T. C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞ YÜKLERİN EROSİF AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ

OMARI MASHI KHALFAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2008

T. C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞ YÜKLERİN EROSİF AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ

OMARI MASHI KHALFAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2008

T. C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞ YÜKLERİN EROSİF AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ

OMARI MASHI KHALFAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 28.01.2008 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Oybirliği İle Kabul Edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK
(Danışman)

Prof. Dr. Kazım ÇARMAN
(Üye)

Yrd. Doç. Dr. Yusuf YILMAZ
(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DIŞ YÜKLERİN EROSİF AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ

Omari Mashi KHALFAN
Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK
2008, 56 Sayfa
Jüri: Prof. Dr. Kazım ÇARMAN
Yrd. Doç. Dr. Yusuf YILMAZ

Bu deneysel çalışmada çekme şeklindeki dış yüke maruz kalan AISI 1010 çelik numunelerin, erozyon aşınma dirençleri tespit edilmiştir. Deneyler esnasında numuneler üzerine AISI 1010 çeliğinin akma gerilme değerinin %0, %20, %40, %60 ve %80'ine karşılık gelen dış çekme yükleri uygulanmıştır. Ayrıca erozyon aşınmasının zaman ile değişimi yanında 15^o, 30^o, 45^o, 60^o, 75^o ve 90^o püskürtme açılarındaki aşınma davranışları incelenmiştir.

Aşındırıcı olarak G40 grit partiküller kullanılmıştır. Partikül hızı gaz basıncı kullanılarak ayarlanmıştır. Deneylerde kullanılan hız değeri ise 30 m/s' dir.

Elde edilen sonuçlardaki aşınma değerleri; gerilmenin, püskürtme açısının ve uygulanan test süresinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bu değişimler incelendiğinde erozyon aşınmasının zaman ile lineer olarak arttığı, en yüksek erozyon aşınmasının 30^{o}' lik püskürtme açısında elde edildiği görülmüştür. Gerilme açısından bakıldığında malzemenin akma gerilmesinin %20' lik değerinde en yüksek aşınmanın gerçekleştiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı partikül erozyon aşınması, püskürtme açısı, erozyon aşınma mekanizması.

ABSTRACT

MS Thesis

EFFECTS OF EXTERNAL LOADS ON EROSIVE WEAR

Omari Mashi KHALFAN
Selcuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Department

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hüseyin İMREK
2008, 56 Pages
Jury: Prof. Dr. Kazım ÇARMAN
Assist. Prof. Dr. Yusuf YILMAZ

In this experimental study, erosion resistancies of AISI 1010 steel specimens subjected to external tensile stresses were investigated.

External tensile loads corresponding to AISI 1010 steel yield strength values of 0%, 20%, 40%, 60% and 80% were applied on the specimens. In addition, apart from the variation of erosion against time erosion behaviour at 15^o, 30^o, 45^o, 60^o, 75^o and 90^o impact angles were also studied.

G40 grits were used as erodents. Particle speeds were adjusted by using gas pressure. The speed value used in the tests was 30 m/s.

The results obtained were shown as functions of wear values, stresses, impact angle and test duration. When these variations are srudied, it is observed that erosive wear increases linearly with time and its maximum value is at 30^{o} impact angle. When looked in terms of stress, it has been observed that the material exhibits maximum wear at the value corrresponding to 20% of the yield strength.

Key Words: Solid particle erosive wear, impact angle, mechanism of erosive wear.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve çalışmanın her aşamasında bana yardımcı olan ve destek veren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK ile Arş. Gör. Mehmet BAĞCI' ya, erozyon aşınması deney tesisatının yapım aşamasında desteklerinden faydalandığım YILMAZ KARDEŞLER A.Ş.'ye, deney numunelerinin hazırlanması aşamasında desteklerini gördüğüm DEVMAK MAKİNA ve KONLASER A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
TABLOLARIN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. TEORİK ESASLAR	9
3.1. Aşınma	9
3.1.1. Kayma aşınması	10
3.1.2. Sert parçacıkların sebep olduğu aşınma	11
3.1.2.1. Adezyon aşınması	11
3.1.2.2. Abrazyon aşınması	15
3.1.2.3. Mekanik korozyon aşınması	16
3.1.2.4. Yorulma aşınması (pitting)	17
3.1.2.5. Erozyon aşınması	18
3.1.2.5.1. Aşındırıcı partiküllerdeki kuvvet analizi	19
3.1.2.5.2. Plastik deformasyona bağlı erozyon aşınması	20
3.1.2.5.3. Metallerin erozyonu ve tipik K değerleri	24
3.1.2.5.4. Erozyon aşınmasında esas alınan modeller	27

3.1.2.5.5. Erozyon aşınması test metotları 29

3.2. Malzemelerin Şekil Değiştirmesi 34

3.2.1. Elastik şekil değiştirme 36

3.2.2. Elastisite modülüne etkiyen etkenler 38

4. MATERYAL VE METOT 39

4.1. Test Metodu 39

4.2. Deney Tesisatı 40

4.3. Deney Numuneleri ve Aşındırıcı Partiküllerin Özellikleri 44

4.4. Deney Prosedürü 46

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 47

6. SONUÇLAR 53

KAYNAKLAR 54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

ŞEKİLLER **SAYFA**

Şekil 3.1	Adezyon aşınmasının etkisi	11
Şekil 3.2	Adezyon aşınmasının oluşması (a) yüzeylerin birbirine temas ettiği pürüzlülük tepeleri, (b) kayma hareketi sonunda meydana gelen aşınma	12
Şekil 3.3	Aşınma çeşitleri (a) çizikler şeklinde oluşan aşınma izleri, (b) parlatma şeklinde oluşan aşınma izleri, (c) aşınan tabaka kalınlığı	12
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	13
Şekil 3.5	Abrazyon aşınmasının etkisi	15
Şekil 3.6	Mekanik korozyon aşınması	16
Şekil 3.7	Yüzeyle temasta olan bir partikül üzerine etki eden kuvvetler	20
Şekil 3.8	Parçacığın plastik deforme edilebilen bir yüzeye batma prosesleri. İlk temas, t = 0 iken gerçekleşir ve parçacık, t = T iken durma noktasına gelir	21
Şekil 3.9	Kütle kaybının aşındırıcı parçacıkların toplam kütlesine bağımlı	23
Şekil 3.10	Erozyonun çarpma açısına olan bağımlılığı	24
Şekil 3.11	Sert parçacıkların yumuşak malzemeye çarpması sonucu oluşan şekiller	25
Şekil 3.12	Sert parçacıkların metal yüzeylerinde oluşturduğu erozyon (a) 30^o çarpma açısında aşınmış yumuşak çelik, (b) 90^o çarpma açısında aşınmış alüminyum	26
Şekil 3.13	Yumuşak malzeme erozyonunun teorik temas geometrisi	27
Şekil 3.14	Erozif aşınmaya maruz kalan numunelerin farklı gösterilişi (a) jet çarpma metodu, (b) sirkülasyon metodu, (c) santrifüj hızlandırıcı, (d) dönen kol metodu	30

Şekil 3.15	Gaz asıllı parçacık erosiv deneylerinde kullanılan çift disk parçacık hızı ölçme metodu	31
Şekil 3.16	Şekil 3.16 LDV ve çift disk metoduyla partikül hızının ölçümünün karşılaştırılması, çift disk metodunda oluşan hata oranının ölçülmesi	32
Şekil 3.17	Bir metal alaşımı için gerilme - % uzama eğrisi	35
Şekil 3.18	Çekme etkisinde eksenel ve yanal şekil değiştirme	36
Şekil 3.19	Sıcaklıkla eğimin değişimi	38
Şekil 4.1	Deney tesisatında kullanılan temas geometrisi	39
Şekil 4.2	Deney tesisatı şematik resmi	40
Şekil 4.3	Deney tesisatı fotoğrafı	41
Şekil 4.4	Deney setinde kullanılan aparat	42
Şekil 4.5	Silindirik helisel yayın kalibrasyonun şematik resmi	43
Şekil 4.6	Silindirik helisel yayın karakteristik eğrisi	43
Şekil 4.7	Deney numunesinin boyutları	44
Şekil 4.8	Aşındırıcı partiküllerin genel görüntüsü	45
Şekil 5.1	90 der. püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi	47
Şekil 5.2	75 der. püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi	48
Şekil 5.3	60 der. püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi	48
Şekil 5.4	45 der. püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi	48
Şekil 5.5	30 der. püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi	49
Şekil 5.6	15 der. püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi	49
Şekil 5.7	Tüm püskürtme açıları için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkileri	49
Şekil 5.8	Püskürtme açıları ağırlık kaybı ortalaması - % akma sınırı ilişkisi	50
Şekil 5.9	Gerilmesiz durum için zaman – ağırlık kaybı ilişkisi	50
Şekil 5.10	Malzemenin çekme yükü tesirindeki elastik şekil değişimi	51

TABLOLARIN LİSTESİ

TABLOLAR		SAYFA
Tablo 4.1	Deney numunesinin kimyasal bileşimi	44
Tablo 4.2	Aşındırıcı partikül kimyasal bileşimi	45
Tablo 4.3	Deney numunelerine uygulanan yükler	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

δW	Normal yük, N
P	Plastik deformasyondaki pürüzün akma basıncı, N/mm^2
a	Pürüzlülük temas yarıçapı ve temas boyu, mm
δV	Aşınma ile taşınan malzeme hacmi, mm^3
κ	Orantı sabiti
δQ	Ortalama aşınmış malzeme hacmi, mm^3
Q	Toplam aşınma oranı, mm^3/m
K	Aşınma katsayısı
k	Boyutlu aşınma katsayısı, $mm^3/N.m$
V_h	Aşınma hacmi, mm^3
h_a	Aşınan bu tabakanın kalınlığı, mm
A_a	Aşınma alanı, mm^2
p	Temas yüzeylerinde meydana gelen basınç, N/mm^2
v	Kayma hızı, m/s
k_a	Malzeme çiftine ait deneyle tayin edilen faktör
dh/dt	Pratikteki aşınma hızı, mm/s
h_{aem}	Aşınma sınırı, mm
m	Aşındırıcı partikül kütlesi (gr)
A(x)	Aşındırıcı partikülün oluşturduğu deformasyon alanı (mm^2)
H	Malzemenin sertliği, N/mm^2
U	Parçacığın başlangıçtaki kinetik enerjisi
V	Parçacığın son hacmi, mm^3
ρ	Erozyona maruz kalan malzemenin yoğunluğu
K	Malzemedeki aşınma çukurunu tanımlayan boyutsuz faktör
E	Erozyon aşınmasını tanımlayan boyutsuz büyüklük
θ	Çarpma açısı, ^{o}

α	Normal geliş açısı, ^{o}
σ	Çekme gerilmesi, N/mm^2
E	Elastisite modülü
ε_y	Yanal şekil değiştirme, mm
ε_x	Eksenel şekil değiştirme, mm
τ	Kayma gerilmesi, N/mm^2
γ	Kayma şekil değiştirmesi
G	Kayma modülü
K	Hacim modülü
p	Hidrostatik basınç
$\Delta V/V$	Hacim değişim oranı
ν	Poisson oranı
HB	Brinell sertlik değeri
HRC	Rockwell C sertlik değeri

Kısaltmalar

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)

1. GİRİŞ

DIN 50320 Standardına göre aşınma; kullanılan malzemelerin, başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulmasıdır.

Genel aşınma tariflerinde aşınma ile ilgili vurgulanan önemli noktalar şu şekilde sıralanabilir;

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

Yukarıdaki şartlardan bazılarını sağlamayan ve yıpranma olayı olarak bilinen korozyon; sürtünme ve mekanik hareket olmaksızın sadece kimyasal ve elektrokimyasal etki ile genelde yüzeyden başlayarak oluşmaktadır. Ancak sürtünme ile birlikte kimyasal etkilerle oluşan korozyon, aşınma kapsamındadır.

Aşınma, makine tasarım ve konstrüksiyonunda çok önemli bir konudur. Temasta bulunan yüzeylerdeki sürtünme güç kaybına sebep olmakta iken aşınma çalışma toleranslarını arzu edilmeyen yönde değiştirmekte ve malzemeleri kullanılamaz duruma getirmektedir.

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 incelenecek olursa bunlar dört ana grupta toplanabilir;

- Aşınmış ve dolayısıyla kullanılamaz duruma gelmiş parçanın yenilenme maliyeti,

- Aşınma yüzünden tesisteki proses parametrelerinin meydana getirdiği maliyet (Örneğin, kâğıt fabrikasında kullanılan silindirlerin aşınmasından dolayı silindirlerin dönme hızının ve dolayısıyla üretimin arttırılamamasının oluşturduğu maliyet gibi),

- Parçanın onarımı için tesisin çalışmaması sebebiyle oluşan üretim kaybı ve üretimin durdurulması ve üretim işlemlerinin yeniden başlatılması (ön ısıtma vs. gibi) için harcanan maliyet,

- Aşınmanın önceden tahmin edilememesi sebebiyle meydana gelecek kazaların neden olduğu maliyettir.

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.

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.

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.

Aşınmaya maruz kalan makine parçalarının bazıları zaman içerisinde değişen veya sabit bir gerilme altında çalışırlar. Dolayısıyla dış yüklere maruz kalan bu parçalardaki erozyon aşınma davranışının tespit edilmesi tasarım ve konstrüksiyon aşamasında önemli bir yer almaktadır.

Yapılan bu çalışmada malzeme üzerine tatbik edilen değişik değerlerde çekme yükleri karşısında erozyon aşınma direnci incelenmiştir.

Çalışmada deney numunesi olarak AISI 1010 çelik, aşındırıcı partikül olarak da G40 çelik gritler kullanılmıştır. Deney numuneleri üzerine numunelerin akma gerilmelerinin %0, %20, %40, %60 ve %80'ine karşılık gelen yükler tatbik edilmiştir. Ayrıca numune üzerine 15^o, 30^o, 45^o, 60^o, 75^o ve 90^o püskürtme açılarında aşındırıcı partiküller püskürtülerek püskürtme açısının aşınma üzerindeki etkisi ile aşınmanın zaman içerisindeki değişimi incelemiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

K. Yıldızlı, M.B. Karamış ve F. Nair (2006)'in 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 derecelik çarpma açısında maksimum, 90 derecede ise minimum değerlerini göstermiştir. Çelik grit parçalarının sürekli olarak metale çarpması sonucunda aşınma yüzeyi altındaki bölgede mikro çatlakların oluşmasına neden olduğu gösterilmiştir.

N.Y. Sarı ve M. Yılmaz (2006) tarafından yapılan çalışmada çeşitli yüzey kaplama işlemlerine tabi tutulan AISI 1050 çelikleri abrazif ve erozif aşınmaya tabi tutulmuş ve aşınmaya maruz bırakılan yüzeylerde sert ve gevrek tabakaların oluştuğu ve yüzeyde mikro çatlak mekanizmasının geliştiği ve aşınma oranının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca kaplama tabaka malzemesi olarak seramik yerine kompozit asıllı malzemeler kullanıldığında aşınma direncinin artığını ispatlanmıştır.

C.K. Fang ve T.H. Chuang (1999) tarafından yapılan çalışmada metalik malzemelerde mikroploughing 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.

N. Sarı ve T. Sınmazçelik (2007)' in kompozit malzemenin erozyonu hakkında yapmış oldukları çalışmada, tek yönlü güçlendirilmiş polyamit karbon fiber kompozitlerin max. aşınma oranlarının 45^{o}–55^{o} olarak bulunmuştur. Yine erozif aşınmada yüzey pürüzlülüğünün aşınma ile yakın ilişkilerinin olduğunu tespit etmişlerdir.

S. Das, Y.L. Saraswathi ve D.P. Mondal (2006) tarafından yapılan çalışmada alüminyum alaşım kompozitlerinin erozyon – korozyon aşınmaları incelenmiştir. Çalışma sonucunda kompozit malzemelerin ortama bağlı kalmaksızın matris alaşımlara göre daha yüksek aşınma direnç değeri gösterdiği görülmüştür. Alaşım içerisindeki silikon karpit (SiC) miktarı artırıldığında aşınma direncinin artığını tespit edilmiş ve kompozitlerin aşınma direnç artışı alaşımlara göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca kompozitlerin bütün aşındırıcı konsantrasyonlarında ortama bağlı kalmaksızın alaşımlı malzemelerden daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu gösterilmiştir.

Harry H. Tian, Graeme R. Addie ve Krishnan V. Pagalthivarthi (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, K., Wood, R.J.K. ve Wheeler, D.W. (2005)'in 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 kaplamada ki 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.

Renno Veinthal (2005), 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 karbit 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.

F.Y. Hung, L.H. Chen ve T.S. Lui (1991)'in yaptıkları çalışmada östemperlenmiş sünek demirin erozyon davranışını incelemişlerdir. 420 ^{o}C'de tavlanmış 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.

K.P. Balan, A.V. Reddy, V. Joshi ve G. Sundararajan (1991) yaptıkları çalışmada dökme demirin iç yapısının erosif aşınma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada hem sade hem de ısıl işlem görmüş gri ve küresel dökme demirler incelenmiştir. Deneyler değişik çarpma açılarında 80 m/s sabit bir hızda yapılmış ve 160 mikron 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.

L.C. Chang, I.C. Hsui, L.H. Chen ve S.T. Lui (2004)'in yaptıkları çalışmada sifero grafit dökme demirin erozyonu üzerinde grafit nodüllerin etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda ferrit ve üst beynitteki yapılarda grafit nodüllerin erozyona herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak martensitik yapıda, sifero grafit dökme demirde, grafit nodüllerin erozyon oranını artırdığı görülmüştür.

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

A.W. Ruff ve L.K. Ives (1975) erozyon aşınmasında katı partiküllerin hızının bulunması üzerine çalışma yapmışlardır. Basit bir mekanik yapılandırma ile değişik durumlarda ölçü alma imkânının olduğu gösterilmiştir. Çalışma sonucunda deney aparatları üzerinde yapılan ölçümlerin örnekleri sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmada nozul tasarımının öneminden de bahsedilmiş ve parçacık ile gaz akış hızları arasındaki mukayeseye de yer verilmiştir.

J.J. Rajesh, J. Bijwe, U.S. Tewari ve B. Venkataraman (2001) tarafından yapılan çalışmada bir seri polyamidin 90 – 180 μm'lik silis partikülleri karşısında erozyon davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda polyamidlerin bazılarının 15^{o} bazılarının ise 30^{o} çarpma açılarında erozyon aşınmasında maksimum aşınma gösterdiği belirtilmiştir. Bu durumda bu malzemelerin sünek bir kırılma noktası olduğu kanıtlamıştır. Ancak PA'larda maksimum aşınma 15^{o}'de oluştuğu ispatlanmıştır. 90^{o} ve 60^{o} lik çarpma açılarında erozyon oranı ve gevreklik arasında iyi bir korelasyon gözlemlenmiştir.

Y.I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa ve M. Matsumura (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^{o}'den başlayarak 90^{o}'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.

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

W.S. Dai, L.H. Chen ve T.S. Luiv (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.

Chabane Bousbaa, Abderrahim Madjoubi, Mohamed Hamidouche ve Nourredine Bouaouadja (2003)'nın 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^o püskürtme açısında ve 12 m/s hız altında yapılmıştır. Çalışma sonucunda iyon değişim uygulamasının küçük aşındırıcı kütlelerde camın erozyon direncini biraz arttırdığını gözlemlenmiştir. Ayrıca kalıntı gerilmelerin de ağırlık kaybına etkili olduğu ispatlanmıştır.

Irina Hussainova (2005) yaptığı çalışmada seramik – metal kompozitlerin mikro yapısal özelliklerinin aşınma üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Ayrıca erozif aşınma üzerindeki termo – mekanik etkiyi de incelemiştir. Çalışmalar sonucunda mikro yapısal parametrelerin aşınma direnci üzerine önemli rol oynadığını ispatlamıştır.

3. TEORİK ESASLAR

3.1. Aşınma

Aşınma; katı cisimlerin yüzeylerinden ufak parçacıkların veya ince parçaların ayrılması ile bir malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Mekanik, fiziksel, elektriksel veya termik sebeplerle aşınma oluştuğu gibi korozyon sonucunda da aşınma meydana gelebilmektedir (Ludema 1996).

Aşınma birçok mühendislik sisteminin performansını etkilemesine rağmen çoğu zaman tasarımda ihmal edilen bir faktördür. Genellikle 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 yuvarlanma hareketini kapsadığı için aşınma yorulma ile olur. Eğer sert parçacıklar yüzeye çarpıyorlarsa aşınma erozyonla oluşur.

Yukarıda anlatılanlara bağlı olarak aşınma; 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 laboratuar 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.

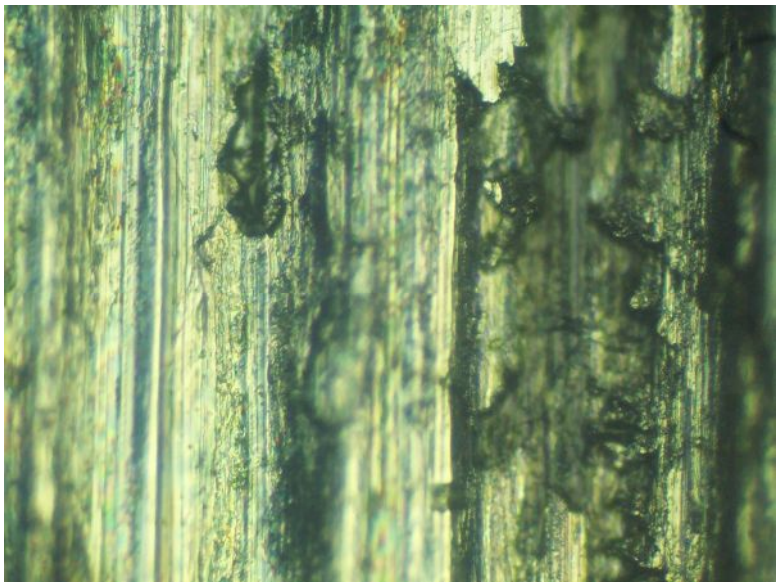
Scuffing, İngiltere' deki kullanımında kayma yüzeyleri arasındaki bölgesel katı hal kaynağı ile meydana gelen bölgesel yüzey aşınması anlamında kullanılır. Bu terim sık olarak, genellikle yüksek hızlı kaymalardaki yağlamanın bozulmasını tanımlamak için kullanılır. Amerika' da scoring yukarıda tanımı yapılan 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.

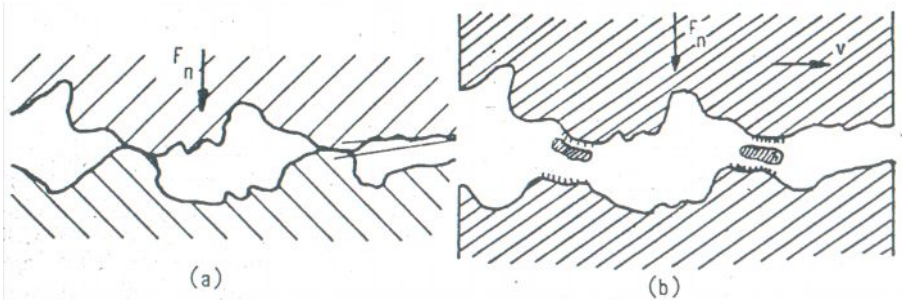
3.1.2.1. Adezyon aşınması

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).



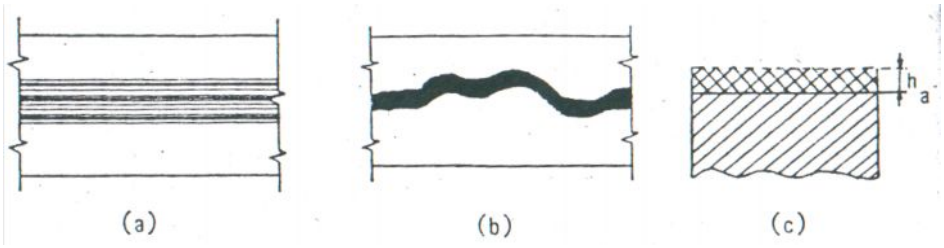
Şekil 3.1 Adezyon aşınmasının etkisi

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; $V_h = h_a * A_a$ ile hesaplanabilir.



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

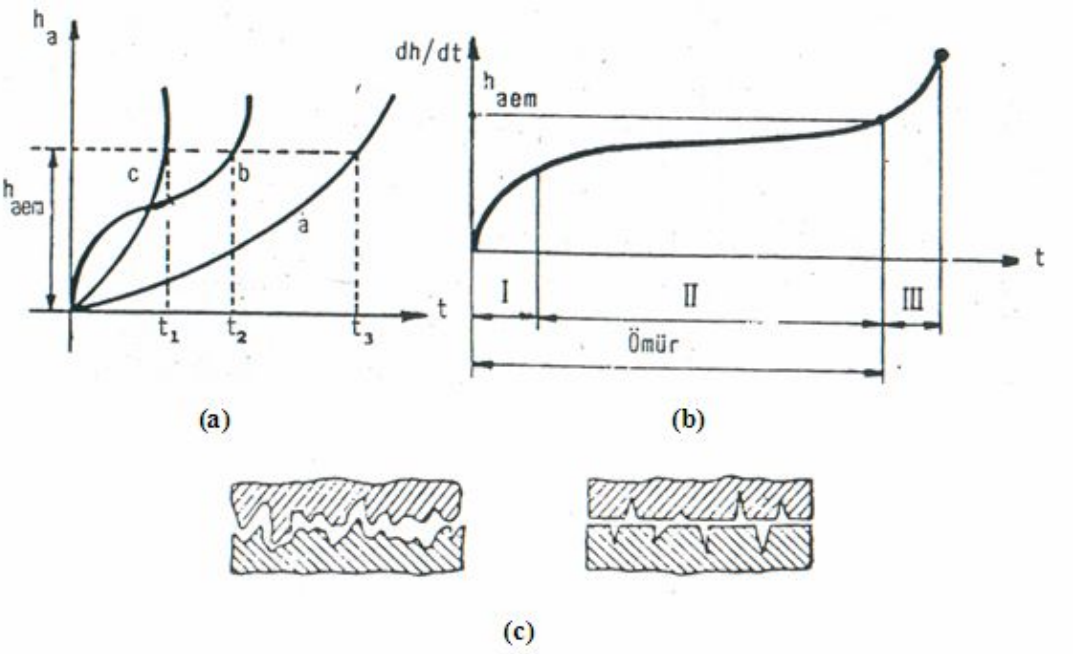
Adezyon aşınması temas yüzeylerde meydana gelen basınç ($p = F_n / A$) ve kayma hızı (v) tarafından önemli şekilde etkilenmektedir. Ayrıca aşınmanın zamana bağlı olarak geliştiği göz önünde tutulursa, analitik olarak adezyon aşınması;

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

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

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

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, (c) 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.

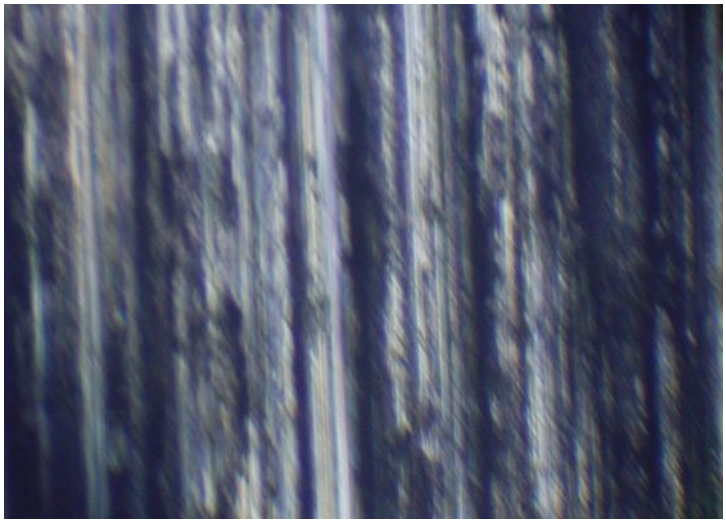
Adezyon aşınmasının önlenmesi için alınması gereken önlemleri şu şekilde sıralayabiliriz.

- 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 büyük ölçüde adezyon aşınmasını önlemektedir. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katıklı bir yağ konulursa aşınma ve bilhassa yenme önlenebilir. Bu nedenle adezyon aşınmasını önlemek için iyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katkılar 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 aşınmasının etkisi

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 ısıl işlem veya yüzeylere sert malzeme kaplama ile elde edilebilir.

Abrazyon aşınmasını önlemek için alınacak önlemler şu şekilde özetlenebilir;

- Yüzeyler sertleştirilmelidir.

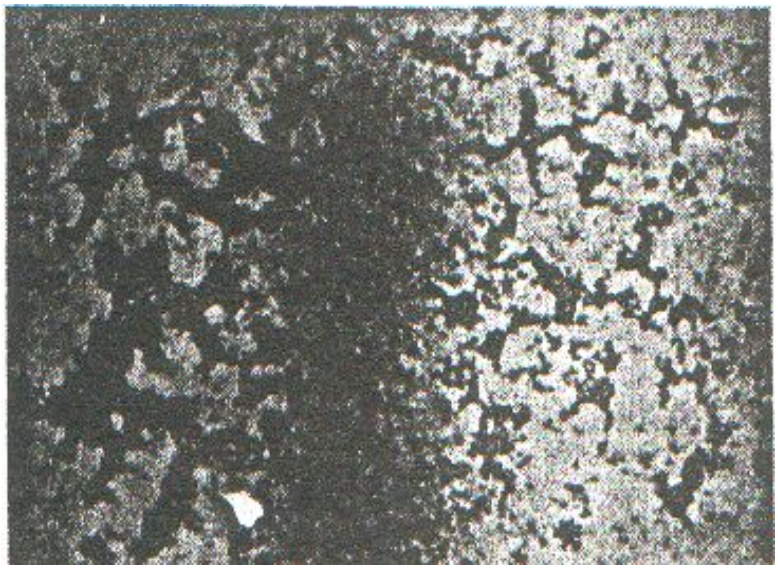
- Dışarıdan sert malzemelerin yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır.

- 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 sülfit 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 büyümezler 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 tarifle, 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.

Katı parçacık erozyonu, son yıllarda artan ilgi görmüştür. Bu ilgi, kömür dönüştürme santralleri hakkında 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 sorun olmuştur. Helikopterlerin ve uçakların kanatlarında oluşan erozyonu kapsamaktadır. 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 ablazyon – erozyon durumudur. Bu durum uzay araçlarının ve füzelerin atmosfere tekrar girdiklerinde burun kısımlarında ve ısı muhafazalarında meydana gelmektedir.

Erozif proseslerin faydaları az da olsa önemlidir. Temizlikte kullanılan kum püskürtme metodu çok kişi tarafından bilinmektedir. Ama sıvı jeti kesme işlemleri, madencilikte, tünel açma, kaya kesme, ahşap ve grafit – epoksi kompozit malzemelerin kesme işlemlerinde kullanıldığı bilinmemektedir. Ayrıca ev tesisatındaki delik açma işlerinde sıvı jeti kullanılabileceği araştırılmış, olumlu ve ucuza mal olabileceği tespit edilmiştir.

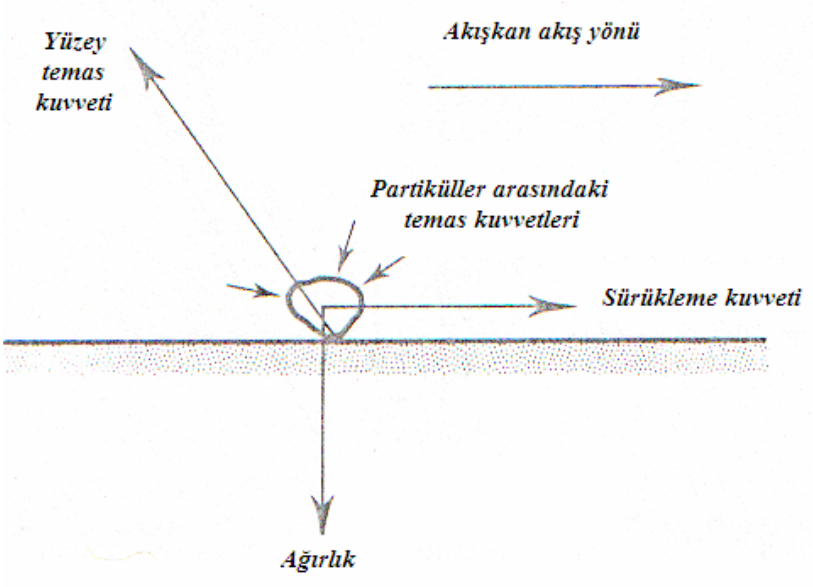
Mühendislik malzemelerinin sıvı damla veya katı parçacık çarpmasına karşın davranışları, büyük ölçüde o malzemenin türüne, maruz bırakıldığı duruma (sıcaklık, gerilme ve yüzey işlemlerine) ve erozyonun çevresel parametrelerine bağlıdır. Erozyon parametrelerinden kastedilen parçacıkların çarpma hızı,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

Katı parçacıkların çarpmasıyla meydana gelen malzeme kaybı, erozyon proseslerinin en yaygın olanıdır. Örneğin, bu tip hasarların görünebileceği yerler şunlardır; enerji dönüşüm sistemlerinde kömürün küçük tanecikler halinde yaygın kullanılması erozyona yol açmaktadır, jet motorlarında ve helikopter rotor kanatlarında katı parçacıkların çarpması ve benzer bir durum da büyük türbinlerde oksit tabakaların kopması ve ardından kanatlara ve yüzeylere çarpması sonucu katı parçacık erozyonunun oluşması söz konusu olmaktadır.

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.

3.1.2.5.1. Aşındırıcı partiküllerdeki kuvvet analizi

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi erozyonda farklı kaynaklardan gelen birçok kuvvet, katı yüzey ile temas halinde olan bir parçacık üzerinde etkili olabilir. Birbiri ile temas eden parçacıklar temas kuvvetlerine neden olabilirler 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. Abrazif aşınmada, aşınan malzemenin miktarı kayma mesafesine ve normal kuvvetin şiddetine bağlıdır. Erozyonda ise aşınma miktarı yüzeye çarpmakta olan parçacıkların sayısına ve kütlesine ve bunların etki hızına bağlıdır.

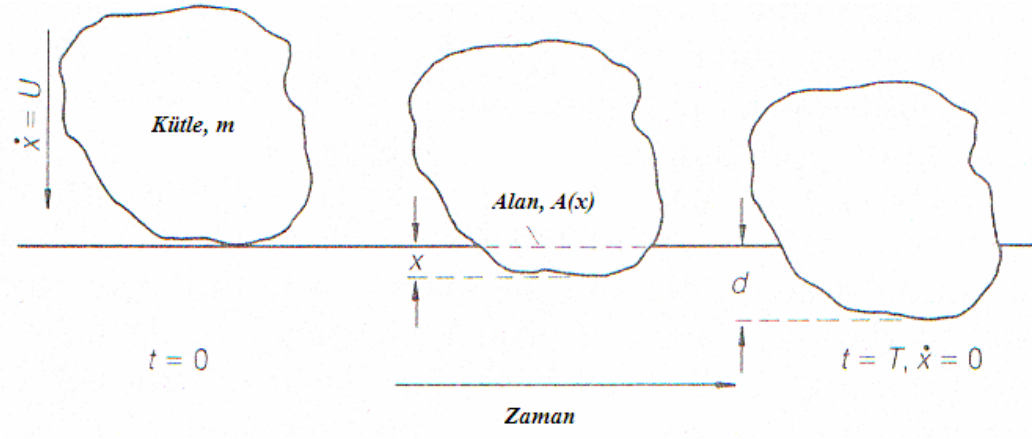


Şekil 3.7 Yüzeyle temasta olan bir partikül üzerine etki eden kuvvetler

Abrazyon aşınmasında 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 plastik akış ya da kırılma ile aşınırlar.

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 davranışı incelenmelidir. 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 olduğu ve bir basınca sahip olduğu kabul edilir. Erozif parçacık ilk temastan sonra t zamanında, m kütlesine sahip olan parçacık yüzeyine x derinliğine kadar girmiş olacaktır; yüzeydeki çentiğin kesit alanı A(x) olacaktır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 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. Ve parçacığın hareketine ait denklem aşağıdaki şekilde yazılır:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -HA(x) \tag{3.3.}$$

Basit parçacık şekilleri için bu eşitlik analitik olarak hemen çözülebilir, ancak bizim amaçlarımız için erozif parçacığın parçanın 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.

$$\int_0^d HA(x)dx = \frac{1}{2}mU^2 \tag{3.4.}$$

Çentiğin son hacmi olan V aşağıdaki denklemle verilir,

$$V = \int_0^d A(x)dx \tag{3.5.}$$

ve bu yüzden H'nin sabit olduğu varsayıldığından,

$$V = \frac{mU^2}{2H} \tag{3.6.}$$

şeklinde yazılır. Çentikten uzaklaşan malzeme birçok olası durumla karşı karşıyadır. Çentikten uzaklaştırılan malzeme birkaç olaya maruz kalabilir.

Bunlar:

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

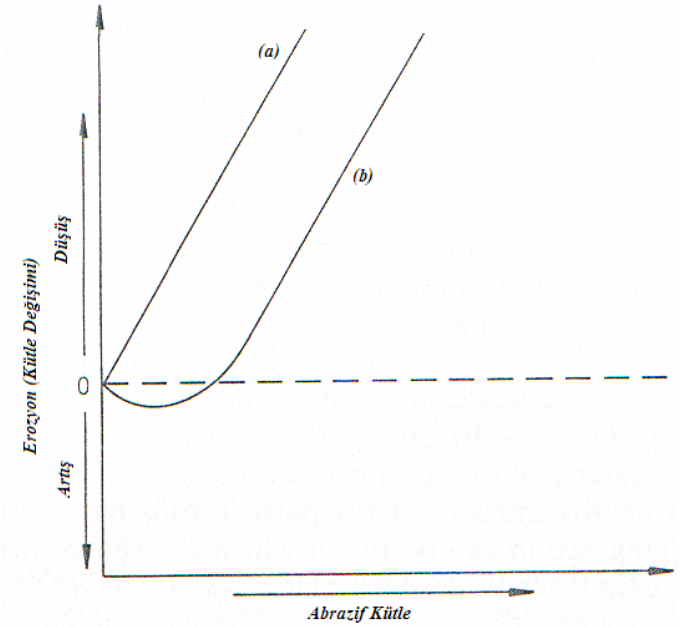
Burada yalnızca çentikten uzaklaştırılmış malzemenin *K* büyüklüğündeki bir bölümü aşınma çukuru olarak kabul edilirse:

$$\text{Ortadan kaldırılan malzemenin kütlesi} = K\rho\frac{mU^2}{2H} \tag{3.7.}$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde ρ, erozyona maruz kalan malzemenin yoğunluğu, K ise boyutsuz bir faktördür.

3.6. denklemi birçok etki bakımından yüzeyden kaldırılan malzemenin toplam kütlesinin yüzeye çarpan erozif parçacıkların toplam kütlesiyle orantılı olması gerektiğini göstermektedir. Şekil 3.9 bir yüzeyden kaybedilen kütlenin yüzeye çarpan parçacıkların toplam kütlesi ile değiştiğini göstermektedir.

Bazı malzemeler için parçacıklar yüzeye gömülebilir ve (b) eğrisi ile gösterildiği şekilde bir başlangıç kütle kazancı oluşturabilir. Temel olarak yumuşak hedef malzemelerle gözlenen ve yüksek geliş açıları 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. Şekil 3.9'daki (a) hattı takip edilir.



Şekil 3.9 Kütle kaybının aşındırıcı parçacıkların toplam kütlesine bağımlılığı

Sabit durum erozyonunda gözlenen doğrusal ilişki basit bir E, erozyon tanımının elde edilmesini sağlar:

E = Temizlenen mal. küt. / Yüzeye çarpan erozyon par. küt. (3.8.)

E boyutsuzdur, bu durumda (3.6.) denklemi aşağıdaki şekli alır:

$$E = \frac{K\rho U^2}{2H} \qquad (3.9.)$$

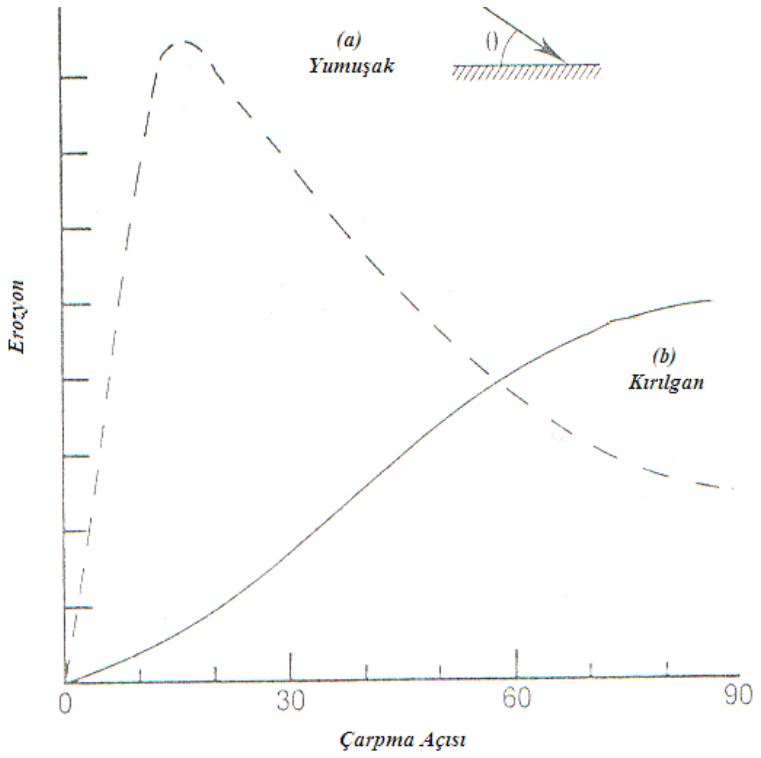
Denklem (3.9.)'un sürtünme sonucu ortaya çıkan aşınma ile ilgili olarak çıkarılan **Q = (K * W) / H** denklemi ile karşılaştırılması öğreticidir. Bunların her ikisi de H ile ters orantılı olan aşınma oranlarını göstermektedir. Sürtünme sonucu ortaya çıkan aşınma denkleminde W; uygulanan toplam normal yük, Q; birim kayma mesafesinde uzaklaştırılan parçacıkların toplam hacmi, K; sürtünme parçasının geometrisine ve uzaklaştırılan materyalin oranı η' ya bağlı bir sabittir. Uygulanan normal yükün rolü erozyonda **ρ * U^2 / 2** miktarı ile ifade edilir. Her iki durumda, aşınmanın şiddeti boyutsuz aşınma katsayısı K ile belirlenir. K 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. Metallerin erozyonu ve tipik K değerleri

Metallerin erozyonu için K tipik olarak 5.10^{-3} ile 10^{-1} arasındadır ve bu değerler iki cisimli sürtünme için gözlenen değerlere benzerdir.

(3.9.) 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 ile yumuşak malzemenin yüzeyi arasındaki etkileşiminin daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

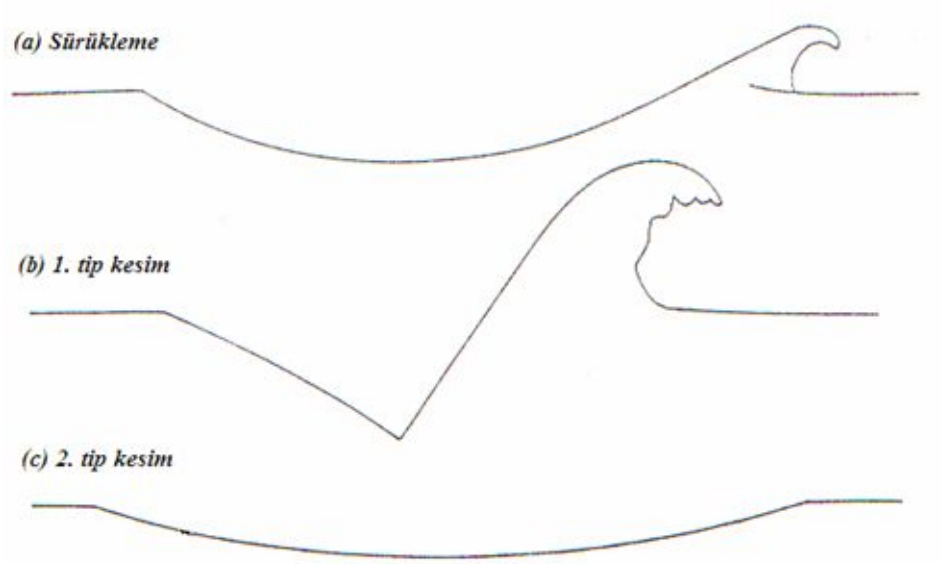
Sert bir parçacığın etkisine bağlı olarak ortaya çıkan deformasyonun geometrisi etki hızına, parçacığın biçimine ve yönüne ve etki açısına bağlı olarak değişir. Erozyondaki etki açıları genellikle Şekil 3.10'da görüldüğü üzere yüzey düzlemine bağlı olarak tanımlanır. Normal etki için $\theta = 90^{o}$ geliş açısında iken θ sıfıra gitme eğilimindedir.



Şekil 3.10 Erozyonun çarpma açısına olan bağımlılığı

Yumuşak malzemelerin erozyonu (örneğin çoğu metaller) etki açısına bağlı olarak belirgin biçimde değişir ve bu durum Şekil 3.10'da (a eğrisi ile) gösterilmiştir. Maksimum değer 20^o ila 30^o arasındadır ve normal geliş açısındaki maksimum aşınma oranının yarısı ile üçte biri arasında değişen bir miktardır.

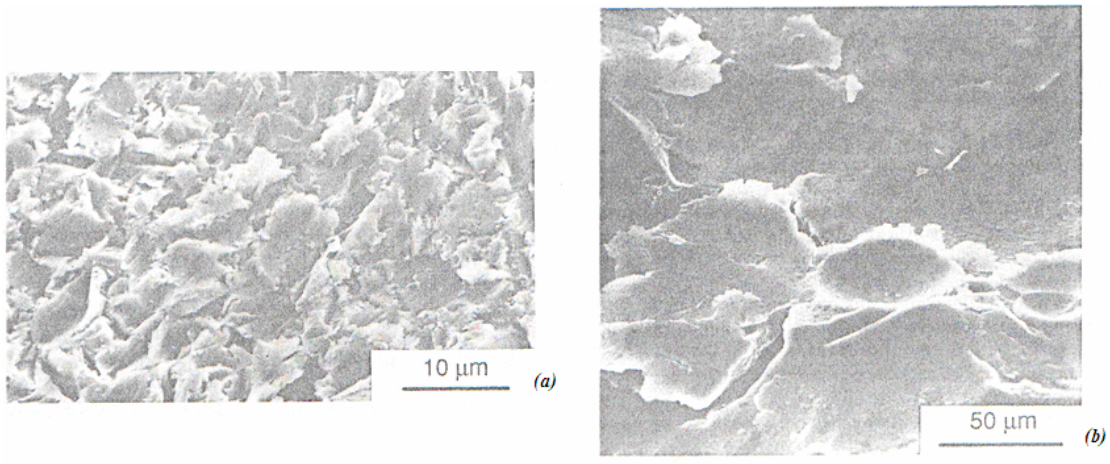
Tek taneciklerin metaller üzerindeki etkisi üzerine 30^o etki açısında yapılan çalışmalar üç temel etki hasarı göstermektedir ve bu türler Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Sert parçacıkların yumuşak malzemeye çarpması sonucu oluşan şekiller

Yuvarlak parçacıklar malzemeyi kenara doğru iterek ve parçacığın önünde sürükleyerek yüzeyi deforme ederler (Şekil 3.11.(a)). Komşu alanlardaki diğer etkiler ağır şekilde zorlanmış malzemenin kraterin ağzından ya da bağlantı dudağından kopmasına yola açarlar. Açısal bir aşındırıcı parçacığın neden olduğu deformasyon parçacığın yüzeye çarptığı sıradaki yönü ve parçacığın temas sırasında öne doğru mu yoksa arkaya doğru mu hareket ettiğine bağlıdır. 1. tip kesim (Şekil 3.11.(b)) olarak adlandırılan modda 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 3.11.(c)), aşındırıcı parçacığın keskin köşesinin yüzeyden bir parça kesip aldığı gerçek bir mekanizma hareketi ortaya çıkabilir. Bu 2. tip 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 yönlere 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 birçok parçacığın etkisi ile aşınmış yüzeylerde ayırt edilebilir. Örneğin, Şekil 3.12.(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 meydana gelen çentikten taşımasına rağmen, bu malzeme birçok plastik deformasyon döngüsü geçirinceye ve şiddetli bir biçimde sertleşinceye dek aşınma kalıntısı olarak kalacaktır.

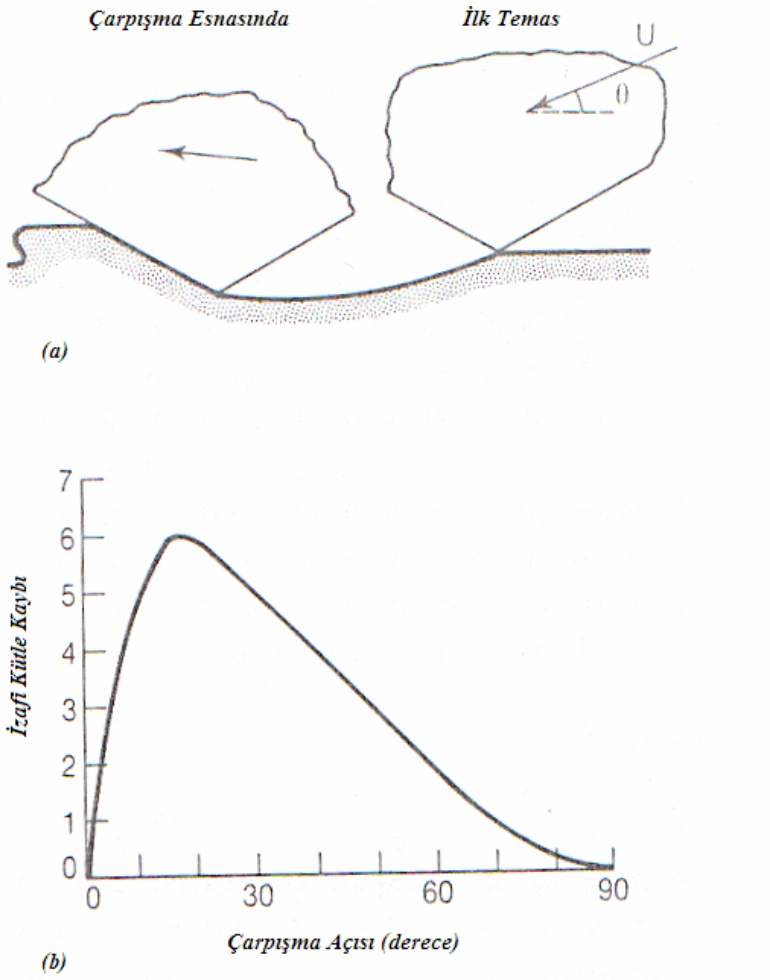


Şekil 3.12 Sert parçacıkların metal yüzeylerinde oluşturduğu erozyon (a) 30^o çarpma açısında aşınmış yumuşak çelik, (b) 90^o çarpma açısında aşınmış alüminyum

Aşındırıcı parçacıkların biçimi, her bir çentik etrafında oluşan plastik deformasyonun biçimini (sürtünme sonucu aşınmada olduğu gibi) ve bir ağız ya da dudak oluşturan her bir çentikten taşınan malzemenin oranını etkiler. Daha yuvarlak parçacıklar daha az lokalize olmuş bir deformasyona yol açar ve her bir kalıntı kısmının temizlenmesi için daha fazla etkiye gerek duyulur. Etki açısının artmasında da benzer bir etkiye sahiptir. Şekil 3.12.(b)'de normal geliş açısında ($\alpha = 90^o$'de) bulunan küresel parçacıkların komşu vuruşların oluşturduğu plastik deformasyonun sonunda ortaya çıkan yüzey açısal parçacıklarla erozyona uğramış olan bir yüzeyden son derece farklı olarak görünür.

3.1.2.5.4. Erozyon aşınmasında esas alınan modeller

Erozyon sonucu oluşan aşınma çukurcuklarının büyük bölümünün birçok 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 sığ bir açı ile çarpması durumunda çözülmesi yoluyla ve malzemenin yalnızca bir kesme işlemi yolu ile kaldırıldığı varsayılarak, yukarıda açıklanmış olan normal etki için geliştirilen basit model, eğik etki durumları için genişletilir. Şekil 3.13, düzgün bir yüzeyi kesmekte olan sert bir parçacığın iki boyutlu, idealize edilmiş bir modelini göstermektedir.



Şekil 3.13 Yumuşak malzeme erozyonunun teorik temas geometrisi

Yüzeyden kaldırılan malzemenin hacmi parçacık başının süpürdüğü miktar olarak alınır (çentik tarafından taşınan toplam hacimden ayrı olarak) ve bu yüzden model normal geliş açısı için sıfır erozyon öngörmektedir. Çeşitli basitleştirici varsayımların yapılması olasıdır. Parçacık üzerindeki kuvvetlerin en üst noktada olduğunun varsayıldığı bir analiz yöntemi aşağıdaki denklemi ortaya çıkarmaktadır:

$$E = \frac{K\rho U^2}{H} f(0) \qquad (3.10.)$$

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 3.13'te gösterilmiştir ve her ne kadar normal geliş açısı için sıfıra düşüyorsa da Şekil 3.10'da gösterilmiş ve deneysel olarak gözlenmiş olan (a) eğrisine benzerdir.

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

$$E = \frac{K_1\rho U^n}{H} f_1(0) \qquad (3.11.)$$

Burada hızın üssü olan n tipik olarak 2,0 ve 2,5 arasındadır ve kendi başına θ etki açısının bir fonksiyonudur.

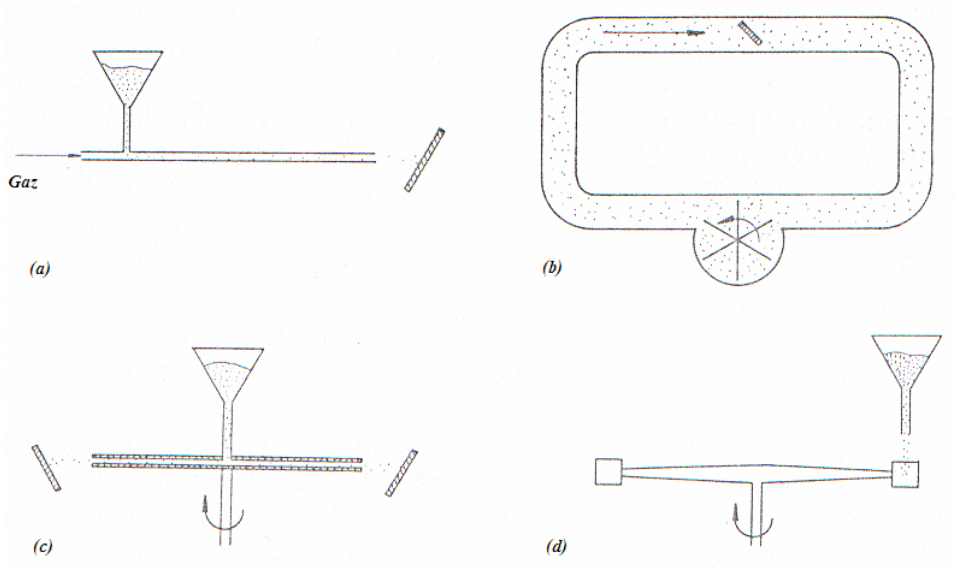
(3.10.) ve (3.11.) denklemlerini ortaya çıkartan modeller, malzemenin kesme işlevi gören münferit parçacıklar tarafından kaldırıldığını varsaymaktadır (Şekil 3.11.(c)'de gösterilmiş olan 2. tip kesmeye benzer olarak) ve yalnızca dar geliş açıları için geçerlidir.

3.1.2.5.5. Erozyon aşınması test metotları

Laboratuar 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 vuruş açısı) tanımlanmalı ve test edilen parçacıklar ve materyal iyice karakterize edilmelidir.

Laboratuar aşınma testi için yaygın olarak kullanılan metotlar, parçacıkların bir ya da sıvı akıntısında ivme kazandırıldığı metotlar ve vuruş hızını elde etmek için sirküler hareketin kullanıldığı metotlar olarak gruplara ayrılmaktadır. Şekil 3.14'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. Gaz akıntısındaki parçacıklarla yapılan erozyon testi için hazırlanır. Standartlar (örn. ASTM G76, DIN 50332) gaz akışı metodunu kullanırlar. 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 sirkülâsyonunu zorunlu hale getirebilir ve bu durumda, kırılmaya bağlı olarak aşındırma oranının test süresince düşmemesine özen gösterilmelidir.

Parçacık aşınma problemleri Şekil 3.14.(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 valflar gibi parçaların aşınma oranlarını belirlemede oldukça önemlidir. Bu metot aynı zamanda numuneleri örnekleri 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.

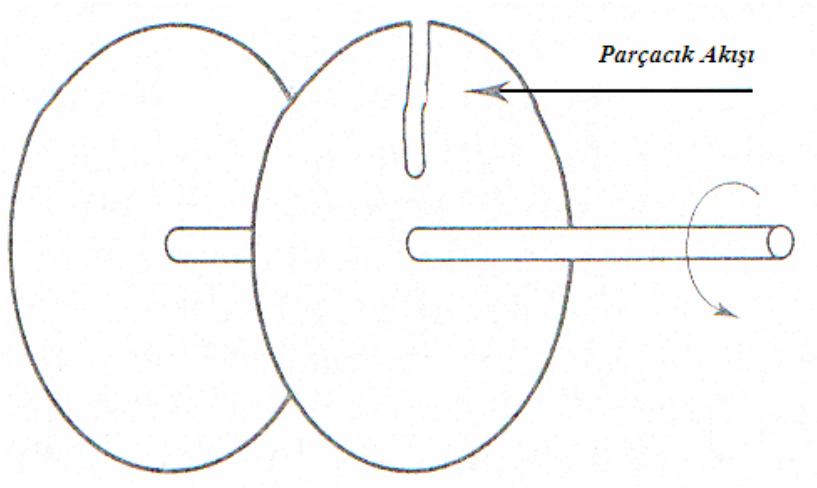


Şekil 3.14 Erozif aşınmaya maruz kalan numunelerin farklı gösterilişi (a) jet çarpma metodu, (b) sirkülasyon metodu, (c) santrifüj hızlandırıcı, (d) dönen kol metodu

Şekil 3.14.(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.

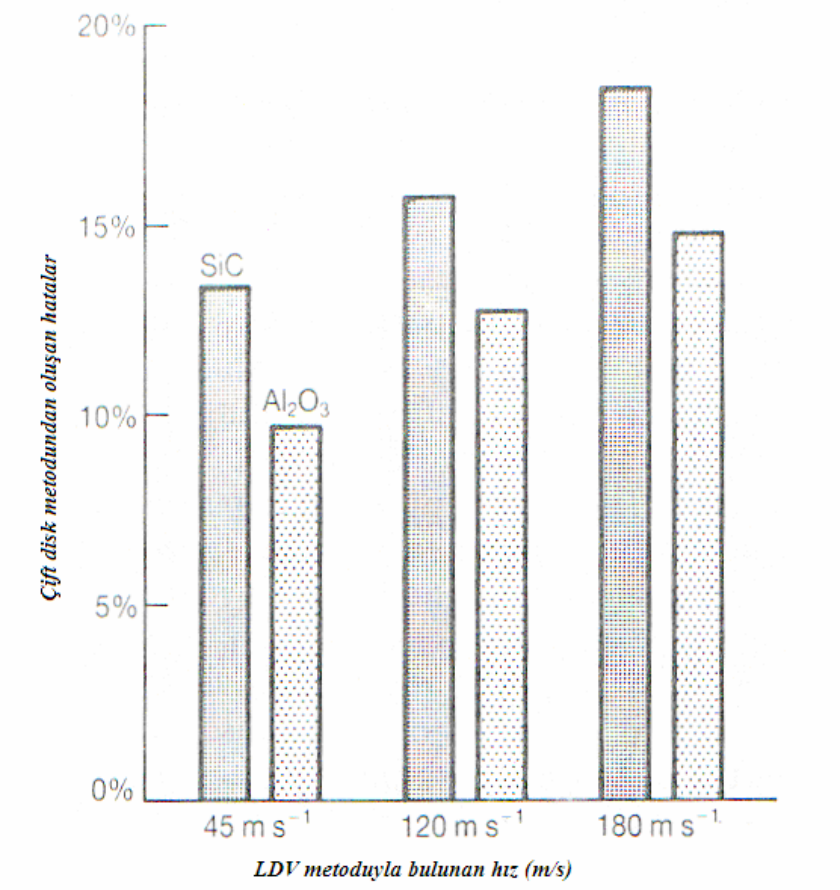
Şekil 3.14.(d)'de gösterilen aparatta, dengelenmiş bir rotorun iki ucundaki iki numune parçacıkların yavaşça düştüğü akış yoluyla, rotorun çevre hızında ve numunelerin yönü ile belirlenen bir açıda bunlara çarparak yüksek hızda hareket eder. Bu dönen kol testi genellikle parçacıklar üzerindeki aerodinamik 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 Hızölçer (LDV) ve dönen disk metodu potansiyel olarak kullanılan metotlardır. Ekonomik nedenlerden dolayı çoğunlukla Şekil 3.15'de gösterilen bu metotların üçüncüsü kullanılmaktadır. Parçacıkların akışı ortak bir şaft üzerinde birlikte dönen ikili düzeneğin bir diskindeki kanaldan geçer.



Şekil 3.15 Gaz asıllı parçacık erosiv 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. İlk işaretin çıkarılması disklerin dönme hızı ve parçacıkların diskler arasındaki mesafe boyunca geçişi ile ilgilidir. Dönen disklerin parçacık akışına olan aerodinamik etkisinden dolayı sistematik hata olabilse de, bu şekilde ölçülen hızlarda rasgele hata, ±%10'dur. Bu hata ~%10 ya da daha üzeri olabilir; küçük parçacıklar da ve düşük yoğunluklarda daha büyük değerlere ulaşacaktır. Şekil 3.16'da 50 μm silikon karpit ve alüminyum parçacıkları için yapılan çift diskli ölçümlerde sistematik hata gösterilmektedir. Dönen disk metodu bu küçük parçacıkların gerçek hızlarını %10–15 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.



Şekil 3.16 LDV ve çift disk metoduyla partikül hızının ölçümünün karşılaştırılması, çift disk metodunda oluşan hata oranının ölçülmesi

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 laboratuar 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 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ üzerindeki akışlarda ve düşük termal yayılımı olan materyallerdeki düşük akışlarda önemli hale gelebilir. Laboratuar aşınma testilerinde 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-oksidant 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, laboratuar 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.

3.2. Malzemelerin Şekil Değiştirmesi

Malzemenin mekanik davranışı incelenirken sürekli bir ortam olduğu kabul edilir ve içyapı değişimleri bu şekilde incelenir. Gerçekte içyapılarla mekanik özellikler arasında çok yakın ilişki vardır ve içyapıyı değiştiren her etken özellikleri de değiştirir. Uygulamada bu ilişkilerden yararlanarak çeşitli endüstriyel işlemler geliştirilmiştir. Bu işlemler yardımı ile özellikler uygulama amacına göre ayarlanabilir.

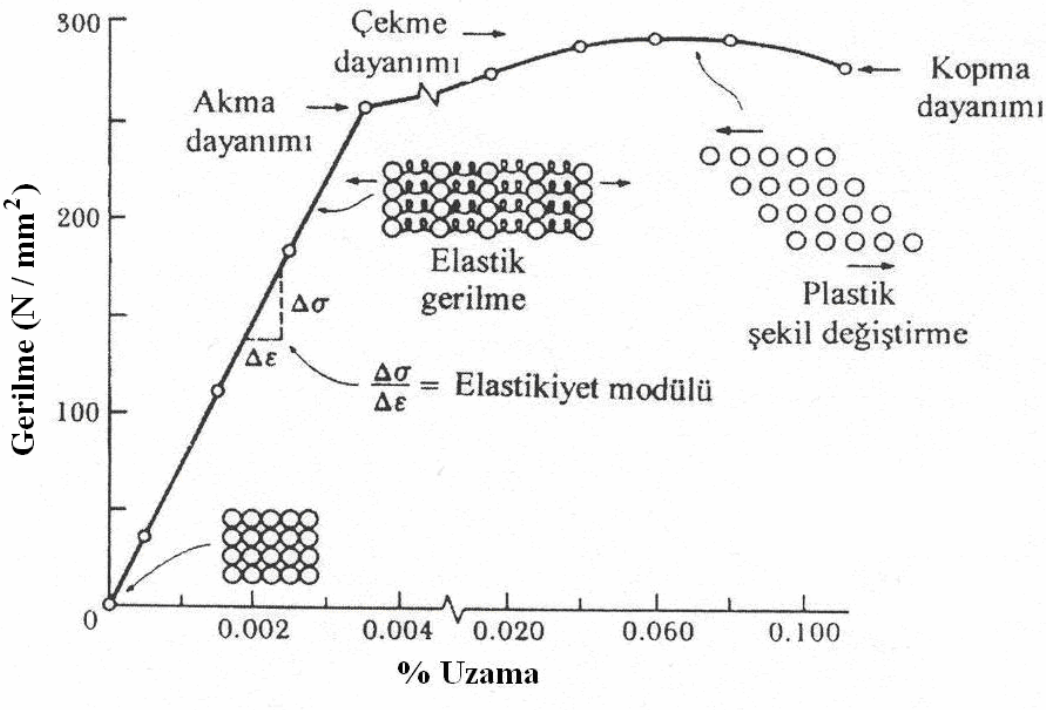
Örneğin tavlı bir çelik yumuşaktır, kolay işlenir ancak çok aşınır. Bu çeliğe yumuşak halde kolayca şekil verilir, sonra su verme ile sertleştirilirse aşınma direnci artar. Özelliklerdeki bu önemli değişmeler ancak içyapılardaki değişmeler göz önüne alınarak açıklanabilir.

Malzemeler içyapılarına göre kristal yapılı ve amorf yapılı olmak üzere iki türe ayrılırlar. Bunların şekil değiştirme mekanizmaları farklı olduğundan ayrı ayrı ele almak gerekir. Metallerin hemen tümü ile polimerlerin ve seramiklerin bir kısmı kristal yapılı, diğer malzemeler amorf yapılıdır.

Buna göre uygulamada kullanılan en önemli malzemeler çoğunlukla kristal yapılı olduklarından bunların davranışları ile ilgili yoğun araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucu kristallerin şekil değiştirmesini açıklayan oldukça sağlam ve başarılı kurallar geliştirilmiş ve ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Diğer taraftan amorf cisimler düzensiz bir atomsal yapıya sahip olduklarından kristallerde olduğu gibi geniş kapsamlı temel kurallar henüz geliştirilememiştir.

Malzemeler genellikle küçük gerilmeler altında elastik davranış gösterilir (Şekil 3.17). Atomların birer yayla bağlı olduğu varsayılarak bu davranış oldukça iyi bir şekilde açıklanabilir. Elastik şekil değiştirme kütle içinde homojen olarak yayılır, yük kalkınca atomlar ilk konumuna döner ve şekil değiştirme kaybolur. Gerilme belirli bir sınırı aşacak olursa bir kısım atom kalıcı olarak yer değiştirir, yük kalkınca ilk konumlarına dönemezler.

Bu şekilde oluşan plastik şekil değiştirme ve plastik deformasyon için kayma gerilmesinin belirli bir değere ulaşması zorunludur. Kristal yapılı cisimlerde plastik deformasyon kayma etkisinde hareket eden dislokasyonlar tarafından oluşturulur. Özellikle metallerde dislokasyonların toplu davranışları sonucu oluşan plastik şekil değiştirme oldukça karışık bir olaydır.



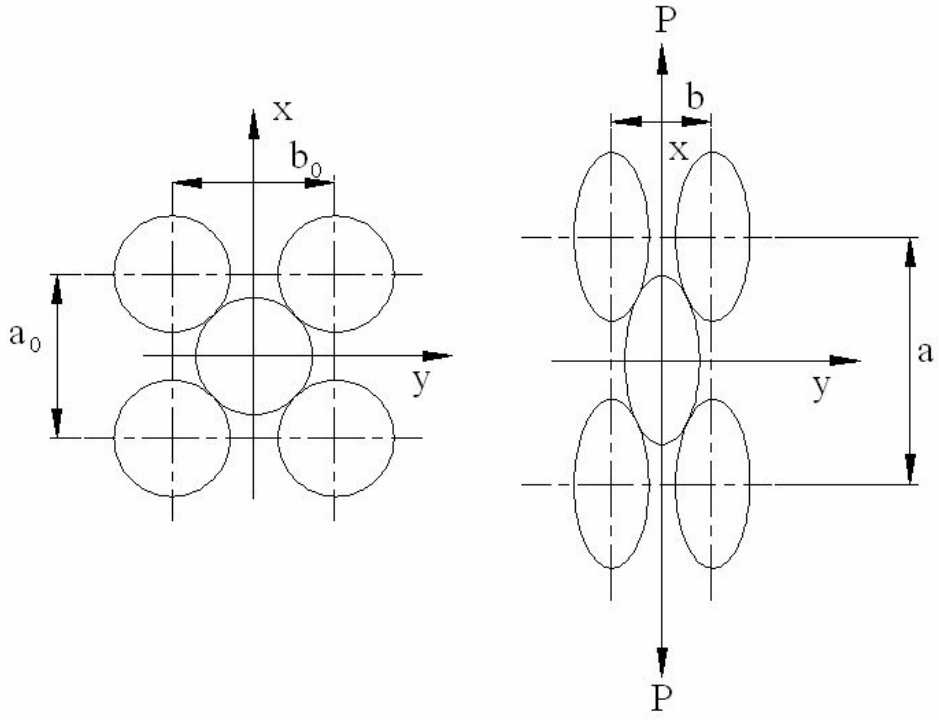
Şekil 3.17 Bir metal alaşımı için gerilme - % uzama eğrisi

Amorf yapılı cisimlerin şekil değiştirmeleri de kristal yapılarda olduğu gibi içyapıya ve içyapı türüne büyük ölçüde bağlıdır. Bu cisimler içlerinde mevcut kuvvetli bağların dağılışına göre iki gruba ayrılırlar. Birinci grupta kuvvetli bağlarla sürekli bir uzay ağı oluşturulur. Bu durumda şekil değiştirme çok kısıtlıdır, genellikle %1 in altındadır. Seramikler ve bazı polimerler buna örnek gösterilebilir. İkinci gruptaki zincir şeklinde ise iç moleküller arası bağlar zayıftır, kuvvet etkisinde birbirleri üzerinde kolayca kayarlar. %300 den fazla şekil değiştiren kauçuk buna örnek olarak gösterilebilir (Erdoğan 1998, Onaran 1993).

3.2.1. Elastik şekil değiştirme

Bir cisme çekme gerilmeleri uygulanırsa atomlar arası uzaklık gerilme doğrultusunda artar, enine doğrultuda ise azalır (Şekil 3.18). Bu tür yer değiştirmelere atomlar arası bağlar karşı koyar ve cismin elastik şekil değiştirme özelliklerini belirler. Elastik şekil değiştirme direncini temsil eden elastisite modülü atomlar arası bağ kuvveti eğrisinin denge uzaklığındaki eğimi ile orantılıdır. Bu nedenle elastik davranışı belirleyen elastik sabitler, içyapıya karşı duyarlı değildirler. Örneğin çeliklerde plastik şekil değiştirme ve su verme işlemleri ile elastisite modülü değişmez, fakat elastik sınır ve mukavemet 2–3 kat artabilir.

Çekme halindeki σ gerilmesi ile bunun sonucu oluşan ε_x şekil değiştirmesi arasındaki oran lineer elastik cisimlerde sabittir ve bu sabite E elastisite modülü denir. Aynı gerilme altında oluşan yanal şekil değiştirme ε_y eksenel şekil değiştirme ε_x ile orantılı olup orantı sabitine Poisson oranı denir.



Şekil 3.18 Çekme etkisinde eksenel ve yanal şekil değiştirme

$$\varepsilon_x = \frac{a - a_0}{a_0} > 0 \qquad \varepsilon_y = \frac{b - b_0}{b_0} < 0 \tag{3.12.}$$

Poisson oranı;

$$\nu = - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \tag{3.13.}$$

Çekme yanal şekil değiştirmesi eksi işaretlidir. Poisson oranı artı işaretli bir malzeme sabiti olduğundan denkleme (-) işareti konmuştur. Elastisite modülü;

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_x} \tag{3.14.}$$

Basit kayma halinde lineer elastik cisimlerde kayma gerilmesi τ ile kayma şekil değiştirmesi γ ile orantılıdır ve orantı sabiti G kayma modülü adını alır.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{3.15.}$$

Diğer bir dördüncü elastik sabit K hacim modülüdür. Lineer elastik bir cisme p hidrostatik basıncı uygulandığı zaman oluşan $\Delta V/V$ hacim değişim oranı uygulanan basınçla orantılıdır.

$$K = p / (\Delta V / V) \tag{3.16.}$$

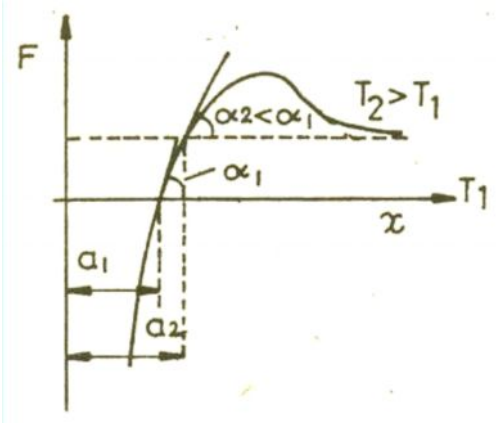
Burada orantı sabiti K ya hacimsel elastisite modülü veya kısaca hacim modülü denir. Lineer izotrop elastik cisimlerde E, G, ν ve K elastik sabitlerinden yalnız ikisi bağımsızdır, aşağıdaki bağıntılar yardımı ile diğer ikisi hesaplanabilir.

$$G = E / 2 (1 + \nu) \quad ; \quad K = E / 3 (1 - 2\nu) \tag{3.17.}$$

Yukarıdaki denklemle verilen K hacim modülü artı bir sabittir. Bunun için poisson oranının 1/2 den küçük olması gerektiği kolaylıkla görülür. ν = 1/2 olursa K sonsuz olur. Bu durumda cisme uygulanan basınç sonsuz dahi olsa hacim değişmez. Bu özelliğe sahip cisme sıkıştırılamaz cisim denir. Malzemelerin büyük bir çoğunluğunda ν = 0.2–0.3 arasındadır. Kauçukta poisson oranı 0.49 civarındadır. Böylece şekil değiştirme hesaplarında kauçuk, sıkıştırılamaz cisim varsayılır.

3.2.2. Elastisite modülüne etkiyen etkenler

Sıcaklık: Sıcaklık yükselirse atomlar arası uzaklık artar, bağ kuvvetleri eğrisinin yeni denge mesafesinde eğimi azalır, dolayısıyla elastisite modülü küçülür (Şekil 3.19).



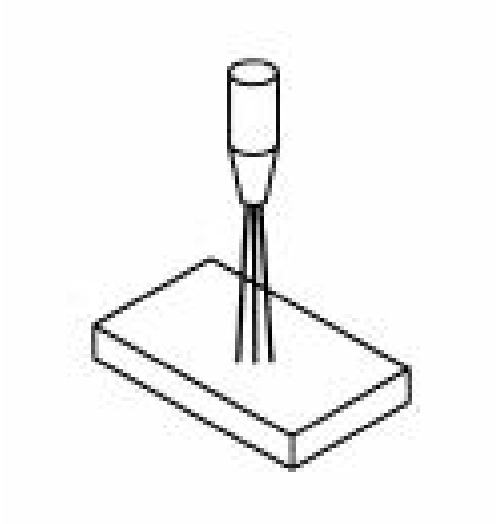
Şekil 3.19 Sıcaklıkla eğimin değişimi

Kristal doğrultuları: Kristaller homojen anizotrop cisimler olduklarından özellikleri kristal doğrultularına bağlı olarak değişir. Atomların en sık dizili olduğu doğrultularda şekil değiştirme rijitliği dolayısıyla elastisite modülü en yüksektir. Örneğin demirde atomlar [111] doğrultusunda en sık dizili konumdadır ve elastisite modülü $2.8x10^5$ N/ mm^2' dir. Atomların en seyrek olduğu [100] doğrulusunda ise $1.26x10^6$ N/mm^2 dır. Çok kristalli demir istatistiksel yönden izotrop sayıldığından ortalama elastisite modülü $2.1x10^5$ N/mm^2 olup doğrultudan bağımsızdır (Erdoğan 1998, Onaran 1993).

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Test Metodu

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



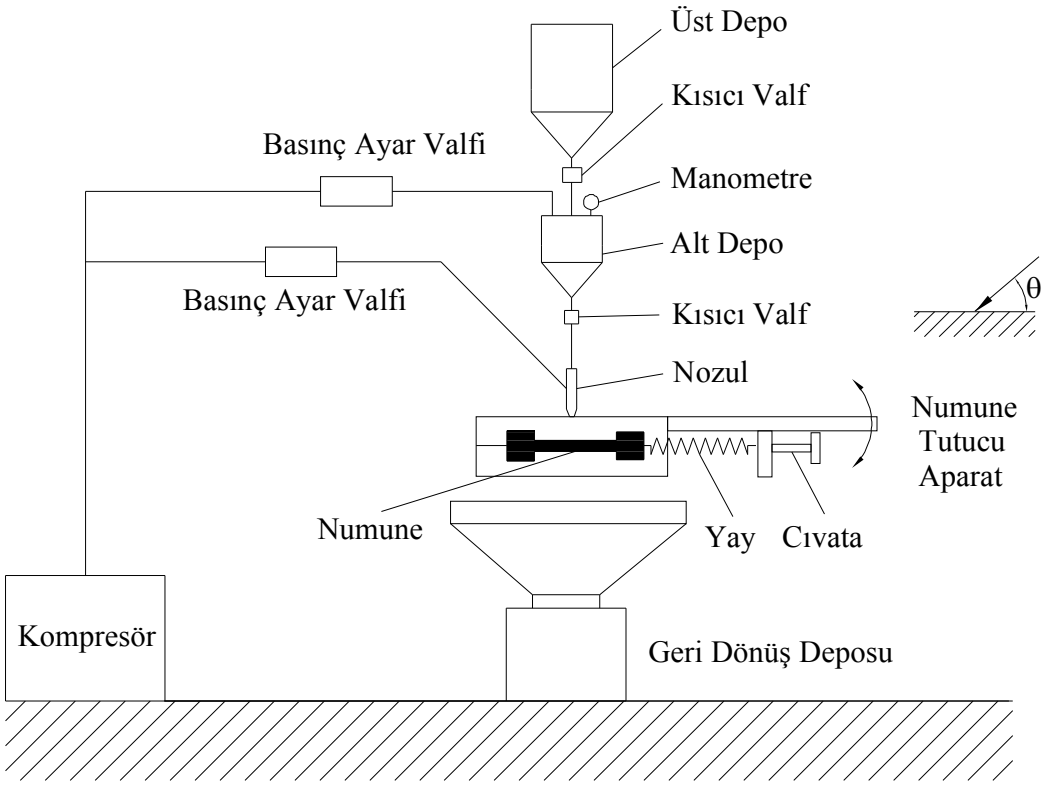
Şekil 4.1 Deney tesisatında kullanılan temas geometrisi

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.

4.2. Deney Tesisatı

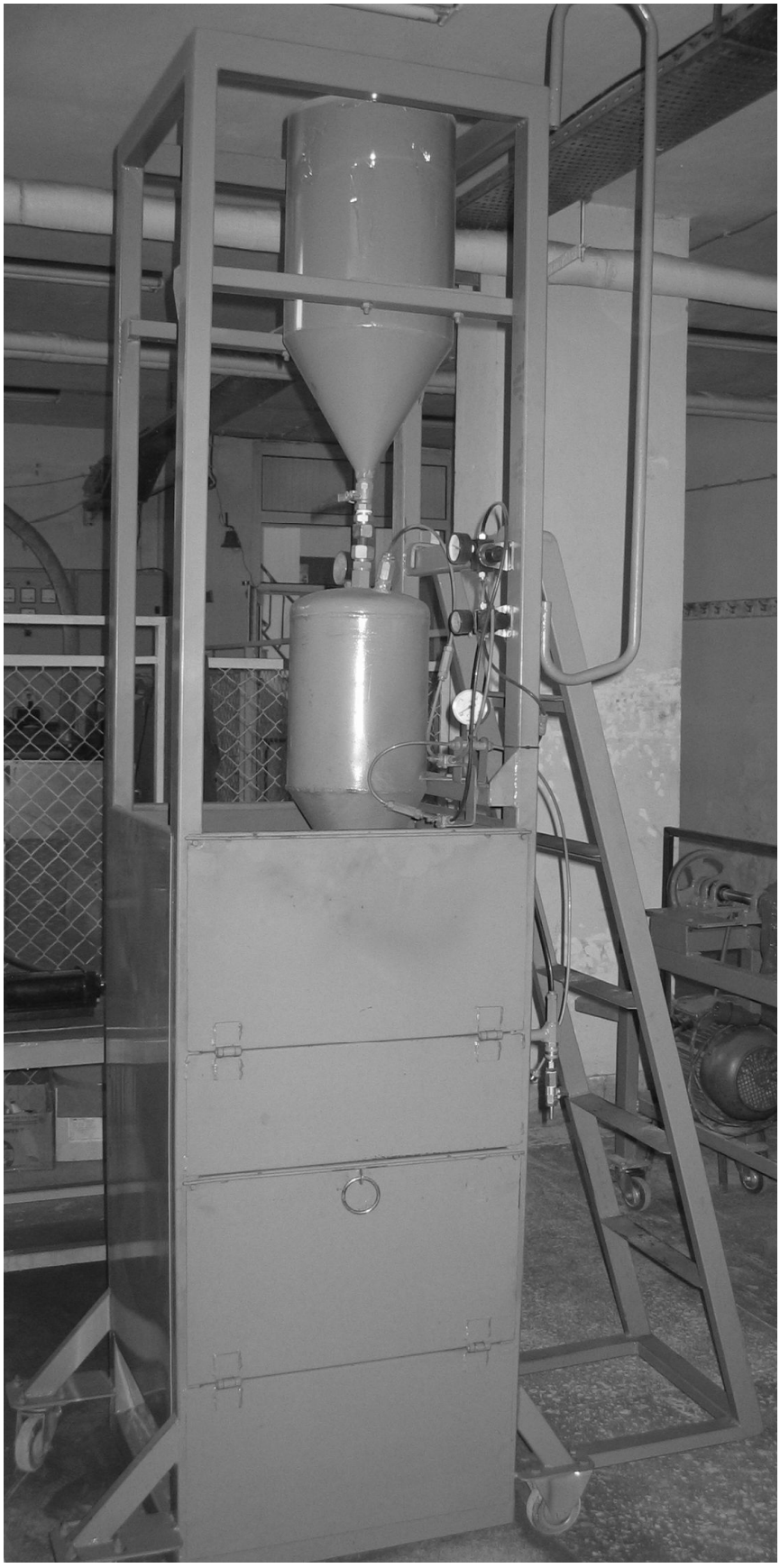
Yapılan çalışmalar Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de şematik resmi ve fotoğrafı verilen katı partikül erozyon deney tesisatında yapılmıştır.



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.



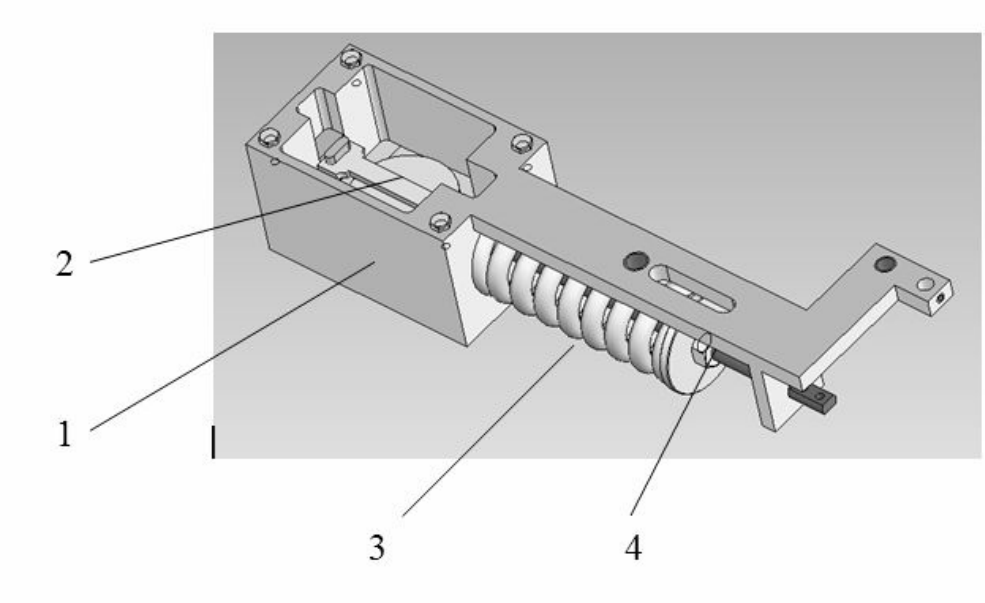
Şekil 4.3 Deney tesisatı fotoğrafı

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 önemli bir diğer aparat ise özel olarak dizayn edilmiş olan numune tutucudur. Deney numuneleri bu numune tutucu aparata yerleştirilmekte ve üzerine deney şartlarına uygun gerilim değerleri uygulanmaktadır. Aynı zamanda bu aparatın kendi ekseni etrafında döndürülmesiyle çarpma açısı ayarlanmaktadır.

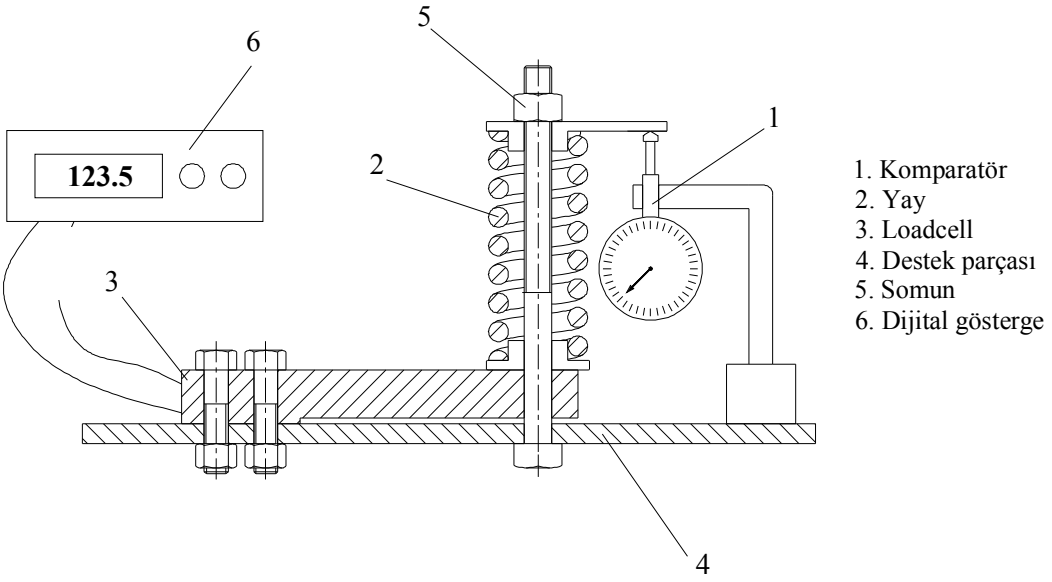
Deneyde kullanılan aşındırıcı partiküller geri dönüş deposunda depolanmaktadır. Aşındırıcı partiküllerin hızlandırması için ≈10 bar'lık kompresörden elde edilen kuru ve basınçlı hava kullanılmıştır.

Deney setinde kullanılan aparat Şekil 4.4'te görülmektedir. Aparat üzerinde bulunan 1 nolu bölme içerisine yerleştirilen 2 nolu deney numunesi üzerine 3 nolu silindirik helisel yay ve 4 nolu somun yardımıyla yük uygulanmaktadır. Uygulanan yükün değeri kalibrasyonu yapılan silindirik helisel yayın deformasyon miktarına göre ayarlanmaktadır.



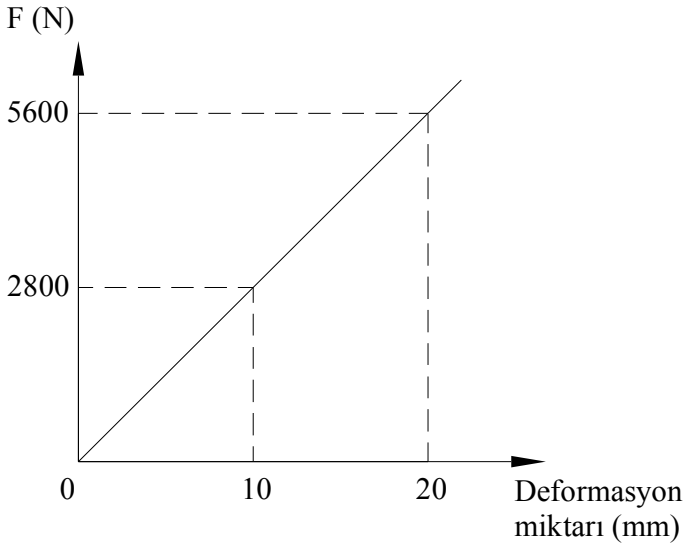
Şekil 4.4 Deney setinde kullanılan aparat

Deney setinin aparat bölümünde kullanılan silindirik helisel yayın kalibrasyonu Şekil 4.5'te gösterilen düzenekte yapılmaktadır.



Şekil 4.5 Silindirik helisel yayın kalibrasyonun şematik resmi

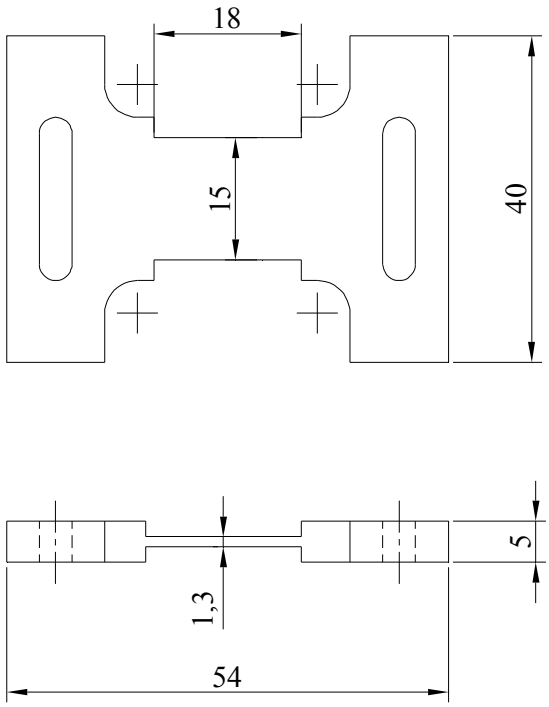
Deney setinin aparat bölümünde kullanılan yayın sabitini bulmak için yay düzeneğe yerleştirildi ve 5 nolu somun sıkılarak komparatördeki belirli mesafelere karşılık gelen yük miktarları loadcell'den okunarak kaydedildi ve Şekil 4.6' daki grafik oluşturuldu.



Şekil 4.6 Silindirik helisel yayın karakteristik eğrisi

4.3. Deney Numuneleri ve Aşındırıcı Partiküllerin Özellikleri

Deneyler 108 – 110 HB Brinell (62 HRB) sertliğine sahip AISI 1010 çeliği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan deney numunelerinin teknik resmi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Ayrıca deney numunesinin bileşiminde bulunan elementlerin kimyasal oranları da Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.7 Deney numunesinin boyutları

Tablo 4.1 Deney numunesinin kimyasal bileşimi

Element	% Miktarı	Element	% Miktarı	Element	% Miktarı
C	0.0590	Mo	0.00100	Ti	0.00100<
Si	0.0371	Ni	0.00541	V	0.00100<
Mn	0.318	Al	0.0904	W	0.00500<
P	0.00469	Co	0.00903	Sn	0.00300<
S	0.0128	Cu	0.0602<	Mg	0.00100
Cr	0.0134<	Nb	0.00200<	Fe	99.38

SAE G40 aşındırıcı partiküllerin geometrisi açısal olup sertliği 55 HRC, yoğunluğu 7,2 gr/cm^3 ve üniform martenzit içyapıya sahiptir. Aşındırıcı partiküllerin genel görünüşleri ve özellikleri de Şekil 4.8 ve Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Aşındırıcı partiküllerin genel görüntüsü

Tablo 4.2 Aşındırıcı partikül kimyasal bileşimi

Element	Karbon	Mangan	Silisyum	Kükürt	Fosfor
% Miktarı	0.85 – 1.20	0.60 – 1.20	0.40 min.	0.05 max.	0.05 max.

Tablo 4.3 Deney numunelerine uygulanan yükler

Deney numunesi için σ_{AK} = 330 N/mm^2, Numune kesit alanı = 19,5 mm^2		
Kademe	Gerilme Değeri σ (N/mm^2)	Eksenel Yük F (N)
1	$0*\sigma_{AK}$	0
2	$0.2*\sigma_{AK}$	1287
3	$0.4*\sigma_{AK}$	2574
4	$0.6*\sigma_{AK}$	3861
5	$0.8*\sigma_{AK}$	5148

4.4. Deney Prosedürü

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

1. Deney numuneleri Şekil 4.7'de verilen boyutlarda laser tezgahında kesilerek işlenmiş ve çalışma yüzeyleri taşlanmıştır.

2. Deney numuneleri aseton ile temizlendikten sonra basınçlı havayla kurutularak yüzeyinde bulunabilecek muhtemel yağ ve kirden temizlenmiştir.

3. Deney numunesinin ilk ağırlığının tespit edilmesi için deney numunesi 0,0001 gr hassasiyete sahip hassas terazide tartılarak ağırlığı kaydedilmiştir.

4. Deney numunesi numune tutucu aparatındaki yerine yerleştirilmiş ve Tablo 4.3'te verilen yükler uygulanarak istenen gerilme ile yüklenmiştir.

5. Basınç valfleri vasıtasıyla basınç değerleri ayarlanarak püskürtme hızı 30 m/s olarak ayarlanmıştır.

6. Püskürtme hızı ve püskürtme açıları ayarlandıktan sonra deney numuneleri 720 s süreyle erozyon aşınmasına maruz bırakılmıştır.

7. Deney numuneleri 15^o, 30^o, 45^o, 60^o, 75^o ve 90^o püskürtme açılarında ve akma gerilmesinin %0, %20, %40, %60 ve %80 değerlerinde yükler uygulanarak ayrı ayrı deneyler yapılmıştır.

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

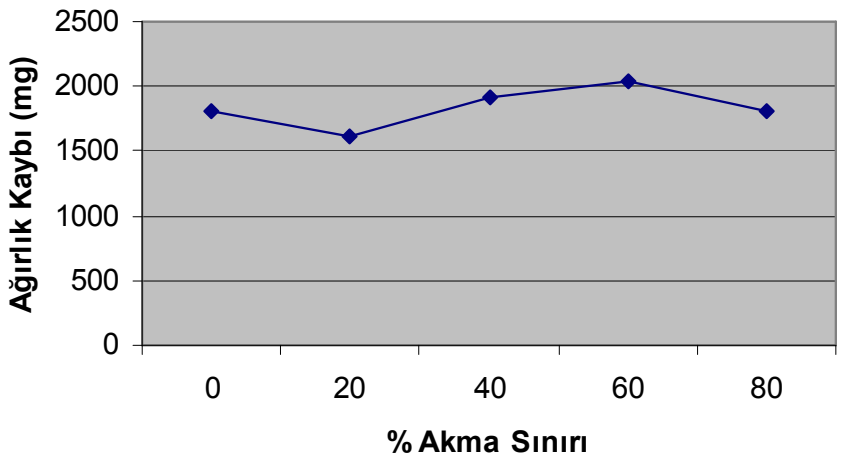
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deney numuneleri 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° olmak üzere altı farklı püskürtme açısında, numune akma gerilmesinin %0, %20, %40, %60 ve %80'ine karşılık gelen yükler ile aşınmaya tabi tutulmuşlardır.

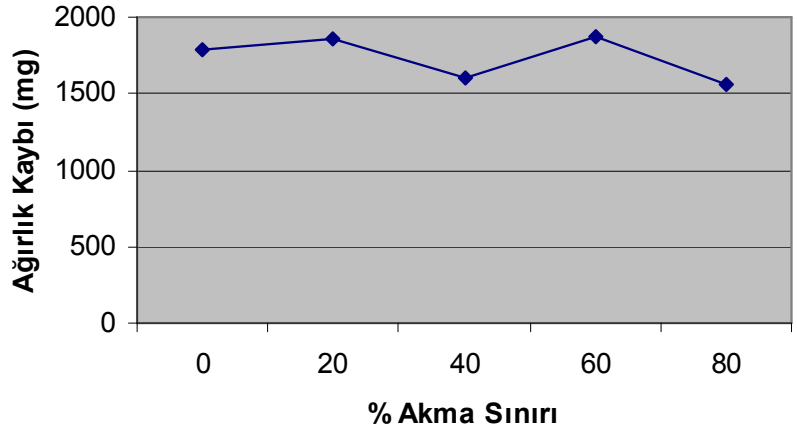
Yapılan deneysel çalışmalarda püskürtme hızı sabit tutularak püskürtme açılarının ve numune üzerine uygulanan faklı dış yüklerin aşınmaya etkisi incelenmiştir.

Yapılan deneyler esnasında elde edilen sonuçlardan her bir püskürtme açısı için elde edilen ağırlık kaybı ile % akma sınırı arasındaki değişimler şekil 5.1 ile şekil 5.6 arasında verilmiştir. Şekil 5.7 de ise bu değişimler toplu halde verilmiştir.

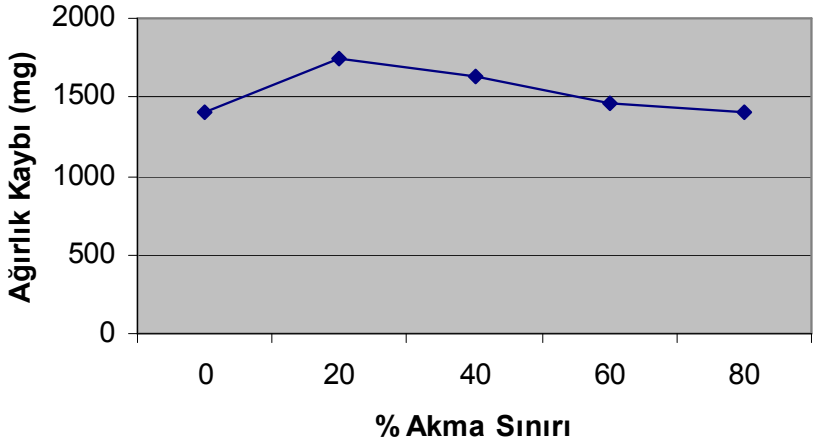
Şekil 5.8 de püskürtme açılarında elde edilen ağırlık kayıplarının ortalamalarının % akma sınırı ile değişimleri verilmiştir. Şekil 5.9 da ise gerilmesiz durum için zaman – ağırlık kaybı ilişkisi verilmiştir.



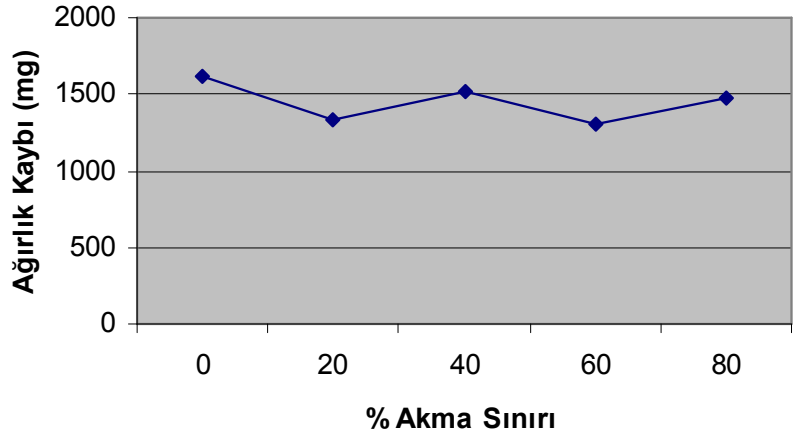
Şekil 5.1 90 derece püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi



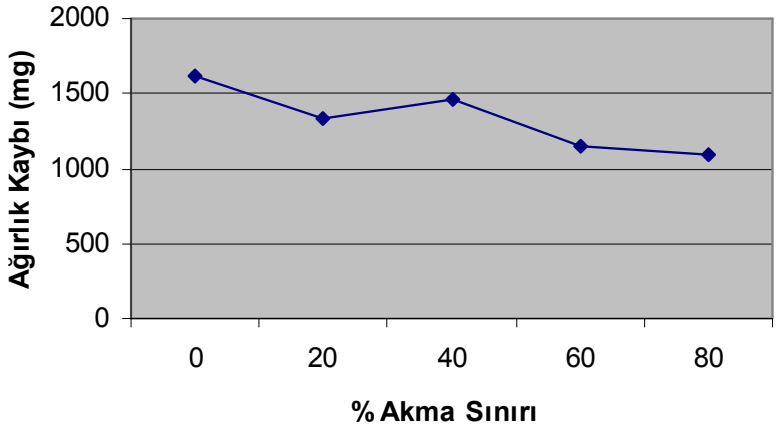
Şekil 5.2 75 derece püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi



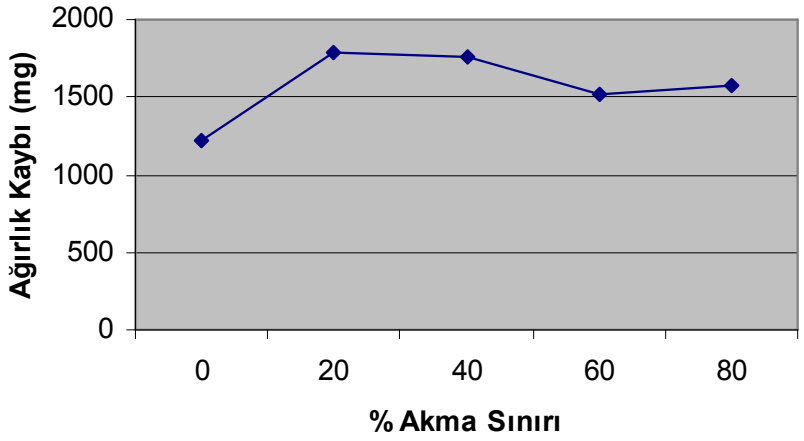
Şekil 5.3 60 derece püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi



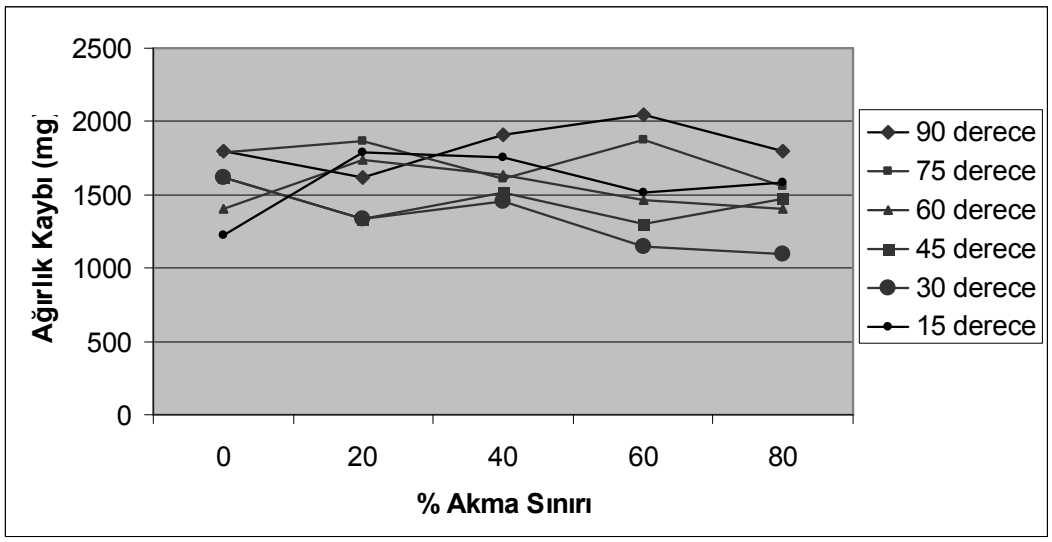
Şekil 5.4 45 derece püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi



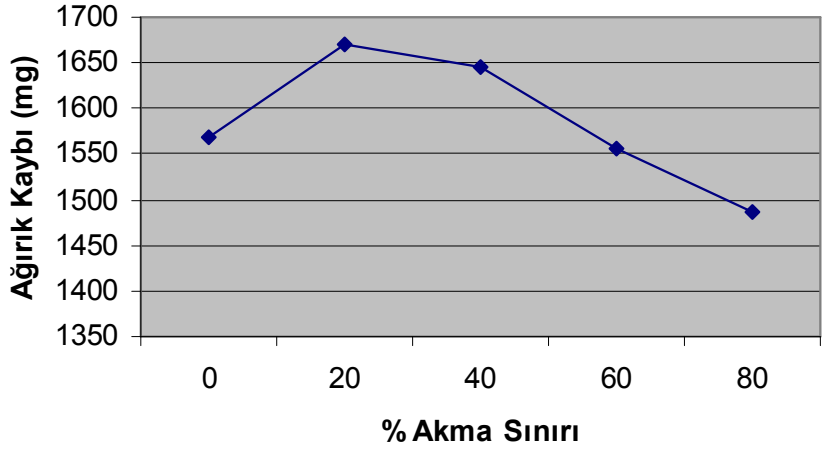
Şekil 5.5 30 derece püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi



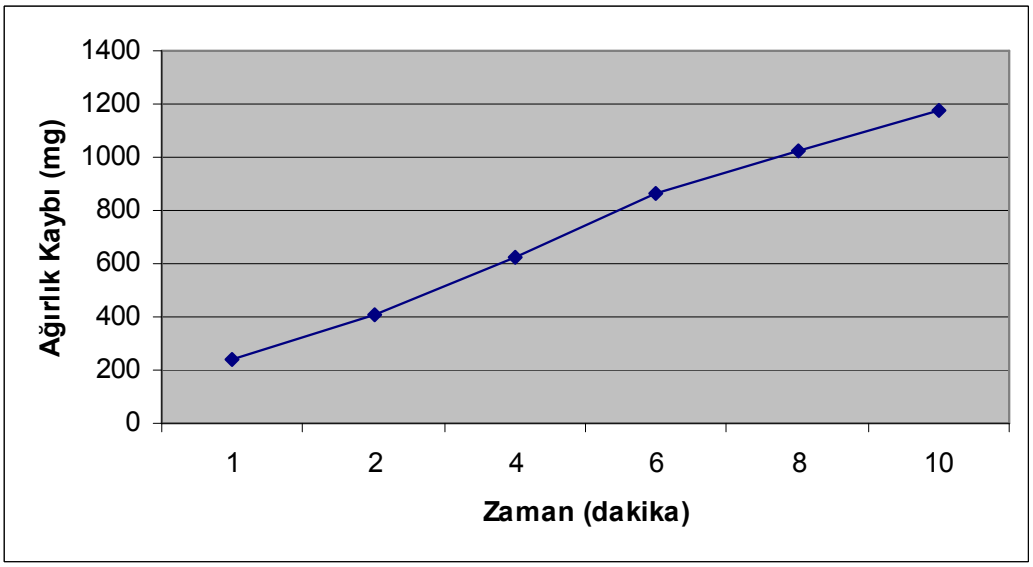
Şekil 5.6 15 derece püskürtme açısı için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkisi



Şekil 5.7 Tüm püskürtme açıları için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkileri

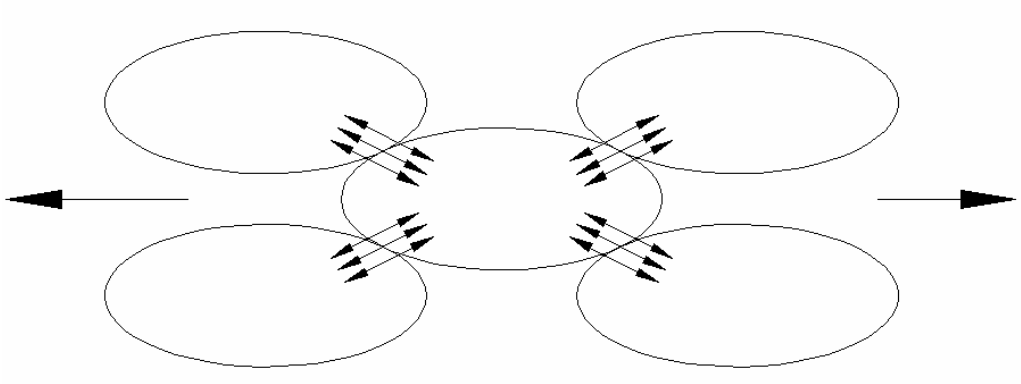


Şekil 5.8 Püskürtme açıları ağırlık kaybı ortalaması - % akma sınırı ilişkisi



Şekil 5.9 Gerilmesiz durum için zaman – ağırlık kaybı ilişkisi

Deneysel çalışmalar çekme yükü tesirinde bulunan numuneler üzerinde yapılmış ve dış yüklere maruz malzemelerin erozyon aşınması karşısındaki davranışı incelenmiştir. Numune üzerine çekme şeklinde uygulanan yükün tesiriyle malzeme yapısında bir değişim meydana gelmektedir. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi yük karşısında oluşan elastik şekil değişimi genel olarak komşu atomların aralarındaki uzaklığın değişmesi şeklindedir. Bu uzaklık gerilme doğrultusunda artar, gerilmeye dik doğrultuda ise azalır. Atomlar arası bu gerilmenin aşınma üzerinde etkili olduğu düşünülebilir.



Şekil 5.10 Malzemenin çekme yükü tesirindeki elastik şekil değişimi

Şekil 5.1 ile Şekil 5.6 arasında farklı püskürtme açıları için verilen grafiklerdeki ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkileri incelendiğinde %0 ~ %80 lik gerilmelere karşılık elde edilen aşınma değerlerinin her bir püskürtme açısı için farklılık arz ettiği görülmektedir. Şekil 5.1 de 90 derece için verilen ağırlık kaybı incelendiğinde % 20 lik akma değerinde bir azalma görülse de % 60 lık değere kadar yükselmekte ve bu noktada maksimum değerine ulaşmaktadır. Daha sonra tekrar düşmektedir. Şekil 5.2 de 75 derece için verilen ağırlık kaybı incelendiğinde bütün gerilme değerlerinde neredeyse aynı değerler olduğu görülmektedir. Şekil 5.3 de 60 derece için verilen ağırlık kaybı incelendiğinde % 20 lik akma değerine kadar bir artma daha sonra tekrar düşme görülmektedir. Şekil 5.4 ve şekil 5.5 te 45 ve 30 dereceler için verilen ağırlık kayıpları incelendiğinde % 0 lık akma değerinden % 80 lik değere gidildikçe genelde bir düşüş hakimdir. Şekil 5.6 da 15 derece için verilen ağırlık kaybı değişiminde ise % 20 lik akma değerine kadar bir artma daha sonra tekrar düşme görülmektedir.

Şekil 5.7 de deneyde kullanılan tüm püskürtme açıları için ağırlık kaybı - % akma sınırı ilişkileri bir arada verilmiştir. Bu şekildeki grafikler incelendiğinde 90 derecelik açıdan 30 derecelik açıya doğru gidildikçe aşınma miktarlarında genelde bir düşüş görülmektedir. Ancak 15 derecelik püskürtme açısı için bu eğilim değişmekte ve bu değer için elde edilen aşınma değerleri 90 ile 30 derecelik açılar için elde edilen değerlerin hemen hemen ortasında yer almaktadır.

Şekil 5.8, ortalama püskürtme açısı için ağırlık kaybı ile % akma sınırı arasındaki değişimi göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde % 20 lik akma değerine kadar bir artma daha sonra % 80 lik akma değerine kadar tekrar bir düşme göstermektedir. % 20 lik akma değerinde aşınma miktarı maksimum değerine ulaşmaktadır.

Şekil 5.9 da erozyon aşınmasının zaman içerisindeki değişimim verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde sürenin artışı ile aşınma miktarındaki değişiminde lineer bir şekilde artığı görülmüştür.

6. SONUÇLAR

Çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçları şu şekilde sıralayabiliriz.

1. Eksenel yükleme karşısında, 90 derece püskürtme açısında maksimum aşınma gözlenirken bu açı düştükçe aşınma miktarının düştüğü görülmüştür.

2. Eksenel kuvvetlerin oluşturduğu gerilme değerlerinin değişmesiyle aşınma oranlarında istikrarlı olmayan bir değişkenliğin olduğu gözlenmiştir.

3. Ortalama püskürtme açısı için aşınma miktarı % 20 lik akma değeri için maksimum değere ulaştığı görülmüştür.

4. Aşınma oranının çalışma süresi ile lineer bir şekilde arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Akkurt, Mustafa, "Makine Elemanları Cilt 1", Birsen Yayınevi, İstanbul, 1990.

2. Gürleyik, M.Y., Aralık 1986, "Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları", Mühendis ve Makine, Cilt 27, Sayı 323, Sayfa 3-14.

3. Ludema, Kenneth C., "Friction, Wear, Lubrication", A Textbook in Tribology, CRC Press, U.S.A., 1996.

4. Hutchings, I.M., "Tribology", Friction and Wear of Engineering Materials, St Edmundsbury Press, London, 1996.

5. 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.

6. Sarı, N.Y. ve Yılmaz, M., "Investigation of abrasive + erosive wear behaviour of surface hardening methods applied to AISI 1050 steel", Materials & Design, volume 27, issue 6, pages 470–478, 2006.

7. Fang, C.K. and Chuang, T.H., "Surface morphologies and erosion rates of metallic building materials after sandblasting", Wear, volume 230, issue 2, pages 156–164, 1999.

8. Sarı, N. and Sınmazçelik, T., "Erosive wear behaviour of carbon fibre / polyetherimide composites under low particle speed", Materials & Design, volume 28, issue 1, pages 351–355, 2007.

9. Das, S., Saraswathi, Y.L. and Mondal, D.P., "Erosive–corrosive wear of aluminum alloy composites: Influence of slurry composition and speed", Wear, volume 261, issue 2, pages 180–190, 2005.

10. Tian, H.H., Addie, G.R. and Pagalthivarthi, K.V., "Determination of wear coefficients for erosive wear prediction through Coriolis wear testing", Wear, volume 259, issues 1–6, pages 160–170, 2005.

11. Bose, K., Wood, R.J.K. and Wheeler, D.W., "High energy solid particle erosion mechanism of superhard CVD coatings", Wear, volume 259, issues 1–6, pages 135–144, 2005.

12. Veinthal, R., "Characterisation and modelling of erosion wear of powder composite materials and coatings", Tallinn University of Technology, 2005.

13. 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, pages 985–991, 2002.

14. Balan, K.P., Reddy, A.V., Joshi, V. and Sundararajan, G., "The influence of microstructure on the erosion behaviour", Wear, volume 145, pages 283–296, 1991.

15. Chang, L.C., Hsui, I.C., Chen, L.H. and Lui, S.T., "Influence of graphite nodules on the particles erosion of spheroidal graphite cast irons", Wear, volume 257, issue 11, pages 1125–1132, 2004.

16. Shimizu, K., Noguchi, T., Kamada, T. and Takasaki, H., "Progress of erosive wear in spheroidal graphite cast iron", Wear, volume 198, issues 1–2, pages 150–155, 1996.

17. Ruff, A.W. and Ives, L.K., "Measurement of solid particle velocity in erosive wear", Wear, volume 35, pages 195–199, 1975.

18. Rajesh, J.J., Jayashree, B., Tewari, U.S. and Venkataraman, B., "Erosive wear behavior of various polyamides", Wear, volume 249, issue 8, pages 702–714, 2001.

19. 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, pages 573–579, 1997.

20. Harsha, A.P. and Thakre, A.A., "Investigation on solid particle erosion behaviour of polyetherimide and its composites", Wear, volume 262, issue 7–8, pages 807–818, 2007.

21. Dai, W.S., Chen, L.H. and Lui, T.S., "A study on SiO_2 particle erosion of flake graphite and spheroidal graphite cast irons", Wear, volume 239, issue 1, pages 143–152, 2000.

22. 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, pages 331–343, 2003.

23. Hussainova, I., "Microstructure and erosive wear in ceramic-based composites", Wear, volume 258, issues 1–4, pages 357–365, 2005.