yapımında öncelikli olarak tercih edilen malzemeler olmuştur.

Kara ve deniz taşıtlarında kullanılan alüminyum ve alaşımları, çelik ve demir gibi diğer metallere göre yaklaşık üç kat daha hafiftir. Otomobil, otobüs, tren ve deniz

araçları gibi taşıtların toplam ağırlığındaki her %10'luk azalma ortalama %5-10 oranında yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Örneğin yaklaşık 1400 kg ağırlığındaki bir kara taşıtında taşıtın yapılış amacı, yapısı, taşıma kapasitesi ve darbe dayanımı gibi hususlar göz önünde bulundurularak çeşitli parçalarında alüminyum veya alaşımlarının kullanımı taşıtın ağırlığında yaklaşık 300 kg azalmaya sebep olmakta ve bu taşıtın toplam ağırlığında ortalama %20'lik bir azalma sağlanmaktadır. Bir araç için kullanılan her 1 kg çeliğin 500 gr alüminyumla yer değiştirmesi aracın tüm kullanım ömrü için toplam 10 kg daha az emisyonu sebep olacaktır [5].

Alüminyum alaşımlarının bir diğer tercih sebebidir doğayı tahrip eden ve ekolojik dengeyi bozan atık gazların miktarını azaltmaktır. Bunun içinde daha düşük yakıt tüketimi sağlayacak teknolojileri üreterek ve geliştirerek yakıt tüketimini minimum seviyede kullanabilme yoluna gidilmektedir. Otomotiv üreticileri konforun artması ve güvenliğin maksimum düzeye çıkartılması için ekstra aksamlar eklemekte ve bu da yapılan aracın ağırlığında artışa neden olmaktadır. Dolayısıyla bu artış aracın performansı, üretiliş amacı ve taşıma kapasitesi göz önünde bulundurulduğunda daha büyük motorlar bununla birlikte de çok fazla yakıt tüketimine sebep olacaktır. Yüksek yakıt tasarrufu için çözüm taşıttaki fazla ağırlığı azaltmak yani ağır metal parçalar yerine aynı mukavemet değerlerine sahip düşük ağırlıklı alüminyum alaşımlı parça kullanımını arttırmaktır. Çevre kirliliğinin yok edilmesine yönelik çalışmalarda hava kirliliğinin azaltılmasında, motorlu araçlarda direkt püskürtmeli dizel motorlar ve hafif taşıt üretimi önemli bir çözüm olarak görülmektedir. Güvenlikten ödün vermeden ve konfordan vazgeçmeden az yakıt tüketen otomobiller için hafif, fakat mukavemeti yüksek alaşımların geliştirilmesi, otomobil üreticilerinin önemli hedefleri arasında yer almaktadır. Şekil 1.3'de bu amaçla üretilmiş Audi A8 aracının iskelet fotoğrafları verilmiştir [5].



Şekil 1.3. Audi A8 alüminyum iskelet [3].

1000/ 3000/ 5000 alüminyum alaşımları paslanmazlık özelliği sebebi ile çelikten yapılmış gövdeye göre üç, dört kat daha çok dayanıklıdır, hafiftir, yüksek dayanım ve şekil alabilme özelliğine sahiptir. Bu özellikleri nedeni ile otomotiv sektöründe kamyon kasası, bagaj kapağı, hava tüpü, otobüs gövdesi ve oto plakası gibi yerlerde kullanılırlar [7].

Son yıllarda otomotiv piyasasında "çelik jant" denilen gösterişli, parlak, boya ve bakım gerektirmeyen "hafif alaşımlı" jantlar "alüminyum"dur. Literatürde AlSi7Mg, ticari olarak A356 alaşımı olarak bilinen ve otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulan Alüminyum – Silisyum – Magnezyum alaşımlarıdır [8].

Alüminyum alaşımlarından üretilen motor sistemi, dişli kutuları, çerçeve bağlantı elemanları, fren sistemi ve enjeksiyon sistemi gibi temel gruplarda yer alan otomobil parçaları ve ağırlıkları aşağıdaki Tablo 1.7'de özetlenmiştir [9].

Tablo 1.7. Otomotiv endüstrisinde kullanılan Alüminyum alaşımlı malzemeler ve ağırlıkları [9].

Parça Adı	Ortalama ağırlık(kg)	Parça Adı	Ortalama ağırlık(kg)
Silindir başı	10	Vites kutusu	3-6
Piston	0.5	Transformotor kutusu	4.0
Emme manifoldu	2	Debriyaj kutusu	4.5
Motor bloğu	12	Kardan kutusu	0.4
Su pompası kutusu	0.5	Direksiyon çubuğu	0.4
Enjeksiyon	0.6	Debriyaj pedalı	0.4
Ateşleme parçaları	0.4	Pedal bağlantıları	0.5
Jeneratör kutusu	0.2	Askı tertibatı	5.0
Starter	0.5	Fren pedalı	0.5
Yağ filtresi	0.6	Fren kavrama kutusu	0.4
Alternatif akım jeneratörü	1.1	Direksiyon kutusu	0.4
Dengeleme kolu kapağı	1.5	Motor bloğu	5
Dağıtıcı başlığı	0.5	İnce döşeme parçaları	14.5
Dengeleme kolu	0.5	Arka ask kutusu	6
Yağ pompası	1.0	Krank kolu	0.5
Dizel yakıt pompa kutusu	0.22	ABS sistemi	4x5+1,7
Karbüratör	1.0	Enjeksiyon	1+1
Termostat başlığı	0.12	Jantlar	6.5
Motor mesneti	0.7	Direksiyon kutusu	0.7

#### 1.4.2. Alüminyum ve mimari

Alüminyum sağlamlığı yanında sahip olduğu dekoratif görünüm ve üzerine uygulanan kaplamalar sayesinde çok değişik amaçlarda kullanılabilmesi mühendislere ve mimarlara inşaat sektöründe zengin seçenekler sunar. Bu nedenle alüminyum, binaların çatı ve cephe kaplamalarında, kapı ve pencere sistemlerinde, merdivenlerde ve korkuluklarında, çatı iskeletlerinde, inşaat iskelelerinde ve sera yapımında büyük miktarda kullanılır [1]. Şekil 1.4'te sera yapımı, pencere ve kapı sistemi, dış cephe ve çatı yapımında alüminyum kullanımı örnekleri gösterilmiştir.





Şekil 1.4. Mimari alanda kullanılan alüminyum örnekleri.

### 1.4.3. Alüminyum ve ambalaj

Alüminyumun homojen yapısı, ince folyo (alüminyum kâğıt) şeklinde üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve kolay şekillenebilmesi onu ideal bir ambalaj malzemesi yapar. Alüminyum folyo, hava ve mor-ötesi ışınları geçirmediğinden, gıdaları doğal renk ve tatları ile birlikte korur [1]. Alüminyum, konteynır yapımından ilaç kutularına, dış macunu tüpünden meşrubat kutularına kadar çok çeşitli ambalajlama alanının da mükemmel bir şekilde kullanılmaktadır. Kutu, tüp, tava, tepsi ve fiçı şeklindeki ambalajlar gıda sanayinde et konserveleri, meyve suyu ve konsantreleri, alkollü ve alkolsüz içeceklerin ambalajlanmasında kullanılır. Şekil verilmiş paket kapları her türlü gıdayı ambalajlama veya servis etme amaçlı kullanılır. Alüminyum folyolar poşet tarzında paketlemeye ve iyi ısı yalıtımından dolayı bazı yemeklerde fırında pişirme işlemi esnasında kullanılır.

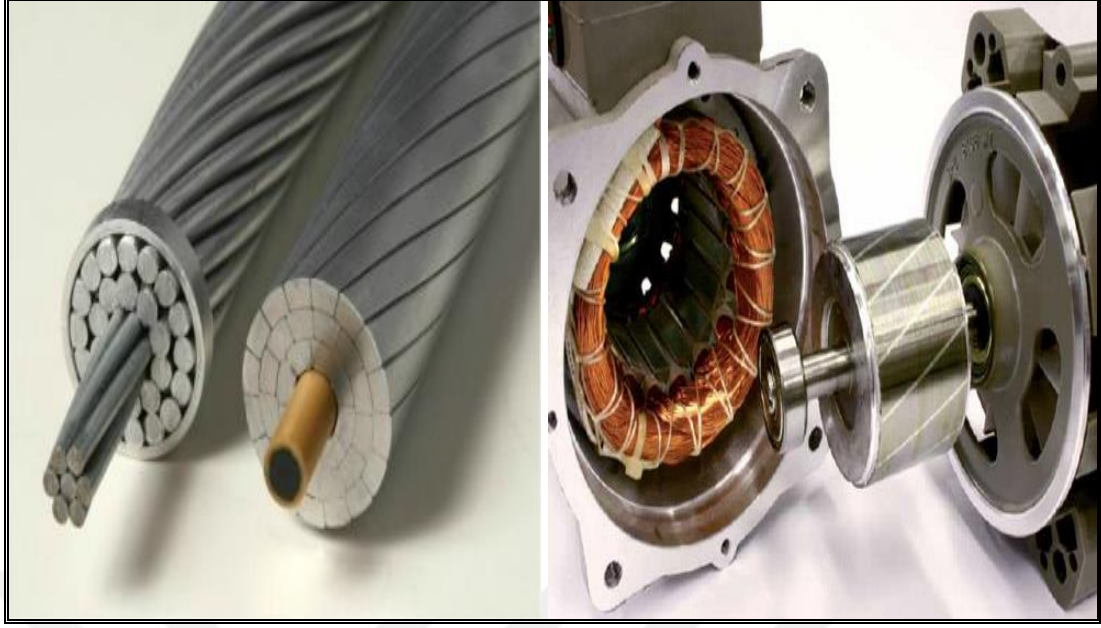


Şekil 1.5. Ambalajlama alanında kullanılan alüminyum örnekleri

#### 1.4.4. Alüminyum ve elektrik - elektronik

Alüminyum, elektrik sektöründe çoğunlukla iletim malzemesi olarak kullanılır. İletim malzemesi olarak saf alüminyuma ek olarak iyi bir iletkenliğe sahip ve zorlu ortam şartlarına mukavemet gösterebilen alüminyum alaşımları da kullanılmaktadır. Bunun yanısıra elektrik motorları, jeneratörler, transformatörler gibi cihazların muhtelif kısımlarında da alüminyum kullanılmaktadır. Bu nedenle, tüm alüminyum kullanımının Avrupa'da %10'u, ABD'de %9'u, Japonya'da %7'si elektrik ve elektronik sektöründe kullanılmaktadır.

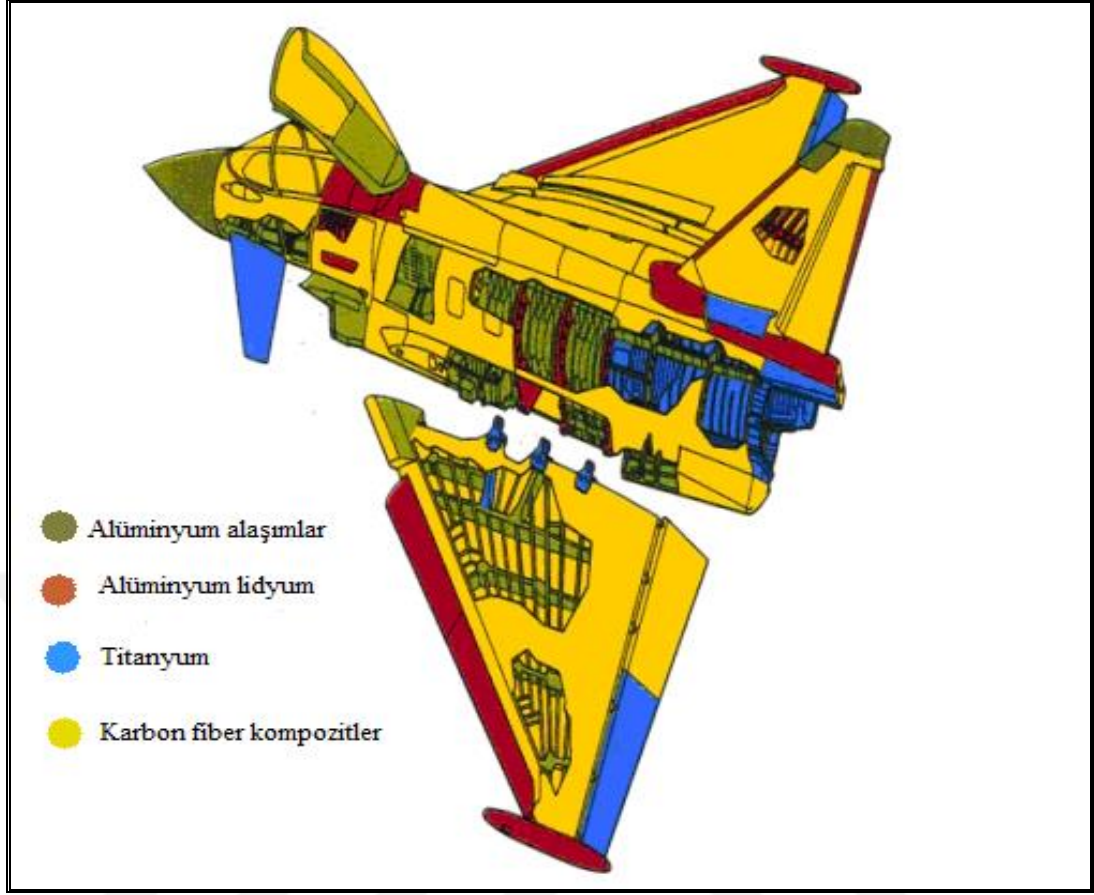
Alüminyumun bu alanda en çok kullanıldığı yer, elektrik nakil hatlarıdır. Çelik özlü alüminyum iletkenler, yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında tercih edilen tek malzeme olmuştur. Alüminyum, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve motor bobin sarımında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Elektronikte, alüminyum kullanım yerleri arasında, şaseler, yongalar, transistör soğutucuları, veri kayıt diskleri ve elektronik cihazların kasaları bulunmaktadır [10].



Şekil 1.6. Elektrik-Elektronik alanında kullanılan alüminyum örnekleri

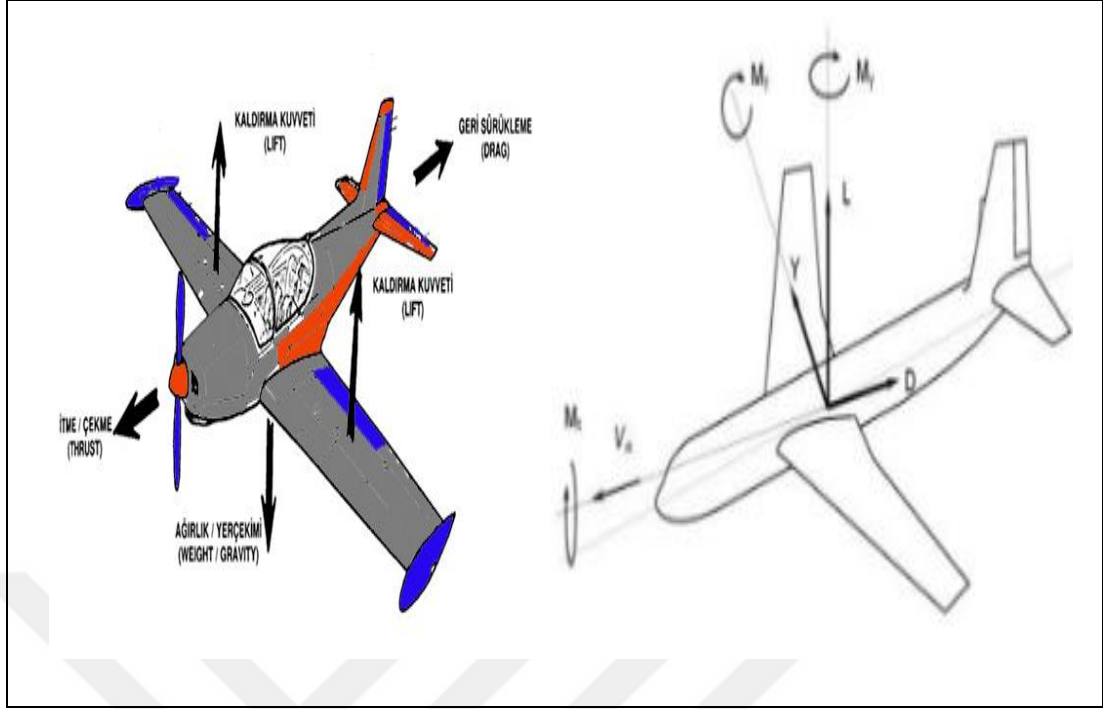
#### **1.4.5. Alüminyum ve havacılık - uzay sanayi**

Hava aracı üreten, kullanan askeri ve sivil şirketlerin en büyük sorunlarından bir tanesi, çeşitli modernizasyonlar yaparak mevcut hava araçlarını günümüz teknolojik gelişmelerinden faydalanır hale getirmektir. Bu gelişmeleri hava aracı üzerine uygulanması, havacılık ve uzay sanayinde en büyük sorunlardan biri olan hava aracının ağırlığını azaltılması dolayısıyla yakıt tüketiminin azaltılması ve tasarruf sağlanmasıdır. Bununla birlikte hava aracını daha yüksek seyir süratlerine çıkartılabilmesi, etkin menzilin artırılabilmesi, daha fazla yük ve yolcu nakliyesi sağlanabilmesi gibi sebeplerden dolayı çok önemlidir.



Şekil 1.7. Hava aracı üzerinde kullanılan malzemelerin dağılımı

1930'lu yıllarda önce yapılan uçaklarda ağaç malzeme kullanılmakta ve gerekli mukavemeti sağlamaktadır fakat 1940'lı yıllara doğru hava araçlarının hızlarının ve kanatlara binen yüklerin artması ile çelik kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bununla birlikte çelik malzemelerin hafif, yüksek hızlar için aerodinamik performansı olan kanat, gövde ve kuyruk gibi uçak parçalarının üretilmesin de büyük zorluklar yaşanmıştır. Bu yüzden alüminyum ve alaşımlarının esas havacılık malzemesi olarak kabul edilmesi çok zaman almamıştır. Şekil 1.7'de gösterildiği gibi helikopter, uçak, uzay mekiği gibi hava araçlarında alüminyum ve alaşımları yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 1.8. Hava aracına etki eden kuvvetler

Emniyet ve güvenilirliğin ön planda olduğu havacılık ve uzay sanayinde Şekil 1.8’de gösterildiği gibi hava aracı üzerine uçuş esnasında kaldırma kuvveti, sürtünme, ani hızlanma veya yavaşlamalar, aerodinamik yükler, iniş esnasında maruz kalınan yükler, silah atışı esnasındaki geri tepmeler ve hem uçuşta hem yerde hava aracının kendi ağırlığı gibi kuvvetler etki etmektedir. İhtiyaca uygun şekilde üretilen alüminyum alaşımlı parçalar önceden belirlenen her türlü çalışma koşulunda etkin bir şekilde kullanılabilir, özelliklerini koruyabilmelidir ve bu çalışma şartlarına göre alüminyum alaşım türleri seçilmelidir.

Günümüzde kullanılan hava araçlarının kiriş, lonjeron ve gövde kaplamaları gibi gövde yapılarının büyük bir bölümü alüminyum alaşımlar kullanılarak imal edilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarını pek çok malzeme için uygun ve ekonomik kılın özelliklerin başında; görünümü, hafifliği, işlenebilirliği, Fiziksel ve mekanik özellikleri ve yükek korozyon mukavemeti gelir [11].

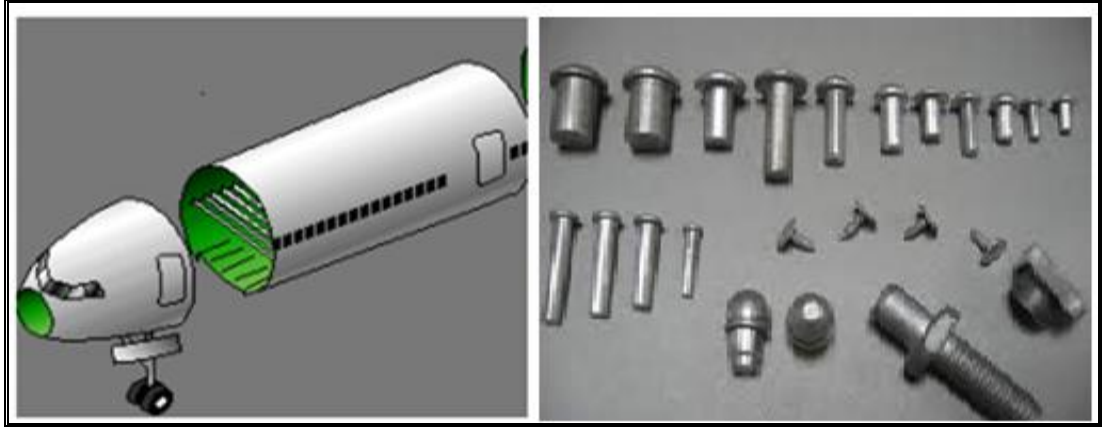
Hava aracı yapımında kullanılan döküm ya da haddeleme yöntemleri ile şekillendirilir.



Şekil 1.9. Döküm alaşımlı malzeme örnekleri

Şekil 1.9’da örnekleri verilen döküm alaşımları hava aracı ana yapı elemanları dışında yardımcı sistemlerin parçalarının (motorlarda, iniş takımlarında, kumanda düzeninde, basınçlandırma sisteminde ve hidrolik donanımında) yapımında kullanılır. Ayrıca hava aracı ana elemanlarının fazla yük taşımayan kısımlarında birleştirme parçaları ve takviye yapılarında sert kalıplara basınçlı olarak dökümü yapılan alaşımlar (kapı ve kapak menteşeleri, yapıda açılan deliklerin kenarına yerleştirilen takviye parçaları, teçhizat ve sistem elemanlarının uçak yapısına bağlanmasını sağlayan parçalar) kullanılır [12].

Şekil 1.10’da da örnekleri görüldüğü gibi hadde alaşımları için alüminyum alaşımları öncelikli olarak kokil kalıplarda yada pres döküm metodu ile bloklar halinde dökülür. Daha sonra bloklar haddeleme, presleme, dövme veya çekme işlemlerine tabi tutularak saç levha, bant, çubuk, profil, boru vb. şekillerde yarı mamül haline getirilir. Bu malzemeler en yaygın hava aracı yapılarında yük taşıyan kaplamalarda kullanılmaktadır. Çubuk şeklindeki alaşımlar değişik boyutlarda ve şekillerde yapılmaktadır ve örnek olarak uçak yapı elemanlarının birleştirilmesinde kullanılan perçinler gösterilebilir. Çekme işlemi ile yapılan profiller hava aracı kanatlarında, gövdede, kuyruk yüzeyleri konstrüksiyonunda vb. yerlerde enlem ve boylam yönlerinde çekme, eğilme ve bazı yüklerini taşıyıcı eleman olarak kullanılır [12].

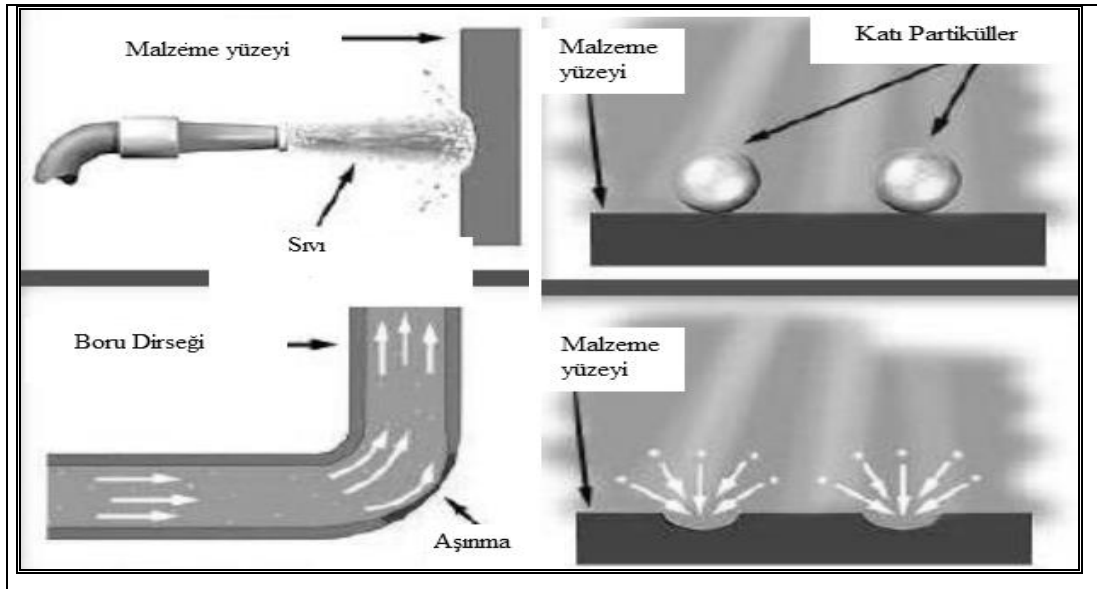


Şekil 1.10. Haddemele yöntemi ile üretilen malzeme örnekleri.



## 2. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Aşınma genel olarak malzemelerin yüzeyinde izafi bir hareket ve mekanik bir etki ile meydana gelen malzeme kaybıdır [13]. Bir sıvı ya da gaz akımı içerisinde taşınan farklı geometrik şekil ve boyuttaki partiküllerin, temasta buldukları katı malzeme yüzeyinde tekrarlı çarpması sonucu oluşturdukları hasar katı partikül erozyonu olarak tanımlanır. Katı partikül erozyonunda, malzeme yüzeyine belirli bir hızla hareket eden sert partiküllerin çarpması sonucunda yüzeyde malzeme kaybı gerçekleşir [14]. Şekil 2.1’de farklı türlerdeki katı partikül erozyonları görülmektedir. Hava kaynaklı katı partikül erozyonunda uzay ve havacılık alanında, helikopter rotor pallerinde, türbinli motorlarda, uçak radom ve kanat hücum kenarları gibi hava akımı ve içerisindeki partiküller ile ilk temasta bulunulan yüzeylerde yoğun olarak görülmektedir. Sıvı kaynaklı katı partikül erozyonunda ise aşındırıcı partiküller hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantılarına, boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarparak şiddetli aşınmalar meydana getirmektedir [15].



Şekil 2.1. Farklı türlerdeki katı partikül erozyonu

Diğer tribolojik süreçlerde olduğu gibi katı partikül erozyonu da kompleks bir süreçtir [16]. Tribolojik etkileşimde bulunan unsurlar arasındaki fiziksel, kimyasal ve termal reaksiyonlar erozyon şeklini ve miktarını yakından etkilemektedir.



Erozyonmekanizmalarının temel ilkelerinin anlaşılabilmesi için yapılan çalışmalar 20. yüzyılın son yarısında başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. Bütün bu yıllar boyunca bilim adamlarının ilgileri geleneksel malzemelere, özellikle de metallere odaklanmıştır [17].

Katı partikül erozyonu esnasında oluşan değişimler aşındırıcı partikül özellikleri, erozyona uğrayan hedef malzeme özellikleri ve deneysel faktörler gibi birçok faktöre bağlıdır. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı, hızı, debisi ve boyutu, aşındırıcı partiküllerin karışım oranı ve aşınan malzemenin özellikleri katı partikül erozyonunda etkin olan en önemli parametrelerdir [18].

Tablo 2.1. Katı partikül erozyonuna etki eden faktörler [19]

Hedef Malzeme Özellikleri	Aşındırıcı Partikül Özellikleri	Deneysel Faktörler
-Moleküler yapısı	-Sertlik	-Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı
-Mekanik özellikleri	-Şekil	-Aşındırıcı partiküllerin hızı
-Morfolojisi	-Boyut	-Aşındırıcı partiküllerin debisi
-Takviye özellikleri	-Kütle	-Sıcaklık
		-Püskürtme basıncı

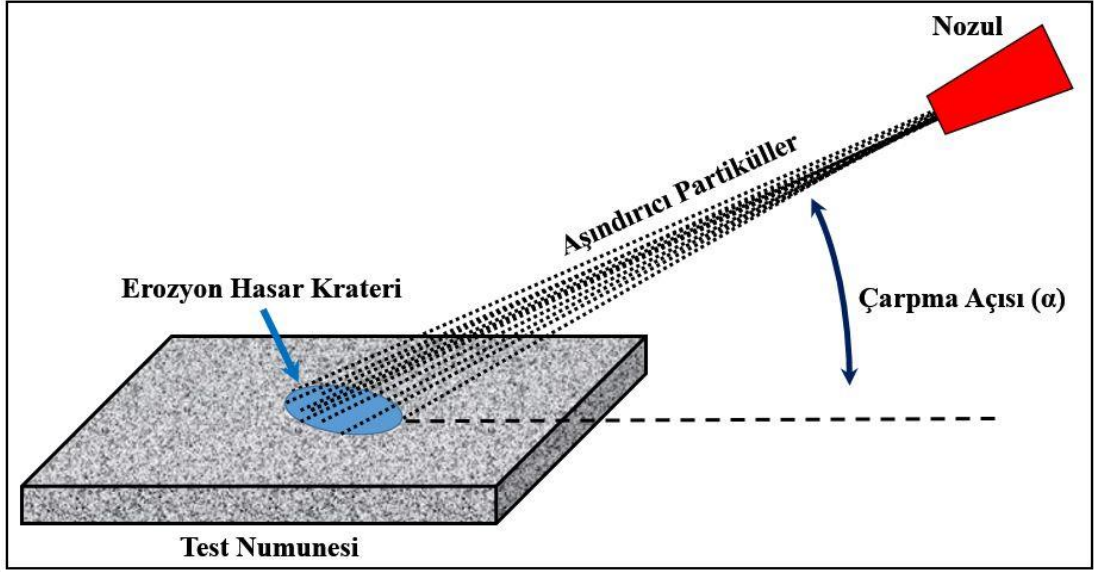
Tablo 2.1’de katı partikül erozyonuna etki eden faktörler gruplandırılarak tablo halinde verilmiştir. Bütün bu faktörlerin birleşimi, aşınmanın meydana geldiği çevresel şartlarında özellikleri ile birleşerek karmaşık bir yapı oluşturur[19]. Bu bölüm içerisinde malzemelerin katı partikül erozyonu davranışını etkileyen önemli parametreler kısaca açıklanacaktır.

### 2.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı

Aşındırıcı partiküllerin nozul ucundan hedef malzeme yüzeyine temas ettiği nolta arasındaki çizdiği hattın malzeme yüzeyi arasındaki açı farkına Şekil 2.2’de gösterildiği gibi çarpma açısı ( $\alpha$ ) denir. Çarpma açısı malzemelerin katı partikül erozyonu davranışlarını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Partikül çarpma açısına ( $\alpha$ ) bağlı olarak, katı partikül erozyonu iki şekilde incelenebilir [20].

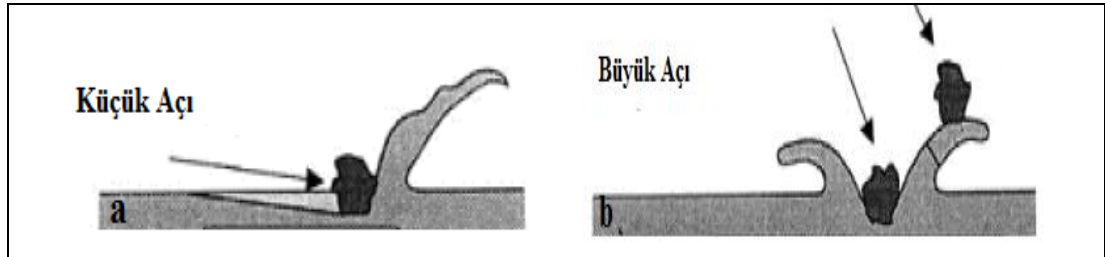
Dik çarpma açılarındaki erozyon ( $\alpha = 90^\circ$ )

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



Şekil 2.2. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı (a)

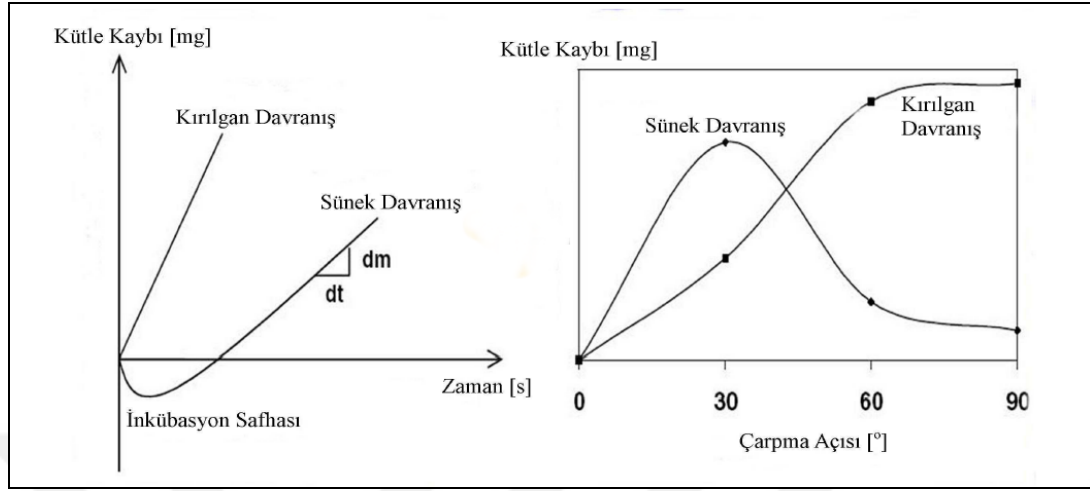
Partikül erozyonu, düşük çarpma açılarında iki cismin sürtünmesine benzer bir mekanizmaya sahiptir, çünkü partiküller etkileşim süresince malzeme yüzeyi boyunca bir yol izlerler. Yüksek çarpma açılarında ise aşınma mekanizması tipik çarpma şeklindedir. Şekil 2.3'te katı partikül erozyonunda çarpma açısı etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Katı partikül erozyonuna çarpma açısının etkisi a küçük açı, b büyük açı

Şekil 2.4'de tasvir edildiği gibi kırılgen malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açılarında ortaya çıkarken, sünek malzemelerde malzeme kaybının en fazla düşük çarpma açılarında ( $\sim 30^\circ$ ) ortaya çıktığı görülmektedir. Malzeme kaybının çarpma zamanıyla değişimi dikkate alındığında ise sünek davranış gösteren malzemelerde aşınma zamanla lineer orantılı hale gelmeden önce hedef malzeme ağırlığının arttığı gelişim safhasının (inkübasyon periyodu) varlığı söz konusu olabilmektedir. Bu periyot aşındırıcı partiküllerin sünek hedef malzemeye gömülmesiyle ortaya çıkar. Aşındırıcı partiküllerin ardışık olarak hedef malzeme yüzeyinden ayrılmasından sonra kararlı erozyon davranışı gözlemlenir [21, 22, 23].

Çarpma enerjisindeki kaybın büyük kısmı hedef malzeme yüzeyini pürüzlendirirken ortaya çıkar [24, 25].



Şekil 2.4. Sünek ve gevrek malzemelerin katı partikül erozyonu karakteristikleri [20].

Katı partikül Erozyonu davranışlarındaki farklılıklar, kauçuklar için yırtılma ve yorulma; sünek metaller ve polimerler için kesme ve sürülme; seramikler, camlar ve gevrek polimerler için çatlak oluşumu ve gevrek kırılma gibi çeşitli malzeme taşınması mekanizmaları şeklinde ortaya çıkmaktadır [26].

Aşındırıcı partiküllerin hareket bileşenlerini yatay ve düşey bileşenler olarak ayırmak mümkündür. Sert aşındırıcı partiküller sünek malzemeler üzerinde aşındırma yaparken düşük çarpma açılarında daha az çarpma, ağırlıklı olarak yatay bileşeni ile malzeme yüzeyini çizme ve kesme mekanizmalarını harekete geçirmektedir. Çarpma açıları büyüdükçe partikül hızının dikey bileşeni artmakta ve çarpma etkisine benzer bir etki mekanizması ağırlık kazanmaktadır. Bu mekanizmaların etkisi ile sünek malzemelerde çarpma açısı küçük açılardan başlayarak giderek arttırıldığında orta dereceli çarpma açılarında aşınmanın maksimuma eriştiği gözlenmektedir. Partiküllerin malzeme ile temas etmeleri sonrası kaymaları ve dönmeleri de malzeme ile etkileşimde farklı sonuçlar doğurmaktadır [3].

Katı partikül erozyonundaki kütle kaybı aşındırıcı partikül çarpma açısının bir etkisi olarak ölçüldüğünde sünek ve kırılğan malzemeler farklı özellikler göstermektedir. Sünek malzemelerin karakteristik özelliği düşük çarpma açılarında (15°– 30°) maksimum erozyon göstermeleridir. Kırılğan malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarında (90°) gösterirler. [27,28].

J. Zhou ve S. Bahadur tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklıklardaki hava ortamında ısıtılmış Ti6Al4V alaşımının korozyon/erozyon davranışı incelenmiştir. Hedef numuneyi 10-90° çarpma açısı ve 55-110 ms<sup>-1</sup> çarpma hızında 120 mesh boyutunda silikon karpit partikülleri ile aşındırmışlardır. Çarpma açısının 30° olduğu durumda maksimum erozyon oranını gözlemlemişlerdir. Yükselen sıcaklık değerlerinde, erozyon oranının 30° çarpma açısının olduğu durumda sıcaklık ile düzenli olarak arttığını ancak çarpma açısının 90° olduğu durumda ise erozyon oranının sıcaklık ile aşırı artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir [31].

## **2.2. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı**

Aşındırıcı partikül hızı (v) aşınma süreci üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir [29]. Eğer aşındırıcı partikül çarpma hızı çok düşükse, aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon oluşumu için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder [27]. Hız arttırıldığında, hedef malzeme yüzeyi aşındırıcı partikülün çarpmasına bağlı olarak plastik deformasyona uğrayabilir. Bu sistemde, katı partikül erozyonu tekrarlanan plastik deformasyonla oluşur. Malzemenin kırılma erozyon davranışında, aşınma alt yüzey kırılması şeklinde meydana gelir. Çok yüksek aşındırıcı partikül çarpma hızlarında, darbeye maruz kalan yüzeylerde lokal ergime olduğu gözlemlenebilir.

Konu ile ilgili literatür taraması yapılarak benzer çalışmalar incelendiğinde aşınan malzemelerde aşındırıcı partikül hızının arttırılması ile aşınma miktarının arttığı söylenebilir [30].

J. Zhou ve S. Bahadur tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklık değerlerinde erozyon oranının aşındırıcı partiküllerin çarpma hızlarına bağlı değişimi incelemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda aşındırıcı partiküllerin çarpma hızları arttıkça erozyon oranının da aynı oranda arttığı görmüşlerdir [31].

## **2.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debisi**

Aşındırıcı partikül akış debisi; birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı partikül kütlesi olarak tanımlanır ve erozyon aşınmasını yakından etkileyen parametrelerden biridir. Teorik olarak, bütün aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye eşit çarpma

açısı ve hızda çarptıkları kabul edildiğinden aşınma miktarı aşındırıcı partiküllerin akış debisinden bağımsız olmalıdır. Fakat uygulamada, ölçülen aşınma oranı üzerinde partikül debisinin önemli etkileri vardır [28, 32,33]. Belirli bir eşik değerine kadar partikül erozyonu aşınma miktarının aşındırıcı partikül akış debisiyle doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu limit değeri hedef numune üzerine gelen ve sekerek geriye dönen aşındırıcı partiküller arasındaki etkileşimin bir sonucu olduğuna inanılmaktadır [23]. Bu etki, çarpanların önceki partikülleri erozyon sürecinden uzaklaştırdığı birinci sırada partikül çarpma modeli ile rasyonalize edilmiştir [32]. Bu çarpışma teorisi çok düşük değerli akış debi değerlerinde bile önemli role sahip olabilir. Partikül akış oranı sınırı elastomerler için  $100 \text{ kg/m}^2$  kadar düşük olduğu gibi büyük ve hızlı parçalarla metallerde oluşan erozyon için  $10000 \text{ kg/m}^2$  kadar yüksek olabilir. Sınır akış debisi değeri geçildiğinde aşınma oranı çok az düşer [32, 33]. Her ne kadar aşındırıcı partiküllerin akış debilerinin etkisi temelde yukarıda bahsedilen etkileşimlere bağlansada, farklı mekanizmalar da oluşabilir ve katı partikül erozyon aşınmasını etkileyebilir. Süreç, aşındırıcı partikülün hedef malzeme yüzeyine her çarpmadan sonra oluşan bir geçici reaksiyonlar dizisi olarak değerlendirilebilir. Aşındırıcı partiküllerin akış debileri arttığında, hedef malzeme yüzeyindeki çarpmalar arası zaman azalır. Bu çarpmalar arası zaman azalmasından dolayı bir sonraki çarpmadan önce bozulma reaksiyonu için daha az zaman kalacaktır ve böylece bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması miktarı düşecektir [32]. Belirtilen bütün bu analizlerden çıkan sonuca göre; Seçilen hedef malzemenin erozyon davranışının etkilenmemesi için, aşındırıcı partikül etkileşimlerini ve çevresel bozulma etkilerini ortadan kaldıracak özel bir debi miktarı seçilmesi gerekmektedir.

#### **2.4. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu**

Literatür taraması yapıldığında aşındırıcı partikül boyutunun katı partikül erozyonu oranına etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda hedef malzeme yüzeyine çarpan partiküllerin boyutları katı partikül erozyonunda önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmış ve iki farklı görüş ileri sürülmüştür [14, 29, 34, 35].

Aşındırıcı partikül boyutlarıyla alakalı birinci görüş; G. Sundararajan, D.P. Mondal, M. Dünder ve diğerlerinin ifade ettiği aşındırıcı partikül boyutunun erozyon miktarı üzerinde güçlü bir etkisi olduğu, ancak erozyon miktarının kritik bir değer üzerinde partikül büyüklüğünden bağımsız olduğudur. Konuyla alakalı yapılan deneyler sonucunda, bu kritik değere kadar aşındırıcı partikül boyutunun arttırılması ile erozyon miktarının arttığını raporlamışlardır [14, 34, 36, 37].

Q. Chen ve D.Y. Li tarafından yapılan çalışmalarda üç farklı aşındırıcı partikül boyutunun etkisi aşındırıcı partikül debisi eşit tutularak incelenmiştir. Böylece katı partikül erozyonuna uğrayan hedef malzeme yüzeyine gönderilen toplam aşındırıcı partikül miktarı eşit tutularak, sadece aşındırıcı partikül boyutları değiştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşındırıcı partikül boyutunun büyütülmesi ile aşınma oranının artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu aşınma oranının artışı aşındırıcı partikül boyutunun büyümesi ve taşıdığı kinetik enerjinin artış göstermesi nedeniyle gerçekleştiği anlatılmıştır [38].

Aşındırıcı partikül boyutlarıyla alakalı ikinci görüş ise Tabakoff, Vittal, Heuer ve diğerleri ifade ettiği aşındırıcı partikül boyutunun erozyon miktarını çok düşük oranda etkilediğidir. Ancak konuyla alakalı yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşındırıcı partikül boyutunun büyütülmesi ile belirli bir partikül boyut aralığında aşınma mekanizmasının değişim gösterdiği ve bu aralıkta aşınma miktarının önemli ölçüde artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Aşınma mekanizmasının değişim gösterdiği partikül boyut aralığı değerlerinin altında ve üstünde ise partikül boyutunun büyütülmesinin erozyon miktarını çok az miktarda arttırdığını belirlemişlerdir [29, 35, 39].

Aşınma mekanizmasının aşındırıcı partikül boyutlarına bağlı olarak gösterdiği değişim incelendiğinde; küçük aşındırıcı partikül boyutlarında hedef malzemede hasarın mikro kesme mekanizması ile gerçekleştiği, büyük aşındırıcı partikül boyutlarında ise hasarın mikro çatlama ve mikro kırılma mekanizmaları ile gerçekleştiği belirlenmiştir. Küçük boyutlu aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjilerinin düşük olması sebebiyle aşınma oranının düşük olduğu görülmüştür. Büyük boyutlu aşındırıcı partiküllerin ise yüksek kinetik ve darbe enerjileri ile

malzemede çatlak oluşumuna yol açarak malzeme yüzeyinden büyük parçalar kopardığı ve yüksek aşınma oranlarına neden olduğu tespit edilmiştir [40, 41].

## **2.5. Aşındırıcı Partikül Sertliği**

Genellikle aşındırıcı partiküllerin sertliğinin artması dik açılarda daha iyi performans göstereceği kanısı uyandırmaktadır. Fakat çok sert aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme üzerine uyguladığı darbeler sonucu parçalanma eğilimi gösterdiği ve aşındırıcı partikül üzerinde bulunan kinetik enerjinin büyük kısmının aşındırıcı partiküllerin parçalanmasında harcandığı gözlenmiştir. Eğik açılarda ve kırılma erozyon mekanizması baskın olduğu durumlarda ise artan sertlik erozyonu arttıran bir etkiye sahip olur [42].

## **2.6. Aşındırıcı Partikül Şekli**

Aşındırıcı partiküller küresele yakın veya keskin olmayan bir şekle sahipse oluşan katı partikül erozyonu plastik deformasyon ağırlıklı olur. Fakat kullanılan aşındırıcı partiküller keskin kenarlı ise katı partikül erozyonu kesme, kırılma ve parçalanmaya daha çok benzer. Keskin olmayan aşındırıcı partiküller küresel şekillere benzeyen bir dairesel yüzeye sahipken keskin köşeli aşındırıcı partiküller aşınma süreci için kritik bir önemi olan ve küçük yarıçaplı köşelerle birbirine bağlanan düzlemsel alanlara sahiptir[42].

## **2.7. Hedef Malzeme Özellikleri**

Katı partikül erozyonunda, aşındırılan hedef malzemenin karakteristik özellikleri erozyon aşınması ve aşınma oranı üzerinde önemli etkileri vardır. Dolayısıyla katı partikül erozyonuna maruz bırakılan hedef malzemelerin aşınma davranışlarının net bir şekilde belirlenebilmesi için aşındırılan malzemelerin farklı parametreler altında (aşındırıcı partikülün çarpma açısı, hızı, debisi, şekli, boyutu, sertliği ve karışım oranı, ortam sıcaklığı) aşındırılması gerekir. Katıpartikül erozyonunda hedef malzemenin kırılma davranışı, aşınma esnasında görülen etkin aşınma mekanizmasını belirleyen önemli bir faktördür [42].

## 2.8. Sıcaklık

Katı partikül erozyonuna maruz kalan termal iletkenliğe sahip hedef malzeme üzerine bir aşındırıcı partikül çarpması sonucu oluşan bölgesel deformasyon ve yüksek gerinim oranlarında baş gösteren adyabatik şartlar yüksek sıcaklıklar ortaya çıkarabilir. Fakat maksimum sıcaklık hedef malzeme üzerinde yapılan işe, malzemenin özgül ısı ve yoğunluğuna bağlıdır. Hedef malzemeye aşındırıcı partiküllerin çarpması sonucu oluşan sıcaklık, aşındırıcı partiküllerin çarptığı bölgeden oluşum zamanından daha kısa bir sürede uzağa akabiliyorsa sıcaklık artışı küçük olur. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklar hedef malzemeyi yumuşatabilir ve ısının etkisiyle yumuşayıp kolay deforme olur hale gelir. Artan sıcaklık ile birlikte hedef malzemenin mekanik özelliklerinin düşmesi bozulma ve malzeme kaybını açıklayacaktır [42].



### **3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ EROZYON DAVRANIŞININ LİTERATÜR TARAMASI**

Alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışlarına etki eden birçok parametre vardır. Bu parametreler; aşındırılan hedef malzemenin özellikleri, aşındırıcı partiküllerin özellikleri (partikül boyutu, sertliği, şekili), deneysel parametreleri (partikül çarpma açısı, çarpma hızı, püskürtme basıncı, partiküllerin kütleli debisi) ve çevresel faktörler (sıcaklık, nem) olarak dört ana başlık altında toplayabiliriz. Bu bölümde alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışının belirtilen parametrelerin etkileri ile göstermiş oldukları davranışlarını literatürde yer alan konuyla ilgili çalışmalarını incelenmiştir.

#### **3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi**

K. Elleuch tarafından yapılan çalışmada 5xxx alüminyum alaşımı, temperlenmiş 5xxx alüminyum alaşımı ve farklı ısıl işleme tabi tutulmuş 7xxx alüminyum alaşımları kullanılmış ve bu malzemelerin erozif aşınma davranışlarını, erozyon dirençlerinin sertlik ile ilişkisi incelenmiştir. Bu çalışmada Pekleşmeye maruz bırakılmış 5xxx alüminyum alaşımının erozif dayanımının iyileştirilemediği, sertleşme ısıl işlemi uygulanan 7xxx alüminyum alaşımının ise erozif dayanımının geliştirildiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak kimyasal bileşimlerin erozif dayanıma etkisinin sertlikten daha önemli olduğunu belirtmiştir [43].

#### **3.2. Aşındırıcı Malzeme Özelliklerinin Etkisi**

Y. Li, G.T. Burstein ve I.M. Hutchings tarafından yapılan çalışmada AA1100 alüminyum alaşımının çamur erozyon – korozyon davranışı incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada aşındırıcı olarak içerisinde 0,5 M NaCl, asetik asit ve 0,1 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> bulunan farklı silika çamuru karışımları kullanılmıştır ve deneysel çalışmalar modifiye edilmiş çamur erozyonu test düzeneğinde yapılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucu elde ettikleri sonuçlarda NaCl ve asetik asit içeren aşındırıcı çamur ile yapılan deneylerde aşındırıcı çamurun içinde saf korozyon bileşeni

az olmasına rağmen alüminyum alaşımının erozyon oranının saf silika çamuru ile yapılan deneylere göre daha yüksek gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir [44].

### 3.2.1. Aşındırıcı partikül boyutu ve sertliği etkisi

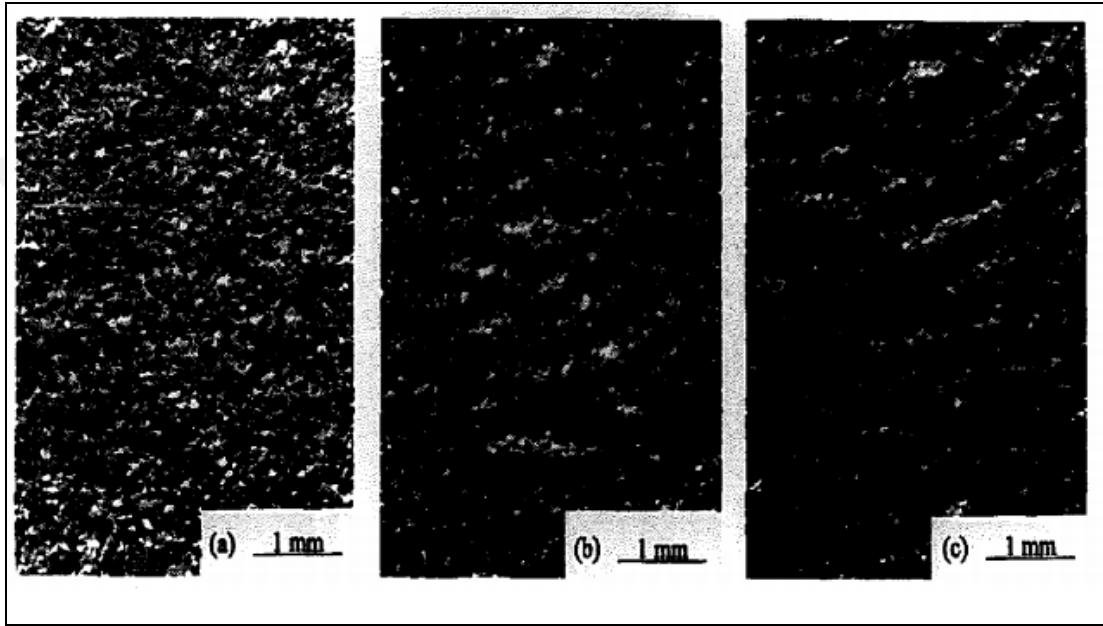
Girish R. Desale tarafından yapılan çalışmada AA 6063 alüminyum alaşımının erozif aşınmasında aşındırıcı partikül boyutunun etkisini çamur erozyonu yöntemi kullanarak incelemiştir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi Girish R. Desale bu çalışmasında boyutları 37,5 ile 655 µm arasında değişen 8 farklı boyutta kuartz kullanmıştır. Deneysel çalışması sırasında kullanılan bütün numunelerde partikül çarpma hızı  $3 \text{ ms}^{-1}$ , partikül çarpma açısı ise  $30^\circ$  ve  $90^\circ$  olarak iki farklı açı kullanmıştır. Yapılan bu deneylerde AA 6063 alüminyum alaşımı üzerindeki erozif aşınmanın ortalama aşındırıcı partikül boyutunun artması ile arttığı görülmüştür [45].



Şekil 3.1. Farklı boyutlarda aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüleri [45].

J. E. Talia tarafından yapılan çalışmada malzeme yüzeylerindeki dalgalanma oluşumunun incelenmesi amacıyla hedef malzeme olarak saf alüminyum ve Al-12Si alaşımı kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak keskin açılı köşelere sahip alümina ve küresel cam boncuk kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarında aşındırıcı partiküller basınçlı hava ile hızlandırılmış, farklı çarpma açılarında ve iki aşındırıcı ile karışım oluşturularak saf alüminyum ve AL-12Sİ alüminyum alaşımı aşındırılmıştır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi yapılan deneyler sonunda taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile aşınmış yüzeyler incelenmiş ve aşındırıcı partikül olarak küresel cam boncuk kullanılan numunelerin

yüzeylerinde dalgalanma gözlemlenmiştir. Aşındırıcı partikül olarak alümina partikül ve cam boncukların karıştırılması ile elde edilen karışım kullanılan numunelerde ise kırılmanın arttığı ancak Al-12Si alüminyum alaşımının yüzey dalgalanmasının azaltıldığını gözlemlemiştir. J. E. Talia yaptığı bu çalışması sonucunda katı partikül erozyonuna maruz kalmış numunelerin yüzeylerindeki dalgalanmanın malzeme yüzeyindeki parça kaybından olmadığını, malzemenin plastik deformasyona uğramasından kaynaklandığını gözlemlemiştir [46].

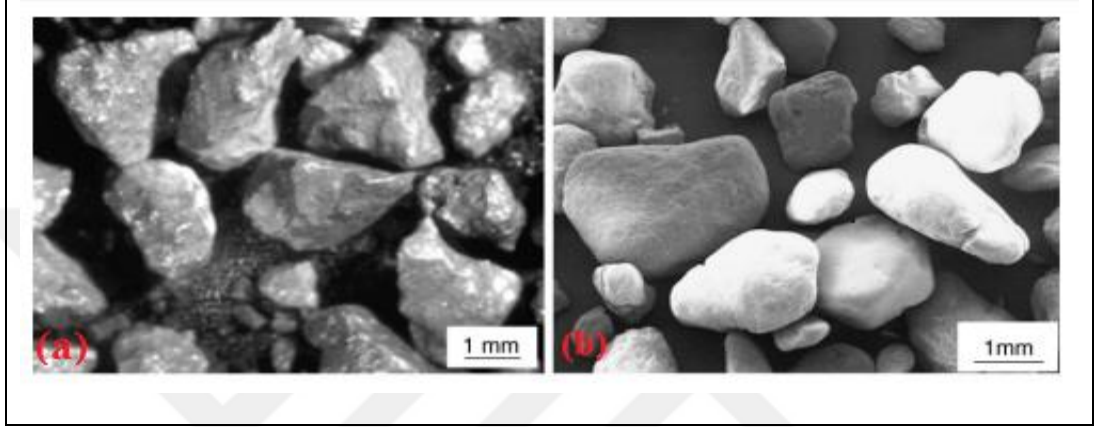


Şekil 3.2. AL-12Si alaşımının alümina (c), alümina + cam boncuk karışımı (b), cam boncuk (a) ile aşınma görüntüleri [46].

### 3.2.2. Partikül şekil etkisi

K. Elleuch tarafından yapılan çalışmada 5xxx alüminyum alaşımı, temperlenmiş 5xxx alüminyum alaşımı ve farklı ısıl işleme tabi tutulmuş 7xxx alaşımları eroziv aşınma davranışlarının incelenmesi amacıyla hedef malzeme olarak kullanılmıştır. Yapılan deneylerde normalize edilmiş abresif kum (NAS) ve standart ocak kumu (SPS) olmak üzere iki farklı aşındırıcı partikül kullanılmıştır. Şekil 3.3'de K. Elleuch tarafından deneyler esnasında kullanılan NAS ve SPS aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi (a)'da belirtilen SPS kumu keskin köşeli iken (b)'de belirtilen NAS kumu keskin olmayan köşe ve kenarlara sahip olduğu görülmektedir. K. Elleuch tarafından yapılan deneyler sonucunda aşındırıcı partiküllerin şeklinin erozyon oranına etkisinin büyük olduğunu bulunmuştur. Keskin

olmayan köşe ve kenarlara sahip NAS kumu kullanılarak gerçekleştirilen deneylerdeki erozyon oranının keskin kşelere sahip SPS kullanılarak gerçekleştirilen deneylerdeki erozyon oranına göre daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi keskin olmayan köşe ve kenarlara sahip NAS kumu kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde numunenin yüzeyinin daha fazla hasar aldığı gözlemlenmiştir [43].



Şekil 3.3. (a) SPS (b) NAS aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri [43]



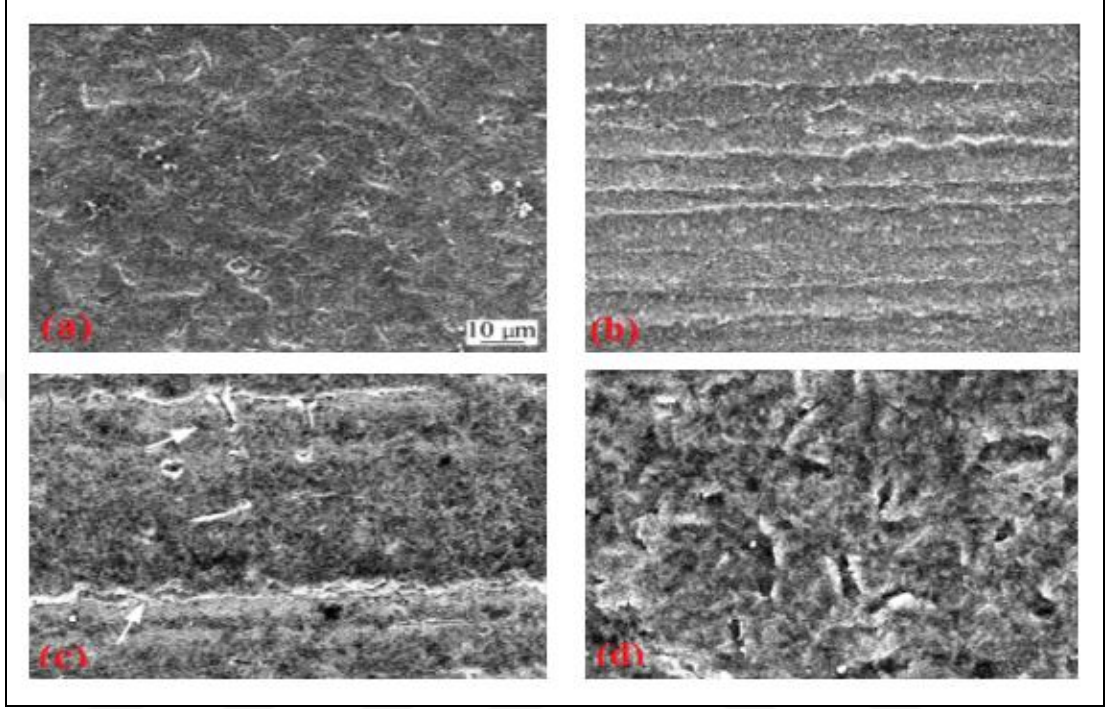
Şekil 3.4. (a) SPS (b) NAS ile aşındırılmış numuneler [43]

### 3.3. Operasyon Parametrelerinin Etkisi

#### 3.3.1. Partikül çarpma açısının etkisi

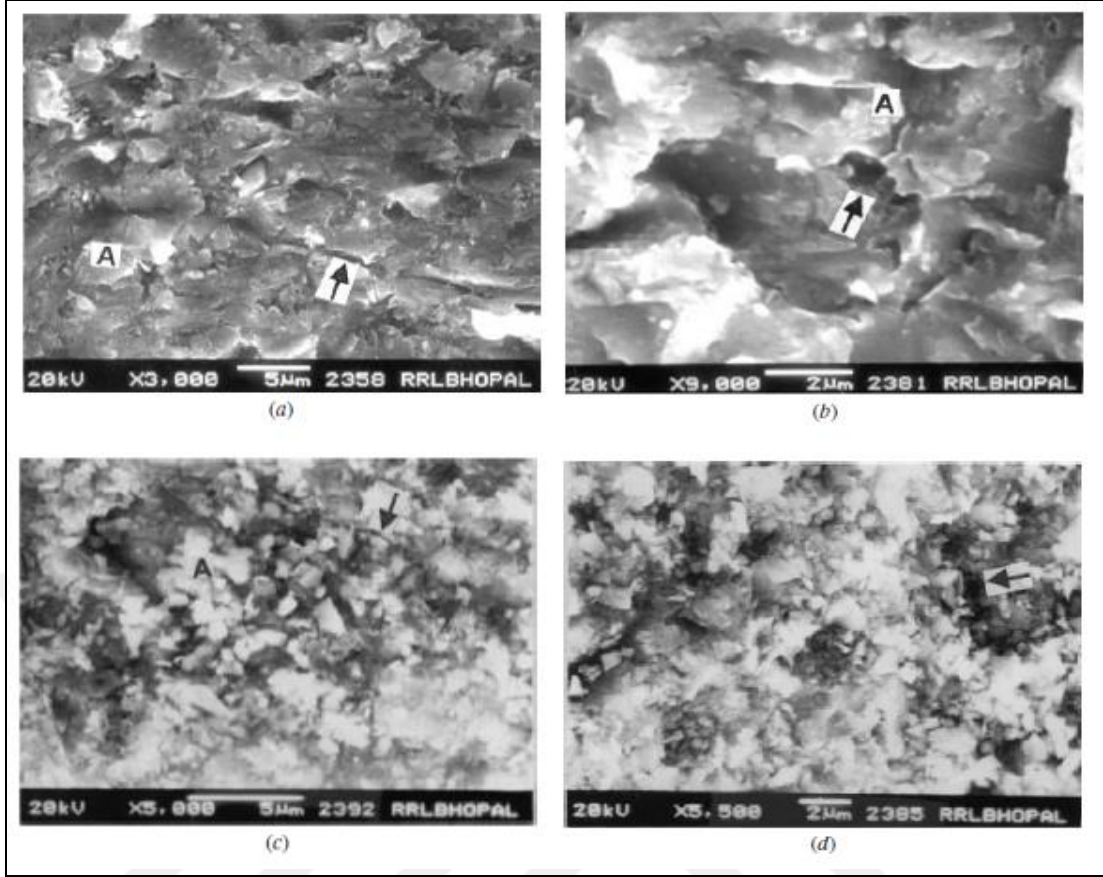
A. K. Jha tarafından yapılan çalışmada çarpma açısının ve dönüş hızının ticari adı Grade 1900 olan alüminyum alaşımının erozyon davranışına etkisini incelemiştir. Alüminyum alaşımı numuneleri çeşitli açılarda ve çeşitli dönme hızlarında çamur erozyonuna maruz bırakılmıştır. Aşındırılan alüminyum alaşımının aşınma oranını hedef malzemenin kütle kaybını ölçerek hesaplanmıştır. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi

aşındırılan alüminyum alaşımının erozyon oranının çarpma açısı arttıkça arttığı, maksimum erozyon oranının 90° çarpma açısında meydana geldiği görülmüştür. [47].



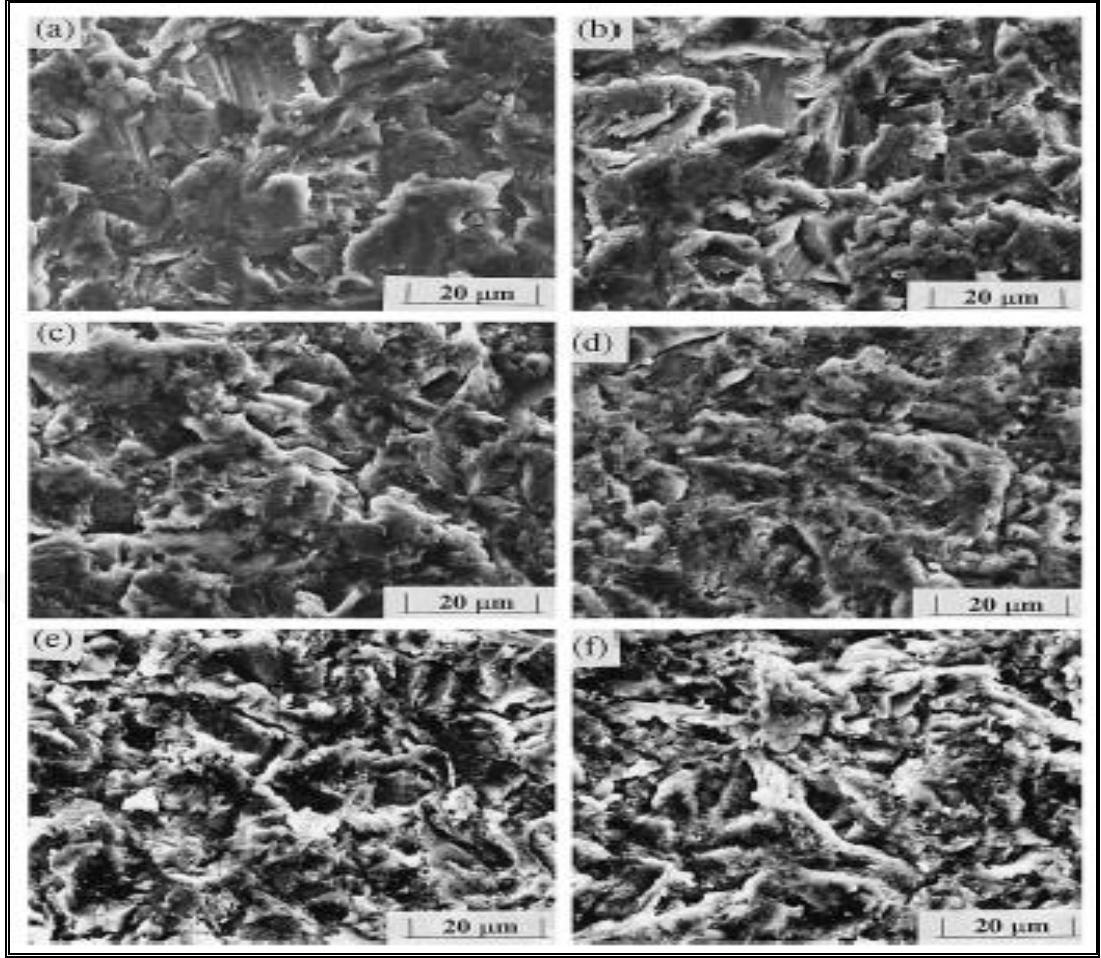
Şekil 3.5. 2.93 m/s hız ve (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 90° çarpma açılarında yapılmış deney görüntüleri [47].

S. Das tarafından yapılan çalışmada ısıtılmış saf alüminyumun ve Al-Si alaşımının katı partikül erozyonu davranışlarını incelemiştir. Yapılan deneylerde aşındırıcı partikül olarak alümina kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda şekil 3.6'da görüldüğü gibi maksimum aşınmanın alüminyum alaşımının 45° partikül çarpma açısı ile gerçekleştiğini, 15°-30° çarpma açılarında malzemede mikro-sürme ve mikro-kesme, 45°-60° çarpma açılarında kesme ve 75°-90° çarpma açılarında ise mikro-kırılma aşınma mekanizmalarının oluştuğunu gözlemlemiştir [48].



Şekil 3.6. (a) 30°, (b) 45°, (c) 60°, (d) 90° çarpma açılarında yapılmış deney görüntüleri [48].

C.K. Fang ve T.H. Chuang tarafından yapılan çalışmada AA6063 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışlarını incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak iki farklı boyutta silisyum karbür (SiC) kullanılmıştır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi deneysel çalışmalar 15°-90° çarpma açıları arasında yapılmış ve en yüksek erozyon oranlarının düşük çarpma açılarında gerçekleştiğini gözlemlemiştir [49].

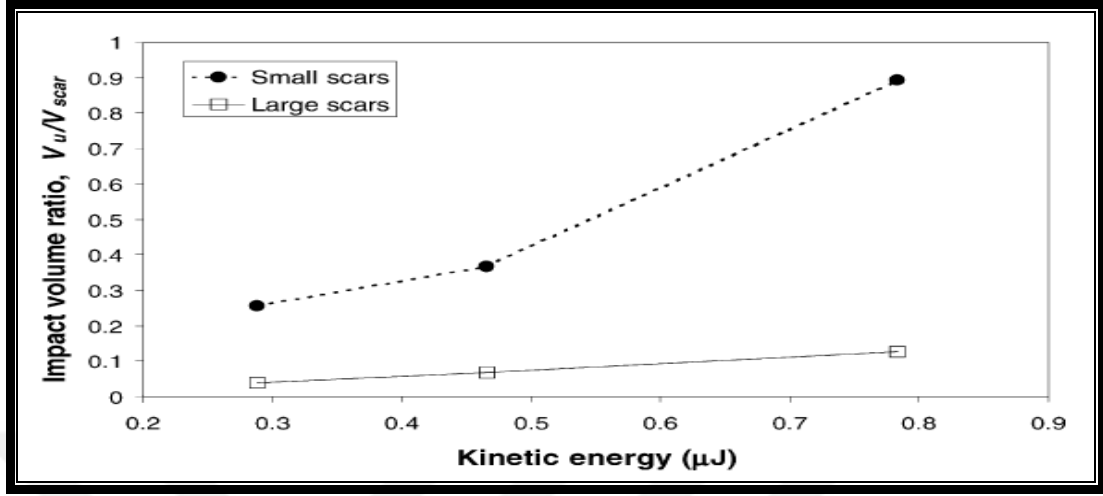


Şekil 3.7. (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 75°, (f) 90° çarpma açılarında yapılmış deney görüntüleri [49].

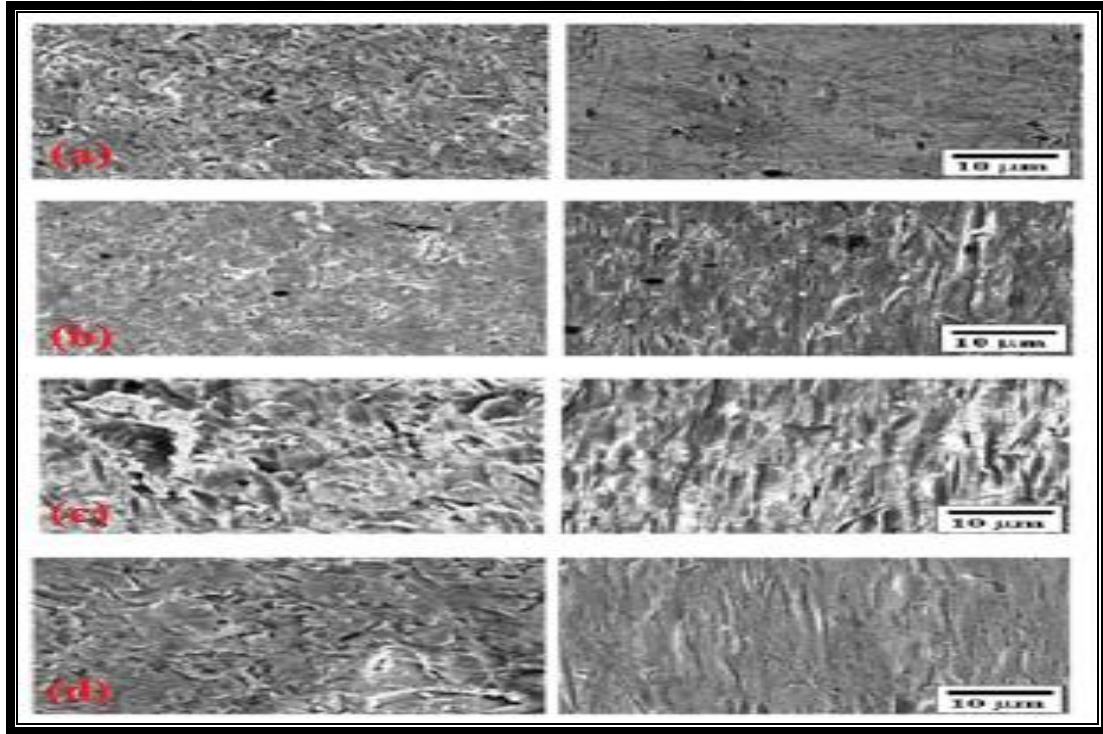
### 3.3.2. Partikül çarpma hızının etkisi

K.S. Tan, R.J.K. Wood, K.R. Stokes tarafından yapılan çalışmada HVOF ( High Velocity Oxy Fuel ) alüminyum bronz kaplamaların çamur erozyonu yöntemi ile erozif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Aşındıcı partikülleri çeşitli kinetik enerjilerde (0,1, 0,3, 0,5 ve 0,8  $\mu\text{j}$ ) hedef malzemelere göndermişlerdir. Yüksek enerji ile gönderdikleri aşındırıcı partiküllerin yüksek hızlara ulaştıklarını gözlemlemişlerdir. Şekil 3.8'deki grafikte de görüldüğü gibi deneysel çalışmalarda aşındırıcı partiküllerin hızlarının artırılması ile birlikte erozyon oranının da artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Şekil 3.9'da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek enerji ile gerçekleşen deneylerde erozyon oranlarının küçük boyutlu aşındırıcı partiküllerin etkili olduğu, yüzeydeki izlerin mikro kesme şeklinde gerçekleştiğini, düşük enerjide gerçekleşen deneylerde ise bütün çarpan partiküllerin

hasar oluşturmadığı ancak hasar mekanizmasında yine de küçük boyuttaki partiküllerin etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [50].



Şekil 3.8. Erozyon oranı-kinetik enerji grafiği [50]



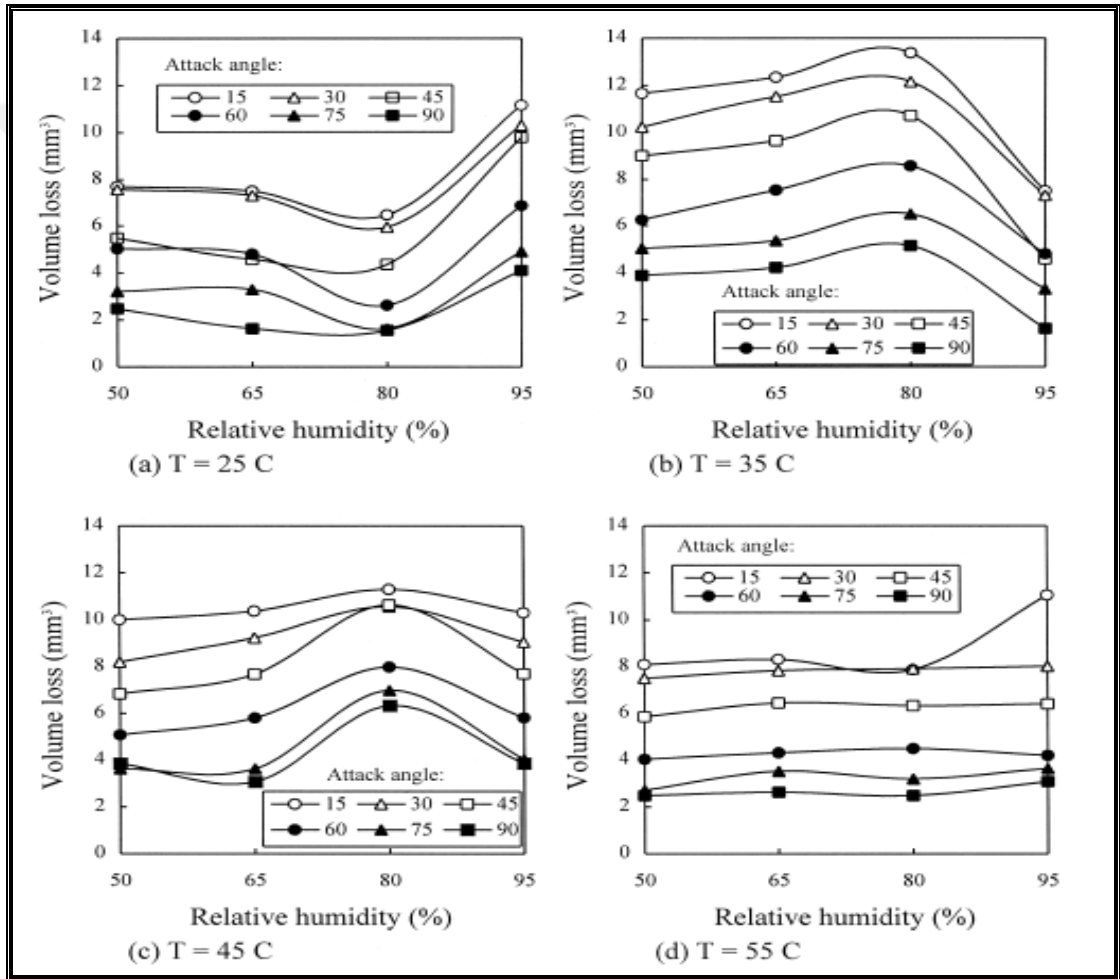
Şekil 3.9. (a)  $E_k=0.1$ , (b)  $E_k=0.3$ , (c)  $E_k=0.5$ , (d)  $E_k=0.8$  enerjiler ile gerçekleştirilen deney sonuçları [50]

### 3.4. Çevresel Etkenler

C.K. Fang ve T.H. Chuang tarafından yapılan çalışmada AA6063 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan deneysel



çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak iki farklı boyutta silisyum karbür (SiC) kullanılmıştır. Hedef malzemedeki kütle kaybını ve aşınma derinliğinin farklı sıcaklıklarda (25°C, 35°C, 45°C ve 55°C), farklı bağıl nem durumlarında (%50, %65, %80 ve %95) ve farklı partikül çarpma açılarında (15°-90° arası ) araştırmışlardır. Araştırmalar sonucunda şekil 3.10'da görüldüğü gibi bağıl nem miktarının maksimum çarpma açısında (90°) hedef malzemede meydana gelen kütle kaybında çok az etkisi olduğunu, ancak genel olarak meydana gelen hacim kaybında ve aşınma derinliğinde karmaşık bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir [49].



Şekil 3.10. Nem oranı-Hacim kaybı grafikleri [49]

## 4. MALZEME

### 4.1. Aşındırıcı Partikül Özellikleri

#### 4.1.1. Alümina mineralinin özellikleri

Alumina ( $Al_2O_3$ ) Şekil 4.1’de görüldüğü gibi alüminyum metalinin oksitlenmiş halidir. Doğal alümina feldispat, kil ve silikalarda bulunur. Boksit, diaspor, kriyolit, sulminat, kyaait, nefelit, gibi minerallerde de az miktarda bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Alümina minerali ve doğadaki görünümü

Alüminanın bilimsel olarak keşfi 20.yüzyıldadır. 1907 yılında ticari kullanımına bir patent ile başlanmıştır ve geniş çapta yayılması ise 1920-1930 yıllarını bulmuştur. Ergime sıcaklığı 1200 derece civarı olan alüminyum oksit, düşük sıcaklıklarda mekanik ve kimyasal bozunmaya karşı en dayanıklı refrakterlerden birisidir. İyi kalsime edilmiş bir alümina malzeme hem mineral asitlerde hem de bazlarda çözünmez. 1700-1800 derece gibi yüksek sıcaklıklarda flor dışında tüm gazlarda karşı dirençlidir. Oksitleyici ve redükleyici atmosferlerde 1900 dereceye kadar kullanılır. Alümina, düşük sıcaklıklarda birden fazla kristal yapıda bulunabilir. Bu formlar 750-1200 derece aralarında atmosfere bağlı olarak  $\alpha$ -Alümina’ya dönüşür ve bu dönüşüm tersinir değildir. Tablo 4.1’de alümina mineralinin

kimyasal içeriği, fiziksel özellikleri ve tane boyutları verilmiştir. Alümina'dan porozite ve yoğun ürünler yapılır. Poroz ürünler genellikle ergimiş Alümina'dan yapılır ve 1900 dereceye kadar fırın astarlarında kullanılır. Yoğun alümina, ergimiş alüminadan daha saftır. Ergimiş alümina %99,8 AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunur. Bu oran arttıkça sıcak mukavemet, elektrik direnci ve aşınma direnci artar.

Alümina malzemeler slip dökümle, ekstrüzyonla, enjeksiyon kalıbı ile, soğuk ve sıcak presle şekillendirirler. Şekillendirmede polvinil, alkol, reçine, mum, lateks gibi bağlayıcılar kullanılır.

Tablo 4.1. Alümina mineralinin özellikleri

KİMYASAL İÇERİK (%)			
	Minimum	Maksimum	Tipik
Kızdırma Kaybı/LOI,1000°C	0,5	1	0,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99	-	99,1
SiO <sub>2</sub>	-	0,02	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,02	0,008
Na <sub>2</sub> O	-	0,3	0,15
CaO	-	0,02	0,007
FİZİKSEL ÖZELLİK			
Sipessifik Yüzey, BET (m <sup>2</sup> /g)	70	90	80
Alfa Alümina (%)	20	30	25
Yığılma Açısı (°)	32	36	34
Mutlak Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	3,3	3,6	3,45
Yığın Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	1	1,1	1
TANE BOYUTU			
d <sub>50</sub> (µm)	55	85	75
<45 µm (%)	-	30	-
>150 µm (%)	-	7	-

#### 4.1.2. Alümina mineralinin kullanım alanları

İlk olarak buji ve laboratuvar malzemelerinde kullanılan alümina günümüzde de bu alanlarda oldukça yaygındır. Özellikle yüksek sıcaklık fırınlarında, kesici takımlarda, yatak malzemelerinde, tekstil endüstrisinde, elektronik endüstrisinde, zırh yapımında, implant ve protezlerde kullanılmaktadır.

Alümina'dan porozite ve yoğun ürünler yapılır. Poroz ürünler genellikle ergimiş Alümina'dan yapılır ve 1900 dereceye kadar fırın astarlarında kullanılır.

Diğer kullanım alanları:

1. Seramik Endüstrisi
2. Cam Endüstrisi
3. Refrakter Endüstrisi
4. Öğütücü Malzeme Üretimi
5. Birincil Alüminyum Üretimi
6. Şeffaf Zırh Üretimi
7. Seramik Kesici Üretimi

#### 4.1.3. Garnet mineralinin özellikleri

Garnet kumu silikatlar grubu minerallerdir ve görünümü Şekil 4.2’de verildiği gibidir. Doğada yüzde 98 saflıktaki garnet kayalarından öğütülerek elde edilir. Sertlikte elmas ve oksit sınıfı corundum’dan sonra gelen bir sarf kumudur. Sertlikleri 7,5–8,5 arasında yer almaktadır. Piyasada avusturalya garneti, hindistan garneti veya garnet kumu olarak bilinen garnet su jeti kesme makinalarında aşındırıcı madde olarak ve diğer kumlama uygulamalarında da korozyon etki yaratmamasından dolayı alüminyum oksit malzemesine bir alternatif olabilir. Bununla birlikte sanayide yoğun miktarda kullanılan silika kumunun çevre ve insan sağlığına olan zararları nedeniyle garnet kumu bu malzemenin yerini almaya başlamıştır.



Şekil 4.2. Garnet mineralinin görünümü

Yapısından kaynaklanan sertliği, dayanıklılığı ve aşındırıcı etkisiyle bilinen, tümüyle doğal almandite garnet içeren avusturalya garneti piyasada GMA Garnet olarak bilinir. Endüstriyel Kumlama ve Hassas Kumlama uygulamalarında kullanılabilen garnet ağır metaller veya toksik maddeler ile serbest silika ihtiva etmez ve tüm işçi

sağlığı ve iş güvenliği gerekliliklerini karşılar. Garnet kumlama amacıyla kullanıldığında tane büyüklüğü, yoğunluk ve sertlik/dayanıklılık arasındaki oranı sayesinde güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamında yüksek üretim hızı, düşük aşındırıcı tüketimi ile optimum aşındırıcı verimliliği sağlamaktadır. GMA Garnet düşük tüketim(kg/m<sup>2</sup>) ve yüksek üretim(m<sup>2</sup>/hr) sağlaması nedeniyle silika kumu, çelik ve mineral gritlerine kıyasla daha ekonomik bir seçenektir. GMA Garnet düşük kırılabilirlik ve yüksek sertliği sayesinde, yapılan çalışmaya bağlı olarak 5-10 defa tekrar kullanılabilir. GMA Garnet Batı Avustralya'daki dünyanın en büyük endüstriyel garnet madeninden çıkartılır ve işlenir. Tablo 4.2'de garnet mineralinin fiziksel özellikleri, kimyasal analizi ve tane boyutları verilmiştir.

Tablo 4.2. Garnet mineralinin özellikleri

Tipik Fiziksel Özellikler		Sevk Edilebilir Tane İriliikleri	
Sertlik	ca.6-7,5 mohs	GARNET	
Tane Yapısı	Köşeli	12/20 mesh	0,50-1,20 (mm)
Erime Noktası	Yakl. 1300 °C	20/40 mesh	0,50-1,00 (mm)
Özgül Ağırlık	Yakl. 3,5-4,3 g/cm <sup>3</sup>	30/60 mesh	0,20-0,60 (mm)
Tane İriliğine Göre Dökme Ağırlığı	Yakl. 1,9-2,2 g/cm <sup>3</sup>	GARNET yüksek basınçlı su püskürtme-kesme aracı	
<b>Kimyasal Ortalama Analizi</b>		80 mesh	0,180-0,35 (mm)
SIO <sub>2</sub> (Silikojen Değil)	35,00%	120 mesh	0,180-0,25 (mm)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,00%	180 mesh	0,090-0,15 (mm)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,00%	200 mesh	0,075-0,15 (mm)
MgO	7,00%	240 mesh	0,045-0,10 (mm)
Mno	1,00%	<b>Paketleme</b>	
CaO	1,00%	25 kg çuvallarda paket üzerinde 1t	
		Büyük kutu içerisinde 1t	

#### 4.1.4. Garnet mineralinin kullanım alanları

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

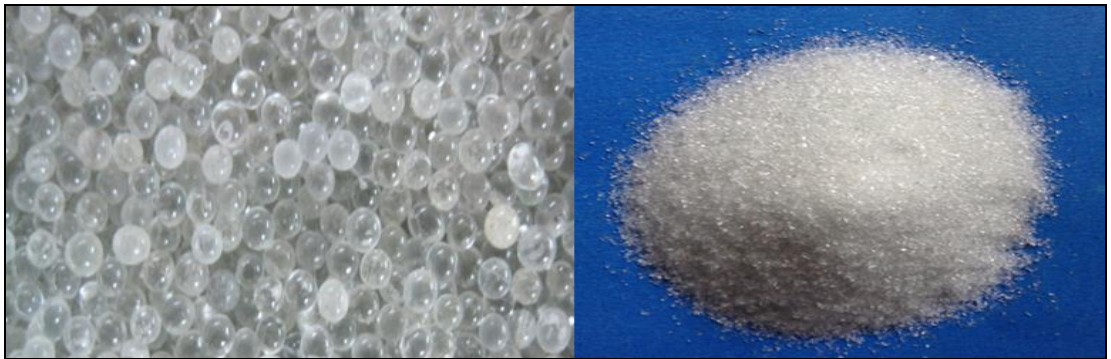
Sanayide yoğun miktarda kullanılan silika kumunun çevre ve insan sağlığına olan zararları ve önemi bilinmektedir. Bu yüzden garnet kumu bu malzemenin yerini almaya başlamış, gemi raspa işleri yada çelik konstrüksiyon kumlama işlemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Diğer taraftan garnet kumu su filtrasyon sistemlerinde ve parlatma amacıyla kullanılan tozların imalinde de yoğun miktarda kullanılmaktadır.

Garnet minerali metalik demir içermez, bu sayede paslanmaz çelik, anti-manyetik çelik, cam kumlama ve tüm özel alaşımların yüzey hazırlığında kullanılabilir. Özel ince taneli garnet kullanılarak, alüminyum, türbin kanatçıkları, fiberglas ve diğer özel yüzeyler hazırlanabilir.

Piyasada garnet kumu olarak bilinen garnet su jeti kesme makinalarında aşındırıcı madde olarak ve diğer kumlama uygulamalarında da korozif etki yaratmamasından dolayı alüminyum oksit malzemesine bir alternatif olarak kullanılabilir.

#### **4.1.5. Cam küre özellikleri**

Cam Kürecikler Şekil 4.3'te görüldüğü gibi sertlikleri ve küresel formları ile uygulanan yüzeylerden metal oksitleri ve yabancı maddeleri yüzeye zarar vermeden temizler. Cam, diğer malzemeler ile kimyasal reaksiyona girmediğinden; cam bilyalar uygulanan malzemedeki korozyona neden olmaz ve malzemenin yüzeyini temizleyerek empüritelerin yüzeyde çökmesini engeller. Kanserojen madde ve serbest silika içermediğinden sağlık açısından hiçbir zararı yoktur.



Şekil 4.3. Cam küre görüntüleri

Cam küreler sağlık ve çevre kirliliği açısından hiç bir tehlike arz etmezler. Silis kumunun neden olduğu silikona bağlı hastalıklar ile hiç bir şekilde bağlantılı

degillerdir. Zehirleyici veya kanserojen etkileri yoktur. Yüzey işlemlerinde tamamen sağlıklı bir seçenektirler. Tablo 4.3'te cam kürelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3. Cam küre özellikleri

Cam Küre Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	
Özgül Yoğunluk	2,60 g/cm <sup>3</sup>
Erime Noktası	730°C
Tane İriliğine Göre Ağırlığı	1,5-1,6 g/cm <sup>3</sup>
Kimyasal Analizi	SiO <sub>2</sub> % 71,00-75,00
	Na <sub>2</sub> O % 12,00-15,00
	CaO % 7,00-12,00
	MgO Max. % 5,00
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Max. % 2,50
	K <sub>2</sub> O Max. % 1,50
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Max. % 0,50
Paketleme	25 kg çuvallarda palet üzerinde 1t

#### 4.1.6. Cam küre kullanım alanları

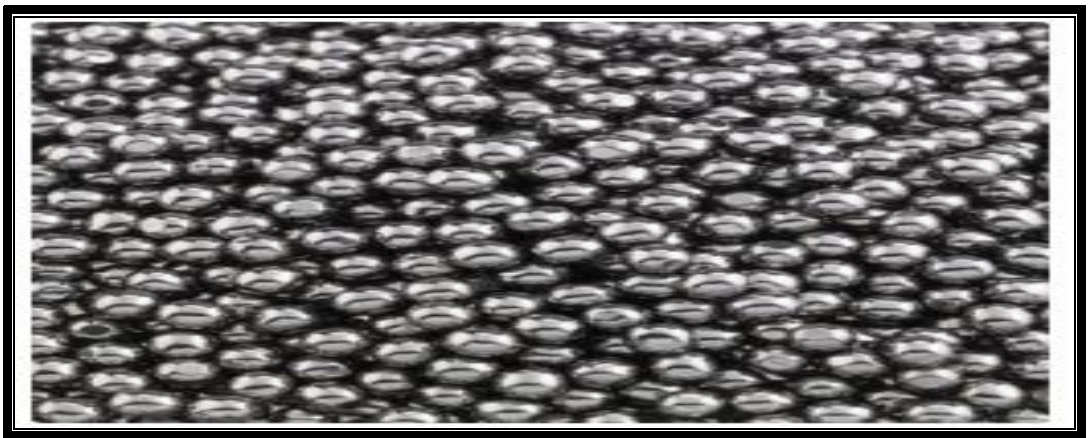
Cam küreler sert ve küre biçimli oldukları için yüzey temizlemede ve yüzeye zarar vermeden metal oksit kalıntılarını gidermede kullanılırlar. Cam küreler diğer malzemeler ile hiç bir kimyasal reaksiyona girmezler ve bu itibarla asındırma, yüzey temizleme, parlatma, kalıp temizleme gibi pek çok dikkat gerektiren yüzey işleminde mükemmel şekilde kullanılabilirler.

Diğer kullanım alanları:

1. Hassas kumlama gerektiren yüzeylerde
2. Kalıp temizliğinde, boya ve kaplama öncesi pürüzlendirme işlemlerinde
3. Reflector malzeme olarak yol çizgilerinde
4. Boya sanayinde dolgu malzemesi olarak
5. Epoksi yüzey kaplamalarda sertlik ve çizilmezlik amaçlı
6. Mozaik, Cam sıva, mineral sıva gibi ürünlerde efekt sağlamak amaçlı
7. İnşaatlarda beton blok, çini, kaldırım taşı, briket, beton plaka, tretuvar üretiminde mukavemet amaçlı
8. Polyester bağlayıcı poligranit, mermerit, kompozit, taş panallerin yapımında sertlik, çizilmezlik ve mukavemet artırıcı olarak kullanılmaktadır.

#### 4.1.7. Çelik bilya özellikleri

Çelik bilyalar Şekil 4.4'de görüntüleri verildiği gibi uzun ömürlü oluşu, kısa sürede istenen sonucu vermesi sayesinde maliyet avantajı sağlar ve uygulanan yüzeylerde parlak ve paslanmaz bir parlaklık sağlar. Kumlama makinasının asınmasını nispeten geciktirir. Temizleme, yüzey profilini geliştirme / iyileştirme işlemlerinde olmak üzere her tür alüminyum döküm parçalarda, basınçlı dökümle üretilen zamaklarda, demir dışı metallerde, özel alaslarda ve paslanmaz çelik dökümlerde sağladığı avantajlar sebebi ile kullanılması gereken tek kumlama abrasividir. Tablo 4.4'de çelik bilyaların fiziksel, kimyasal özellikleri ve tane boyutları verilmiştir.



Şekil 4.4. Çelik bilya görüntüleri



Tablo 4.4. Çelik bilya özellikleri

Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri		SAE	Tane İriliği (mm)
Özgül Yoğunluk	7,90 g/cm <sup>3</sup>	S-10	0,05-0,20
İşletim Karışımında Sertlik	30-45 HRC (300-450 HV)	S-20	0,09-0,30
	C % 0,05-0,20	S-30	0,14-0,50
	Cr % 16,00-20,00	S-40	0,40-0,80
Kimyasal Analizi	Si % 1,80-2,20	S-50	0,60-1,00
	Ni % 7,00-9,00	S-60	0,70-1,25
	Mn % 0,70-1,20	S-100	1,00-1,40
	25 kg çuvallarda palet üzerinde 1t	S-150	1,25-1,70
Paketleme		S-200	1,40-2,00
		S-300	1,70-3,00

#### 4.1.8. Çelik bilya kullanım alanları

Tablo 4.5. Çelik bilyaların uygulama alanlarına göre çeşitleri

Kullanım alanları	S 780	S 660	S 550	S 460	S 390	S 330	S 280	S 230	S 170	S 110	S 70
Çelik, pik sfero döküm büyük parça temizliği	x	x									
Çelik, pik sfero döküm orta parça temizliği		x	x	x	x	x					
Demir dışı döküm parça temizliği							x	x	x	x	x
El aletleri kaplama öncesi temizlik							x	x	x		
Fitting imalatında, galvaniz öncesi temizlik					x	x	x				
Gemi inşaat sanayinde, kazan yapımında			x	x	x	x					
Kaliteli çelik imalatında, çubuk parça temizliği, boru imalatında				x	x	x					
Konteyner imalatında							x	x	x		
Radyatör, küvet döküm parçalarda boya ve emaye öncesi temizlik		x	x	x	x						
Tüp imalatında galvaniz öncesi temizlik		x	x	x	x	x	x				
Yay imalatında yay ömrü arttırma				x	x	x	x	x	x	x	

Çelik bilyalar birçok kumlama işleminde yaygın olarak kullanılan metalik yapıda kumlama abrasividir. Tablo 4.5’de çelik bilyaların uygulama alanları ve uygulama alanlarına göre hangi çeşit çelik bilyanın kullanıldığı verilmiştir.

## 4.2. Deney Numuneleri

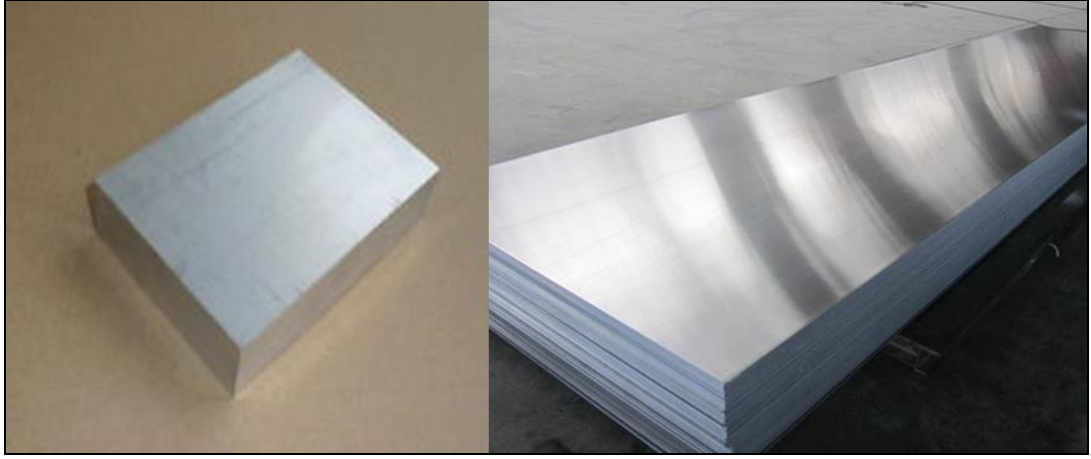
### 4.2.1. AA6082-T6 alaşımı özellikleri

AA6082 alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementleri olarak yapısında silisyum ve magnezyum ( $Mg_2Si$ ) kullanılmıştır. Tablo 4.6’da AA6082 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu yer almaktadır.

Tablo 4.6. AA6082 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Kompozisyon	% Değer
Silikon (Si)	0,70-1,30
Krom (Cr)	0,00-0,25
Mangan (Mn)	0,40-1,00
Magnezyum (Mg)	0,60-1,20
Bakır (Cu)	0,00-0,10
Titanyum (Ti)	0,00-0,10
Demir (Fe)	0,00-0,50
Çinko (Zn)	0,00-0,20
Alüminyum (Al)	Balans

Alüminyum 6082 alaşımları 6000 serisi alaşımları arasında en yüksek dayanımlı ve yüksek korozyon mukavemeti olan alaşımlardır. Yapısal alaşım olarak bilinen AA6082 alüminyum alaşımı Şekil 4.5’de görüldüğü gibi genellikle işleme için plaka şeklinde üretilir. AA6082 alaşımı içerisinde büyük miktarda manganez ilavesi daha güçlü bir alüminyum alaşımı elde edilmesini sağlamıştır. Buyüzden AA6082 alaşımında ince cidarlı ve komplike ekstrüzyon şekilleri üretmek zordur. T6 ve T651 temperlerinde alaşım makinaları iyidir ve üretimde talaş kırıncılar kullanıldığında sıkı bobin sargısı üretilir.



Şekil 4.5. AA6082 T6 alüminyum alaşımı plaka örnekleri

AA6082 T6 alaşımlarının kolay şekillendirilebilmesi amacıyla levha şeklinde üretilmesinin yanı sıra kullanım ihtiyaçlarına bağlı olarak boru, çubuk, lama ve profil çeşitleri şekline de üretimleri de mevcuttur. Bu alaşım Tablo 4.7’de görüldüğü gibi diğer 6xxx serisi alaşımlara kıyasla benzer fakat eşdeğer olmayan fiziksel özelliklere ve T6 ısıtma işlemi uygulandığında biraz daha yüksek mekanik özellikler sunar. Kaynak, lehimleme, vb. çeşitli birleştirme yöntemleri AA6082 alaşımına kolayca uygulanabilir.

Tablo 4.7. AA6082 T6 alüminyum alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler	Değer	Mekanik Özellikler	Değer
Yoğunluk	2,71 g/cm <sup>3</sup>	Akma Dayanımı	270 Mpa
Erime Sıcaklığı	575 °C	Çekme Dayanımı	330 Mpa
Isıl Genleşme K.	23,1x10 <sup>-6</sup> /K	Uzama	16%
Elastisite Modülü	71 Gpa	Elastisite	71 Gpa
Isıl Kapasite	170 W/m.K		
Elektriksel İletkenlik	%44 IACS		

#### 4.2.2. AA6082-T6 alaşımı kullanım alanları

Havacılık alanında 15 yılı aşkın süre önce AA6082 alüminyum alaşımı teknolojisi Aleris ve diğer şirketler ile birlikte Airbus’ın katılımı ile alman hükümeti tarafından finanse edilerek başlatılmıştır. Bu alaşım teknolojisiyle alakalı çalışmaların tercih edilme sebebi AA6082 alaşımının düşük yoğunluklu ve hafif oluşu, kaynak gibi birleştirme yöntemlerinin kolay uygulanabilir olması nedeniyle Airbus firmasının

ilgileniyor olmasıdır. Bu çalışmalardan yola çıkarak Şekil 4.6’da görülen A380 yolcu uçağının alt gövdesinde 6000 serisi lazer kaynaklı paneller kullanılmıştır. Bu alaşımın ve lazer kaynağının kullanımının avantajı panellerin gövde üzerine monte edilmesi için basamak ayağına ihtiyaç duyulmaması, dolayısıyla kullanılan bu malzemeden %30 oranında tasarruf sağlanmasıdır. Ayrıca bu duruma ek olarak panellerin gövde üzerine lazer kaynağıyla monte edilmesi perçinle bağlama yönteminden çok daha kısa sürede gerçekleşmektedir.



Şekil 4.6. Airbus A380 yolcu uçağı

Havacılık alanınmda bir başka kullanım ise Şekil 4.7’de görülen The Eagle Eye 1 adlı uçaktır. The eagle eye 1 uçağı paslanmaz çelik AISI 316, AA6082 T6 alaşımları ve kompozit malzemelerden üretilmiştir. Uçağın bu malzemelerden üretilmesi deniz üzeri uçuşlarda tuzlu suya maruz kalsa bile uzun ömürlü malzeme dayanımı, daha uzun vadeli bakım gereksinimi ve güvenlik gibi avantajlar sağlamıştır.



Şekil 4.7. The Eagle Eye 1 uçağı

Havacılık alanında bir başka kullanım ise Şekil 4.8’de verilen Eurofly firması tarafından üretilen ultralight sınıfı Flash light tipi uçaktır. Bu uçak çelik ALS 500’ün yanı sıra kanatları AA6082 T6 alüminyum alaşımından üretilmiştir.



Şekil 4.8. Eurofly firmasının flash light uçağı

AA6082 T6 alüminyum alaşımının diğer kullanım alanları aşağıda belirtildiği gibidir.

1. Demiryolu vagonlarında ağır yapılar
2. Kamyon korkulukları
3. Gemi inşaat sektöründe gemi direkleri ve kirişleri

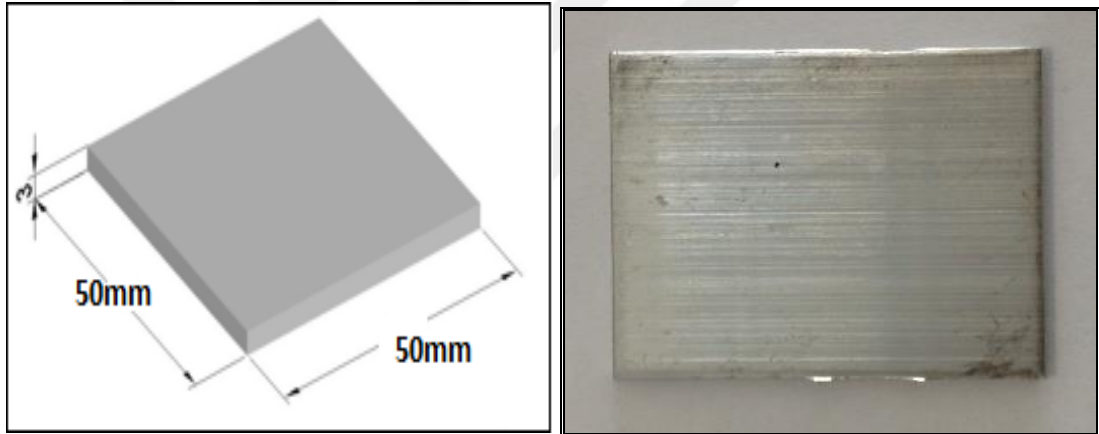
4. Köprüler
5. Askeri köprüler
6. Bisiklet imalatı
7. Kazan imalatı
8. Platform yapımı
9. Flanş imalatı
10. Hidrolik sistem ve parçaları
11. Maden ekipmanları
12. Kule yapımı
13. Perçin  retimi



## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. Hedef Malzeme

Deneysel çalışmalarda hedef malzeme olarak kullanılan Alüminyum alaşımı (6082 T6) 500x500 mm'lik levhalar halinde ASAŞ TÜRKİYE Alüminyum firmasından temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda hedef malzeme (katı partikül erozyonuna maruz kalan malzeme) olarak kullanılan levha halindeki 6082 T6 alüminyum alaşım giyotin makas ile kesilerek, 50mm x 50mm kare plakalar şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Şekil 5.1'de hazırlanan numunelerin boyutları ve hedef malzeme örneği gösterilmiştir.



Şekil 5.1. AA6082 T6 numunelerin boyutları ve örnek hedef malzeme

### 5.2. Aşındırıcı Malzemeler

Deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak, 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılmıştır. Dört numaralı malzeme bölümünde alümina, garnet, cam küre ve çelik bilya aşındırıcıları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Alümina, Garnet, Cam küre ve Çelik bilya mineralleri SaykarMetalurji ve Yüzey İşlem Ürünleri San. Tic. Ltd. Şti'nden temin edilmiştir. Tablo 5.1'de

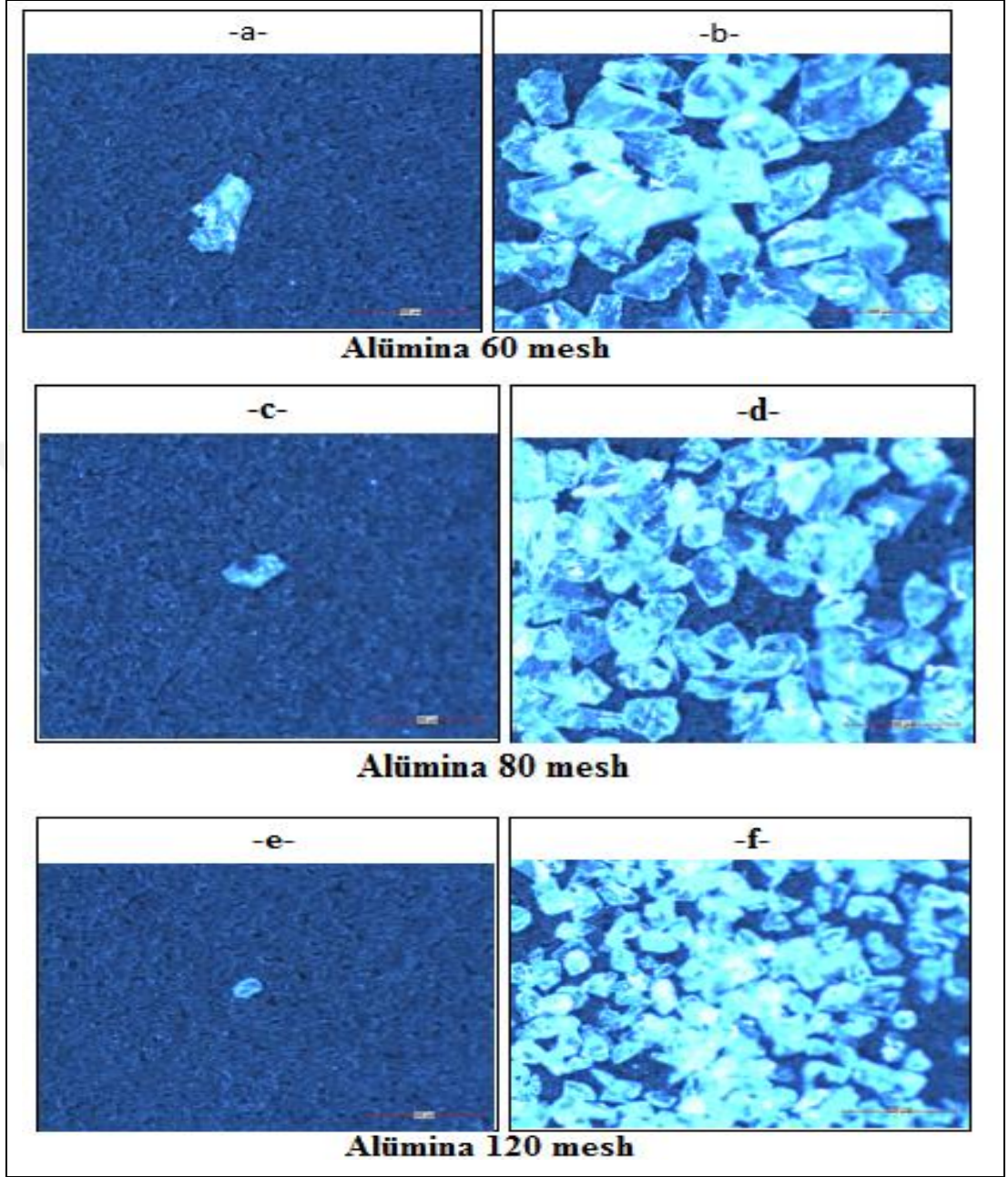
deneysel çalışmalarda kullanılan alümina, garnet, cam küre ve çelik bilya aşındırıcılarının partikül boyutları verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları

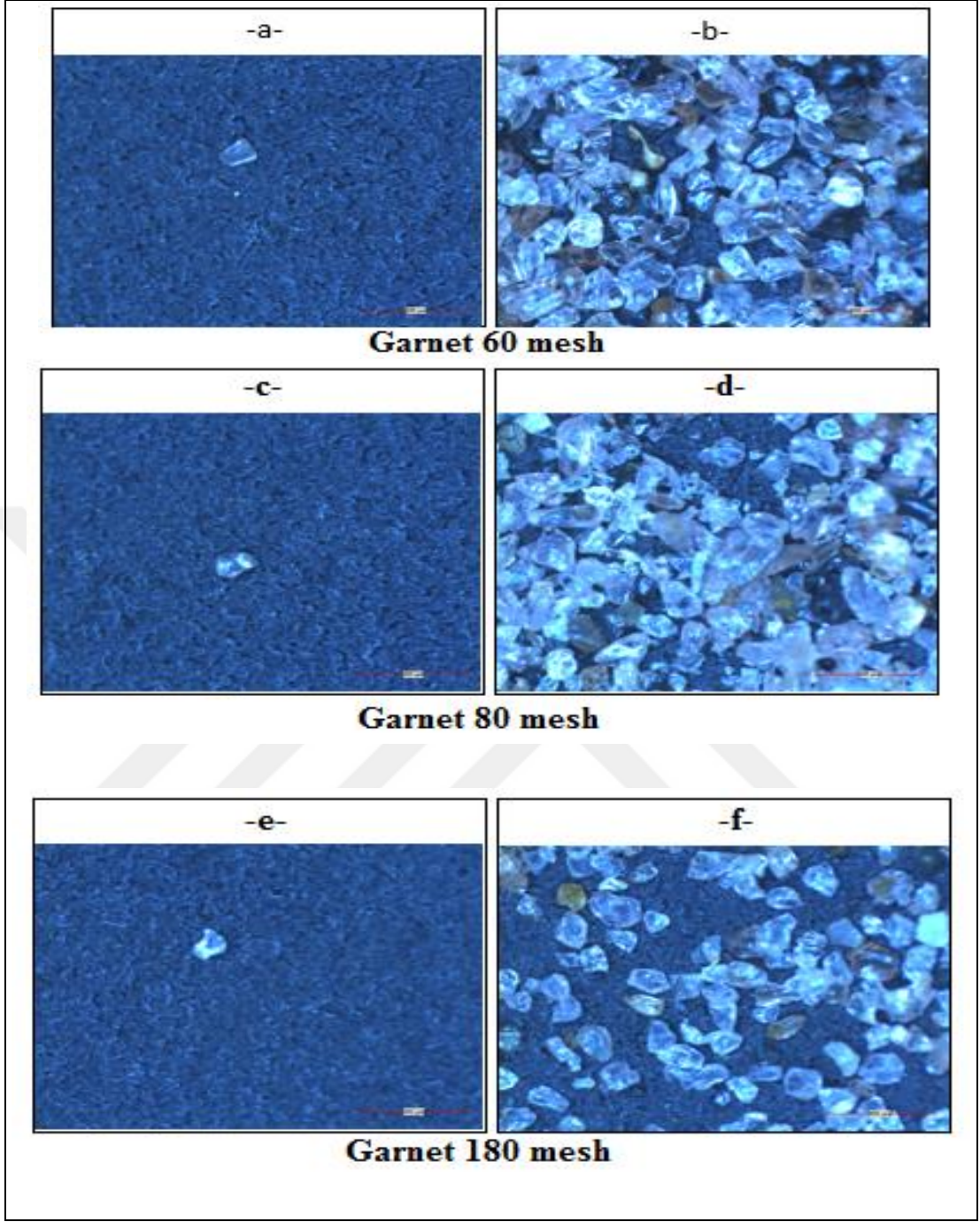
<b>Aşındırıcı Partikül Adı</b>	<b>Aşındırıcı Partikül Boyutu</b>
<b>Alümina 60 mesh</b>	212-300 mikron
<b>Alümina 80 mesh</b>	150-212 mikron
<b>Alümina 120 mesh</b>	90-125 mikron
<b>Garnet 60 mesh</b>	180-600 mikron
<b>Garnet 80 mesh</b>	150-212 mikron
<b>Garnet 180 mesh</b>	53-90 mikron
<b>Cam küre 100-200</b>	100-200 mikron
<b>Cam küre 200-300</b>	200-300 mikron
<b>Cam küre 300-400</b>	300-400 mikron
<b>Çelik bilya</b>	212-600 mikron

Şekil 5.2, şekil 5.3, şekil 5.4 ve şekil 5.5’de deneysel çalışmalarda kullanılan alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcı partiküllerinin 600 µm büyütmadaki tekli (-a-) ve çoklu (-b-) olarak çekilmiş stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.6’da alümina, garnet, cam küre ve çelik bilya aşındırıcı partiküllerinin 3 bar püskürtme basıncı, 90° çarpma açısı ve 10 sn uygulama süresinde püskürtülen aşındırıcı partikül ağırlıkları verilmiştir.

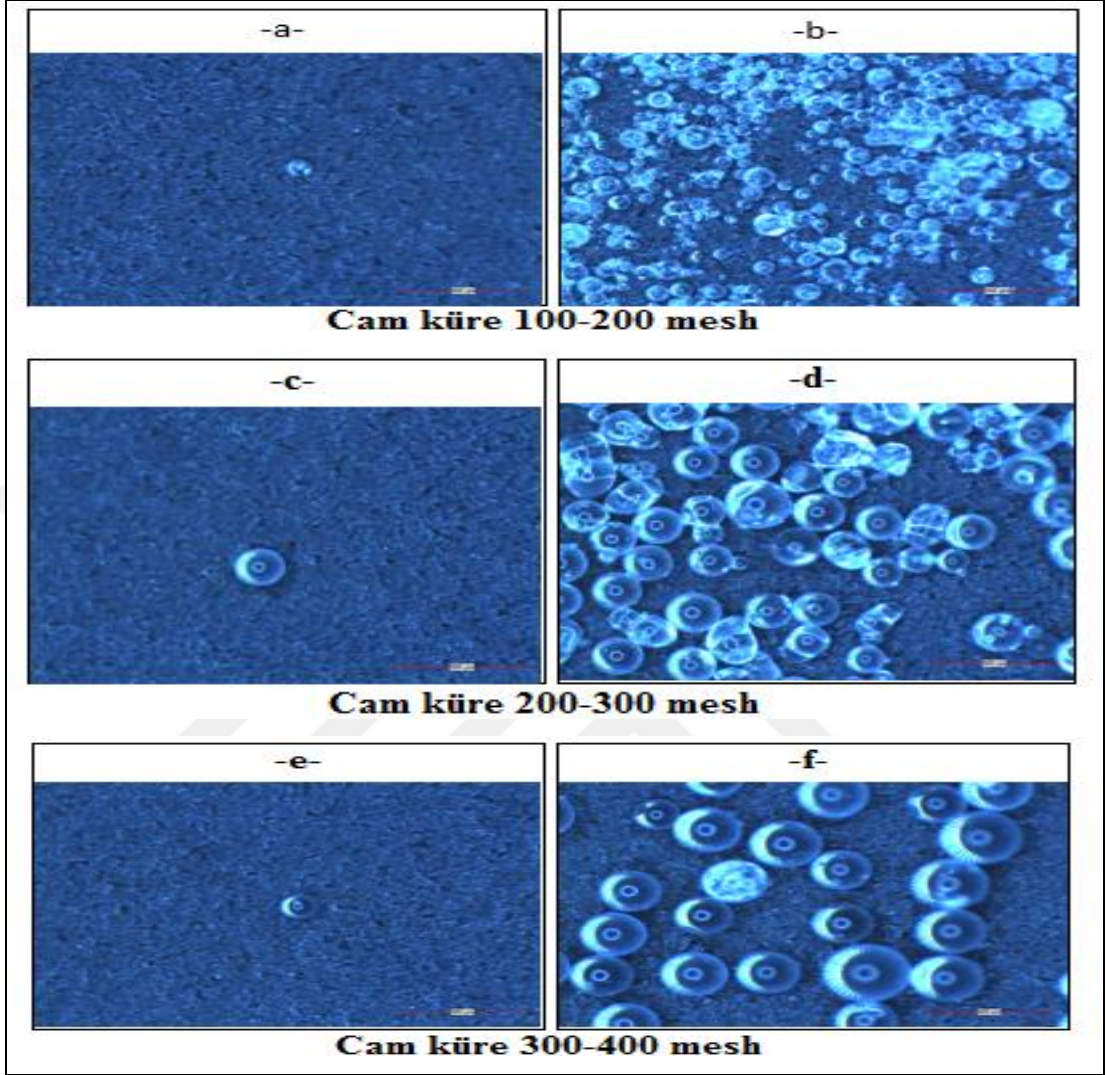




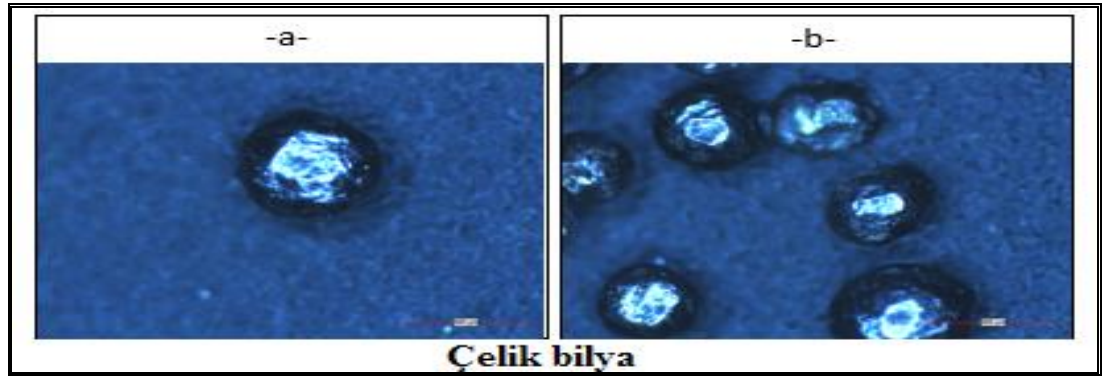
Şekil 5.2. Alumina a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 120 mesh aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri



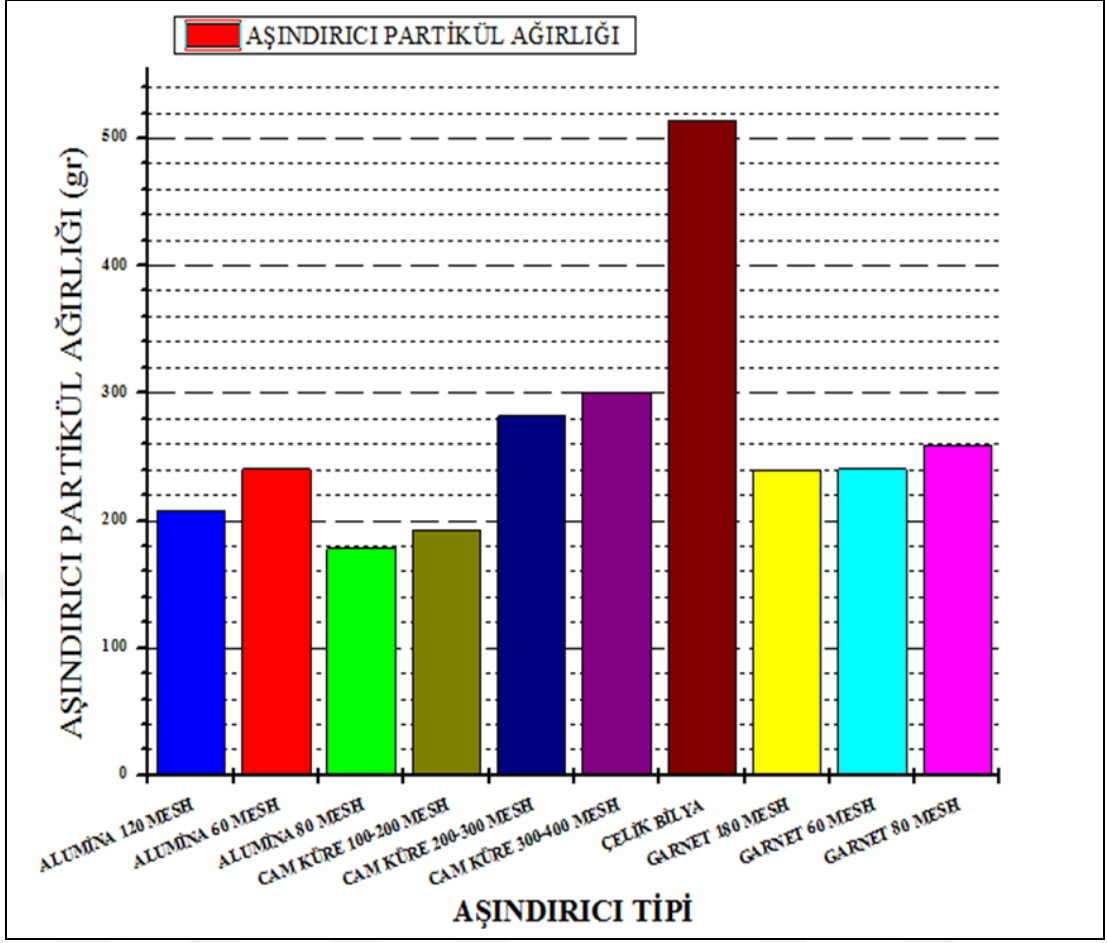
Şekil 5.3. Garnet a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 180 mesh aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri.



Şekil 5.4. Cam küre a)-b) 100-200 mesh, c)-d) 200-300 mesh, e)-f) 300-400 mesh aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri



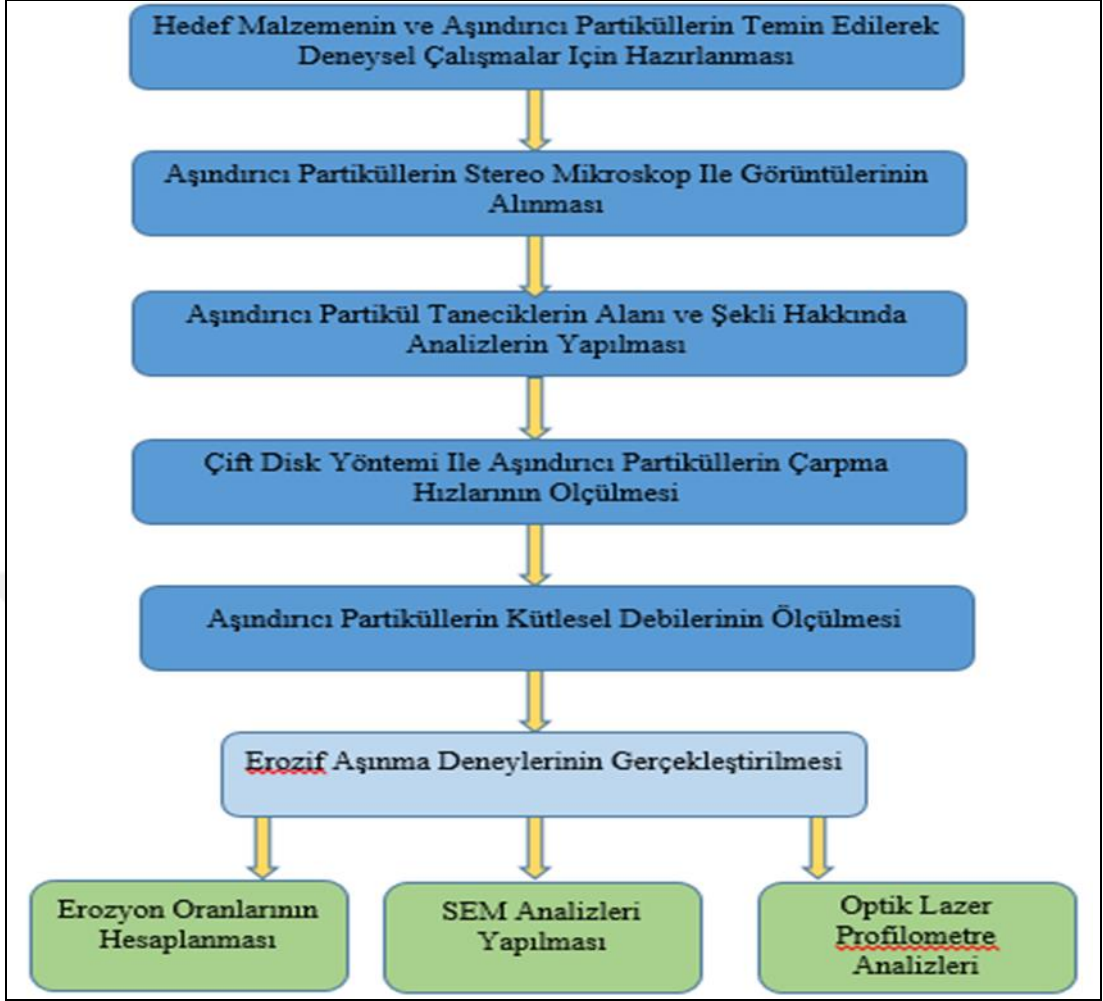
Şekil 5.5. Çelik bilya aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri.



Şekil 5.6. Deneylede kullanılan aşındırıcıların partikül ağırlıkları

### 5.3. Yöntem

Tez çalışmaları kapsamında Şekil 5.7’de akış şeması verilen deneysel çalışmalar sırası ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm içerisinde akış şemasında verilen yöntemlerin nasıl gerçekleştirildiği ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi aşamasında kullanılan cihaz ve ekipmanlar akış şemasında verilen yöntemlerin anlatıldığı bölümler içerisinde verilmiştir.

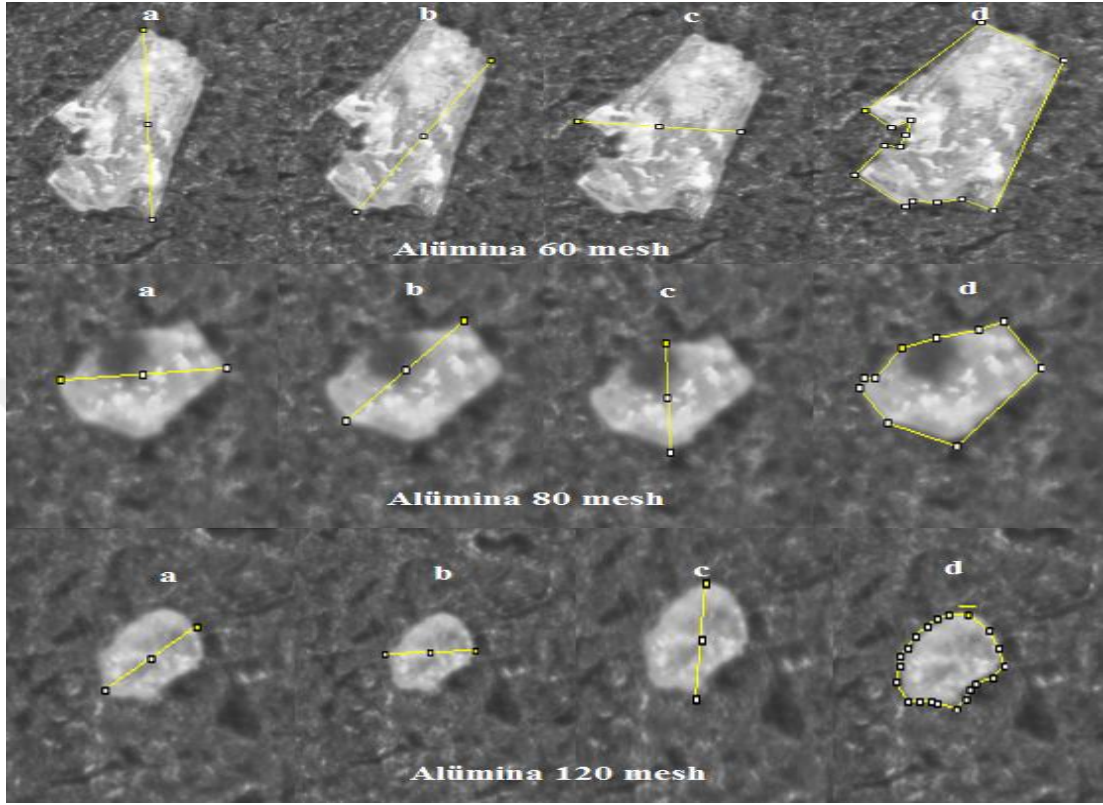


Şekil 5.7. Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması

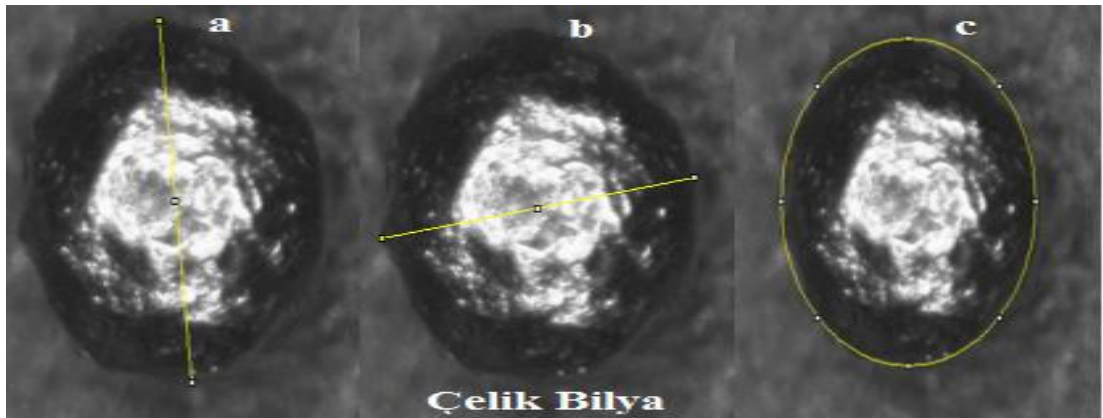
### 5.3.1. Partiküllerin stereo mikroskop ile görüntülerinin alınması

Deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak, 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılmıştır. Denejlerde kullanılan her bir aşındırıcı partikülün 50X yaklaşma şartlarında, eşit koşullarda parçacık şekillerini ve boyutlarını görebilmek amacıyla Nikon SMZ 745T marka stereo mikroskop ile görüntüleri alınmıştır. Farklı partikül boyutlarına ve şekillerine sahip aşındırıcı partikül tanecikleri tek tek ve çoklu olarak stereo mikroskoba yerleştirilmiş, 600 µm büyütmede görüntüleri kaydedilmiştir. Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partikül taneciklerinin tekli (-a-) ve çoklu (-b-) olarak çekilmiş stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Kaydedilen görüntüler İMAGEJ programı kullanılarak aşındırıcı partikül taneciklerinin boyut ölçümleri

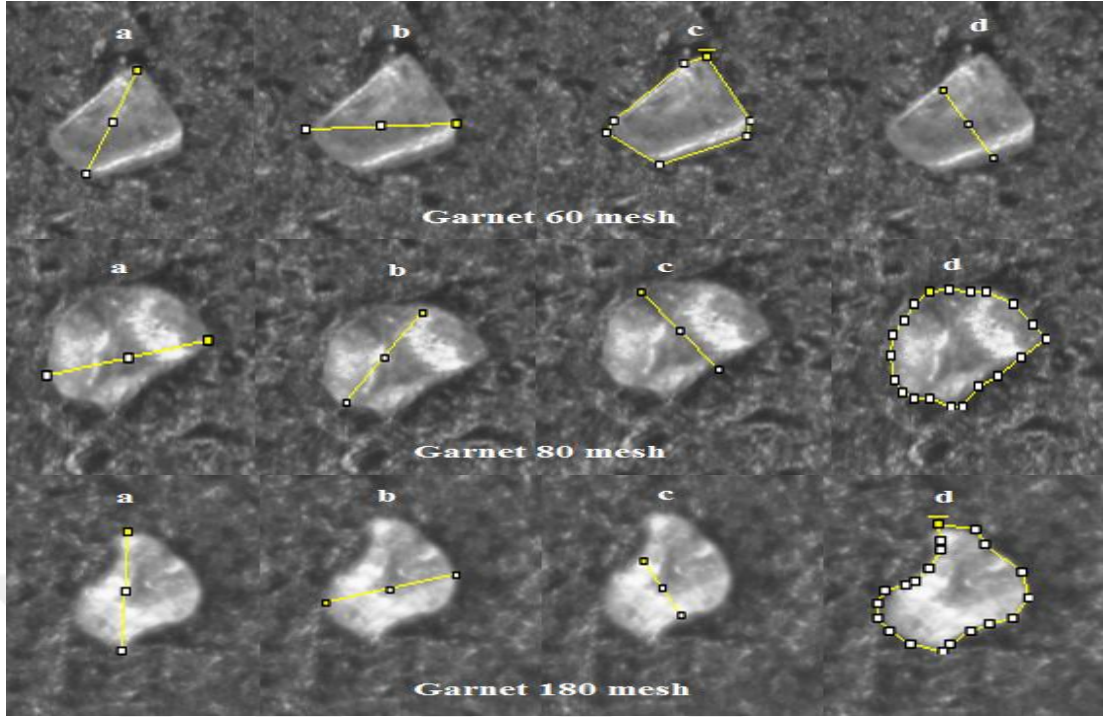
yapılmıştır. Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11’da IMAGEJ programı kullanılarak yapılan aşındırıcı partikül boyut ölçümleri görülmektedir. Tablo 5.2’de ise bu ölçümlerin sonuçları verilmiştir.



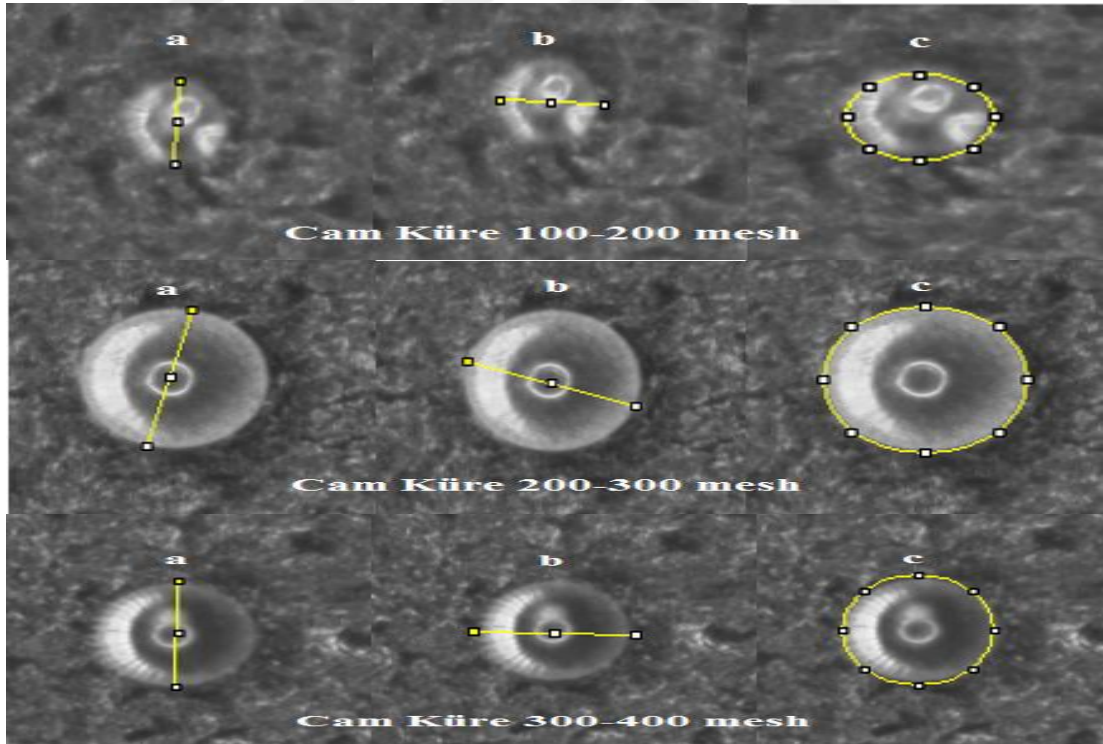
Şekil 5.8. Alümina aşındırıcı partiküllerinin boyut ölçüm görüntüleri



Şekil 5.9. Çelik bilya aşındırıcı partiküllerinin boyut ölçüm görüntüleri



Şekil 5.10. Garnet aşındırıcı partiküllerinin boyut ölçüm görüntüleri

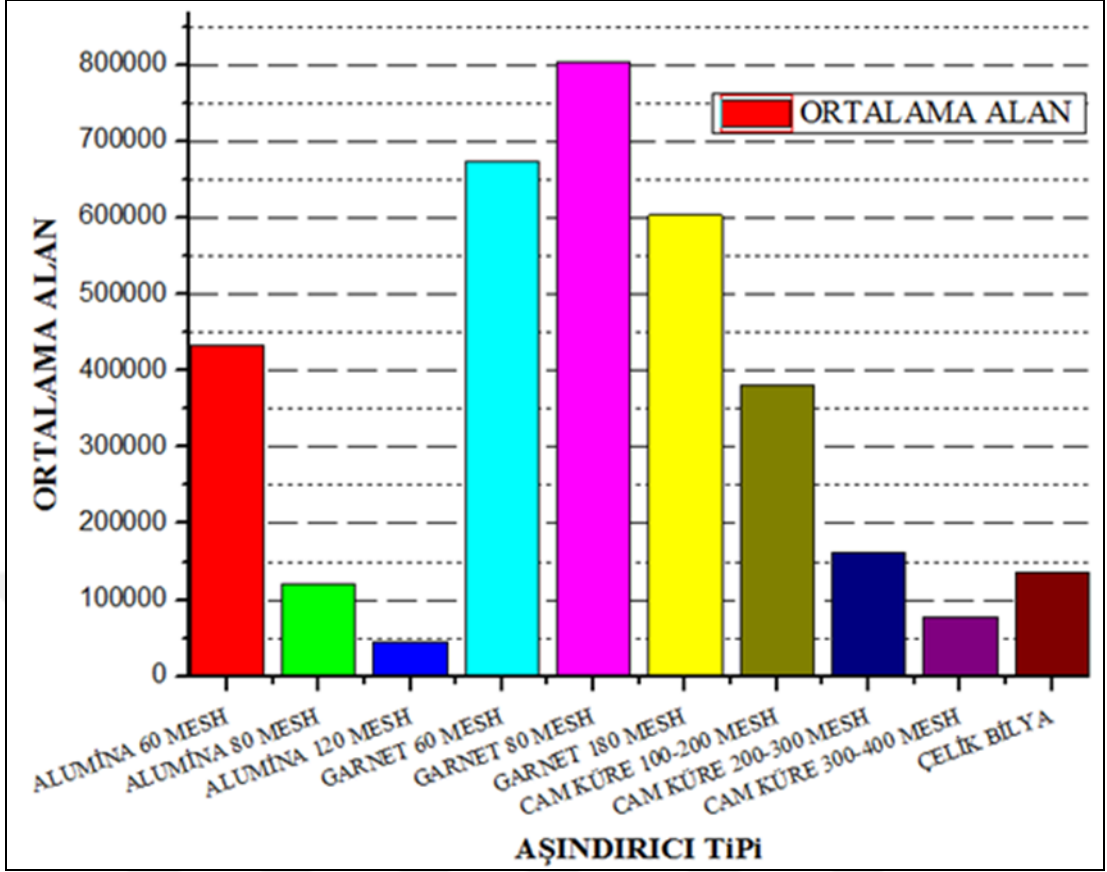


Şekil 5.11. Cam küre aşındırıcı partiküllerinin boyut ölçüm görüntüleri

Tablo 5.2. IMAGEJ programı kullanılarak yapılan aşındırıcı partikül ölçüm sonuçları.

Aşındırıcı Tipi	Şekil	Alan	Ortalama	Minimum	Maksimum	Açı	Uzunluk
Alümina 60 mesh	a	1.231.092	198.408	96	249.486	-88.080	663.323
	b	1.138.503	178.624	77	242.231	-124.651	612.299
	c	678.986	189.623	88	249.848	-5.826	364.841
	d	170.295.294	184.554	67	250	-	-
Alümina 80 mesh	a	526.411	161.034	98	230.522	3.545	344.818
	b	445.246	155.133	92.330	200.985	-141.809	290.632
	c	317.702	143.387	81.956	217.529	-87.474	207.305
	d	46.785.622	162.588	63	233	-	-
Alümina 120 mesh	a	267.449	160.487	83	195.250	-145.176	172.415
	b	267.449	173.680	97	213.500	-177.955	172.415
	c	236.680	169.387	108	201.397	-95.826	151.550
	d	17.194.814	167.754	77	224	-	-
Cam Küre 100-200 mesh	a	173.929	138.641	84.135	224.324	-93.094	112.855
	b	192.481	152.291	78	224.195	-2.793	125.022
	c	11.094.334	144.422	66	238	-	-
Cam Küre 200-300 mesh	a	378.688	119.356	77.556	218.795	-103.861	244.026
	b	381.055	133.596	74.300	224.400	-18.208	246.170
	c	47.591.648	137.240	68	236	-	-
Cam Küre 300-400 mesh	a	247.550	108.560	66	178.017	-90.971	170.217
	b	268.352	115.932	59.312	238.656	-1.790	184.706
	c	22.708.025	115.838	56	245	-	-
Çelik Bilya	a	1.129.188	129.866	32.532	249.521	-84.028	735.615
	b	1.101.075	130.328	33.804	250	10.065	718.185
	c	404.520.915	93.379	30	250	-	-
Garnet 60 mesh	a	305.317	141.894	102.441	206.031	-114.963	196.848
	b	352.653	121.425	63.041	182.824	-177.678	227.876
	c	26.120.023	140.041	50	247	-	-
	d	208.279	141.476	109.992	188.196	-56.310	133.126
Garnet 80 mesh	a	402.331	159.380	106	238.437	-168.261	250.994
	b	300.475	165.741	124.852	223.693	-128.047	186.422
	c	269.919	114.378	56	147.928	-46.548	167.059
	d	31.234.156	154.308	56	249	-	-
Garnet 180 mesh	a	314.501	205.819	113	249	-92.526	206.258
	b	291.544	176.159	105	239.333	13.815	190.353
	c	156.103	211.905	153.753	248.877	-57.265	100.867
	d	23.408.494	180.134	65	250	-	-





Şekil 5.12. Aşındırıcı partikül ölçümlerine göre ortalama alan

Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküller IMAGEJ programı kullanılarak alan ölçümleride yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçları Tablo 5.2’de görüldüğü gibidir. Bu sonuçlardan yararlanarak şekil 5.12’de verilen ortalama alan grafiği çizilmiştir. Şekil 5.12 incelendiğinde aşındırıcı partiküllerin ortalama alanları parçacık boyutuyla aynı doğrultuda değiştiği görülmektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin yapısını, şeklini ve boyutunu incelemek için kullanılan Şekil 5.13’de görülen Nikon SMZ 745T marka stereo mikroskopun özellikleri aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 5.13. Nikon SMZ 745T marka stereo mikroskop görüntüsü

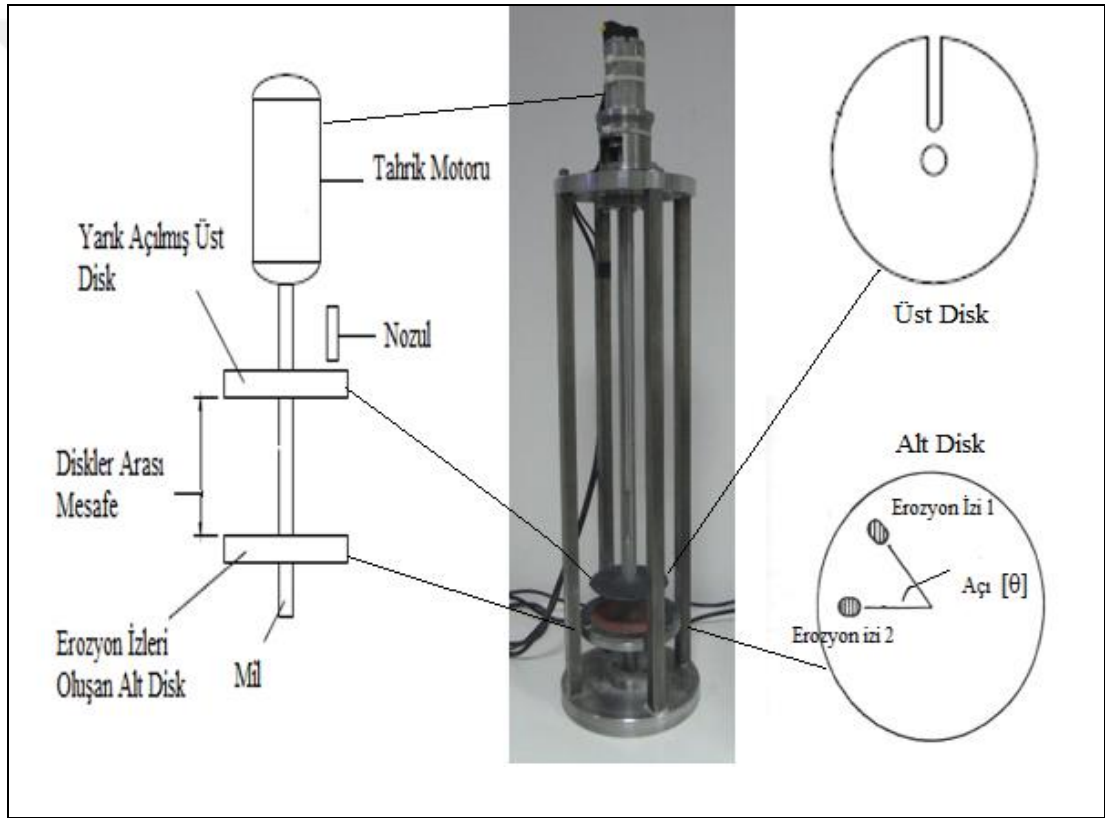
Nikon SMZ 745 mikroskop 7.5X zoom büyütmesi içeren, 115 mm uzun çalışma mesafesine sahip, hem endüstriyel hemde biomedikal uygulamalar için uygun olan bir stereo mikroskoptur. Nikon SMZ 745 mikroskop yansıtma prizması sayesinde yüksek kontrastlı parlak görüntüler üretmektedir ve anti-mold tasarımı ile nemin ve sıcaklığın yüksek olduğunu ortamlara uygun olarak çalışabilmektedir. SMZ-745T trinoküler modeli entegre 0.55x c-mount adaptörü ile direk Nikon mikroskop kameraların takılmasına imkan sağlamaktadır. Tablo 5.3’de Nikon SMZ 745T marka stereo mikroskopun özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.3. Nikon SMZ 745T stereo mikroskop özellikleri

Optik Sistem:	Greenough optik sistemi
Toplam Büyütme:	3.35-300x (kullanılan oküler ve ilave objektif kullanımına göre değişmektedir.)
BüyütmeDikey Tüp:	Entegre C-mount 0.55x büyütmeli lens (F.N. 11), 2/3 " veya daha küçük CCD sensör boyutlarına uygun
Gözlem Tüpü:	Fix tip
Eğim:	45°
Gözler arası mesafe ayarı:	52-75 mm
Okülerler (Diyoptri Ayarı):	C-W 10xB (F.N. 22), C-W 15x (F.N. 16), C-W 20x (F.N. 12,5), C-W 30x (F.N. 7)
Zoom Aralığı:	0.67-5x
Zoom oranı:	7.5:1
İlave objektifler:	G-AL 0.5x (W.D. 211 mm), G-AL 0.7x (W.D. 150 mm), G-AL 1.5x (W.D. 61 mm), G-AL 2x (W.D. 43,5 mm)
Çalışma Mesafesi:	115 mm
Ağırlık:	1.55 kg (SMZ745), 1,8 kg (SMZ745T)

### 5.3.2. Çift disk yöntemi ile aşındırıcı partiküllerin çarpma hızlarının ölçülmesi

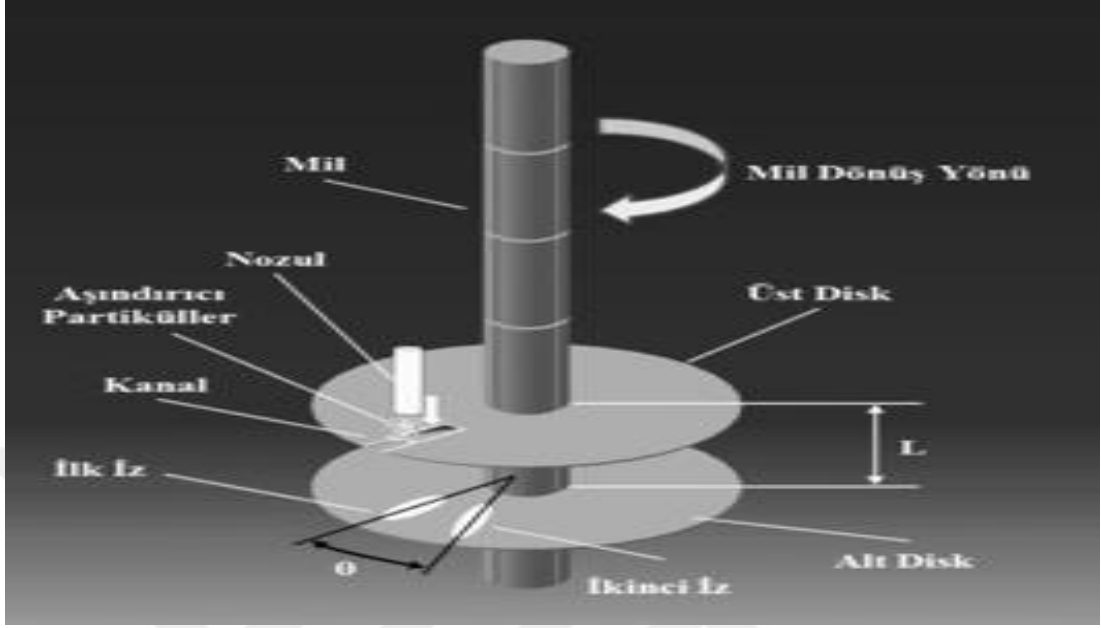
Deneysel çalışmalarda çift disk metodu ile alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları 3 bar basınçta hızlandırılmış ve 3 bar basınçta erozif aşınma deneyleriyle aynı şartlar altında (nem, sıcaklık, vb.) partikül hızları ölçülmüştür. Çift disk metodu ile gerçekleştirilen aşındırıcı partikül hız ölçümleri için kullanılan deneysel cihaz aşağıda açıklanan matematiksel hesaplamalara göre tasarlanarak imal edilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.14’de çift disk yöntemi deney düzeneğinin çizim ve gerçek resmi verilmiştir.



Şekil 5.14. Döner disk partikül hızı ölçme sisteminin çizim ve gerçek resimleri

Şekil 5.14’de verilen döner disk partikül hız ölçme sisteminin temin edilmesinden sonra hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hız ölçümleri için gerekli formülasyonlar Microsoft Office Excel’de hazırlanmıştır. Aşınma izleri arası mesafe, diskler arası mesafe, disk merkezi ile iz arası mesafe ve disk devir sayısının hazırlanan excel formülasyonuna girilmesi ile her bir partikülün 3 bar basınç değerinde hız ölçümleri

gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.15’de partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler cihazın CAD resmi üzerinde verilmiştir.



Şekil 5.15. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler

Denklem (5.1) ve (5.2)’de şekilde verilen döner disk ile partikül çarpma hızlarının hesaplanması için kullanılan formülasyon verilmiştir. İlk aşamada disklerin dönüş hızı ( $n$ ) ve aşınma izleri arasındaki açı ( $\theta$ ) ölçülerek Denklem (5.1)’de yerlerine yerleştirilerek partiküllerin birinci diskten ikinci diske ulaşmaları esnasında geçen süre ( $t$ ) hesaplanır.

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (5.1)$$

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

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

$n$  = devir hızı (rpm)

Daha sonra hesaplanan süre ( $t$ ) Denklem (5.2)’de yerine koyularak partiküllerin çarpma hızı ( $v$ ) bulunur.

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

$V =$  partikül çarpma hızı ( $m.s^{-1}$ )

$L =$  diskler arası mesafe (m)

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

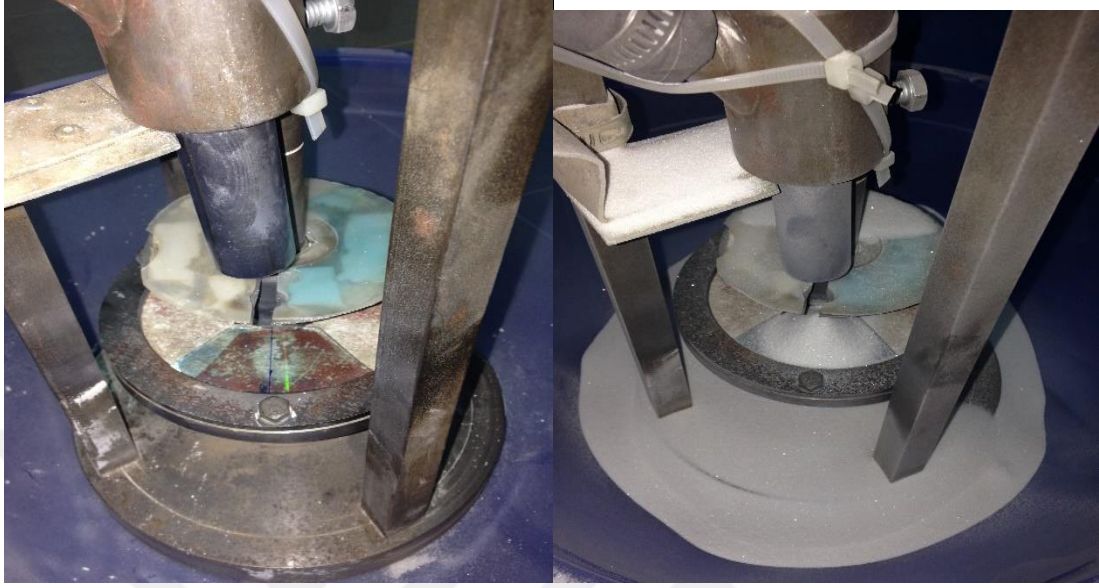
Şekil 5.16'de görüldüğü gibi disklerin dönüş hızı ( $n$ ) ölçümleri lazerli devir ölçer kullanılarak mil üzerine reflektör yapıştirılarak yapılmıştır.



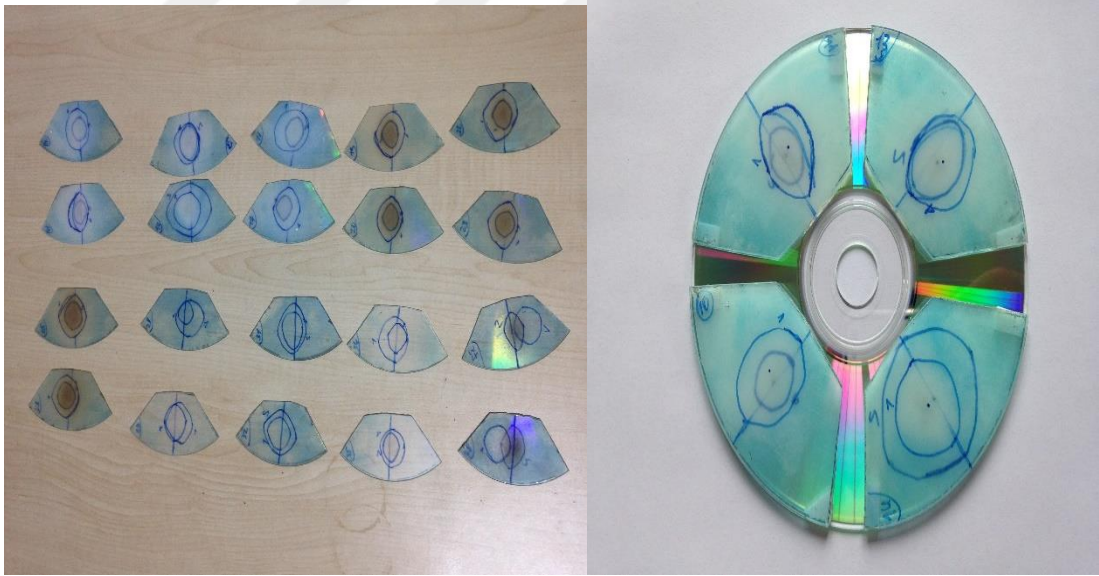
Şekil 5.16. Disklerin dönüş hızı ( $n$ ) ölçümü

Aşınma izleri arasındaki açığı ( $\theta$ ) hesaplayabilmek için öncelikle boş cdler döner disk partikül hız ölçme düzenegine yerleştirilebilecek şekilde kesilmiştir. Hazırlanan bu cdler kullanılarak 3 bar basınçla hızlandırılan her bir aşındırıcı partikül için 2'şer tekrar olacak şekilde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda birinci iz için cihaz 2000 rpm devir hızında döndürülmüş ve nozuldan 10 sn süreyle hız ölçümü yapılan aşındırıcı partikül püskürtülmüştür. İkinci iz için ise Şekil 5.17'de görüldüğü gibi üst diskte bulunan yarığı nozul ucuna dik olacak şekilde izalanmış ve nozuldan 10 sn süreyle hız ölçümü yapılarak aşındırıcı püskürtülmüştür. Yapılan bu çalışmalar

sonucunda Şekil 5.18’de görüldüğü gibi cdler üzerindeki izler elde edilmiş ve eş merkezli olmaları için boş bir cd üzerine yapıştırılmışlardır.



Şekil 5.17. İkinci iz oluşumu için yapılan çalışmalar



Şekil 5.18. Çift disk yöntemi ile yapılan çalışmalar

Çift disk yöntemi kullanılarak bulunan birinci ve ikinci iz merkezleri arasındaki açı farkı MB-Ruler programı kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. Şekil 5.19’da MB-Ruler programı kullanılarak yapılan açı ölçümü örneği görülmektedir.



Şekil 5.19. MB-Ruler programı kullanılarak yapılan açı ölçümü

Tablo 5.4’de verilen tabloda her bir numune için MB-Ruler programı kullanılarak hassas bir şekilde ölçülen açı farkları, yapılan 2 deneyin açı ortalamaları, Denklem (5.1)’de ilgili yerlere yerleştirilerek hesaplanan süreler (t) ve Denklem (5.2)’de ilgili yerlere yerleştirilerek hesaplanan hızlar (v) görülmektedir.

Tablo 5.4. Aşındırıcı partiküllerin hız ölçümü sonuçları

Numune No	Aşındırıcı Tipi	Açı	Açı Ortalama	Süre (T)	Hız (V)
10	Alumina 80	4,42	3,69	0,0003075	65,0406504
11	Alumina 80	2,97			
13	Alumina 60	1,93	2,54	0,00021167	94,486701
14	Alumina 60	3,16			
16	Alumina 120	3,93	3,95	0,00032917	60,7588784
17	Alumina 120	3,98			
19	Garnet 80	2,01	2,71	0,00022583	88,5621928
20	Garnet 80	3,42			
22	Garnet 60	3,33	3,36	0,00028	71,4285714
23	Garnet 60	3,4			
25	Garnet 180	1,82	2,42	0,00020167	99,1719145
26	Garnet 180	3,03			
28	Cam Küre 200-300	6,63	7,68	0,00064	31,25
29	Cam Küre 200-300	8,73			
31	Cam Küre 300-400	1,79	2,51	0,00020917	95,6160061
32	Cam Küre 300-400	3,23			
34	Cam Küre 100-200	5,21	4,94	0,00041167	48,5826026
35	Cam Küre 100-200	4,68			
37	Çelik Bilya	16,39	16,78	0,00139833	14,3027755
38	Çelik Bilya	17,17			

### 5.3.3. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin hesaplanması

Tez çalışmasında aşındırıcı partikül olarak, 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları 3 barlık basınç ile hızlandırılmış ve bu basınçta aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri ölçülmüştür. Elde edilen debi değerleri daha sonra alüminyum alaşımının farklı partiküllerle aşındırılması sonrasında erozyon oranlarının hesaplanması için kullanılmıştır.



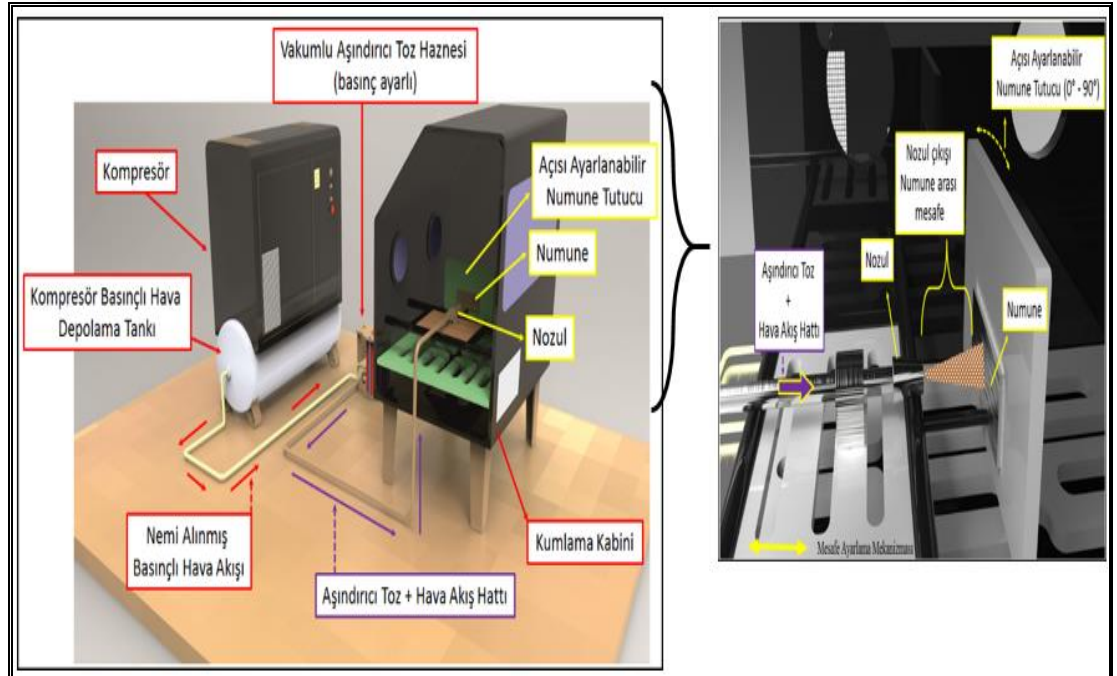
Kütlesel debilerin ölçülmesi için aşındırıcı partiküller 3 bar püskürtme basıncında ortalama 10 saniye süresince 3'er tekrar olacak şekilde püskürtülmüştür. Bu süre içerisinde harcanan aşındırıcı partikül kütlesinin püskürtme süresine bölünmesi ile her bir partikül boyutu için kütleli debi hesaplanmıştır. Tablo 5.5'de her bir aşındırıcı partikülün debi ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.5. Aşındırıcı partiküllerin debi ölçümü sonuçları

Aşındırıcı Tipi	Aşındırıcı Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Kullanılan Aşındırıcı Partikül Ağırlığı (gr)	Süre (sn)	Aşındırıcı Partikül Debisi (gr/s)	Ortalama Aşındırıcı Partikül Debisi (gr/s)	Ortalama Kullanılan Aşındırıcı Partikül Ağırlığı (gr)
Alümina 80	150-212	176,2225	10,50	16,78		
Alümina 80	150-212	181,0880	10,33	17,53	17,08	178,21
Alümina 80	150-212	177,3276	10,47	16,94		
Alümina 60	212-300	239,1031	10,10	23,67		
Alümina 60	212-300	242,4621	10,13	23,94	23,66	240,23
Alümina 60	212-300	239,1396	10,23	23,38		
Alümina 120	90-125	194,0008	10,17	19,08		
Alümina 120	90-125	205,8047	10,06	20,46	20,38	207,64
Alümina 120	90-125	223,1040	10,33	21,60		
Garnet 80	150-212	265,8513	10,02	26,53		
Garnet 80	150-212	263,4871	10,25	25,71	25,36	258,46
Garnet 80	150-212	246,0471	10,32	23,84		
Garnet 60	180-600	239,6262	10,33	23,20		
Garnet 60	180-600	240,8478	10,09	23,87	23,46	240,41
Garnet 60	180-600	240,7695	10,33	23,31		
Garnet 180	53-90	263,2032	10,25	25,68		
Garnet 180	53-90	219,3710	10,00	21,94	23,61	238,72
Garnet 180	53-90	233,5827	10,06	23,22		
Cam Küre 200-300	200-300	294,2459	10,36	28,40		
Cam Küre 200-301	200-300	276,9109	10,33	26,81	27,42	281,65
Cam Küre 200-302	200-300	273,7918	10,12	27,05		
Cam Küre 300-400	300-400	316,4046	10,33	30,63		
Cam Küre 300-401	300-400	291,9526	10,35	28,21	29,29	300,80
Cam Küre 300-402	300-400	294,0505	10,13	29,03		
Cam Küre 100-200	100-200	176,6672	10,35	17,07		
Cam Küre 100-201	100-200	212,4908	10,42	20,39	18,55	192,35
Cam Küre 100-202	100-200	187,8782	10,33	18,19		
Çelik Bilya	212-600	366,2010	10,15	36,08		
Çelik Bilya	212-600	609,2166	10,46	58,24	50,13	514,04
Çelik Bilya	212-600	566,7151	10,11	56,05		

### 5.3.4. Eroziyon aşınma deneyleri

AA6082 T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu deneyleri özel olarak tasarlanan eroziyon aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Eroziyon aşınma test düzeneği basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, manometre, regülatör, ayak mandalı, nozul, kuşlama kabini, numune fikstürü ve borular gibi elemanlarından oluşmaktadır. Eroziyon aşınma test düzeneği kuşlama kabini içerisine sabitlenmiştir ve kabin dışarısından bir pedal vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Püskürtme basıncı kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir. Kuşlama kabini içerisinde bulunan eroziyon aşınma test düzeneğine numunenin sabitlenmesi ve numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülmesini sağlayan özel bir numune fikstürü yerleştirilmiştir. Bu düzenek yardımıyla kabin içerisindeki eroziyon aşınma test düzeneği üzerine sabitlenmiş kuşlama tabancası, numunenin 15'er derecelik (15, 30, 45, 60, 75, 90) 6 farklı açıya döndürülmesine olanak veren fikstürün hareketi ile numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülebilmektedir. Kuşlama işlemleri sırasında numuneler bu fikstür kullanılarak kuşlama tabancasından 20 mm uzaklıkta tutulmuştur. Şekil 5.20'de katı partikül erozyonu test düzeneği verilmiştir.



Şekil 5.20. Katı partikül erozyonu test düzeneği

Şekil 5.20'de verilen test düzeneği kullanılarak AA6082 T6 alüminyum alaşımı 90° partikül çarpma açısında, farklı hızlarda, 3 bar püskürtme basıncında, 3'er farklı

partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak aşındırılmıştır. Tablo 5.6’da deneysel çalışmalarda kullanılan tüm parametreler özetlenmiştir.

Tablo 5.6.Erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı türü ve boyutları:	Alümina 60 mesh (212-300 $\mu\text{m}$ ), Alümina 80 mesh (150-212 $\mu\text{m}$ ), Alümina 120 mesh (90-125 $\mu\text{m}$ ), Garnet 60 mesh (180-600 $\mu\text{m}$ ), Garnet 80 mesh (150-212 $\mu\text{m}$ ), Garnet 180 mesh (53-90 $\mu\text{m}$ ), Cam Küre 100-200 mesh (100-200 $\mu\text{m}$ ), Cam Küre 200-300 mesh (200-300 $\mu\text{m}$ ), Cam Küre 300-400 mesh (300-400 $\mu\text{m}$ ), Çelik Bilya (212-600 $\mu\text{m}$ )
Partikül çarpma açısı:	90°
Püskürtme basıncı:	3 bar
Partikül çarpma hızları:	Alümina 60 mesh (94,48 $\text{m.s}^{-1}$ ), Alümina 80 mesh (65,04 $\text{m.s}^{-1}$ ), Alümina 120 mesh (60,75 $\text{m.s}^{-1}$ ), Garnet 60 mesh (71,42 $\text{m.s}^{-1}$ ), Garnet 80 mesh (88,56 $\text{m.s}^{-1}$ ), Garnet 180 mesh (99,17 $\text{m.s}^{-1}$ ), Cam Küre 100-200 mesh (48,58 $\text{m.s}^{-1}$ ), Cam Küre 200-300 mesh (31,25 $\text{m.s}^{-1}$ ), Cam Küre 300-400 mesh (95,61 $\text{m.s}^{-1}$ ), Çelik Bilya (14,30 $\text{m.s}^{-1}$ )
Test sıcaklığı:	25 °C
Nozul çapı:	5 mm
Nozul uzunluğu:	50 mm
Nozul/numune arası mesafe:	20 mm

### 5.3.5. SEM analizleri

Farklı parametreler altında aşındırılan numunelerin yüzeyleri Tescan Vega2 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 5.21’de deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazının fotoğrafı, Tablo 5.7’de ise bu cihazın önemli özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.21. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı

Tablo 5.7. SEM cihazının özellikleri

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

Tez çalışması kapsamında farklı parametrelerde, farklı boyut ve türlerdeki aşındırıcı partiküllerle aşındırılan AA6082 T6 alüminyum alaşım numunelerinin yüzeyleri bu

bölüm içerisinde verilen SEM cihazı ile derinlemesine incelenmiştir. SEM analizleri esnasında AA6082 T6 alüminyum alaşımı numunelerinden farklı modlarda ve farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır ve analizler gerçekleştirilmiştir. Katı partikül erozyonuna maruz kalmış malzemelerin erozif aşınma davranışlarının araştırılmasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Literatürde konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde ilgili çalışmaların büyük bir çoğunluğunda erozif aşınmaya maruz kalmış malzemelerin erozyon oranları ile birlikte aşınmış yüzeylerin morfolojileri SEM ile birlikte incelenmiş ve aşınan malzemelerin yüzey morfolojisinin incelenen parametrelere (hedef malzeme özellikleri, operasyon parametreleri, aşındırıcı partikül özellikleri, sıcaklık, nem vb çevresel özellikler vb.) bağlı olarak değişim gözlenmiştir.

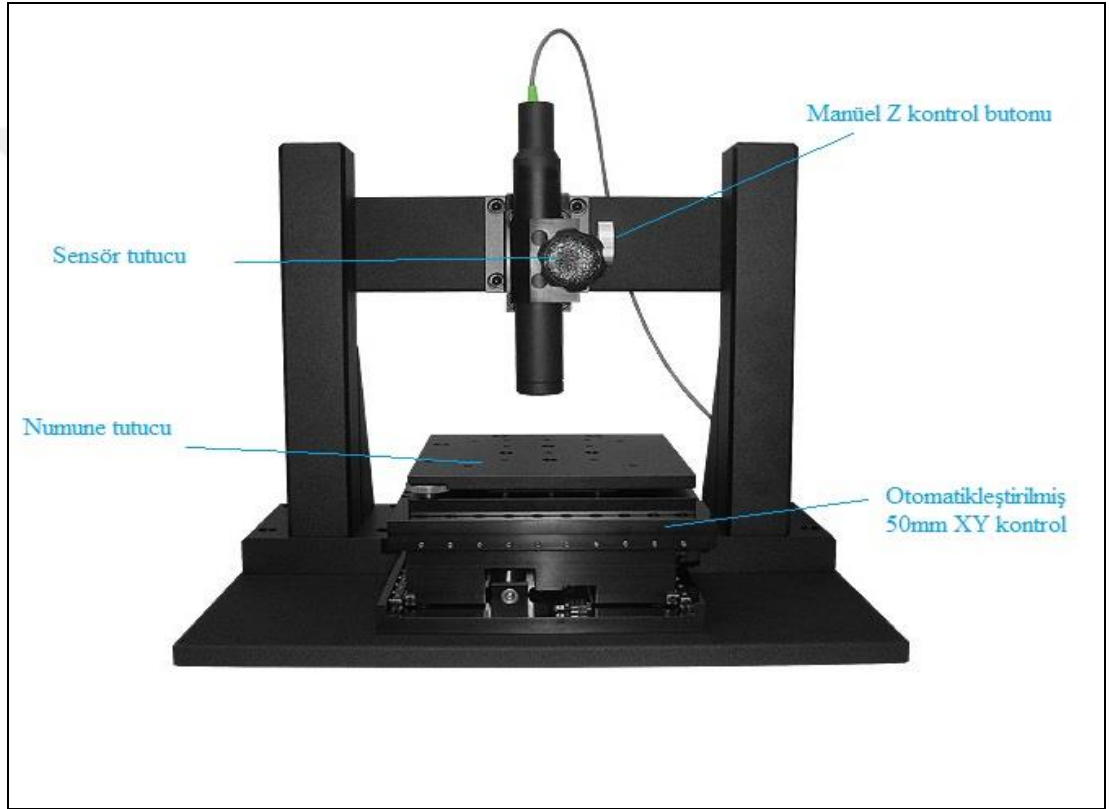
Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneylerde aşındırılan malzemede görülen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle tez çalışmasında farklı boyut ve türdeki aşındırıcı partiküllerin AA6082 T6 alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM çalışması gerçekleştirilmiştir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin farklı detektörler ile BSE modunda görüntüleri alınmış ve aşınmış yüzeylerden farklı yaklaşımlarda SEM fotoğrafları alınarak incelenmiştir.

Tez çalışması içerisinde yapılan tüm bu incelemelerin sonuçları bir arada değerlendirilerek AA6082 T6 alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışı yorumlanmıştır. Bölüm içerisinde özellikle farklı boyutta ve türdeki aşındırıcı partiküllerle aşındırılan yüzeylerin fotoğrafları büyük bir özgünlük taşımaktadır.

“SEM çalışmaları” başlıklı, “Deneysel sonuçlar ve irdeleme” bölümü altında bu bölümde anlatılan çalışmaların ve yöntemlerin sonuçları verilmiştir. Tez çalışması kapsamında AA6082 T6 alüminyum alaşımının yüzey morfolojisinin erozif aşınma parametrelerine, aşındırıcı partikül çeşidine ve boyutuna bağlı olarak değişiminin özgün ve detaylı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla bu bölüm içerisinde açıklanan çalışmalara ve yöntemlere büyük önem verilmiştir.

### 5.3.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Farklı boyutta ve türde aşındırıcı partiküllerle ile aşındırılan numunelerin hasarlı yüzeylerinden aşınma hasarının ölçülebilmesi için hasar merkezinden başlayarak Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Şekil 5.22’de yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazının fotoğrafı, Tablo 5.8’de ise bu cihazın önemli özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.22. Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazı

Tablo 5.8. Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazının özellikleri

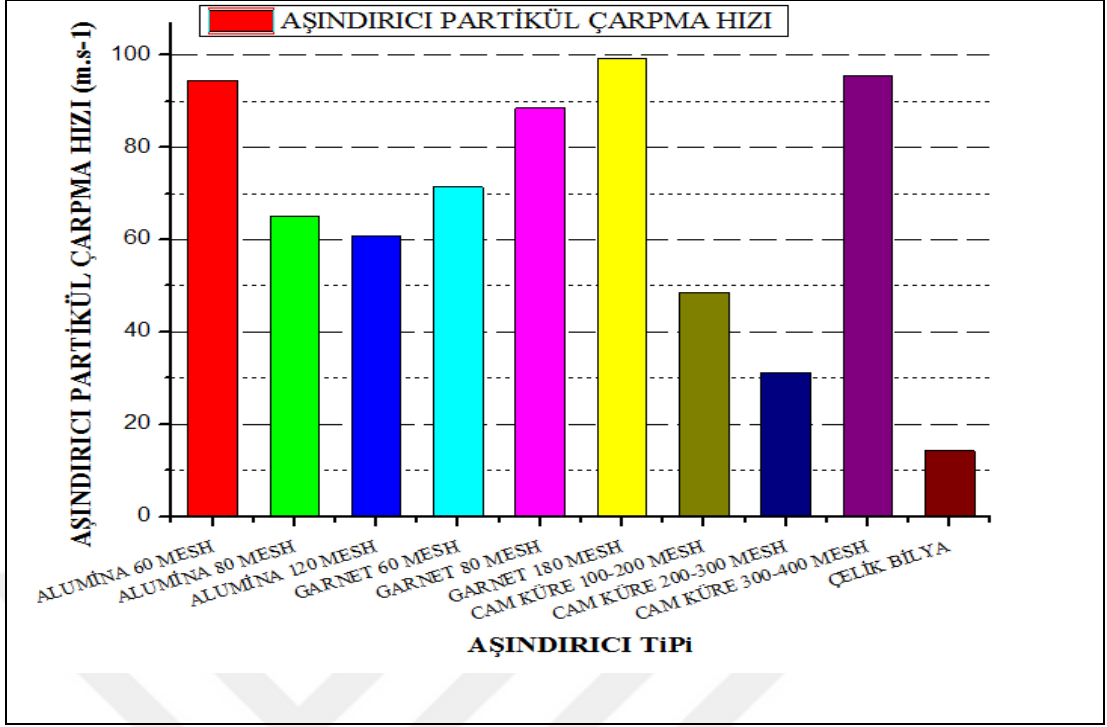
XY Ekseni:	50 x 50mm
Z Ekseni:	30mm (Manüel)
Maksimum XY eksen hızı:	20mm/s
Maksimum numune ağırlığı:	8 Kg
Aydınlatma aralığı (dinamik):	Yeşil Işık 11 Hz – 2,4 MHz
Dikey çözünürlük:	0,1 nm (cihaza bağlı)
Yatay çözünürlük:	380 nm (objektife bağlı)
Yatay yer değiştirme çözünürlüğü:	0,1 piksel (geometriye bağlı)

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

### 6.1. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debileri ve Hızlarının Değişimi

Bu bölüm içerisinde deneysel çalışmalarda kullanılan farklı tür ve boyutlardaki aşındırıcı partiküllerin kütlesel debilerinin ve partikül çarpma hızlarının 3 bar püskürtme basıncında değişimleri verilmiştir. Tez çalışması kapsamında çift disk metodu ile 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcılarının hızları ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalarda çift disk metodu ile partiküllerin ortalama çarpma hızlarının yanında en düşük ve en yüksek çarpma hızları da ölçülerek farklı boyut ve türlerdeki partiküllerin ortalama hız dağılımları da çıkarılmıştır. Şekil 6.1'de alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcı partiküllerinin 3 bar basınçlarda ölçülen hızları verilmiştir.

Şekil 6.1'de görüldüğü gibi deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin hız dağılımının çok geniş bir aralıkta olduğu görülmektedir. Aşındırıcı partiküllerin ulaşabildikleri minimum ve maksimum hızların hesaplanan ortalama hızlarının artışına ve azalışına paralel olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Diğer yandan hedef malzemeye çarpan aşındırıcı partiküllerin içerisinde çok yüksek ve çok düşük hızlarda partiküller bulunduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi partiküllerin püskürtme sistemi içerisinde farklı oranlarda hızlandıkları ve sonrasında numune yüzeyine çarpmadan önce kendi aralarında çarpışıp etkileşime girerek hızlanmalarından veya yavaşlanmalarından kaynaklandığı söylenebilir.

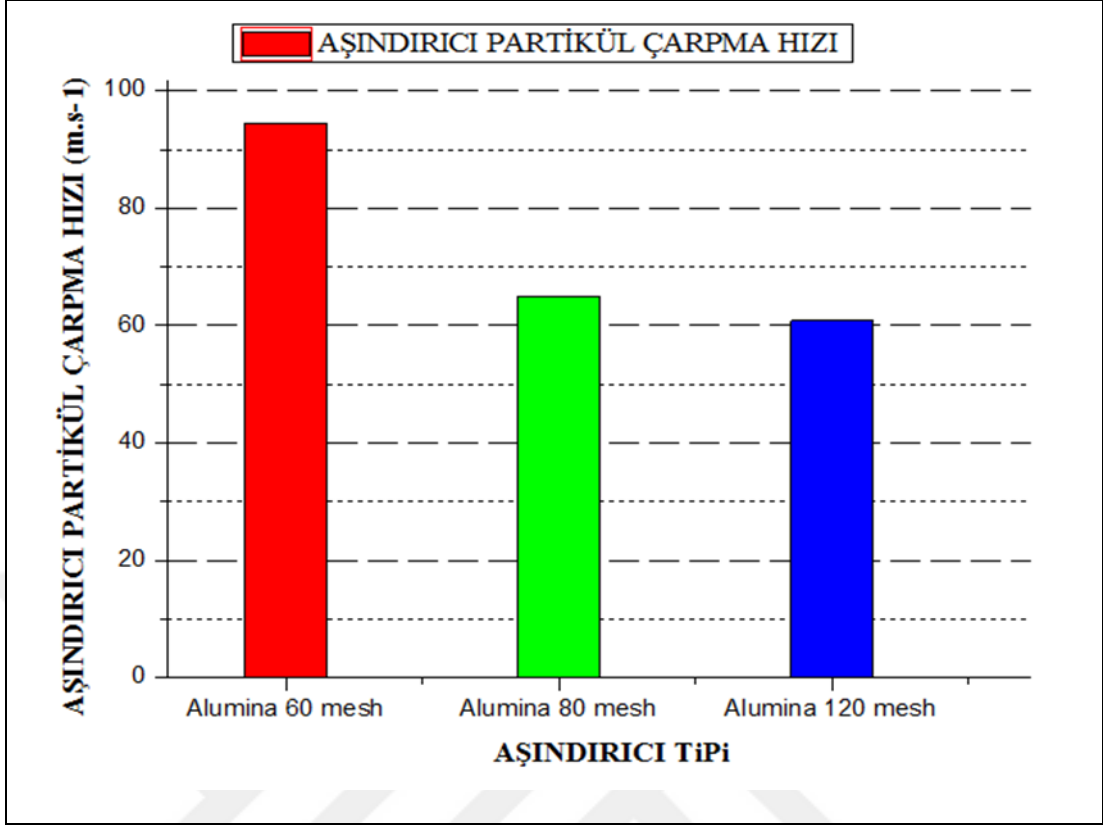


Şekil 6.1. Ortalama partikül çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi

Her bir aşındırıcı partikül kendi arasında boyutlarına göre çarpma hızlarının incelenmesi aşağıda belirtildiği gibidir.

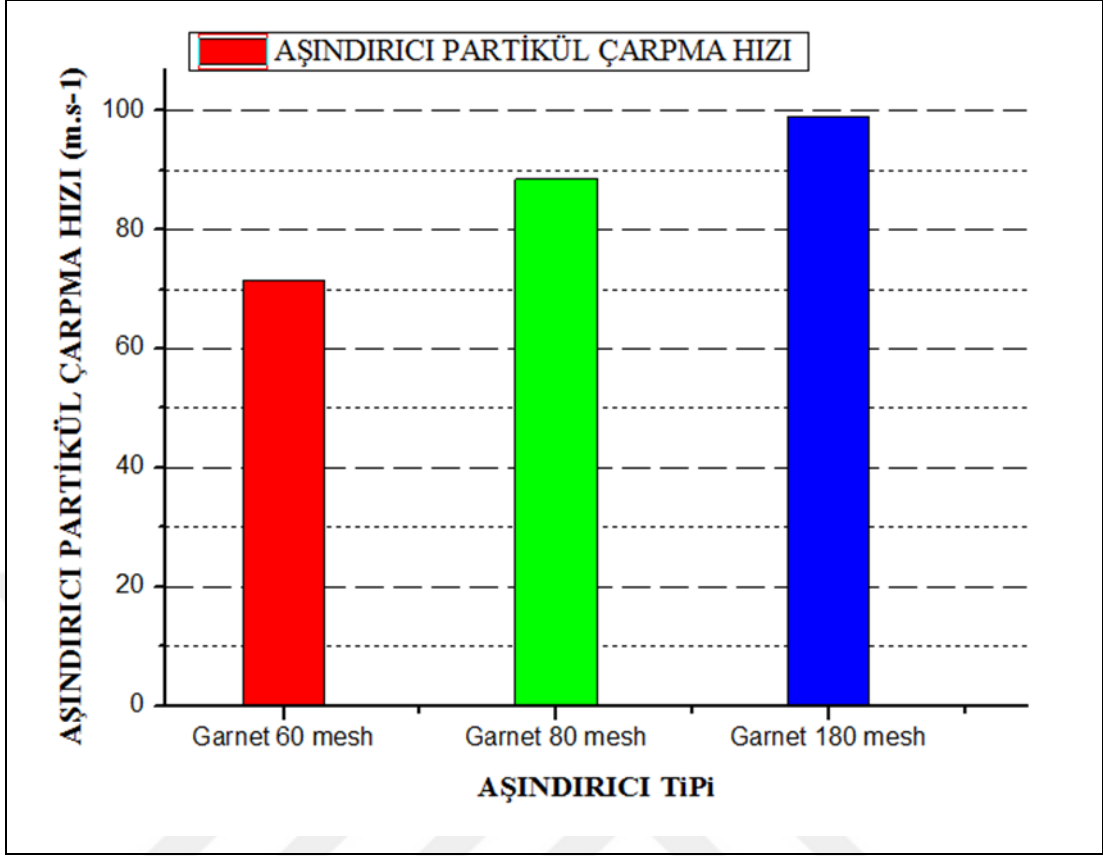
Şekil 6.2’de 60 mesh (212-300  $\mu\text{m}$ ), 80 mesh (150-212  $\mu\text{m}$ ) ve 120 mesh (90-125  $\mu\text{m}$ ) boyutlarındaki alümina aşındırıcı partikülünün çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 5.2’de de görüldüğü üzere alümina aşındırıcı partikülleri aerodinamik yapısı gereği keskin kenarlı ve köşeli bir yapıya sahiptir. Alumina aşındırıcı partikülünün bu yapısı hava akımı içerisinde kolayca etkilenip hareket etmesini sağlamaktadır. Şekil 6.2 incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile ortalama partikül çarpma hızlarında düşüş gösterdiği gözlenmektedir. Eşit şartlarda 60 mesh (212-300  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki alümina aşındırıcısının çarpma hızı maksimumken 120 mesh (90-125  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki alümina aşındırıcısının çarpma hızı minimum olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar alümina aşındırıcısının partikül boyutunun erozif aşınmada partiküllerin hedef malzemeye çarpma hızları üzerinde çok etkin bir rol oynadığı sonucuna varılmaktadır.





Şekil 6.2. Alümina 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh partiküllerinin çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi

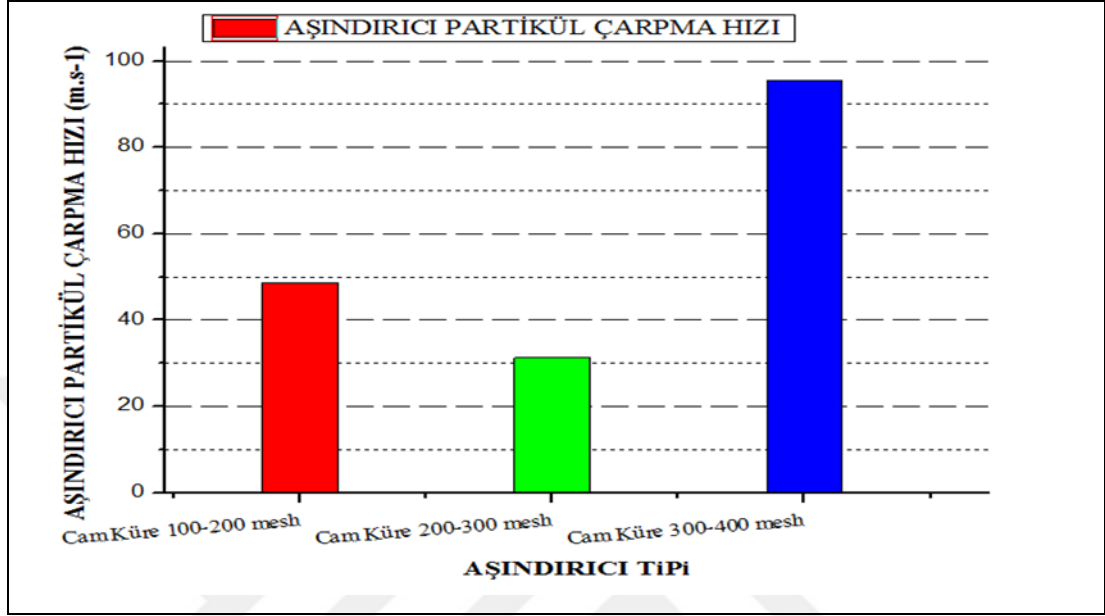
Şekil 6.3’de 60 mesh (180-600  $\mu\text{m}$ ), 80 mesh (150-212  $\mu\text{m}$ ) ve 180 mesh (53-90  $\mu\text{m}$ ) boyutlarındaki garnet aşındırıcı partikülünün çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 5.3’de de görüldüğü üzere garnet aşındırıcı partikülü alümina aşındırıcısına göre aerodinamik olarak daha az köşe ve keskin kenarlara sahiptir. Fakat garnet aşındırıcı partikülleri alümina aşındırıcılarına göre aynı boyutlarda daha ağırdır. Şekil 6.3 incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile ortalama partikül çarpma hızlarının artış gösterdiği gözlenmektedir. Eşit şartlarda 60 mesh (180-600  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki garnet aşındırıcısının çarpma hızı minimumken 180 mesh (53-90  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki garnet aşındırıcısının çarpma hızı maksimum olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar garnet aşındırıcısının partikül boyutunun erozif aşınmada partiküllerin hedef malzemeye çarpma hızları üzerinde çok etkin bir rol oynadığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 6.3. Garnet 60 mesh, 80 mesh ve 180 mesh partiküllerinin çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi

Şekil 6.4’de 100-200 mesh (100-200  $\mu\text{m}$ ), 200-300 mesh (200-300  $\mu\text{m}$ ) ve 300-400 mesh (300-400  $\mu\text{m}$ ) boyutlarındaki cam küre aşındırıcı partikülünün çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 5.4’de de görüldüğü üzere cam küre aşındırıcı partikülü alümina ve garnet aşındırıcılarına göre aerodinamik olarak daha pürüzsüz ve yuvarlak hatlara sahiptir. Bu durum cam küre aşındırıcı partiküllerinin basınçlı hava içerisinde daha az tutunup yavaş hareket etmesine sebep olmuştur. Şekil 6.4 incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile ortalama partikül çarpma hızlarının düzgün bir değişim göstermediği gözlenmektedir. Eşit şartlarda 200-300 mesh (200-300  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki cam küre aşındırıcısının çarpma hızı minimumken 300-400 mesh (300-400  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki cam küre aşındırıcısının çarpma hızı maksimum, 100-200 mesh (100-200  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki cam küre aşındırıcısının ise diğer boyutlara nazaran orta hızda olduğu ölçülmüştür. Tanecik boyutu en küçük olan cam küre aşındırıcı partikülünün tanecik ağırlığında çok küçük olduğundan dolayı hava akımının içerisinde kolayca hareket edebilmekte dolayısıyla çarpma hızı diğer boyuttakilere göre en yüksek olarak

ölçülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar cam küre aşındırıcısının partikül boyutunun erozif aşınmada partiküllerin hedef malzemeye çarpma hızları üzerinde ayarlanabilir bir etkiye sahip olmadıkları sonucuna varılmaktadır.

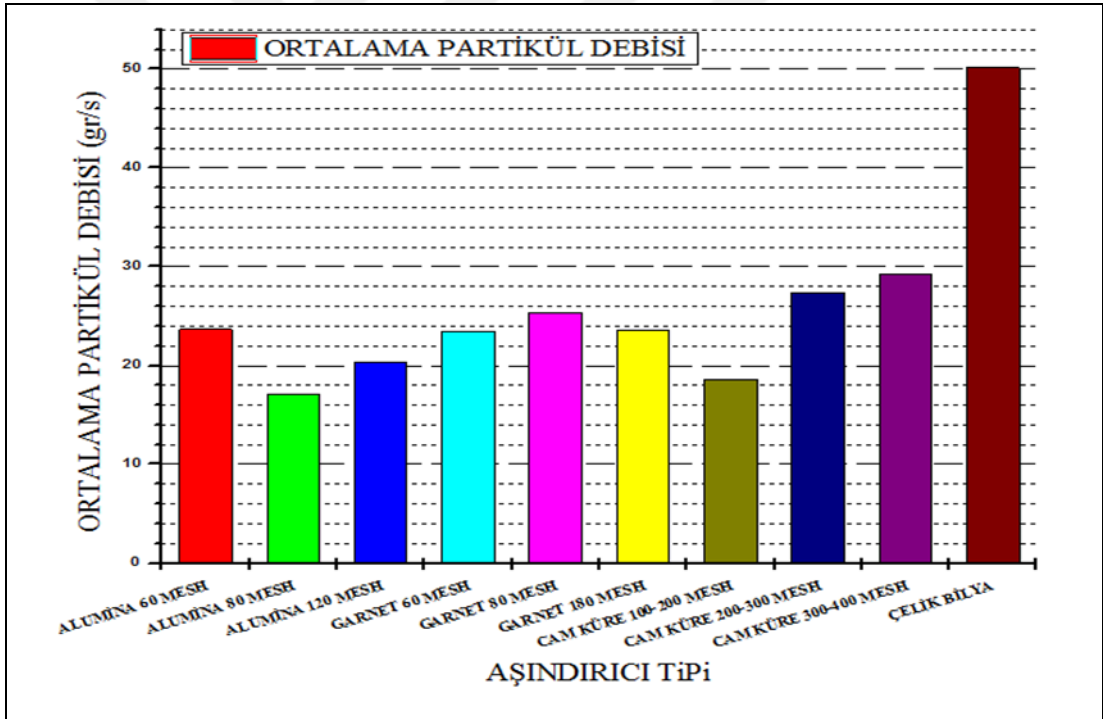


Şekil 6.4. Cam küre 100-200 mesh, 200-300 mesh ve 300-400 mesh partiküllerinin çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı değişimi

Şekil 6.1’de deneysel çalışmalarda kullanılan bütün aşındırıcı partiküllerin çarpma hızlarının partikül boyutuna bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Şekil 5.5’de de görüldüğü üzere çelik bilya (212-600  $\mu\text{m}$ ) aşındırıcı partikülleri cam küre gibi aerodinamik olarak daha pürüzsüz ve yuvarlak hatlara sahiptir. Fakat aynı boyutlardaki diğer aşındırıcılara göre daha büyük ağırlığa sahiptir. Bu durum çelik bilya aşındırıcı partiküllerinin hava akımı içerisinde kolayca etkilenip hareket etmelerini güçleştirmiştir. Şekil 6.1 incelendiğinde çelik bilya aşındırıcı partikülün diğer aşındırıcı partikül çarpma hızlarına göre bariz bir düşüş olduğu gözlenmektedir. Elde edilen bu sonuç çelik bilya aşındırıcısının partikül boyutunun ve ağırlığının erozif aşınmada partiküllerin hedef malzemeye çarpma hızları üzerinde ayarlanamayan çok etkin bir rol oynadığı sonucuna varılmaktadır.

Şekil 6.5’te aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin partikül boyutuna bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde partikül boyutunun etkisi alümina 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh aşındırıcı partikül için partikül boyutunun artışı ile kütleli debinin arttığı, garnet 60 mesh, 80 mesh ve 180 mesh aşındırıcı partikül için partikül

boyutunun artışı ile kütleli debinin azaldığı, cam küre 100-200 mesh, 200-300 mesh ve 300-400 mesh aşındırıcı partikül için partikül boyutunun artışı ile kütleli debinin azaldığı, çelik bilya aşındırıcı partikül için ise diğer aşındırıcı partiküllere nazaran kütleli debinin en yüksek olduğu görülmüştür. Ancak partiküllerin kütleli debileri arasındaki farklılıkların ortalama hızlarına kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Diğer yandan partikül boyutunun büyümesi ile birlikte cam küre ve garnet aşındırıcı partikülünün kütleli debilerinin azaldığı, alümina aşındırıcı partikülünün kütleli debisinin arttığı görülmekte ancak alümina aşındırıcı partiküllerinin ortalama partikül hızının artması, garnet aşındırıcı partiküllerinin ortalama partikül hızının azaldığı, cam küre aşındırıcı partiküllerinin ise değişkenlik gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu sonuçların malzemenin erozyon oranı üzerinde meydana getirdiği değişimler sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde tartışılacaktır.



Şekil 6.5. Aşındırıcı partiküllerin ortalama kütleli debilerinin partikül boyutuna bağlı olarak değişimi.

## 6.2. Eroziyon Aşınma Deneylerinin Sonuçları

Bu bölümde AA6082 T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışına aşındırıcı boyutu ve türünün etkileri incelenecektir. Tez çalışması kapsamında AA6082 T6 alüminyum alaşımı 90° partikül çarpma açısında, 3 bar partikül

püskürtme basıncında, 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya partikülleri kullanılarak aşındırılmıştır. Bu noktada alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışına partikül boyutunun etkilerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Diğer taraftan çift disk metodu ile her bir aşındırıcı partikülün malzeme yüzeyine çarpma hızı belirlenmiş ve partikül çarpma hızının AA6082 T6 alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına etkileri de ele alınmıştır. Bu kapsamda literatür çalışmaları incelendiğinde alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışlarının incelenmesi aşamasında aşındırıcı partikül boyut ve türünün etkisinin bu kadar detaylı şekilde araştırmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi erozif aşınma bir yandan havacılıkta endüstrisinde kullanılan mühendislik malzemelerine zarar veren bir proses iken, diğer yandan malzemelerin işlenmesi (su jeti, mikro yüzey işleme), yüzeylerinin temizlenmesi ve hazırlanması (endüstriyel kumlama) amacıyla kullanılan faydalı bir süreçtir. Bu kapsamda kullanılacağı yere göre seçilecek olan aşındırıcı partikülün tespiti için alüminyum alaşımlarının farklı boyut ve türlerdeki aşındırıcı partiküllere karşı göstermiş olduğu erozif aşınma davranışının ortaya konulması çok büyük önem arz etmektedir. Özellikle alüminyum alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı havacılık uygulamalarında erozif aşınma nedeniyle oluşabilecek hasarlarının minimuma indirgenmesi, diğer yandan malzemelerin işlenmesi ve yüzeylerin temizlenmesi gibi erozif aşınma prosesine dayanan uygulamalar ile işlenmesi aşamasında bu bölüm içerisinde verilecek sonuçların büyük bir önem taşıdığı düşünülmektedir.

Bu bölüm içerisinde AA6082 T6 alüminyum alaşımının erozyon oranının; partikül çarpma hızı aşındırıcı partikül debisi ve aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi ayrı ayrı çizilen grafikler yardımı ile incelenmiş ve alt başlıklar halinde verilmiştir.

Tablo 6.1'de erozif aşınma deneylerinde incelenen parametreler verilmiştir. Tez çalışması kapsamında tabloda verilen parametrelerde herbir aşındırıcı için 3'er tekrar olacak şekilde erozif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm deneyler için AA6082 T6 alüminyum alaşımının erozyon oranları hesaplanmıştır.

Tablo 6.1. Erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı Partikül Boyutu:	Alümina 60 mesh (212-300 $\mu\text{m}$ ), Alümina 80 mesh (150-212 $\mu\text{m}$ ), Alümina 120 mesh (90-125 $\mu\text{m}$ ), Garnet 60 mesh (180-600 $\mu\text{m}$ ), Garnet 80 mesh (150-212 $\mu\text{m}$ ), Garnet 180 mesh (53-90 $\mu\text{m}$ ), Cam Küre 100-200 mesh (100-200 $\mu\text{m}$ ), Cam Küre 200-300 mesh (200-300 $\mu\text{m}$ ), Cam Küre 300-400 mesh (300-400 $\mu\text{m}$ ), Çelik Bilya (212-600 $\mu\text{m}$ )
Partikül Çarpma Açısı:	90°
Püskürtme Basıncı:	3 bar

Erozyon oranı; katı partikül erozyonu sonucunda aşındırılan hedef numunedeki kütle kaybının, bu kaybı meydana getiren toplam aşındırıcı partikül kütlelerine oranı olarak tanımlanmaktadır. Önceki bölümde aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin; kullanılan aşındırıcı partikül boyutuna ve türüne bağlı olarak değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu durumda farklı boyutlarda ve türlerdeki partiküller ile aşındırılan numunelere aynı aşınma süresinde çarpan partikül miktarının (kütlesinin) değişim göstereceği sonucuna varılmıştır. Tablo 6.1’de verilen parametreler ile aşındırılan numunelerin erozyon davranışlarının karşılaştırılması istendiğinde doğrudan malzemede meydana gelen kütle kaybının ( $\Delta m$ ) kullanılması doğru bir yöntem değildir. Aşındırılan malzemelerin erozyon miktarlarının erozyona neden olan aşındırıcı partikül kütlelerinden bağımsız olarak hesaplanması gerekmektedir. Sonuç olarak aşındırılan hedef malzemelerin erozyon davranışı incelenirken birim aşındırıcı partikülün gerçekleştirdiği erozyon miktarı hesaplanmalı ve elde edilen sonuçla parametreler ne olursa olsun hedef malzemelerin erozyon davranışları karşılaştırılmalıdır. Bu nedenlerden dolayı tez çalışmasında tüm deneylerin sonuçları aşağıdaki formül kullanılarak her bir numune için erozyon oranı hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalarda erozyon oranı hesabı Denklem (6.1)’de verilen formül ile hesaplanmıştır.

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

E = Erozyon oranı

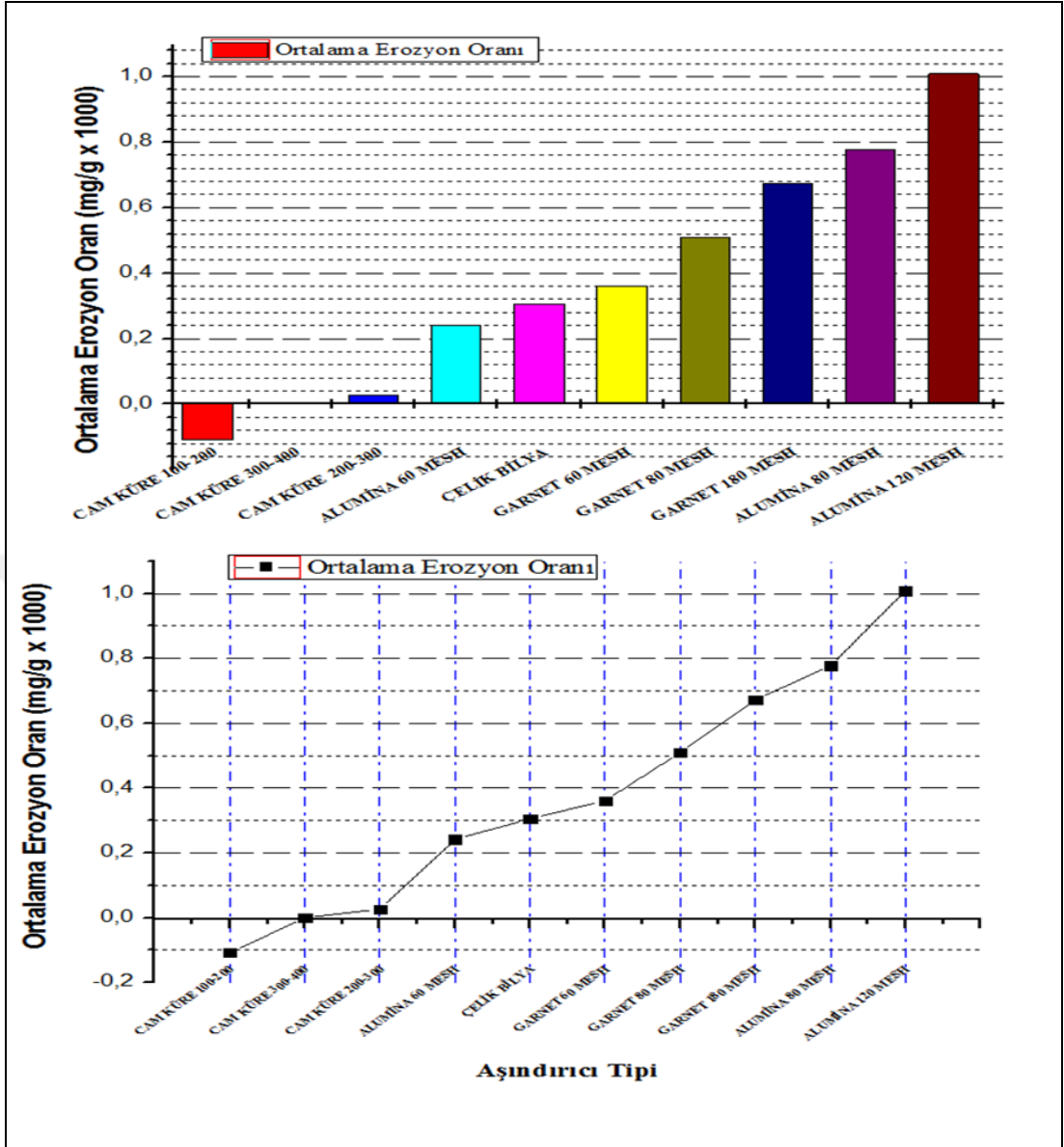
$\Delta m_s$  = Hedef numunenin kütle kaybı

$m_e$  = Aşındırıcı partikül kütlesi

### 6.2.1. Erozyon oranının partikül tür ve boyutuna göre değişimi

Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partikül boyutu malzemelerin erozif aşınma davranışlarını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Buna karşın literatür taraması yapıldığında aşındırıcı partikül boyutunun malzemenin erozif aşınma davranışına olan etkisi ile ilgili çok detaylı çalışmalar bulunmamaktadır. Konuyla alakalı bazı araştırmacılar kullanılan aşındırıcı partikül boyutunun hedef malzemede meydana gelen erozif aşınma üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını dile getirmiştir. Fakat buna karşın araştırmacıların bir çoğu kullanılan aşındırıcı partikül boyutunun hedef malzemelerin erozif aşınma davranışları üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ve genel olarak aşındırıcı partikül boyutunun artışına paralel olarak erozyon oranında artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Tez çalışması kapsamında AA6082 T6 alüminyum alaşımı 90° partikül çarpma açısında, 3 bar partikül püskürtme basıncında, 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya partikülleri kullanılarak aşındırılmıştır. Bu aşındırma işlemi öncelikli olarak aşındırıcı partikül ağırlığı ortalama 40gr olacak şekilde sabit tutularak daha sonra erozyon süresi ortalama 10 sn olacak şekilde sabit tutularak yapılmıştır.

Şekil 6.6'da AA6082 T6 alüminyum alaşımıyla 90° çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncı altında, aşındırıcı partikül ağırlığı ortalama 40 gr olacak şekilde sabit tutulan deneylerde erozyon oranına aşındırıcı partikül boyutunun etkisi verilmiştir.



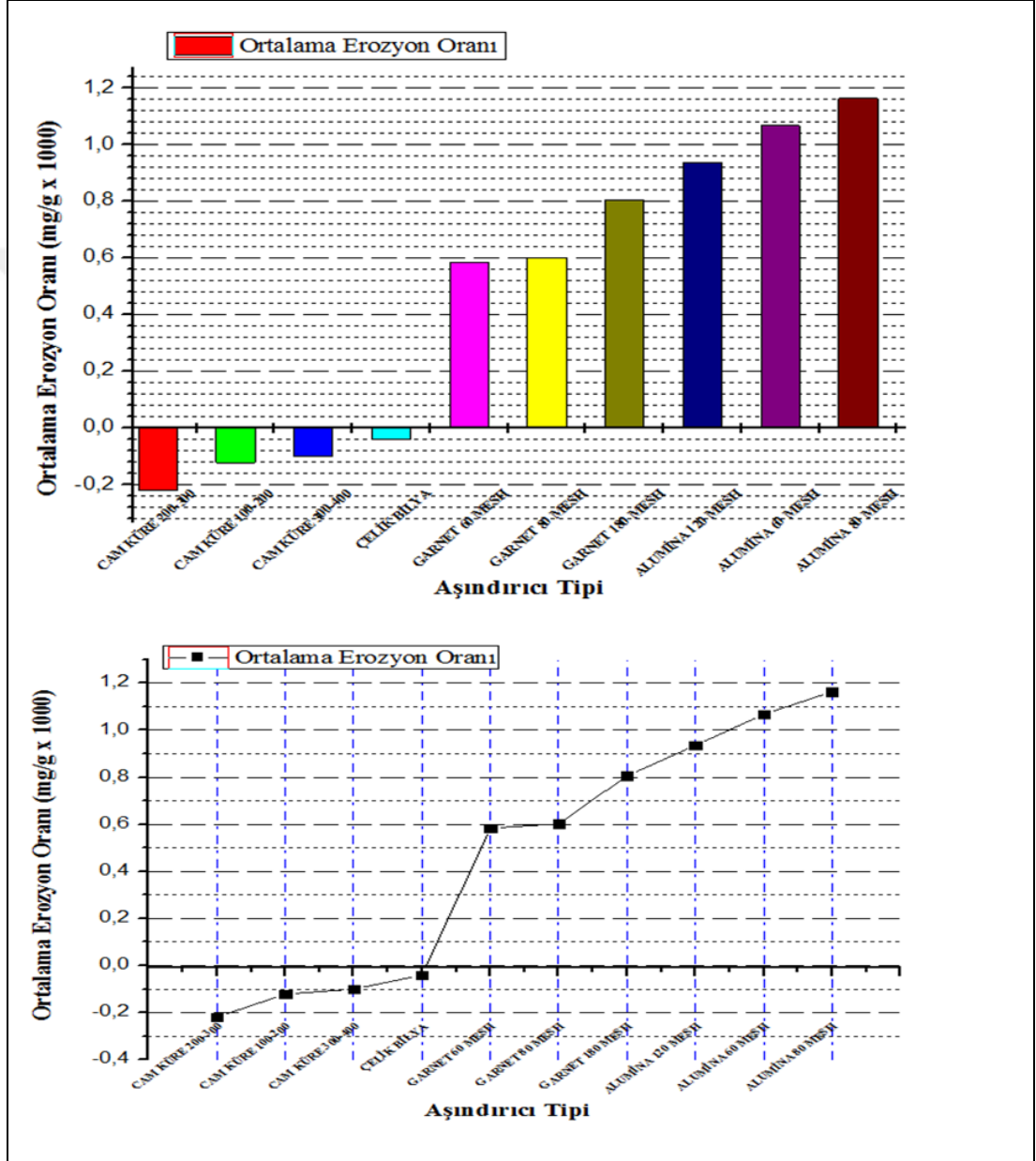
Şekil 6.6. Aşındırıcı partikül ağırlığı sabit tutulduğunda erozyon oranının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.6'da 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak aşındırıcı partikül ağırlığı ortalama 40 gr olacak şekilde gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. Şekil 6.6 incelendiğinde 3 bar püskürtme basıncında 90° çarpma açısı değerleri için gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda en yüksek erozyon oranının alümina 120 mesh boyutundaki aşındırıcıda, en düşük erozyon oranının ise cam küre 200-300 mesh boyutundaki aşındırıcıda görülmüştür. Cam küre 300-400 de erozif aşınma meydana gelmemiş, cam küre 100-200 de de erozif



aşınma meydana gelmemiş aksine kırılan cam kürelerin malzeme üzerine saplanarak ağırlığını arttırdığı gözlenmiştir.

Şekil 6.7’de AA6082 T6 alüminyum alaşımıyla 90° çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncı altında, erozyon süresi ortalama 10 sn olacak şekilde sabit tutulan deneylerde erozyon oranına aşındırıcı partikül boyutunun etkisi verilmiştir.



Şekil 6.7. Erozyon süresi sabit tutulduğunda erozyon oranının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.7’de 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3’er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180

mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak erozyon süresi ortalama 10 sn olacak şekilde gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. Şekil 6.7 incelendiğinde 3 bar püskürtme basıncında 90° çarpma açısı değerleri için gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda en yüksek erozyon oranının alümina 80 mesh boyutundaki aşındırıcıda, en düşük erozyon oranının ise garnet 60 mesh boyutundaki aşındırıcıda görülmüştür. Çelik bilya, cam küre 100-200 mesh, cam küre 200-300 mesh ve cam küre 300-400 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküllerde erozif aşınma meydana gelmemiş aksine kırılan cam kürelerin ve küçük boyutlu çelik bilyaların malzeme üzerine saplanarak ağırlığını arttırdığı gözlenmiştir.

Bölüm içerisinde iki farklı deneysel çalışma sonucu verilen grafikler incelendiğinde AA6082 T6 alüminyum alaşımının erozyon oranı değerinin kullanılan aşındırıcıların boyutlarına bağlı olarak önemli bir değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Alümina ve garnet aşındırıcı partikülleri için küçük partiküllerin büyük partiküllere kıyasla alüminyum alaşımında daha fazla kütle kaybına yol açtıkları belirlenmiştir. Bu durumun garnet aşındırıcı partikülü için küçük partiküllerin büyük partiküllerle karşılaştırıldığında hedef malzemeye daha yüksek hızlarda çarpmalarından kaynaklandığı söylenebilir. Daha yüksek hızlara sahip partiküller daha yüksek bir kinetik enerji ve momentuma da sahiptir. Bu durumda tek bir aşındırıcı partikülün sahip olduğu toplam enerji küçük partiküllerde büyük partiküllere kıyasla daha yüksek olmaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak küçük partiküller alüminyum alaşımının daha yüksek miktarda aşındırabilmektedir. Alümina aşındırıcı partikülü için ise bu durumun sebebi diğer aşındırıcılara göre daha keskin kenarlara ve sert köşelere sahip olmasından ve küçük partiküllerin kütleli debilerinin büyüklüğünden kaynaklandığı söylenebilir. Kütleli debinin büyük olması birim alana eşit zamanda daha fazla miktarda aşındırıcı partikülün çarpması demektir. Dolayısıyla küçük partiküllerin birim alana çarpma tekrarları artmış ve daha fazla aşınmaya sebep olmuştur. “Aşındırıcı Partiküllerin Kütleli Debileri ve Hızlarının Değişimi” bölümü içerisinde partikül boyutunun kütleli debiye ve partikül hızlarına etkisi açıklanmıştır.

Cam küre aşındırıcı partikülleri hedef malzeme üzerinde erozif aşınma meydana getirmemiş aksine kırılan partikül parçacıkları hedef malzeme üzerine yapışarak

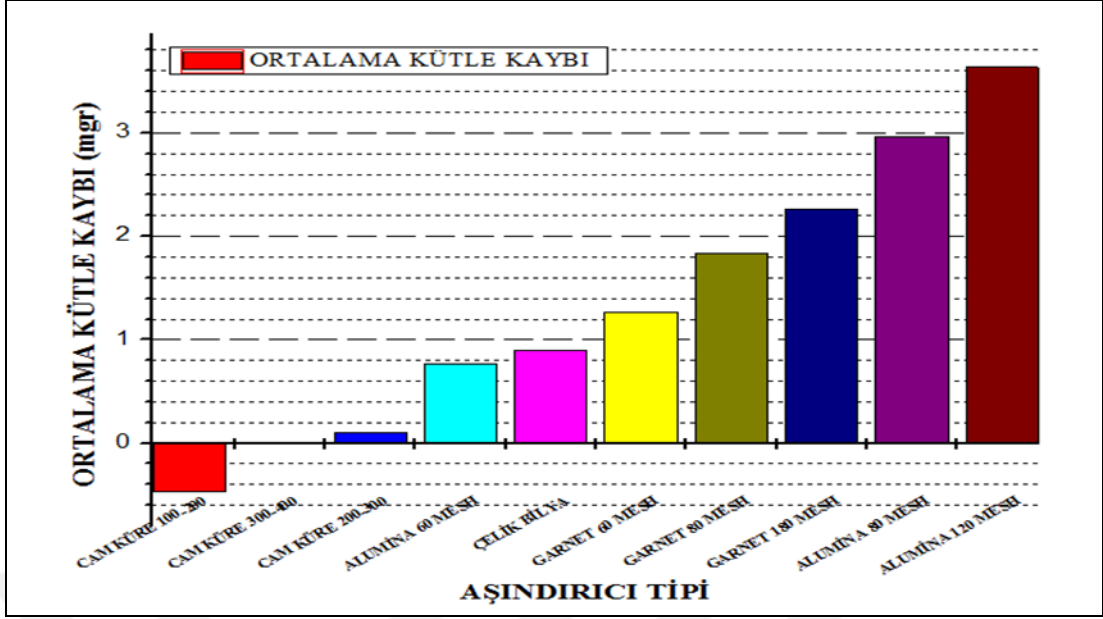
alüminyum alaşımının ağırlığını arttırmıştır. Çelik bilya ise alüminyum alaşımı hedef malzemeyi dövmeş üzerinden ufak parçaların kopmasına sebep olmuş fakat erozyon süresi arttıkça küçük boyutlu çelik bilyaların hedef malzeme üzerine yapışması sonucu malzemenin ağırlığı artmıştır.

Yukarıda belirtilen çıktılar uygulamada büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden malzemelerin katı partikül erozyonu karşısında hasar görmemeleri ve kullanım ömürlerinin arttırılması için bu çıktılar göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Diğer yandan kumlama vb. faydalı uygulamalar için de malzemenin hasar görmeden en uygun şekilde temizlenebilmesinde doğru aşındırıcının kullanımında bu çıktılar büyük bir önem arz etmektedir. Hedef malzeme yüzeyinin işlenmesi, temizlenmesi ve pürüzlendirilmesi uygulamalarında küçük alümina ve garnet aşındırıcı partiküllerinin daha efektif olduğu sonucu uygulamada büyük avantaj sağlayabilir. Ancak çelik bilya gibi büyük boyutlu ve sert malzemelerin kullanımı malzeme üzerinde temizlemenin yanısıra hasarlarada sebep olacağından efektif olarak kullanımı çok mümkün değildir. Cam küre aşındırıcı partikülleri ise malzeme yüzeyine hasar vermediğinden uygulama süresi kontrol altında tutuldunda en uygun aşındırıcı partikül olduğu sonucuna varılmıştır.

### **6.2.2. Kütle kaybının partikül boyutuna göre değişimi**

Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partikül boyutu malzemelerin erozif aşınmaya bağlı kütle kaybını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Tez çalışması kapsamında AA6082 T6 alüminyum alaşımı 90° partikül çarpma açısında, 3 bar partikül püskürtme basıncında, 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya partikülleri kullanılarak aşındırılmıştır. Aşındırma işlemi ilk aşamada aşındırıcı partikül ağırlığı ortalama 40gr olacak şekilde sabit tutularak daha sonra erozyon süresi ortalama 10 sn olacak şekilde sabit tutularak yapılmıştır.

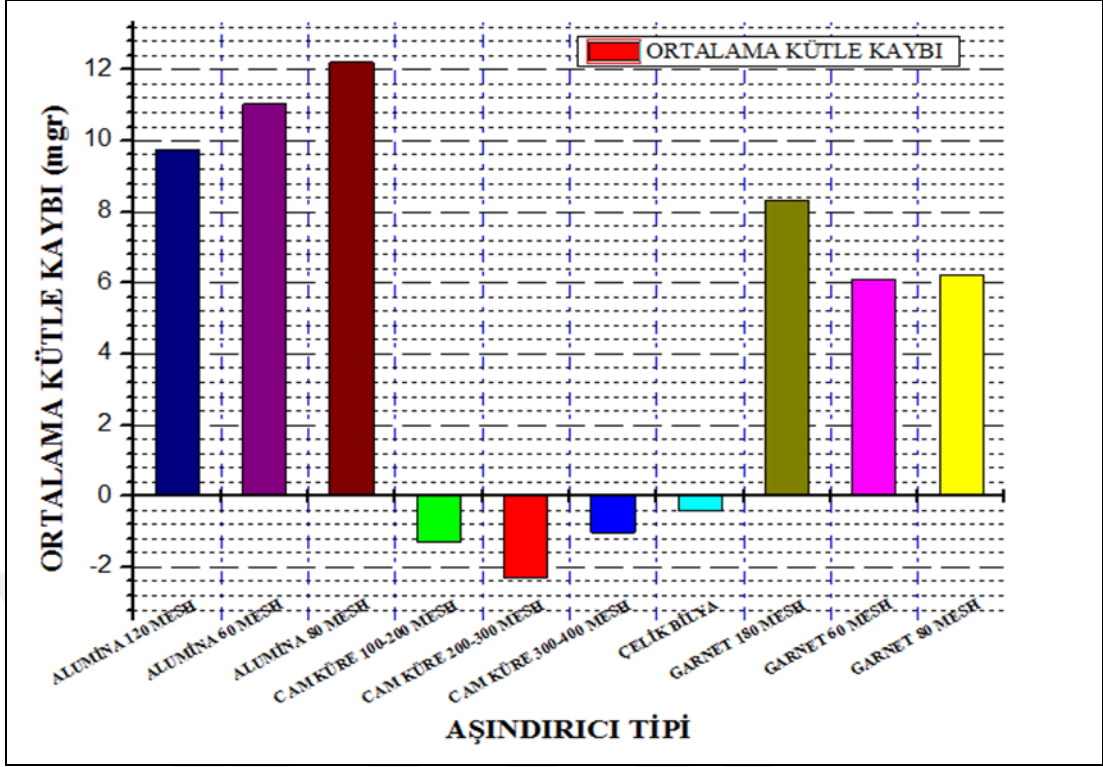
Şekil 6.8'de AA6082 T6 alüminyum alaşımıyla 90° çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncı altında, aşındırıcı partikül ağırlığı ortalama 40 gr olacak şekilde sabit tutulan deneylerde kütle kaybına aşındırıcı partikül boyutunun etkisi verilmiştir.



Şekil 6.8. Aşındırıcı partikül ağırlığı sabit tutulduğunda kütle kaybının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi

Şekil 6.8’de 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3’er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak aşındırıcı partikül ağırlığı ortalama 40 gr olacak şekilde gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. Şekil 6.8 incelendiğinde 3 bar püskürtme basıncında 90° çarpma açısı değerleri için gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda en yüksek kütle kaybı alümina 120 mesh boyutundaki aşındırıcıda, en düşük kütle kaybının ise cam küre 200-300 mesh boyutundaki aşındırıcıda görülmüştür. Cam küre 300-400 de kütle kaybı meydana gelmemiş, cam küre 100-200 de de kütle kaybı meydana gelmemiş aksine kırılan cam kürelerin malzeme üzerine saplanarak kütle artışına sebep olmuştur.

Şekil 6.9’da AA6082 T6 alüminyum alaşımıyla 90° çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncı altında, erozyon süresi ortalama 10 sn olacak şekilde sabit tutulan deneylerde erozyon oranına aşındırıcı partikül boyutunun etkisi verilmiştir.



Şekil 6.9. Erozyon süresi sabit tutulduğunda kütle kaybının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi

Şekil 6.9’da 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3’er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak erozyon süresi ortalama 10 sn olacak şekilde gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. Şekil 6.9. incelendiğinde 3 bar püskürtme basıncında 90° çarpma açısı değerleri için gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda en yüksek kütle kaybının alümina 80 mesh boyutundaki aşındırıcıda, en düşük kütle kaybının ise garnet 60 mesh boyutundaki aşındırıcıda görülmüştür. Çelik bilya, cam küre 100-200 mesh, cam küre 200-300 mesh ve cam küre 300-400 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküllerde kütle kaybı meydana gelmemiş aksine kırılan cam kürelerin ve küçük boyutlu çelik bilyaların malzeme üzerine saplanarak kütle artışına sebep olmuştur.

### 6.3. SEM Çalışmaları

AA6082 T6 alüminyum alaşımının 3bar püskürtme basıncı ve 90° çarpma açısında erozyon oranının ve kütle kaybının partikül boyutuna, türüne bağlı olarak önemli derecede değişim gösterdiği bir önceki bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ancak deneysel çalışmaların sonuçların görülmesinin yanında bu sonuçların nedenlerinin anlaşılması çok önemlidir. Katı partikül erozyonu hedef malzeme üzerinde meydana gelen karmaşık bir aşınma sürecidir. Bu aşınma sürecinin ve bu sürece etki eden parametrelerin hedef malzeme yüzeyinde meydana getirdiği değişimin net olarak anlaşılabilmesi için aşındırılmış yüzeylerin morfolojilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle hedef malzemelerin erozif aşınma davranışlarının araştırılmasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Katı partikül erozyonu sonrası hedef malzeme yüzeyinde meydana gelen hasarın analizi, AA6082 T6 alüminyum alaşımında hangi aşındırıcı partikül boyutunun ve türünün ne tür bir hasara yol açtıkları, oluşan bu hasarın hangi erozif aşınma mekanizmaları ile meydana geldiğinin belirlenmesi önemli bir durumdur. Literatür taraması yapıldığında birçok malzemenin erozif aşınma davranışlarının incelenmesi gerçekleştirilen çalışmaların büyük çoğunluğunda malzemelerin erozyon oranları ile birlikte aşınmış yüzeylerin morfolojileri SEM ile birlikte incelenmiştir. Hedef malzemenin yüzey morfolojisi incelenen parametrelere (hedef malzeme özellikleri, operasyon parametreleri, aşındırıcı partikül özellikleri, sıcaklık, nem, çevresel özellikler vb.) bağlı olarak değişim gözlenmiştir. Gerçekleştirilen SEM çalışmalarında özellikle malzemede görülen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında farklı tür ve partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin AA6082 T6 Alüminyum alaşımında erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan hedef malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve hedef malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM çalışması gerçekleştirilmiştir.

SEM çalışmalarının nasıl gerçekleştirildiği “Yöntem” bölümünde açıklanmıştır. Fakat bu bölümde de SEM çalışmaları ile ilgili özet bilgiler verilmiştir. SEM çalışmalarında AA6082 T6 alüminyum alaşımının aşınmış yüzeylerinin farklı detektörler ile BSE modunda 250x, 500x, 1kx ve 2kx yaklaşımlarında görüntüleri alınmıştır.

Farklı boyutta ve türde aşındırıcı partiküller ile gerçekleştirilen erozif aşınma sonucunda hedef malzeme yüzeyine saplanan partiküller incelenmiştir. Saplamanın hangi parametrenin etkisi ile daha yüksek oranda meydana geldiği, saplanma sonucunda hedef malzeme yüzeyinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

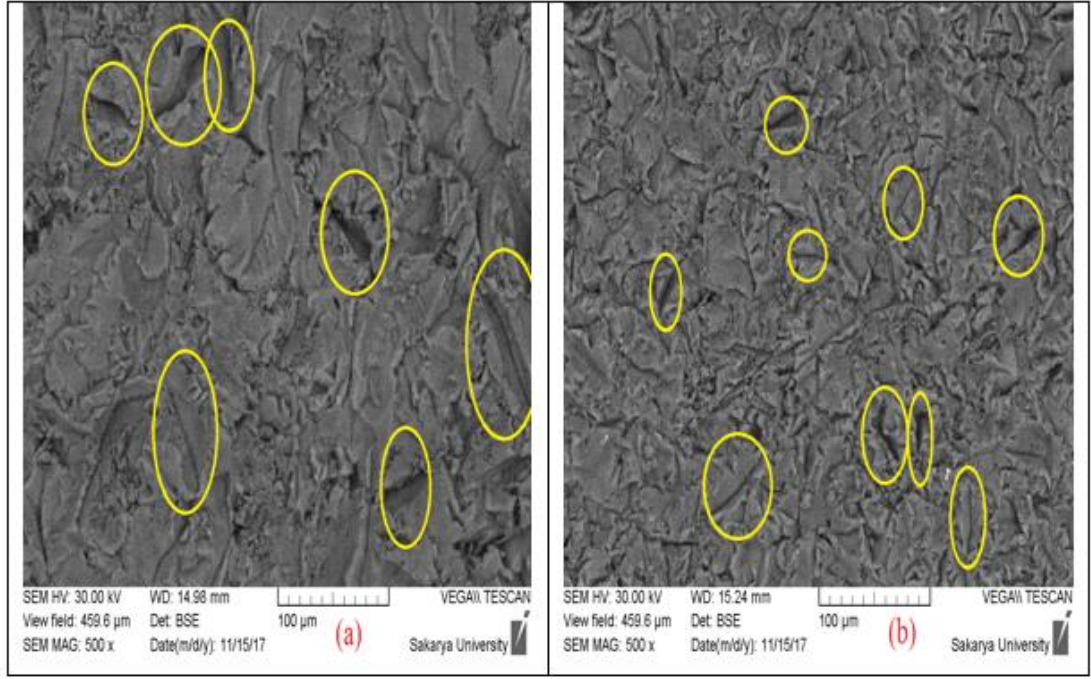
Bu bölüm içerisinde tüm bu çalışmaların sonuçları ayrı ayrı değerlendirilerek AA6082 T6 alüminyum alaşımının aşındırıcı partikül türüne ve boyutuna bağlı erozif aşınma davranışı yorumlanmıştır. Bölüm içerisinde özellikle farklı tür ve boyuttaki aşındırıcı partikül ile aşındırılmış hedef malzemeden alınan aşınmış yüzey morfolojilerinin görüntüleri özgünlük taşımaktadır.

Bu bölüm içerisinde SEM analizleri aşındırıcı partikül türü ve boyutunun AA6082 T6 alüminyum alaşımının yüzey morfolojisine ve malzeme yüzeyinde görülen erozif aşınma mekanizmalarına olan etkileri açıklanacaktır.

### **6.3.1. SEM çalışmaları sonuçları**

#### **6.3.1.1. Partikül türü ve boyutunun yüzey morfolojisine etkisi**

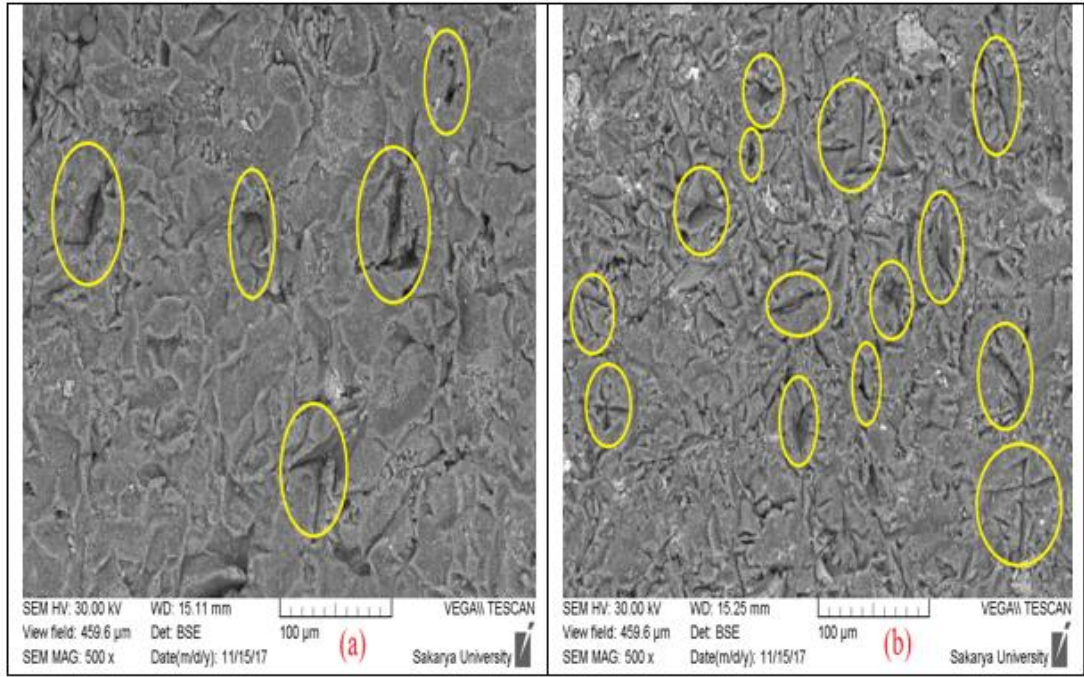
Bu bölüm içerisinde aşındırıcı partikül türü ve boyutunun hedef malzemenin yüzey morfolojisine ve erozif aşınma sırasında görülen erozif aşınma mekanizmalarına olan etkileri incelenmiştir. Şekil 6.10'da 90° partikül çarpma açısında 3 bar püskürtme basıncında alumina 60 mesh ve 120 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılan AA6082 T6 alüminyum alaşımını numunelerin BSE modunda 500x büyütmede çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.10-a'da büyük alumina aşındırıcı partiküllerinin (60 mesh) meydana getirdiği yüzey hasarları, yüksek ve geniş aşınma vadileri görülmektedir. Şekil 6.10-b'de ise küçük alumina aşındırıcı partiküllerinin (120 mesh) meydana getirdiği yüzey hasarları, dar ve nispeten daha az derin vadiler gözlenmektedir.



Şekil 6.10. a) 60 mesh, b) 120 mesh boyutundaki alumina ile aşındırılmış numunelerin 500x büyütmede SEM fotoğrafı

Erozyon oranının partikül boyutuna göre değişimi bölümünde küçük alümina aşındırıcı partiküllerinin alüminyum alaşımlarını büyük partiküllere kıyasla daha fazla aşındırdıkları sonucuna varılmıştır. Ancak şekil 6.10'da verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde büyük (60 mesh) alümina aşındırıcı partiküllerin (a) malzeme yüzeyinde daha ağır bir tahribata yol açtıkları görülmektedir. Buna karşın Şekil 6.10-b'de aşınma hasarının Şekil 6.10-a'ya kıyasla daha az olmasına rağmen aşınma izlerinin çok daha fazla sayıda oldukları gözlenmektedir. Küçük (120 mesh) alümina aşındırıcı partikülleri yüzeyde derinliği ve genişliği daha düşük izler oluşturmalarına rağmen hedef malzeme yüzeyinde çok sayıda aşınma izine ve hasarına yol açmaktadırlar. Özellikle Şekil 6.10-b'de aşınma yönüne paralel çok sayıda aşınma izinin görülmesi bu sonucu desteklemektedir. Bu durumda küçük partiküller tek başlarına büyük partiküllere kıyasla daha az aşınma meydana getirir birim zamanda yüzeye büyük partiküller ile karşılaştırıldığında çok daha fazla küçük partikülün çarptığı ve bunun sonucu olarak yüzeyde daha fazla miktarda hasarın ve aşınmanın meydana geldiği söylenebilir.





Şekil 6.11. a) 60 mesh, b) 180 mesh boyutundaki garnet ile aşındırılmış numunelerin 500x büyütmede SEM fotoğrafı

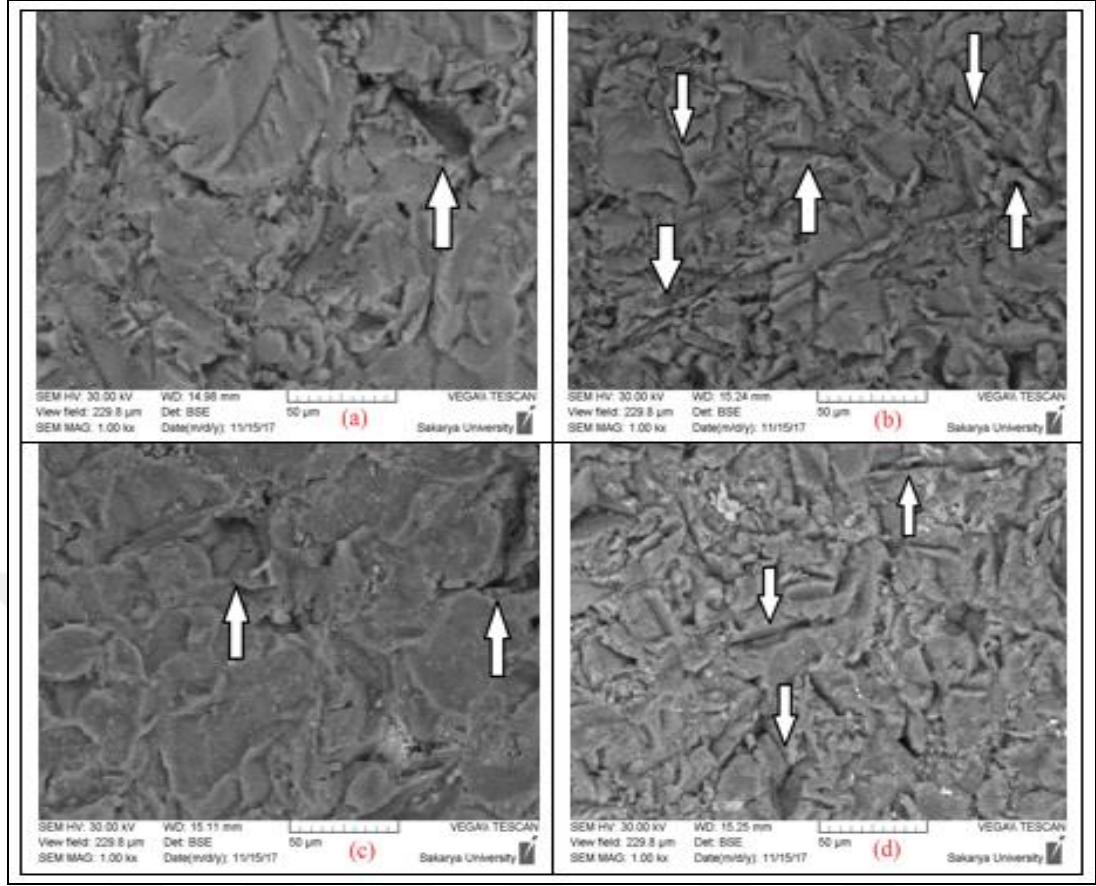
Şekil 6.11’de 90° partikül çarpma açısında 3 bar püskürtme basıncında garnet 60 mesh ve 180 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılan AA6082 T6 alüminyum alaşımı numunelerin BSE modunda 500x büyütmede çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.11-a’da büyük garnet aşındırıcı partiküllerinin (60 mesh) meydana getirdiği yüzey hasarları, yüksek ve geniş aşınma vadileri görülmektedir. Şekil 6.11-b’de ise küçük garnet aşındırıcı partiküllerinin (120 mesh) meydana getirdiği yüzey hasarları, dar ve nispeten daha az derin vadiler gözlenmektedir.

Erozyon oranının partikül boyutuna göre değişimi bölümünde küçük garnet aşındırıcı partiküllerinin alümina aşındırıcı partikülündede olduğu gibi alüminyum alaşımlarını büyük partiküllere kıyasla daha fazla aşındırdıkları sonucuna varılmıştır. Ancak Şekil 6.10’da görüldüğü gibi Şekil 6.11’de de verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde büyük (60 mesh) garnet aşındırıcı partiküllerin (a) malzeme yüzeyinde daha ağır bir tahribata yol açtıkları görülmektedir. Buna karşın Şekil 6.11-b’de aşınma hasarının Şekil 6.11-a’ya kıyasla daha az olmasına rağmen aşınma izlerinin çok daha fazla sayıda oldukları gözlenmektedir. Küçük (180 mesh) garnet aşındırıcı partikülleri yüzeyde derinliği ve genişliği daha düşük izler oluşturmalarına rağmen hedef malzeme yüzeyinde çok sayıda aşınma izine ve hasarına yol açmaktadırlar. Özellikle Şekil

6.11-b'de aşınma yönüne paralel çok sayıda aşınma izinin görülmesi bu sonucu desteklemektedir. Bu durum durumun sonucu olarak alümina ve garnet aşındırıcı partikülleri için küçük partiküller tek başlarına büyük partiküllere kıyasla daha az aşınma meydana getirir. Birim zamanda yüzeye büyük partiküller ile karşılaştırıldığında çok daha fazla küçük partikülün çarptığı ve bunun sonucu olarak yüzeyde daha fazla miktarda hasarın ve aşınmanın meydana geldiği söylenebilir.

Şekil 6.10. ve Şekil 6.11'de verilen farklı boyutlardaki alümina ve garnet aşındırıcı partiküller ile aşındırılan hedef malzemelerin yüzey morfolojisi incelendiğinde aşınma mekanizmalarının benzer şekilde gerçekleştiği, hedef malzeme yüzeyinde aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak mikro sürme ve mikro kesme oluşmuştur.

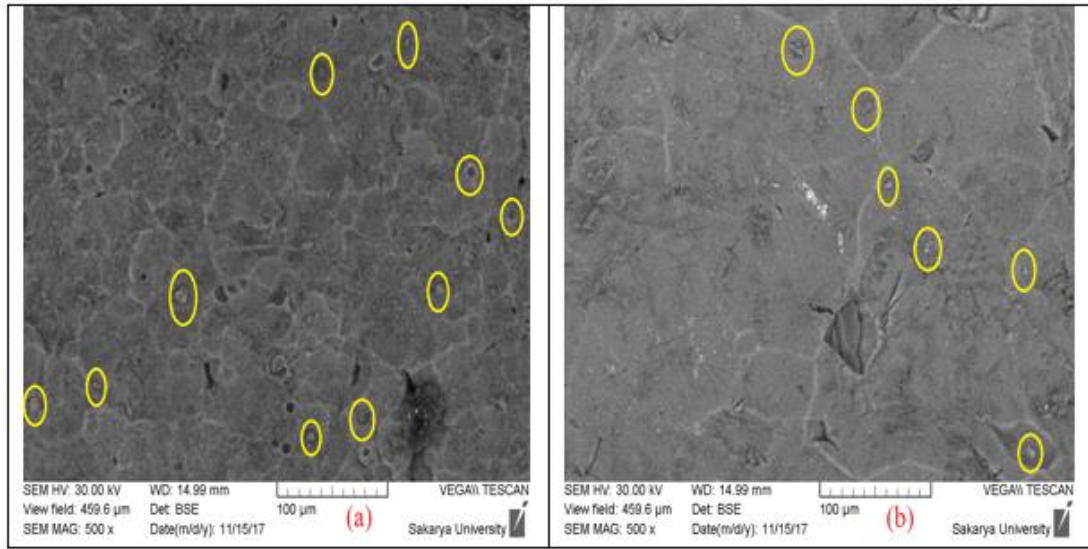
Şekil 6.12'de 90° partikül çarpma açısında 3 bar püskürtme basıncında a) 60 mesh, b) 120 mesh boyutundaki alümina, c) 60 mesh, d) 180 mesh boyutundaki garnet aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan AA6082 T6 alüminyum alaşımı numunelerin BSE modunda 1kx büyütmede çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.12'de görüldüğü gibi katı partikül erozyonu sonucu aşınan yüzeylerde meydana gelen izlerin kullanılan aşındırıcı partikül boyutuna göre değişim gösterdiği görülmüştür. Küçük boyutlu aşındırıcı partikül (alümina 120 mesh, garnet 180 mesh) kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde yüzeyde oluşan mikro sürme ve mikro kesme mekanizması sık ve nispeten daha az derin izler olarak görülürken, büyük boyutlu aşındırıcı partiküller (alümina 60 mesh, garnet 60 mesh) kullanılması ile aynı mekanizmanın daha seyrek ve derin izler olarak gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 6.12. a) 60 mesh, b) 120 mesh boyutundaki alümina, c) 60 mesh, d) 180 mesh boyutundaki garnet ile aşındırılmış numunelerin 1kx büyütmede SEM fotoğrafları.

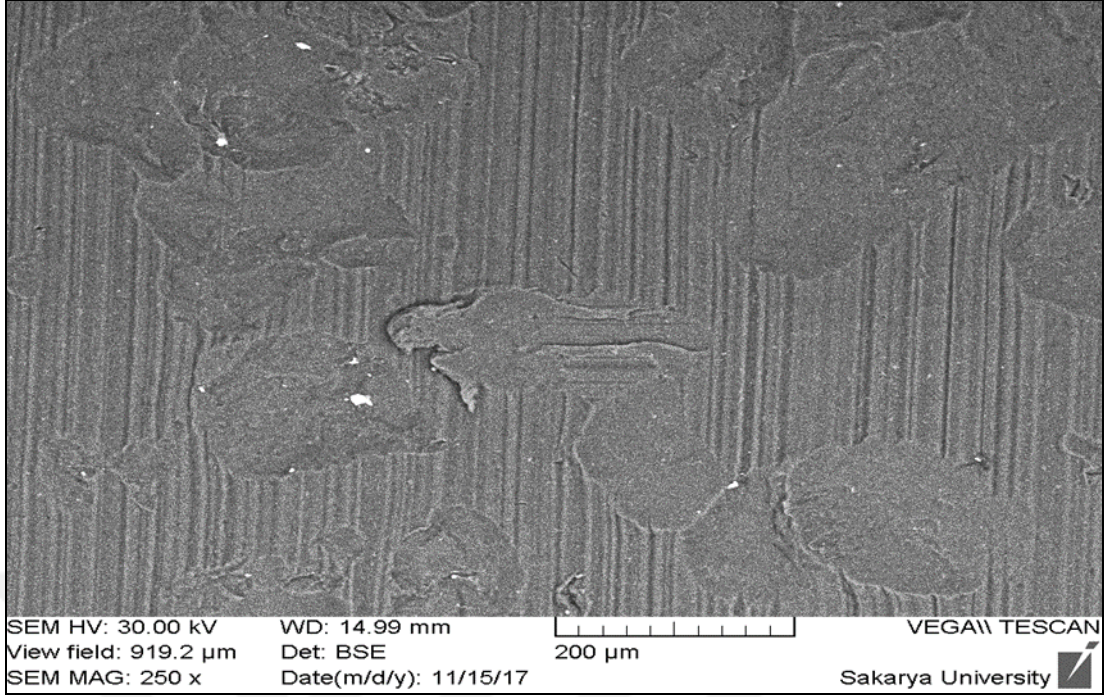
Şekil 6.13'de  $90^\circ$  partikül çarpma açısında 3 bar püskürtme basıncında cam küre 100-200 mesh ve 300-400 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılan AA6082 T6 alüminyum alaşımı numunelerin BSE modunda 500x büyütmede çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.13-a'da büyük cam küre aşındırıcı partikülleri (100-200 mesh) kullanılarak aşındırılan hedef malzemenin 500x büyütmedeki SEM görüntüleri görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde AA6082 T6 alüminyum alaşımı hedef malzemenin yüzeyinde bir hasar meydana gelmediği aksine kırılan cam küre parçacıklarının hedef malzeme yüzeyine yapıştığı görülmektedir. Yapışan bu parçacıklar hedef malzemenin ağırlığını deney öncesi ağırlığına göre arttırmış dolayısıyla ortalama kütle kaybı negatif yönde olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.13-b'de ise küçük cam küre aşındırıcı partikülleri (300-400 mesh) kullanılarak aşındırılan hedef malzemenin 500x büyütmedeki SEM görüntüleri görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde cam küre 100-200 mesh'de ki gibi hedef malzeme yüzeyinde bir hasar mekanizması tespit edilmemiş aksine cam kürelerin aynı şekilde kırılarak

malzeme yüzeyine yapıştığı görünmektedir. Şekil 6.13. incelendiğinde 100-200 mesh boyutundaki büyük cam kürelerin 300-400 mesh boyutundaki küçük cam kürelere nazaran daha fazla malzeme üzerine saplandığı dolayısıyla hedef malzeme ağırlığını daha fazla artırdığı saptanmıştır. Bu durumun sebebi olarak büyük boyutlu cam kürelerin yüksek hızlarda malzeme yüzeyine çarpmaları sonucu daha büyük parçalara ayrıldığı ve bu parçacıkların küçük boyutlu cam kürelere nazaran daha fazla sayıda malzeme yüzeyine saplandığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.13. a) 100-200 mesh, b) 300-400 mesh boyutundaki cam küre ile aşındırılmış numunelerin 500x büyütmede SEM fotoğrafı.

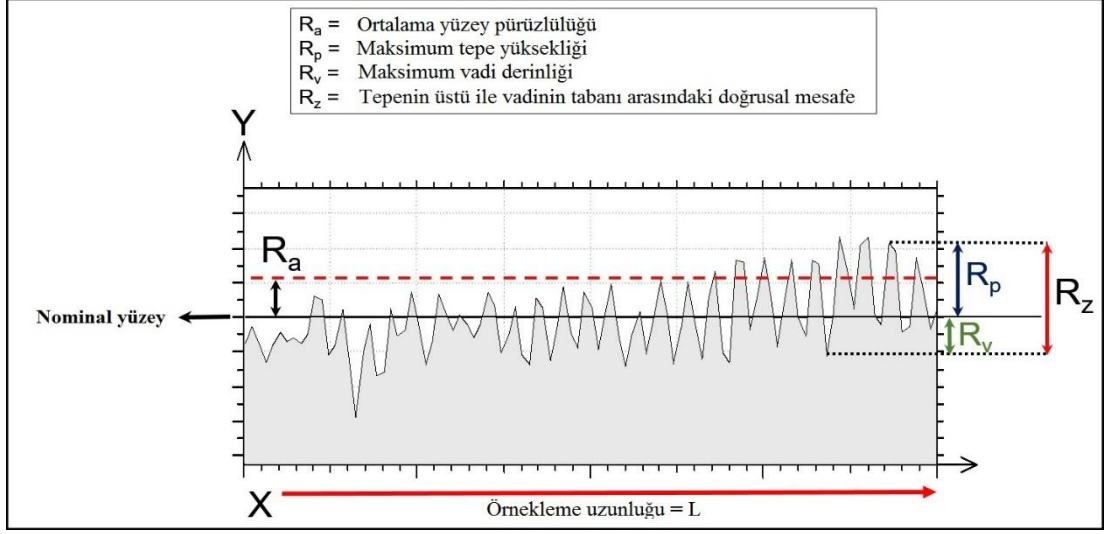
Şekil 6.14'de 90° partikül çarpma açısında 3 bar püskürtme basıncında çelik bilya aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan AA6082 T6 alüminyum alaşımı numunelerin BSE modunda 250x büyütmede çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.14. incelendiğinde AA6082 T6 alüminyum alaşımı hedef malzemenin yüzeyinde mikro sürme ve dövme mekanizmalarının oluştuğu ancak malzeme yüzeyinden parça kopmadığı ve küçük boyutlu çelik bilya aşındırıcılarının malzeme içerisine gömüldüğü için hedef malzeme ağırlığında bir artış görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak çelik bilya aşındırıcılarının AA6082 T6 alüminyum alaşımına göre daha sert olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.14. Çelik bilya aşındırıcı partikülleri ile aşındırılmış numunelerin 250x büyütmede SEM fotoğrafı.

#### 6.4. Aşınmış Yüzeylerin Pürüzlülük Değerlerinin Değişimi

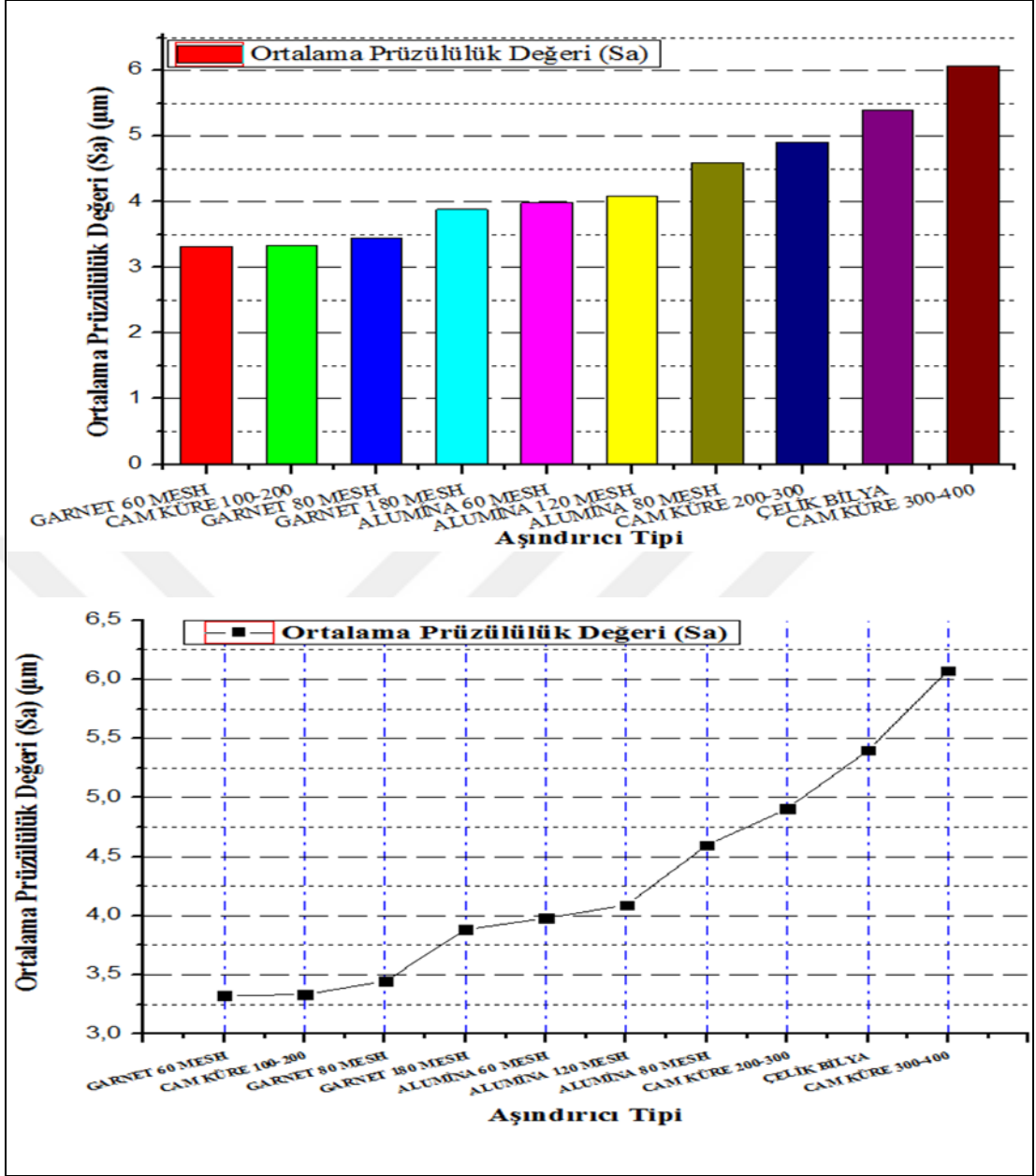
Bu bölümde 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları ile aşındırılan yüzeylerin Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazıyla pürüzlülüğü ölçülmüştür. Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazı yardımı ile aşınmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmıştır. Görüntülerde yüksekliklerin değerleri farklı renklerde verilmiş ve bu renklere bağlı skala oluşturulmuştur. Ayrıca Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazında okunan seçili yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerine (Ra), maksimum tepe yüksekliği (Rp), maksimum vadi derinliği (Rv), tepenin üstü ile vadinin tabanı arasındaki doğrusal mesafe (Rz) bağlı olarak grafikler çizilmiştir. Şekil 6.15'de optik profilometre de okunan pürüzlülük değerlerinin tanımları verilmiştir. Hedef numunenin tüm yüzeyi için ise ortalama pürüzlülük değerine (Sa), maksimum tepe yüksekliği (Sp), maksimum vadi derinliği (Sv), tepenin üstü ile vadinin tabanı arasındaki doğrusal mesafe (Sz) bağlı olarak grafikler çizilmiştir



Şekil 6.15. Nanovea PS50 marka 3D optik profilometrede okunan pürüzlülük değerlerinin tanımları.

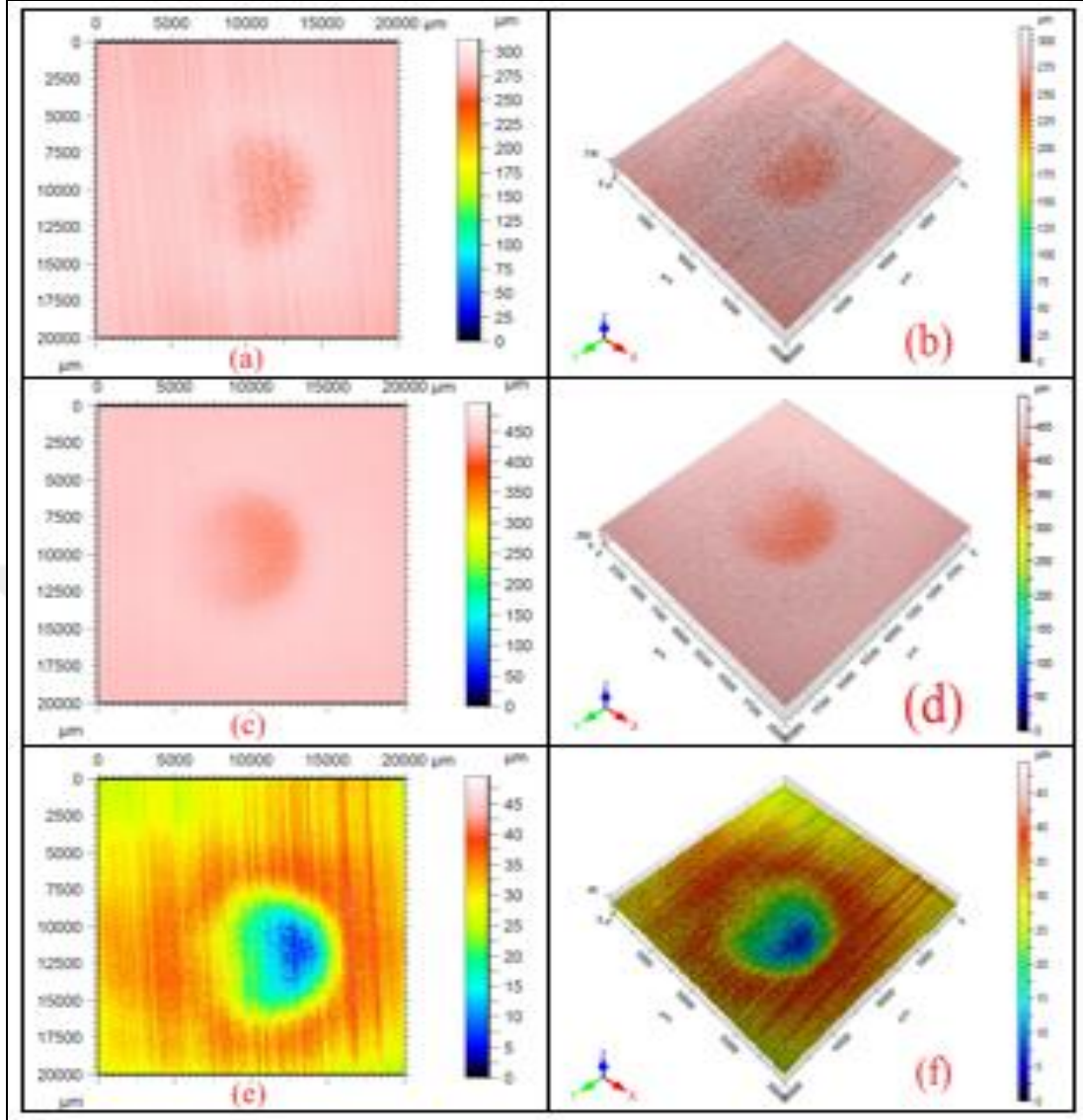
#### 6.4.1. Aşındırıcı partikül türü ve boyutunun etkisi

Şekil 6.16'da aşındırıcı partikül boyutunun ortalama pürüzlülük değerine etkisi gösterilmiştir. Şekilde 3bar partikül püskürtme basıncı altında,  $90^\circ$  partikül çarpma açısında ve 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak aşındırıcı partikül ağırlığı ortalama 40 gr olacak şekilde gerçekleştirilen deneylerdeki ortalama pürüzlülük değerleri kıyaslanmıştır. Aşındırıcı partikül boyutuna göre her bir aşındırıcı partikül kendi içinde ayrıntılı bir şekilde pürüzlülük değerlerine göre açıklanmıştır.



Şekil 6.16. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak partikül ağırlığı sabit tutulan deneylerde ortalama pürüzlülük değişimi.

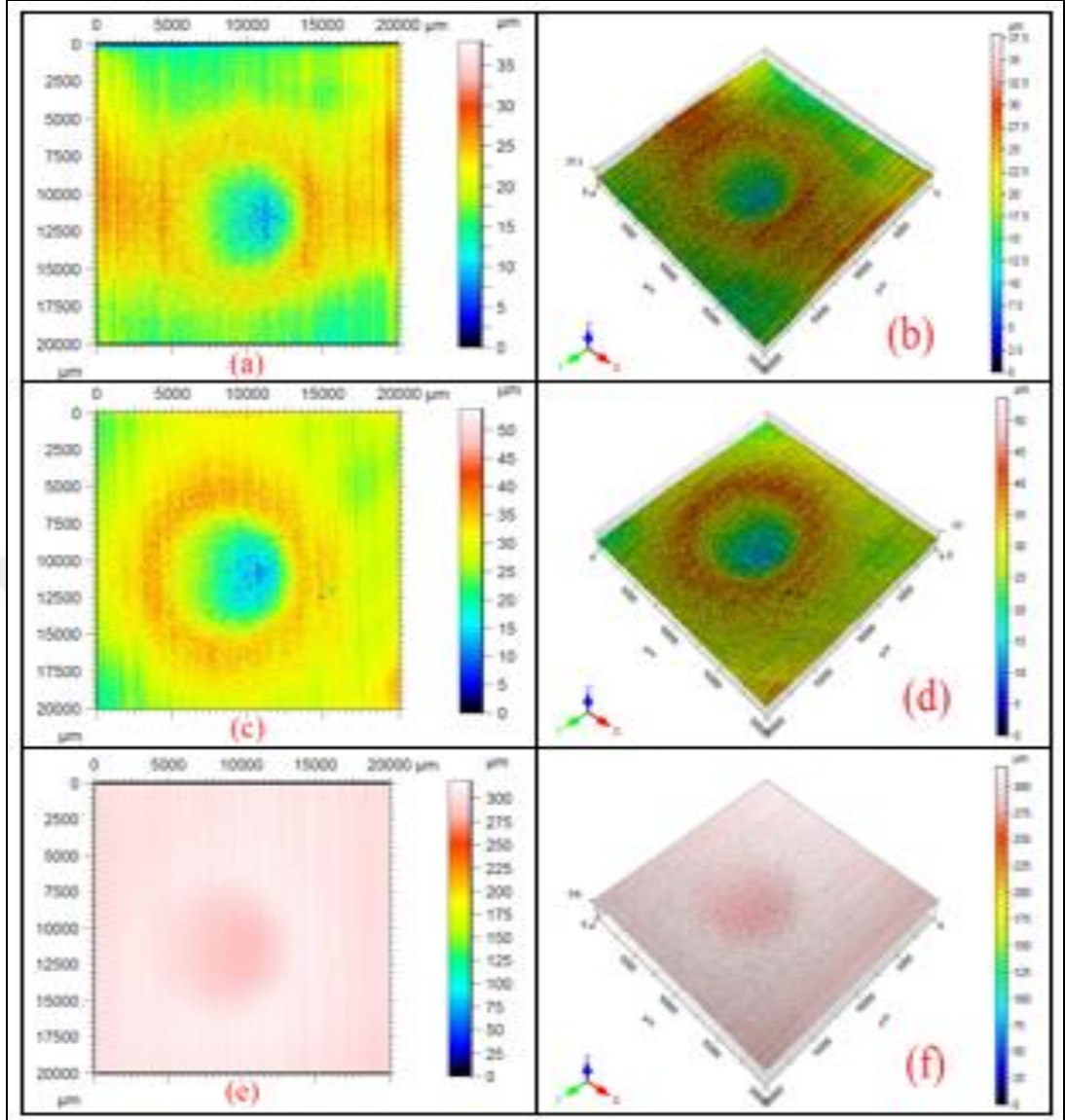
Şekil 6.17’de 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde alümina 60, 80 ve 120 mesh aşındırıcı partiküller kullanılmış, aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 incelendiğinde küçük boyutlu alümina aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü büyük boyutundaki alümina aşındırıcı partikülü kullanımına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6.17. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, alümina aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 120 mesh.

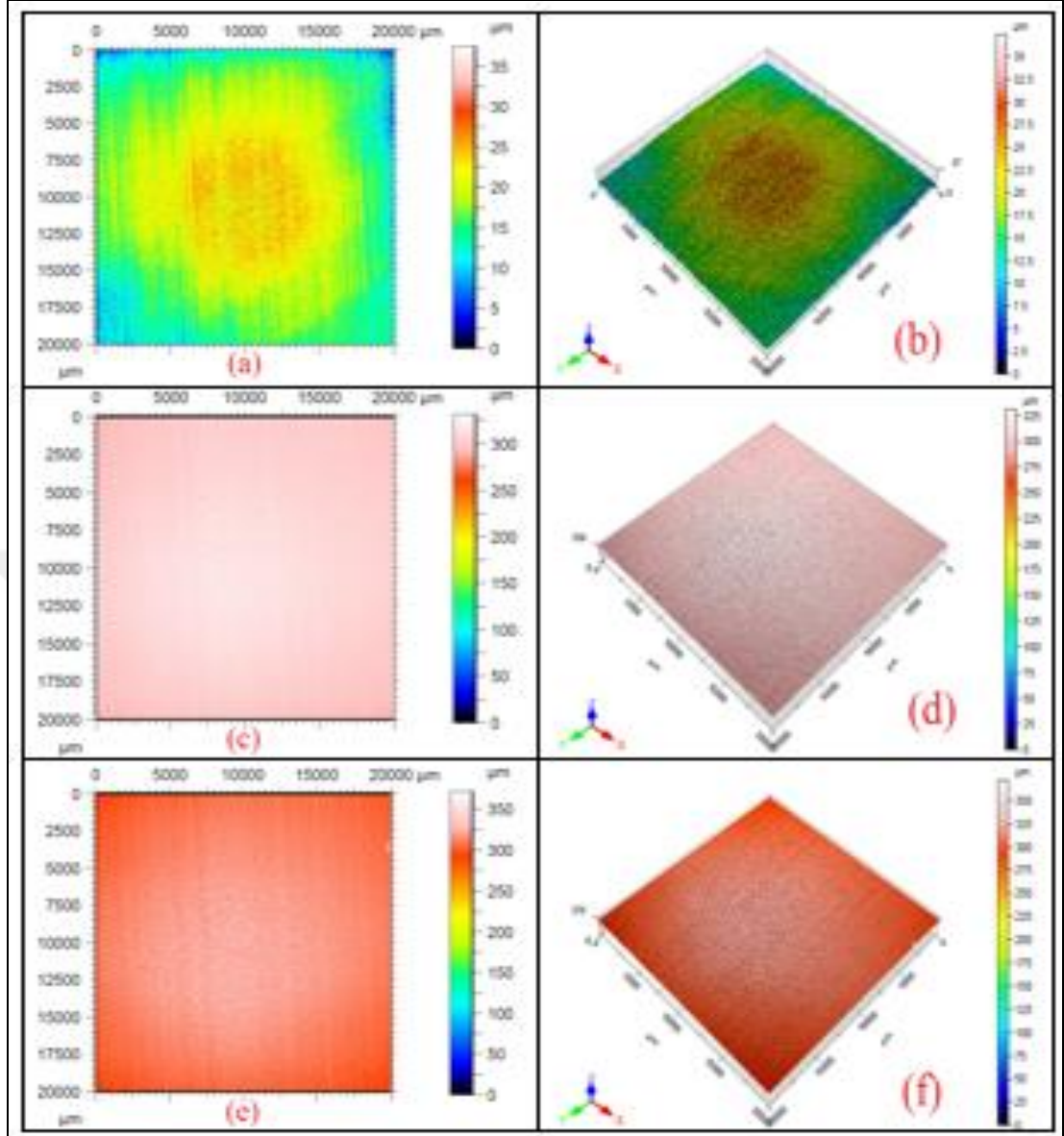
Şekil 6.18'de 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde garnet 60, 80 ve 180 mesh aşındırıcı partiküller kullanılmış, aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil 6.16 ve Şekil 6.18 incelendiğinde küçük boyutlu garnet aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü büyük boyutundaki garnet aşındırıcı partikülü kullanımına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.





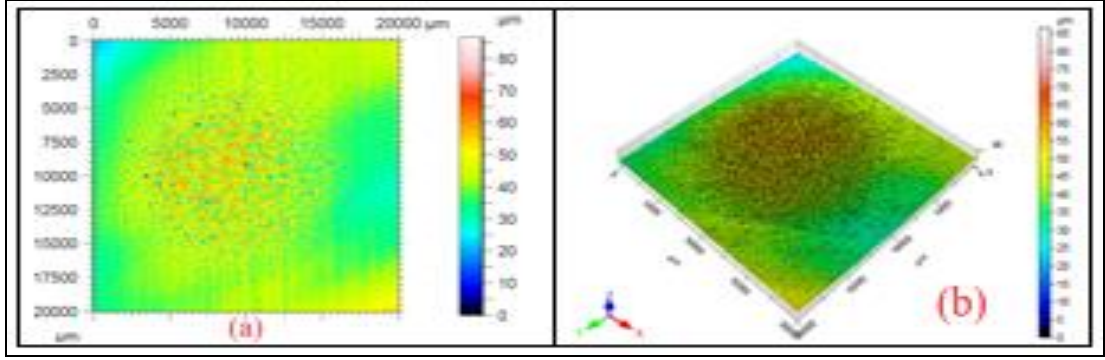
Şekil 6.18. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, garnet aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 180 mesh

Şekil 6.19'da 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde cam küre 100-200, 200-300 ve 300-400 mesh aşındırıcı partiküller kullanılmış, aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil 6.16 ve Şekil 6.19 incelendiğinde küçük boyutlu cam küre aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü büyük boyutundaki cam küre aşındırıcı partikülü kullanımına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.



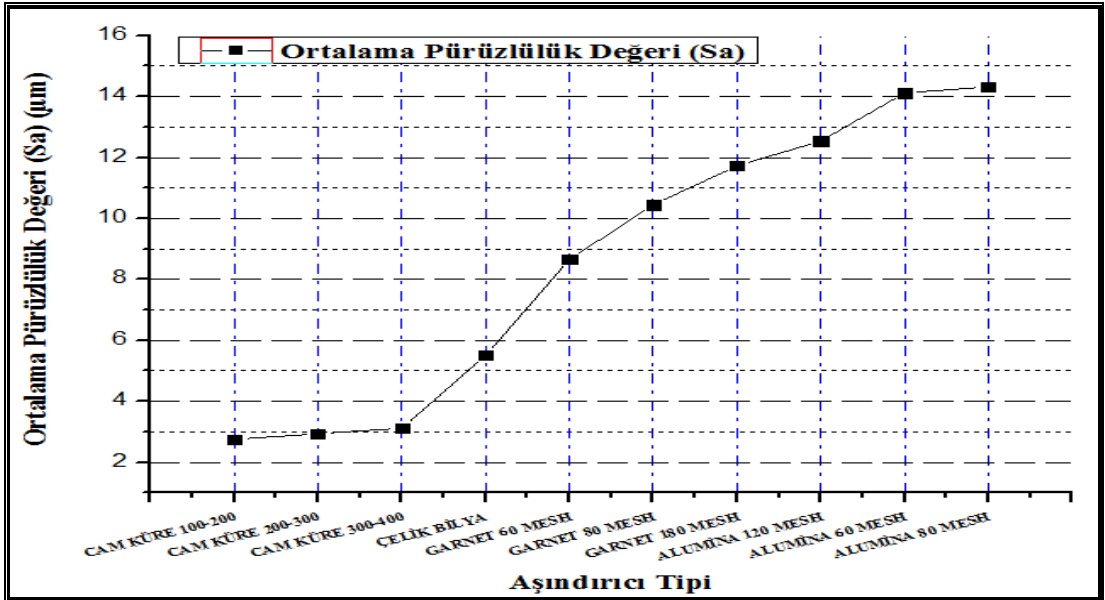
Şekil 6.19. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, cam küre aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 100-200 mesh, c)-d) 200-300 mesh, e)-f) 300-400 mesh.

Şekil 6.20'de 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde çelik bilya aşındırıcı partikülü kullanılmış, aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil 6.16 ve Şekil 6.20 incelendiğinde çelik bilya aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü diğer aşındırıcı partiküllere nazaran daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6.20. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, çelik bilya aşındırıcı partikülü.

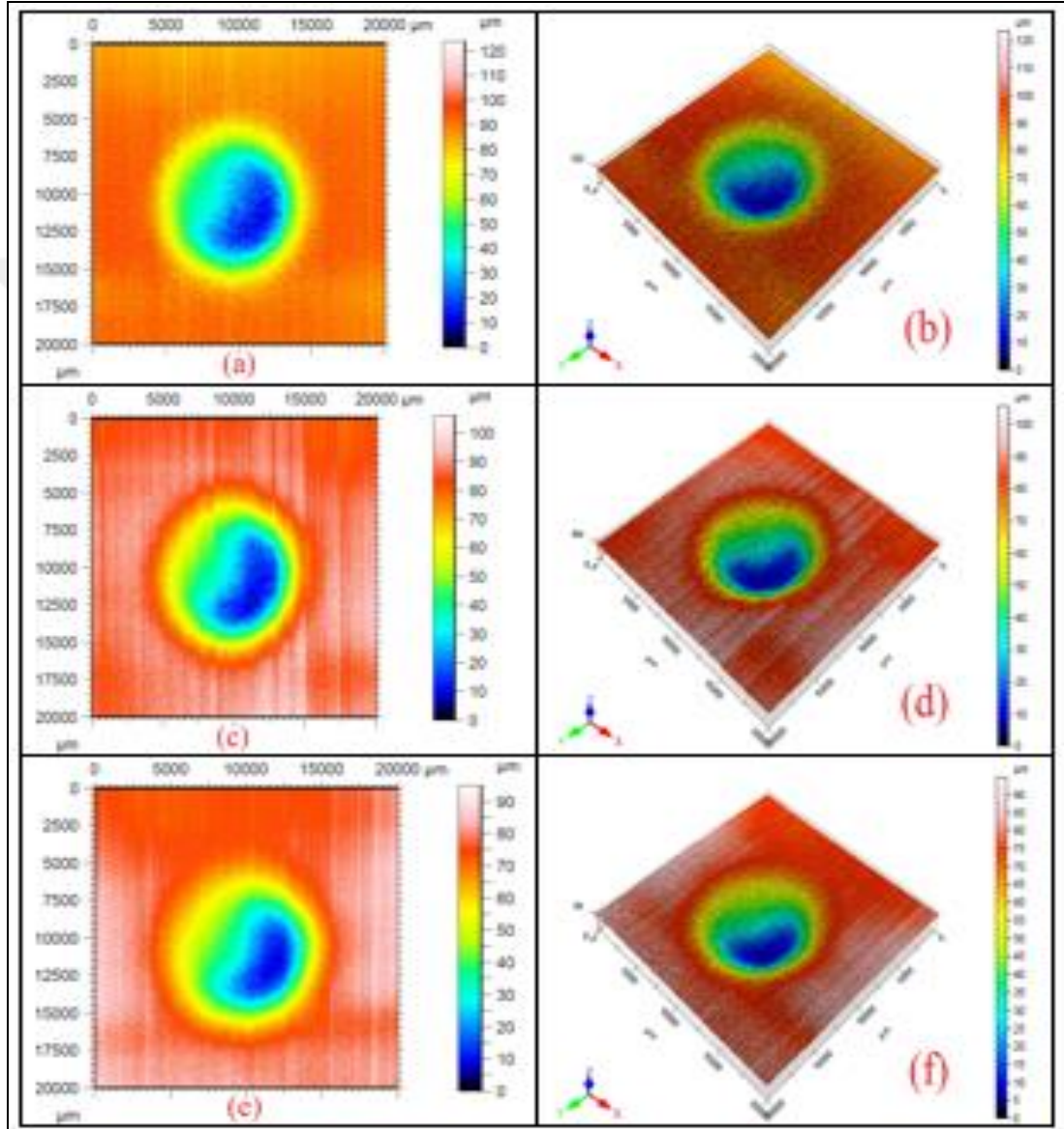
Şekil 6.21’de aşındırıcı partikül boyutunun ortalama pürüzlülük değerine etkisi gösterilmiştir. Şekilde 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3’er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak aşınma süresi ortalama 10 sn olacak şekilde gerçekleştirilen deneylerdeki ortalama pürüzlülük değerleri kıyaslanmıştır. Aşındırıcı partikül boyutuna göre her bir aşındırıcı partikül kendi içinde ayrıntılı bir şekilde pürüzlülük değerlerine göre açıklanmıştır.



Şekil 6.21. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak aşınma süresi sabit tutulan deneylerde ortalama pürüzlülük değişimi.

Şekil 6.22’de 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde alümina 60, 80 ve 120 mesh aşındırıcı partiküller kullanılmış, aşınan

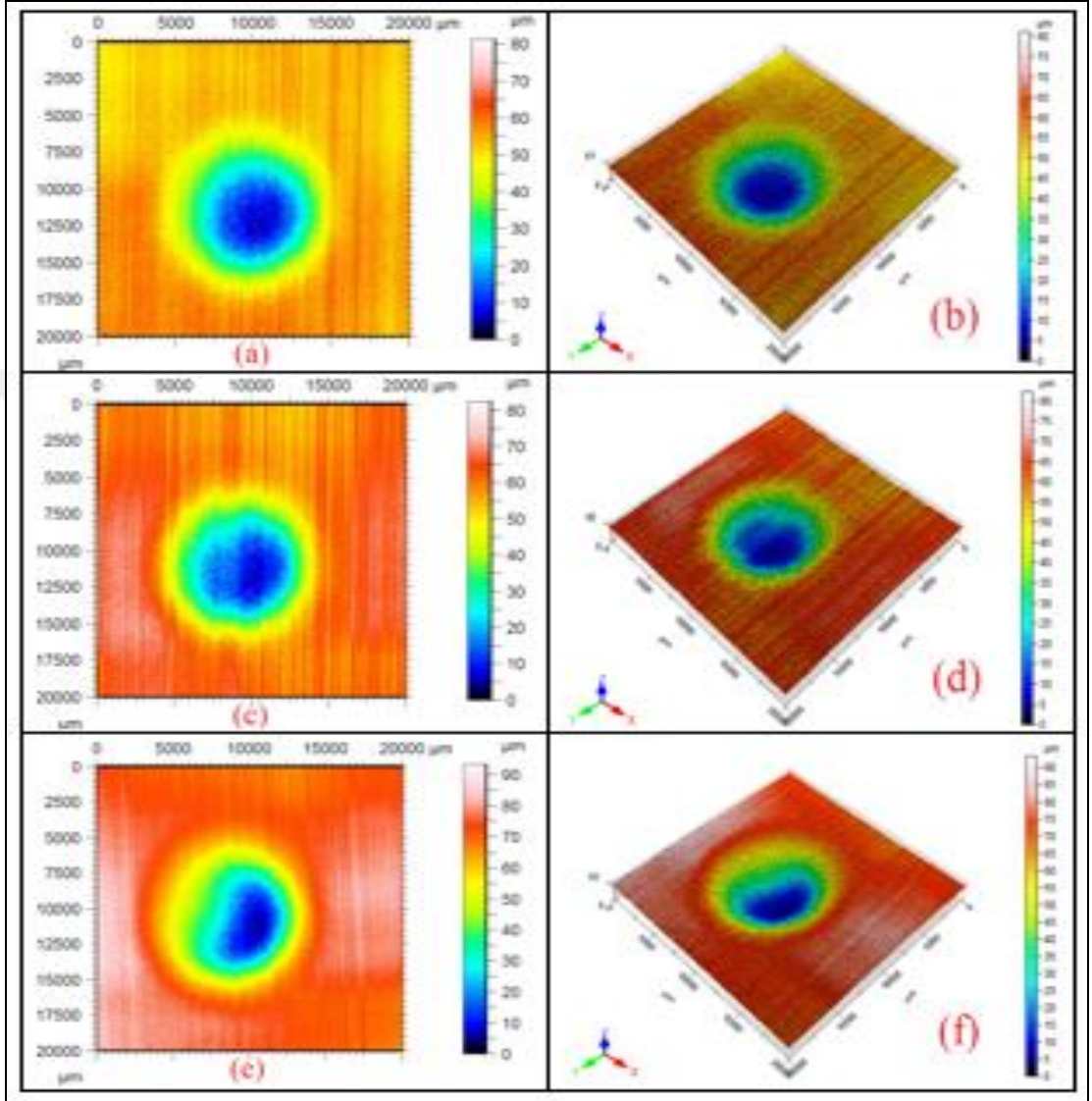
yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil 6.21 ve Şekil 6.22 incelendiğinde küçük boyutlu alümina aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü büyük boyutundaki alümina aşındırıcı partikülü kullanımına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6.22. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, alümina aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 120 mesh

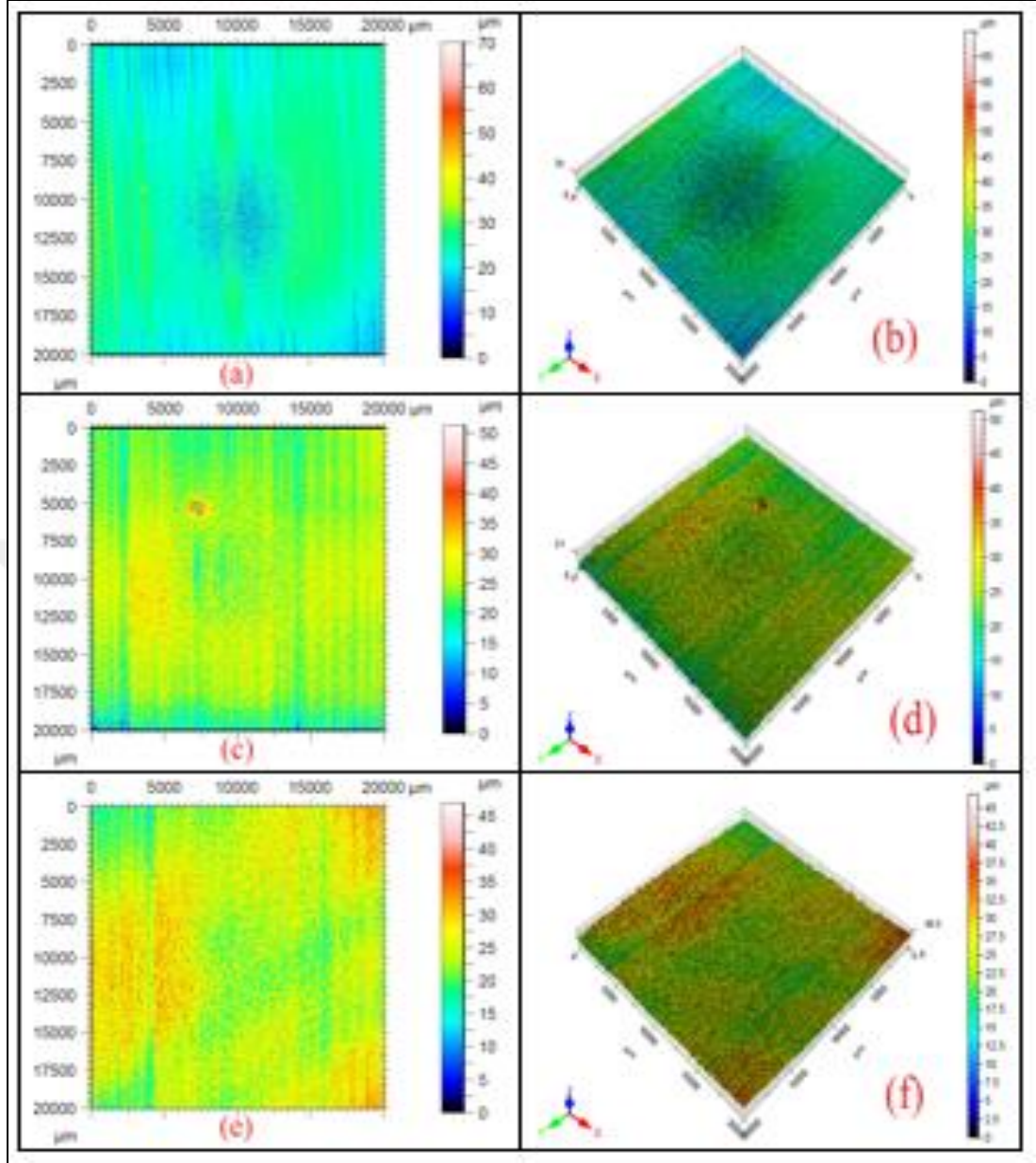
Şekil 6.23'de 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde garnet 60, 80 ve 180 mesh aşındırıcı partiküller kullanılmış, aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil 6.21 ve Şekil 6.23 incelendiğinde küçük boyutlu garnet aşındırıcı

partikül kullanılarak aşındırılan yüzelerde ortalama yüzey pürüzlülüğü büyük boyutundaki garnet aşındırıcı partikülü kullanımına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.



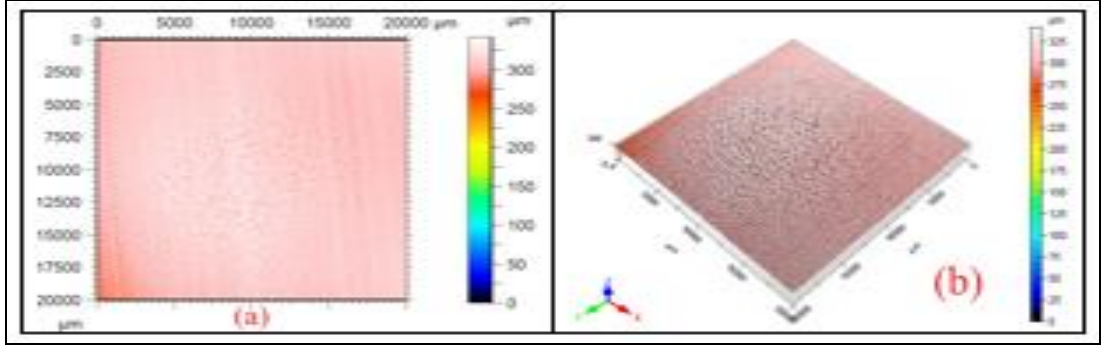
Şekil 6.23. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, garnet aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 60 mesh, c)-d) 80 mesh, e)-f) 180 mesh

Şekil 6.24'de 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde cam küre 100-200, 200-300 ve 300-400 mesh aşındırıcı partiküller kullanılmış, aşınan yüzelerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil 6.21 ve Şekil 6.24 incelendiğinde küçük boyutlu cam küre aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzelerde ortalama yüzey pürüzlülüğü büyük boyutundaki cam küre aşındırıcı partikülü kullanımına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.



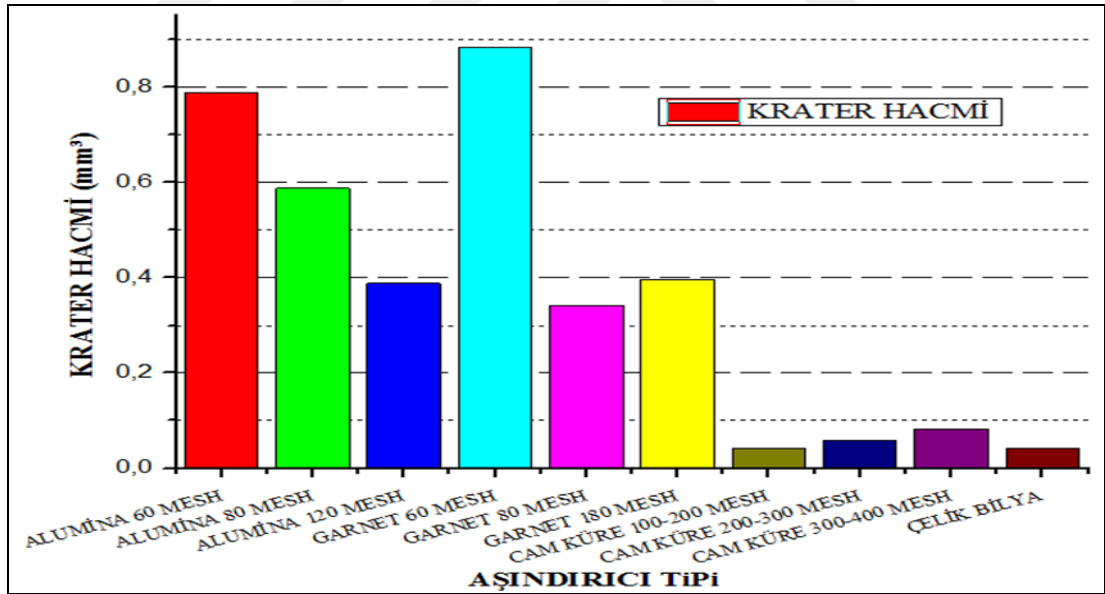
Şekil 6.24. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, cam küre aşındırıcı partikül boyutu a)-b) 100-200 mesh, c)-d) 200-300 mesh, e)-f) 300-400 mesh

Şekil 6.25’de 3 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde çelik bilya aşındırıcı partikülü kullanılmış, aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri skalaları ile birlikte optik profilometre ile alınmıştır. Şekil 6.21 ve Şekil 6.25 incelendiğinde çelik bilya aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü diğer aşındırıcı partiküllere nazaran daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6.25. 3 bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında, çelik bilya aşındırıcı partikülü

Şekil 6.26'da aşındırıcı partikül boyutunun krater hacmine etkisi gösterilmiştir. Şekilde 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak aşındırıcı partikül ağırlığı ortalama 40 gr olacak şekilde gerçekleştirilen deneylerdeki krater hacimleri kıyaslanmıştır.

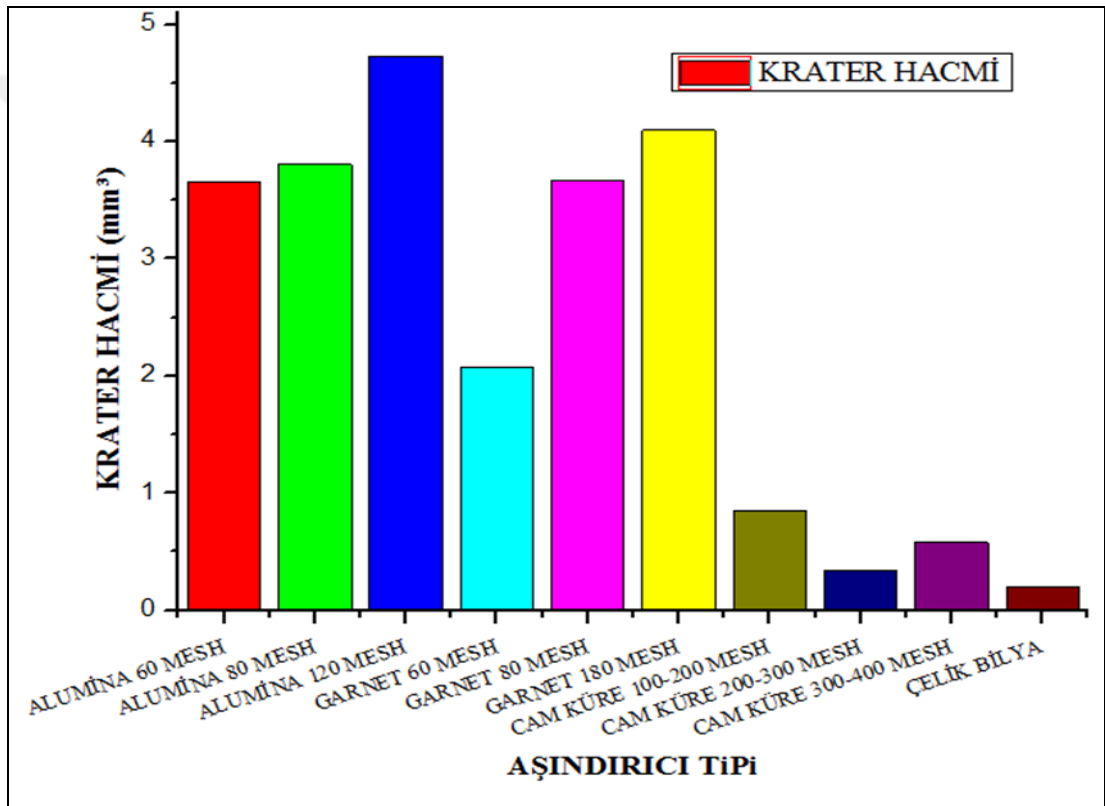


Şekil 6.26. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak partikül ağırlığı sabit tutulan deneylerde krater hacim değişimi.

Şekil 6.26. incelendiğinde alümina aşındırıcı partikülünün parçacık boyutu küçüldükçe krater hacminde doğru orantılı olarak küçüldüğü, cam küre aşındırıcı partikülünde ise parçacık boyutunun küçülmesiyle krater hacminin arttığı, garnet aşındırıcı partikülünde ise sabit bir sonucun olmadığı, çelik bilyanın ise üzerinde

dövme mekanizması gerçekleştiği için çok düşük bir krater hacmine sahip olduğu görülmüştür.

Şekil 6.27’de aşındırıcı partikül boyutunun krater hacmine etkisi gösterilmiştir. Şekilde 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3’er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak aşınma süresi ortalama 10 sn olacak şekilde gerçekleştirilen deneylerdeki krater hacimleri kıyaslanmıştır.



Şekil 6.27. Aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak aşınma süresi sabit tutulan deneylerde krater hacim değişimi.

Şekil 6.27. incelendiğinde alümina ve garnet aşındırıcı partikülünün parçacık boyutu küçüldükçe krater hacminin ters orantılı olarak büyüdüğü, cam küre aşındırıcı partikülünde ise sabit bir sonucun olmadığı, çelik bilyanın ise üzerinde dövme mekanizması gerçekleştiği için çok düşük bir krater hacmine sahip olduğu görülmüştür.



## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

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

Yüksek lisans tezi kapsamında Alüminyum Alaşımının (6082 T6) katı partikül erozyonu mekanizmasına etki eden operasyon parametrelerinden; aşındırıcı partiküllerin türü ve boyutunun etkisi incelenmiştir.

3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak ASTM G 76 standartlarına göre gerçekleştirilen deneylerde AA6082 T6 alüminyum alaşımının katı partikül erozyonu davranışı karakterize edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla aşındırılan numunelerin ilk olarak erozyon oranı değerleri hesaplanmış, böylelikle operasyon parametrelerinin erozyon oranına etkisi incelenmiştir. Aşındırılan yüzeylerin SEM görüntüleri alınarak operasyon parametrelerinin yüzey morfolojisine olan etkisi incelenmiştir. Son olarak optik profilometre yardımı ile tüm aşındırılmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmış, ortalama pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır.

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

Partikül çarpma hızlarının ve kütleli debilerin incelenmesi;

Tez çalışmasında çift disk metodu ile farklı tür ve boyuttaki aşındırıcı partiküllerin hızları 3 bar püskürtme basıncında olacak şekilde ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Alümina 60 mesh (212-300  $\mu\text{m}$ ), 80 mesh (150-212  $\mu\text{m}$ ) ve 120 mesh (90-125  $\mu\text{m}$ ) boyutlarındaki aşındırıcı partiküllerinin çarpma hızlarının hesaplanması ile büyük boyutlu partiküllerin küçük boyutlu partikülere kıyasla daha hızlı olduğu sonucuna varılmıştır. Alümina 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerinin hızları sırası ile 94.48, 65.04 ve 60.75 m/s olarak hesaplanmıştır.

Garnet 60 mesh (180-600  $\mu\text{m}$ ), 80 mesh (150-212  $\mu\text{m}$ ) ve 180 mesh (53-90  $\mu\text{m}$ ) boyutlarındaki aşındırıcı partiküllerinin çarpma hızlarının hesaplanması ile küçük boyutlu partiküllerin büyük boyutlu partikülere kıyasla daha hızlı olduğu sonucuna varılmıştır. Alümina 60 mesh, 80 mesh ve 180 mesh boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerinin hızları sırası ile 71.42, 88.56 ve 99.17 m/s olarak hesaplanmıştır.

Cam küre 100-200 mesh (100-200  $\mu\text{m}$ ), 200-300 mesh (200-300  $\mu\text{m}$ ) ve 300-400 mesh (300-400  $\mu\text{m}$ ) boyutlarındaki aşındırıcı partiküllerinin çarpma hızlarının hesaplanması ile aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile ortalama partikül çarpma hızlarının düzgün bir değişim göstermediği sonucuna varılmıştır. Eşit şartlarda 200-300 mesh (200-300  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki cam küre aşındırıcısının çarpma hızı minimumken 300-400 mesh (300-400  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki cam küre aşındırıcısının çarpma hızı maksimum, 100-200 mesh (100-200  $\mu\text{m}$ ) boyutundaki cam küre aşındırıcısının ise diğer boyutlara nazaran orta hızda olduğu hesaplanmıştır. Cam küre 100-200 mesh, 200-300 mesh, 300-400 mesh boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerinin hızları sırası ile 48.58, 31.25 ve 95.61 m/s olarak hesaplanmıştır.

Çelik bilya (212-600  $\mu\text{m}$ ) boyutlarındaki aşındırıcı partiküllerinin çarpma hızlarının hesaplanması ile çelik bilya aşındırıcı partikülün diğer aşındırıcı partikül çarpma hızlarına göre bariz bir düşüş olduğu sonucuna varılmıştır. Çelik bilya aşındırıcı partikülünün hızı 14.30 m/s olarak hesaplanmıştır.

Erozyon oranını hesaplamak amacı ile farklı tür ve boyuttaki aşındırıcı partiküllerin debileri hesaplanmıştır. Ayrıca alümina 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh aşındırıcı partikül için partikül boyutunun artışı ile kütleli debinin arttığı, garnet 60 mesh, 80 mesh ve 180 mesh aşındırıcı partikül için partikül boyutunun artışı ile kütleli debinin azaldığı, cam küre 100-200 mesh, 200-300 mesh ve 300-400 mesh aşındırıcı partikül için partikül boyutunun artışı ile kütleli debinin azaldığı, çelik bilya

aşındırıcı partikül için ise diğer aşındırıcı partiküllere nazaran kütleli debinin en yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Erozyon oranına aşındırıcı partikül tür ve boyutunun etkisi:

AA6082 T6 alüminyum alaşımı için 3bar partikül püskürtme basıncı altında, 90° partikül çarpma açısında ve 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcıları kullanılarak ASTM G 76 standartlarına göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Alümina ve garnet aşındırıcı partikülleri için küçük partiküllerin büyük partiküllere kıyasla alüminyum alaşımında daha fazla kütle kaybına yol açtıkları belirlenmiştir. Cam küre aşındırıcı partikülleri hedef malzeme üzerinde erozif aşınma meydana getirmemiş aksine kırılan partikül parçacıkları hedef malzeme üzerine yapışarak alüminyum alaşımının ağırlığını arttırmıştır. Çelik bilya ise alüminyum alaşımı hedef malzemeyi dövmüş üzerinden ufak parçaların kopmasına sebep olmuş fakat erozyon süresi arttıkça küçük boyutlu çelik bilyaların hedef malzeme üzerine yapışması sonucu malzemenin ağırlığı artmıştır.

Katı partikül erozyonunda operasyon parametrelerinin yüzey morfolojisine etkilerini incelemek amacı ile aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri alınmıştır.

Aşındırıcı partikül tür ve boyutunun yüzey morfolojisine etkisi:

Aşındırıcı partikül tür ve boyutunun yüzey morfolojisine etkisini incelemek amacı ile 3'er farklı partikül boyutlarına sahip alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcı partikülleri ile 90° çarpma açılarında ve 3 bar püskürtme basınçlarında aşındırılan malzeme yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiştir.

Büyük boyutlu alümina ve garnet aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde daha ağır bir tahribata yol açtıkları görülmektedir. Buna karşın küçük boyutlu alümina ve garnet aşındırıcı partikülleriyle aşındırılan malzemelerde aşınma hasarının küçük boyutluyla aşındırılan malzemelere kıyasla daha az olmasına rağmen aşınma izlerinin çok daha fazla sayıda oldukları gözlenmektedir. Küçük boyutlu alümina ve garnet aşındırıcı partikülleri yüzeyde derinliği ve genişliği daha düşük izler oluşturmalarına

rağmen hedef malzeme yüzeyinde çok sayıda aşınma izine ve hasarına yol açmaktadırlar.

Cam küre aşındırıcı partikülleri hedef malzemenin yüzeyinde bir hasar meydana gelmediği aksine kırılan cam küre parçacıklarının hedef malzeme yüzeyine yapıştığı görülmektedir. Yapışan bu parçacıklar hedef malzemenin ağırlığını deney öncesi ağırlığına göre arttırmıştır. Büyük boyutlu cam kürelerin küçük boyutlu cam kürelere nazaran daha fazla malzeme üzerine saplandığı dolayısıyla hedef malzeme ağırlığını daha fazla artırdığı saptanmıştır.

Çelik bilya aşındırıcı partikülleri hedef malzemenin yüzeyinde mikro sürme ve dövme mekanizmaları oluşturmuş ancak malzeme yüzeyinden parça kopmadığı ve küçük boyutlu çelik bilya aşındırıcılarının malzeme içerisine gömüldüğü için hedef malzeme ağırlığında bir artış görülmektedir.

AA6082 T6 alüminyum alaşımın katı partikül erozyonu davranışı karakterini daha detaylı inceleyebilmek için aşınmış yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerleri optik profilometre yardımı ile hesaplanmış, 2 ve 3 boyutlu görüntüleri alınmıştır.

Yüzey pürüzlülüğüne aşındırıcı partikül tür ve boyutunun etkisi:

Ortalama pürüzlülük değerine aşındırıcı partikül tür ve boyutunun etkisini incelemek amacıyla alümina (60, 80, 120 mesh), garnet (60, 80, 180 mesh), cam küre (100-200, 200-300, 300-400 mesh) ve çelik bilya aşındırıcı partikülleri ile aşındırılmış tüm numune yüzeyleri optik profilometre yardımı ile incelenmiştir.

Küçük boyutlu alümina, garnet ve cam küre aşındırıcı partikülleri kullanılarak aşındırılan yüzeylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü büyük boyutundaki alümina, garnet ve cam küre aşındırıcı partikülleri kullanımına kıyasla daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum büyük partiküllerin küçük partiküllere kıyasla daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmalarına ve buna bağlı olarak malzeme yüzeyine çarptıklarında daha yüksek oranda plastik deformasyon gerçekleştirmeleri ile açıklanabilir.

Çelik bilya aşındırıcı partikül kullanılarak aşındırılan yüzeylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü diğer aşındırıcı partiküllere nazaran daha fazla olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] Güteryüz K., Deformasyon Yaşlanması AA7075 Alaşımının Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2011, 284274.
- [2] Aktuğ S. L., İkiz Merdane Döküm Yöntemiyle Üretilmiş AA1050 ve AA3003 Alüminyum Alaşımlarının Termomekanik İşlemler Sonrası Mikro Yapı İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2009, 245291.
- [3] Yıldırım Y.. Alüminyum Alaşımlarının Katı Partikül Erozyonu Davranışlarının Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.
- [4] Bayındır M. K., Katı Parçacık Erozyon Aşınmasının Alüminyum Alaşımları Üzerinde Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009, 237493.
- [5] Başer T. A., Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 2012, **635**, 51-58.
- [6] [https://www.tubitak.gov.tr/tubitak\\_content\\_files/vizyon2023/mm/Ek2b.pdf](https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023/mm/Ek2b.pdf) (Ziyaret Tarihi: 07.09.2017).
- [7] <http://www.assan.com.tr/NDC/Generic/Content/Uygulama/Details.aspx?ID=41>, (Ziyaret Tarihi: 06.09.2017).
- [8] Demir E., Alüminyum Alaşımlarda Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008, 244006.
- [9] TÜBİTAK-MAM, OSD, “Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği”, Dr. Havva Kazdal Zeytin, Mayıs 2000.
- [10] Tımaç G., Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 185281.
- [11] Rooy, E. L., “Properties and Selection Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials”, Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys, Vol. 2, A.S.M Handbook, *American Society For Metals*, Ohio, 1995, p. 1-27.
- [12] [http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/U%C3%A7ak%20Malzemeleri.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/U%C3%A7ak%20Malzemeleri.pdf), (Ziyaret Tarihi: 07.10.2017).

- [13] Vingsbo O., Wear and wear mechanisms, Proc. Intl. Conf. *Wear of Materials*, ASME, New York, 1979.
- [14] Sundararajan G., Roy M., Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures, *Tribology International*, 1997, **30**, 339-359.
- [15] Bağcı M., İmrek H., CuZn10 ve CuSn10 Bakır alaşımlarının erozif aşınması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye, 2009.
- [16] VDI 3822, Schadensanalyse, Schäden durch tribologische Beanspruchungen, in "VDI Handbuch Werkstofftechnik, Konstruktion, Betriebstechnik Teil 4" (VDI Verlag, Düsseldorf, 1989) Blatt 5.2.
- [17] Finnie I., Some reflections on the past and future of erosion: Part I, *Wear*, 1995, **186**, 1-10.
- [18] Veinthal R., Tarbea R., Kulua P., Kaerdi H., Abrasive erosive wear of powder steels and cermets, *Wear*, 2009, **267**, 1838–1844.
- [19] Hutchings, I.M., 1996. *Tribology; Friction and Wear of Engineering Materials*, St. Edmundsbury Press, London.
- [20] Czichos H., K.H. Habig, Reibung und Verschleiß, System analyse, Pruftechnik, Werkstoffe und Konstruktion selement, Friedr. Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, *Tribologie-Handbuch*, Wiesbaden, 128, (1992).
- [21] Finnie I., Some reflections on the past and future of erosion: Part I, *Wear*, 1995, **186**, 1-10.
- [22] Tsiang T.H., Survey of sand and rain erosion of composite materials, *Journal of Composite Technology and Research*, 1986, **8**, 154.
- [23] Liebhard M., Levy A., The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals, *Wear*, 1991, **151**, 381-390.
- [24] Tilly G. P., Erosion Caused by Airborne Particles, *Wear*, 1969, **14**, 63-79.
- [25] Arnold J. C., Hutchings M., A model for the erosive wear of rubber at oblique impactangles, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1992, **25**, A222-A229.
- [26] Tewari U.S., Harsha A.P., Hager A.M., Friedrich K., Solid particle erosion of carbon fibre and glass fibre epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 2003, **63**, 549-557.
- [27] Hager A., Friedrich K., Dzenis Y.A., Paipetis S.A., Study of erosionwear of advanced polyme rcomposites. In: Street K, editor. ICCM-10 Conference Proceedings, Whistler, BC, Canada. Cambridge UK, 155-162, 1995.

- [28] Stachowiak G.W., Batchelor A.W., Engineering Tribology, *Tribology Series*, 1993, **24**, 577-586.
- [29] Heuer V., Walter G., Hutchings I.M., A study of the erosive wear of fibrous ceramic components by solid particle impact, *Wear*, 1999, 225–229, 493–501.
- [30] Harsha A.P., Kumarjha S., Erosive wear studies of epoxy-based composites at normal incidence, *Wear*, 2008, **265**, 1129–1135.
- [31] Zhou J., Bahadur S., Erosion-corrosion of Ti-6Al-4V in elevated temperature environment, *Wear*, 1995, **186**, 332-339.
- [32] Barkoula N. M., Kocsis J. K., Processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymer sand their composites, *Journal of Materials Science*, 2002, **37**, 3807-3820.
- [33] Anand K., Hovis S. K., Conrad H., Scattergood R. O., Flux effect in solid particle erosion, *Wear*, 1987, **118**, 243-257.
- [34] Mondal D.P., Das S., Jha A.K., Yegneswaran A.H., Abrasive wear of Al alloy–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle composite: a study on the combined effect of load and size of abrasive, *Wear*, 1998, **223**, 131–138.
- [35] Mondal D.P., Das S., High stress abrasive wear behaviour of aluminium hard particle composites: Effect of experimental parameters, particle size and volume fraction, *Tribology International*, 2006, **39**, 470–478.
- [36] Dunder M., Inal O.T., Solid particle erosion of brass with 5 and 25 mm particles at normal incidence, *Wear*, 1999, **224**, 226–235.
- [37] Amirthan G., Udayakumar A., Prasad B., Balasubramanian M., Solid particle erosion studies on biomorphic Si/SiC ceramic composites, *Wear*, 2010, **268**, 145–152.
- [38] Chen Q., Li D.Y., Computer simulation of solid-particle erosion of composite materials, *Wear*, 2003, **255**, 78–84.
- [39] Tabakoff W., Vittal B.V.R., High Temperature Erosion Study of INCO 600 Metal, *Wear*, 1983, **86**, 89-99.
- [40] Fowler G., Shipway P.H., Pashby I.R., Abrasive water-jet controlled depth milling of Ti-6Al-4V alloy- an investigation of the role of jet-work piece traverse speed and abrasive grit size on the characteristics of the milled material, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **161**, 407-414.
- [41] Sinmazcelik T., Sari N.Y., Eroder Size Effect on the Erosion of Polyphenylene Sulfide Composite, *Polymer Composites*, 2010, **31**, 985-994.

- [42] 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.
- [43] Elleuch K., Mezlini S., Guermazi N., Kapsa P., Abrasive wear of aluminium alloys rubbed against sand, *Wear*, 2006, **261**, 1316–1321.
- [44] Li Y., Burstein G.T., Hutchings I.M., The influence of corrosion on the erosion of aluminium by aqueous silica Slurries, *Wear*, 1995, **186**, 515-522.
- [45] Desale G.R., Gandhi B.K., Jain S.C., Particle size effects on the slurry erosion of aluminium alloy (AA 6063), *Wear*, 2009, **266**, 1066-1071.
- [46] Talia J.E., Ballout Y. A., Sacttergood R.O., Erosion ripple formation mechanism in aluminum and aluminum alloys, *Wear*, 1996, **196**, 285-294.
- [47] Jha A.K., Batham R., Ahmed M., Majumder A.K., Modi O. P., Chaturvedi S., Gupta A. K., Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum, *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 2011, 21, 32-38.
- [48] Das S., Mondal D.P., Sawla S., Solid particle erosion of Al alloy and Al-alloy composites: Effects of heat treatment and angle of impingement, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, **35A**, 1369-1379.
- [49] Fang C.-K., Chuang T.H., The effect of humidity on the erosive wear of 6063 Al alloy, *Wear*, 1999, **236**, 144–152.
- [50] Tan K.S., Wood R.J.K., Stokes K.R., The slurry erosion behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF) sprayed aluminium bronze coatings, *Wear*, 2003, **255**, 195–205.



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Hakan S.**, Fidan S., Sinmazçelik T., Solid Particle Erosion Effect On Surface Plastic Deformation Of Aluminum Alloys, *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu* UMAS, Düzce, 11-13 Eylül 2017.
- [2] **Hakan S.**, Fidan S., Sinmazçelik T., Solid Particle Erosion Effect On Surface Plastic Deformation Of Aluminum Alloys, *El Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt: 5 No: 1, 2018 (243-250).



## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Çanakkale’de doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Çanakkale’de tamamladı. 2006 yılında başladığı Hava Astsubay Meslek Yüksek Okulu Uçak Bakım Bölümü’nden 2008 yılında Uçak Bakım Astsubayı olarak mezun oldu. 2009 yılında başladığı Anadolu Üniversitesi İşletme Bölümü’nden 2013 yılında mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2008 yılından itibaren Deniz Hava Komutanlığı bünyesinde Uçak Bakım Astsubayı olarak görev yapmaktadır.

