

T. C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATI PARÇACIK EROZYON AŞINMASININ ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ

MURAT KERİM BAYINDIR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Konya, 2009

T. C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KATI PARÇACIK EROZYON AŞINMASININ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

MURAT KERİM BAYINDIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2009

T. C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KATI PARÇACIK EROZYON AŞINMASININ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

MURAT KERİM BAYINDIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 01/06/2009 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Oybirliği İle Kabul Edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK

(Danışman)

Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR

(Üye)

Yrd. Doç. Dr. A.Lütfi KURŞUNEL

(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KATI PARÇACIK EROZYON AŞINMASININ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Murat Kerim BAYINDIR

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İmrek

2009, 84 Sayfa

Jüri: Prof. Dr. Ali Ünüvar

Yrd. Doç. Dr. A. Lütfi Kurşunel

Yapılan bu deneysel çalışmada katı parçacık erozyon aşınmasının alüminyum alaşımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada deney numunesi olarak 1050, 3003, 5754, 6061 ve 7075 (EN 573) alüminyum alaşımları, aşındırıcı partikül olarak ta Al_2O_3 (200 μ m-400 μ m) ve çelik grid (G40-400 μ m) kullanılmıştır. Deneyler 30°, 45°, 60° olmak üzere üç farklı çarpma açısında yapılmıştır.

Deneylerde partikül hızı basınç değişimi kullanılarak ayarlanmış olup deneylerde kullanılan hız değeri 30 m/s' dir.

Yapılan çalışmada katı parçacık aşınmasının alüminyum alaşımları üzerindeki etkisinin, çarpma açısı, alaşım cinsi ve sertliği, aşındırıcı partikül boyutu ve cinsi ile aşındırıcı partikül miktarına bağlı değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak ifade edilmiş ve bu grafikler irdelenmiştir.

Bu irdeleme sonucunda aşındırıcı partikül çeşidinin ve partikül boyutunun erozyon oranına büyük etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı boyuttaki çelik grid'in Al_2O_3 'e göre daha fazla aşındırma sağladığı ve yine aşındırıcı partikül boyutunun arttırılması ile erozyon oranının arttığı görülmüştür. Üç farklı çarpma açısı arasında en yüksek erozyon oranı 30° çarpma açısında gerçekleşmiş olup kullanılan deney numuneleri arasında ise en yüksek erozyon oranı 1050 alüminyum alaşımında ortaya çıkmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan aşındırıcı partikül miktarının artırılması ile erozyon oranı değerlerinde artış gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı partikül erozyon aşınması, çarpma açısı, alüminyum alaşımları, partikül boyutu, partikül cinsi, partikül miktarı, erozyon oranı.

ABSTRACT**MS Thesis****EXPERIMENTAL INVESTIGATION EFFECTS OF SOLID PARTICLE
EROSION WEAR ON ALUMINIUM ALLOYS****Murat Kerim BAYINDIR****Selçuk University****Graduate School of Natural and Applied Sciences****Department of Mechanical Engineering****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hüseyin İMREK****2009, 84 Page****Jury: Prof. Dr. Ali Ünüvar****Assist. Prof. Dr. A. Lütfi Kurşunel**

In this experimental work effects of solid particle erosion on aluminium alloys was investigated. During the work as experiment specimen 1050, 3003, 5754, 6061, 7075 (EN 573) aluminium alloys, as abrasive particle Al_2O_3 (200 μm – 400 μm) and steel grid (G40-400 μm) particles were used. Experiments were applied for three different impact angles as 30°, 45°, 60°.

Particle speed is regulated with using compression changing and speed value using in the experiments is 30 m/s.

In this experiment, changings of effects of solid particle erosion on aluminium alloys related with impact angle, alloy type and hardness, size of abrasive particle and type with abrasive particle amount were invesitgated. Achieved results are stated graphically and these graphics were examined.

It is resulted at the end of this examine that type of abrasive particle and size of particle are extremely effective on erosion rate. It was seen in the same size that steel grid provides more erosion by comparison Al_2O_3 in same size and with increase of abrasive particle size erosion rate increases. Highest erosion rate obtained at 30° between three different impact angles and highest erosion rate seen at 1050 aluminium alloy between used experiment specimens. Furthermore it is observed that erosion rate increases with remaining of abrasive particle amount.

Keywords: Solid particle erosion, impact angle, aluminium alloys, particle size, particle type, particle amount, erosion rate.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve çalışmanın her aşamasında bana yardımcı olan ve destek veren tez danışmanın Sayın Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK' e, deneyin yapılmasında gösterdiği ilgi ve yardımlarından dolayı Arş. Gör. Mehmet BAĞCI'ya, teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam süresince bana her zaman moral veren ve destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
TABLO LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. TEORİK ESASLAR	12
3.1. Aşınma	12
3.1.1. Kayma aşınması	13
3.1.2. Sert parçacıkların sebep olduğu aşınma	14
3.1.2.1. Adezyon aşınması	14
3.1.2.2. Abrasyon aşınması	18
3.1.2.3. Mekanik korozyon aşınması	19
3.1.2.4. Yorulma aşınması (pitting)	20
3.1.2.5. Erozyon aşınması	21
3.1.2.5.1. Erozyon aşınmasında esas alınan modeller.....	23
3.1.2.5.2. Plastik deformasyona bağlı erozyon aşınması	26
3.1.2.5.3. Erozyonda malzeme kaldırma mekanizması ve kuvvet analizi .	30
3.1.2.5.4. Tipik K değerleri ve erozyon oranının değişimi	32
3.1.2.5.4.1. Metallerin erozyonu ile parçacık hızının ilişkisi.....	35
3.1.2.5.4.2. Sertliğin Abrezif Aşınma Oranına Etkisi	38
3.1.2.5.4.3. Abrezif parça büyüklüğünün aşınma oranına etkisi.....	40
3.1.2.5.5. Erozyon aşınması test metotları	41
3.1.3. Alüminyum ve alaşımlarının aşınması.....	46
3.1.3.1. Alüminyum alaşımlarının kimyasal yapısına göre Sınıflandırılması	47
3.1.3.2. Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlem durumuna göre sınıflandırılması	
ve alaşım elementlerinin alüminyum alaşımlarına etkileri	48
4. MATERYAL VE METOT	52
4.1. Test Metodu	52
4.2. Deney Tesisatı	53
4.3. Deney Numuneleri ve Aşındırıcı Partiküllerin Özellikleri	56
4.3.1. Deney numuneleri	56
4.4. Deney Prosedürü	60
5.DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	62
5.1.Deneysel Sonuçlar.....	62
5.2.Tartışma.....	84
6. SONUÇLAR	90
7. KAYNAKLAR	91
8. EKLER.....	95

ŞEKİL LİSTESİ

ŞEKİLLER	SAYFA
Şekil 3.1 Adezyon aşınması	14
Şekil 3.2 Adezyon aşınmasının oluşması	
(a) yüzeylerin birbirine temas ettiği pürüzlülük tepeleri	
(b) kayma hareketi sonunda meydana gelen aşınma.....	15
Şekil 3.3 Aşınma çeşitleri	
(a) çizikler şeklinde oluşan aşınma izleri	
(b) parlatma şeklinde oluşan aşınma izleri	
(c) aşınan tabaka kalınlığı.....	15
Şekil 3.4 Adezyon aşınmasının zamanla gelişmesi	
(a) farklı malzemelerdeki aşınma zaman diyagramı	
(b) aşınmanın zamana bağlı değişimi	
(c) rodajdan önce ve rodajdan sonraki yüzey durumu.....	16
Şekil 3.5 Abrasyon aşınması.....	18
Şekil 3.6 Mekanik korozyon	19
Şekil 3.7 Yumuşak malzeme erozyonunun teorik temas geometrisi	
(a) Düzgün bir yüzeyi kesmekte olan sert bir parçacığın teorik iki boyutlu idealize edilmiş modeli	
(b) Teorik yumuşak malzeme erozyonunun çarpma açısına olan bağımlılığı.....	24
Şekil 3.8 Erozyonun çarpma açısına bağlı değişimi.....	25
Şekil 3.9 Parçacığın plastik deforme edilebilen bir yüzeye batma prosesleri	27
Şekil 3.10 Kütle kaybının aşındırıcı parçacıklarının toplam kütesine bağımlılığı....	29
Şekil 3.11 Düşük ve yüksek açılarda malzeme ayırma mekanizması	
(a) Düşük çarpma açısında ağız formasyonu	
(b) Yüksek çarpma açısında ağız formasyonu.....	31
Şekil 3.12 Yüzeyle temasta olan partikül üzerine etki eden kuvvetler.....	31

Şekil 3.13 Sert parçacıkların yumuşak malzemeye çarpması sonucunda oluşan şekiller.....	33
Şekil 3.14 Sert parçacıkların metal yüzeylerinde oluşturduğu erozyon	
(a) 30° çarpma açısında yumuşak çelik	
(b) 90° çarpma açısında alüminyum.....	34
Şekil 3.15 Partikülün çarpma öncesi ve sonrası hızları.....	36
Şekil 3.16 Farklı araştırmalardan elde edilen Bakırın erozyon oranları.....	36
Şekil 3.17 Aşınma oranı – sertlik çizgisi.....	38
Şekil 3.18 SiO ₂ ve SiC abrezifleriyle yapılan aşınmanın karşılaştırılması.....	38
Şekil 3.19 Metallerin, abrezif parçacık boyutunun bir fonksiyonu olarak aşınma oranı.....	39
Şekil 3.20 Parçacık büyüklüğünün erozyon oranına etkisinin şematik gösterimi.....	40
Şekil 3.21 Eroziif aşınmaya maruz kalan numunelerin farklı gösterilişi	
(a) jet çarpma metodu	
(b) sirkülasyon metodu	
(c) santrifüj hızlandırıcı	
(d) dönen kol metodu	42
Şekil 3.22 Gaz asıllı parçacık eroziif deneylerinde kullanılan çift disk parçacık hızı ölçme metodu.....	43
Şekil 3.23 Çift disk metodu için partikül vuruş hızı ölçümü.....	44
Şekil 4.1 Deney tesisatında kullanılan temas geometrisi.....	52
Şekil 4.2 Deney tesisatı şematik resmi.....	53
Şekil 4.3 Deney tesisatı fotoğrafları	
(a) ön görünüş	
(b) sol yan görünüş.....	54
Şekil 4.4 Deney tesisatı-numune tutucu tabla ve püskürtücü nozul üstten görünüş...	55
Şekil 4.5 Deney tesisatı-püskürtücü nozul.....	55
Şekil 4.6 Numune ölçüleri.....	57
Şekil 4.7 Kullanılan deney numuneleri (1050).....	57
Şekil 4.8 Kullanılan deney numuneleri (6061).....	57
Şekil 4.9 Kullanılan deney numuneleri (7075).....	58
Şekil 4.10 Kullanılan deney numuneleri.....	58

Şekil 4.11 Aşındırıcı partiküllerin genel görüntüsü.....	59
Şekil 5.1 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 200µm).....	62
Şekil 5.2 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 200µm).....	63
Şekil 5.3 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 200µm).....	63
Şekil 5.4 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 200µm).....	64
Şekil 5.5 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 200µm).....	64
Şekil 5.6 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 200µm).....	65
Şekil 5.7 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 400µm).....	66
Şekil 5.8 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 400µm).....	66
Şekil 5.9 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 400µm).....	67
Şekil 5.10 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 400µm).....	67
Şekil 5.11 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- Al ₂ O ₃ 400µm).....	68
Şekil 5.12 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg-Al ₂ O ₃ 400µm)	68
Şekil 5.13 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- çelik grid 400µm).....	69
Şekil 5.14 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- çelik grid 400µm).....	70
Şekil 5.15 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg- çelik grid400µm).....	70

Şekil 5.16 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg-çelik grid 400µm).....	71
Şekil 5.17 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg-çelik grid 400µm).....	71
Şekil 5.18 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma ilişkisi (30 kg-çelik grid 400µm).....	72
Şekil 5.19 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma ilişkisi (30 kg-çelik grid 400µm).....	73
Şekil 5.20 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg-Al ₂ O ₃ 400µm)	73
Şekil 5.21 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (30 kg-Al ₂ O ₃ 200µm).	74
Şekil 5.22 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 200µm).....	74
Şekil 5.23 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 200µm).....	75
Şekil 5.24 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 200µm).....	75
Şekil 5.25 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 200µm).....	76
Şekil 5.26 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 200µm).....	76
Şekil 5.27 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60kg-Al ₂ O ₃ 200µm)	77
Şekil 5.28 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 400µm).....	78
Şekil 5.29 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 400µm)	78
Şekil 5.30 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 400µm).....	79
Şekil 5.31 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 400µm).....	79

Şekil 5.32 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg- Al ₂ O ₃ 400µm).....	80
Şekil 5.33 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 400µm)	80
Şekil 5.34 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60kg- çelik grid 400µm)	81
Şekil 5.35 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60kg- çelik grid 400µm)	81
Şekil 5.36 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60kg- çelik grid 400µm)	82
Şekil 5.37 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg- çelik grid 400µm)	82
Şekil 5.38 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg- çelik grid 400µm)	83
Şekil 5.39 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60kg-çelik grid 400µm)	83
Şekil 5.40 Tüm alüminyum alaşımlar için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60kg- çelik grid 400µm)	84
Şekil 5.41 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 400µm)	85
Şekil 5.42 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (60 kg-Al ₂ O ₃ 200µm)	85
Şekil 5.43 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (a) 30 kg-çelik grid 400µm için (b) 60 kg-çelik grid 400µm için.....	86
Şekil 5.44 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (a) 30 kg-Al ₂ O ₃ 200µm için (b) 60 kg-Al ₂ O ₃ 200µm için	87
Şekil 5.45 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi (a) 30 kg-Al ₂ O ₃ 400µm için (b) 60 kg-Al ₂ O ₃ 400µm için	88

TABLO LİSTESİ

TABLolar	SAYFA
Tablo 3.1 Katı parça erozyonuna maruz kalan komponentlere örnekler.....	22
Tablo 3.2 Abrezif parçalarının mekanik özellikleri	39
Tablo 3.3 Alüminyum alaşımlarının karşılaştırılabileceği standartlar	51
Tablo 3.4 Deney numunelerinin mekanik özellikleri	56
Tablo 3.5 Deney numunelerinin bileşimi.....	59
Tablo 3.6 Aşındırıcı partiküllerin kimyasal yapısı	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

K	Aşınma katsayısı
h_a	Aşınan bu tabakanın kalınlığı, mm
A_a	Aşınma alanı, mm^2
p	Temas yüzeylerinde meydana gelen basınç, N/mm^2
m	Aşındırıcı partikül kütlesi (g)
$A(x)$	Aşındırıcı partikülün oluşturduğu deformasyon alanı (mm^2)
H	Malzemenin sertliği, N/mm^2
v	Parçacığın son hacmi, mm^3
ρ	Erozyona maruz kalan malzemenin yoğunluğu, g/mm^3
K	Malzemedeki aşınma çukurunu tanımlayan boyutsuz faktör
E	Erozyon aşınmasını tanımlayan oran
θ	Çarpma açısı, $^\circ$
E	Elastisite modülü
HB	Brinell sertlik değeri
HRC	Rockwell C sertlik değeri
F_N	Normal kuvvet, N
F_S	Sürtünme kuvveti, N
μ	Sürtünme katsayısı
A	Kesit alanı, mm^2
A_a	Aşınma alanı, mm^2
μ_s	Statik sürtünme katsayısı
v	Kayma hızı, m/s
v_h	Aşınma hacmi, mm^3
h_a	Aşınan tabakanın kalınlığı, mm
k	Boyutlu aşınma katsayısı, $\text{mm}^3/\text{N.m}$
k_a	Malzeme çiftine ait deneyle tayin edilen faktör
t	Deney tayin süresi, s

dh/dt	Pratikteki aşınma hızı, mm/s
h_{em}	Aşınma sınırı, mm
U	Parçacığın başlangıçtaki hızı, m/s
x	Parçacığın batma prosesinde katettiği mesafe, mm
d	Parçacığın durma noktasındaki katettiği mesafe, mm
α	Normal geliş açısı, °
ε_c	Aşınma olayının gerçekleştiği plastik zorlama, teorik erozyon direnci
σ	Küresel erozyon parçacıklarının yoğunluğu, g/mm ³
V_n	Parçacık eksenel hızı, m/s
V_t	Parçacık eksenel hızı, m/s
G	Parçacık ağırlık merkezi
HV	Vickers sertlik değeri
K_c	Kırılma Dayanımı, MPa m ^{1/2}
d_c	Aşındırıcı partikül kritik çap değeri, mm
S	Partikül ilk vuruş - ikinci vuruş arası mesafe, cm
ϑ	Disk çevrim hızı, s ⁻¹
V	Partikül akış hızı, m/s
r	Disk yarıçapı, cm
L	Çift disk metodu iki disk arası mesafe, cm

KISALTMALAR

DIN	Deutsches Institut für Normung (Alman Norm Enstitüsü)
AISI	American Iron And Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu)
SAE	Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Topluluğu)
EN	European Standarts (Avrupa Birliği Standartları)
EN573	European Standarts of Aluminium and Aluminium Alloys (Avrupa Birliği Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları Standartı)
ETİAL	Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri Alüminyum Ürünü
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
ABD(AA)	A.B.D. The Aluminium Association (A.B.D.Alüminyum Birliği)
ISO	International Standarts Organization (Uluslararası Standartlar Birliği)

1. GİRİŞ

Teknik anlamda aşınma; kullanılan malzemelerin, başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulmasıdır.

Bir başka tarifle aşınma; katı cisimlerin yüzeylerinden ufak parçacıkların veya ince parçaların ayrılması ile bir malzeme kaybı şeklinde de tanımlanır. Yüzey değişikliği, çeşitli sebeplerle veya parçanın zorlanma durumuyla ilgilidir. Mekanik, fiziksel, elektriksel veya termik sebeplerle de aşınma olduğu belirtilmiş fakat korozyon tarif dışı bırakılmıştır.

Aşınma tariflerinin üzerinde durduğu önemli noktalar şunlardır;

- Mekanik bir etkinin bulunması,
- Sürtünmenin olması (izafi hareket),
- İzafi hareketin yavaş ve sürekli olması (ani hareket ve darbe olmamalı),
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İstenmediği halde meydana gelmesidir.

Yukarıda belirtilen hususlar, aşınmanın gerek ve yeter şartları olarak kabul edilmektedir. Aşınma, makine tasarımında çok önemlidir. Temas eden yüzeylerde sürtünme kuvvetleri güç kaybına sebep olmakta iken aşınma işleme toleranslarının azalmasına ve malzemelerin kullanılamaz duruma gelmesine neden olmaktadır.

Bir makinede aşınması muhtemel parçaların sürekli olarak kontrol altında tutulması lazımdır. Çünkü aşınmış makine parçası, görevini tam olarak yapamaz, belki de tamamen devre dışı kalır ve çalışan sistemin tehlikeli bir pozisyona girmesine yol açabilir.

Aşınma sorunlarının yaşandığı tesislerde, meydana gelen aşınma maliyetleri dört ana grupta toplanabilir.

Bunlar;

- Aşınmış ve dolayısıyla kullanılamaz duruma gelmiş parçanın yenilenme maliyeti,
- Aşınma yüzünden tesisteki süreç parametrelerinin meydana getirdiği yani dolaylı olarak üretimin arttırılamaması vb. maliyet.
- Parçanın onarımı için tesisin durdurulması sebebiyle oluşan üretim kaybı ve dolayısıyla üretimin durdurulması ve üretim işlemlerinin yeniden başlatılması (ön ısıtma gibi) için harcanan maliyet,
- Aşınmanın önceden tahmin edilememesi yüzünden meydana gelecek kazaların sebep olduğu maliyetlerdir.

Aşınmanın firmalar açısından önemi ise şu şekilde açıklanabilir. Herhangi bir firmada yukarıdaki aşınma maliyetleri ne kadar az olursa o firmanın rakip firmalarla rekabet edebilme şansı o nispette artacaktır.

Bu sebeplerden dolayı tasarımcı öncelikli olarak sistemde oluşan aşınmanın önemli olup olmadığını saptamalı ve eğer sistemdeki aşınma önemliyse ekonomi ve tasarım üzerindeki diğer sınırlamalar dâhilinde aşınma oranını kabul edilebilir seviyeye indirecek önlemler almalıdır.

Aşınma; malzeme, kullanılan yağlayıcılar, kayma hızı, sıcaklık, kayma yüzeyleri arasındaki normal temas basıncı, kayma süresi, yüzey pürüzlülüğü, sertlik vs. gibi birçok parametreye bağlı olarak değişim göstermektedir. Aynı zamanda bu ve benzeri parametrelere bağlı olarak değişik tipler arz etmektedir. Erozyon aşınması da katı parçacıklar içeren bir akışkanın bir yüzeye çarpması durumunda oluşur. Başka bir tarifle, belirli bir hıza sahip olan katı parçacıkların metal bir yüzeye çarptığı zaman, yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybı meydana getirmesi sonucu oluşan aşınmadır. Yüzeyin üst tabakasından malzeme kaybının devam etmesi halinde kullanım yerine bağlı olarak ciddi mekanik olumsuzluklara yol açabilir.

Malzemeler çalışma durumlarında değişik ortamlar içerisinde bulunurlar. Dolayısıyla değişik etkilere maruzdurlar. Bu etkileşimler sebebiyle malzemelerin mekanik özellikleri ve fiziksel özellikleri yani malzemelerin kullanılabilirliği olumsuz yönde etkilenebilir. Makine elemanlarının erozif ortamlarda bulunması

durumunda yüzeylere sıvı damlaları veya katı parçacıklarının çarpması sonucu elemanların ömürlerinde azalmalar meydana gelmektedir.

Bozulma mekanizmaları bir malzemeden diğerine değişiklik gösterir. Mesela metallerde görünen yüzey bozulması, seramik veya polimer malzemelerdekinden farklıdır. Metal malzemelerde yüzey bozulması, oksit tabakası oluşumu veya aşınma ile yüzeyden malzeme kaybı şeklinde olurken diğerlerinden daha farklıdır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, bugün günlük yaşantımıza kadar girmiş ve yaşamımızın ayrılmaz bir endüstriyel malzemesi konumuna gelmiş olup, gıda, kimya, otomotiv ve gemi yapım, taşıt yapım, uçak yapım endüstrisi, makina ve cihaz yapımı ile mimari alanda ve inşaat sektöründe geniş kullanım alanına sahip olmuşlardır.

Alüminyum çelikten sonra günümüz endüstrisinde en fazla kullanılan metalik malzeme olan ve yer kabuğunda en çok bulunan ikinci elementtir. Bununla birlikte ekonomikliğiyle ön plana çıkan bir metal olan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafiflikleri, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, artırılmış mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için tercih edilen malzemeler konumuna gelmiştir. Yine günümüzde düşük yoğunlukları ve uygun kaynak kabiliyetleri nedeniyle kullanım alanları fazlasıyla artmıştır. Alüminyumun önemli özellikleri arasında özgül ağırlığının düşük olması, çok yumuşak ve sünek olması ile bazı alaşımlarının çökelme yolu ile sertleştirilebilmesi de sayılabilir.

Yapılan bu deneysel çalışmada deney numunesi olarak kullanılan 1050, 3003, 5754, 6061, ve 7075 alüminyum alaşımlarının, 30°, 45°, 60° çarpma açılarındaki katı parçacık erozyon aşınma davranışları incelenmiş olup deneylerde aşındırıcı olarak Al_2O_3 ve çelik grid partiküller kullanılmıştır. Öncelikle aynı boyuttaki Al_2O_3 (400 μm) ve çelik grid (400 μm) aşındırıcı partikülleri ile numuneler erozyon aşınmasına tabi tutulmuştur. Daha sonra Al_2O_3 (200 μm) ve Al_2O_3 (400 μm) aşındırıcı partikülleri ile aşındırmaya tabii tutularak erozyon oranı hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan aşındırıcı miktarları (30kg-60kg) değiştirilerek deney numunelerinin erozyon oranlarının aşındırıcı miktarına göre değişimi incelenmiştir.

Elde edilen deneysel verilerle katı parçacık aşınmasının alüminyum alaşımları üzerindeki etkisinin çarpma açısı, alaşım cinsi ve sertliği, aşındırıcı partikül boyutu ve cinsi, aşındırıcı partikül miktarına bağlı değişimleri grafiksel olarak çizilmiş olup değişimlerin nelere bağlı olduğu ile ilgili yorumlar yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Hutchings ve ark. (1999), yaptıkları çalışmada aşınmanın, mekanizmalarını tespit etmek ve erozyon oranının nicel ölçülerini elde etmek için lifli alüminyum silikat yalıtım malzemelerinin erozif aşınmasını incelemişlerdir. Gaz üflemleri bir aşındırma setinde ve silis kumu kullanılarak, erozif tanecik büyüklüğü, tanecik hızı ve aşınma esnasındaki darbe açısının etkileri tespit edilmiştir. Aşınma oranının, hıza ve en fazla 90°'lik bir çarpma açısına bağlı lineer bağıllık sergilediğini göstermişlerdir. Yüksek sıcaklıktaki endüstriyel bir tesiste lifli yalıtımın aşınma oranlarını modellemek amacıyla tanecik hareketi açısından akışkan mekanik modellerle kombine edilmiş, tanecik hızı (6 ve 12 ms⁻¹ arasında) ve çarpma açısının bir fonksiyonu (20° ve 90° arasında) olarak, aşınma oranını tahmin etmek üzere deneye dayalı bir denklem belirlemişlerdir.

Ottmüller ve ark. (1998), yaptıkları deneysel çalışmada dökme alüminyum ve paslanmaz çeliğin yanı sıra bir grup termal püskürtmeli seramik, metal ve polimer kaplamaların sert tanecik ile aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Sıvı çamur ve hava kökenli aşınma kullanılarak sertlik ve şekil gibi tanecik özelliklerinin rolü belirlenmiştir. Hava kökenli aşındırıcıda basınç ve çarpma açısı değiştirilerek her bir kaplamanın erozyon oranı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aşınma mekanizmalarını ortaya çıkarmak amacıyla aşınmış yüzeyin elektron mikroskopisi kullanılmıştır. Sert açısallık taneciklerin daha yumuşak ve yuvarlak taneciklere göre daha şiddetli hasara neden olduğu gösterilmiş ve kaplama mikro yapısı, hata yoğunluğunun aşınma mekanizmaları üzerinde kontrol etkisine sahip olduğu belirtilmiştir.

Mondal ve ark. (2004), yaptıkları deneysel çalışmada ısıtıl işlemsiz (ham döküm) ve ısıtıl işlemlili Alüminyum alaşımları ve Alüminyum alaşımlı SiC tanecikli kompozitlerin Al₂O₃ aşındırıcısı karşısındaki erozif aşınma davranışlarını farklı çarpma açılarındaki incelemişlerdir. Çarpma açısına bakılmaksızın, dökme alüminyum alaşımının ısıtıl işlemlili alaşım ve kompozitlere göre daha yüksek aşınma oranı sergilediği gösterilmiştir. ısıtıl işlemsiz ve ısıtıl işlemlili alüminyum alaşımı 45°'lik

çarpma açısında en fazla aşınma oranı sergilerken, ısıt işlemleri şartların yanı sıra ısıt işlemsiz şartlardaki kompozitin 60°'lik çarpma açısında en fazla aşınma oranı sergilediği belirlenmiştir. Alaşım ve kompozitin yüzey çalışmaları, eroziv aşınma esnasında malzeme kaybının özellikle mikro-kesme (örn: abrazif-tip) ve mikro kırılma (örn: darbe-tipi) eylemler nedeniyle olduğunu göstermiştir. Düşük bir çarpma açısında, abrazif-tipin malzemeyi uzaklaştırma açısından baskın bir faktör olduğu belirtilmiş ve daha yüksek bir çarpma açısında ise hem darbe-tipi hem de abrazif-tipin önemli rol oynadığı tespit edilmiştir.

Liang ve ark. (1995), çalışmalarında güçlendirilmiş 2024A1 ve $Al_2O_3 - SiO_2$ kısa lif takviyeli SC 122 A (ASTM) alüminyum alaşım kompozitlerinin aşınma davranışlarını üç testte incelenmiştir. Bunlar; (1) kayma aşınması, (2) darbe aşınması ve (3) kumlama aşınmasıdır. Sonuçlar kompozitin sabit bir yük ile kaymadaki aşınma direncinin matris alaşımlarınkinden belirgin şekilde daha iyi olduğunu ve SiC'nin artan parçacık hacmi ile artırıldığını; değişken yükte ise kompozitlerin aşınma direncinin hızla kötüleştiğini göstermiştir. Darbe aşınması testinde, kompozitlerin aşınma direncinde hiçbir belirgin ilerleme bulunamamış olup; kumlama ile aşınma testinde, kompozitlerin aşınma direnci matris alaşımlarınkinden çok daha kötü olduğu sonucuna varılmış ve SiC'nin artan parçacık hacmi ile aşınma direncinin düştüğü tespit edilmiştir.

Burstein ve ark. (1991), yaptıkları deneysel çalışmada hem havadan gelen hem de sıvı çamur şeklindeki, 4,5 ms⁻¹ lik bir hızda olan silis kum tanecikleri tarafından kaynaklanan alüminyum aşınmasını incelemişlerdir. Deneysel şartlar altında yapılan ölçümler, çamurlu aşınmanın hava kökenli aşınmaya göre birkaç kat daha fazla olduğunu göstermiş ve bu oranın darbe açısına güçlü bir şekilde bağlı olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Kum taneciklerinin, havadan gelen tanecik aşındırması esnasında, kompozit bir metal ve silis tabaka oluşturarak metal yüzeye yerleştiği ve aşınma oranında önemli bir fark etkeni yarattığı bulunmuştur. Yerleşen tanecikler yüzeyin sertleşmesini ve aşınma oranındaki anlamlı düşüşü hızlandırmıştır. Su ile etkilenen ara yüzlerin yağlanması, sıvı çamur erozyonu ile alüminyum aşınması üzerinde en az etkiye sahip olduğu ortaya çıkartılmıştır.

Dündar ve İnal (1999), çalışmalarında erozif tanecikler tarafından etkilenen sünek bir malzeme yüzeyinin deformasyon özelliklerini incelemişlerdir. Cu-%30 Zn (α -pirinç) yüzeyi deneysel bir ortamda ortalama 5 ila 25 μ m büyüklüğüne sahip açılmalı SiO₂ tanecikleri tarafından etki altında bırakılmıştır. Çentik büyüklükleri α -pirincin tane büyüklüğü ile kıyaslandığında çok küçük olduğu gözlemlenmiştir. Burada taneciklerin deformasyon şeklinin deforme olan tanenin mekanik etkileşimi ile şekillendiği ileri sürülmüştür. Deformasyon, tane ile sınırlı olduğu için, tek bir kristalin anizotropik mekanik özellikleri talaş oluşumundaki ve son derece asimetrik çentik geometrilerinde ki değişiklikler ile ilişkilendirilmiştir.

Yıldızlı ve ark.nın (2006), ortaklaşa yapmış oldukları çalışmada, erozif aşınma için değişik çarpma açılarında küresel grafitli dökme demirin, gri dökme demire göre daha dayanıklı olduğu ispatlanmıştır. Bu iki malzemenin erozif aşınma oranları 30°'lik çarpma açısında maksimum, 90°'lik ise minimum değerlerini göstermiştir. Çelik grid parçalarının sürekli olarak metale çarpması sonucunda aşınma yüzeyi altındaki bölgede mikro çatlakların oluşmasına neden olduğu gösterilmiştir.

Fang ve Chuang (1999), tarafından yapılan çalışmada metalik malzemelerde aşınma miktarının çarpma açısının artmasıyla azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca büyük parçacıkların küçüklere göre daha geniş alanı etkilediği görülmüştür. Genel olarak küçük çarpma açılarının aşınmada daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca büyük açılarda malzeme hacim kaybına, nemin etkisinin düşük olduğu ancak toplam hacim kaybına ise etkisinin oldukça büyük olduğu gösterilmiştir.

Goretta ve ark. (2007), tarafından yapılan çalışmada katı partikül aşındırma deneyleri, sertleştirilmiş Mg alaşımı (WE43A-T6) ve yaklaşık 12 μ m oksit tabaka üretmek için anotlanmış aynı alaşım üzerine yapılmıştır. Nominal çapları 63 μ m veya 143 μ m olan köşeli alüminyum partiküller hedefe 20° veya 90° açılarda 60 m/s veya 120 m/s hızlarla etki ettirilmiştir. Kararlı hal aşındırma oranı bir numunenin etki eden partikül ağırlığı başına ağırlık kaybı olarak belirlenmiştir. Bu aşınma şartları altında WE43A-T6 alaşım üzerindeki oksit tabaka hızla çıkartılmıştır. Ağırlık kaybı bilgisi, anotlanmış tabaka altındaki alaşımın tavlanmış alaşımdan daha hızlı aşındığını göstermiştir. Fakat derinlikleri 80 μ m'den fazla olmakla beraber her iki alaşımda

yaklaşık aynı oranlarda aşınmışlardır. Yakın yüzeyin anotlanmış alaşım için daha hızlı aşınma oranı, anotlama işleminden kaynaklanan iç oksitlenmeye bağlı yumuşamanın kaybına bağlanmıştır.

Tian ve ark. (2005), tarafından erozif aşınmada aşınma katsayısının tespiti için yapılan çalışmada aşındırıcı parçacıkların boyutu, şekli ve boyut dağılımının hedef malzemenin aşınma sonuçları üzerine büyük etkilerinin olduğu gösterilmiştir. Genelde büyük açılı aşındırıcı parçacıkların malzemede daha büyük aşınma olmasına neden olduğu ve malzeme sertliğinin, özgül enerji katsayısı ile bir ilişkisinin olduğunu göstermişlerdir.

Bose ve ark. nın (2005), yapmış oldukları çalışmada petrol endüstrisinin valf ve pompa uygulamalarında sertliğinden dolayı erozyon ve abrazyona dayanıklı iki kaplama malzemesi olan boron karpit ve elmas kaplamalarının katı parçacık erozyon aşınma mekanizmalarının mukayesesi yapılmıştır. Çalışmalarda sertlikleri ve şekilleri farklı olan kireç sodası, açılı quartz silika kumu ve elmas tanecikleri aşındırıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Çarpma hızları 130 ve 270 m/s olarak alınmıştır. Boron karpit kaplama için erozyon, aşındırıcı parçacıkların oluşturduğu radyal çatlaklar şeklinde oluşmuşken elmas kaplamadaki hasar, gerilme dalgası şeklinde çevresel bir çatlak olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca elmastaki hasarların oluşmasında daha yüksek başlangıç ve ilerleme hızlarının gerektirdiği tespit edilmiştir. Bu da boron karpite göre daha yüksek erozyon performansı olduğunu göstermiştir.

Veinthal (2007), tarafından yapılan çalışmada ise metal matris kompozit malzemelerin aşınması incelenmiş ve çalışma sonucunda düşük çarpma hızlarında (20...50 m/s) bu malzemelerin çelik malzemelere göre daha yüksek aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Tungsten karpit ile güçlendirilen malzemenin erozif aşınma direnci AISI 316 çeliğinkinden 2,5 katı daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yine düşük çarpma açılarında, WC-Co malzemeyle güçlendirilen metal matris kompozit malzemelerin aşınma direnci, %0.45 karbonlu çeliğin aşınma direncinden yaklaşık iki kat daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Hung ve ark. nın (2002), yaptıkları çalışmada östemperlenmiş sünek demirin erozyon davranışını incelemişlerdir. 420 °C' de tavllanmış numuneler 73 m/s

hız altında alüminyum oksit partikül erozyonuna maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda en yüksek östenit yapıya sahip olan ve 0,5 saatte tavlanan numunelerin diğer numunelere göre erozyona karşı daha dayanıklı olduğu ispatlanmıştır.

Murty ve ark. (2008), tarafından yapılan çalışmada A356 ve A356/TiB₂ in-situ yöntemi ile takviyelendirilmiş kompozitlerinin katı partikül erozyon aşınması davranışları incelenmiştir. A356 alaşımı halojenür tuzların eriyik alüminyum ile reaksiyona girmesi ile üretilen ve in-situ yöntemi ile elde edilmiş TiB₂ partikülleriyle takviye edilmiş ve Al₃Ti kırılğan yapısının oluşumu tamamen önlenmiştir. Kompozitler α -Al ve sıvılaşmış silisyumun değişikliğinin iyi tane küçültme özelliği olduğunu göstermiştir. Bu takviyeli kompozitler temel alaşımdan daha fazla sertlik ve daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. TiB₂ takviye edilmiş partiküller aşındırıcı silisyum partiküllerden daha küçük olsa da TiB₂ partikülleri etkin bir şekilde aşındırıcı parçalara karşı direnç göstermiştir. Deneyin tasarımı katı partikül aşındırması üzerine olmuştur. Aynı zamanda matematiksel bir model geliştirmek için de regresyon analizi kullanılarak bir deneme yapılmıştır. Geliştirilen modelin doğruluğu için varyans analizi (ANOVA) tekniği uygulanmıştır. Aşındırma mekanizması aşındırılmış numunenin yüzeyinin elektron mikroskobu ve enerji ayırıcı x-ray mikro analiz ışınları ile tarama yapılması ile çalıştırılmıştır.

Sundararajan ve ark. (1991), yaptıkları çalışmada dökme demirin içyapısının erozif aşınma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada hem sade hem de ısıtılmış işlem görmüş gri ve küresel dökme demirler incelenmiştir. Deneyler değişik çarpma açılarında 80 m/s sabit bir hızda yapılmış ve 160µm boyuttaki Silikon Karpit partikülleri kullanılmıştır. Deney sonucunda dökme demirin grafit ve matris yapılarının erozyon oranını etkilediği gösterilmiştir. Aynı dökme demirin erozyon oranı ile akma/çekme mukavemeti arasındaki ilişkisi de gösterilmiştir.

Shimizu ve ark. (1996), yaptıkları çalışmada sifero grafitli dökme demirin erozyon mekanizmasını incelemek için yüzey yakınlarında düşey bir kesitin yapısal değişikliklerini dikkate almışlardır. Çalışma sonucunda, yüzey tabakasındaki sifero grafitlerin yavaşça deformasyona uğradığını daha sonra çarpma yönünde ağızlar oluştuğunu ve bu ağızların genişleyip koptuğunu göstermişlerdir.

Rajesh ve ark. (2001), tarafından yapılan çalışmada bir seri polyamidin 90 – 180 μm 'lik silis partikülleri karşısında erozyon davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda polyamidlerin bazılarının 15° bazılarının ise 30° çarpma açılarında erozyon aşınmasında maksimum aşınma gösterdiği belirtilmiştir. Bu durumda bu malzemelerin sünek bir kırılma noktası olduğu kanıtlamıştır. Ancak PA'lerde maksimum aşınmanın 15°'de olduğu ispatlanmıştır. 90° ve 60° lik çarpma açılarında erozyon oranı ve gevreklik arasında iyi bir korelasyon gözlemlenmiştir.

Matsumura ve ark. (1997), çalışmalarında katı parçacıkların erozyon çarpma açısının bağımlılığını birkaç malzeme türüyle karakterize etmişlerdir. Bu durum çarpma açısı ve malzeme sertliğine karşı trigonometrik bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Çalışmalarda silis kumu kullanılmıştır. Deneyler 3°'den başlayarak 90°'ye kadar ve 130 m/s maksimum çarpma hızında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak test edilen malzemelerde hasarların, partikül özellikleri sabit olduğu sürece, elde edilen ifadede sabit parametrelerin ve üslerin çarpma durumlarına bağlı olduğu ispatlanmıştır.

Harsha ve Thakre'nin (2007), yaptıkları çalışmada içerisine karbon fiberi, MoS_2 doldurulmuş politermid kompozitlerin erozyon davranışını incelemişlerdir. 15°–90° arasındaki çarpma açılarında ve 30 – 88 m/s hızlarda çalışılmıştır. Çekme mukavemeti, yüzde uzama, malzeme sertliği ve kesme mukavemeti gibi mekanik özelliklerin politermid ve kompozitlerinin aşınma oranını kontrol ettikleri görülmüştür.

Chen ve ark. (2000), yaptıkları çalışmada ferritik ve martenzitik yapıdaki sifero dökme demirleri incelemişlerdir. Aşındırıcı parçacıklar olarak SiO_2 kullanılmış olup ortalama çarpma hızı ise 66 m/s dir. Matris fazı aynı olan dökme demirler için kaba dağılıma sahip olan sifero grafitler ince dağılıma sahip olanlara göre daha iyi erozyon dirence sahip oldukları gösterilmiştir. Ayrıca genel olarak sifero grafitlerin yaprak grafitlere göre erozyona karşı daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ferritik yapıdaki sifero dökme demirlerde büyük çarpma açılarında daha az aşınma kaybı görülmesine rağmen martenzitik yapıdaki sifero dökme demirlerde ise küçük çarpma açılarında daha az aşınma kaybı meydana geldiği ispatlanmıştır.

Bousbaa ve ark.'nın (2003), yaptıkları çalışmanın amacı kum püskürtmeye maruz bırakılan iyon güçlendirmesi yapılan soda kireç camının erozyon aşınmasına karşı olan direncini incelemektir. Ayrıca kum püskürtme esnasında oluşan kalıntı gerilmelerin etkisi incelenmiştir. Testler 90° çarpma açısında ve 12 m/s hız altında yapılmıştır. Çalışma sonucunda iyon değişim uygulamasının küçük aşındırıcı kütlelerde camın erozyon direncini biraz arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kalıntı gerilmelerin de ağırlık kaybına etkili olduğu ispatlanmıştır.

Sarı ve Sınmazçelik'in (2007), kompozit malzemenin erozyonu hakkında yapmış oldukları çalışmada, tek yönlü güçlendirilmiş politermid (PEI) karbon fiber kompozitlerin en yüksek aşınma oranlarının 45° de 1.96 m/s ve 50°-55° de 2.88 m/s olarak kaydedilmiştir. Büyük tepe açılarında, düşük partikül hızlarına göre yüksek partikül hızlarında daha fazla aşınma oranları elde etmiştir. Eroziyon aşınmada yüzey pürüzlülüğünün aşınma ile yakın ilişkisinin olduğu tespit edilmiştir.

3. TEORİK ESASLAR

3.1. Aşınma

Aşınma; katı cisimlerin yüzeylerinden ufak parçacıkların veya ince parçaların ayrılması ile bir malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Yüzey değişikliği, çeşitli sebeplerle veya parçanın zorlanma durumuyla ilgilidir. Mekanik, fiziksel, elektriksel veya termik sebeplerle aşınma olduğu gibi korozyon sonucunda da aşınma meydana gelebilmektedir (Ludema 1996).

Aşınma, birçok mühendislik sisteminin performansını etkilemesine rağmen çoğu zaman tasarımda ihmal edilen bir faktördür. Çoğu zaman önemli tamirler veya yenileme masrafları gerektirir ve kullanılabilirlik oranını düşürür. Sonuçta aşınan parçaların tamir edilmediği ve yenilenmediği durumlarda makinenin randımanının düşmesine sebep olur. Bu sebeplerden dolayı aşınma, tasarım sürecinde ele alınmalı ve kullanım sırasında bir problem olarak karşımıza çıkması önlenmelidir.

Birbirleri üzerinde kayan katı yüzeylerde meydana gelen aşınma, yağlamanın durumuna, kayan yüzeylerin yapısına, kimyasal ortama, normal yük ve kayma hızı gibi işleme koşullarından etkilenebilir. Yüzeyler arasındaki izafi yer değiştirmenin belli bir amacının olması gerekmez. Birbirlerine bağlı olmayan yüzeylerde de hafif bir titreşimle aşınma olabilir.

Dönen elemanlarda meydana gelen temas, kaymadan ziyade dönme hareketini kapsadığı için aşınma yorulma ile olur. Eğer sert parçacıklar yüzeye çarpıyorlarsa aşınma erozyonla oluşur.

Yukarıda anlatılanlara bağlı olarak aşınmanın oluşmasının genel sebepleri; uygun olmayan yağlama sonucunda metal-metal temasının olması, yağ içerisindeki aşındırıcı tanecikler ve toz parçalarının bulunması, temas alanında yağ filminin yırtılması ile yağ ve içerisindeki kimyasal katkıların oluşturacağı kimyasal aşınmalardan kaynaklanabilir.

3.1.1. Kayma aşınması

Birçok pratik uygulamada kayma yüzeyi bir şekilde yağlanır ve bu durumda meydana gelen aşınmaya kayma aşınması denir. Bazı mühendislik uygulamalarında ve birçok laboratuvar araştırmalarında yüzeyler normal hava şartlarında ve aralarında herhangi bir yağlayıcı madde olmaksızın birbiri üzerinde kayarlar. Hissedilir derecede nemli hava ortamında gerçekleşse bile bu tip aşınmaya kuru kayma aşınması denir. Dışarıdan ortama giren veya malzeme üzerinden kopan ve yüzeylerin arasına giren sert partiküllerin iştirak ettiği aşınmaya abrazif aşınma denir.

Adhesif aşınma terimi bazen kayma aşınmasını tanımlamak için kullanılır. Fakat bu kullanım aldatıcı olabilir. Adhezyon, kayma aşınmasında önemli bir rol oynasa da bu rol kayma aşınmasında gerçekleşen birçok fiziksel ve kimyasal süreçten yalnızca biridir. Bu nedenle kayma aşınması tercihen genel bir terim olarak kullanılır. Scuffing, scoring, galling terimleri şiddetli kayma aşınmalarıdır. Bunlar tam olarak tanımlanamazlar ve bu terimler kullanım bakımından farklılık gösterirler.

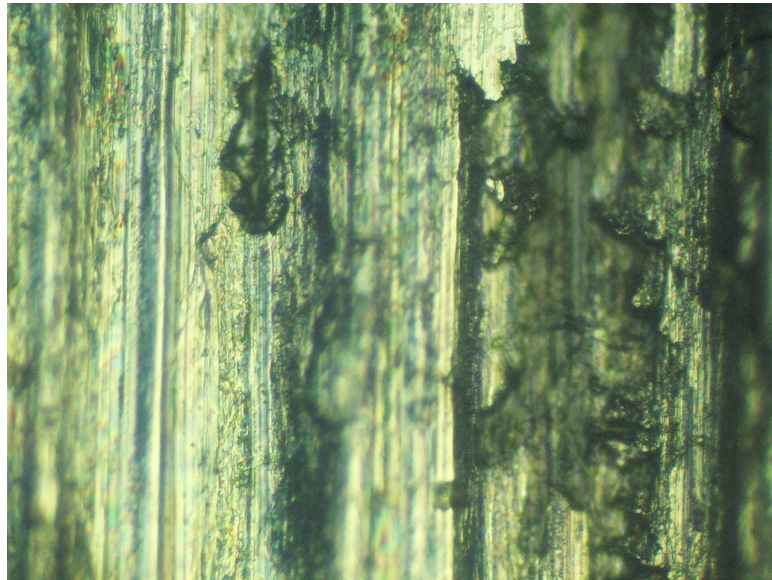
Scuffing, İngiltere’ deki kullanımında kayma yüzeyleri arasındaki bölgesel katı hal kaynağı ile meydana gelen bölgesel yüzey aşınması anlamında kullanılır. Bu terim, genellikle yüksek hızlı kaymalardaki yağlamanın bozulmasını tanımlamak için kullanılır. Amerika’ da scoring yukarıda tanımlanan scuffing ile aynı anlamda kullanılır ve bu iki terim abrazif parçacıkların sebep olduğu aşınmayı da içerir. Galling, bölgesel kaynağın sebep olduğu scuffing’ in daha şiddetli bir şeklidir ve geniş ölçüdeki yüzey aşınmaları için kullanılır. Bu kelime düşük hızlardaki yetersiz yağlamalı kaymanın sonucu oluşan aşınma anlamına gelir, malzemedeki büyük parçaların transferi veya yer değiştirmesi ve pürüzlü yüzeyler ile karakterize edilir. Galling süreksiz yağlamalı sistemlerde oluşur. İlk olarak yağ filmi bozulur ardından yüzeyler birbirine yapışır ve kayma sisteminde büyük bir hasar oluşur (Hutchings 1996).

3.1.2. Sert parçacıkların sebep olduğu aşınma

Sert parçacıkların sebep olduğu aşınmada dış etkenler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle pratikte, bir aşınma hali değil, birçok aşınma hali vardır. Bunlar; adezyon aşınması, abrazyon aşınması, mekanik korozyon aşınması, yorulma aşınması (pitting) ve erozyon aşınması olmak üzere gruplandırılabilir.

3.1.2.1. Adezyon aşınması

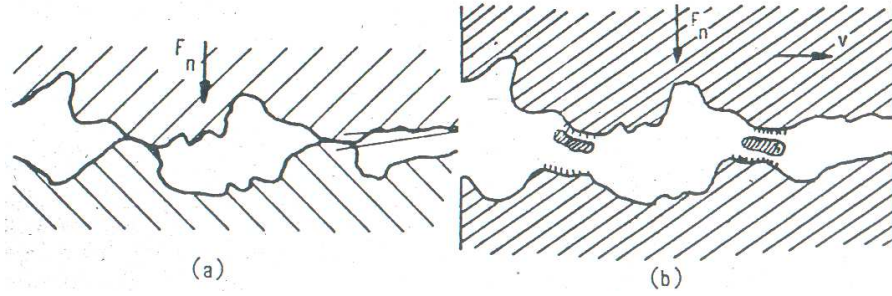
Adezyon aşınması en yaygın aşınma türüdür ve genel anlamda aşınma kavramı bu aşınma için kullanılmaktadır (Akkurt 1990). Bu aşınmanın temel esası kaynak bağı teorisi ile açıklanabilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Adezyon aşınması

Özellikle kayma sürtünmesi yapan ve metalografik yapıları birbirine benzeyen metallerin kaynaklaşmasıdır. Çok iyi parlatılmış yüzeylerin bile çok

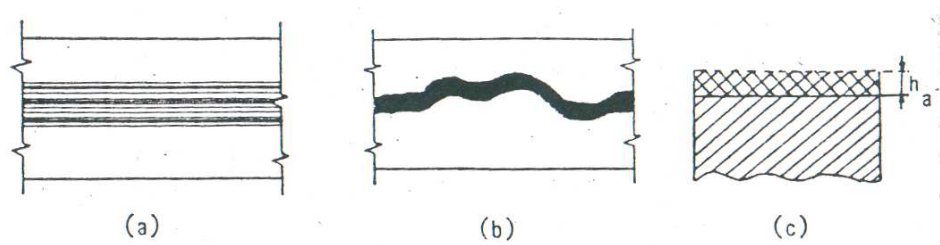
küçükte olsa bazı bölgeleri birbirine temas eder. Çok küçük yüklemeler altında bile bu noktalardaki gerilmeler malzemenin akma sınırını geçebilir. Yüzeyde bulunan bu oksit tabakası parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaşma meydana gelir. Kayma hareketi esnasında bu noktalar kesilerek yenme ve aşınma olayı ortaya çıkar (Gürleyik 1986). Bu olay Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Adezyon aşınmasının oluşması (a) yüzeylerin birbirine temas ettiği pürüzlülük tepeleri, (b) kayma hareketi sonunda meydana gelen aşınma

Adezyon aşınması, yüzeylerde bir takım çizikler halinde (Şekil 3.3.a) veya tam tersine yüzeyleri parlatılmış gibi görülmektedir. Şekil 3.3.b’ de gösterildiği gibi yüzeylerden bir tabaka kaldırılmaktadır. Teorik olarak da Şekil 3.3.c’ de gösterildiği gibi olur. Aşınan bu tabakanın kalınlığı h_a ve aşınma alanı A_a ile ifade edilirse aşınma hacmi;

$$v_h = h_a * A_a \text{ ile hesaplanabilir.}$$



Şekil 3.3 Aşınma çeşitleri (a) çizikler şeklinde oluşan aşınma izleri, (b) parlatma şeklinde oluşan aşınma izleri, (c) aşınan tabaka kalınlığı

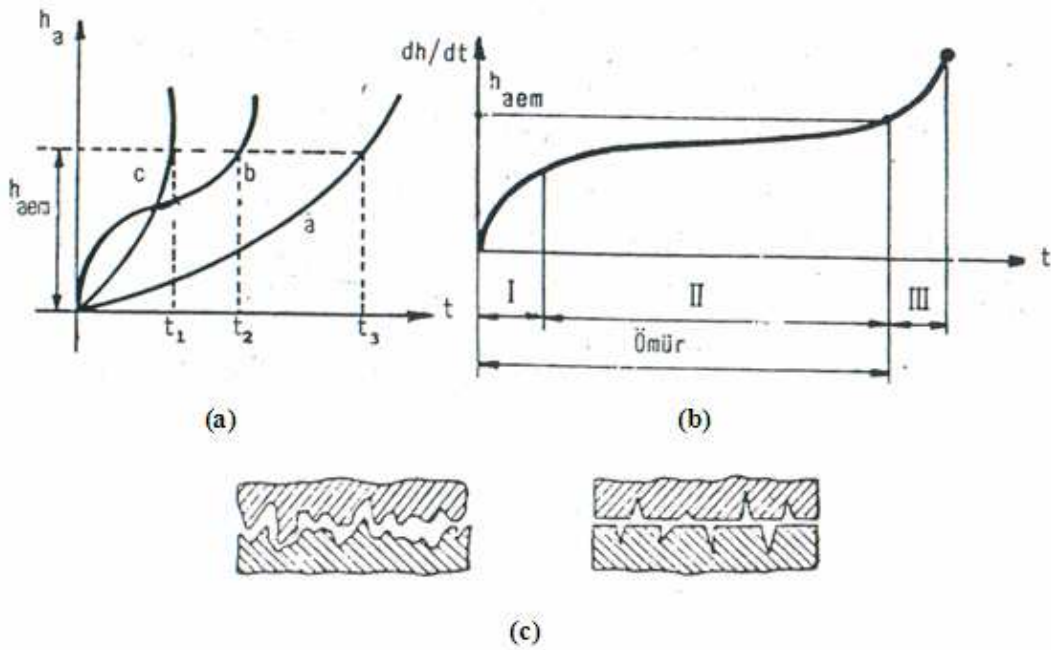
Adezyon aşınması temas yüzeylerde meydana gelen basınç ($p = F_n / A$) ve kayma hızı (v) tarafından önemli şekilde etkilenmektedir. Ayrıca aşınmanın zamana bağlı olarak geliştiği göz önünde tutulursa, analitik olarak adezyon aşınması;

$$h_a = k_a * p * v * t \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada k_a , temasta bulunan malzeme çiftine bağlı olan ve deneylerle tayin edilen bir faktördür. Aşınmanın yanı sıra pratikte aşınma hızı;

$$dh / dt = k_a * p * v \quad (3.2)$$

ifadesinde önem taşımaktadır. Belirli bir ($p * v$) değeri için zamana bağlı olarak aşınma, Şekil 3.4.a'da gösterildiği gibi çeşitli şekillerde gelişebilir. Şekil 3.4.b'de, aşınmanın esas üç bölgeden meydana geldiği görülür.



Şekil 3.4 Adezyon aşınmasının zamanla gelişmesi (a) farklı malzemelerdeki aşınma - zaman diyagramı, (b) aşınmanın zamana bağlı değişimi rodajdan önce ve rodajdan sonraki yüzey durumu

I. bölgede; yani parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj denilen bu safha parçaların birbirlerine alıştırılma safhasıdır. Bazen imalatın devamı olarak sayılan bu safhada pürüzlülükler eşitlenir. Şekil 3.4.c’de rodajdan önce ve rodajdan sonra yüzey durumu gösterilmiştir. Rodaj, parçanın daha sonraki aşınmasını büyük ölçüde etkiler.

Bu nedenle parçaların rodajlarının iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi gerekir. Genellikle rodaj, yüksüz ve normal hızdan daha küçük hızlarda yapılır.

II. bölgede esasen çalışma sırasındaki meydana gelen aşınmadır. Burada aşınma hızı az ve sabittir. Ancak zaman geçtikçe parçalar arası boşluklar büyür, titreşimlerin artması ve yağlama koşullarının kötüleşmesi sonucu aşınma gittikçe artar.

Bu andan itibaren aşınmanın III. bölgesine girilir. Bu safhada parçaların kırılması veya tüm makinenin bozulması beklenebilir.

Parçanın ömrü, çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı (h_{aem}) tayin edilerek aşınma–zaman diyagramından hesaplanabilir. Şekil 3.4.a’ dan görüldüğü gibi aynı h_{aem} için aşınma şiddetine bağlı olarak çeşitli ömürler karşılık gelir. Bu andan sonra parçanın değiştirilmesi gerekir.

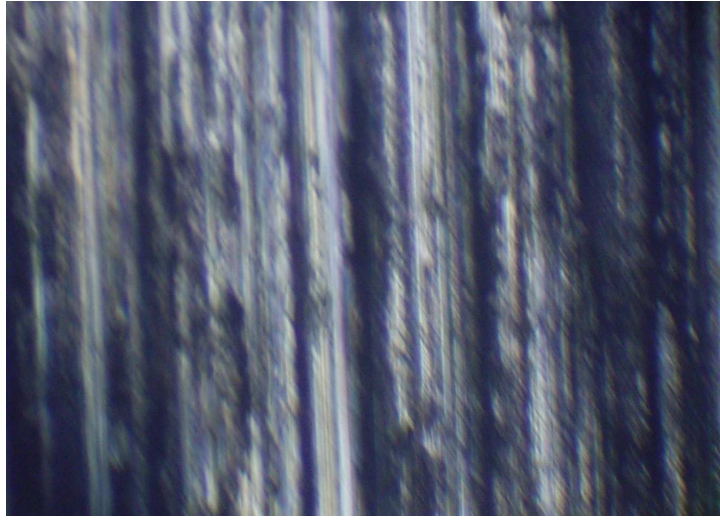
Adezyon aşınmasının önlenmesi için alınması gereken önlemleri şu şekilde sıralayabiliriz.

➤ Adezyon aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana geldiğinden malzeme çiftinin biri sert diğeri yumuşak olarak seçilmelidir.

➤ Yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi yüzeylere yapışmış yağ tabakası adezyon aşınmasını büyük ölçüde önlemektedir. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katı bir yağ konulursa aşınma ve bilhassa yenme önlenir. Bu nedenle adezyon aşınmasını önlemek için iyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katkıları kullanılmalıdır (Akkurt 1990).

3.1.2.2. Abrazyon aşınması

Çok önemli olan abrazyon aşınmasında yüzeylerin bozulması dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Abrazyon aşınması

Bu sert parçacıklar bir zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğelemeye ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine neden olurlar. Abrazyon aşınmasında önemli olan yüzeylerin sertliğidir. Yüzeylerin sertliği ısıtılma işlemi veya yüzeylere sert malzeme kaplama ile elde edilebilir.

Abrazyon aşınmasını önlemek için alınacak önlemler şu şekilde özetlenebilir;

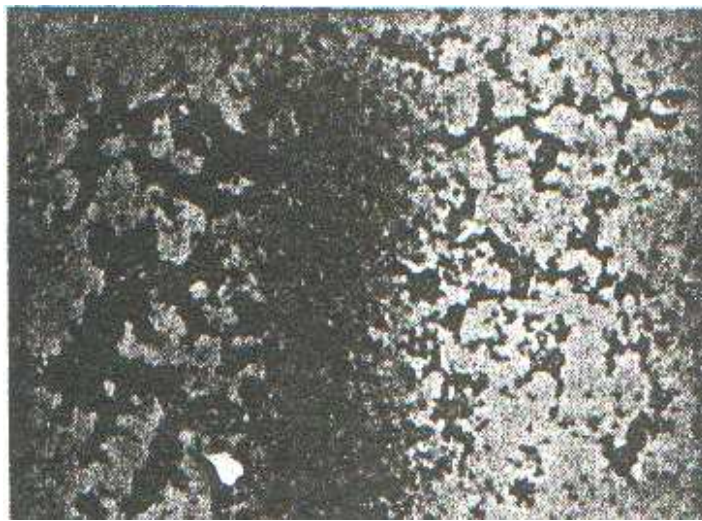
- Yüzeyler sertleştirilmelidir.
- Dışarıdan sert malzemelerin yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır.

➤ Makineler ve sistemler talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir. Ancak bu oldukça zor bir iştir. Bazen aşındırıcı parçacıklar yumuşak metal içerisine gömülebilir. Bu durumda aşınma kaçınılmaz olmaktadır.

3.1.2.3. Mekanik korozyon aşınması

Daha önce belirtildiği gibi, yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluştururlar. Aynı sonuç yağlarda bulunan maddelerden dolayı da gerçekleşir.

Değişken yük altında bu sert tabakalar kırılır ve kırılan parçacıklar yerinden ayrılarak aşınma parçacıklarını oluştururlar. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder. Kesin olarak bilinmemekle beraber, hava rutubetinin de bu olay üzerinde etkisi büyüktür (Şekil 3.6). Oksidasyon aşınmasını önlemek için yüzeyler fosfat veya sülfat ile işlem görür veya oksidasyonu önleyen özel yağlayıcı maddeler kullanılır.



Şekil 3.6 Mekanik korozyon aşınması

3.1.2.4. Yorulma aşınması (pitting)

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

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

İki tip pitting vardır. Birinci tipi olan ilkel pitting’ de çukurcuklar çok küçük olup büyümeyizler ve yüzeye yayılmazlar. İkinci tipi olan tahripkar pitting’ de ise çukurcuklar zamanla büyür ve yayılırlar. Birinci tipte parçanın normal çalışması genellikle etkilenmezken diğerinde parça işe yaramaz hale gelir.

Pitting oluşumunda malzemelerin doğal sertliği önemli rol oynar. Doğal sertlikteki malzemelerde örneğin çeliklerde pitting meydana gelir ancak çeliğin yüzeyi sertleştirilirse pitting oluşumu geciktirilebilir. Bu aşınma türü yumuşak malzemelerde görülmemektedir. Yorulma aşınmasını önlemek için en önemli tedbir temas yüzeylerinin sertleştirilmesidir (Akkurt 1990).

3.1.2.5. Erozyon aşınması

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

Erozif proseslerin faydaları az da olsa önemlidir. Kum püskürtme metodu yüzey temizlemede kullanıldığı gibi sıvı jeti kesme işlemleri, madencilikte, tünel açma, kaya kesme, ahşap ve grafit – epoksi kompozit malzemelerin kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca ev tesisatındaki delik açma işlerinde sıvı jeti kullanılabileceği araştırılmış, olumlu ve ucuza mal olabileceği tespit edilmiştir.

Mühendislik malzemelerinin sıvı damla veya katı parçacık çarpmasına karşın davranışları, büyük ölçüde o malzemenin türüne, maruz bırakıldığı duruma (sıcaklık, gerilme ve yüzey işlemlerine) ve erozyonun çevresel parametrelerine bağlıdır. Erozyon parametrelerinden kastedilen parçacıkların çarpma hızı, boyutları ve tipleri, çarpma açısı ve ablasyon ve korozyon gibi ikili etkilerdir.

Erozyon aşınması iki grupta ele alınır;

1) *Katı parçacık erozyonu*

2) *Sıvı – çamur erozyonu*

Katı parçacıkların çarpmasıyla meydana gelen malzeme kaybı, erozyon proseslerinin en yaygın olanıdır. Bu tip hasarların görünebileceği yerlerden bazıları; enerji dönüşüm sistemlerinde kömürün küçük tanecikler halinde yaygın kullanılması, jet motorlarında ve helikopter rotor kanatlarına katı parçacıkların çarpması, büyük türbinlerde oksit tabakaların kopması ve ardından kanatlara ve yüzeylere çarpması olarak sayılabilir (Tablo 3.1).

Katı parçacık erozyonu, son yıllarda artan bir ilgi görmüştür. Bu ilgi, kömür dönüştürme santralleri üzerinde yapılan araştırmalardan, bu sistemlerde elde edilen gelişmelerden ve santrallerin değişik ekipmanlarında katı parçacıkların akışını sağlamak amacıyla oluşan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Bu parçacıkların hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantılarına ile boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarpmasıyla şiddetli erozyon aşınması oluşturmaktadır.

Katı parçacık erozyonu yıllardır uzay havacılık sistemlerinde de sorun olmuştur. Malzeme erozyonunda bazen de korozyon ve çarpma erozyonu gibi başka yüzey bozulma türleri görünmektedir. Bu genellikle kömür dönüşüm sistemleri gibi yüksek sıcaklıkta ve erozif ortamda çalışan yerlerde görülür. Diğer çift etkili bozulma örneği ablasyon – erozyon durumudur. Bu durum uzay araçlarının ve füzelerin atmosfere tekrar girdiklerinde burun kısımlarında ve ısı muhafazalarında meydana gelmektedir.

Düşük ve orta hızlı katı parçacık erozyonuna maruz kalan sünek metallerin elemanları önce ağırlık kaybı olmadan yüzey deformasyona uğrar sonra da çok tartışılan ve teorisi üzerinde durulan malzeme kaybı prosesi meydana gelir.

Tablo 3.1 Katı parça erozyonuna maruz kalan komponentlere örnekler

SİSTEM	PARÇA (BİLEŞEN)
Kimyevi fabrika	Hava akışlı abrezif materyal taşıyıcı
Hidrolik maden ve makinalar	Pompalar ve valfler
Öteleme sistemi	Roket motor memeleri, silah fırçaları
Yanma sistemleri	Yanıcı memeleri, ısıtıcılar
Kömür gaz prosesi	Türbin, kilit hazne valfleri, genişleme türbini
Kömür sıvı prosesi	Üretilen buharı kırmak için boğaz
Uçak motoru	Kompresör ve türbin kanatları
Helikopter motoru	Rotor ve gaz türbini kanatları

Karşılaştırma açısından, sıvı çamur erozyonu, sıvı ve katıların karıştırılmasıyla oluşan bir çamur kullanılarak yapılır. Genel olarak böyle bir karışımın çamur olarak adlandırılması, odaklanmanın katıya olduğu, sıvının sadece taşıma görevi olduğu durumlardadır. Çamuru itecek pompalar çok çabuk aşınabilir. Çamur, pompalardaki küçük geçitlerden 100 m/s yada daha büyük hızlarda geçer. Bazı örneklerde abrezif erozyon istenir. Beton gibi sert yüzeylerde kesme işlemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış jet sıvı püskürtücü aletler artık vardır.

Sıvı çarpmasıyla erozyon oluşumunda eğer bir sıvı yeterli momentum ve yeterli frekansta bir yüzeye çarpmaya devam ederse, yüzeyde yorulma sonucu aşınma olacaktır. Yağışlar uçakların polimer radar kubbelerini bu yüzden aşındırır.

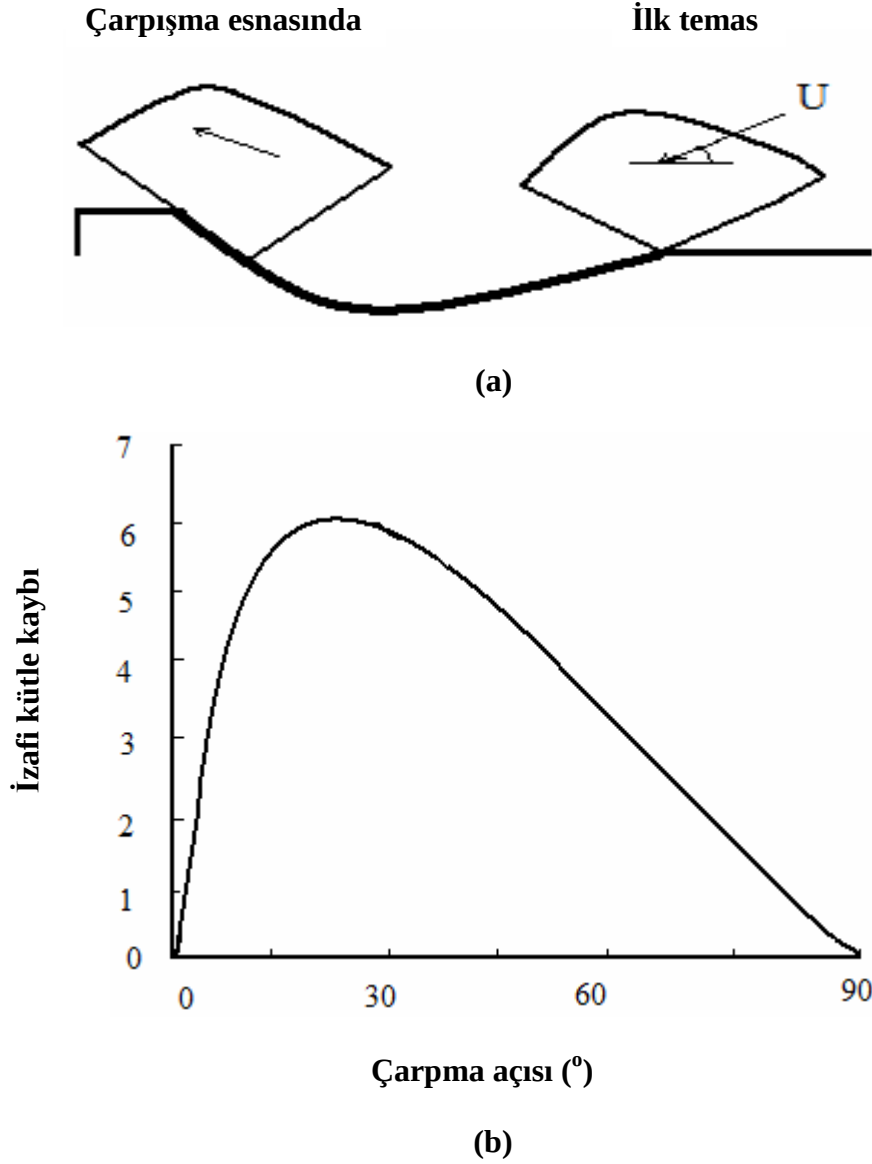
Sıvı erozyonunda abrezif suyunun içerdiği sıvılar, kuru şartlarda genelde abreziflerin uzaklaştırılmasını kolaylaştırır. Sıvıların görevi, en azından silmede (öğütme), ısıyı ve talaşı uzaklaştırmaktır. Yavaş abrezyonda ve cilalamada, sıvıların birincil görevi, abrezif parçacıklar ile abrezyon aşınmasına tabi yüzey arasında sürtünmeyi azaltmak, bu sırada fazladan talaş kaldırılmasını ve abreziflerin yüzeye gömülmelerini engelleyerek az enerji harcatmaktır. Sıvıların ikinci etkisi ise, abreziflerin pürüzlülük derecesini azaltarak daha çabuk keskin kenarlar elde etmesi ve hazır hale gelmelerini sağlamaktır.

Her abrezif malzeme ve operasyon farklı sıvılar gerektirir. Özellikle ticari abrezif uygulamalarda bunun örnekleri görülebilmektedir. Örnek olarak gevrek malzemelerin iki gövde aşınmalarında yağ sudan daha iyidir.

3.1.2.5.1. Erozyon aşınmasında esas alınan modeller

Erozyon sonucu oluşan aşınma çukurcuklarının büyük bölümünün birden çok etki sonucunda deforme olduğu yönündeki kanıtlara rağmen, erozyon konusunda geliştirilmiş olan modeller temel olarak düzgün bir yüzeye çarpan tek bir parçacığın etkisi için geçerli olan modellerdir ve elde edilen deneysel verilerin çoklu etkileşmeye uygulanmasıyla elde edilir. Bu tür bir yaklaşım hareket denklemlerinin sert bir parçacığın tamamen plastik bir malzemeye dar bir açı ile çarpması

durumunda çözülmesi ile gerçekleştirilir. Malzemenin yalnızca kesme işlemi yolu ile kaldırıldığı varsayılarak, normal etki için geliştirilen basit model, diğer etki durumları içinde genişletilir. Şekil 3.7 (a), düzgün bir yüzeyi kesmekte olan sert bir parçacığın iki boyutlu, idealize edilmiş bir modelini göstermektedir.



Şekil 3.7 Yumuşak malzeme erozyonunun teorik temas geometrisi (a) Düzgün bir yüzeyi kesmekte olan sert bir parçacığın teorik iki boyutlu idealize edilmiş modeli
(b) Teorik yumuşak malzeme erozyonunun çarpma açısına olan bağımlılığı

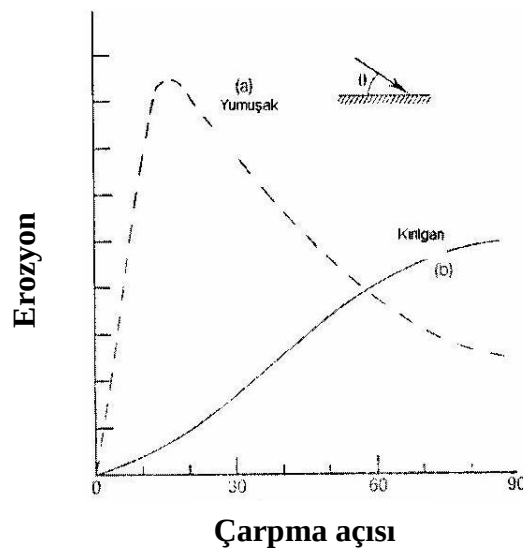
Kaldırılan malzemenin hacmi parçacığın süpürdüğü miktar olarak alınır. Bu yüzden model normal geliş açısı için sıfır erozyon öngörmektedir. Çeşitli basitleştirici varsayımların yapılması mümkündür. Parçacık üzerindeki kuvvetlerin en üst noktada olduğunun varsayıldığı bir analiz yöntemi aşağıdaki denklemi ortaya çıkarmaktadır:

$$E = \frac{K\rho U^2}{H} f(0) \quad (3.3)$$

Formülde E erozyon oranını tanımlamaktadır.

$E = \text{Temizlenen malzeme kütlesi} / \text{Yüzeye çarpan parçacıkların kütlesi}$

Denklemden K boyutsuz bir sabit olup, U parçacık hızı, H ise sertliği belirtmektedir. Denklemin hangi yöntemle elde edildiği ileride hız ve kuvvet analizinde daha detaylı anlatılacaktır. K'nin değeri parçacığın geometrisine ve gerçekte idealize bir şekilde kesim işlemi gerçekleştiren parçacıkların oranına (ya da alternatif olarak aşınma kalıntısı olarak temizlenen parçacığın başı tarafından süpürülen hacmin oranına) bağlı olarak değişir. Teorinin öngördüğü $f(0)$ fonksiyonu Şekil 3.7(b)'de gösterilmiştir ve her ne kadar normal geliş açısı için sıfıra düşüyorsa da pratikte Şekil 3.8'de gösterilmiş ve deneysel olarak gözlenmiş olan (a) eğrisine benzeyeceği bir gerçektir.



Şekil 3.8 Erozyonun çarpma açısına bağlı değişimi

Parçacık üzerindeki kuvvetlerin etki noktasının etki sırasında hareket etmesine olanak sağladığı benzer ancak daha gerçekçi bir model E için aşağıdaki şekilde yaklaşık olarak daha karmaşık bir ifadeyi ortaya çıkarır:

$$E = \frac{K_1 \rho U^n}{H} f_1(0) \quad (3.4)$$

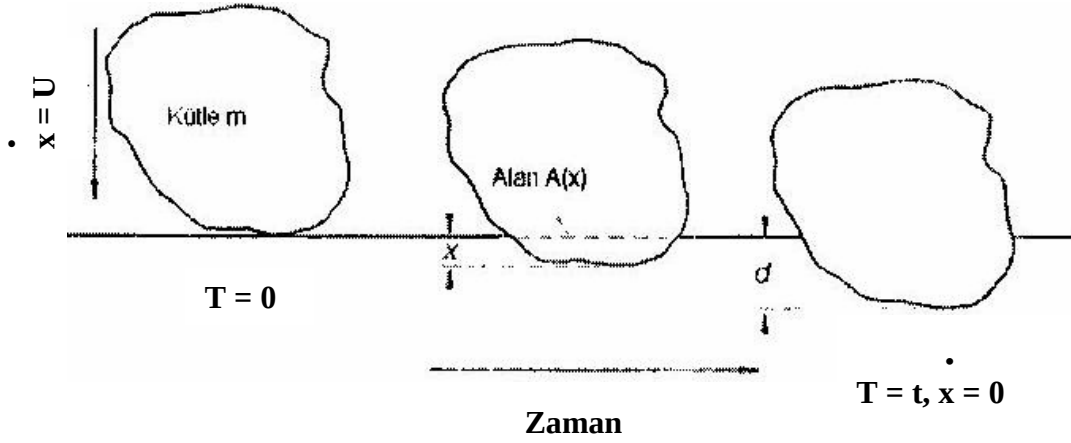
Burada hızın üssü olan n tipik olarak 2.0 ve 2.5 arasındadır ve kendi başına θ etki açısının bir fonksiyonudur.

Bu iki denklemi ortaya çıkartan modeller malzemenin kesme işlevi gören münferit parçacıklar tarafından kaldırıldığını varsaymaktadır. İleride bahsedilecek olan H tipi kesmeye benzer olarak ve yalnızca dar geliş açıları için geçerlidir.

3.1.2.5.2. Plastik deformasyona bağlı erozyon aşınması

Plastik deformasyonla ilgili erozyon mekanizmalarını incelemeden önce daha yumuşak bir yüzeye dik olarak çarpan tek bir parçacığın davranışının incelenmesi gereklidir.

Aşındıran parçacığın deforme olmadığını ve problemin yarı statik olarak ele alınabileceği (örneğin dalga yayılması ve gerilme oranı hassasiyeti gibi dinamik etkileri göz ardı ederek) kabul edilebilir. Etkili olduğu varsayılan tek kuvvet yüzey tarafından uygulanan tepki kuvvetidir. Buna ek olarak yüzey üzerindeki deformasyonun tamamen plastik olduğunu ve plastik akış basıncına (sertliğe H) sahip olduğunu varsayacağız. M kütleline sahip olan erozif parçacık ilk temastan sonraki t zamanında, yüzeyi x derinliğine kadar girmiş olacaktır. Bu durumda yüzeydeki çentiğin kesit alanı da A(x) olacaktır.



Şekil 3.9 Parçacığın plastik deforme edilebilen bir yüzeye batma prosesleri

İlk temas, $t = 0$ iken gerçekleşir ve parçacık, $t = T$ iken durma noktasına gelir.

Burada $A(x)$ parçacığın şekliyle belirlenir. Parçacığın hızını kesen kuvvet $A(x)$ alanı üzerinde etki sahibi olan plastik akış basıncının sonucunda ortaya çıkan kuvvettir. Parçacığın hareketine ait denklem ise aşağıdaki gibi yazılır:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = HA(x) \quad (3.5)$$

Basit parçacık şekilleri için bu eşitlik analitik olarak hemen çözülebilir. Ancak bizim amaçlarımız için, erozif parçacığın çentiğinin d derinliğinde iken son hacminin bilinmesi gereklidir. Bu noktada, yavaşlatıcı kuvvet tarafından yapılan iş, U değerinde bir başlangıç hızına sahip olduğu varsayılan parçacığın başlangıçtaki kinetik enerjisine eşit olacaktır. Bu durum

$$\int_0^d HA(x) dx = \frac{1}{2} m U^2 \quad (3.6)$$

denklemini ile ifade edilebilir.

Çentiğin son hacmi olan V aşağıdaki denklemle verilir

$$V = \int_0^d A(x) dx \quad (3.7)$$

Ve bu yüzden H'nin sabit olduğu varsayıldığından,

$$V = \frac{mU^2}{2H} \quad (3.8)$$

yazılır.

Çentikten uzaklaşan malzeme birçok olası durumla karşı karşıyadır. Bunları sıralayacak olursak;

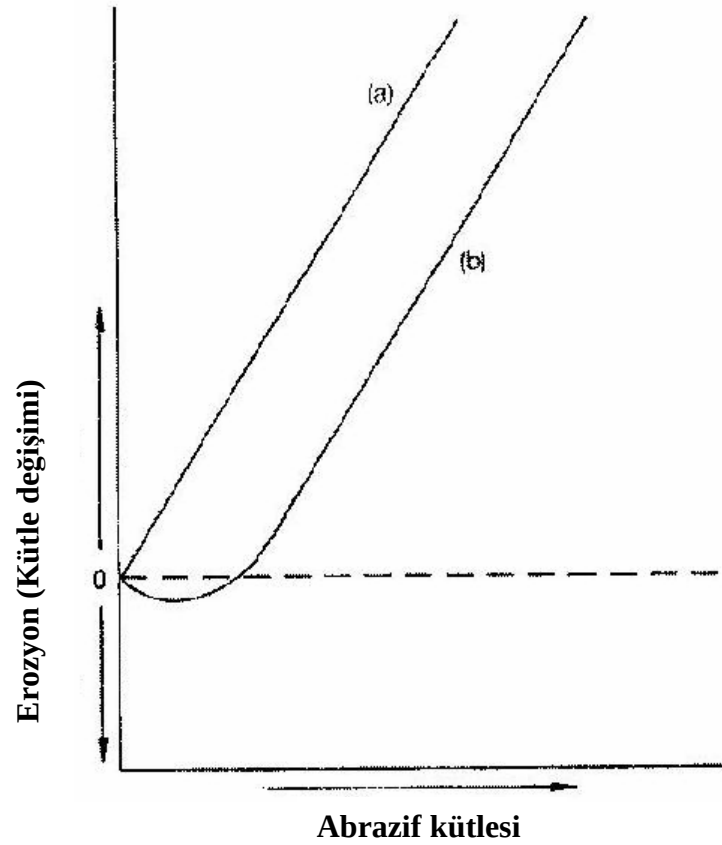
1. Elastik deformasyon meydana gelebilir.
2. Çentik etrafında plastik olarak deforme olmuş bir şekil oluşabilir.
3. Malzeme tamamen ortadan kaldırılıp boşluk oluşabilir.

Burada yalnızca çentikten uzaklaştırılmış malzemenin K büyüklüğündeki bir bölümü aşınma çukuru olarak kabul edilirse uzaklaştırılan malzeme kütlesi

$$\text{Ortadan kaldırılan malzemenin kütlesi} = K\rho \frac{mU^2}{2H} \quad (3.9)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu denklemde ρ erozyona maruz kalan malzemenin yoğunluğu K ise boyutsuz bir faktördür. 3.9 denkleminin özeti birçok etki bakımından yüzeyden kaldırılan malzemenin toplam kütlesinin yüzeye çarpan erozif parçacıkların toplam kütlesiyle orantılı olması gerektiğini göstermektedir. Şekil 3.10 bir yüzeyden uzaklaştırılan kütlenin yüzeye çarpan parçacıklarının toplam kütlesi ile değiştiğini göstermektedir.



Şekil 3.10 Kütle kaybının aşındırıcı parçacıklarının toplam kütlesine bağımlılığı

Bazı malzemeler için parçacıklar yüzeye gömülebilir ve (b) eğrisi ile gösterilen şekilde bir başlangıç kütle kazancı oluşturabilir. Temel olarak yumuşak hedef malzemelerle gözlenen ve yüksek geniş açılar ile daha belirgin hale gelme eğiliminde olan bu inkübasyon süresi sonrasında erozyon yüzeye çarpan iri taneli aşındırıcı kütlesi ile doğrusal bir şekilde artar. Birçok yumuşak hedef madde için ve çoğu erozyon parçacığı için bir inkübasyon süresinin varlığı ihmal edilebilir ve yüzeyden kaybedilen kütle yüzeye çarpan erozyon parçacıklarının toplam kütlesi ile orantılıdır. Bu durum şekil 3.10 da (a) hattı ile verilmiştir. Sabit durum erozyonunda gözlenen doğrusal ilişki basit bir E , erozyon tanımının elde edilmesini sağlar:

$E = \text{Temizlenen malzeme kütlesi} / \text{Yüzeye çarpan erozyon parçacıklarının kütlesi}$ (3.10)

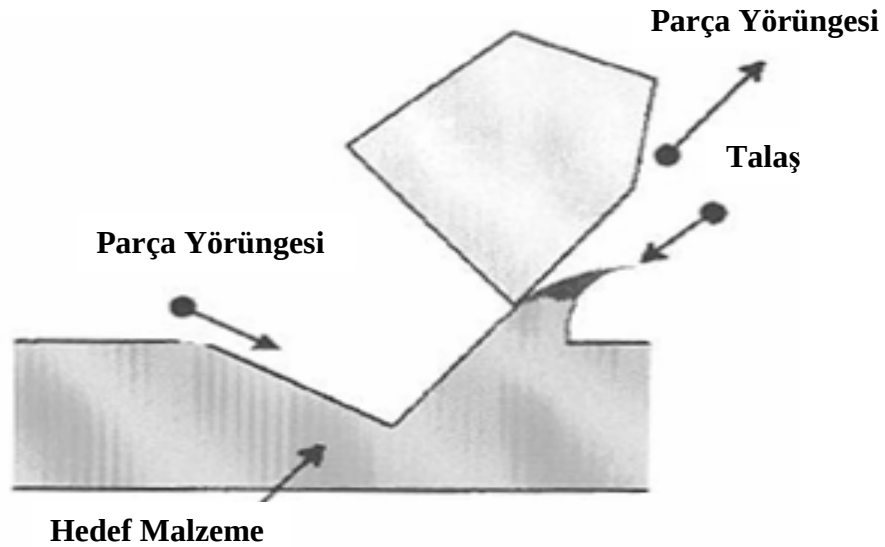
E boyutsuzdur, bu durumda 3.9 denklemi aşağıdaki şekli alır:

$$E = \frac{K\rho U^2}{2H} \quad (3.11)$$

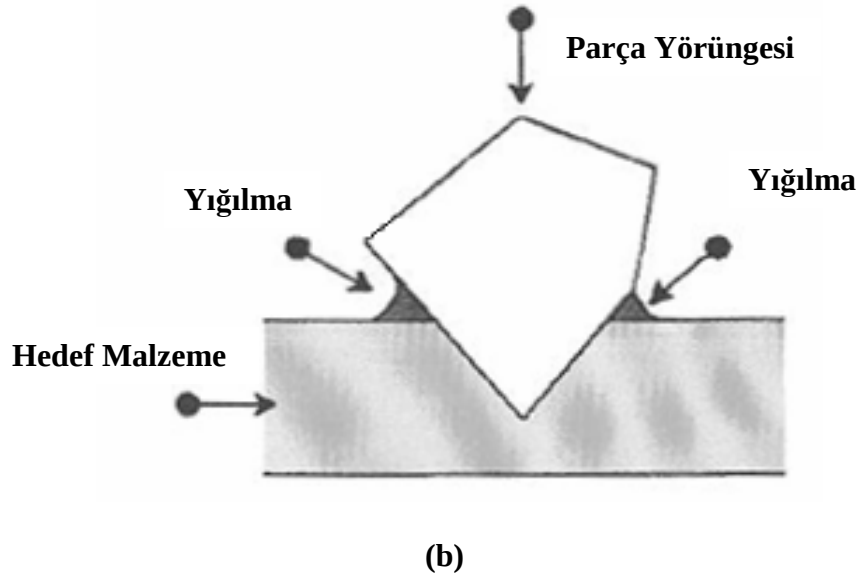
K boyutsuz faktörü malzeme temizleme işleminin etkinliğinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir. Erozyon parçacıkları tarafından yeri değiştirilen tüm malzemenin temizlenmesi durumunda K birim değere sahip olacaktır.

3.1.2.5.3. Erozyonda malzeme kaldırma mekanizması ve kuvvet analizi

Erozyonda malzeme – talaş kaldırma mekanizması incelendiğinde,



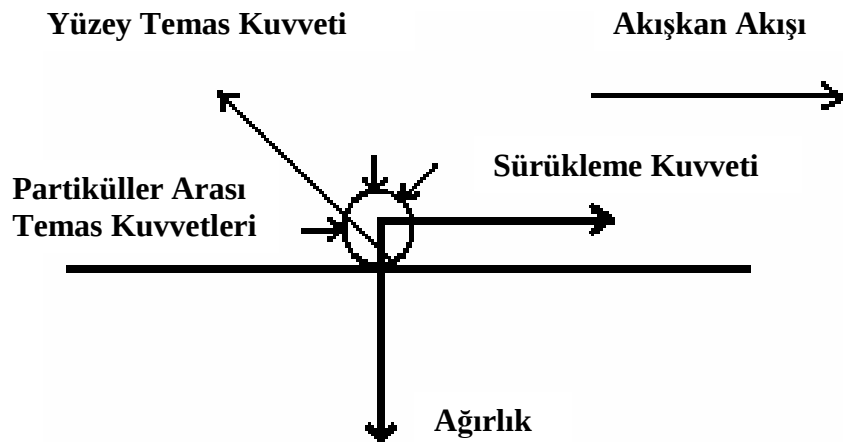
(a)



Şekil 3.11 Düşük ve yüksek açılarda malzeme ayırma mekanizması (a) Düşük çarpma açısında ağız formasyonu (b) Yüksek çarpma açısında ağız formasyonu

düşük çarpma açılarında malzeme talaş olarak ayrılmakta Şekil 3.11 (a), yüksek çarpma açılarında ise malzeme yığılma yaparak daha sonra hedef malzemedan ayrılma işlemi gerçekleşmektedir Şekil 3.11 (b).

Partiküllerin üzerine düşen kuvvetler aşağıdaki şekil 3.12.de görüldüğü gibi katı yüzey ile temas halinde olan bir parçacık üzerinde farklı kaynaklardan gelen birçok kuvvet halinde etkili olabilir.



Şekil 3.12 Yüzeyle temasta olan partikül üzerine etki eden kuvvetler

Yan yana olan parçacıklar temas kuvvetlerine neden olabilir ve akan bir sıvının varlığı halinde sürüklenme durumu ortaya çıkabilir. Bazı koşullarda, yerçekimi önemli olabilir.

Bununla birlikte erozif parçacık üzerinde bulunan ve temel olarak bu parçacığın başlangıçtaki hızının azalmasına neden olan baskın kuvvet çarpma esnasındaki yüzeyin tepki kuvvetidir. Abrezif aşınmada, aşınan malzemenin miktarı kayma mesafesine ve normal kuvvetin şiddetine bağlıdır. Erozyonda, aşınma miktarı yüzeye çarpmakta olan parçacıkların sayısına ve kütlesine ve bunların etki hızına bağlıdır.

Abrezif aşınmada olduğu gibi, erozyon aşınması mekanizmaları da hem plastik deformasyonu hem de kırılmayı içerebilir. Metallerin erozyonu genellikle plastik akışı içerirken, daha kırılgan malzemeler etki koşullarına bağlı olarak daha çok akış yada kırılma ile aşınırlar.

3.1.2.5.4. Tipik K değerleri ve erozyon oranının değişimi

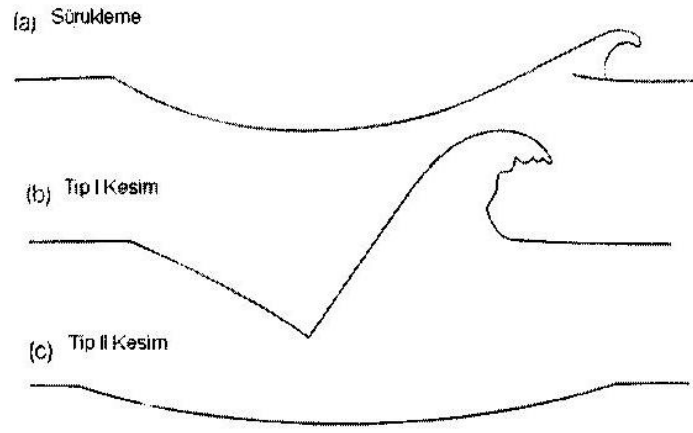
Metallerin erozyonu için K tipik olarak boyutsuz aşınma katsayısı olarak belirlenmiştir. K malzeme temizleme işleminin etkinliğinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir ve uzaklaştırılan materyalin oranına bağlı bir sabittir.

3.11 denklemi yalnızca erozyon aşınmasını kontrol eden faktörlere ait kaba bir tahmin sağlamaktadır. Örneğin etki açısı sonucunda erozyonda ortaya çıkan herhangi bir değişikliği ihmal eder. Bu konunun daha iyi anlaşılabilmesi için sert bir parçacık ve yumuşak malzemenin yüzey arasındaki etkileşimi daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerekir.

Sert bir parçacığın etkisine bağlı olarak ortaya çıkan deformasyonun geometrisi etki hızına, parçacığın biçimine, yönüne ve etki açısına bağlı olarak değişir. Erozyondaki etki açıları genellikle Şekil 3.8 de görüldüğü üzere yüzey düzlemine bağlı olarak tanımlanır. Normal etki için, $0 = 90^\circ$ iken geliş açısında, θ sıfıra gitme eğilimindedir.

Yumuşak malzemelerin erozyonu etki açısına bağlı olarak belirgin biçimde değişir. Bu durum Şekil 3.8 de (a eğrisi) gösterilmiştir. Maksimum değer 20° ila 30° arasındadır ve normal geliş açısındaki maksimum aşınma oranının yarısı ile üçte biri arasında değişen bir miktardır.

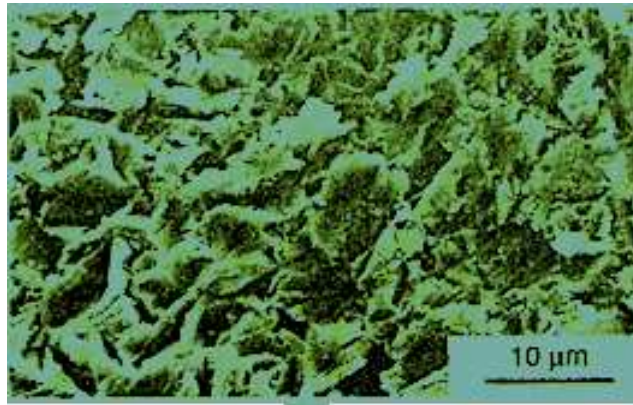
Tek taneciklerin metallere üzerindeki etkisi üzerine 30° etki açısında yapılan çalışmalar üç temel etki hasarı göstermektedir ve bu türler şekil 3.13 de gösterilmiştir.



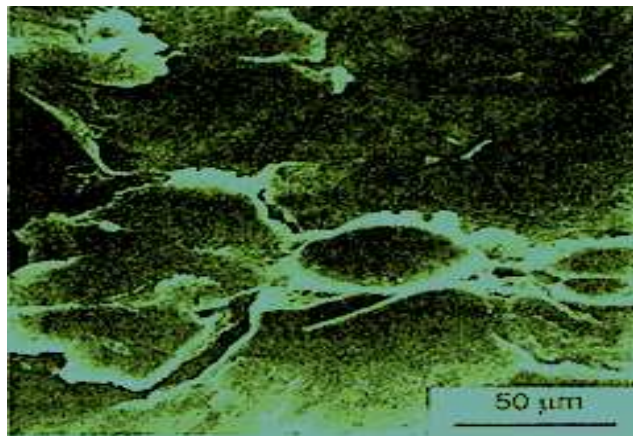
Şekil 3.13 Sert parçacıkların yumuşak malzemeye çarpması sonucunda oluşan şekiller

Yuvarlak parçacıklar malzemeyi kenara doğru iterek ve parçacığın önünde sürükleyerek yüzeyi deforme ederler (Şekil 3.13 (a)). Komşu alanlardaki diğer etkiler ağır şekilde zorlanmış malzemenin kraterin ağzından ya da bağlantı dudağından kopmasına yol açarlar. Açısal bir parçacığın neden olduğu deformasyon parçacığın yüzeye çarptığı sıradaki yönü ve parçacığın temas sırasında öne doğru mu yoksa arkaya doğru hareket ettiğine bağlıdır. Tip 1 kesim (Şekil 3.13 (b)) olarak adlandırılan moda parçacık öne doğru hareket eder ve yüzey üzerinde çentikler oluşturur ve malzemeyi öne doğru bir dudak biçiminde kabartır ve bu durum daha sonraki vuruş etkileri nedeniyle yok olabilir. Parçacığın geriye doğru hareket etmesi halinde (Şekil 3.13 (c)), aşındırıcı parçacığın keskin köşesinin yüzeyden bir parça kesip aldığı gerçek bir mekanizma eylemi ortaya çıkabilir. Bu tip II kesimdir ve yalnızca dar bir parçacık geometrisi yelpazesinde ve etki yönünde ortaya çıkar.

Münferit parçacıkların düzgün bir yüzeye çarpması halinde bu üç deformasyon türü arasında açık farklılıklar vardır. Bu sınıflandırma düzensiz biçimlere ve düzensiz yönlerle sahip olan parçacıkların daha önce erozyona uğramış ve bu yüzden kabalaşmış bir yüzeye çarpması halinde bu kadar basit değildir. Bununla birlikte, münferit parça etkilerinin neden olduklarına benzer özellikler bir çok parçacığın etkisi ile aşınmış yüzeylerde ayırt edilebilir. Örneğin, Şekil 3.14(a) silikon karpit parçacıkları ile aşınmış olan çelik bir yüzeyi göstermektedir. Erozyona bağlı aşınma, etki alanlarından yükseltilmiş krater ağızlarına ve dudaklarına taşınmış olan metalin kopması sonucunda ayrılmasıdır. Her bir etkinin malzemeyi oluşturan çentikten taşınmasına rağmen, bu malzeme birçok plastik deformasyon döngüsü geçirinceye ve şiddetli bir biçimde sertleşinceye dek aşınma kalıntısı olarak kalacaktır.



(a)



(b)

Şekil 3.14 Sert parçacıkların metal yüzeylerinde oluşturduğu erozyon (a) 30° çarpma açısında yumuşak çelik (b) 90° çarpma açısında alüminyum

Aşındırıcı parçacıkların biçimi her bir çentik etrafındaki plastik deformasyonun biçimini (sürtünme sonucu aşınmada olduğu gibi) ve bir krater ağzı yada dudak oluşturan her bir çentikten taşınan malzemenin oranını etkiler. Daha yuvarlak parçacıklar daha az lokalize olmuş bir deformasyona yol açar ve her bir kalıntı bölümünün temizlenmesi için daha fazla etkiye gerek duyulur. Etki açısının artmasında da benzer bir etkiye sahiptir. Şekil 3.14 (b)'de normal geliş açısında ($\alpha = 90^\circ$ 'de) bulunan küresel parçacıkların komşu vuruşların oluşturduğu plastik deformasyonun sonunda ortaya çıkan yüzey açısallı parçacıklarla erozyona uğramış olan bir yüzeyden son derece farklı olarak görünür.

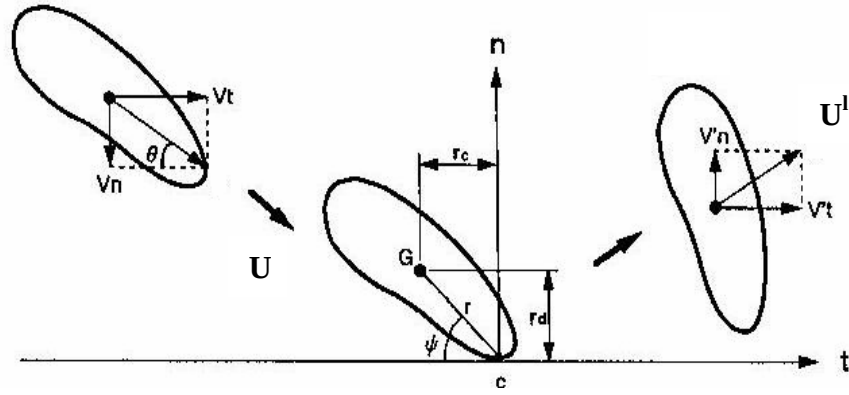
3.1.2.5.4.1. Metallerin erozyonu ile parçacık hızının ilişkisi

Yüksek etki açılarında kalıntılar yalnızca tekrarlanan deformasyon sonrasında ayrılırlar ve bu gerçeği göz önünde bulunduran modellerin uygulanması daha makuldür. Kesmenin herhangi bir etkisinin olmadığı erozyonun uç durumu, küresel parçacıkların normal geliş açısına sahip olması iki şekilde modellenebilir. Birinci şekilde yüzey malzemesinin biriken plastik zorlamanın kritik bir değere ulaşması sonucunda ayrıldığı varsayılır. İkinci şekilde ise probleme arda arda gelen parçacık etkileri ile ilgili deformasyonun neden olduğu düşük döngülü bir eylem olarak yaklaşmak yoluyla. Her iki yaklaşım da başlangıçta yapılan varsayımlardaki farklılıklara rağmen etki mekanizmaları konusundaki uygun varsayımlara benzer yorumlara yol açar. Erozyon oranı aşağıdaki denklemle tekrarlanacak olursa;

$$E = \frac{K_2 \rho \sigma^{1/2} U^3}{(\epsilon_c)^2 H^{3/2}} \quad (3.12)$$

Burada σ küresel erozyon parçacıklarının yoğunluğu, ϵ_c ise aşınma kalıntısının ayrılması olayının ortaya çıktığı plastik zorlamadır. 3.12 denklemi, 3.3 ve 3.4 denklemlerinden hız U 'nun (Şekil 3.15) üssünün daha yüksek olması nedeniyle belirgin şekilde farklıdır ve aslında bu iki ayrı yüzey malzemesi özelliği yüzeyin

erozyon direncini belirler. H ise yalnızca sertliği değil, aynı zamanda malzemenin süneklik ölçüsü içinde değer belirtir ve yine ε_c de erozyon direncini belirler.



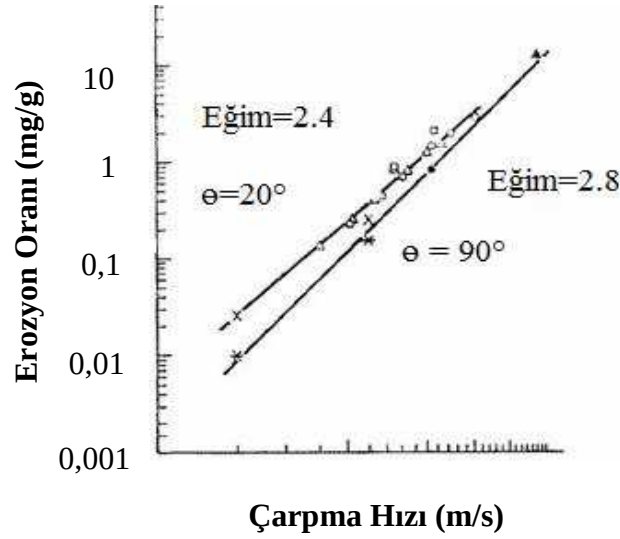
Şekil 3.15 Partikülün çarpma öncesi ve sonrası hızları

Uygulamada, metallerin erozyonu aşındırıcı parçacığın etki hızına karşı son derece duyarlıdır. Erozyon ile etki hızı arasındaki değişkenlik oranı genellikle

$$E \propto U^n$$

biçiminde ifade edilir.

Ve 2.3 ile 3.0 arasındaki n değerleri genellikle elde edilen değerlerdir. Hızın üssü olan n neredeyse daima daha basit modellerin öngördüğü 2.0 değerinden daha büyüktür ve genellikle yumuşak metaller için maksimum erozyon açısına yakın olan etki açıları 2.4 civarındadır. n 'nin daha yüksek değerlerinin Şekil 3.16 da gösterildiği gibi bakırın erozyonu bakımından daha dik etki açıları ile ilgili olduğu yönünde bir öneri vardır. Bu artış aşınma partiküllerini kaldırabilmek için gerekli aşındırıcı parçaların sayısına ve mekanizmadaki değişikliğe bağlıdır.

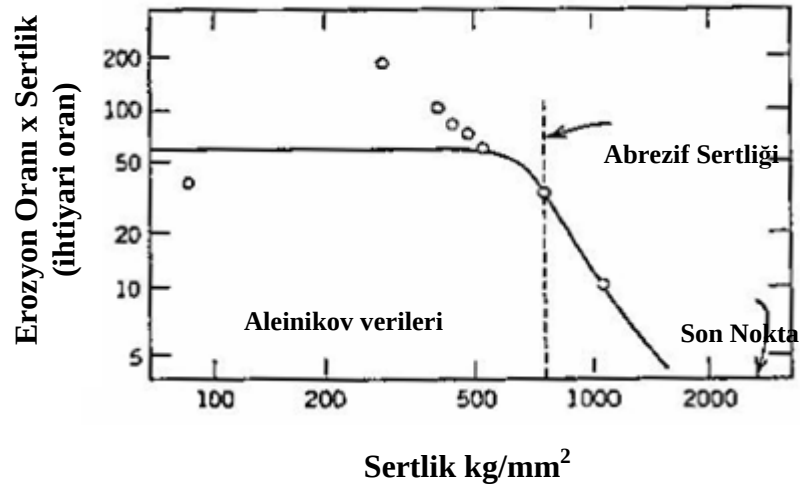


Şekil 3.16 Farklı araştırmalardan elde edilen bakırın erozyon oranları

Yukarıda genel hatları ile verilmiş tüm teorik modeller plastik deformasyon içeren mekanizmalara bağlı olarak ortaya çıkan erozyon oranlarının malzemenin ya 1 (3.11, 3.3 ya da 3.4 denklemleri) ya da $3/2$ (3.12 denklemi) kuvvetine yükseltilmiş olan sertliği ile ters orantılı olması gerektiğini öngörmektedir. 3.12 denklemi malzemenin yumuşaklığında bir bağımlılık öngörmektedir. Bu denklemlerin aynı zamanda birim parçacık kütlesi başına temizlenen kütleyi de öngörmesi nedeniyle, E malzemenin yoğunluğu olan ρ 'yla orantılı olmalıdır. Bu durum E/ρ miktarının sertliğe karşı grafiğinin çizilmesi için sertliğin tek başına değişiminin araştırılması sırasında yararlı olmaktadır. E/ρ parçacıkların birim kütlesi tarafından taşınan malzemenin hacmini temsil etmektedir ve özellikle erozyon nedenli aşınmanın tasarım bağlamında ölçülmesinde yararlıdır. Buna göre tanımlama yapıldığında hacim erozyonu için, birçok saf metal için bunların sertleştirilmiş durumdaki sertliklerine karşı aynı zamanda erozyona maruz kalmış yüzeylerin sertliğine karşı çizilir. Yüzey malzemesi parçacık etkileri ile işlenerek sertleşir ve bu durum iki sertlik değeri grubu arasındaki farkta yansıtılır. Hacim erozyonu ve sertleştirilmiş metalin sertliği arasında uygun bir ilişki bulunmasına rağmen, erozyona maruz kalmış yüzeyin sertliği ile daha iyi bir ilişki gözlenmektedir. Elbette ki sabit durum erozyonunu 3.11 ve 3.12 denklemlerine göre belirlemesi beklenen erozyona uğramış olan yüzeyin sertliğidir.

3.1.2.5.4.2. Sertliğin Abrezif Aşınma Oranına Etkisi

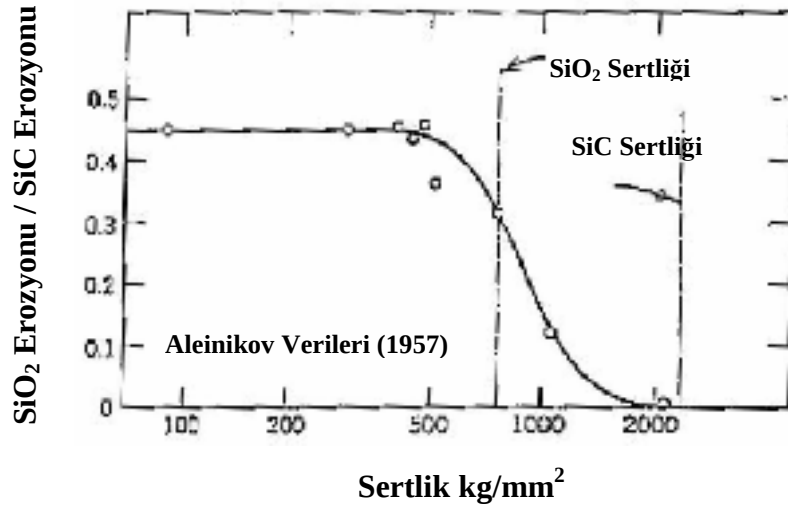
Herhangi bir abrezif kullanımındaki aşınma yapılacak yüzeyin sertliği, aşınma oranıyla ters orantılıdır. Dolayısıyla, aşınma oranı x sertlik ile sertlik arasında bir ilişki oluşturulursa, yatay bir doğrusal grafik çıkmalıdır. Şekil 3.17 de aşınan malzemenin sertliğinin abreziften çok olduğu bölgeye geldiğinde aşınma oranı x sertlik değerinin şiddetli biçimde düşüşü gösterilmektedir (Aleinikov, 1957). Pratikte doğru bir noktaya kadar yatay ilerlemekte ve sonra hızlı bir şekilde düşmektedir. Orta sertlikte bir abrezifin aşındırma oranıyla çok sert bir abrezifin aşındırma oranı, Şekil 3.18 de çizilen bir göstergeyle açıkça gösterilmektedir.



Şekil 3.17 Aşınma oranı – sertlik çizgisi

Abrezif aşınma oranının düşmeye başladığı sertlik hemen hemen abrezifin sertliğine eşit bir sertliğe denk geliyor (Kruschov ve Babichev, 1956). Ve oran, SiO₂ abrezifinden daha sert malzemede 0'a kadar düşmektedir. Herhangi bir abrezifin kendinden daha sert bir malzemeyi kesemeyeceği gerçeği, abrezif aşınma projesinin önemli bir özelliği olarak akılda tutulmalıdır. Abrezif aşınma gerektiğinde, abrezif, aşınmanın yapılacağı yüzeyden sert olmalı fakat bu sertlikte aşırı büyük farklılık gerekmemektedir. Abrezif aşınmanın istenmediği durumlarda, kayma yüzeyinin

abreziften sert olması sorunu çözer. Tablo 3.2 de en yaygın kullanılan abrezif partiküllerinden bazılarının mekanik özellikleri verilmiştir.



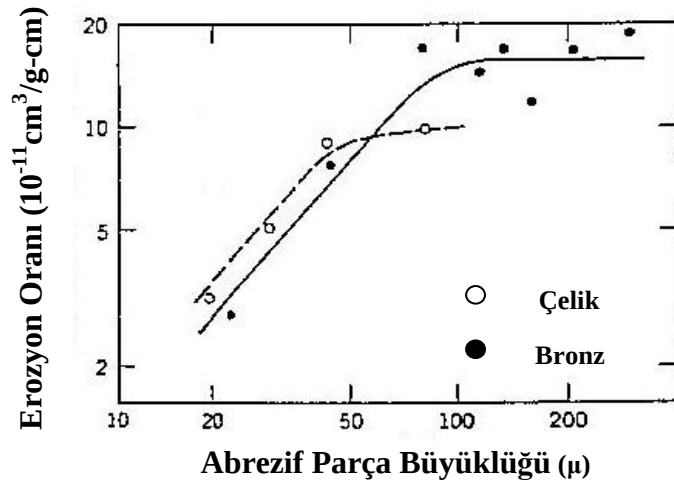
Şekil 3.18 SiO₂ ve SiC abrezifleriyle yapılan aşınmanın karşılaştırılması

Tablo 3.2 Bazı abrezif parçalarının mekanik özellikleri

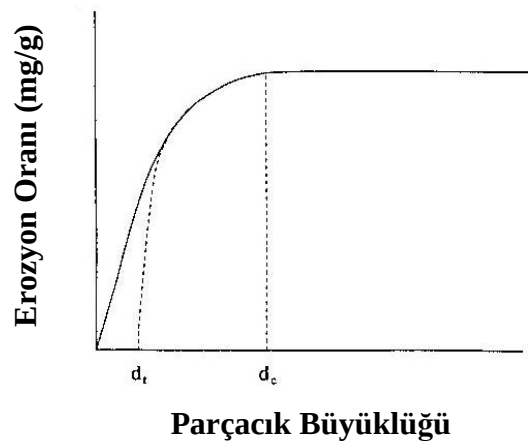
Erozyon malzemesi	Sertlik	Yoğunluk ρ	Kırılma Dayanımı
	HV	Kgm ⁻³	K _c , MPa m ^{1/2}
SiC	3000	3300	3.52
SiO ₂	1100	2150	1.6

3.1.2.5.4.3. Abrezif parça büyüklüğünün aşınma oranına etkisi

Birçok araştırmacı, aşınan malzemenin ve abrezifin sabit olduğu durumlarda, abrezif parçacık büyüklüklerinin değişme koşullarında bir kritik değer olduğunu bulmuşlardır. Bu değer üzerindeki parçacık büyüklükleri aşınma oranına etki etmezken bu kritik değerden küçük olanlar aşınma oranına etki eder (Kruschov ve Babichev, 1960). Tipik veriler Şekil 3.19 ve 3.20 de verilmiştir.



Şekil 3.19 Metallerin, abrezif parçacık boyutunun bir fonksiyonu olarak aşınma oranı



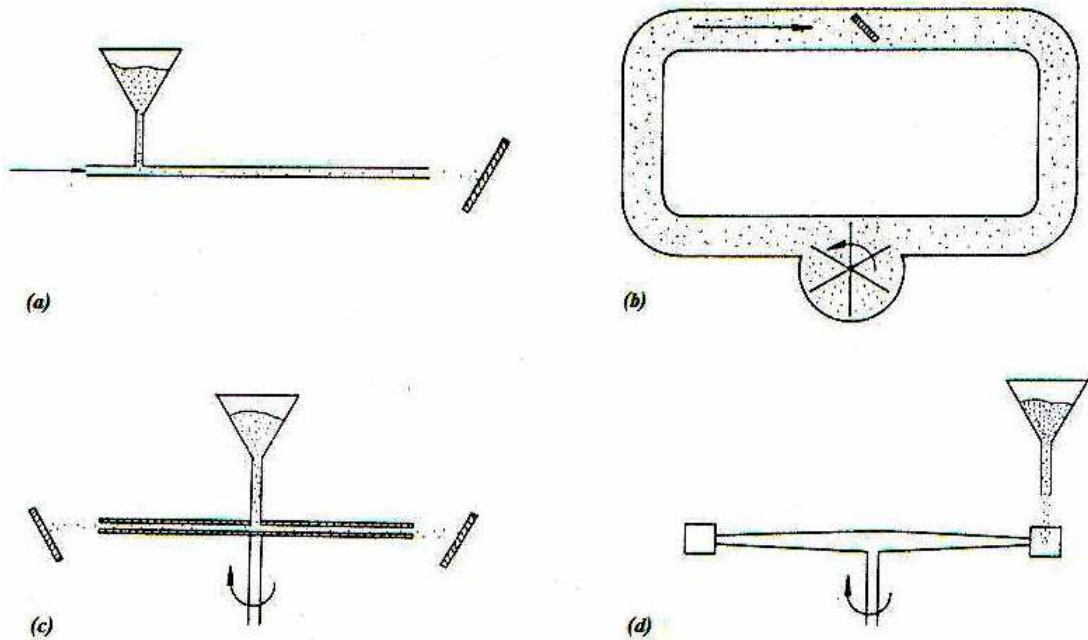
Şekil 3.20 Aşındırıcı parçacık büyüklüğünün erozyon oranına etkisinin şematik gösterimi

3.1.2.5.5. Erozyon aşınması test metotları

Laboratuvar ölçekli aşınma testleri; belli koşullarda mutlak ve izafi aşınma oranları konusunda veri temin etme, teorik modellerin geçerliliğini araştırma ve aşınma mekanizmalarını inceleme amaçlarıyla uygulanmaktadır. Bu hedeflerin ilki tasarım mühendisine direkt değerler verirken, diğerleri sürtünme sonucu ortaya çıkan aşınmanın anlaşılmasını kolaylaştırmada daha fazla değer taşır. Bir test sonucunun faydalı olabilmesi için vuruş koşulları (parçacık hızı, akış ve çarpma açısı) tanımlanmalı ve test edilen parçacıklar ve materyal iyice karakterize edilmelidir.

Laboratuvar aşınma testi için yaygın olarak kullanılan metotlar, parçacıkların bir gaz ya da sıvı akıntısında ivme kazandırıldığı metotlar ve vuruş hızını elde etmek için sirküler hareketin kullanıldığı metotlar olarak gruplara ayrılmaktadır. Şekil 3.21’de dört tür test metodunun şematik diyagramları gösterilmektedir. (a)’da gösterilen metotta parçacıklara paralel kenarlı ya da daha kompleks şekle sahip bir nozul boyunca gaz veya sıvı akıntısında ivme kazandırılır. Daha sonra bu parçacıklar sabit bir açıda nozul sonunda tutulan hedef materyale çarpar. Çoğunlukla jet vuruş ya da gaz akışı metodu adı verilen bu test, gazdaki parçacıklar (genellikle gaz taşıyıcı hava ile) ya da sıvı ile birlikte kullanılabilir. Çok farklı boyutları olan nozullar farklı uygulamalar için kullanılabilir. Pratik testlerde 1 mm’ den 50 mm çapa kadar olan nozullar kullanılır. Küçük bir nozul numune üzerinde küçük bir aşınma alanı oluşturur ancak daha az sıvı ve aşındırıcı parçacık oranları gerektirir. Daha büyük bir nozul ise iri taneli seramik malzemeler ya da büyük ölçekli heterojen mikro yapıları olan test materyalleri için daha uygundur. Ancak daha fazla sıvı ve aşındırıcı gerektirir. 10–100 m/s’ lik aralıkta olan vuruş hızları elde edilebilir, ancak nozulda uzun ivme aralıkları ile gazdaki parçacıklar için daha yüksek hızlar elde etmek mümkündür. Bu türdeki çoğu testte aşındırıcı parçacıkların çarpmaları sonucunda oluşabilecek kırılmalarından kaçınmak için sadece bir kez kullanılır. Ancak çok büyük nozullarda gerekli olan aşındırıcının miktarı parçacıkların yeniden sirkülasyonunu zorunlu hale getirebilir ve bu durumda, kırılmaya bağlı olarak aşındırma oranının test süresince düşmemesine özen gösterilmelidir.

Parçacık aşınma problemleri Şekil 3.21 (b)'de gösterilen pompa devresi ya da yeniden sirkülasyon devresinde de ortaya çıkar. Burada iki fazlı parçacık ve sıvı akışı (gaz veya sıvı) bir boru devresi etrafında gerçekleştirilir. Bu metot, pnömatik ve hidrolik iletim sistemlerinde valfler gibi parçaların aşınma oranlarını belirlemede oldukça önemlidir. Bu metot aynı zamanda numuneleri tamamen akış içerisine bırakarak materyallerin durumunu doğrudan incelemek için kullanılır. Şematik diyagram akışın pompa içerisinden geçtiğini gösterse de bazı uygulamalı tasarımlarda parçacıkları sıvıdan ayırıp daha sonra sıvıyı pompaladıktan sonra tekrar birleştirme yoluyla pompadaki aşınma önlenebilmektedir.



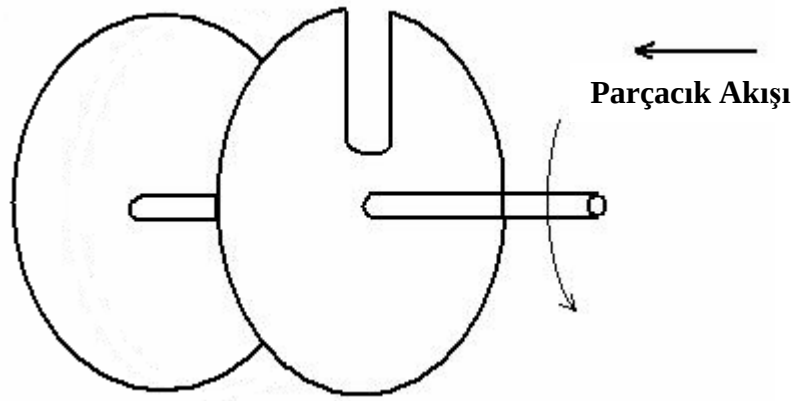
Şekil 3.21 Erozif aşınmaya maruz kalan numunelerin farklı gösterilişi (a) jet çarpma metodu, (b) sirkülasyon metodu, (c) santrifüj hızlandırıcı, (d) dönen kol metodu

Şekil 3.21 (c)'de gösterilen ve bazen açık merkez hızlandırıcı adı verilen metot, parçacıkların sürekli akışını sağlamak için sirküler hareket kullanır ve genellikle havada ya da vakumda kullanılır. Aşındırıcı parçacıklar rotorun merkezi üzerinden beslenir ve radyal tüpler ya da kanallar boyunca dışarıya doğru hareket ederler. Rotorun çevresel hızıyla eşit değerdeki hızda rotoru terk eder. Merkezden

dışarıya akan hareketler rotora teğetsel değildir. Bazı tasarımlarda radyal hızı düşürmek için tedbirler alınsa da dairesel kenara ulaştıkları anda radyal hız kazanmışlardır. Sabit numuneler rotorun dairesel kenarının etrafına yerleştirilmiştir ve metot yirmi adet ya da çok farklı örneklerin aşınma hareketlerini aynı anda karşılaştırabilmek için kullanılabilir.

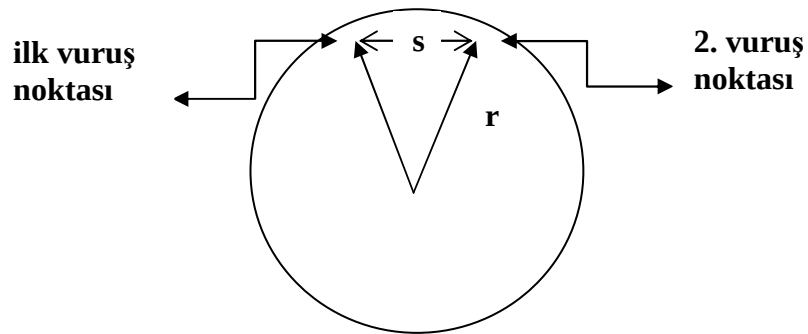
Şekil 3.21 (d)'de gösterilen aparatta, dengelenmiş bir rotorun iki ucundaki iki numune parçacıkların yavaşça döküldüğü akış yoluyla, rotorun çevre hızında ve numunelerin yönü ile belirlenen bir açıda bunlara çarparak yüksek hızda hareket eder. Bu dönen kol testi genellikle parçacıklar üzerindeki aerodinamik etkiyi önlemek ve rotoru döndürmek için gereken gücü azaltmak için vakumda kullanılır. Bu metotta numuneleri taşıyan bir rotorun sıvı ve parçacık dolu bir konteynır'a batırıldığı çimento pot testinde kullanılır ancak bu tür testte vuruş açısı ve hızını tanımlamak zordur.

Parçacık vuruş hızı, aşınma oranını etkileyen en önemli değişkendir. Aşınma testinde, hızın sabit tutulması ve tam olarak bilinmesi önemlidir. Aşınma testlerinde, basit metotlarla ölçülebilecek olan parçacık hızının sıvının hızıyla aynı olduğunu farz etmek bazen uygun olabilir. Örneğin jet vuruş testinde, belli bir zaman içinde nozuldan çıkan çimento hacmi çimento jetinin çıkış hızı için direkt bir ölçüm sağlar. Ancak havadaki parçacıklar için uygulanan çoğu test metodunda parçacık hızı için bağımsız bir ölçüm gereklidir. Çoklu flaş fotoğraf çekimi, Lazer Doppler Hız Ölçer (LDV) ve dönen disk metodu potansiyel olarak kullanılan metotlardır. Ekonomik nedenlerden dolayı çoğunlukla Şekil 3.22'de gösterilen ve bu metotların üçüncüsü kullanılmaktadır. Parçacıkların akışı ortak bir shaft üzerinde birlikte dönen ikili düzeneğin bir diskindeki kanaldan geçer.



Şekil 3.22 Gaz asıllı parçacık erozif deneylerinde kullanılan
çift disk parçacık hızı ölçme metodu

Parçacıklar diğer diske çarpar ve bir işaret bırakır. İkinci bir işaret, parçacık akışının mile sabitlenen diskler üzerindeki kanaldan geçmesine izin verilerek elde edilir. (Şekil 3.23)



Şekil 3.23 Çift disk metodu için partikül vuruş hızı ölçümü

İlk işaretin çıkarılması disklerin dönme hızı ve parçacıkların diskler arasındaki mesafe (L) boyunca geçişi ile ilgilidir. Partikül vuruş hızı için, denklem 3.13 de görüldüğü üzere;

$$S = 2\pi r \frac{L}{V} \vartheta \quad (3.13)$$

olup, S partikülün ilk vuruş noktası ile ikinci vuruş noktası arası mesafeyi belirtmektedir.

Yine;

$$\frac{L}{V} \vartheta$$

ifadesi diskin çevrim oranını belirtmekte V partikül akış hızını, ϑ ise disk çevrim hızını ifade etmektedir. Denklem 3.13'e göre V partikül akış hızı ise;

$$V = 2\pi r \frac{L}{S} \vartheta \quad (3.14)$$

şeklini almaktadır.

Dönen disklerin parçacık akışına olan aerodinamik etkisinden dolayı sistematik hata olabilse de, bu şekilde ölçülen hızlarda rasgele hata, $\pm\%10$ 'dur. Bu hata $\sim\%10$ ya da daha üzeri olabilir; küçük parçacıklar da ve düşük yoğunluklarda daha büyük değerlere ulaşacaktır. Dönen disk metodu bu küçük parçacıkların gerçek hızlarını $\%10\text{--}15$ arasında eksik gösterir. Bir jet vuruş aparatında, örneğin nozulun ucundan numuneye olan mesafe aynı zamanda vuruş hızını da değiştirir, çünkü numune yüzeyine yakın olan gaz akışı yansıyarak geriye döner ve böylece parçacıkların hareket hızını ve yönünü değiştirir. Burada yine LDV doğru vuruş hızı için çift disk metodundan daha iyi bir sonuca götürür.

Önemli olan ve bazen aşınma testi sırasında göz ardı edilen bir değişken, yüzeye çarpan parçacıkların akıntısıdır. Aşınma testleri belirli bir süre içerisinde ya da belirli bir aşındırıcı parçacık kütlesi ile gerçekleştiriliyor olduğundan, akış, yüzeyde bir noktanın maruz kaldığı vuruşların sayısını ve ardışık vuruşlar arasındaki zaman aralıklarını belirleyecektir. Bazı uygulamalı durumlarda, akış düşük olabilir, makul bir süre içinde ölçülebilir aşınma elde etmek için daha yüksek akışta bir laboratuvar testi yapılabilir. Bu tür teste hızlandırılmış test adı verilir. Eğer hızlandırılmış testin sonuçları aşınmayı tahmin etmek için kullanılacaksa, parçacık akışının aşınma üzerindeki etkisinin önemli olmadığı kabul edilmelidir. Normal akışlardaki çoğu materyaller için bu doğrudur. Ancak, çok yüksek akışlarda, aşınma yüzeye çarpan parçacıklar arasındaki etkileşmelerden ya da yüzey, yüksek orandaki kinetik enerji ile ısınacağından termal unsurlardan etkilenebilir. Bu tür etkiler, çelik

üzerinde $1\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ üzerindeki akışlarda ve düşük termal yayılımı olan materyallerdeki düşük akışlarda önemli hale gelebilir. Laboratuvar aşınma testlerinde bu yüzden yüksek akışlardan kaçınılmalıdır.

Parçacık akışının aşınma ölçümlerine başka bir etkisi aşınan yüzeyde kimyasal reaksiyonlar oluştuğunda ortaya çıkar. Bu reaksiyonlar konvensiyonel korozyon işlemleri olabilir. Örneğin, doğal kauçuğun aşınmasının düşük akışlarda, parçacık vuruş alanlarında materyalin oksidatif etkisinden kaynaklı olarak büyük ölçüde parçacık akışına bağlı olduğu bulunmuştur. Bu durum kauçuk karışımına anti-oksidadant eklenmesiyle elimine edilebilir. İnkübasyon davranışı, eğer buna izin verilmezse, aşınma testinde yanlış sonuçlara neden olabilir. Örneğin, tek bir zaman sürecinde ya da tek miktar aşındırıcısı olan bir materyali test etmek ve sonuç hacim kaybının doğru aşınma ölçümünü temsil ettiğini kabul etmek tehlikelidir. İnkübasyon sürecini tanımlayacak ve inkübasyondan sonra doğru aşınma ölçümü sağlayacak olan test prosedürleri kullanılmalıdır. Eğer sonuçlar uygulamada kullanılacaksa, laboratuvar testinde kullanılan aşındırıcı parçacıklar dikkatle seçilmelidir. Parçacık boyutu uygulamada kullanılanla aynı boyutta olmalıdır; aynı zamanda parçacık materyali ve açısallığı da aynı olmalıdır. Parçacıkların materyali aşınma mekanizmalarını ve aşınma oranını etkilemektedir. Nispi aşınma oranı açısından materyallerin niteliği farklı aşındırıcı parçacıklar kullanılarak değiştirilebilir.

3.1.3. Alüminyum ve alaşımlarının aşınması

Çelikten sonra günümüz endüstrisinde en fazla kullanılan metalik malzeme olan ve yer kabuğunda en çok bulunan ikinci element olmakla birlikte mühendislik uygulamalarında ekonomikliğiyle ön plana çıkan bir metal olan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafiflikleri, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, artırılmış mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için tercih edilen malzemeler konumuna gelmiş olup günümüzde düşük yoğunlukları, ve uygun kaynak kabiliyetleri gibi yukarıda belirtilen özelliklerinden dolayı çeliklerden sonra en çok kullanılan metalik malzeme haline gelmiştir (Tülbentçi 1987).

Günümüzde alüminyum ve alaşımların profillerinin kullanım sahaları şu şekilde sıralanabilir:

- Nakliye araçları (otomobil, gemi, tren, metro, uçak ve uzay araçları),
- Mimari uygulamalar ve inşaat sektörü (binaların cephe kaplama sistemleri pencereler, kapılar, çeşitli konstrüksiyonlar)
- Elektrik endüstrisi,
- Makina ve ekipman imali,
- Kimya ve gıda endüstrisinde,

Alüminyum ve alaşımları EN 573'e göre standardlaştırılmıştır. Alüminyum ve alüminyum alaşımları içinde en çok kullanılan alaşımlar 1xxx, 2xxx, 4xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alaşımlardır bu alaşımların standard gösterimleri aşağıda aktarılmıştır.

3.1.3.1. Alüminyum alaşımlarının kimyasal yapısına göre Sınıflandırılması

Alüminyum'a çeşitli özellikler vermesi için çeşitli metaller karıştırılır. İlave edilen metallerle göre sınıflandırma yapılır. Bir alaşım 4 rakamdan oluşan notasyon ile tanımlanır. Birinci rakam, alüminyum ilâve edilen esas metali gösterir. EN 573 normlarına göre;

1XXX: Alaşımsız alüminyum

2XXX: Bakır'lı alüminyum alaşımı

3XXX: Manganezli alüminyum alaşımı

4XXX: Silisyum'lu alüminyum alaşımı

5XXX: Magnezyum'lu alüminyum alaşımı

6XXX: Silisyum ve magnezyum'lu alüminyum alaşımı

7XXX: Çinko'lu alüminyum alaşımı

8XXX: Demir ve Silisyum'lu alüminyum alaşımları

9XXX: Yeni bulunan alaşımlar (Örnek: Lityum'lu alaşımlar)

3.1.3.2. Alüminyum alaşımlarının ısıtma işlem durumuna göre sınıflandırılması ve alaşım elementlerinin alüminyum alaşımlarına etkileri

Alüminyum yarı mamul veya mamuller üretildikten sonra belirli fiziksel özelliklere sahip olmaları için bazı işlemlerden geçirilirler. Genel olarak alüminyum alaşımları iki gruba ayrılırlar:

1- Isıtma işlem uygulanabilir alaşımlar

2- Isıtma işlem uygulanamayan alaşımlar

1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıtma işlem uygulanamayan türlerdir ve bunlar yalnızca şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ise ısıtma işlemine tabi tutulabilirler. 4xxx serisi hem ısıtma işlemine tabi tutulabilir hem de ısıtma işlemine tabi tutulamaz alaşımlar içerir (Anderson 2000).

Alüminyum alaşımları üretim metodları esas alınarak işlem ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılabilir. Bu da, imalat usullerinin farklı ihtiyaçları olduğunu gösterir. Plastik deformasyonla şekillendirilen alaşımlar, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikro yapı ve kompozisyona sahiptir. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıtma işlem yapılabilir ve yapılamaz alaşımlar olmak üzere, iki alt gruba ayrılabilir. Isıtma işlem yapılabilir alaşımlarda, yaşlandırma ile dayanım artışı sağlanabilirken, ısıtma işlem yapılamayan alaşımlar ise katı eriyik, pekleşme, ile mukavemetlendirilir.

Isıtma Alüminyum Alaşımları:

1xxx Ticari saflıkta Al (>%99Al) –Yaşlandırılmaz

2xxx Al-Cu alaşımları –Yaşlandırılabilir

3xxx Al-Mn alaşımları –Yaşlandırılmaz

4xxx Al- Si alaşımları –Eğer magnezyum varsa yaşlandırılabilir

5xxx Al-Mg alaşımları –Yaşlandırılmaz

6xxx Al-Mg-Si alaşımları –Yaşlandırılabilir

7xxx Al-Mg-Zn alaşımları –Yaşlandırılabilir

Döküm Alüminyum Alaşımları:

1xxx Ticari saflıkta Al –Yaşlandırılmaz

2xxx Al-Cu alaşımları –Yaşlandırılabilir

3xxx Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si alaşımları –Biraz yaşlandırılabilir

4xxx Al-Si alaşımları –Yaşlandırılmaz

5xxx Al-Mg alaşımları –Yaşlandırılmaz

7xxx Al-Mg-Zn alaşımları –Yaşlandırılabilir

8xxx Al-Sn alaşımları –Yaşlandırılabilir

Isıl İşlem Uygulanamayan İşlem Alüminyum Alaşımları:

1xxx Serisi Alaşımlar:

Bu alaşımlar minimum %99,0 alüminyum, empürite olarak da silisyum ve demir içerirler. Dayanım artışı için %0.12 bakır ilavesi yapılabilir. Bu alaşımlar yüksek oranda haddelenerek levha veya folyo haline getirilerek kullanılırlar. 1100 alaşımının tavlanmış durumda çekme mukavemeti 90 MPa dır.

3xxx Serisi Alaşımlar:

Bu serinin en önemli alaşımı 3003 tür. Bu alaşım 1100 alaşımına %1,25 mangan ilavesi ile oluşturulur. 3003 alaşımının tavlanmış durumda çekme dayanımı 110 MPa dır. Bu da demek oluyor ki mangan ilavesi dayanım artışı sağlar. Bu serinin alaşımları iyi işlenebilirliğin gerektiği yerlerde kullanılabilen genel amaçlı alaşımlardır.

5xxx Serisi Alaşımlar:

Bu serinin ana alaşım elementi olan magnezyum, katı eriyik mukavemetleşmesi sağlar ve miktarı %5 e kadar çıkabilir. Bu serinin endüstride kullanılan en önemli alaşımı 5052 dir. Bu alaşım %2.5 Mg, %0,2 Cr içerir ve tavllanmış durumdaki çekme dayanımı 193 MPa dır.

Isıl İşlem Uygulanabilen İşlem Alüminyum Alaşımları:

2xxx Serisi Alaşımlar:

Bu seri alaşımlarının birçoğuna bakırın yanında magnezyum ve düşük miktarlarda diğer elementler eklenir. 2xxx serisi alaşımları birim ağırlık dayanımının yüksek olması gereken uçak sanayi gibi alanlarda kullanılır. Bu alaşımlar katı eriyik mukavetlenmesi ve çökelti sertleşmesiyle dayanım kazanırlar. Endüstriyel uygulama alanı bulabilmiş en önemli alaşım 2024 alaşımıdır. 2024-T6 alaşımı %4,5 bakır, %1,5 magnezyum ve %0,6 mangan bulundurur ve çekme dayanımı 442 MPa dır.

6xxx Serisi Alaşımları:

Mg₂Si intermetalik bileşikler, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artışı sağlar. En yaygın kullanılan alaşım 6061 alaşımıdır ve bu alaşım %1,0 magnezyum, %0,6 silisyum, %0,3 bakır içerir. 6061-T6 alaşımının çekme mukavemeti 290 MPa dır. Bu seri, otomotiv sektöründe genel amaçlı yapı elemanı olarak kullanılır.

7xxx Serisi Alaşımlar:

Temel çökelti MgZn₂ intermetalik bileşiğinden oluşur. Çinkonun ve magnezyumun alüminyum içersinde yüksek çözünübilirliği yüksek yoğunluklu çökelti oluşmasını, bu da dayanımın oldukça yükselmesini sağlar. Bu serinin en önemli alaşımı 7075 tir ve bu alaşım %5,6 çinko, %2,5 magnezyum, &1,6 bakır ve %0,25 krom ihtiva eder. 7075-T6 alaşımının çekme dayanımı 504 MPa dır. Bu seri yüksek dayanımın gerekli olduğu yerlerde kendisine uygulama alanı bulur.

Tablo 3.3 Alüminyum alaşımlarının karşılaştırılabileceği standartlar

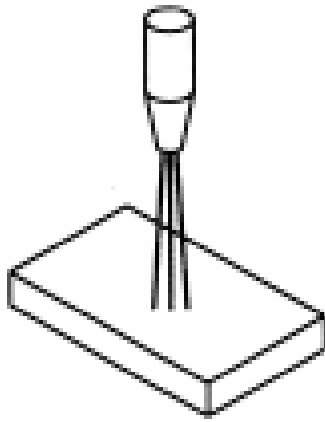
ETİAL	TSE	DIN	ABD(AA)	ISO
ETİAL-20	AlCuBiPb	AlCuBiPb	2011	AlCu6BiPb
ETİAL-21	AlCuSiMn	AlCuSiMn	2014	AlCu4SiMg
ETİAL-22	AlCuSiMg1	AlCuMg1	2017	AlCu4MgSi
ETİAL-24	AlCuMg2	AlCuMg2	2024	AlCu4Mg1
ETİAL-30	AlMnCu	AlMnCu	3003	AlMn1Cu
ETİAL-31	AlMn1Mg1	AlMn1Mg1	3004	AlMn1Mg1
ETİAL-33	AlMn1	AlMn	3103	AlMn1
ETİAL-35	AlMn0,5Mg0,5	AlMn0,5Mg0,5	3105	AlMn0,5Mg0,5
ETİAL-43	-	-	7178	AlZn7MgCu
ETİAL-44	AlZnMgCu1,5	AlZnMgCu1,5	7075	AlZn5,5MgCu
ETİAL-50	AlMg0,8	AlMg1	5005	AlMg1
ETİAL-51	AlMg1,5	-	5050	AlMg1,5
ETİAL-52	AlMg2,5	AlMg2,5Cr	5052	AlMg2,5
ETİAL-53	AlMg3	AlMg3	5754	AlMg3
ETİAL-54	AlMg2Mn0,3	AlMg2Mn	5251	AlMg2
ETİAL-60	AlMgSi0,5	AlMgSi0,5	6063	AlMg0,7Si
ETİAL-61	AlMgSi l	AlMgSi l	6351	AlSiMg0,5Mn
ETİAL-62	AlMgSi1	AlMgSi1	6082	-
ETİAL-64	-	E-AlMgSi	6463	-
ETİAL-65	AlMglSiCu	AlMglSiCu	6061	AlMglSiCu
ETİAL-98	AlFeSi	AlFeSi	8011	-

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Test Metodu

Aşınmanın tespiti için değişik deney düzenekleri kullanılmaktadır. Aşınmayla ilgili laboratuvar araştırmaları, aşınmanın meydana geldiği mekanizmayı incelemek veya pratikteki uygulamaya benzeterek aşınma oranları ve sürtünme katsayıları üzerinde uygun tasarım verilerini sağlamak için yapılır. Bu laboratuvar çalışmaları, aşınma oranının değişim parametrelerini anlamak için çok önemlidir.

Katı partikül erozyon aşınmalarında kullanılan temas geometrisi Şekil 4.1’de gösterildiği gibidir.



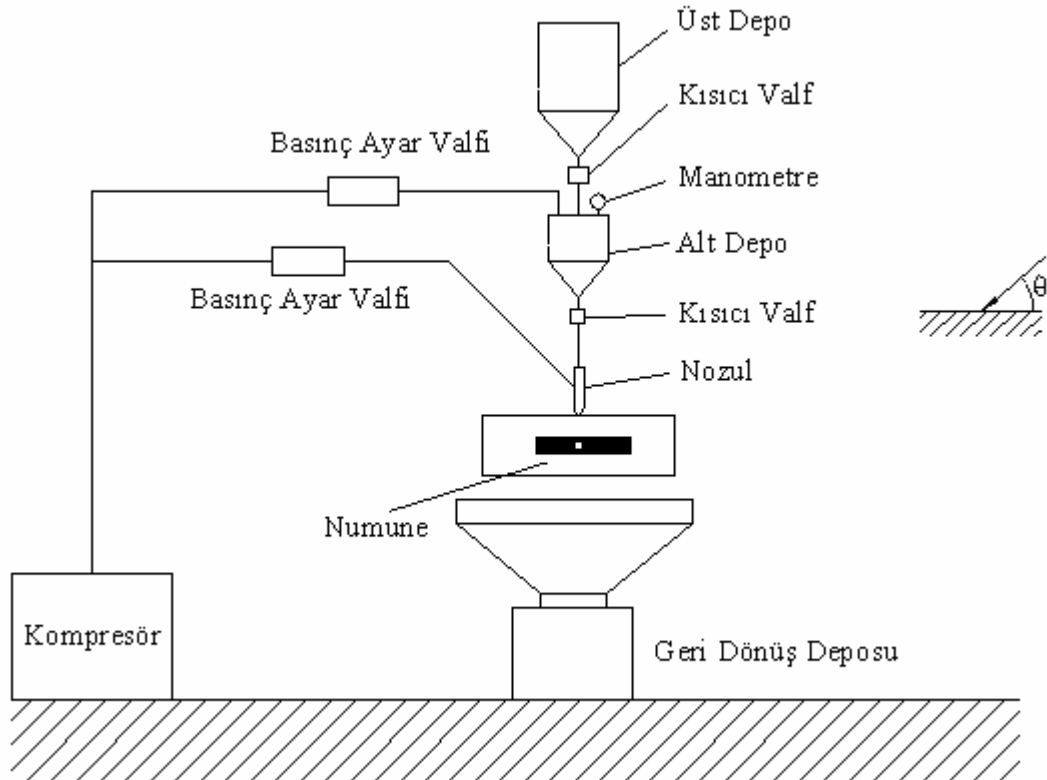
Şekil 4.1 Deney tesisatında kullanılan temas geometrisi

Bu tarz temas geometrisi kullanılarak katı partikül erozyon aşınmasına ait durumlar incelenmekle birlikte bunun yanı sıra yüzey işlemlerinin aşınma performansı, kaplamaların aşınma performansı gibi konular hakkında da bilgi sahibi olunmaktadır.

Uygulamadaki bu tarz basit ve ucuz olduğundan büyük miktarlardaki deneyler için uygundur. Bu metotta metaller, plastikler, kompozitler ve seramik malzemelerin aşınma dirençleri belirlenebilmektedir. Numune geometrisinin basit ve küçük olması aşınma ölçümlerinde boyutsal değişim ve ağırlık azalmasının kolaylıkla incelenmesine imkân vermektedir. Deney çalışmasında test sıcaklığı da malzemenin mekanik özelliklerini ve bazı kimyasal süreçleri etkilemesi bakımından önemlidir. Bu geniş kapsamlı etkenler gösterir ki pratik uygulamalarla aynı sayılabilir bir laboratuvar testi de yapmak mümkün değildir. Temas gerilmeleri, termal durumlar, kayma hızları ve kimyasal ortam bir aşınma testinde önemli unsurlardır.

4.2. Deney Tesisatı

Yapılan çalışmalar Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de şematik resmi ve fotoğrafları verilen katı partikül erozyon deney tesisatında yapılmıştır.



Şekil 4.2 Deney tesisatı şematik resmi

Deney tesisatında aşındırıcı partiküllerin bulunduğu iki adet depo bulunmaktadır. Dış ortama açık olan aşındırıcı malzemenin bulunduğu üst depo alt kısmında bulunan valf yardımıyla alttaki basınçlı depoya bağlanmıştır.

Çalışma öncesinde istenilen miktarda partikül üst depoya doldurulur ve buradan da alt depoya boşaltılarak iki depo arasındaki valf kapatılır ve bu suretle basınçlı havanın üst depodan çıkışı önlenir. Dolayısıyla alt deponun dış ortamla irtibatı kesilmiş olur.

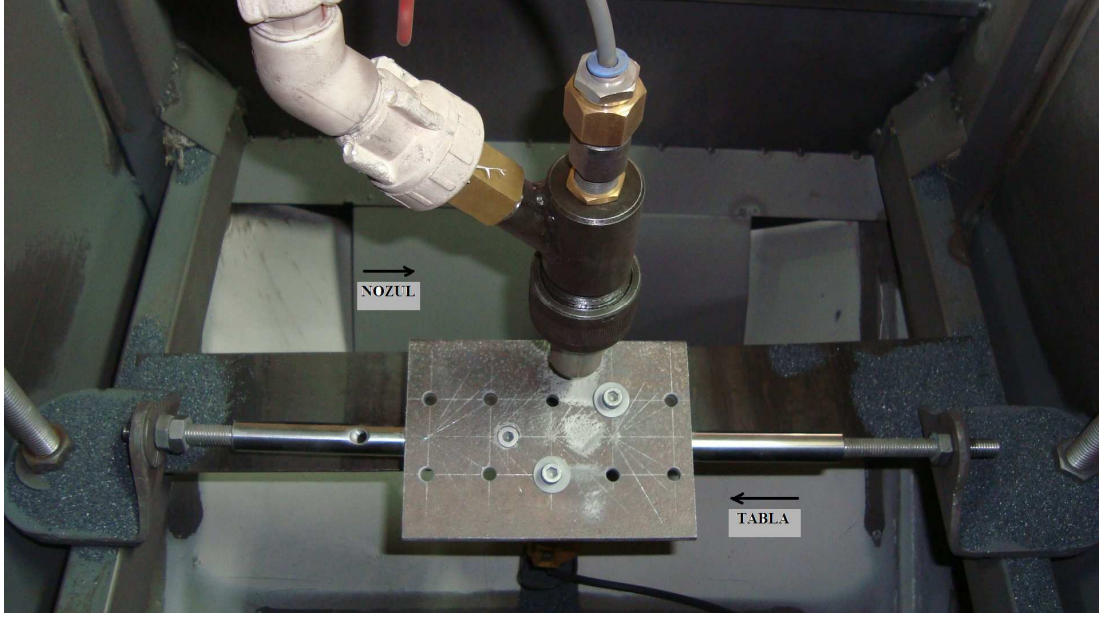


(a)



(b)

Şekil 4.3 Deney tesisatı fotoğrafları (a) ön görünüş, (b) sol yan görünüş



Şekil 4.4 Deney tesisatı - numune tutucu tabla ve püskürtücü nozul üstten görünüş



Şekil 4.5 Deney tesisatı - püskürtücü nozul

Deney tesisatında kullanılan basınç ayar valfleri vasıtasıyla depo içerisindeki ve nozuldaki basınçların kontrolü yapılabilmektedir. Sistemdeki manometre yardımıyla da alt depo içerisindeki basınç ölçülebilmektedir.

Deney tesisatındaki numune tutucu aparatın (Şekil 4.4) kendi ekseninde etrafında döndürülmesiyle çarpma açısı ayarlanmaktadır.

Deneyde kullanılan aşındırıcı partiküller geri dönüş deposunda depolanmaktadır. Aşındırıcı partiküllerin hızlandırması için ≈ 8 bar'lık kompresörden elde edilen kuru ve basınçlı hava kullanılmış ve nozul yardımı ile püskürtme işlemi yapılmıştır (Şekil 4.5).

4.3. Deney Numuneleri ve Aşındırıcı Partiküllerin Özellikleri

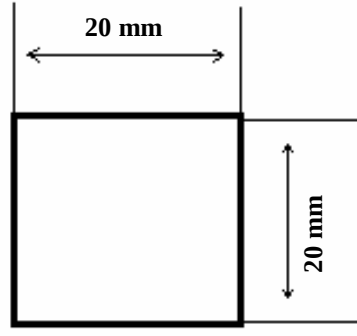
4.3.1. Deney numuneleri

Yapılan deneysel çalışmada 1050, 3003, 5754, 6061, 7075 (EN 573) alüminyum alaşımları kullanılarak aşınma oranının alaşım cinsine ve sertliğine göre nasıl değiştiği, çarpma açıları ve aşındırıcı partikül parametreleri de değiştirilerek incelenmiştir.

Deney numunesi olarak sac levha halinde Tablo 3.4 te mekanik özellikleri verilmiş olan 20 mm – 20 mm ölçülerinde (Şekil 4.6) kare profil olarak kestirilmiş 5 çeşit (1050, 3003, 5754, 6061, 7075 (EN 573)) alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

Tablo 3.4 Deney numunelerinin mekanik özellikleri

Alaşım	E (Mpa)	ρ (g/cm ³)	HV
1050	69000	2,70	43
3003	69500	2,73	62
5754	70500	2,68	66
6061	70000	2,70	81
7075	72000	2,81	90



Şekil 4.6 Numune ölçüleri

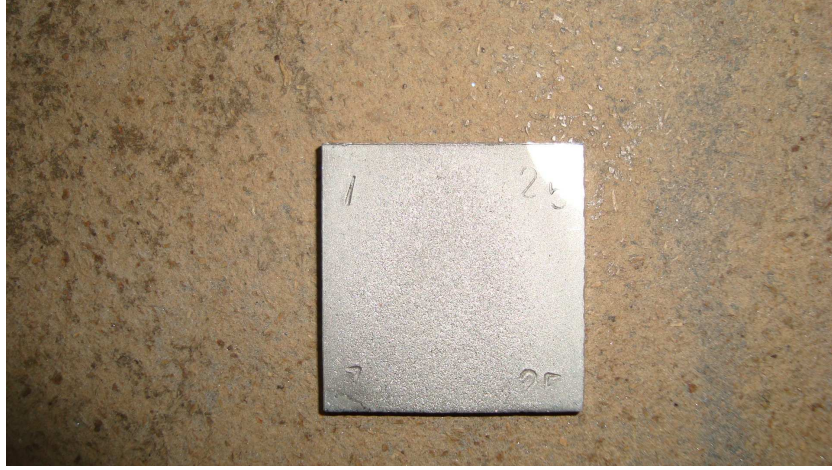
Yapılan deneysel çalışmada kullanılan ve yukarıda özellikleri verilmiş olan deney numunelerinin örnek fotoğrafları Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 da görülmekte olup Şekil 4.10 da toplu halde gösterilmiştir.



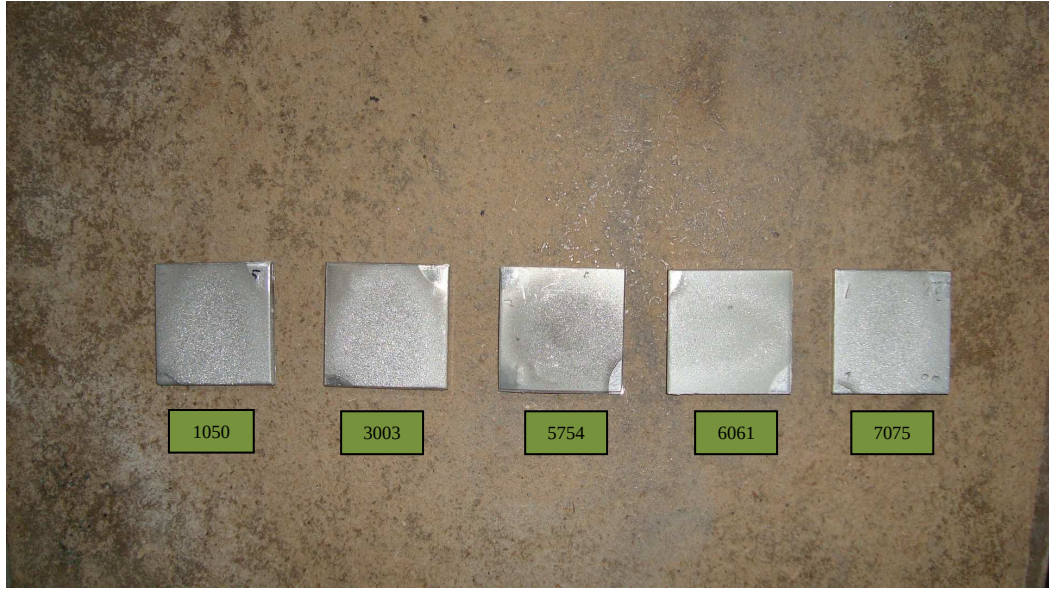
Şekil 4.7 Kullanılan deney numunesi (1050)



Şekil 4.8 Kullanılan deney numunesi (6061)



Şekil 4.9 Kullanılan deney numunesi (7075)



Şekil 4.10 Kullanılan deney numuneleri

Deney numunesi olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının içerisinde bulunan bileşimlerinin tam olarak tespit edilmesi için spektrometrik analizleri yapılmış ve yapı içerisindeki bileşimleri tespit edilmiştir (Tablo 3.5)

Tablo 3.5 Deney numunelerinin bileşimi

ALAŞIM	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Sn	% Ti	% Sb	% Al
1050	0,15	0,28	0,0002	0,004	0,0005	0,004	0,004	0,002	0,002	0,005	0,01	0,003	99,53
3003	0,16	0,24	0,06	1,07	0,0005	0,001	0,002	0,008	0,002	0,005	0,01	0,004	98,42
5754	0,138	0,287	0,02	0,25	2,64	0,03	0,002	0,02	0,002	0,005	0,0005	0,003	96,59
6061	0,56	0,33	0,19	0,05	0,87	0,02	0,007	0,113	0,002	0,005	0,01	0,003	97,81
7075	0,18	0,34	1,46	0,15	2,41	5,15	0,02	0,23	0,002	0,005	0,03	0,003	90,00

Deneylerde alüminyum alaşımlarını aşındırmak için karşı aşındırıcı olarak çelik grid (400 μm), Al_2O_3 (200 μm) ve Al_2O_3 (400 μm) aşındırıcı partikülleri kullanılmıştır. Kullanılan Al_2O_3 aşındırıcı partikülü, 200 μm ve 400 μm şeklinde iki farklı büyüklükte 150 HV sertliğe sahip olup yoğunluğu 3,4 g/cm^3 tir.

SAE G40 çelik grid ise; üniform martenzit içyapıya sahip, 400 μm büyüklüğünde, aşındırıcı partiküllerinin geometrisi açısallı olup sertliği 600 HV – 55 HC ve yoğunluğu 7,2 g/cm^3 tür. Aşındırıcı partiküllerin genel görünüşleri ve kimyasal yapıları da Şekil 4.7 ve Tablo 3.5 te verilmiştir.

Şekil 4.11 Aşındırıcı partiküllerin genel görüntüsü (400 μm çelik grid)

Tablo 3.6 Aşındırıcı partiküllerin kimyasal yapısı

Aşındırıcı partikül	Kimyasal yapı
G 40 Çelik grid	%C; 0.85 - 1.20, min %Si; 0,4, max %S; 0.05, max %P; 0.05, %Mn; 0.6-1.20
Al ₂ O ₃	% Al ₂ O ₃ ; 96.20, %FeO ₃ ; 0,5 min SiO ₂ ; %0,030, max FeO ₃ ; %0,035 max Na ₂ O; %0,50

4.4. Deney Prosedürü

Deney numunelerinin hazırlanması ve deneylerin yapılma işlemleri aşağıda verilen prosedüre göre yapılmıştır.

1. Deney numuneleri 20 mm-20 mm boyutlarda saç kesim tezgâhında kesilerek işlenmiş ve çalışma yüzeyleri taşlanmıştır.
2. Yukarıdaki işlemler tamamlandıktan sonra deney numunelerimizin içerisinde bulunan bileşimlerinin tam olarak tespit edilmesi için spektrometrik analizleri yapılmış ve yapı içerisindeki bileşimleri tespit edilmiştir.
3. Deney numuneleri aseton ile temizlendikten sonra basınçlı havayla kurutularak yüzeyinde bulunabilecek muhtemel yağ ve kirden temizlenmiştir.
4. Deney numunesinin ilk ağırlığının tespit edilmesi için deney numunesi 0,0001 gr hassasiyete sahip hassas terazide tartılarak ağırlığı kaydedilmiştir.
5. Deney numunesi numune tutucu aparatındaki yerine yerleştirilmiş ve açılma değeri ayarlanmıştır.
6. Basınç valfleri vasıtasıyla basınç değerleri ayarlanarak püskürtme hızı 30 m/s olarak ayarlanmıştır.

7. Püskürtme hızı ve çarpma açıları ayarlandıktan sonra deney numuneleri 30 kg aşındırıcı miktarı için 200 μm lik Al_2O_3 , 400 μm lik Al_2O_3 ve 400 μm lik G40 çelik grid aşındırıcı partikülleri ile erozyon aşınmasına maruz bırakılmıştır. Daha sonra aynı deney 60 kg aşındırıcı kullanılarak tekrar edilmiştir.

8. Deney numuneleri olarak kullanılan 5 farklı alüminyum alaşımının (1050, 3003, 5754, 6061 ve 7075 (EN573)) sırası ile 30°, 45° ve 60°, çarpma açılarında deneyleri yapılmıştır. Her bir çalışma 3 kez tekrarlanmıştır.

9. Deney tamamlandıktan sonra deney numunesi tekrar basınçlı havayla temizlendikten sonra ağırlık kaybının ölçülebilmesi için deney numunesi hassas terazide tartılarak son ağırlığı kaydedilmiştir.

10. Hassas terazi ile ölçülen ilk ağırlık ve son ağırlık farkı ağırlık kaybıdır. Hesaplanan ağırlık kaybı aşağıdaki formülde yerine konularak erozyon oranı hesaplanmıştır.

$$E = \text{Ağırlık kaybı (g)} / \text{Kullanılan aşındırıcı miktarı (kg)} \quad (4.1)$$

11. Deney sonuçlarına göre katı partikül aşınma oranının kullanılan alaşım cinsi, aşındırıcı partikül miktarı, aşındırıcı partikül boyutu, aşındırıcı partikül cinsi, çarpma açısı değişimlerine bağlı olarak nasıl değiştiği grafikler yardımı ile gösterilmiştir.

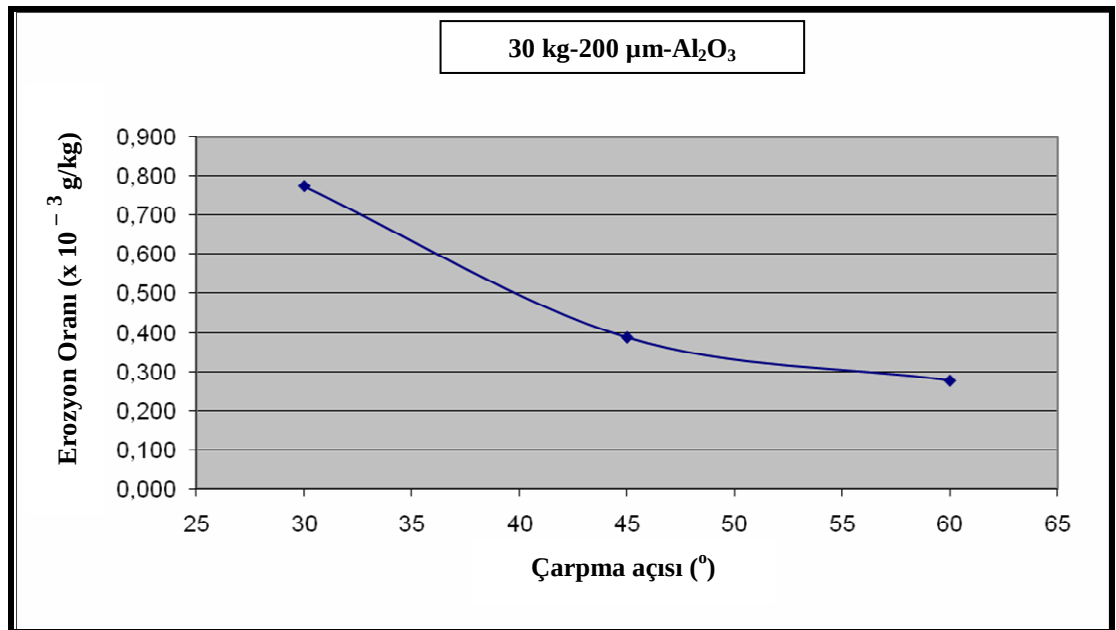
5.DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1.Deneysel Sonuçlar

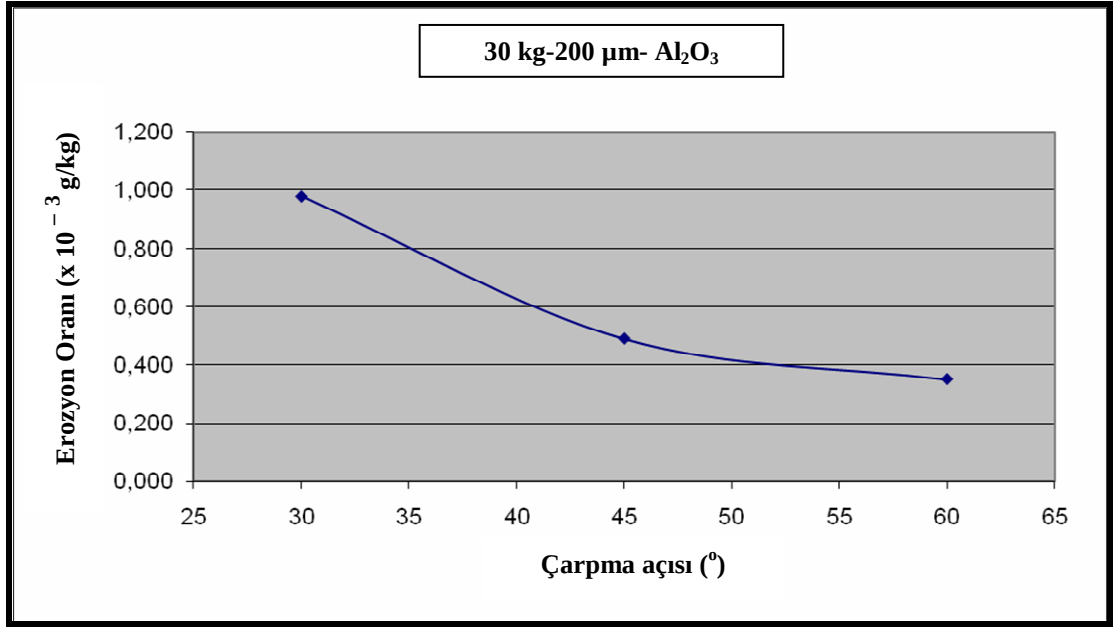
Beş farklı alüminyum alaşımı (1050, 3003, 5754, 6061 ve 7075 (EN 573)) üç farklı çarpma açısında (30° , 45° ve 60°) 3 kategoride erozyon aşınmasına tabi tutulmuşlardır. Deney numuneleri 30kg aşındırıcı partikül miktarı için; 200 μm boyutundaki Al_2O_3 , 400 μm boyutundaki Al_2O_3 , 400 μm boyutundaki çelik grid aşındırıcı partikülleri ile aşındırılmıştır. Daha sonra aynı deneyler 60kg aşındırıcı partikül kullanılarak tekrarlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda püskürtme hızı sabit tutularak çarpma açılarının, kullanılan alaşım cinsinin, aşındırıcı partikül miktarının, aşındırıcı partikül boyutunun ve aşındırıcı partikül cinsinin aşınmaya etkisi incelenmiştir.

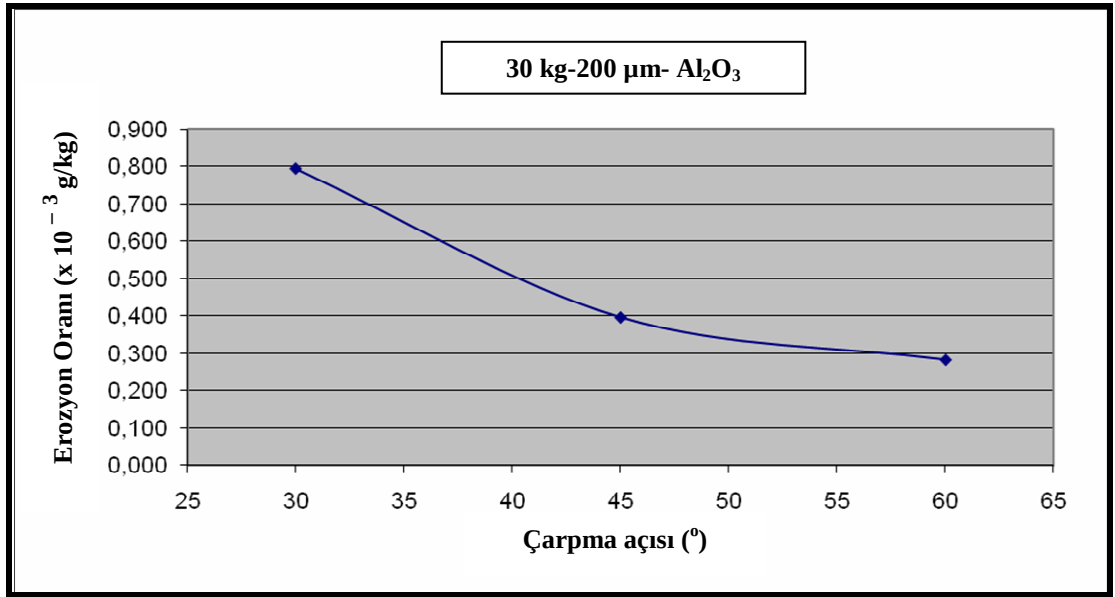
Yapılan deneyler esnasında her bir alüminyum alaşımı için 30 kg - 200 μm büyüklüğündeki Al_2O_3 aşındırıcı partikülü kullanılarak elde edilen erozyon oranı ile etki açısı arasındaki değişimler Şekil 5.1 ile Şekil 5.5 arasında verilmiştir. Şekil 5.6 da ise bu değişimler toplu halde verilmiştir.



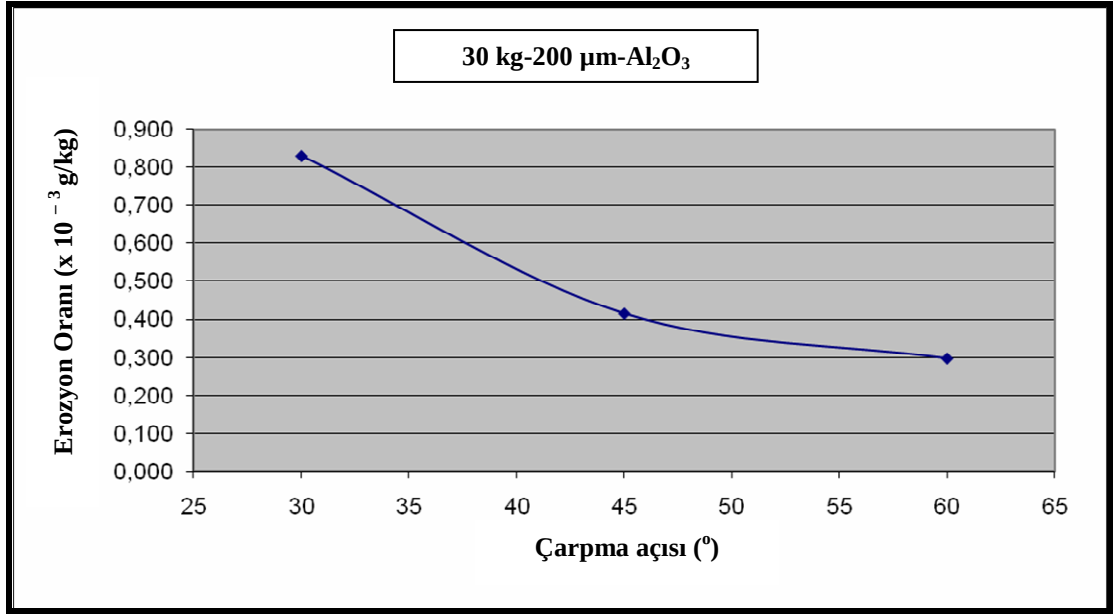
Şekil 5.1 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



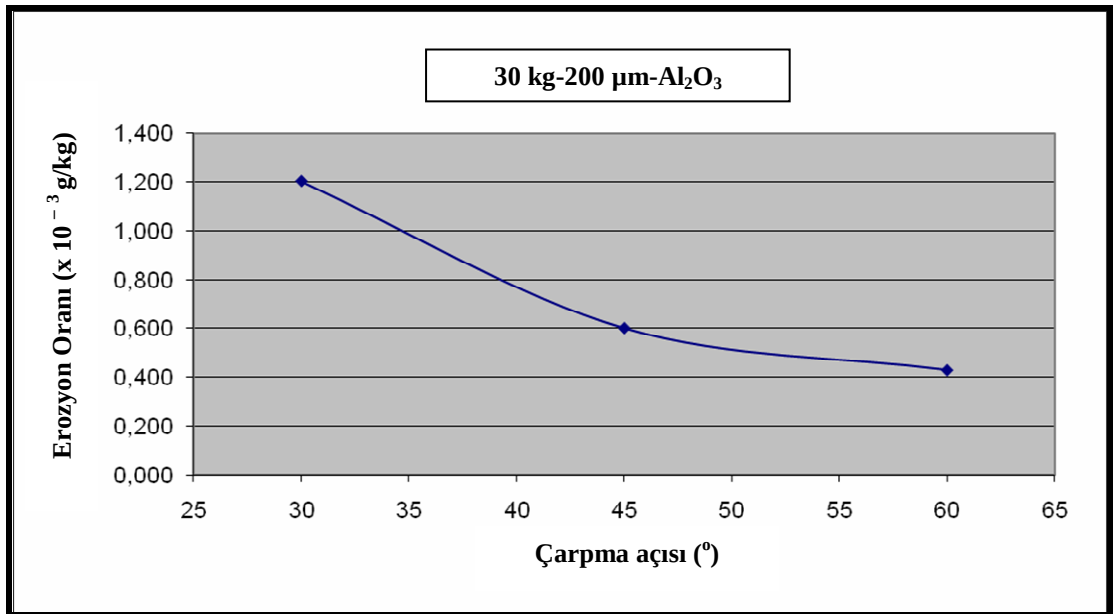
Şekil 5.2 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



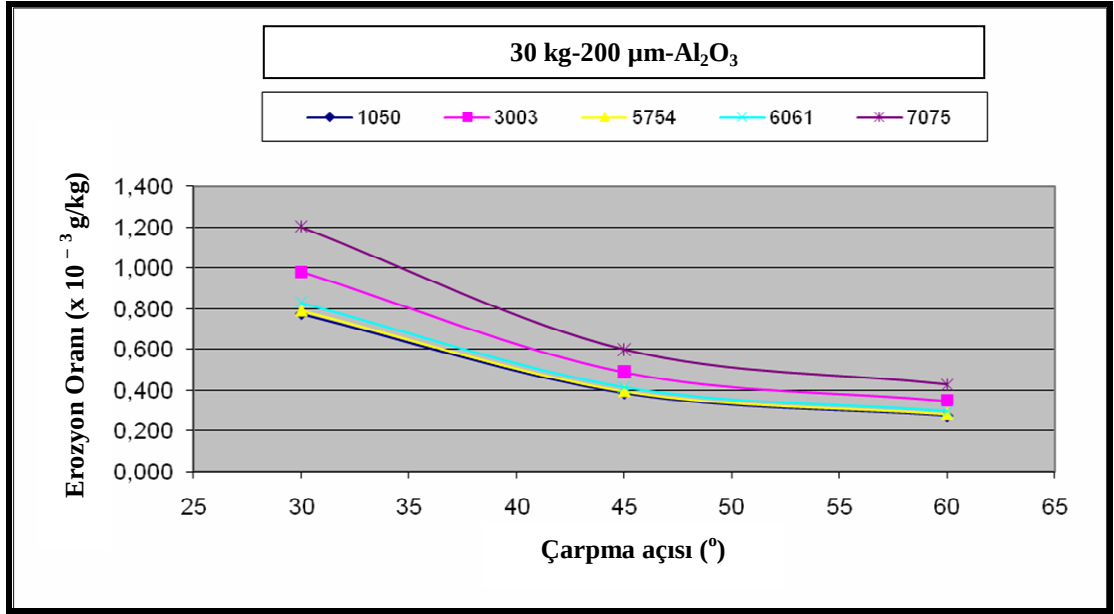
Şekil 5.3 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



Şekil 5.4 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



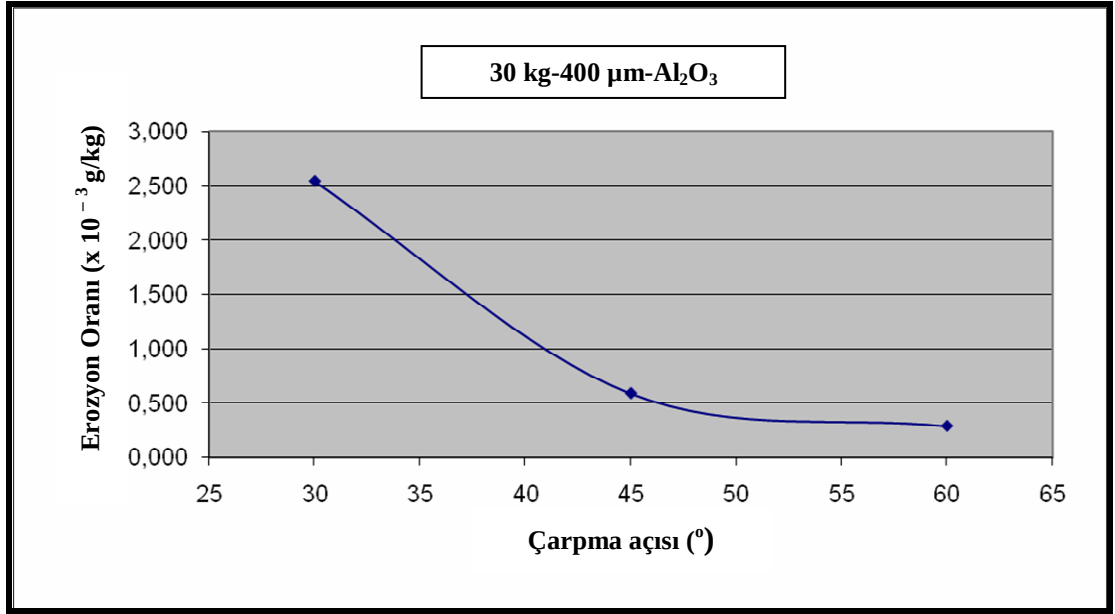
Şekil 5.5 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



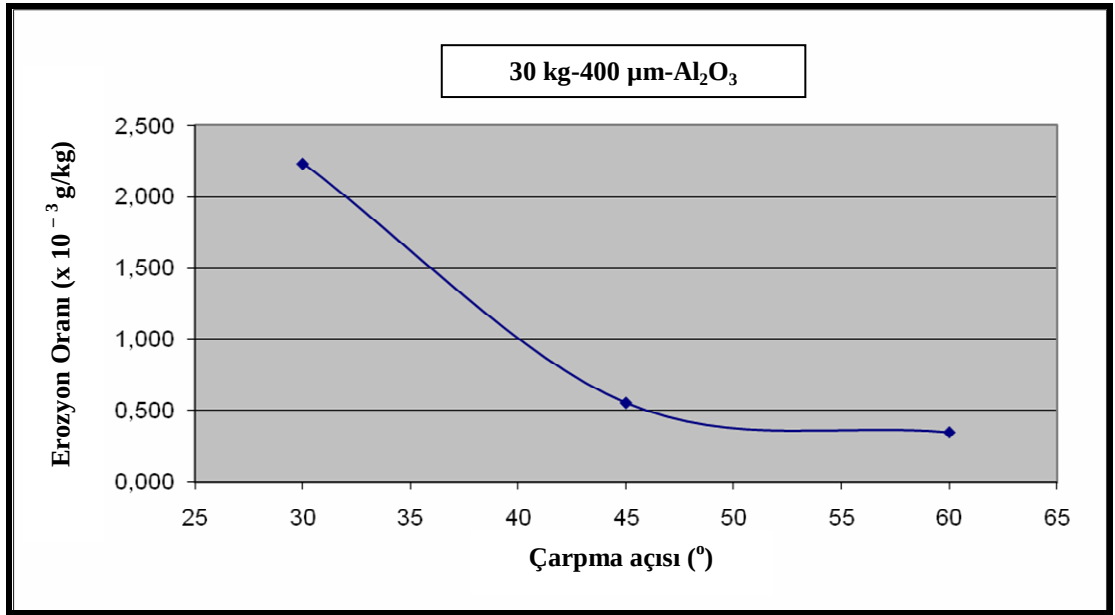
Şekil 5.6 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

Deneylerden de görüldüğü üzere 30 kg - 200µm büyüklüğündeki Al₂O₃ aşındırıcı partikülü için en fazla aşınma oranı 30° de elde edilmiş çarpma açısı büyüdükçe erozyon oranı küçülmüştür. Deneylerden elde edilen veriler daha önce Şekil 3.8 de de gösterildiği gibi sünek malzemelerin erozyon oranının çarpma açısına bağlı değişimini teyit etmiştir. Her bir alüminyum alaşımı için 30 kg aşındırıcı partikül kullanımı erozyon aşınmasında ilk aşamada inkübasyon (uyum) sürecinin geçerli olduğunu göstermiştir (Burstein ve ark. (1991)).

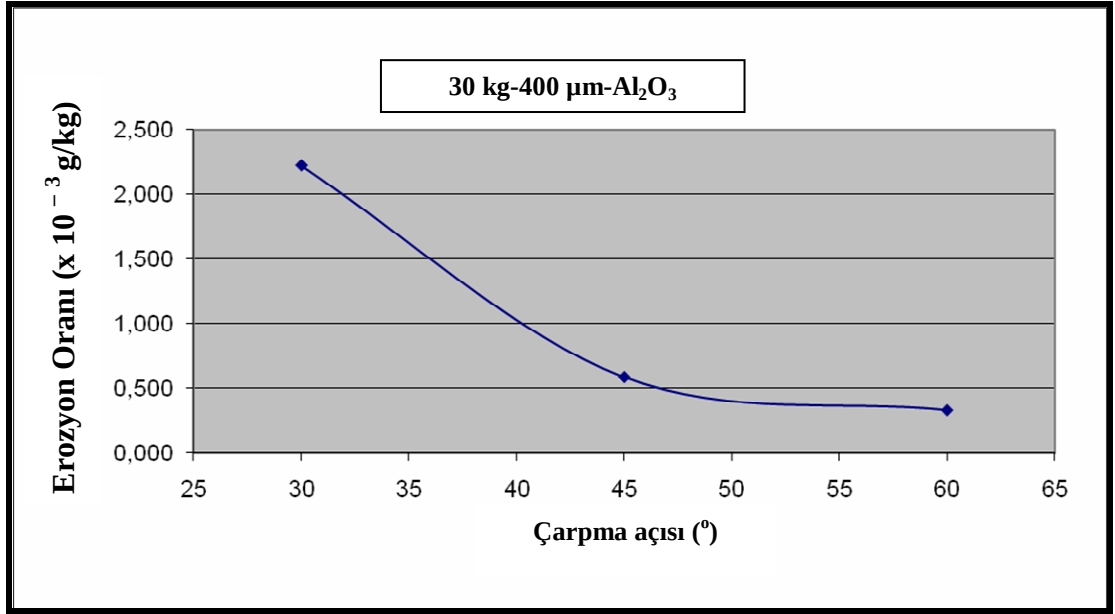
Her bir alüminyum alaşımı için 30 kg - 400 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ aşındırıcı partikülü kullanılarak elde edilen erozyon oranı ile çarpma açısı arasındaki değişimler Şekil 5.7 ile Şekil 5.11 arasında verilmiştir. Şekil 5.12’de ise yine bu değişimler toplu halde verilmiştir.



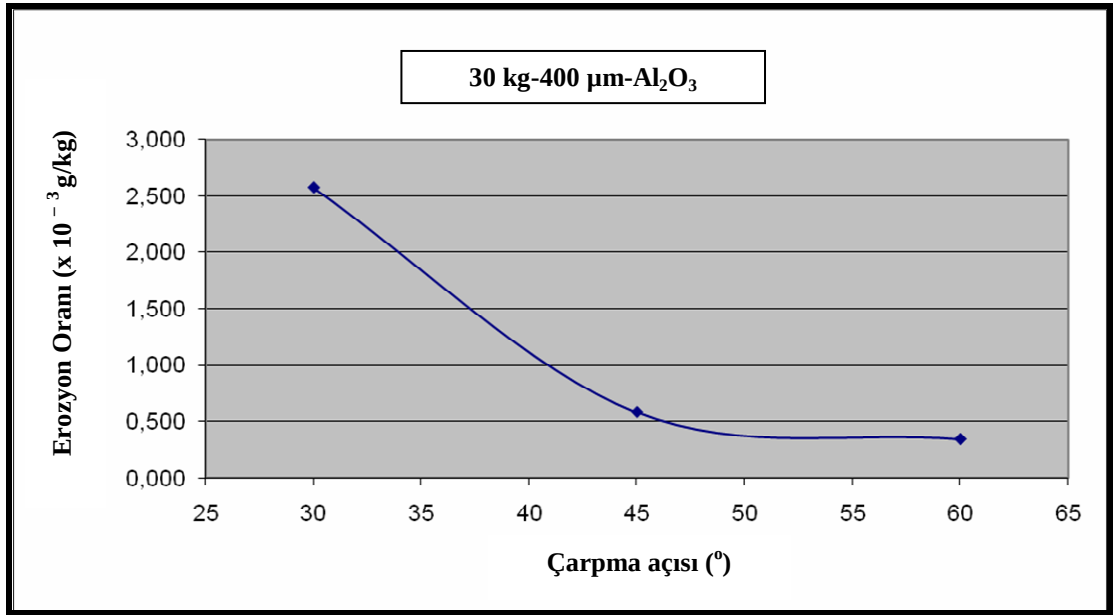
Şekil 5.7 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



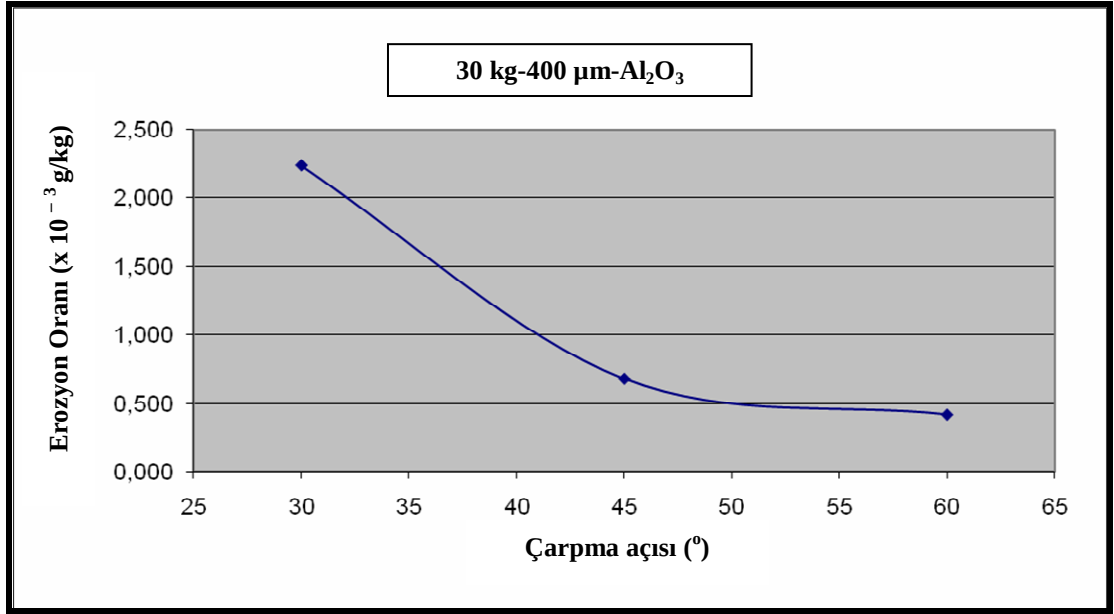
Şekil 5.8 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



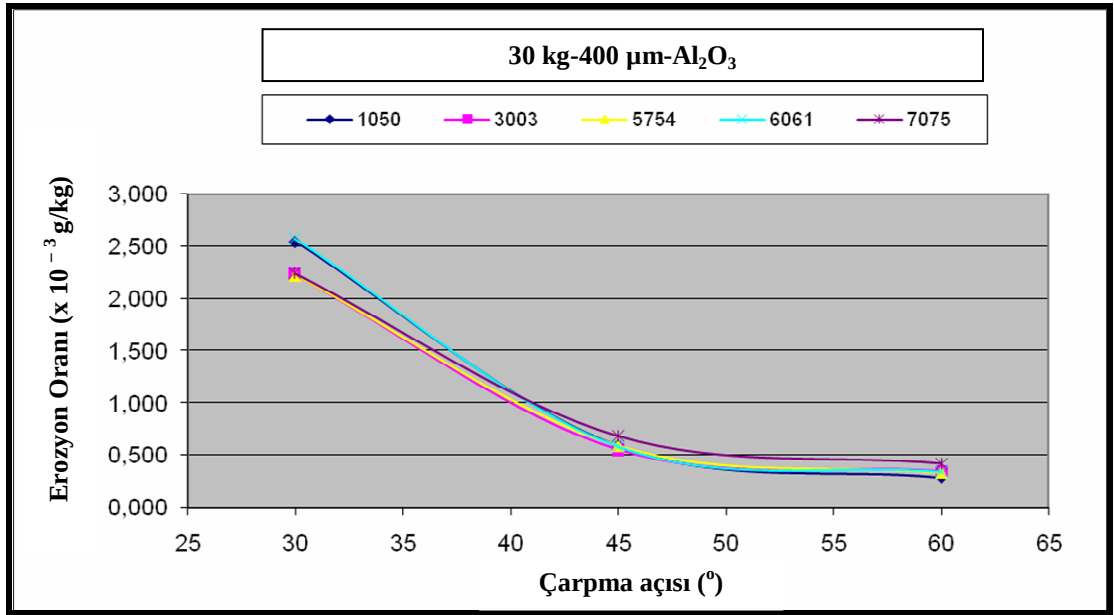
Şekil 5.9 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



Şekil 5.10 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



Şekil 5.11 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

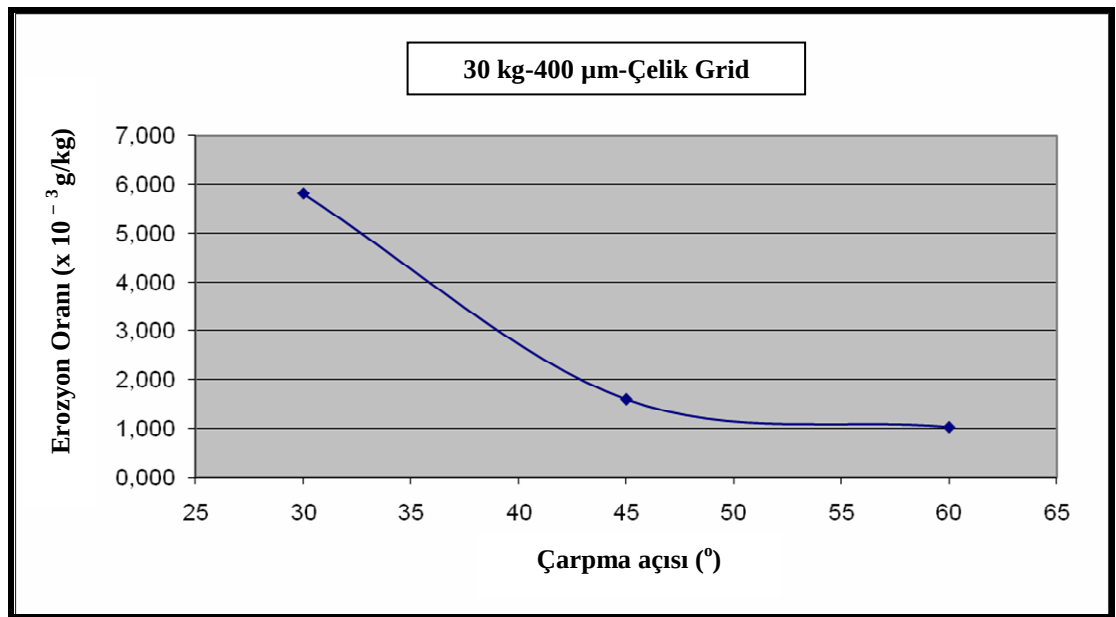


Şekil 5.12 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

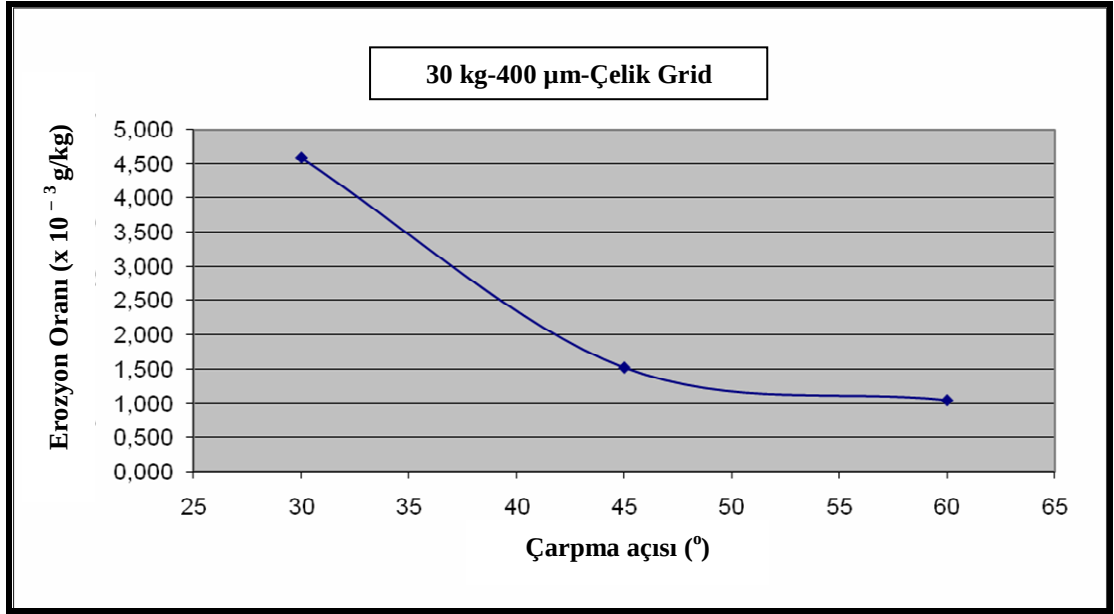
Grafiklerden de görüldüğü üzere 400 μm büyüklüğündeki Al_2O_3 aşındırıcı partikülü için çarpma açısı büyüdüğünde erozyon oranı azalmış maksimum erozyon oranı 30° lik çarpma açısında gerçekleşmiştir. Alüminyum alaşımları arasındaki

erozyon oranı sıralamasında ise aşındırıcı partikül boyutunun büyümesi ile gözle görülür bir fark olmamış, inkübasyon (uyum) süreci tekrar gözlenmiştir.

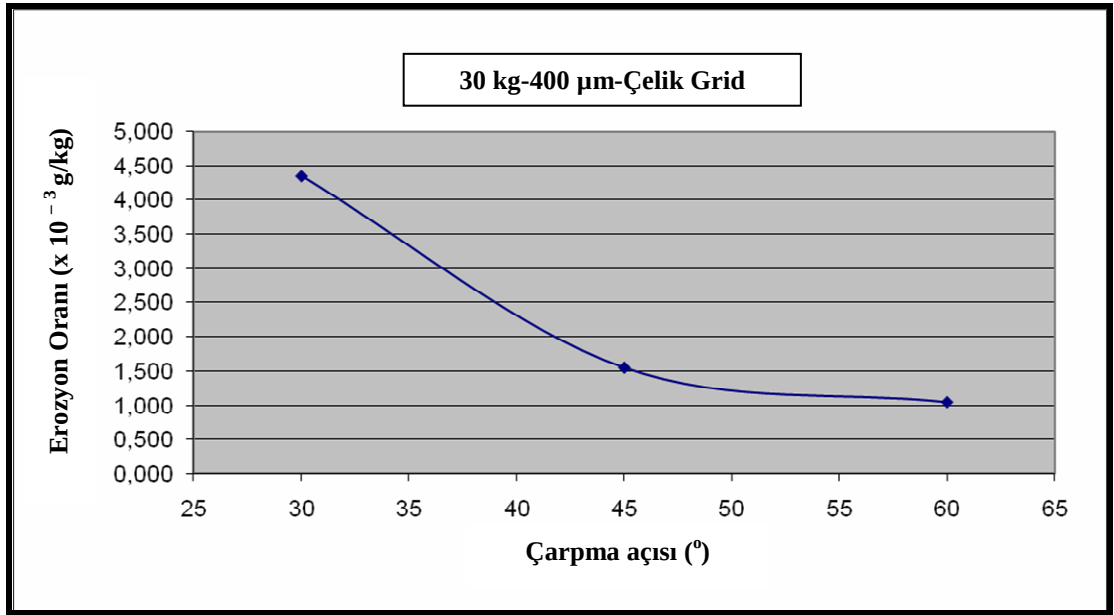
Yine her bir alüminyum alaşımı için 30 kg - 400 μ m büyüklüğündeki çelik grid aşındırıcı partikülü kullanılarak elde edilen erozyon oranı ile çarpma açısı arasındaki değişimler şekil 5.13 ile şekil 5.17 arasında verilmiştir. Şekil 5.18’de ise bu değişimler toplu halde verilmiştir.



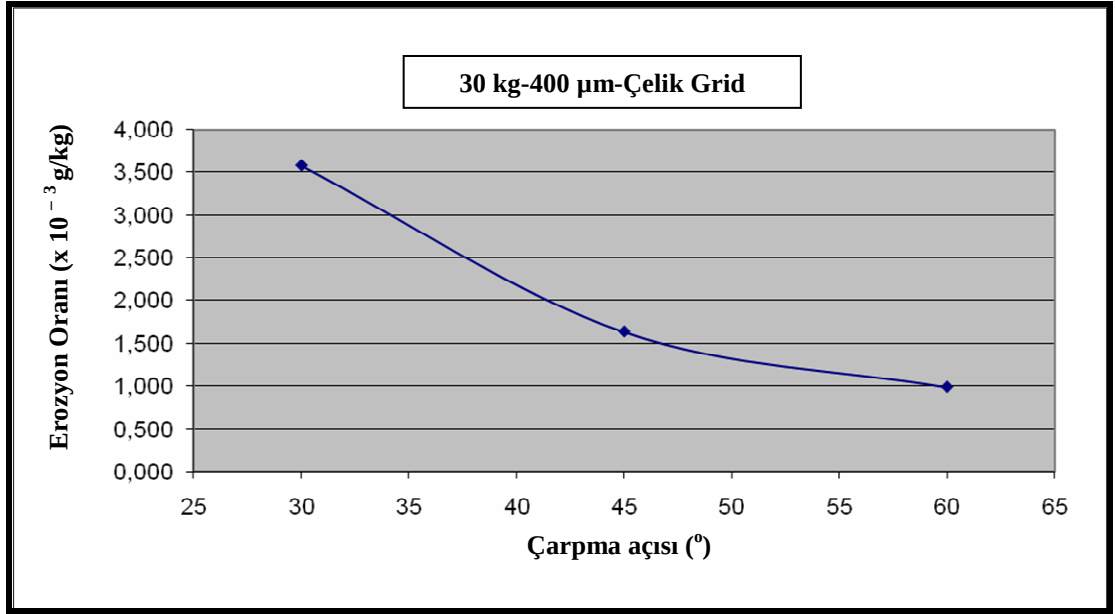
Şekil 5.13 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



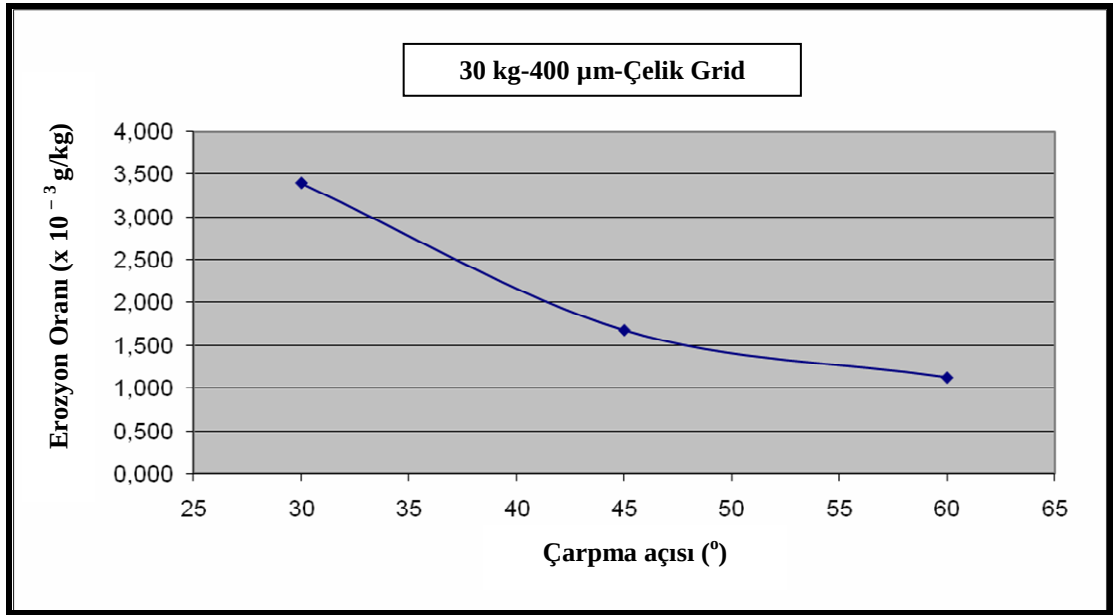
Şekil 5.14 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



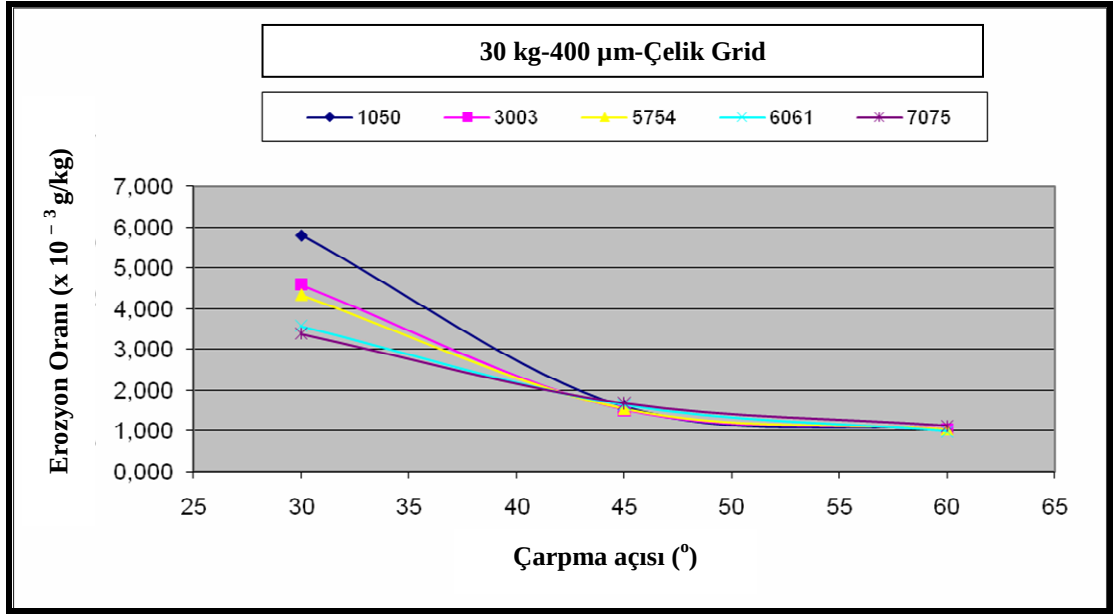
Şekil 5.15 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



Şekil 5.16 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



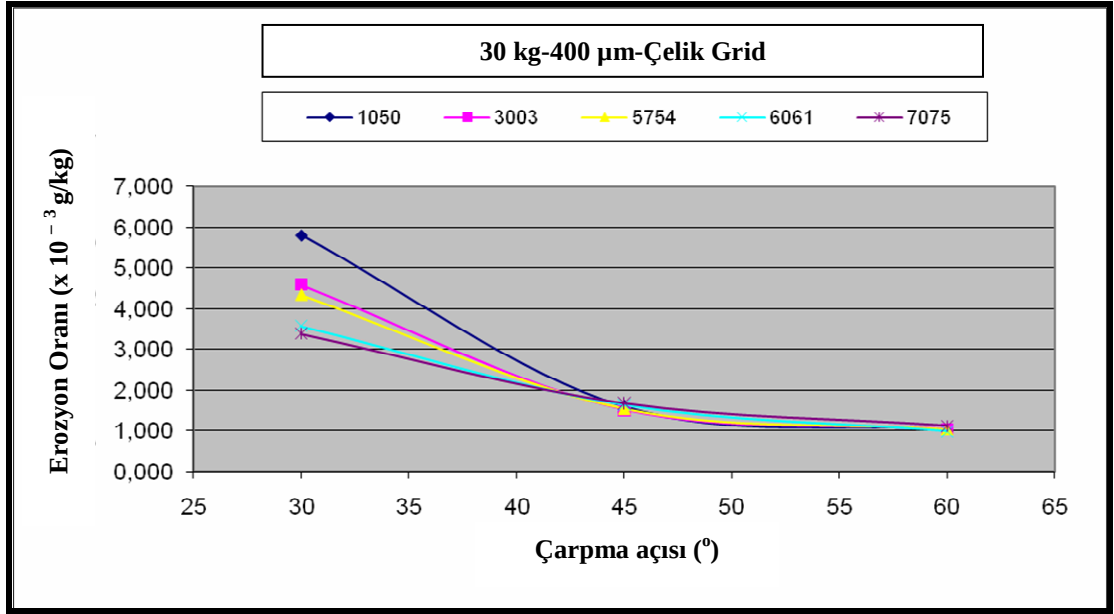
Şekil 5.17 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



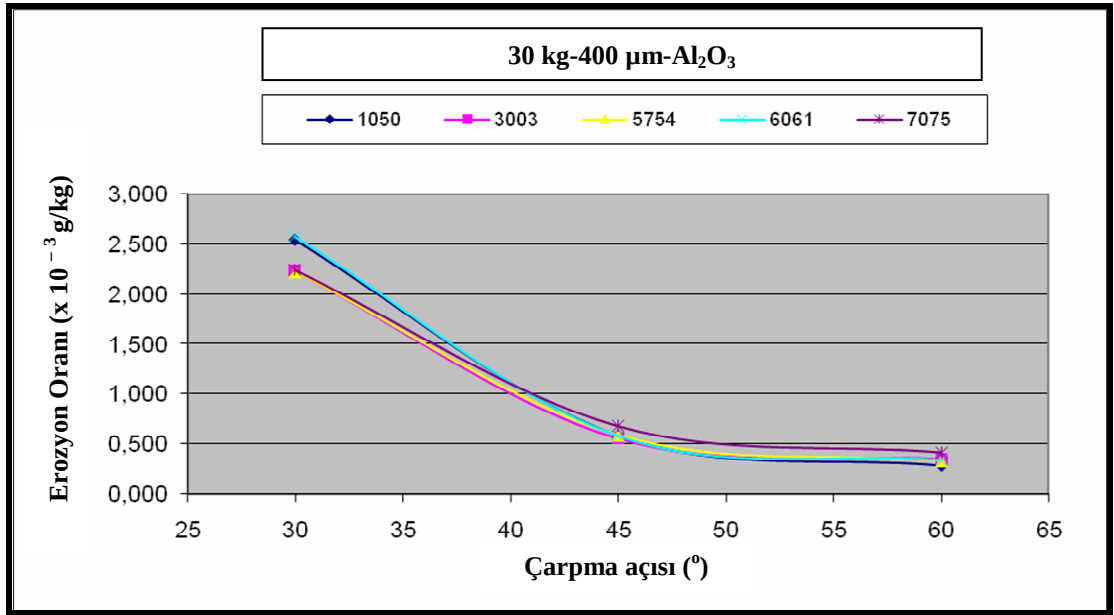
Şekil 5.18 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü üzere 400 µm büyüklüğündeki çelik grid aşındırıcı partikülü için erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi incelendiğinde alüminyum alaşımlarının sertliği arttıkça erozyon oranı da ters orantılı olarak azalmaktadır. 400 µm büyüklüğündeki çelik grid aşındırıcı partikülü için alüminyum alaşımları arasındaki erozyon oranı sıralaması daha net bir şekilde ortaya çıkmış inkübasyon (uyum) süreci etkisi erozyon oranının fazla olması nedeni ile ortadan kalkmıştır. Çarpma açısı ise 30° de 45° ve 60° ye göre daha fazla aşınma oranı sağlayarak daha önceki deneylerimizi de teyit etmiştir.

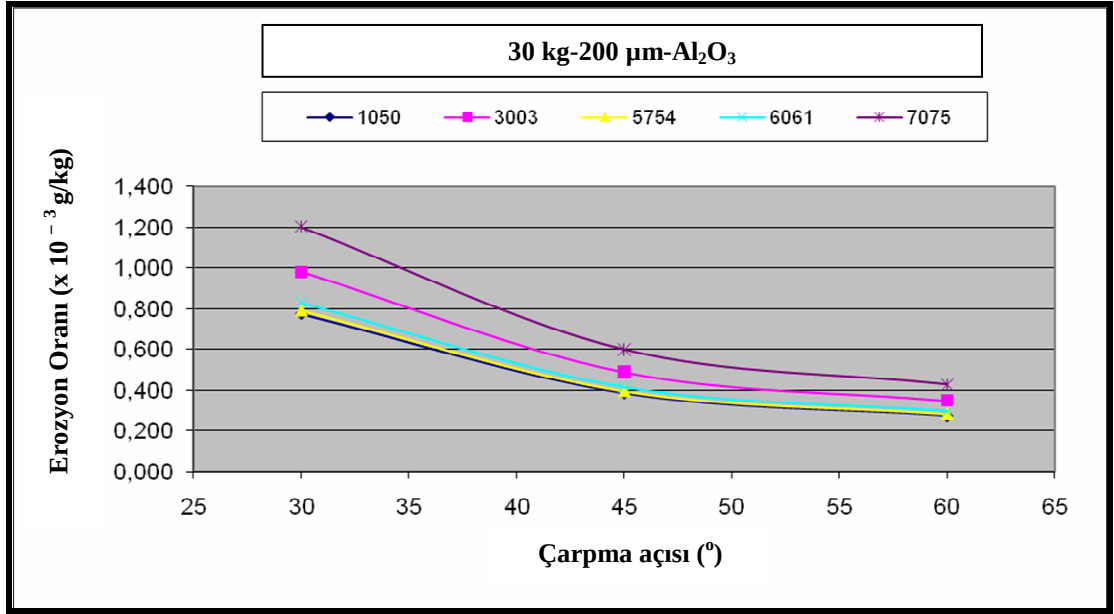
Karşılaştırma açısından Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 incelendiğinde aynı aşındırıcı partikül boyutları için 400 µm büyüklüğündeki G40 çelik grid, 400 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ 'e göre daha fazla aşınma oranı vermektedir. Ve yine aynı aşındırıcı partikül için 400 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ - 200 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ 'e göre daha fazla aşınma sağlamaktadır.(Şekil 5.21)



Şekil 5.19 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma ilişkisi

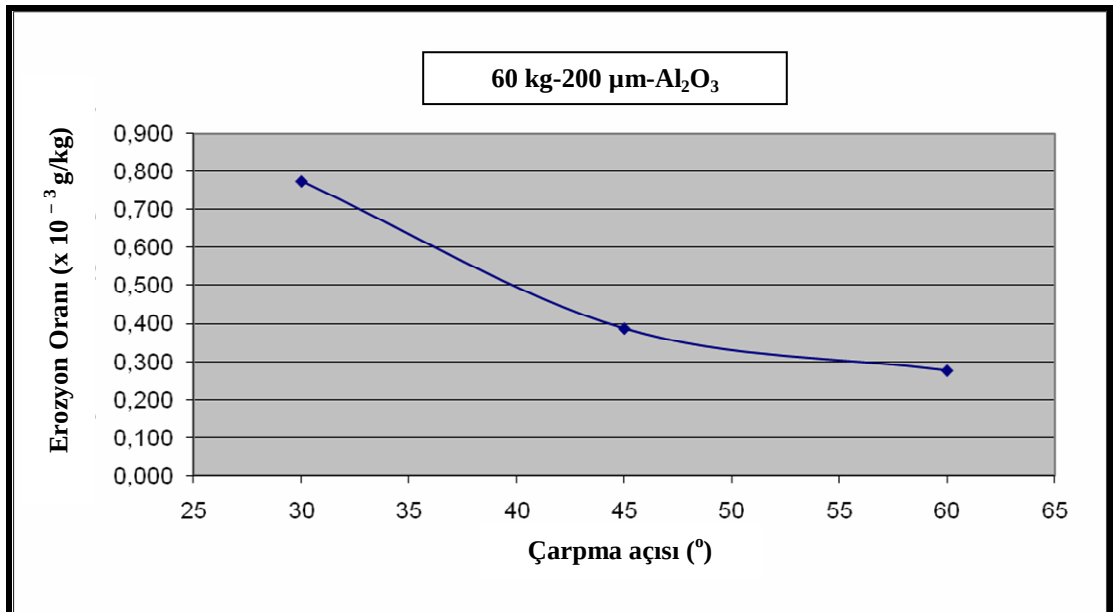


Şekil 5.20 Tüm alüminyum alaşımlar için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

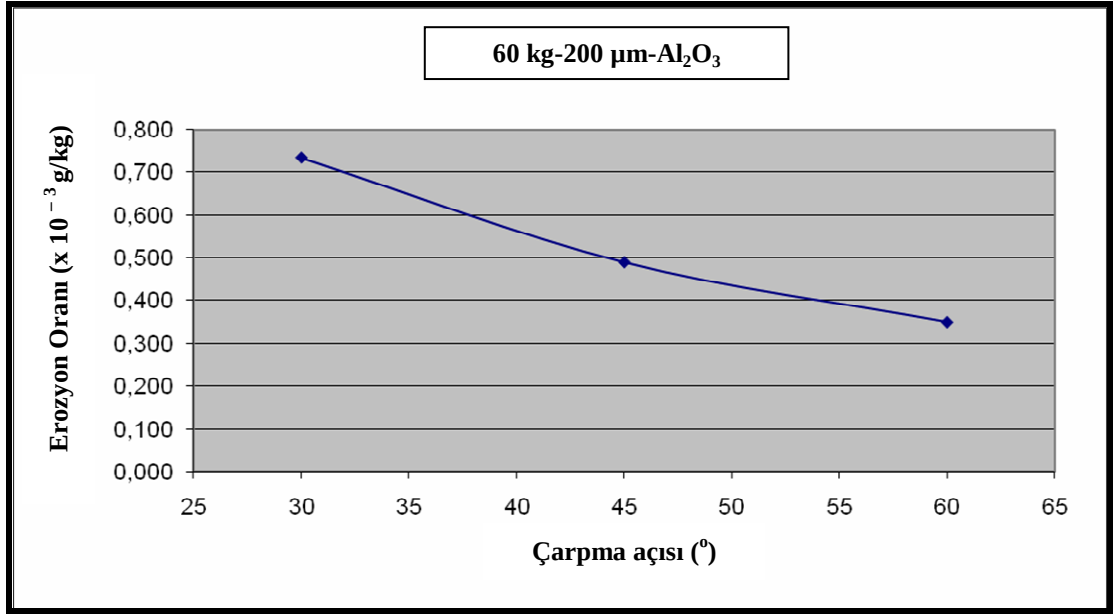


Şekil 5.21 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

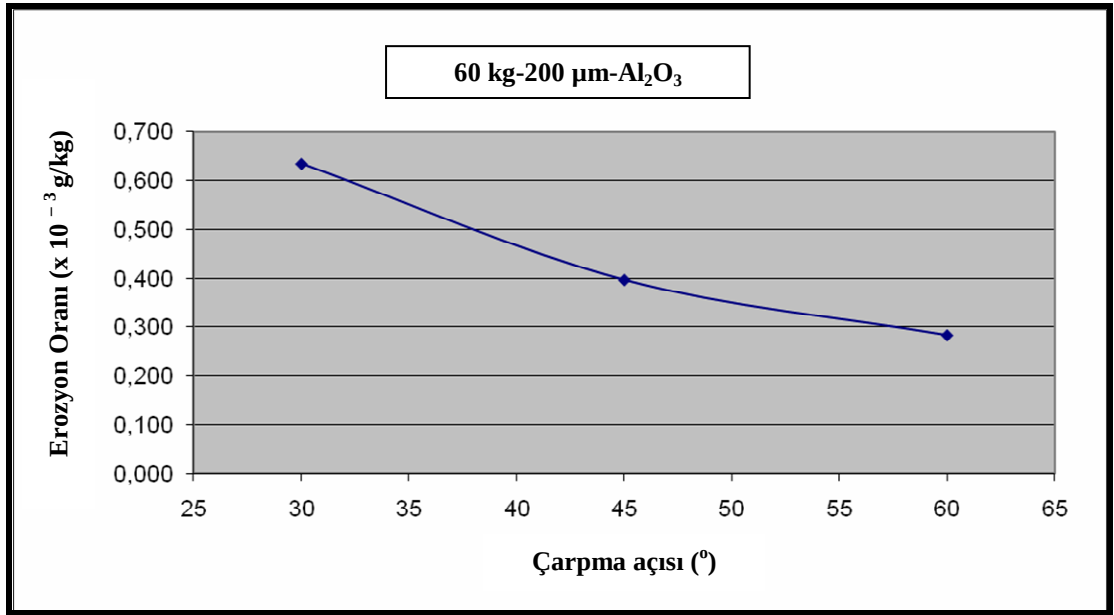
Yapılan deneyler her bir alüminyum alaşımı için aynı şekilde, fakat aşındırıcı partikül miktarı değiştirilerek 60 kg olarak uygulanmış olup, 200 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ aşındırıcı partikülü kullanılarak elde edilen erozyon oranı ile çarpma açısı arasındaki değişimler şekil 5.22 ile şekil 5.26 arasında verilmiştir. Şekil 5.27’de ise bu değişimler toplu halde verilmiştir.



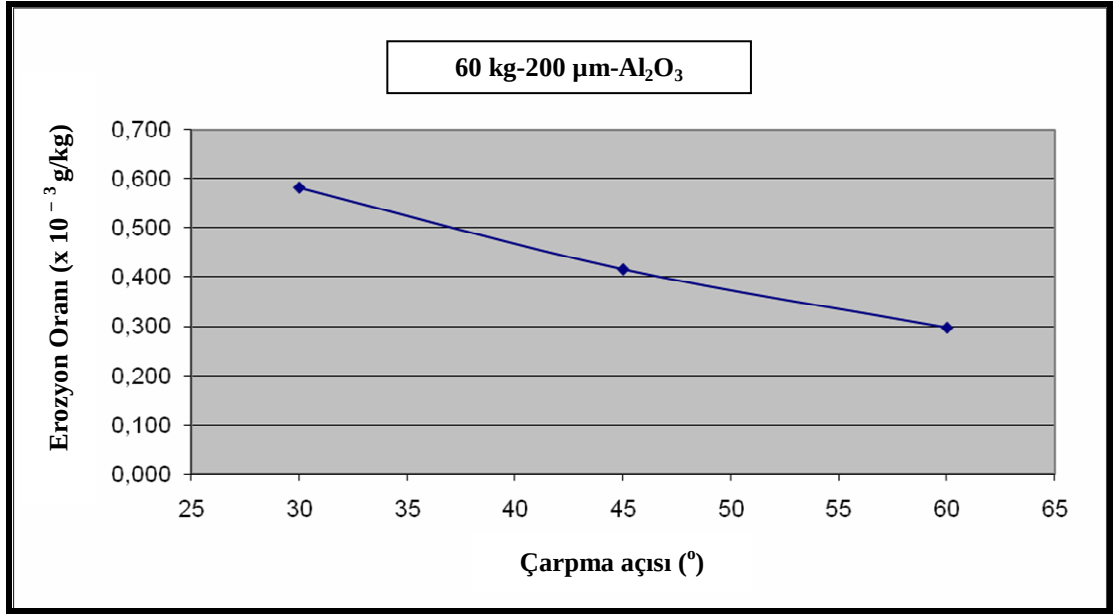
Şekil 5.22 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



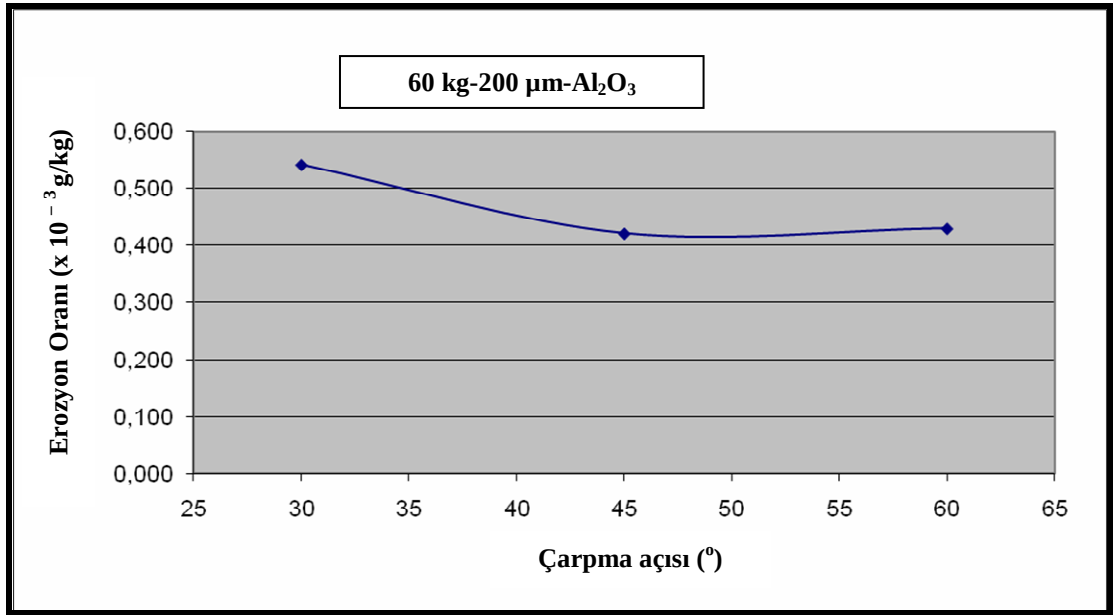
Şekil 5.23 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



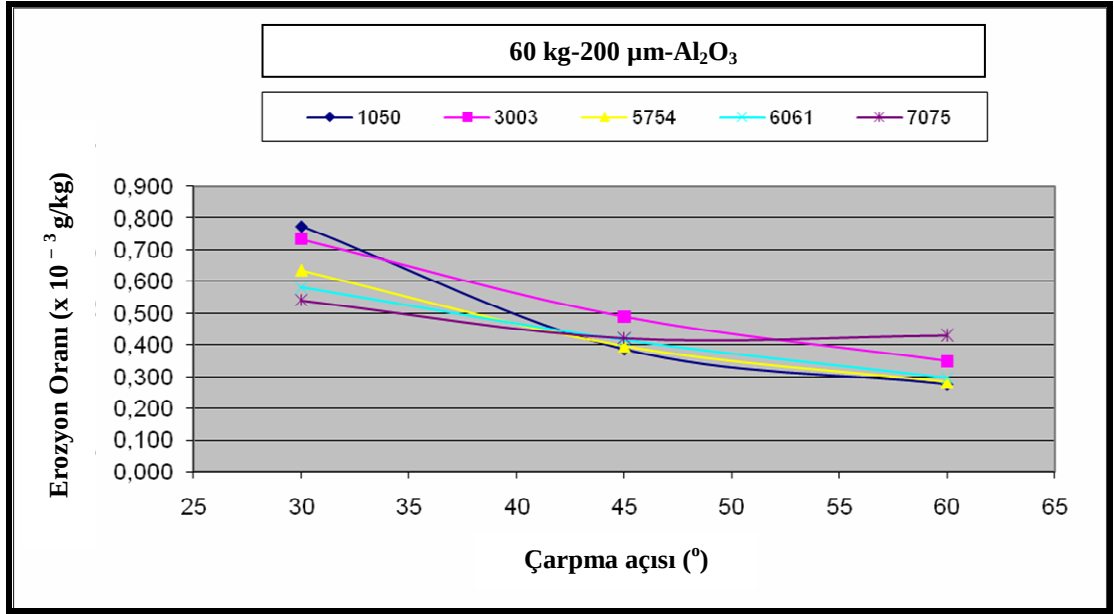
Şekil 5.24 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



Şekil 5.25 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



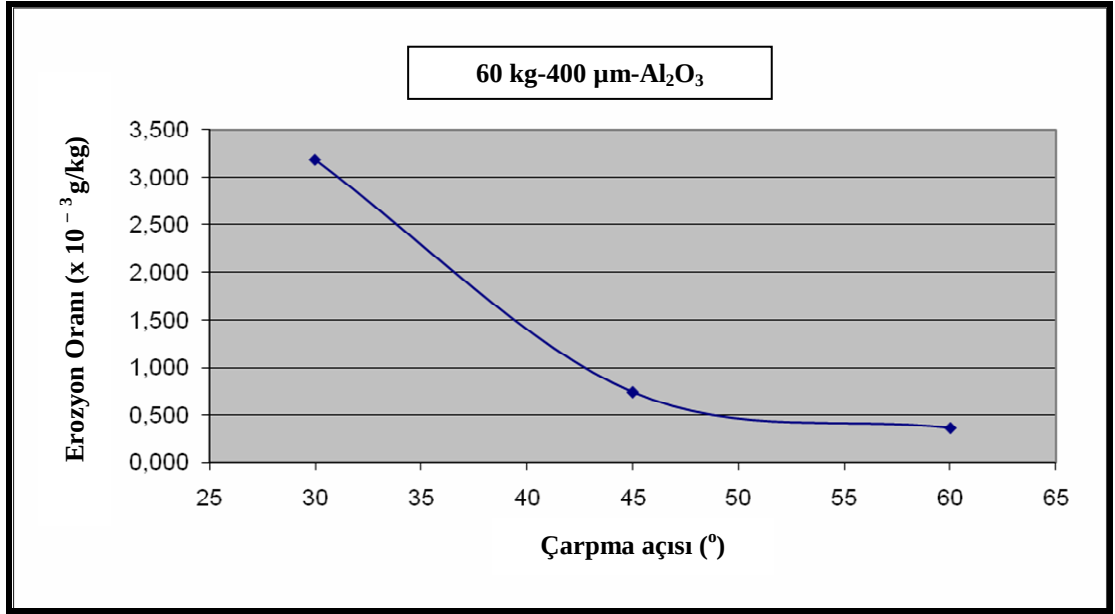
Şekil 5.26 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



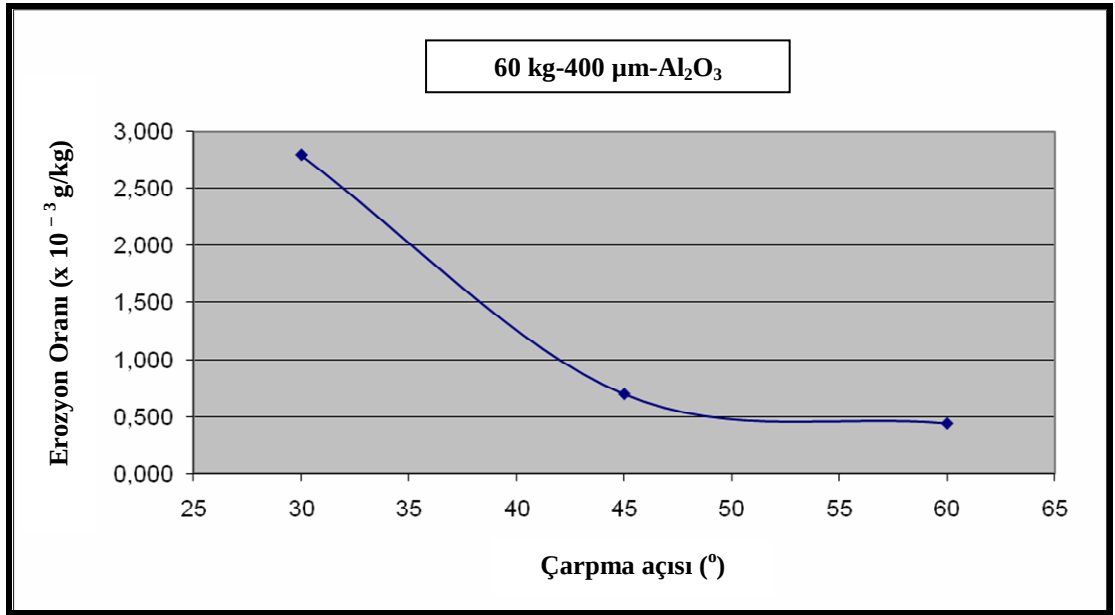
Şekil 5.27 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

Deneylerden de görüldüğü üzere 60 kg – 200 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ aşındırıcı partikülü için maksimum aşınma oranı 30° de elde edilmiştir. Yine çarpma açısı büyüdükçe erozyon oranı küçülmüştür. 60 kg – 200 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ aşındırıcı partikülü için, alüminyum alaşımları arasındaki erozyon oranı sıralaması inkübasyon (uyum) süreci atlatılarak 30 kg – 200 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ erozyon oranlarına göre daha net bir şekilde ortaya çıkmıştır (Burstein ve ark.(1991)).

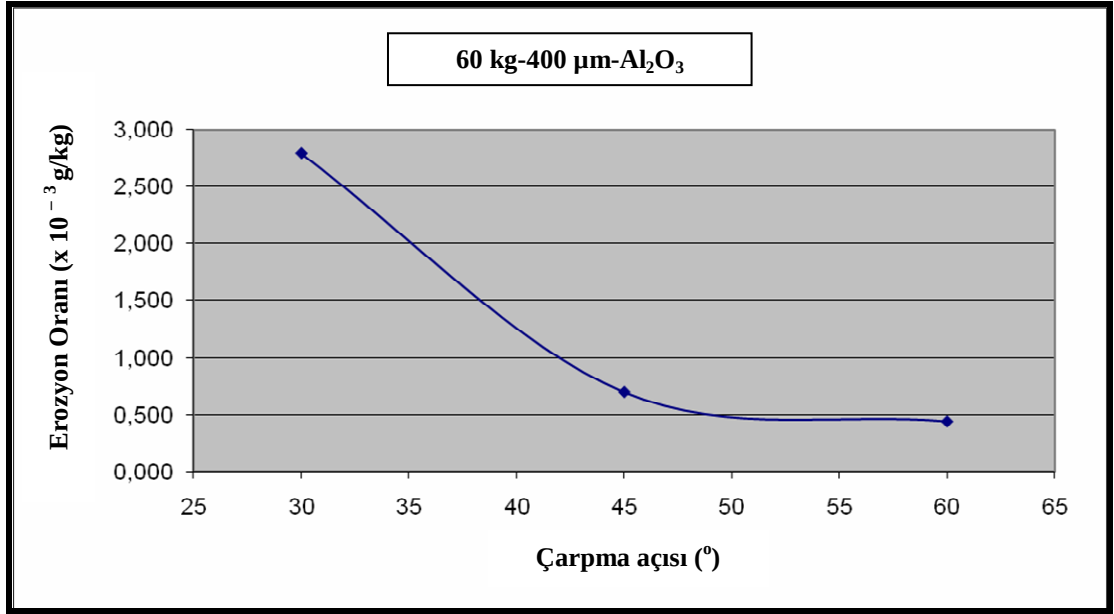
Aşağıda her bir alüminyum alaşımı için 60 kg – 400 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ aşındırıcı partikülü kullanılarak elde edilen erozyon oranı ile çarpma açısı arasındaki değişimler Şekil 5.28 ile Şekil 5.32 arasında verilmiştir. Şekil 5.33’de ise bu değişimler toplu halde verilmiştir



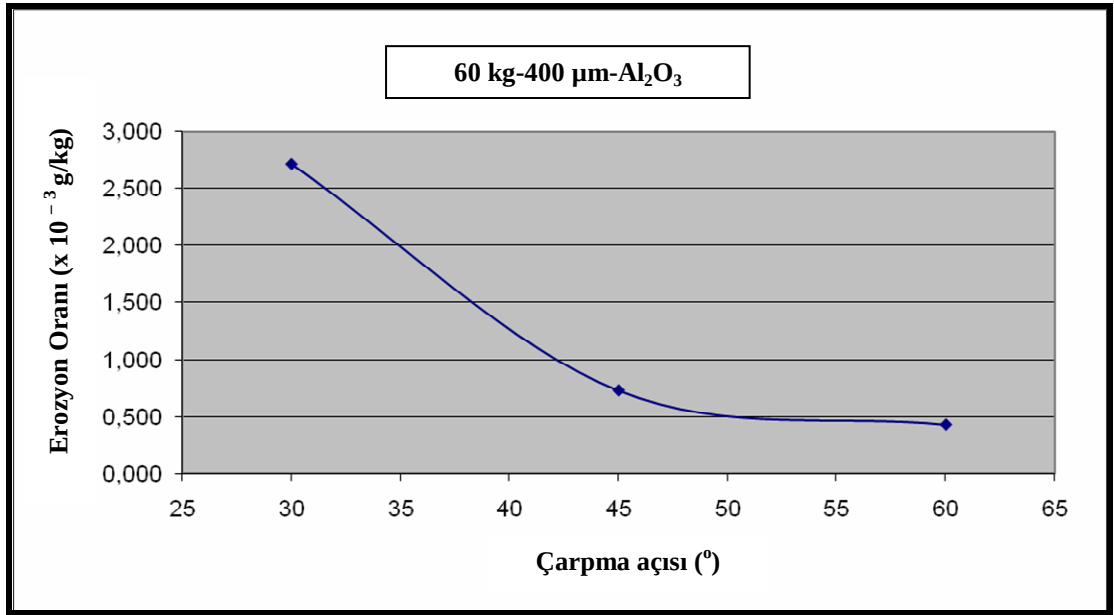
Şekil 5.28 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



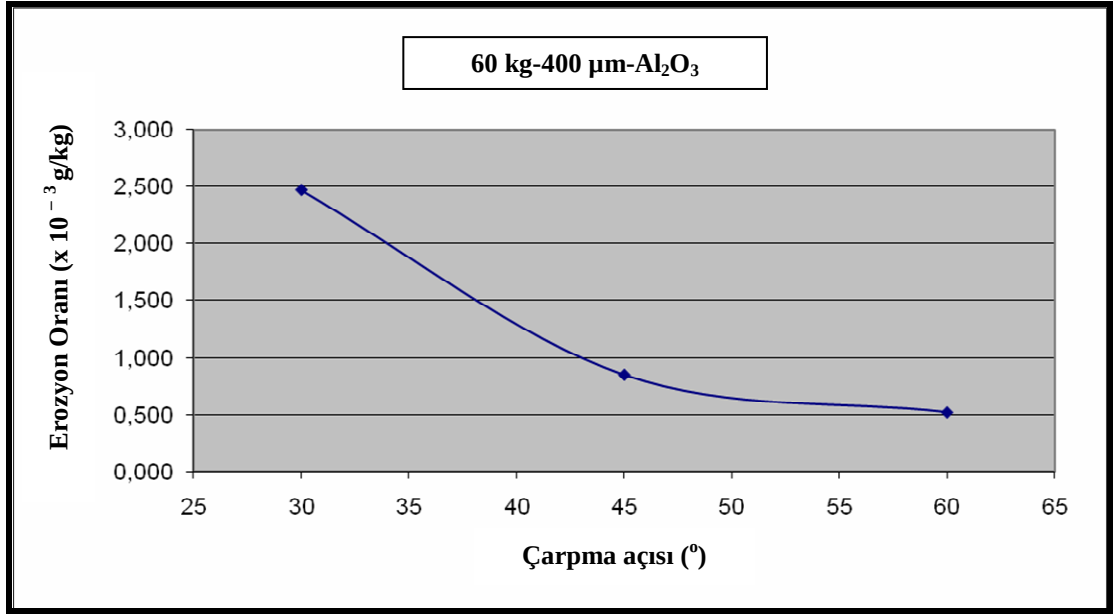
Şekil 5.29 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



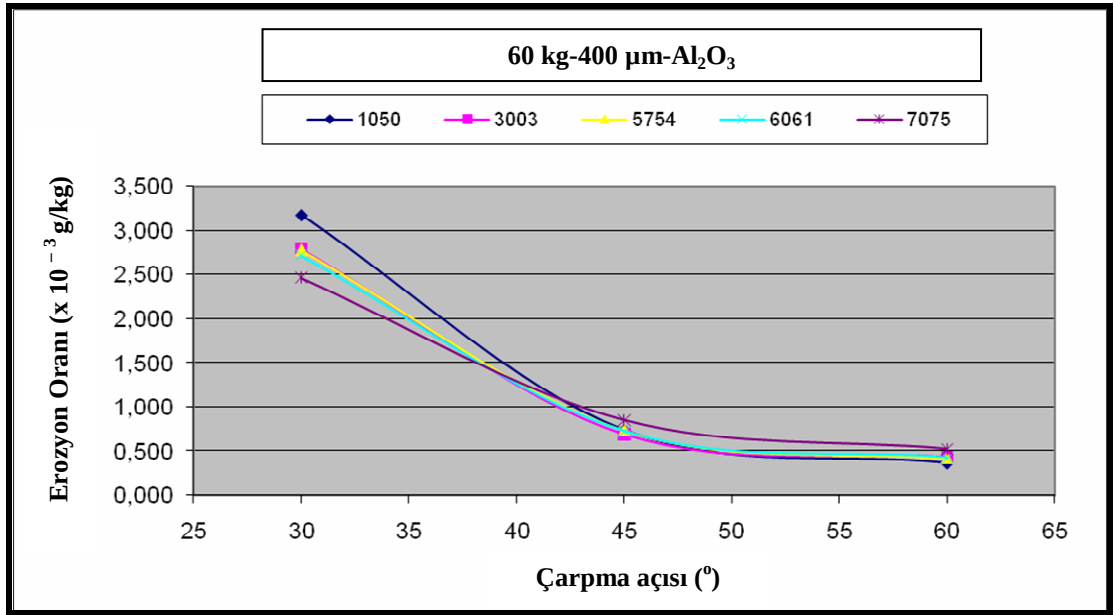
Şekil 5.30 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



Şekil 5.31 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



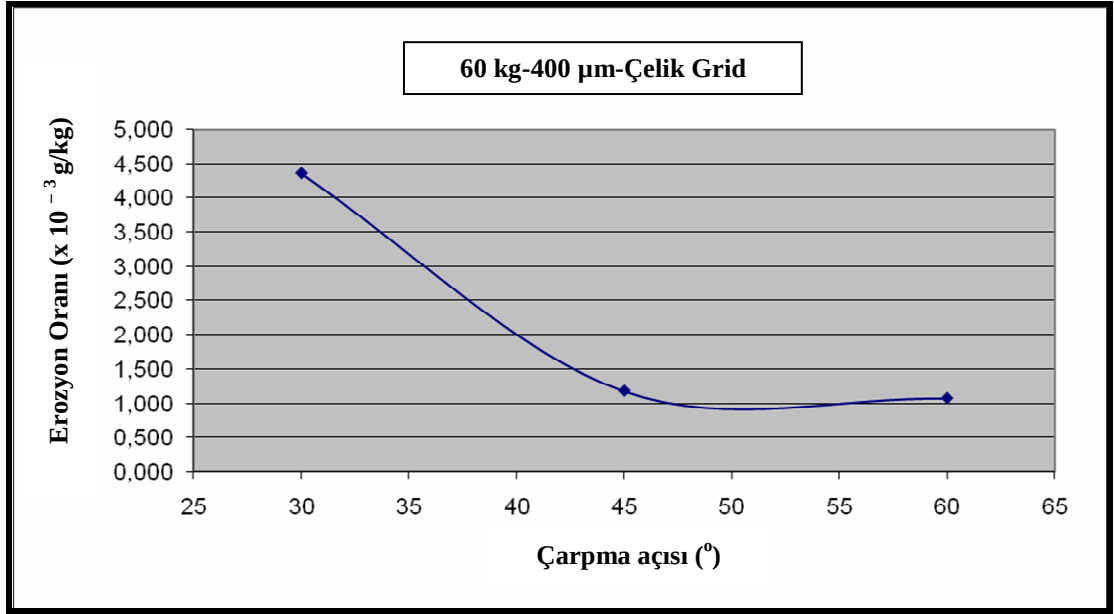
Şekil 5.32 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



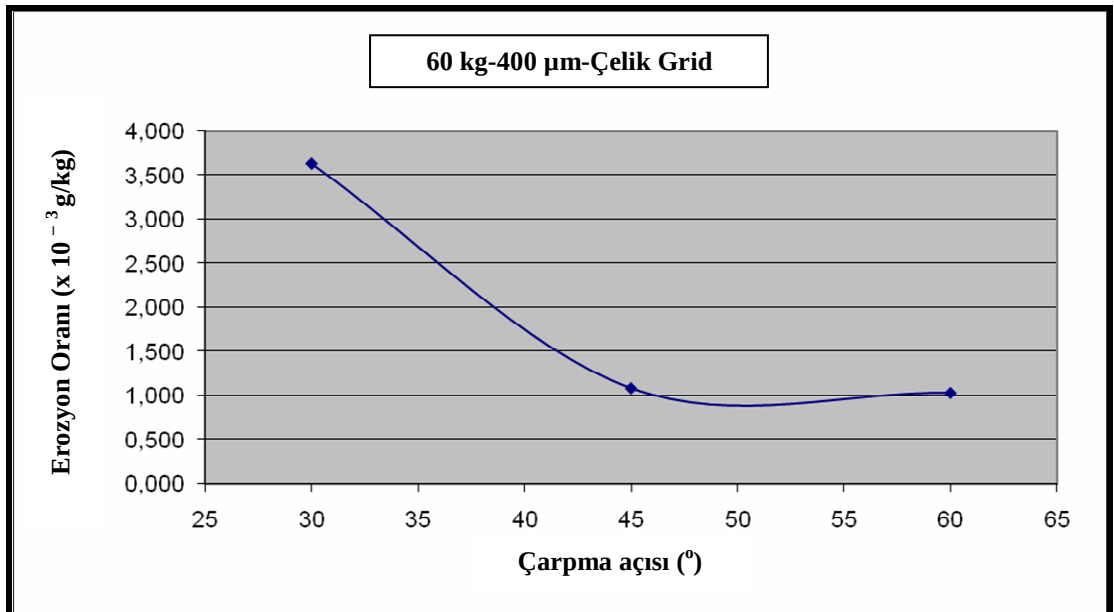
Şekil 5.33 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

400 μm büyüklüğündeki Al_2O_3 aşındırıcı partikülü için yapılan deneylerde, alüminyum alaşımları arasındaki aşınma oranı netleşmiş maksimum aşınma 30° elde edilmiştir.

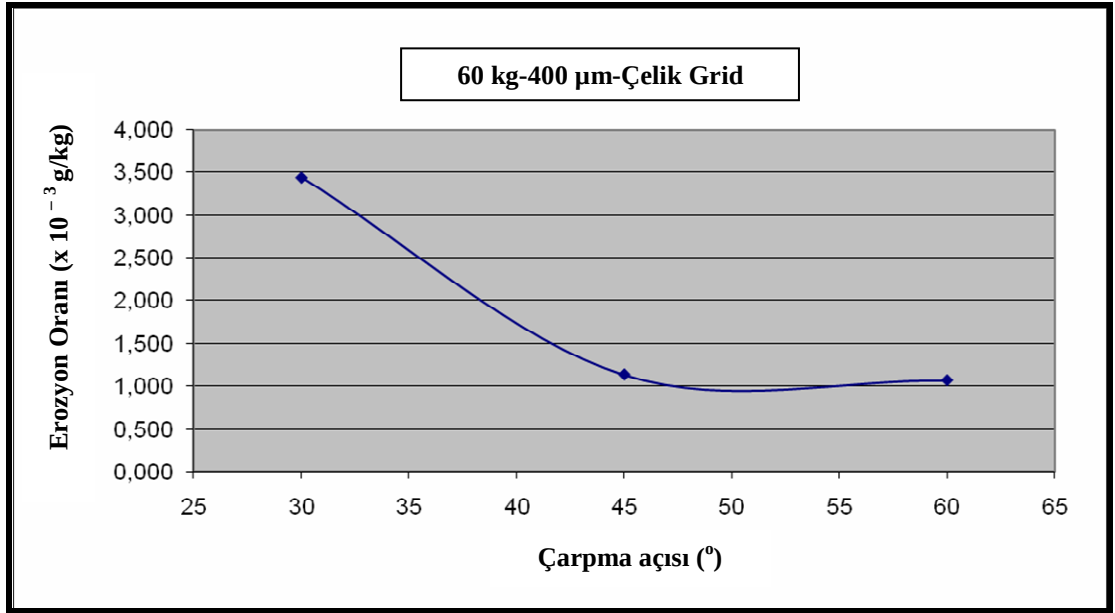
Aşağıda yine her bir alüminyum alaşımı için 60 kg - 400 μm büyüklüğündeki çelik grid aşındırıcı partikülü kullanılarak elde edilen erozyon oranı ile çarpma açısı arasındaki değişimler Şekil 5.34 ile Şekil 5.38 arasında verilmiştir. Şekil 5.39’da ise yine bu değişimler toplu halde verilmiştir



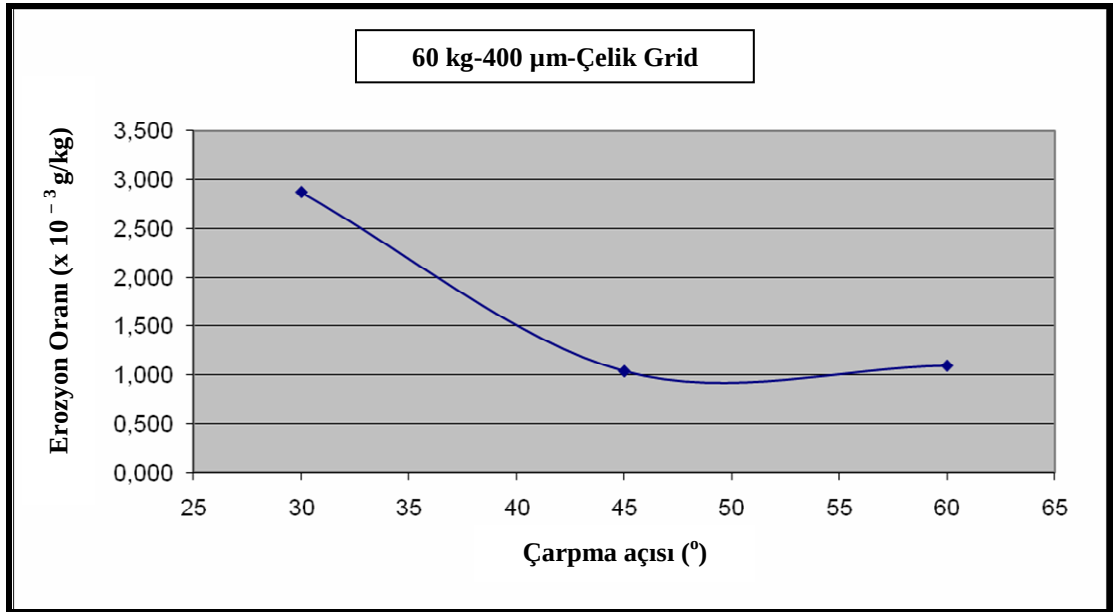
Şekil 5.34 1050 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



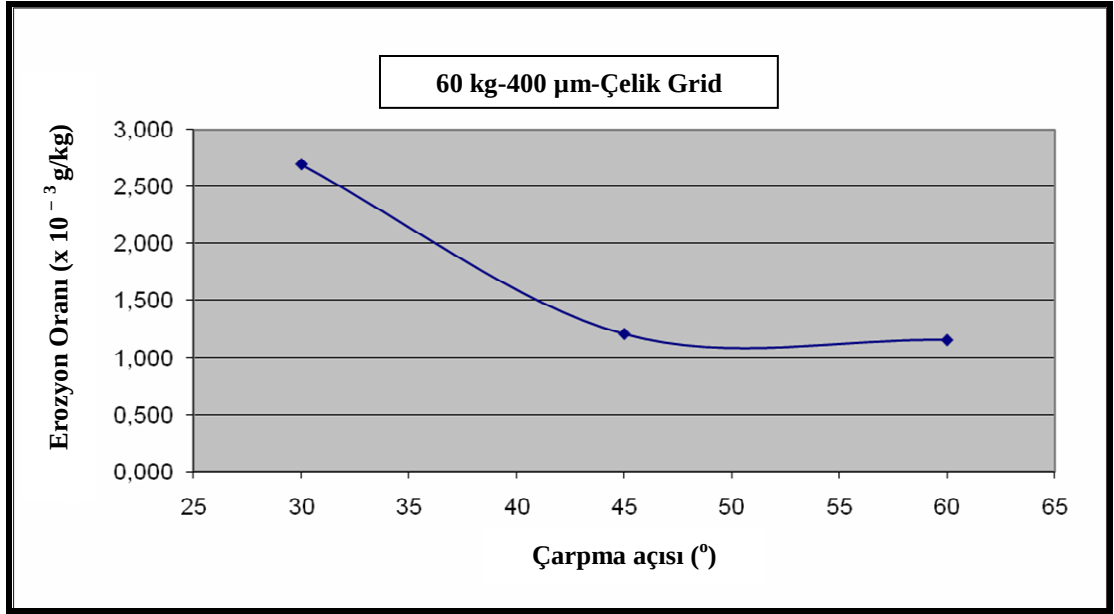
Şekil 5.35 3003 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



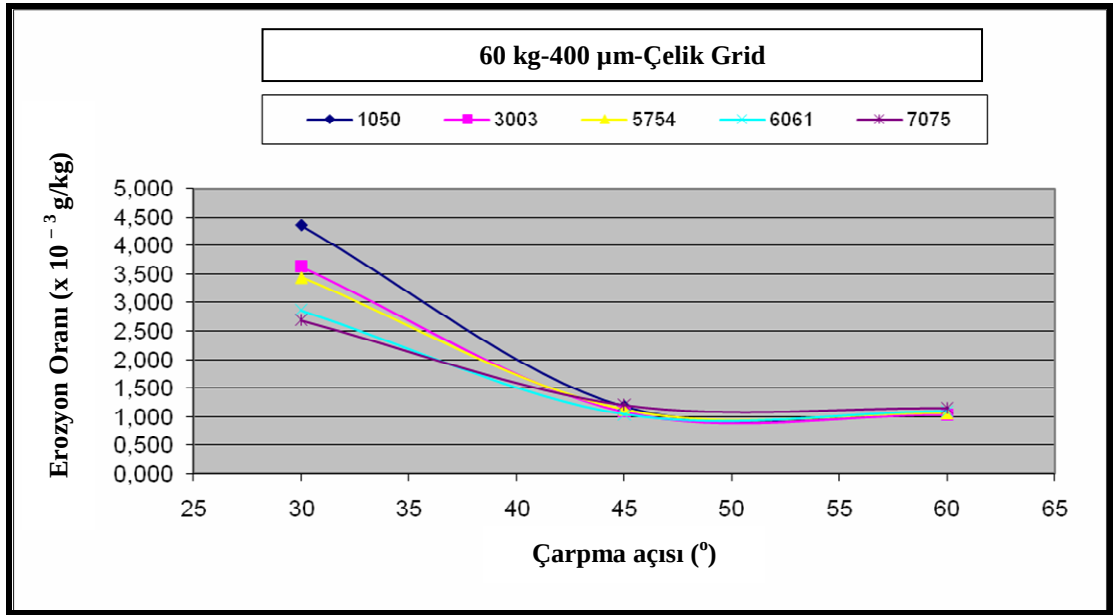
Şekil 5.36 5754 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



Şekil 5.37 6061 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



Şekil 5.38 7075 alüminyum alaşımı için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi



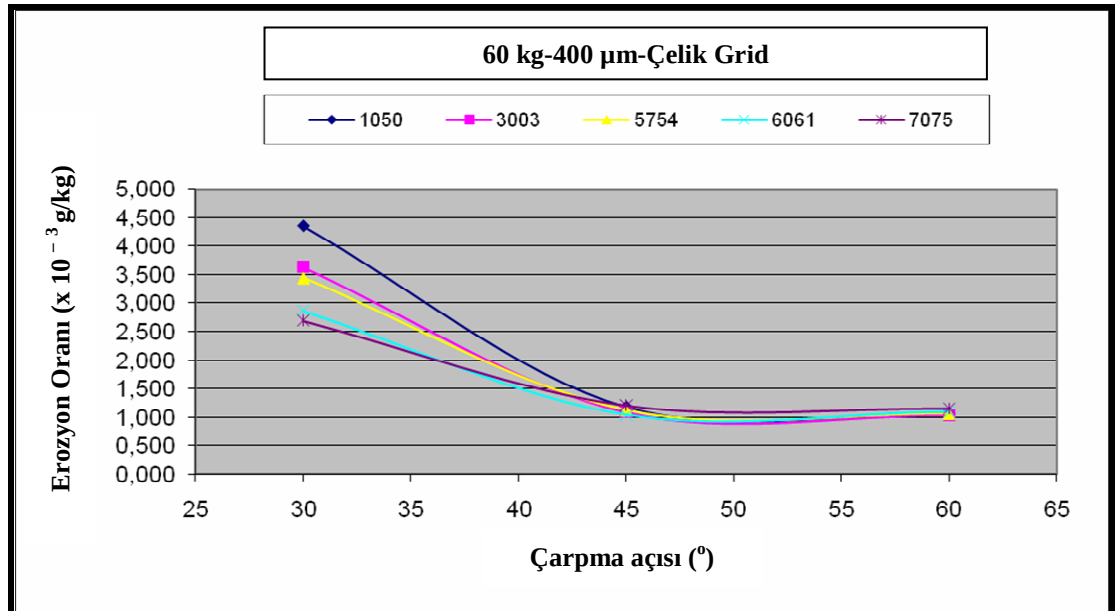
Şekil 5.39 Tüm alüminyum alaşımlar için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

400 µm büyüklüğündeki G40 çelik grid aşındırıcı partikülü alüminyum alaşımları arasındaki erozyon oranı sıralamasını net bir şekilde ortaya koymuştur. Yine maksimum aşınma 30° lik çarpma açısında elde edilmiştir.

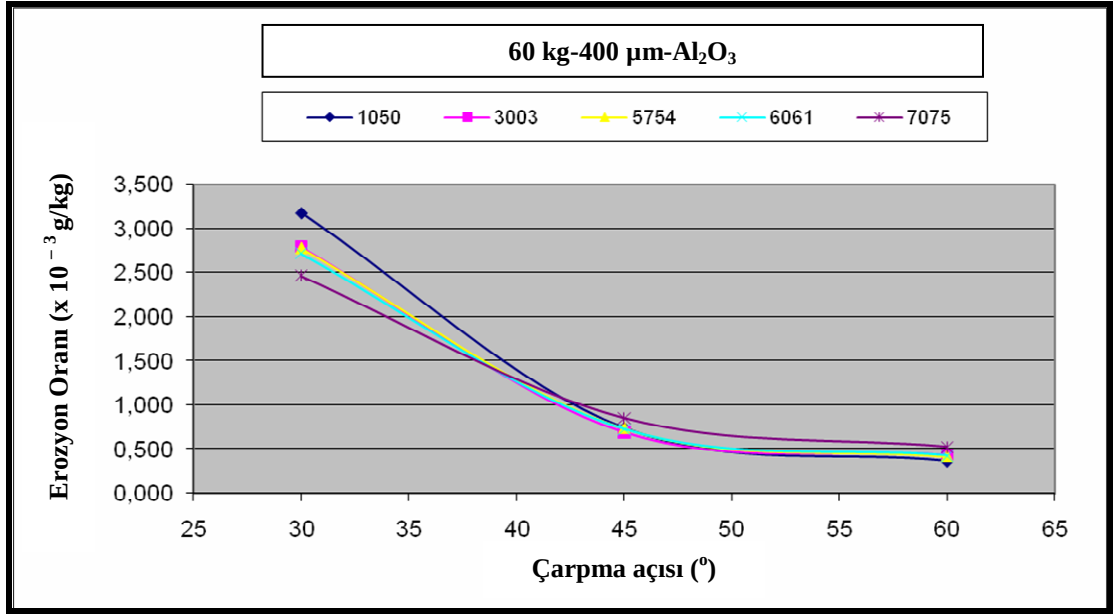
5.2.Tartışma

Şekillerden de görüldüğü üzere erozyon oranı - çarpma açısı ilişkisi incelendiğinde alüminyum alaşımlarının sertliği arttıkça erozyon oranı da ters orantılı olarak azalmaktadır. Etki açısı ise 30° de, 45° ve 60° dereceye göre daha fazla aşınma oranı vermektedir (Fang ve Chuang (1999)). Aşındırıcı partikül miktarı 30 kg dan 60 kg a artırılarak ağırlık kaybı artırılmıştır ancak erozyon oranına yansımaları bir miktar artış göstererek gerçekleşmiştir.

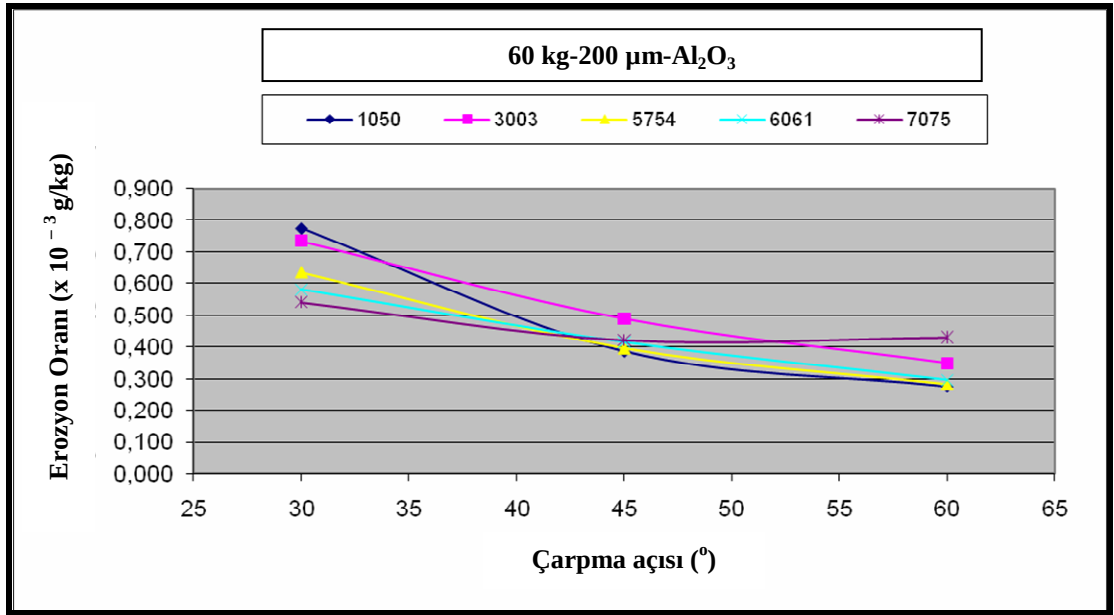
Karşılaştırma açısından Şekil 5.40 ve Şekil 5.41 incelendiğinde aynı aşındırıcı partikül boyutları için 400 µm büyüklüğündeki G40 çelik grid, 400 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ 'e göre daha fazla aşınma oranı vermiş (Ottmüller ve ark. 1998, Aleinikov 1957), yine Şekil 5.42 de görüldüğü üzere aynı aşındırıcı partikül için 400 µm büyüklüğündeki Al₂O₃, 200 µm büyüklüğündeki Al₂O₃ 'e göre daha fazla aşınma oranı sağlamıştır (Tian ve ark. 2005). Ağırlık kaybı birebir erozyon oranına yansımamış erozyon oranları bir miktar artış göstererek yakın değerlerde kalmıştır.



Şekil 5.40 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

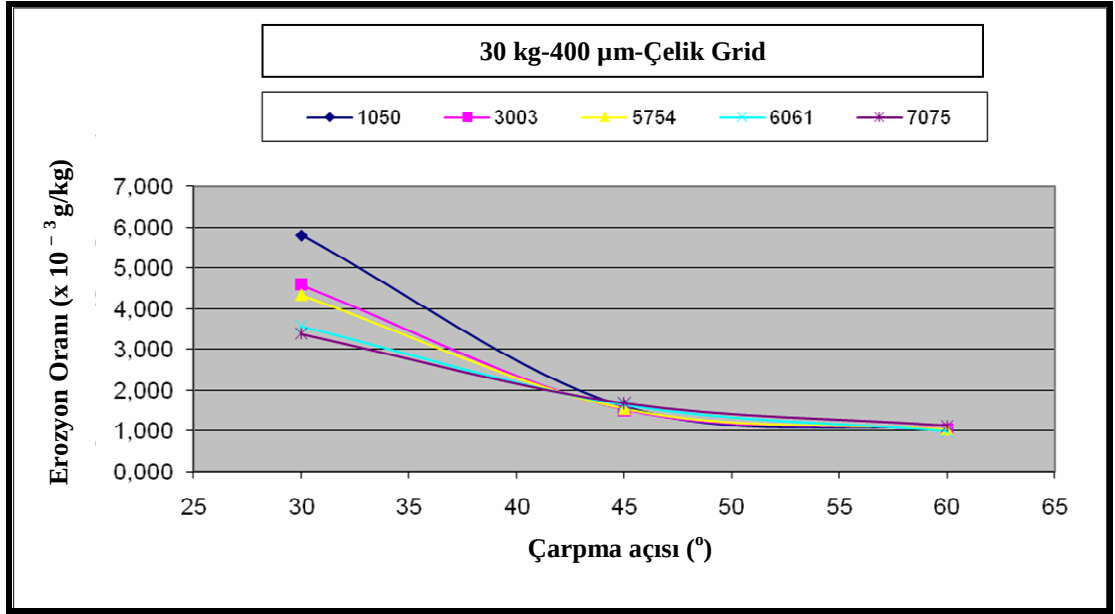


Şekil 5.41 Tüm alüminyum alaşımlar için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

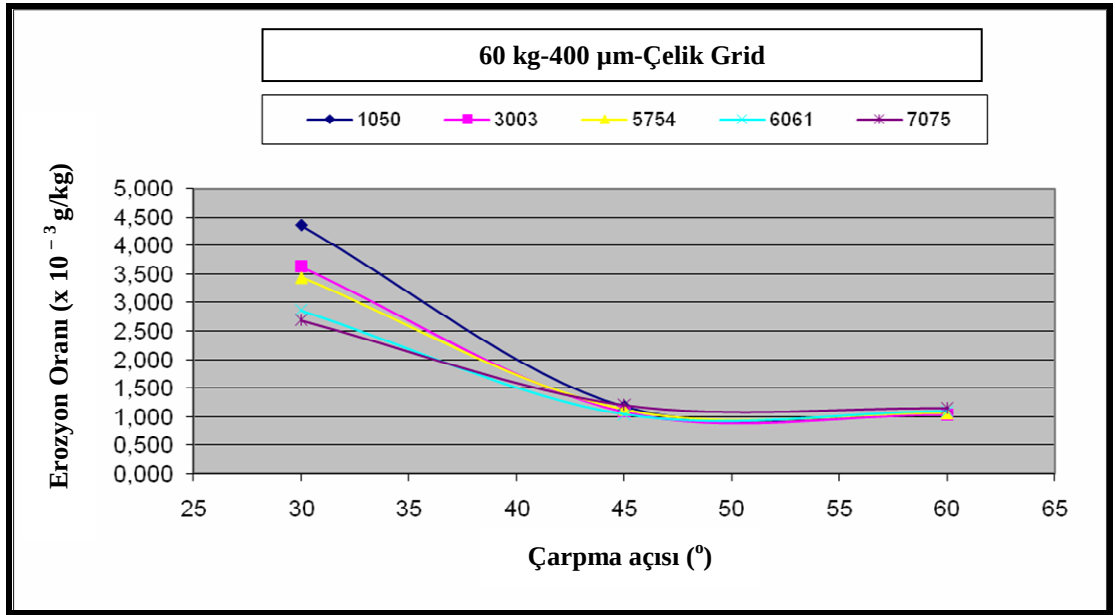


Şekil 5.42 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

Şekil 5.43, Şekil 5.44 ve Şekil 5.45 de aşındırıcı partikül miktarının 30 kg ve 60 kg olarak kullanılması halinde üç aşındırıcı partikül (400 µm-Al₂O₃, 200 µm-Al₂O₃, 400 µm- G40 çelik grid) için karşılaştırmalar verilmiştir.



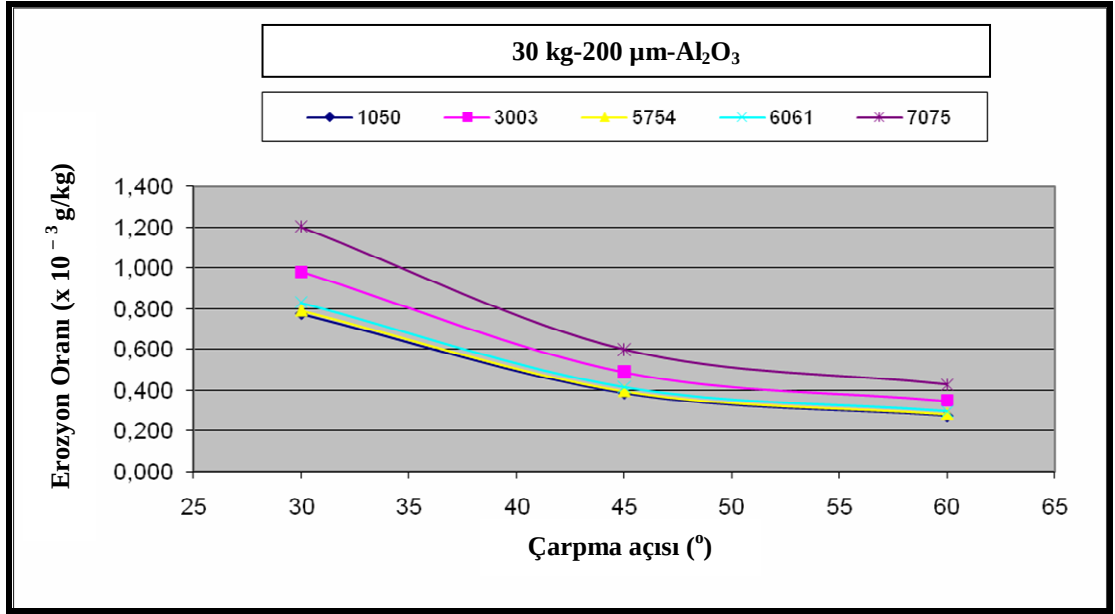
(a)



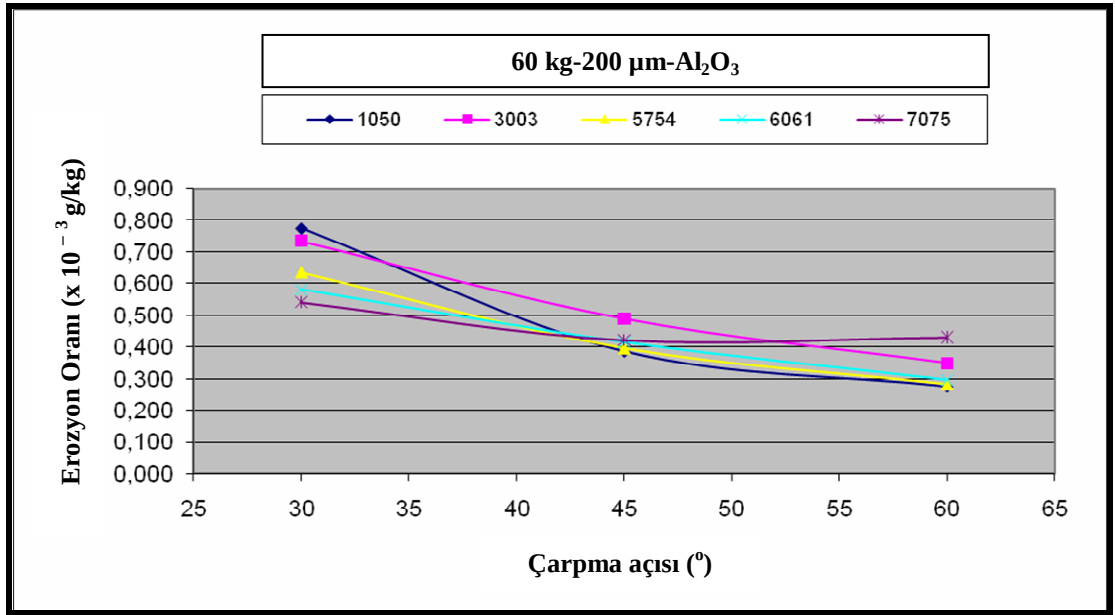
(b)

Şekil 5.43 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi

(a) 30kg - çelik grid 400 μ m için (b) 60 kg-çelik grid 400 μ m için

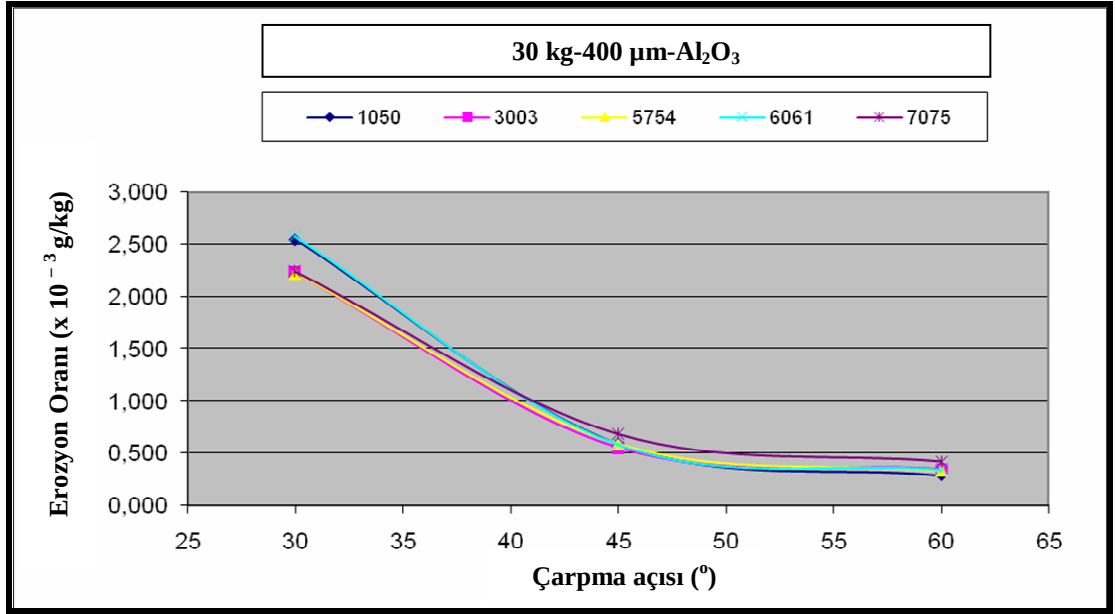


(a)

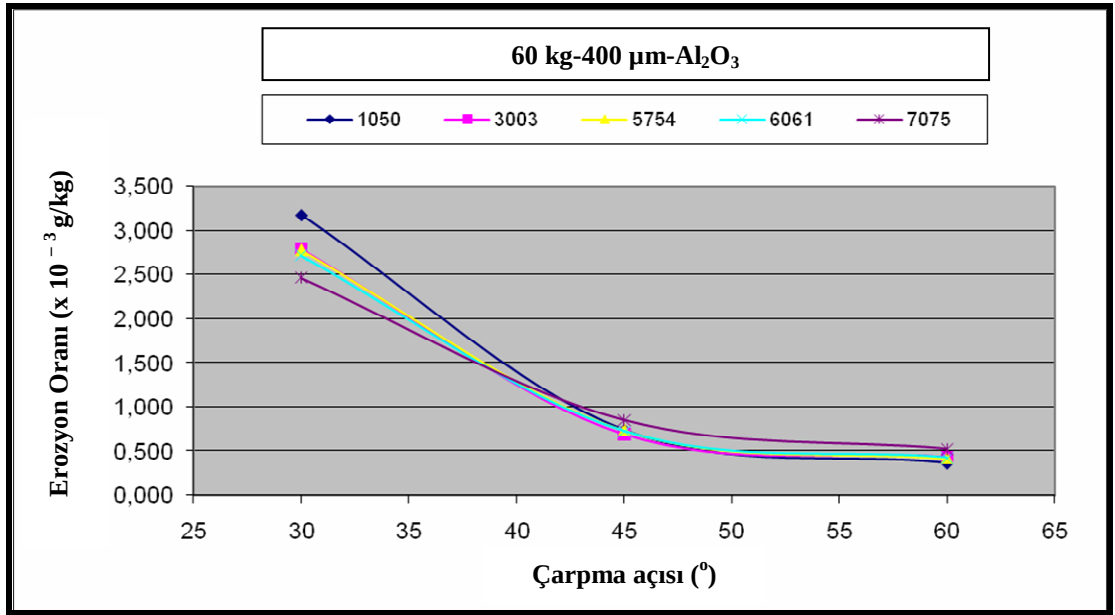


(b)

Şekil 5.44 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi (a) 30 kg- Al₂O₃ 200 µm için (b) 60 kg-Al₂O₃ 200 µm için



(a)



(b)

Şekil 5.45 Tüm alüminyum alaşımları için erozyon oranı-çarpma açısı ilişkisi
 (a) 30 kg- Al_2O_3 400 μm için (b) 60 kg- Al_2O_3 400 μm için

Alaşımların sertlik derecelerine göre erozyon aşınması oranı incelendiğinde, 1050 alaşımı içeriğine Mn ilavesi ile sertleşen ve dayanımı artan 3003 alaşımının daha az aşındığı gözlemlenmiştir. Alaşımın içerdiği Mg oranının artırılması ile dayanımı artırılmış ve sertleşmiş olan 5xxx serisinden 5754 alaşımının aşınma oranı yine düşüş göstermiş, alaşım seri numarası 6xxx ve 7xxx serisine doğru gittikçe alaşım içerisindeki alüminyum oranının azalması ile aşınma miktarı ve dolayısı ile erozyon oranı düşmüştür. Erozyon oranının değişiminde yine alaşımların sertlik değerini kategorize eden ısıtılma işlem uygulanabilirliği de etkili olmuştur. (Bknz.Sayfa 47-51)

Elde edilen deneysel sonuçlar tüm parametreleri ile genel olarak incelendiğinde katı partikül aşınma oranının etkili olduğu havacılık ve uçak sanayi, petrol ve kömür sanayi tesisleri, dönme hareketi yapan rotor, türbin ve helikopter kanatları tasarımında mühendisler için yol göstermesi açısından yararlı olmuştur. Tasarımcı erozyon oranına etki eden aşındırıcı partikül hızı, çarpma açısı, aşındırıcı partikül cinsi ve aşınan malzeme sertliği gibi parametreleri değiştirme yolu ile aşınmayı ve dolayısı ile oluşacak zararı önleyebilecektir.

6. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. 30⁰ derece çarpma açısında maksimum erozyon oranı ortaya çıkmış olup çarpma açısının artmasına paralel olarak erozyon oranı değeri azalmıştır. Bu durum da literatürdeki sünek malzemelerde karşılaşılan duruma benzer bir eğilim sergilemiştir.

2. Erozyon oranı aşındırıcı partikül miktarı ve dolayısı ile çalışma süresi ile orantılı olarak artmıştır.

3. Aynı aşındırıcı partikül için erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutu ile ilgili olduğu görülmüş ve partikül boyutunun artması ile erozyon oranında artış gözlemlenmiştir.

4. Aynı boyuttaki daha sert aşındırıcı partiküller ile yapılan çalışmalarda erozyon oranının arttığı görülmüştür.

5. Alüminyum alaşımlarının sertliği arttıkça ve içerdiği alüminyum yüzdesinin düşmesi ile aşınmanın zorlaştığı tespit edilmiştir.

7. KAYNAKLAR

1. Akkurt, M., “Makine Elemanları Cilt 1”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1990.
2. Aleinikov, F.K., “The effect of Certain Physical and mechanical properties on the grinding of brittle materials”, Soviet Physics - Technical Physics, vol. 2, 1957, pages 2529-2538.
3. Balan, K.P., Reddy, A.V., Joshi, V. and Sundararajan, G., “The influence of microstructure on the erosion behaviour of cast irons”, Wear, volume 145, issue 2, May 1991, pages 283–296.
4. Bose, K., Wood, R.J.K., Wheeler, D.W., “High energy solid particle erosion mechanism of superhard CVD coatings”, Wear, volume 259, issues 1–6, August 2005, pages 135–144.
5. Bousbaa, C., Madjoubi, A., Hamidouche, M. and Bouaouadja, N., “Effect of annealing and chemical strengthening on soda lime glass erosion wear by sand blasting”, Journal of the European Ceramic Society, volume 23, issue 2, February 2003, pages 331–343.
6. Dai, W.S., Chen, L.H. and Lui, T.S., “A study on SiO₂ particle erosion of flake graphite and spheroidal graphite cast irons”, Wear, volume 239, issue 1, April 2000, pages 143–152.
7. Das, S., Mondal, D.P. Sawla, S., “Solid particle erosion of Al alloy and Al-alloy composites: Effect of heat treatment and angle of impingement, Metallurgical and Materials Transactions A., volume 35, Number 4, April 2004, pages 1369-1379.

- 8.** Dündar, M., Inal, O.T., “Solid particle erosion of α -brass with 5 and 25 μm particles at normal incidence”, *Wear*, volume 224, issue 2, February 1999, pages 226-235.
- 9.** Fang, C.K. ve Chuang, T.H., “Surface morphologies and erosion rates of metallic building materials after sandblasting”, *Wear*, volume 230, issue 2, May 1999, pages 156–164.
- 10.** Gürleyik, M.Y., Aralık 1986, “Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları”, *Mühendis ve Makine*, cilt 27, sayı 323, sayfa 3-14.
- 11.** Goretta, K.C., Cunningham, A.J., Chen, N., Singh, D., Routbort, J.L., Rateick Jr.R.G., “ Solid-particle erosion of an anodized Mg alloy”, *Wear*, volume 262, issue 9-10, April 2007, pages 1056-1060.
- 12.** Harsha, A.P. and Thakre, A.A., “Investigation on solid particle erosion behaviour of polyetherimide and its composites”, *Wear*, volume 262, issue 7–8, March 2007, pages 807–818.
- 13.** Heuer, V., Walter, G., Hutchings, I.M., “A study of the erosive wear of fibrous ceramic components by solid particle impact”, *Wear*, volumes 225-229, Part 1, April 1999, pages 493-501.
- 14.** Hung, F.Y., Chen, L.H. and Lui, T.S., “A study on the particle erosion of upper bainitic austempered ductile iron”, *Wear*, volume 252, issues 11–12, 2002, pages 985–991.
- 15.** Hutchings, I.M., “Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials”, St Edmundsbury Press, London, 1996.
- 16.** Kenneth, L.C., “Friction, Wear, Lubrication”, A Textbook in Tribology, CRC Press, U.S.A., 1996.

17. Kruschov, M.M., Babichev, M.A., “An investigation of the wear of metals and alloys on an abrasive surface”, Friction and Wear in Machinery, volume 11, A.S.M.E, New York 1956, pages 1-12.
18. Kruschov, M.M., Babichev, M.A., “Investigations into the wear of metals”, U.S.S.R. Academy of Sciences, Moscow, 1960.
19. Kumar, S., Subramanya, V., Murty, B.S., “A statistical analysis on erosion wear behaviour of A356 alloy reinforced with in-situ formed TiB₂ particles”, Materials Science and Engineering, volume 476, issue 1-2, March 2008, pages 333-340.
20. Liang, Y.N., Ma, Z.Y., Li, S.Z., Li, S., Su, G.Y., Bi, J., “Wear behavior of reinforced aluminum alloys in various impact loadings” Wear, volume 189, issues 1-2, October 1995, pages 45-50.
21. Oka, Y.I., Ohnogi, H., Hosokawa, T. and Matsumura, M., “The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact”, Wear, volumes 203–204, March 1997, pages 573–579.
22. Ottmüller, M., Lathabai, S., Fernandez, I., “Solid particle erosion behaviour of thermal sprayed ceramic, metallic and polymer coatings”, Wear , volume 221, issue 2, October 1998, pages 93-108.
23. Rajesh, J.J., Jayashree, B., Tewari, U.S. and Venkataraman, B., “Erosive wear behavior of various polyamides”, Wear, volume 249, issue 8, August 2001, pages 702–714.
24. Sarı, N., ve Sınmazçelik, T., “Erosive wear behaviour of carbon fibre / polyetherimide composites under low particle speed”, Materials & Design, volume 28, issue 1, 2007, pages 351–355.

25. Shimizu, K., Noguchi, T., Kamada, T. and Takasaki, H., “Progress of erosive wear in spheroidal graphite cast iron”, *Wear*, volume 198, issues 12, October 1996, pages 150–155.
26. Tian, H.H., Addie, G.R., ve Pagalthivarthi, K.V, “Determination of wear coefficients for erosive wear prediction through Coriolis wear testing”, *Wear*, volume 259, issues 1–6, August 2005, pages 160–170.
27. Tülbentçi, K., “Stress relieving heat treatment of welded steel constructions”, *Effect of Heat Input and Stress-Relief Annealing on the Toughness of the HAZ in the Welding of the Boiler Steels Type*, International Conference Held in Sofia -Bulgaristan, July 1987, Pergamon Press , pages 1-7.
28. Veinthal, R., “Characterisation and modelling of erosion wear of powder composite materials and coatings”, *International Journal of Materials and Product Technology*, volume 28, Number 3-4, 2007, pages 425-447.
29. Yıldızlı, K., Karamış, M.B. ve Nair, F., “Erosion mechanisms of nodular and gray cast irons at different impact angles”, *Wear*, Article in Press, 2006.
30. Zu, J.B., Burstein, G.T., Hutchings, I.M., “A comparative study of the slurry erosion and free-fall particle erosion of aluminium, *Wear*, volume 149, issues 1-2, September 1991, pages 73-84.

8. EKLER

AL₂O₃ 30kg-200 µm deney sonuçları

MALZEME	İLK AĞIRLIK (g)	SON AĞIRLIK (g)	AĞIRLIK FARKI (g)	TOPLAM SÜRE (s)	AŞINDIRICI MİKTARI (kg)	AÇI (°)	EROZYON ORANI
1050	3,5009	3,4777	0,0232	82	30	30	0,775
1050	4,9021	4,8905	0,0116	86	30	45	0,387
1050	4,6655	4,6572	0,0083	95	30	60	0,277
3003	4,4002	4,3708	0,0294	83	30	30	0,980
3003	5,7200	5,7053	0,0147	85	30	45	0,490
3003	2,3475	2,3370	0,0105	80	30	60	0,350
5754	4,8302	4,8064	0,0238	90	30	30	0,793
5754	5,0338	5,0219	0,0119	90	30	45	0,397
5754	4,6312	4,6227	0,0085	81	30	60	0,283
6061	5,122	5,0971	0,0249	85	30	30	0,831
6061	4,7261	4,7136	0,0125	92	30	45	0,415
6061	5,3446	5,3357	0,0089	79	30	60	0,297
7075	3,9780	3,9419	0,0361	88	30	30	1,204
7075	4,0355	4,0174	0,0181	88	30	45	0,602
7075	5,8784	5,8655	0,0129	84	30	60	0,430

AL₂O₃ 60kg-200 µm deney sonuçları

MALZEME	İLK AĞIRLIK (g)	SON AĞIRLIK (g)	AĞIRLIK FARKI (g)	TOPLAM SÜRE (s)	AŞINDIRICI MİKTARI (kg)	AÇI (°)	EROZYON ORANI
1050	5,4962	5,4497	0,0465	164	60	30	0,775
1050	4,0718	4,0486	0,0232	172	60	45	0,387
1050	5,3864	5,3698	0,0166	190	60	60	0,277
3003	5,074	5,0299	0,0441	166	60	30	0,735
3003	5,5028	5,4734	0,0294	170	60	45	0,490
3003	5,6866	5,6656	0,0210	160	60	60	0,350
5754	4,2978	4,2597	0,0381	180	60	30	0,635
5754	4,9941	4,9703	0,0238	180	60	45	0,397
5754	5,1003	5,0833	0,0170	162	60	60	0,283
6061	5,8264	5,7915	0,0349	170	60	30	0,581
6061	6,020	5,9951	0,0249	184	60	45	0,415
6061	6,0384	6,0206	0,0178	158	60	60	0,297
7075	5,7119	5,6794	0,0325	176	60	30	0,542
7075	4,5782	4,5529	0,0253	176	60	45	0,421
7075	5,683	5,6572	0,0258	168	60	60	0,430

AL₂O₃ 30kg-400 µm deney sonuçları

MALZEME	İLK AĞIRLIK (g)	SON AĞIRLIK (g)	AĞIRLIK FARKI (g)	TOPLAM SÜRE (s)	AŞINDIRICI MİKTARI (kg)	AÇI (°)	EROZYON ORANI
1050	4,2372	4,1609	0,0763	127	30	30	2,543
1050	4,8630	4,8453	0,0177	103	30	45	0,591
1050	5,042	5,0333	0,0087	113	30	60	0,289
3003	4,1294	4,0624	0,0670	116	30	30	2,232
3003	4,0632	4,0465	0,0167	108	30	45	0,557
3003	5,1870	5,1765	0,0105	108	30	60	0,351
5754	5,0328	4,9661	0,0667	120	30	30	2,224
5754	4,7506	4,7329	0,0177	105	30	45	0,589
5754	4,8319	4,8219	0,0100	110	30	60	0,333
6061	6,2307	6,1535	0,0772	121	30	30	2,573
6061	5,9742	5,9567	0,0175	110	30	45	0,583
6061	5,4055	5,3952	0,0103	108	30	60	0,343
7075	4,8119	4,7447	0,0672	121	30	30	2,239
7075	4,3850	4,3646	0,0204	108	30	45	0,681
7075	4,7720	4,7594	0,0126	110	30	60	0,419

AL₂O₃ 60kg-400 µm deney sonuçları

MALZEME	İLK AĞIRLIK (g)	SON AĞIRLIK (g)	AĞIRLIK FARKI (g)	TOPLAM SÜRE (s)	AŞINDIRICI MİKTARI (kg)	AÇI (°)	EROZYON ORANI
1050	4,6595	4,4688	0,1907	254	60	30	3,178
1050	4,6526	4,6083	0,0443	206	60	45	0,738
1050	4,664	4,6423	0,0217	225	60	60	0,362
3003	2,329	2,1616	0,1674	232	60	30	2,790
3003	2,3539	2,3121	0,0418	215	60	45	0,697
3003	2,3435	2,3172	0,0263	215	60	60	0,438
5754	4,6295	4,4627	0,1668	239	60	30	2,780
5754	4,6233	4,5791	0,0442	210	60	45	0,737
5754	4,5511	4,5261	0,025	220	60	60	0,417
6061	5,1599	4,9669	0,163	241	60	30	2,717
6061	5,1844	5,1407	0,0437	220	60	45	0,728
6061	5,1892	5,1635	0,0257	215	60	60	0,428
7075	5,9866	5,7812	0,148	241	60	30	2,467
7075	6,0063	5,9552	0,0511	215	60	45	0,852
7075	6,244	6,2126	0,0314	220	60	60	0,523

Çelik Grid 30kg-400 µm deney sonuçları

MALZEME	İLK AĞIRLIK (g)	SON AĞIRLIK (g)	AĞIRLIK FARKI (g)	TOPLAM SÜRE (s)	AŞINDIRICI MİKTARI (kg)	AÇI (°)	EROZYON ORANI
1050	4,6498	4,4757	0,1741	85	30	30	5,803
1050	4,6592	4,611	0,0482	87	30	45	1,607
1050	4,6553	4,6242	0,0311	92	30	60	1,037
3003	2,3583	2,2207	0,1376	93	30	30	4,587
3003	2,3473	2,3015	0,0458	89	30	45	1,527
3003	2,3534	2,3219	0,0315	90	30	60	1,050
5754	4,6395	4,509	0,1305	95	30	30	4,350
5754	4,6215	4,575	0,0465	92	30	45	1,550
5754	4,625	4,5937	0,0313	91	30	60	1,043
6061	5,2247	5,1172	0,1075	97	30	30	3,583
6061	5,2257	5,1766	0,0491	86	30	45	1,637
6061	5,0719	5,0423	0,0296	97	30	60	0,987
7075	5,8713	5,7695	0,1018	96	30	30	3,393
7075	5,9806	5,9303	0,0503	85	30	45	1,677
7075	5,9508	5,9171	0,0337	97	30	60	1,123

Çelik Grid 60kg-400 µm deney sonuçları

MALZEME	İLK AĞIRLIK (g)	SON AĞIRLIK (g)	AĞIRLIK FARKI (g)	TOPLAM SÜRE (s)	AŞINDIRICI MİKTARI (kg)	AÇI (°)	EROZYON ORANI
1050	4,6548	4,3935	0,2613	204	60	30	4,355
1050	4,6536	4,5828	0,0708	197	60	45	1,180
1050	4,6596	4,5952	0,0644	195	60	60	1,073
3003	2,3448	2,1268	0,218	205	60	30	3,633
3003	2,3548	2,2896	0,0652	200	60	45	1,087
3003	2,3325	2,2705	0,062	200	60	60	1,033
5754	4,6305	4,424	0,2065	202	60	30	3,442
5754	4,6391	4,5711	0,068	202	60	45	1,133
5754	4,628	4,5641	0,0639	203	60	60	1,065
6061	5,1776	5,0056	0,172	200	60	30	2,867
6061	5,2119	5,1492	0,0627	195	60	45	1,045
6061	5,2147	5,1487	0,066	205	60	60	1,100
7075	5,9386	5,777	0,1616	198	60	30	2,693
7075	5,9429	5,8704	0,0725	195	60	45	1,208
7075	5,9853	5,916	0,0693	200	60	60	1,155