

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL YATAK ALAŞIMLARININ
AŞINMA DAVRANIŞLARININ KARAKTERİZASYONU

90926

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Uğur ÖZSARAÇ

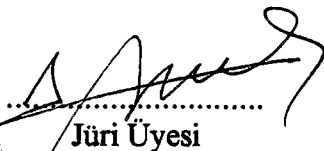
Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : MALZEME

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Bu tez 15. / 01 / 1999 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


.....
Jüri Başkanı

Prof Dr.Mehmet DURMAN
Rektör Yardımcısı


.....
Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZSARAÇ
Dekan Yardımcısı


.....
Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZEL

ÖNSÖZ

Ülke ekonomilerini olumsuz yönde etkileyen aşınma problemi tamamen önlenemese de önlem alınması zorunlu bir olgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Aşınmanın bilinmesi ve önlenmesi ya da en azından azaltılabilmesi için gerekli önlemlerin alınması hem malzeme kazancına, hem de bakım-onarım için gereken işgücünden ve zamandan tasarruf sağlanmasına neden olacaktır.

Aşınmayı önlemenin, geciktirmenin bir yolu da yapılacak iş için uygun malzemeyi seçmekten geçer.

Bu çalışmada değişik makina aksamalarında yatak malzemesi olarak kullanılan bronz alaşımlarına bir alternatif olması açısından, ZA-alaşımlarının geleneksel bronz alaşımlarıyla birlikte aşınma davranışları incelenmiştir.

Çalışmalarımın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında deneyimleriyle ve fikirleriyle beni aydınlatan saygıdeğer hocam Prof.Dr. Mehmet DURMAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında usta-çırak ilişkisi içerisinde her zaman yardımlarını gördüğüm çalışma arkadaşlarım Met.Yük.Müh. Can KURNAZ ve Teknisyen Ersan DEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneyselerimin bir kısmının yapıldığı cihazı üreten, daha sonra da yardımlarını gördüğüm Mak.Müh. Cevat ATEŞ'e (ATEŞ MAKİNA) de ayrıca teşekkür ederim.

Ocak 1999

Met.Müh. Uğur ÖZSARAÇ

İÇİNDEKİLER

SİMGELER LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. KATI CİSİMLERİN TEMASI	2
2.1. İdeal Olarak Pürüzsüz Yüzeylerin Teması	3
2.2. Pürüzlü Yüzeylerin Teması-Yüzey Etkileşimleri	4
2.2.1. Yüzey doruklarının karşılıklı etkileşimleri	4
2.2.2. Temasın gerçek ve çevre alanları	5
2.2.3. Gerçek temas alanının boyutu	7
BÖLÜM 3. SÜRTÜNME	12
3.1. Başlıca Kavram ve Tanımlar	12
3.2. Kayma Sürtünmesi	16
3.2.1. Kayma sürtünmesinin nicel kanunları	17
3.3. Yuvarlanma Sürtünmesi	21
BÖLÜM 4. AŞINMA	22
4.1. Aşınmanın Tanımı	22
4.2. Aşınmanın Ekonomik Boyutu	23
4.3. Aşınmanın Kullanımı	25
4.3.1. Aşınmanın teşhiste kullanımı	26
4.4. Aşınma Tipleri	26
4.4.1. Yapışkan aşınma	27
4.4.2. Abrasiv aşınma	27
4.4.3. Korozif aşınma	27
4.4.4. Yüzey yorulma aşınması	28

4.5. Aşınma Şekillerinin Göreceli Önemi	28
4.6. Aşınmanın Diğer Şekilleri	29
4.6.1. Kemirilme	29
4.6.2. Erozyon	30
4.6.3. Kavitasyon	30
BÖLÜM 5. AŞINMA MEKANİZMALARI	31
5.1. Adhesiv Aşınma (Yapışma ve Yenme Aşınması)	31
5.2. Abrasiv Aşınma (Yırtılma ve Çizme Aşınması)	34
5.2.1. Abrasiv aşınmanın sınıflandırılması	35
5.3. Tabaka Aşınması	36
5.4. Titreşim Aşınması	36
5.5. Ablativ Aşınma	36
5.6. Aşınma Çeşitleri	36
5.6.1. Kayma aşınması	36
5.6.2. Metal-metal aşınması	37
5.6.3. Püskürtme aşınması	38
5.7. Erozyon (Erosiv Aşınma)	38
5.7.1. Erozyonun tanımı	38
5.7.2. Erozyon çeşitleri	38
5.7.3. Erozyonu etkileyen faktörler	40
5.8. Yorulma Aşınması	40
5.9. Oksidasyon Aşınması	40
5.10. Seramiklerin Aşınması	41
BÖLÜM 6. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ	42
6.1. Kayma Aşınması için Deney Yöntemleri	42
6.2. Abrasiv Aşınma İçin Deney Yöntemleri	47
BÖLÜM 7. ÇİNKO-ALÜMİNYUM İÇEREN ALAŞIMLAR	49
7.1. Çinko-Alüminyum Denge Diyagramı	50
7.2. Çinko-Bakır Denge Diyagramı	50
7.3. ZA Alaşımlarının Mikroyapıları	51
7.3.1. ZA-8 alaşımının mikroyapısı	51
7.3.2. ZA-12 alaşımının mikroyapısı	51
7.3.3. ZA-27 alaşımının mikroyapısı	52
7.4. ZA Alaşımlarının Özellikleri	52
7.4.1. Fiziksel özellikleri	52

7.4.2. Mekanik özellikler	54
7.4.2.1. Oda sıcaklığındaki mekanik özellikler	54
7.4.3. Darbe Dayanımı, Kırılma Tokluğu ve Yorulma Dayanımı	55
7.4.4. Zn-Al Alaşımlarının Aşınma Özellikleri	58
7.5. ZA Alaşımlarının Kullanım Alanları	61
7.6. Yatak Alaşımları	62
7.7. ZA ve Bronz Alaşımlarının Göreceli Karşılaştırılması	64
BÖLÜM 8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	68
8.1. Aşınma Deney Yöntemleri	68
8.2. Spektrometrik Analiz	70
8.3. Aşınma Deneyleri	71
8.3.1. Disk-üstü-pim aşınma cihazı	71
8.3.2. İşlem değişkenleri	74
8.3.3. Aşınma deneyi prosedürü	74
8.3.4. Yatak aşınması deney cihazı	75
BÖLÜM 9. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	78
BÖLÜM 10. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	86
10.1. Öneriler	88
EK A	89
EK B	103
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ	108

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

R_a	Pürüzlülük
A_c	Çevre temas alanı
A_r	Gerçek temas alanı
P_r	Gerçek basınç
P_c	Çevre basıncı
A_a	Toplam yüzeyler arası alan
L	İki yüzeyin temas yüzey arasına etkiyen dikey kuvvet
L_r	Radyal dikey kuvvet
p	Nüfuz sertliği
σ_y	Akma mukavemeti
T	Yer değiştirme kuvveti
F	Sürtünme kuvveti
F_s	Kesme için gerekli sürtünme kuvveti
S	Malzemenin kesme gerilmesi
μ	Sürtünme katsayısı
N	Dikey yük
E_1, E_2	Young modülü
θ	Eğik düzlem açısı
μ_r	Yuvarlanma sürtünmesi
F_r	Yuvarlanma sürtünmesi kuvveti (direnci)
W	Yük
D	Silindir veya kürenin çapı

n, m	Deneysel sabitler
$\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$	Peritik reaksiyon ara fazları
α, η	Faz
dP	Diskin pim etrafında bir kez dönmesiyle alınan yol
F_P	Pime etkiyen kuvvet
dT	Transdüserin mesnete uzaklığı
F_T	Transdüserine etkiyen kuvvet

Kısaltmalar

YMK	Yüzey merkezli kübik yapı
EHL	Elastohidrodinamik yağlama

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Birbirine sürtünen iki yüzeyde görünür ve gerçek temas alanları	6
Şekil 2.2. Tek bir temas alanına tesir eden kuvvetler	8
Şekil 2.3. Bir elastik temas	9
Şekil 2.4. Kayma mesafesi ile A_r ve makaslama kuvvetinin değişmesi	10
Şekil 2.5. Sürünen malzemelerde yükün uygulanma süresi ile A_r 'nin değişmesi	11
Şekil 3.1. Bir halka ile buna yağlamasız olarak geçirilmiş bir cıvatanın birleşme yeri kesiti	15
Şekil 3.2. Kayar yüzeyin düzensizlikleri ve kolloidal grafitin perdahlayıcı etkisi	16
Şekil 3.3. Bir yatay yüzey üzerinde bir yükün şematik gösterilişi	17
Şekil 3.4. Bir cismin bir meyilli düzlem üzerinde denge diyagramı	19
Şekil 3.5. Yapışma süresinin fonksiyonu olarak tipik statik katsayı grafiği	20
Şekil 3.6. Kayma hızının fonksiyonu olarak tipik kinetik katsayı grafiği	20
Şekil 6.1. Kayma aşınması testlerinde kullanılan geometrik düzenler	43
Şekil 6.2. a) Çizgisel temas b) Noktasal temas geometrileri	44
Şekil 6.3. Genellikle iyi bir yağlama sağlamak için kullanılan dört top testi	45
Şekil 6.4. Malzemenin aşınma miktarını ölçmek için en yaygın kullanılan dört metodun şematik gösterilmesi	49
Şekil 7.1. Zn-Al ikili denge diyagramı	50
Şekil 7.2. Zn-Cu ikili denge diyagramı	51
Şekil 7.3. Kırılma tokluğunun sıcaklık ve Al miktarı ile değişimi	56
Şekil 7.4. ZA alaşımlarının eğmeli yorulma deneyi ile elde edilen S-N eğrileri	56
Şekil 7.5. Basınçlı döküm ZA-8 alaşımının sürünme dayanımına Li ve Mn elementlerinin etkisi	58
Şekil 7.6. ZA-12 ve ZA27 alaşımları ile SAE 660 bronzunun, aşınma miktarı-yatak gerilmesi arasındaki ilişki	59
Şekil 7.7. Bileşiminde %3.1 Cu(3), %2.7 Si(5) ve %4.1 Si(6) içeren Zn-%25 Al	

alaşımının döküm hali (A) ve ısıl işlem hali görmüş hali (B) ile SAE bronz ve SAE 73 pirincinin hacimsel aşınma değerlerinin kayma mesafesi ile değişimi	60
Şekil 7.8. Mekanik özelliklerin karşılaştırılması	65
Şekil 8.1. Döküm sonrası numunelerin üstten görünüşü	69
Şekil 8.2. Döküm sonrası numunelerin alttan görünüşü	69
Şekil 8.3. Bronz burçlar	69
Şekil 8.4. Yatak aşınması deneyinde kullanılan numuneler	69
Şekil 8.5. Disk-üstü-pim aşınma deney cihazı	72
Şekil 8.6. Disk-üstü-pim aşınma deney cihazı	72
Şekil 8.7. Disk-üstü-pim testinin şematik gösterimi	73
Şekil 8.8. Yatak aşınması deney cihazı	75
Şekil 8.9. Yatak aşınması deney cihazı	76
Şekil 8.10. Yatak aşınması deney cihazının imalat resmi	77
Şekil 9.1. Disk-üstü-pim aşınma deneyi sürtünme katsayısı sonuçları	81
Şekil 9.2. Yatak aşınması deneyi sürtünme katsayısı sonuçları	82
Şekil 9.3. Disk-üstü-pim aşınması ağırlık kaybı sonuçları	83
Şekil 9.4. Yatak aşınması deneyi ağırlık kaybı sonuçları	84

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi	33
Tablo 7.1. Çinko-Alüminyum esaslı alaşımların % ağırlıkça kimyasal bileşimi	49
Tablo 7.2. ZA alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması	53
Tablo 7.3. ZA alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	57
Tablo 8.1. Bronz numunelerin spektrometrik analiz sonuçları	70
Tablo 9.1. Disk-üstü-pim aşınma deneyi sonuçları	84
Tablo 9.2. Yatak aşınması deney sonuçları	84

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sürtünme, Aşınma, Yatak, Bronz, Çinko-Alüminyum Alaşımı

Bu çalışmada yatak malzemesi yapımında geleneksel olarak kullanılan fosfor bronzu (RB1) ile kurşunlu kalay bronzları (RB4 ve RB7) ile son yıllarda geliştirilmiş olan çinko-alüminyum alaşımlarının (ZA-8, ZA-12 ve ZA-27) aşınma davranışları incelenmiştir.

İncelemelerde iki değişik deney türü uygulanmıştır. Bunlardan ilki disk üstü-pim (pin-on-disc)'dir. İkinci tür deney için yatak aşınması yapılan bir deney cihazı sanayide imal edilmiştir.

Deneyler 10 N, 20 N ve 40 N'luk yükler altında ve 1 m/s ve 0.5 m/s hızlarda yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda malzemelerin aşınması, ağırlık kaybı (mg) ve hacim kaybı (mm³) olarak ölçülmüş yatak malzemelerinin sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ZA alaşımlarının, geleneksel olarak kullanılan bronz alaşımlarınkinden daha düşük sürtünme katsayılarına sahip oldukları görülmüştür. Bu durum hem disk-üstü-pim hem de yatak aşınması deneyleri için geçerlidir. Buna paralel olarak ZA-alaşımlarının ağırlık kayıplarının bronz alaşımlarıyla kıyaslandığında çok düşük düzeyde olduğu görülmüştür. Yapılan ölçümler sonucu bronz alaşımlarının, ZA-alaşımlarından iki saatlik süre içinde; 10 N'da yaklaşık olarak 4 kat, 20 N'da 9 kat, 40 N'da da 14 kat daha fazla ağırlık kaybına uğradığı tespit edilmiştir.

Bu araştırmanın sonunda aşınmanın sözkonusu olduğu mühendislik uygulamalarında, eskiden beri kullanılan bronz alaşımlarının yerine aşınma dayanımları yüksek, mekanik özellikleri daha iyi olan ZA-alaşımlarının kullanılabilceği grlmştr.



THE CHARACTERIZATION OF WEAR BEHAVIORS OF INDUSTRIAL SLIDING-BEARING ALLOYS

KEYWORDS: Friction, Wear, Sliding-Bearing, Bronze, Zinc-Aluminum Alloys

SUMMARY

In this study, the wear behaviors of conventionally used bearing phosphorus bronze (RB1) and leaded tin bronzes (RB4 and RB7) and recently developed zinc-aluminum alloys (ZA-8, ZA-12 and ZA-27) were investigated.

Two types of testing were applied during the research. First one was pin-on-disc testing. The second type of testing was a sliding-bearing testing. A machine for the later testing was designed and built particularly for this research in the university.

Tests have been performed under 10 N, 20 N and 40 N loads with 1.0 m/s and 0.5 m/s speeds. After the applied tests wear rates of materials were measured in terms of weight loss (mg) and volume loss (mm³). In addition, the coefficient of friction of all materials tested have been determined.

According to the result obtained from this study, it has been seen that the coefficients of friction of ZA-alloys are lower than that of conventionally used bronze-alloys. This is valid for both pin-on-disc testing and sliding-bearing testing. Similarly, weight loses of ZA-alloys are lower than that of bronze-alloys. As a result of the measurements, the bronze-alloys have been subjected to the weight loses approximately four times

greater than that of ZA-alloys under 10 N force and nine times greater under 20 N and also fourteen times greater under 40 N force in the period of two hours.

As result of this research, it has been understood that the zinc-based alloys showing considerably higher wear resistance and having better mechanical properties can be used instead of conventionally used bronze alloys.



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yeryüzünde temas eden cisimlerin birbirlerini etkilemeleri kaçınılmazdır. Bu temas sürtünme biçiminde olursa, sonuçta malzemelerde fiziksel boyutlu değişiklikler meydana gelir. Aşınma olarak nitelenen bu değişimler malzeme, iş zamanı ve para kayıpları olarak kendini gösterir. Bunların toplanarak büyümesi ülke ekonomilerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Makina parçalarında ortaya çıkan başlıca hasarları, insana bağlı nedenler ve teknik esaslara bağlı nedenler oluşturur. %38'lik kısmı oluşturan teknik esaslara bağlı nedenler %11 yıpranma, %21 makinanın aşırı çalışması, %6 diğer nedenler şeklinde olup %11'lik yıpranma kısmını aşınma, korozyon, ısıl ve diğer etkenler oluşturmaktadır. Dünyada yıpranmanın neden olduğu yıllık kayıp 200 milyar DM'dir.[1]

Durum böyleyken aşınma dayanımları yüksek malzemeler bulmak ve bunları endüstride kullanmak zorunluluk arz etmektedir.

Bu malzemelere bir örnek olarak basınçlı döküm yoluyla üretilen çinko-alüminyum esaslı ZA alaşımları gösterilebilir. Bunlar ulaşım endüstrisinde, süspansiyon ve aks parçaları, vites kutusu, iletim (aktarma) parçaları, yakıt enjeksiyon pompa kapakları ve aşınma yatakları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. [2]

BÖLÜM 2. KATI CİSİMLERİN TEMASI

Sürtünme alanında varolan katı cisimlerin karşılıklı etkileri ancak, karşı karşıya bulunan parçaların yüzey geometrilerinin hesaba katılmasıyla anlaşılabilir. Pürüzlü yüzeylerin temas teorisi, elastik ve plastik tipte temas için sorunların klasik çözümlerine dayanmaktadır ve burada yüzeyin “kalitesi” önemli olmaktadır. Katı cisimler, doğru geometrik şekle ve ideal fiziko-mekanik niteliklere sahip kabul edilir; oysa ki, gerçek yüzey pürüzlülükleri, makina parçalarında çok değişik olup bunların nitelikleri ideal olmaktan uzaktır. Bu nedenle de bir temasın karakteristikleri istatistik yöntemler yoluyla hesaplanmakta olup bu sonuçlar belli bir ortama yüzey sivrilikleri ve dalgalarının dağılımı kanununu hesaba katar. Bu tür bir yaklaşım, mühendislik hesapları için yeterince doğru formüller verir.

Gerçekten katı bir dünyada yaşamaktayız. Toprağın kendisi katı, yüzeyindeki taşlar ve kum katıdır. Etki ve tepki kuvvetlerini harekete geçiren iki katının birbirine değmesi hallerinde katılar bir karşılıklı yüzey halindedir denir. Bunun günlük yaşantımızdaki en belirgin örneklerinden biri de, yerde yürürken, merdiven inip çıkarken ayakkabılarımızın tabanının aşınmasıdır. Bununla beraber merdivenin mermer basamaklarının da (uzun süre içinde) aşındığını-oyulduğunu görürüz.

Bir yüzey üzerinde duran bir cisim kaldırarak teması yok etmek için, cismin kendi ağırlığından fazla bir kuvvet harcamaya gerek yoktur; böylece de karşılıklı yüzey etkisi sırasında yapışma etkisi oluşmamalıdır. Ama pratikte bu karşılıklı yüzey etkisinin çok küçük, elimizdeki ölçü aletlerinin bunları değerlendirebilme sınırının altında bulunması, yaygın yüzey üzerindeki cismin hiçbir zaman hareketsiz olmadığı, yapışma etkilerinin mevcut bulunmadığı ve bazı yüzey hasarı ve malzeme taşınımının var olmadığı anlamına gelmez. Bu karşılıklı etkinin büyüklüğü genellikle az olup ancak birkaç durumda ölçülebilir halde olur. Oysa ki, birçok halde bu karşılıklı etkinin sonuçları

(sürtünme, yapışma ve aşınma durumları) hayli önemli ve tamamen çapraşık olup bu etkinin ilerleyişini tamamen değiştirir.[3]

Karşılıklı yüzey etkisi olgusu birçok çeşitli mühendislik durumlarında önemli olmaktadır. Örneğin ısı transferi ve elektrik teması teorileri sırasıyla ısı ve elektriğin temas eden katıların arasından nasıl iletiildiği konusu ile ilgilidirler.

2.1. İdeal Olarak Pürüzsüz Yüzeylerin Teması

Temas alanında gerilme koşulları tipine bağlı olarak, iki katının teması ya elastik, ya da plastik olur.

Elastik katılarda temas şekil değişimleri teorisi iki durumu göz önüne alır: Biri, başlangıç temasın bir noktada, öbürü de bunun bir çizgi boyunca olduğu hallerdir.

Sorunlar aşağıdaki varsayımlara göre çözülür:

1. Temas eden cisimler pürüzsüz ve homojendirler;
2. Temas alanında sadece elastik şekil değişimleri olur;
3. Temas kuvvetleri birleşme yüzeyine dikeydirler;
4. Temas alanı, temas eden yüzeylere göre küçüktür. [3]

Yükün uygulandığı zamandaki temas alanında oluşan sürtünme ihmal edilmektedir. Gerçekten, mühendislik hesaplarında temas sürtünmesi genel olarak hesaba katılmaz. Hertz, temas alanının genel olarak bir elips olup aşırı durumlarda bir daireye ya da paralel çizgilerle sınırlanmış bir şeride dönüşebileceğini göstermiştir. [3]

İlk aşırı hal iki küresel cismin ya da birbirlerine dikey eksenli iki eş silindirin temasına tekabül eder. İkinci hal, temasın paralel eksenli iki silindir tarafından meydana getirilme durumudur.

2.2. Pürüzlü Yüzeylerin Teması - Yüzey Etkileşimleri

2.2.1. Yüzey doruklarının karşılıklı etkileşimleri

Üzerlerinde bir normal yükün bulunduğu iki pürüzlü yüzey temas haline geldiğinde, ilk temasa gelen yüzey dorukları, yükseklikler toplamının en büyük olduğu doruklardır. Yük arttıkça, daha az yükseklik toplamına sahip karşılıklı yeni doruk çiftleri de temasa gelirler. Temasa geldikten sonra, yüzey doruklarının şekilleri değişir. Bu şekil değişimi başta elastik olur. Yük belli bir kritik büyüklüğü aşınca, şekil değişimi plastiğe veya daha doğru olarak elastik-plastiğe dönüşür. Şöyle ki; sürekli olarak şekil değiştiren doruk altındaki malzeme, elastik olarak sapacaktır [3].

Artan yük, üzerlerinde yüzey girinti ve çıkıntılarının toplandığı yüzey dalgalarının elastik şekil değiştirmelerine götürür. Bu şekil değiştirme, çevre temas alanında bir artma meydana getirir, bunun sonucunda yükü taşıyan doruk sayısı artar. Dorukların yükseklikleri farklı olduğundan, bir ve aynı yüzey üzerindeki çeşitli dorukların şekil değişimleri her an farklı olacaktır. Temas halinde en yüksek doruk çiftleri en fazla şekil değiştirecekken, ortalamanın altında yükseklikteki doruklar, büyük yüklerde bile genellikle temasa gelmezler.

Değen yüzeylerin farklı sertliklere sahip olmaları halinde, daha sert yüzeyin dorukları, daha yumuşak olan yüzeye dalarlar. Bunun sonucunun dorukları ezilir ve şekilleri değişir. Bu durumda temasın özellikleri, daha sert cismin yüzey şekil hatalarından ve daha yumuşak cismin mekanik niteliklerinden etkileneceklerdir.

Normal yükün ilk uygulamasında ve tekrarlanan uygulamalarında temasın davranışı farklı olur. Pürüzlülüğü çok küçük olmayan ($R_a > 0.16$) metal yüzeylerinin ilk yüklenmesinde plastik şekil değişimleri basit olur. Yüzeylerin karşılıklı pozisyonlarını değiştirmeden uygulanan müteakip yüklemeler doğruca elastik temas şekil değiştirmesi meydana getirecektir. Ama yüzeylerden biri öbürüne göre yer değiştirecek olursa, o zamana kadar deformasyona uğramış doruklar temas haline

gelecekler ve temas deformasyonu (şekil değiştirmesi) de yine esas itibariyle plastik olacaktır.

Değen yuzyeler birbirlerinin uştünde kayacak olurlarsa, önce birbirlerine “alışırlar”, geometrileri değişir; bunun sonucunda, belirli sürtünme koşulların özgü bir sabit büyüklükte przlkler meydana getirirler. Temasta plastik Şekil değiştirmeler mutad olarak başat olduklarından, bu alıştırma süreci sırasında yüzey tabakalarının fiziksel ve mekanik nitelikleri de değişir.

Bu nedenle, başlardaki yüzey geometrisi ve temas halinde yüzeylerin ilk nitelikleri, sadece ilk alıştırma safhası sırasında bir temasın karakteristiklerini saptayacaklardır. Alıştırma süreci stabil (sabit, istikrarlı) hale gelince, yüzey geometrisi tekrar tekrar oluşturulur ve yüzey tabakasının özellikleri önemli Şekilde bozulmaz, yüzey düzensizlikleri doruklarının plastik teması, başat halde olur.

2.2.2. Temasın gerçek ve evre alanları

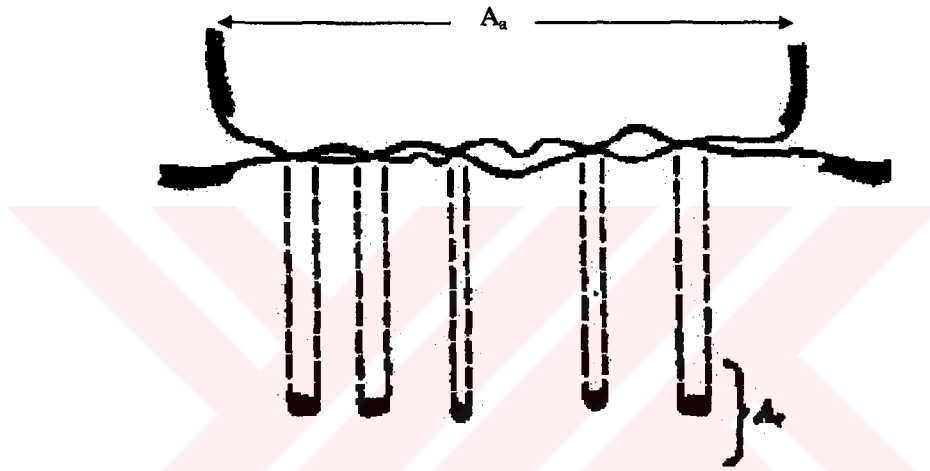
Birbirleriyle alışan makine parçalarında, srtşen yüzeylerin düzensizlikleri, yüzey dalgalılık ve Şekil hatalarından dolayı, görünüşteki temas alanının önemli bir bölümünde temas dışı kalırlar. Bu nedenle, temas alanı değen parçaların geometrik alanlarına fazlaca bağlı değildir. Sürtünme kuvvetinin, değen yüzeylerin görünürdeki temas alanından bağımsız olduğuna dair Coulomb’un vardığı sonuç, bu olguya dayanmaktadır. [3]

Dalgalılık, dalgalı Şekilde tepelerde aynı alanlarda toplanan temas noktalarından sonuçlanır; bu alanların bir toplamı, evre temas alanını (A_c) oluşturur. Bu alan, üzerinde yüzey dalgalarının temas ettikleri alan olarak tanımlanabilir. Bu alan, hiç Őpbesiz, yüzey pürüzlülüğü dolayısıyla aralıklıdır. Przllkle dalgalılık arasındaki fark haylice itibari olduğundan, evre alanının sınırları, Şu tanımlama esasına göre teşhis edilebilir. evre alanı, temas intizamsızlıklarının içinde oluştuğu, yüzey pürüzlülüğünün belirli bir bykllğn ölçmek için Standard’lar tarafından belirtilmiş örnekleme-numune uzunluğunu aşmayan temas noktaları

arasındaki mesafenin olduğu alanı ifade etmektedir.

A_r gerçek temas alanı, içinde yüzey pürüzlülüğünü oluşturan düzensizliklerin temas halinde buldukları alanı ifade etmektedir (Şekil 2.1). Gerçek temas alanı, büyüklük itibarıyla madde atom ve moleküllerinin birbirlerini etkiledikleri alana yaklaşıır.

Gerçek temas alanı genellikle küçüktür; görünür temas alanının % 0.01 ile 0.1'ini geçmez. Aynı düzensizliklerin şekil değiştirmesi ile meydana gelmiş fiili temas noktalarının çapı, 3 ile 50 μm 'dir.



Şekil 2.1. Birbirine sürtünen iki yüzeyde görünür ve gerçek temas alanları [3]

Birim gerçek temas alanı başına normal yük, P_r gerçek basıncı niteler. Bu basınç, plastik malzeme için malzeme sertliğine yakın olup elastik temasta bundan oldukça azdır. Çevre temas alanı çoğu kez görünür temas alanının % 5'i ile 15'i kadardır. Görünür temas alanının fazla büyük olmaması ve dalgalılığın da ihmal edilebilir oranda bulunması halinde, çevre temas alanı, görünür alana eşit kabul edilebilir. Birim çevre temas alanı başına normal yük P_c çevre basıncını niteler. Çevre basıncı genellikle nominal basıncın birkaç katıdır. Nominal basınç arttığında çevre basıncı nispeten değişir ve gerçek basınç pratik olarak değişmez.

Burada önemli olan, hangi atomların, öbür yüzeyde karşılık gelen atomlarla kuvvetlice etkileşimde bulduklarının ve hangilerinin de bulunmadığının bilinmesidir. Büyük atom atoma kuvvetlerin çok dar aralıklı, sadece birkaç Angstrom büyüklük

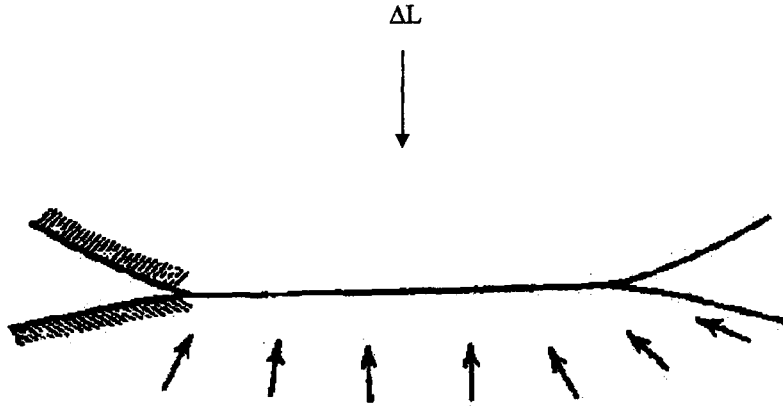
mertebesinde olduğu bilinir; bu aralık yaklaşık olarak ortalama atom boyutunda olur. Böyle olunca da sorunu basitleştirmek ve etkileşimin atom atoma temas ettiği bölgeler arasında meydana geldiğini varsaymak mümkündür. Bu bölgeler “birleşme-yapışma yerleri” olarak bilinir ve tüm birleşme yerlerinin toplamı, gördüğümüz A_r gerçek temas alanını oluşturur. Bu gerçek temas alanı ile temasın olmadığı bölgelerden meydana gelen toplam yüzeyler arası alan da A_a , görünür temas alanı olmaktadır.

2.2.3. Gerçek temas alanının boyutu

İki yüzey arasında etkileşim şeklini gerçek temas alanı saptadığından, bu sonucunu hakkında mümkün olduğu kadar çok bilgi elde etmek gereklidir. Her şeyden önce, gerçek alanın boyutunu bilmeliyiz. İlk bakışta, temasın koşulları, görünür temas alanının boyut ve biçimi, iki malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve bunları hangi yolla karşı getirildikleri hakkında geniş bilgi edinmeden, iki yüzey birbirlerine, bunların temas yüzey arasına dikey bir L kuvvetiyle bastırıldıklarında A_r 'nin büyüklüğü hakkında herhangi bir nicel saptamada bulunmanın olanaksız olduğu farkedilir. Bu parametreler elde olsa bile, sorunun somutlaşabilmesi için çok hızlı bir bilgisayara gerek bulunduğu sanılır. Ama, ideal olarak plastik şekil değiştirme farz edilerek çok basit bir sınır analizi yapıp A_r için bir minimum değer hesaplanabilir. Bu minimum değer normal olarak gerçek temas alanının değerine yaklaşmaktadır.

Bu ifadelerden yukarıda verilmiş olan parametre değerlerinin pratik anlamı ortaya çıkar.

A_r 'nin bir minimum değerinin hesaplanabilmesi için, temas haline getirilmiş yüzeylerin pürüzlü (ama aşırı ölçüde pürüzlü değil) olmaları halinde bir tipik birleşmenin Şekil 2.2'de görüldüğü gibi olacağından hareket edilir ki burada yüzeyler arası bir triaksiyal (üç eksenli) zorlama halinde olacaktır.



Şekil 2.2. Tek bir temas alanına tesir eden kuvvetler [3]

Şekil 2.2’de görülen aslında, Brinell ve Vickers sertlik deneylerinin sırasıyla sert küre ve kare piramitinin bıraktıkları izle benzetilir. Böyle bir malzeme bölgesinin plastik akma olmadan taşıyabileceği en büyük basma gerilmesi, onun p nüfuz sertliği olarak bilinir. Yukarıda bu nüfuz sertliğinin tek eksenli basmada σ_y akma mukavemetinin üç katı olduğunu görmüştük. Böylece gerçek temas alanı A_r ’nin değeri;

$$A_r \geq L / p \quad (2.1)$$

Birçok halde, belki de çoğunlukla, A_r ’nin gerçekleşen L/p ’ye eşit olduğunu gösteren birçok dayanak vardır. Önce, akla yakınlık kanıtı ileri sürülebilir. Teknik yöntemlerle hazırlanmış çoğu yüzeyde tepe ve çukurluklar vardır ve böyle bir yüzey bir başkasına bastırıldığında geometri, daha küçük ölçekte olmak üzere, bir sertlik deneyinde oluşana çok yakındır. Böylece de bu iki yüzey temas haline getirilip bir normal uygulandığı zaman plastik şekil değiştirme meydana gelecektir. Şöyle ki; başlangıçtaki üç noktanın teması muhtemelen çok sayıda ve oldukça büyük alanların teması haline gelir ve şekil değiştirme, toplam gerçek temas alanı;

$$A_r = L / p \quad (2.2)$$

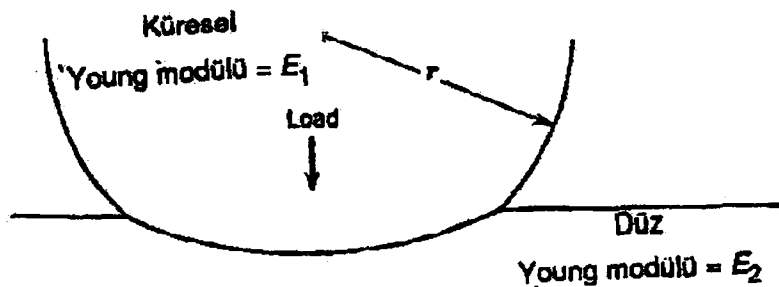
değerine varana kadar devam edecektir. Bu aşamada şekil değiştirme duracaktır.

Bu sonuncu denklemi doğrulayan ikinci kanıt, deneysel olguya dayanıp birçok şekil almaktadır. Önce, temas halindeki metallerin elektrik temas direnç ölçümleri bahsedilebilir; bu ölçümler, gerçekten, elektrik temas direnci değerlerinin genellikle bu

sonucu denklemlerle uyum halinde olduklarını göstermiştir. Bundan sonra, kayan malzemelerin sürtünme katsayısının temas yük ve geometrisinden önemli ölçüde bağımsız olduğu kanıtı vardır. Bu dahi bir plastik şekil değiştirme modeli ile uyum halinde olmakla beraber varsayılan bir başka şekil değiştirme türüne uygun düşmemektedir. Ve nihayet, bazı koşullarda gerçek temas alanının doğrudan ölçülmüş olduğu ve $A_r = L/p$ denkleminde verilmiş değerlerle aynı büyüklük mertebesinde bulunduğu söylenebilir.

Sadece bazı istisnai hallerde A_r 'nin değeri bu denklemin verdiği kadar değil, çok daha büyük olur. Şöyle ki; $A_r \geq L/p$ denklemini kullanmak zorunlu hale gelir. Bu durumlara ait başlıca üç kategori zikredilecektir. İlki, yüzey pürüzlerinin çok küçük olduğu ve dolayısıyla da çok düzgün olan yüzeyler kategorisidir. Bu koşullar altında, böyle iki yüzeyin herhangi bir şekilde birleştirilmeleri durumunda plastik şekil değiştirme olmayabilir, sadece elastik şekil değiştirme görülür ve A_r , L/p değerinden hayli büyük olacaktır. Bu hal, yatak bilyeleri gibi yüksek derecede parlatılmış yüzeylerinki (Şekil 2.3) olup bu, bir parlatılmış yüzey üzerine bastırıldığında elastik şekil değiştirme için Hertz denkleminin verdiği bir temas alanı meydana getirecektir; burada Poisson oranının her iki yüzey için 0.3 olduğu farzedilmiştir [3].

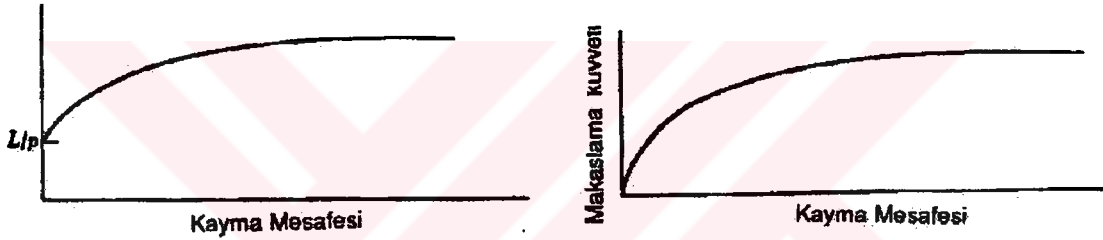
$$A_r = 2.9 \left[L_r \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{2/3} \quad (2.3)$$



Şekil 2.3. Bir elastik temas [3]

Dikkat edilmesi gereken ikinci durum, normal kuvvetlerle birlikte makaslama kuvvetlerinin de birleşme yerine etki etmeleri halidir. Her ne kadar bu bütün hallerin

en yaygın olanı olup tüm kayma durumlarında en önde görüleni ise de, henüz yeterince anlaşılmuş değildir. Makaslama kuvvetinin her iki malzemenin denge pozisyonu üzerinde derin bir etkisi olacağı açıktır. Gerçekten makaslama kuvveti ilk önce uygulandığında teğetsel kuvvetinin çok az olmasına rağmen, teğetsel hareket gerçekleşir. Bu hareketin sonucunda temas alanı artar. Bu yeni alan, birleşik, normal ve makaslama kuvvetinin ortak etkisi altında dengeyi yeniden sağlar. Şöyle ki, makaslama kuvveti sürekli artacak olursa, artan makaslama kuvveti ile gerçek alan artışı, muhtemelen, statik dengeyi tutmak için gerekli olandan az olur ve dolayısıyla kayma hareketi gerçekleşir. Bir tipik durumda, kaymanın başlamasından önce gerçek temas alanı, makaslama kuvvetlerinin ilk uygulamasından önceki değerin yaklaşık üç katı kadar olabilir.



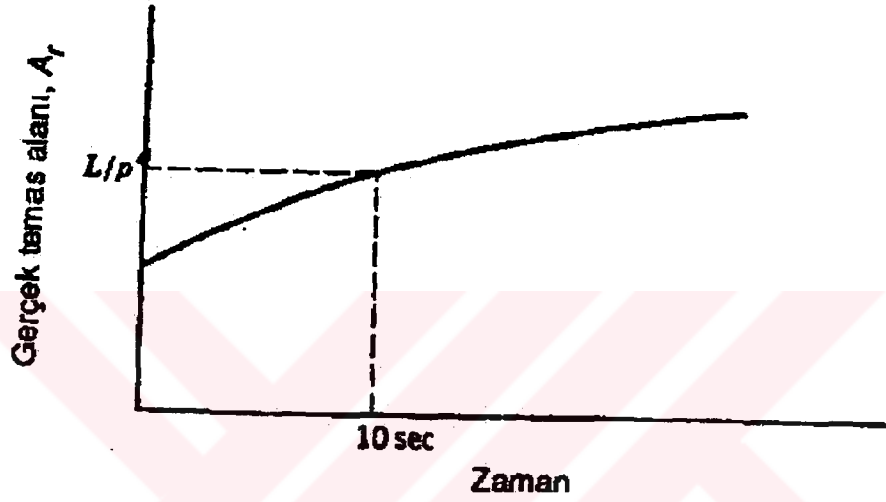
Şekil 2.4. Kayma mesafesi ile A_r ve makaslama kuvvetinin değişmesi [3]

A_r 'yi arttıran üçüncü etkiyi, yani yüzey enerjisine atfedilecek olan irdelemeden önce, A_r 'yi L/p değerinin altına düşürebilecek olan bir olguya dikkati çekmek yerinde olacaktır. Bu olgu, metallerin mukavemet özelliklerinin bir karakteristik görünümü olan boyut etkisidir. Tipik birleşmelerin boyutları, 10^{-3} ile 10^{-4} cm, boyut etkisine tabi olabilen numune boyutlarının sınırındadır.

Bu itibarla $A_r = L/p$ denkleminde, p sertliği için geniş bir çukur izin kullanıldığı normal deneyde elde edilen değeri değil, 10^{-3} ile 10^{-4} cm mertebesinde bir iz verebilecek kadar küçük bir yükte elde edileni kullanmak gerekecektir. Hafif yük deneyi altında saptanmış sertlik iki ila üç kat daha büyük ve böylece de A_r , buna karşılık gelerek daha küçük olabilir.

Malzemelerin sertliklerinin sabit olmaması nedeniyle devreye giren ve boyut etkisine

yakından benzeyen etkiler önemli ölçüde sürünen (creep) malzemelerde meydana gelenlerdir. Bu durumda A_r 'nin değeri, yükün uygulanma süresi ile artacaktır. Tipik bir sertlik deneyinde yük, yaklaşık 10 sn süre ile uygulanır. Şöyle ki, bulunan sertlik değeri "10 saniye mukavemeti" diye adlandırılabilir. Böylece de, sürünen malzemelerde A_r , yükün uygulanmasından sonra ilk 10 saniye için L/p değerinden küçük, ama daha sonra tercihen daha büyük olacaktır. Muhtemelen çok geniş temas alanları meydana gelecektir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Sürünen malzemelerde yükün uygulanma süresi ile A_r 'nin değişmesi [3]

BÖLÜM 3. SÜRTÜNME

3.1. Başlıca Kavram ve Tanımlar

Sürtünme, bir katı cismin dokunduğu bir başkasının yüzeyine göre teğetsel olarak hareket ettiğinde veya böyle bir hareketi meydana getirme girişiminde, bu harekete karşı mevcut olan bir dirençtir [3]. İnsanoğlunun toplam enerji sarfiyatının çok ciddi bir kısmını kayma sırasında oluşan sürtünme kayıplarının oluşturduğu olgusu, sürtünmenin önemini vurgulamaya yeterli olmaktadır. Bu itibarla herhangi bir türdeki sürtünmenin azaltılması, modern teknolojinin son derece önemli bir sorunu olmaktadır. Bununla birlikte günlük yaşamın birçok sürecinin, etkinlik açısından geniş ölçüde sürtünmeye dayandığı da gözardı edilmeyecektir. Bu itibarla, gerektiğinde yeterince geniş ölçüde sürtünmenin sağlanması büyük önemde bir görev olmaktadır. Yürümek veya otomobil kullanmak (ilk hareket, durma, viraj alma açısından), cisimleri elimizde tutmak gibi basit süreçle içiçeyiz ve sürtünmenin çok az olması halinde bunları gerçekleştiremeyiz. Bu sonuncu durumda, koşulların “kaygan” olduğunu söyleriz ve bu çare bulunması gereken bir sürtünme sorunu haline gelir. Bilindiği üzere çiviler, civata-somunlar ve sair sıkıştırıcı-birleştiriciler gibi normal düzeneklerin işlevinde yüksek sürtünmenin sağlanması gereklidir.

Her ne kadar sözü edilen iki kategori başlıca iki sürtünme gereksinmesini, istenmediğinde sürtünmeyi azaltma ya da gereğinde onu yeterince yüksek düzeyde tutmayı içeriyorsa da yine belli bir öneme sahip bir üçüncü sorun vardır ki o da, dar sınırlar içinde sürtünmeyi sabit tutmaktır. Buna tipik bir örnek, otomobil frenleri olup bunlar, sürtünme çok az olunca arabayı yeterince çabuk durduramazlar, fazla yüksek olduğunda da yolculara tatsız bir ileri fırlamayı yaşatırlar. Sürtünmenin denetim altında tutulmasının gerektiği diğer uygulamalar, metal haddeleme endüstrisinde veya yine

çeşitli türden presizyon tertipleri gibi hassasiyetle denetlenebilir hareketin istendiği yerlerde olur.

Birçok pratik uygulamada oldukça önemli bir dördüncü sorun da, ince sesler, sürekli gürültüler şeklinde beliren, sürtünmenin meydana getirdiği titreşimlerdir. Bunun aksinin istenmesi de, örneğin keman türü çalgılarda olduğu gibi, bunlar ancak bu titreşimler sayesinde ses verirler.

Birbirinden çok farklı şeyleri içine alan üç tür sürtünmeden bahsedilebilir:

1. kuru sürtünme, 2. akıcı sürtünme ve 3. yarı akıcı, sınır ya da karma sürtünme.

Kuru sürtünmede katı cisimlerin üst yüzeyleri, bir yağlayıcı aracının ara tabakası bulunmaksızın birbirlerine dokunurlar. Burada T yer değiştirme kuvveti N dikey yük ile orantılı olup,

$$T = \mu N \text{ dir.} \quad (3.1)$$

Dolayısıyla kuru sürtünmenin μ katsayısı, yüklemenin büyüklüğünden bağımsızdır ki bunu ilk kez Coulomb (1779) saptamıştır. Ch.Jakob'un (1911) salt temiz, ileri derecede kuru ve gazdan arınmış yüzeyler üzerinde büyük özenle yürüttüğü deneyler bu kanunu doğrulamaktadır. Bu deneylere pirinç veya çelik üstünde pirinçte, yüzey basıncının 0.009 atm'den 60 atm'e yükseltilmesinde, μ sürtünme katsayısında hata sınırının dışında bir değişme gözlenmemiştir.

Bir katı cisimle atmosfer arasındaki sınır yüzeyi, kristal şebekesindeki bağlı katı atomların serbest hareket eden gaz moleküllerine komşu şeklinde algılanmayacaktır. Bunların ikisi, bir absorbe olan hava tabakasıyla ayrılmış olup bu sonuncusu, normal atmosferden çok daha yoğun ve sadece az molekül veya atom tabakası kalınlığında, 10^{-7} ile 10^{-6} mm büyüklük (kalınlık) mertebesinde olan bir tabakadır. Bu, katı cisimler arasındaki sürtünmeyi önemli ölçüde etkiler; böylece de bir yağlama tabakası gibi davranır. Çok sayıda deney, absorbe eden tabakanın

mesafesine göre sürtünmenin nasıl arttığını gösterir.

Gerlach bunu çok anlamlı bir şekilde şöyle dile getirmektedir: “Camın düz-perdahlı olduğu, iki çubuğun birbiri üzerinde kolayca yuvarlandıkları bilinir. Camın üst yüzeyini, yumuşayana kadar bir Bunsen alevine tabi tutarak yapışık tabakadan kurtardığımız zaman çubuklar artık birbirleri üzerinde yuvarlanmaz oluyorlar, hatta belli bir değere varmamış kuvvetle genelde bunların birbirleri üzerine kımıldatamıyorum; bundan, ben de sizin gibi kuşkulanıp üst yüzeyin mat olduğunu gözlüyorum”.

Demir ve çelik yüzeylerde hava ile temasta sadece bir temiz absorpsiyon tabakası değil, yaklaşık 10 molekül kalınlığında çok ince bir oksit tabakası, yani metalin bir gazla kimyasal bağlantısı söz konusudur. Teknikte cisimler, daima yağ ya da gres ile temasa gelirler.

Kuru sürtünmeyi moleküler kuvvetler açısından belirtmeye çalışmak, teknik parçaların absorbe eden tabaka ve üst yüzeylerinin düzensizlikleri nedeniyle, anlamsızdır. En parlak yüzeyler, yükseklik farkları birkaç yüz atom boyutunda olan dağ silsileleridir; bu itibarla yaklaşık iki atom boyutunda etki alanına sahip bir moleküler kuvvet burada etkili olamaz. Ayrıca aynı konuya, değişik koşullar altında olmak üzere aşağıda yeniden değineceğiz.

Kuru sürtünmeye ilişkin en eski düşünce, yüzeylerin çok ince dişler gibi yüksekliklere sahip oldukları, bunların birbirleriyle kancalandıkları merkezindedir. Şekil 3.1, bir halka ile buna yağlamasız olarak geçirilmiş bir civatanın birleşme yeri kesitini verir.

Bu, söz konusu iddiaya iyi bir örnek oluşturur. Daha önce de ifade edilmiş olduğu gibi, cisimlerin birbirleri üzerinde kaymaları halinde düzensizlikler (dişlerin) elastik olarak şekil değiştirdiklerinde Coulomb kanunu geçerli olmaktadır [3].



Şekil 3.1. Bir halka ile buna yağlamasız olarak geçirilmiş bir civatanın birleşme yeri kesiti [3]

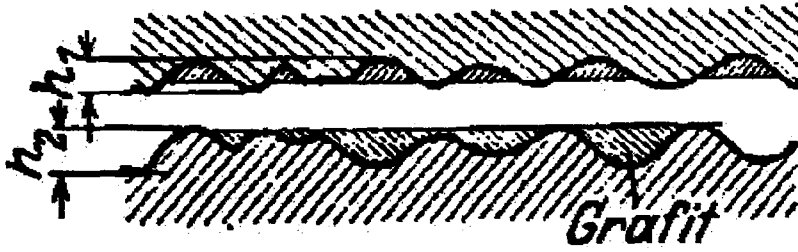
Düz yüklemenin, yumuşak malzemenin herhangi bir çıkıntısının, elastikiyet sınırını aşacak şekilde artması durumunda, geri kalan şekil değiştirme de oluşur. Şöyle ki; malzeme, yırtılıp (tırmalanıp) aşınacaktır (aşınma sürtünmesi). Düzensizlikler farklı yükseklikte ve yüzeyde homogen şekilde dağılmamış olup çıkıntıların bir bölümü elastik, geri kalanı da elastik olmayan şekil değişimine uğrayacaktır. Bu durum, basıncın tüm düzensizliklerin elastik olmayan şekil değiştirmesini meydana getirecek kadar artmasına dek sürer. Bu son durumda Coulomb kanunu, doğal olarak daha yüksek bir sürtünme katsayısıyla yine geçerli olur. Bu aradaki durumda ise sürtünme katsayısı, yüzey basıncı ve kayma hızına bağlı olur.

Bu itibarla arada herhangi bir şey bulunmadan birbirine değen yüzeylerde daima aşınma beklenecektir. Plastik cisimlerde (beyaz metal) böylece üst yüzey perdahlanmış olur; diğerlerinde, parçalarda daha yüksek bir sürtünme meydana gelir.

Aşınma sorunu etraflıca tetkik edilmiş ve edilmekte olup genellikle aşınma yoluyla ayrılan malzeme miktarı, yüzey koşulları dikkate alınmadan, saptanmaktadır. O ise ki aşınmada sürtünme oksidasyonunun rolünün yanısıra nötr azotunki çok daha anlamlıdır. Deneyler, yüksek basınç altında kuvvetli sürtünmede bir nitrülenme oluşur, bu da malzemeyi gevrekleştirip kırılğan yapar. Kuru sürtünme esasta sadece pürüzlü yüzeylerin yapışması halinde önem kazanır ki bu, uzun süre hareketsiz kalmış kayma yataklarda da oluşur. Örneğin beyaz metal yataklar üzerindeki deneylerde yapışma süresi katsayısı 0.21 ile 0.24 olarak bulunmuşken dökme zarflı Seller yataklarında bu sayı sadece 0.14 olarak saptanmıştır ki bunların her iki malzeme türüne kuvvetlice bağlı oldukları anlaşılıyor.

Yağlama sürtünmeyi azaltmaktadır. Bunun teorisi üzerinde durmayacağız. Ancak, grafitin bu yöndeki rolünü belirtmekle ilerde irdeleneceğimiz parça aşınması konusunda başlıca bir prensibi şimdiden ifade etmiş olacağız.

Gerçekten saf kolloidal grafit Şekil 3.2’de görüldüğü gibi yüzeyleri “düzgün” hale getirmektedir. [4]



Şekil 3.2. Kayar yüzeyin düzensizlikleri ve kolloidal grafitin etkisi [4]

3.2. Kayma Sürtünmesi

İki katı yüzey birbirine bastırıldığında veya biri diğeri üzerinde kaydığında bu yüzeyler arasındaki gerçek temas sadece sınırlı sayıda küçük noktalarda oluşur. Bu noktalara pürüzlülük denir.

Kayma sırasında teğetsel kuvvet artarken, birleşmeler kaymaya başlar. Tüm bağların kesilmesi için gerekli sürtünme kuvveti, bağlarda malzemenin gerilmesiyle orantılı olacaktır [5].

$$F_s = A \cdot S \quad (3.2)$$

Burada F_s : Kesme için gerekli sürtünme kuvveti,

A : Kayma yüzeyinin boyutundan bağımsız gerçek temas alanı,

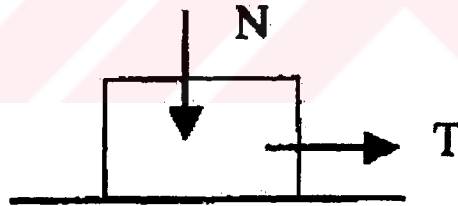
S : Malzemenin kesme gerilmesidir.

Pratikte kayma sürtünmesi, bazı ilave etkileri de içerebilir. Bu etkiler, daha sert malzemenin przllgnn yumuak malzemede meydana getirdiği çizikler ve yüzey dzgnszlklerinin birbiri içine girmesi gibi etkilerdir.

3.2.1. Kayma sürtünmesinin nicel kanunları

Sürtünme, nicel terimlerle, bir kuvvet olarak ifade edilir: temas eden iki cisimden birinin, öbürünün teğetsel yer değitirmesine engel olmak için ortaya koyduğu kuvvet. Burada, iki durum arasında bir ayrım yapmak zorluğu vardır; yle ki, birinde uygulanan kuvvet, hareketi balatmakta yetersizdir, öbüründe de kaymanın olduğu kuvvet vardır [3].

Birinci duruma özgü olarak, yatay bir düz yüzey üzerine oturmu bir N ağrlğını dikkate alabiliriz (ekil 3.3). Küçük bir T kuvveti uygulandığında, kaymanın olmadığı görülür. Bu durumda (Newton'un birinci kanunu gereğince), yüzey arasında sürtünme kuvvetinin tam olarak T 'ye eit ve buna ters yönde olması gerektiği açıktır.



ekil 3.3. Bir yatay yüzey üzerinde bir yükün ematik gsterilii [3]

Teğetsel kuvvet azaldığında, diyelim ki $T/2$ olduğunda, deneysel olarak sürtünme kuvvetinin $T/2$ 'ye gerilediği bulunur. Bu, sürtünme kuvvetinin ilk nitel kanununu ifade eder. "Teğetsel kuvvetlerin bilekesinin, bu özel duruma özgü bazı kuvvet parametrelerinden küçük olması durumunda, sürtünme kuvveti, uygulanan kuvvetlerin bilekesine eit ve ters yönde olacak olup hiçbir teğetsel hareket olumayacaktır". Bu kanuna istisna, sadece bir mikroskobik ölçüde görülür. Aratırmalar, önce bir T teğetsel kuvvetin uygulanmasında, T 'nin yönünde ağrlğın çok küçük bir yer değitirmesinin (rneğin 10^{-5} veya 10^{-4} cm

mesafesinde), az çok ani olarak oluştuğunu göstermiştir.

Bu durumda ağırlık, yüzey üzerinde, sonradan kaybolacak kadar küçülen uygun bir hızda (Örneğin 10^{-6} cm/sn) sürtünme eğilimini gösterir. Bu gibi olgular karşısında T teğetsel kuvvetle F sürtünme kuvveti arasında çok hafif eşitsizliklerin bulunacağı anlaşılır.

Dikkat edilecek ikinci durum, uygulanan T kuvvetinin kaymaya zorladığı durumdur; bunda T uygulandığında, ağırlık hareket eder.

Cismin T yönünde hareket ettiği deneysel olarak saptanmış olup, burada sürtünme kuvvetinin, T'den küçük olsa da hala T ile aynı çizgide olduğu tespit edilir. Bu sürtünme kuvvetinin ikinci nitel özelliği olarak kabul edilebilir. Teğetsel hareket meydana geldiğinde sürtünme kuvveti daima yüzeylerin göreceli hızlarının yönüne karşıt yönde etki yapar.

Geri kalan sürtünme kanunları, sürtünme kuvvetinin büyüklüğüne aittir. Makroskopik ölçüde gözlenebilen başlıca değişkenlerin yani uygulanan yük, temas bölgesinin boyutu ve kayma hızının fonksiyonu olarak sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü ifade etmek için üç nicel ilişki gereklidir. Bu üç nicel ilişki aşağıdadır: F sürtünme kuvveti, N dikey yük ile orantılıdır;

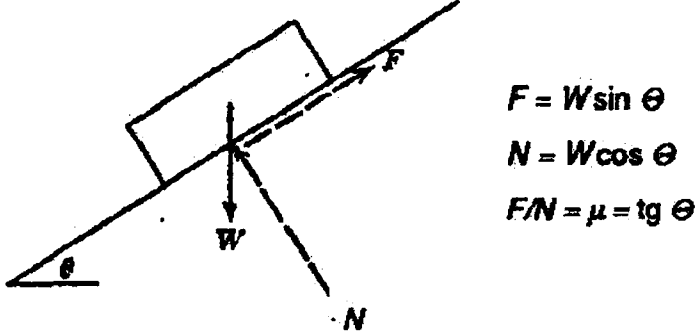
$$F = \mu N \quad (3.3)$$

Bu ilişki bir μ sürtünme katsayısını tanımlama olanağını sağlar. Alternatif olarak bu kanunu bir sabit açıyla ifade etmek çoğu kez uygun olmaktadır; bu θ açısı, ya da sürtünme açısı;

$$\text{tg } \theta = \mu \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır. [3]

Bu, üzerine konmuş herhangi bir ağırlıkta bir cismin sabit kalacağı bir eğimli düzlemin açısı olup, bu açı herhangi bir miktarda arttırılacak olursa, cisim aşağıya kayacaktır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Bir cismin bir meyilli düzlem üzerinde denge diyagramı. Aşağı kayma başlamak üzere

İkinci ilişki: Sürtünme kuvveti A_s görünür temas alanından bağımsızdır. Böylece de iri ve küçük cisimler aynı sürtünme katsayısına sahiptirler.

Üçüncü ilişki: Sürtünme kuvveti v kayma hızından bağımsızdır. Bu kanun, kaymayı başlatmak için gerekli kuvvetin, kaymayı herhangi bir hızda tutmak için gerekli olan kuvvetle aynı olacağını gösterir.

Birlikte ele alındıklarında bu üç kanun, sürtünmenin genellikle mühendislerce içinde ele alındıkları nicel çerçeveyi sağlamaktadır. Bu itibarla bu kanunların pratikte ne denli uygunluk arz ettiklerini araştırmak uygun olmaktadır.

Sürtünme kuvvetinin yükle orantılı olmadığı bir başka durum da, bir yumuşak alt tabaka üzerine ince bir sert tabakalı yüzeyde meydana gelir. Alçak yüklerde ince sert tabaka kırılmadan kalır ve onun sürtünme özellikleri baskın olur. Yüksek yüklerde yüzey tabakası arada kırılır ve alt tabakanın nitelikleri önemli hale gelir.

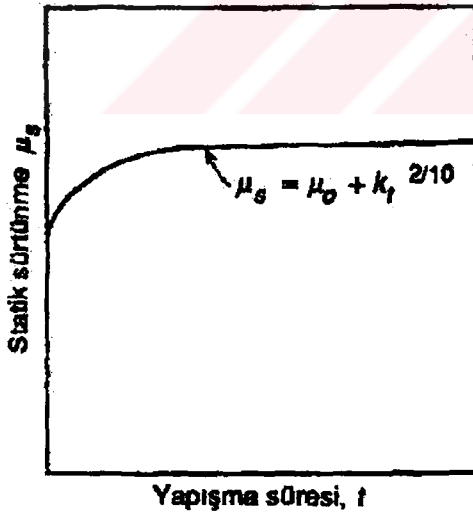
Sürtünmenin görünür temas alanından bağımsız olduğunu ifade eden ikinci nicel kanundan sapmalara bazen çok düzgün ve çok temiz yüzeylerde rastlanır. Bu koşullarda yüzeyler arasında çok kuvvetli karşılıklar yer alır. Şöyle ki, sürtünme kuvveti yükten bağımsız ama doğruca görünür temas alanıyla orantılı olur (bu arada

görünür temas alanı gerçek temas alanı olmuştur).

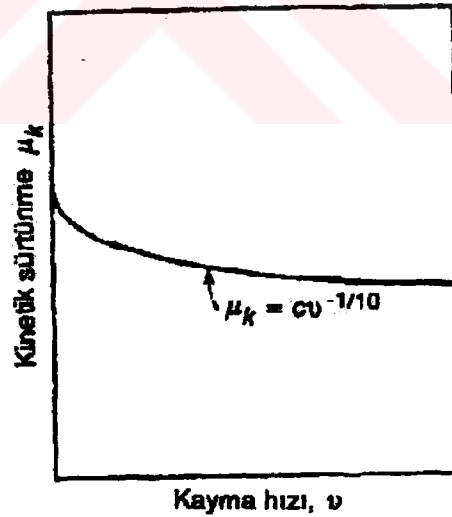
Birinci ve ikinci nicel kanunlara iyi uyulduğu ve istisnaların nadir olduğu vurgulanacaktır. Buna karşılık, sürtünme kuvvetinin hızdan bağımsız olduğunu ifade eden üçüncü kanunun durumu çok farklıdır.

Kaymayı başlatmak için gerekli sürtünme kuvvetinin, kaymayı devam ettirmek için gerekli olandan genellikle daha büyük olduğu iyice bilinir; bu özellik iki sürtünme katsayısı (hareketsiz yüzeyler için) statik, (hareket halindeki yüzeyler için) kinetik katsayı kavramına yol açmıştır. Bunlar sürtünme katsayıları cetvellerinde ayrı ayrı gösterilirler.

Bununla birlikte yeni çalışmalar bunun fazlaca bir basite indirgeme olduğunu, statik sürtünme katsayısının temas süresinin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir; burada kinetik sürtünme katsayısı, hızlar aralığı içinde hızın bir fonksiyonudur. Tipik statik sürtünme-süre ve kinetik sürtünme-hız grafikleri şematik olarak aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Yapışma süresinin fonksiyonu olarak tipik statik katsayı grafiği [3]



Şekil 3.6. Kayma hızının fonksiyonu olarak tipik kinetik katsayı grafiği [3]

Kinetik sürtünme katsayısı genellikle yavaş kayma hızlarında pozitif eğimli, yüksek kayma hızlarında ise negatif eğime sahiptir.

Sürtünme olarak bilinen kuvvet, bir kütlenin diğer bir kütle üzerindeki hareketine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Sürtünme kuvveti, cisimlerin hareketini zorlaştırarak enerji kaybına, aynı zamanda aşınmaya sebep olur [5].

Sürtünme kuvvetinin değeri, sürtünme katsayısının değeri ile izah edilir. Sürtünme kanunlarını şu şekilde özetleyebiliriz:

- i. Sürtünme kuvveti, normal yük ile orantılıdır.
- ii. Sürtünme kuvveti temas bölgesinin görünüşüne bağlı değildir.
- iii. Sürtünme kuvveti kayma hızına bağlı değildir. [5]

3.3. Yuvarlanma Sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yüklü bir kürenin veya silindirin, düz bir kütle yüzeyi üzerinde yuvarlanması sırasında oluşur. Yük altındaki bir silindirin yuvarlanmasında sürtünme direnci, silindirin merkezine uygulanır. Bu sürtünme, aşağıda gösterilen bağıntıya uygun olarak yük ile doğru orantılı (W) ve yuvarlanma elemanın çapı ile ters orantılıdır.

$$F_r = k \cdot W^n / D^m \quad (3.5)$$

Burada k : Malzeme ve yüzey şartlarına bağlı sabit,

F_r : Yuvarlanma sırasındaki sürtünme direnci,

W : Yük,

D : Silindir veya kürenin çapı,

n, m : Deneysel sabitlerdir.

Yuvarlanma sürtünmesi katsayısı μ_r kayma sürtünmesinde olduğu gibi aynı yöntemlerle bulunur.

$$\mu_r = F_r / W \quad (3.6)$$

Genel olarak yuvarlanma sürtünmesi katsayısı kayma sürtünmesi ile karşılaştırılırsa çok düşüktür. Statik ve kinetik sürtünme katsayıları ile yaklaşık olarak aynıdır.

BÖLÜM 4. AŞINMA

4.1. Aşınmanın Tanımı

Aşınma denilince akla ilk gelen şey, katı cisimlerin yüzeylerinden çeşitli etkenlerle sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkmasıdır. DIN 50320 ve ASTM G4093 standartlarına göre aşınma, “kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır. Aşınma; genel olarak mekanik ve/veya kimyasal işlemlerle yüzeyden malzemenin kaldırılması olarak tanımlanır [25]. Katı cisim yüzeyleri oksit filmleriyle ve yağlayıcılarla korunsalar bile, oksit filmlerinin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının absorpsiyonunun zayıf olduğu yerlerde yer yer katı-katı teması oluşur. Bu temaslar ise, aşınmaya neden olur.

Metallerde aşınma sonucunda aşağıdaki olaylar meydana gelmektedir:

1. Metalin yüzeyine nüfuz veya yüzeye kaynama:

Metal parçacığının yüzeyden kopmasında ilk safha, aşındırıcı metalin yüzeye batması veya atomsal mesafedeki çok sıkı temas neticesinde yüzeyde kısmen kaynamaların oluşmasıdır. Yüzeyin sertliği yüksek ise, gerek bakma yolu ile nüfuz ve gerekse geniş bölgeler üzerinde temas için lüzumlu olan kısmi plastik şekil değiştirmeye, sertliğin yüksekliği oranında engel olunur. Sertlik ile aşınmaya dayanıklılık arasında çok mükemmel ve karşılıklı bir ilişki vardır.

2. Metalin şekil değiştirmesi:

Aşınmanın oluşabilmesi için küçük metal parçalarının şekil değiştirmesi ve kopup ayrılması lazımdır. Tok metaller bu konuda böyle bir eğilim göstermediklerinden aşınma mukavemetleri iyidir. Pratikte genellikle sertliğin yüksek olması tokluğun yüksek olmasına tercih edilir.

3. Metal yüzeyinin korozyonu:

Aşındırıcı cisim, yüzeyde oluşabilecek oksit veya sülfid gibi bir korozyon ürününü kolaylıkla aşındırıp atabilir. Bu sebepten korozyona dayanıklı metallerin aşınma dayanımları genellikle iyidir.

4. Metal yüzeyinin ısınması:

Her ne kadar aşınma sırasında metal yüzeyinin kısmi olarak ergimesi ender olarak görülsede daha az şiddetli olan sürtünme ısılarında korozyon reaksiyonlarının hızlanmasından ve metalik özelliklerin kötüleşmesinden dolayı aşınma dayanımı düşer. Bu sebeple, ergime noktası yüksek olan metallerin aşınma dirençleri yüksektir.

4.2. Aşınmanın Ekonomik Boyutu

Teorik yönlerini incelemiş olduğumuz sürtünmeden oluşan aşınma, tüm endüstri kollarında önemli bir tehlike olarak karşımızda durup, zamanında ve sistematik önlem alınmadığı takdirde çok pahalıya mal olabilecek sonuçlara götürebilir. Konunun boyutları hakkında bir fikir vermiş olmak için sadece Almanya'da aşınmanın 2 milyarı metalurji, 1.5 milyarı madencilik, 500 milyonu plastik imalat sanayileri ve 1 milyarı da diğer sanayi kolları olmak üzere 5 milyar DM'lik bir maliyet yüklediğini söyleyebiliriz [3].

Bütün bu önemine rağmen özellikle ülkemizde konuya hala yeterli dikkat sarf edilmemektedir. Bu itibarla aşınmanın ekonomik rolünü gözden geçirmekle başlayacağız.

Herhangi bir nesnenin faydasız hale gelmesinin üç yolu vardır: Kullanılmaz hale gelmesi (modasının geçmesi), kırılma ve aşınma. Elbette farklı nesne sınıflarında bu nedenlerin etkileri de farklı olur. Örneğin, bir bayan şapkasının modasının geçmesi bir hastane derecesinin kırılması ve nihayet bir gramofon iğnesinin ucunun aşınması, bunların terkedilmelerine neden olur. Aslında bu terkedilmeye götüren olguların çoğu kez birlikte etki yaptıklarını görürüz. Böylece bir otomobil, eskimiş model (stilini kaybetmiş) veya bir kazada hasar görmüş olmasıyla ya da artık iyi çalışmaması sebebiyle satışa çıkarılır. İşte bu üçüncü sebep, aşınma sonucu faydalılığını kaybetmeyi teşkil eder [3].

Aşınma; mekanik etki sonucu katı yüzeylerden malzeme kalkması, eksilmesidir.

Aşınma sürecinin bir nitel görünümü, kalkan-eksilen malzeme miktarının çok küçük olması şeklindedir. Böylece de bir otomobilde modasının geçmişliği ve hasar kolaylıkla görülebilse de aşınma, rastgele bir tetkikle tamamen görünmez halde olabilir. Gerçekten bir iki tonluk arabada tamamen hurdaya çıktığında, kayma temasından olan yüzeylerden sadece birkaç gram eksilmiştir. Her ne kadar kayan sistemlerde aşınma genellikle çok yavaş bir süreç ise de bu, çok kararlı ve sürekli dir.

Bu söylediklerimiz, nesnelere terkedilmelerine sebep olan etkenlerden aşınmanın önemini vurgulamaktadır. Çapraşık parçalarda gerçekten aşınma, en önemli mekanizma olmaktadır.

Konunun günümüze kadar ihmal edilmiş olmasının üç sebebi vardır. Bunlardan ilki, önceki zamanlarda aşınma bugüne göre, makine ve diğer mekanizmaların faydalı ömürlerinin saptanmasında çok daha az önemli bir etken olmuş olmasıydı. Nitekim 1760'ların bir buhar silindirini günümüz otomobilinin silindirleriyle kıyasladığımızda, her ne kadar iki makinenin beygir gücü aynı büyüklükte ise de, tasarımının tamamen farklı olduğu görülür. 1760'ın silindiri hayli ılımlı buhar basıncı ile çalışıyordu ve her zaman en azından 6-7 mm işleme hatasıyla çalışıyordu. Oysa ki bildiğimiz gibi günümüz otomobilinde bu koşullar tamamen değişiktir. Bunda, izin verilebilir olan aşınma, çok dar sınırlar içinde belirlenmektedir.

İkinci olarak, aşınma oranlarının çoğunlukla çok az olması ve yakın zamanlara kadar bunları uygun şekilde ölçecek olanağın bulunmaması söylenebilir.

Bütün yapılabilen, deneylerden önce ve sonra, parçaların tartılabilmesinden ibaretti. Ancak sıradan mühendislik metalllerinin radyo-izotoplarının ortaya çıkmalarıyla (1940'larda), araştırmacıların eline yeni bir olanak verilmiştir [3].

Üçüncü olarak, birçok mühendis ve bilim adamının bu konudaki tutumu belirtilebilir; aşınma o denli bir çapraşık ve hataya götürebilecek bir olgudur ki, bunun üzerine eğilmek zaman kaybindan başka bir şey olmayıp yeni bir tasarımda yapılacak en iyi şey, bundan önceki denemelerden faydalanıp bir ömür deneyine girişmek ve gerisini tarihe bırakmaktır.

4.3. Aşınmanın Kullanımı

Bu arada aşınmanın bazı faydalı yönleri de bizi şaşırtmayacaktır.

Yüzeylerin meydana getirilmesi: Bir mamul eşyada bir yüzey meydana getirmenin birçok yöntemi, aşınma olgusunu kullanır. Önce, abrasiv süreçler ailesi vardır ki bunlarda ege, abrasiv kağıtlar (zımpara) sayılabilir.

Bir yüzeyin bitmiş şeklini değiştirmenin bir faydalı yöntemi de kum püskürtmedir.

Yazı: Bilgi kaydının birçok yolu, etkinlik için aşınma sürecine dayanır. Nitekim bir kalemin ya da bir tebeşirin kullanımı, yapışkan aşınmanın varolmasına bağlıdır.

Bir lastik (veya plastik) silgi, yazı kalıntılarını yine bir yapışkan aşınma mekanizmasıyla kaldırır. Önce, kalemin karbon zerrecikleri bir yapışkan aşınma mekanizmasıyla silginin yüzeyine aktarılır ve sonra silginin yüzeyi bir yapışkan aşınma mekanizmasıyla kağıda geçer ve arkasında temiz bir yüzey bırakır.

Keskin kenar-ağızların korunması: Kesme işlemlerinde kesici aletin bir keskin ağza sahip olması gerekir. Kesme sırasında ağız körlenecek olursa kesme artık

gerçekleşmez; süreç durdurulacak, ağız yeniden şekillendirilecektir (bilecektir). Ayrıca bazı durumlarda aşınma, sürekli olarak ağız bileyecek şekilde davranır.

Elektrikli traş makinası ve et kıyma makinasında, alt yüzey boyunca yapışkan aşınma, kesme ağını keskin tutacak şekilde iş görür.

Bir ikinci yöntem, çok zarif şekilde kemirici hayvanlarda örneğin tavşanlarda görülür. Bu hayvanların kesici ön dişleri, dış kavisli yüzey boyunca bir sert mineyle kaplıken iç tarafta sadece bir yumuşak dentin vardır. Böylece daha yumuşak tarafta daha hızlı oluşan abrasiv ve yapışkan aşınma, dişlerin keskinliğini devam ettirecek şekilde iş görür. Birkaç insan yapısı kesici alet kendini bileyen bu prensibi kullanmış olup bunlara örnek olarak tungsten karbür ile kaplı bıçaklar ve bir yeri sertleştirilmiş saban demirleri verilebilir [3].

4.3.1. Aşınmanın teşhiste kullanımı

Birçok sistemde aşınma olgusunu sistemin çalışması sırasında meydana gelen olayların gelişmesini tetkik etmekte kullanmak mümkündür. Aşınma sürecinin bu yolla kullanılmasının yararı, gözlemlerin sistem çalışmazken ve hatta kırılmış sistemlerde artık çalışamaz durumlarda yürütülebilmesindedir. Böylece sistemin bileşenlerinin aşınma izlerinin ve özellikle yanlış yerde aşınmanın saptanması kırılma analizinin önemli bir bölümü olmaktadır.

Günlük yaşantımızdaki örnekler arasında ayakkabı taban ve topuklarının incelenmesinin doğru yürünüp yürünmediğini, otomobil lastiklerindeki aşınma şeklinin incelenmesinin de tekerlerin düz olup olmadıklarının saptanması verilebilir.

4.4. Aşınma Tipleri

Modern araştırmalar çoğu kez aşınma şekilleri olarak sınıflandırılan birkaç ara sürecin yanı sıra dört ana aşınma şeklini tespit etmiştir. Her aşınma süreci kendi öz kanununa uymakla birlikte, diğer süreçleri de etkiler. Bu nedenle araştırmacı bir çapraşık durumu

açmak ve aşınmanın başlıca nedenini bulmak zorundadır.

Bir başka yaklaşım, kayan numunelerin yüzeylerini tetkik etmek olup, bu aşınma gerçekleşmeden varılmasının gerektiği esas aşamanın saptanmasını mümkün kılar. Nitekim, bir temiz düzgün bakır yüzeyin aynı şekilde temiz düzgün çelik yüzey üzerinde kayması halinde, her bir yüzeyden öbürüne tanecik geçmesi ve her bir yüzeyin diğeri tarafından çizilmesi söz konusu olur. Aşınma türünün yüzeylerin tetkiki suretiyle bunu abrasiv tipte bir aşınma olduğu kanısına varılır. Çiziklerin oluşması burada bir ipucu olmaktadır.

4.4.1. Yapışkan aşınma

Bu aşınma şekli, iki düzgün cismin birbiri üzerinde kayması ve bir yüzeyden parçacıkların kopup diğesine yapışması halinde gerçekleşir. Daha sonra bu parçacıklar, üzerlerinde oluştukları yüzeylerden çıkıp ilk yüzeye geri gelebilirler, ya da gevşek aşınma tanecikleri teşkil edebilirler.

Yapışkan aşınma, atomların çok yakın temasa geldiği her yerde meydana gelir. Kayma sırasında, yüzeylerden birinde bir küçük bölüm öbür yüzeydeki benzer bir bölümle temasa gelir ve küçük ama sınırlı bir olasılıkla temas kırıldığında, kırılma ilk yüzey arasında değil malzemelerin birinde gerçekleşir.

4.4.2. Abrasiv aşınma

Bu, pürüzlü ve sert bir yüzeyin ya da sert tanecikler içeren yumuşak bir yüzeyin daha yumuşak bir başka yüzey üzerinde kayıp bunda bir dizi oluk açması şeklinde gerçekleşen aşınmadır. Oluklardan çıkan malzeme, aşınma tanecikleri şeklinde olup genellikle gevşek olurlar.

4.4.3. Koroziyon aşınma

Bu aşınma şekli kaymanın bir koroziyon ortamda gerçekleşmesi halinde meydana gelir.

Kayma olmadığı zaman, korozyon ürünleri yüzeyler üzerinde bir film oluştururlar; bu film korozyonu yavaşlatır ve hatta durdurur, ama kayma korozyon atağı devam ettiğinden bu filmi dışlar.

4.4.4. Yüzey yorulma aşınması

Bu aşınma şekli, bir iz üzerinde tekrarlanma veya yuvarlanma sırasında gözlenir. Malzemelerin maruz kaldıkları tekrarlanan yüklenme ve boşalma, yüzey veya yüzey altı çatlakları oluşturabilir, bunun sonucunda yüzeyde iri parçalar oluşumu ile kırılma oluşabilir ve bu parçalar yüzeyde büyük çukurlar bırakırlar. Benzer bir aşınma şekli de iri parçalar halinde kırılan gevşek malzemelerde görülür.

4.5. Aşınma Şekillerinin Göreceli Önemi

En az dört aşınma şeklinin varlığı karşısında, kayma teması halinde bulunan malzemelerin herşeye rağmen bir faydalı ömre sahip bulunmaları önemli bir husustur. Bununla birlikte bir tanesi dışında bütün aşınma şekillerin yok edilebileceği o bir tanenin de büyük ölçüde azaltılabileceği bilinmelidir.

Abrasiv aşınma sadece bir sert, pürüzlü yüzeyin mevcut olması ya da sert abrasiv tanelerin kayan iki daha yumuşak yüzeylerde bulunması halinde gerçekleşir. Sistemimizde sert yüzeylerin çok düzgün olmaları sağlandığında ve sistemin içinde abrasiv tanelerin bulunması önleildiğinde abrasiv aşınma yok edilebilir. Aynı şekilde kayan malzemelerin içinde çalıştıkları atmosfer ya da yağlayıcılarla kimyasal reaksiyona girmemeleri durumunda koroziyon aşınma önlenmiş olur.

Yüzey yorulma aşınması sadece kayan yüzeyde aynı malzeme hacminin birçok kez gerilip gerilmenin kalkması halinde meydana gelir ve dolayısıyla öbür aşınma şekillerinin olduğu sistemlerde görülmez. Bu durumda bu sonuçlar, malzeme yorulmaya vakit bulamadan yüzeylerin üzerinden malzeme kaldırır.

Bu yorulma aşınmasına çimento fabrikalarında döner fırın çemberlerinin üzerinde

döndükleri merdane çiftlerinde rastlanmıştır; ağır baskı sonucu merdanelerin temas yüzeylerinden pul pul kalkmalar olduğu görülmüştür [3].

Gözlemler sonucunda yapışkan aşınmanın en az önlenebilir aşınma türü olduğu ortaya çıkmıştır. Bilindiği kadarıyla birbiriyle temas halinde iki katı cismin kaydığı bütün mekanik sistemlerde bu aşınma türü evrensel olmaktadır, yok edilemez sadece azaltılabilir.

Her ne kadar yapışkan aşınma aşınmanın en evrensel şekliyse de bunun en tehlikeli olmasını engellemez. Şöyle ki, yapışkan aşınma derecesi genellikle çok düşüktür. Öbür aşınma şekillerinin örneğin, abrasiv aşınmanın beklenmedik anda ortaya çıkması çoğu kez beklenmedik yüksek aşınma alanları ve mekanizmanın erken kırılmasını doğurur.

4.6. Aşınmanın Diğer Şekilleri

Biz burada kemirilme (fretting), kavitasyon ve erozyon aşınmalarına değineceğiz.

4.6.1. Kemirilme

Bu tam bir aşınma şekli değil de öbür aşınma mekanizmalarının sınırlı kayma koşulları altında gerçekleşen bir durumu gibi görülmektedir. Bu aşınma şekli temas eden yüzeylerin küçük sınırlı teğetsel yer değiştirmeye uğramaları halinde ortaya çıkar. Bunun tipik bir örneği kadran şaftı olup, bunda ucundaki diş şaftın her dönüşünde küçük bir teğetsel ileri geri hareketine uğrar. Bu hareketin sonucu olarak yapışkan çelik tanecikler meydana gelir (yapışkan aşınma) ve bunlar Fe_2O_3 şeklinde oksitlenir. Bu ise, abrasiv olup yüzeylerde abrasiv aşınmayı meydana getirir. Özetle bu yapışkan, korozif ve abrasiv aşınma şekillerinin aynı zamanda mevcut oldukları durum olmaktadır.

Kemirilme çoğu kez, şaşırtıcı bir aşınma tipi gösterir; çünkü onu oluşturan hareket o denli küçüktür ki, meydana getirdiği aşınma döküntüsünün topluca geniş hacmini önceden kestirmek zordur.

Kemirilmenin üstesinden gelmek için genel bir önerinde bulunmak kolay değildir. Başlıca değişkenlerin herhangi birinin değiştirilmesi iyi ya da kötü sonuç verebilir; dolayısıyla tahmini olanaksızdır. Nitekim, dikey yük arttırıldığında bu yüzey arasında kaymayı önliyorsa iyidir, ama yüzeyler arası kayma aynı kalırsa kötüdür ve tüm aşınma derecesi orantılı olarak artar.

4.6.2. Erozyon

Bir nesneye çarpan keskin parçacıkların meydana getirdikleri hasar abrazyonun meydana getirdiği ile aynıdır. Erozyonda başlıca fark, bu ikincisinde meydana gelen yüzey pürüzlülüğü göreceli olarak daha büyük olabilir. Zira çarpan bir parçacık yüzey üzerinde bir alçak noktadan kolaylıkla malzeme kaldırabilir.

4.6.3. Kavitasyon

Bir sıvı bölümünün çekme gerilmesi altında olması halinde sıvı kaynayabilir. Daha sonra aniden dibe çöküp bir mekanik darbe meydana gelebilir. Bunun yakınında olan katı yüzey bir parçacığın kaldırılmasına götüren bu darbeden hasar görebilir. Bu süreç kavitasyon olmaktadır.

Kavitasyon, yüzey yorulma aşınmasına çok yakın olup buna dayanıklı malzemeler sert ama gevrek olmayan malzemelerdir. Bununla birlikte kavitasyona dayanıklılık için sıvı tarafından korozyon atağına da mukavemet gerekli olmaktadır.

BÖLÜM 5. AŞINMA MEKANİZMALARI

Endüstride kullanılan parçaların maruz kalması olası aşınma ve yıpranmalara karşı aşınma mekanizmalarının ne olacağını bilmesi [37], malzeme seçimi, mühendislik dizaynı, hasar analizi ve aşınma ömrünün tahmin edilebilmesi açılarından önemli ve gereklidir [38].

5.1. Adhesiv Aşınma (Yapışma ve Yenme Aşınması)

Adhesiv aşınma, özellikle birbirleri ile kayma sürtünmesi yapan metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen kaynaklaşma olayının bir sonucudur. Birbiri üzerinde kayan teknik yüzeylerin pek küçük bir kısmı temas halindedir. Bu küçük temas halindeki yüzeylerde gerilmeler pek küçük yüklemelerde dahi akma gerilmesi sınırına erişirler veya geçerler. Böylece moleküller yapışma kuvvetleri etkisini gösterir. Bu nedenle bir parçadan diğerine malzeme geçişi, soğuk kaynaklaşma ve küçük parçacıkların kesilmesi olayı meydana gelir.

Temas halinde bulunan bu cisimlerde bu tip aşınmadan kaçınmak mümkün değildir. Bu olayda yüzeylerin karşılıklı fiziksel ve kimyasal etkileri önemli rol oynar.

Adhezyon teorisi metal transferini izah etmekle beraber aşınma partiküllerinin oluşumu için yeterli değildir. Bu hususta plastik pürüzlenme teorisi açık bir fikir verebilir.

Adhezyon teorisine göre temas halindeki yüzeylerde temas noktalarındaki bölgesel basınçların çok yüksek olması dolayısıyla küçük kaynak bağlar oluşur. Normal olarak yüzüyle absorbe edilmiş olan gaz veya sıvı molülleri ile oksit tabakaları bu basınç altında parçalanır, malzemenin molekülleri doğrudan doğruya temasa gelir ve bölgesel

kaynak bağlar meydana gelir. Bu kaynak bağların oluşturduğu malzeme kaybı, adhezyon aşınmasını teşkil eder.

Adhezyon aşınmasıyla ilgili yapılan çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar kısaca şu başlıklar altında toplanabilmektedir: [3]

Adhezyon aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.

Olay, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir.

Adhezyon aşınması sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmektedir.

Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür.

Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemede olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir.

Adhezyon aşınmasını önlemek için gereken tedbirler şu şekilde sıralanabilir:

- i. Eş çalışacak malzeme çiftleri uygun seçilmelidir, mesela çelik ile eş çalışan yatak malzemeleri.
- ii. İyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katkıları kullanılmalıdır.

Tablo 5.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi [3]

MALZEME ÖZELLİKLERİ	ADHESİV AŞINMA
Oksitli yüzey	Az
Kübik kristal yapı	Çok
Hegzagonal kristal yapı	Az
Yüksek deformasyon sertleşmesi	Çok
Yüksek sertlik	Çok
Yüksek elastik modül	Çok
Yüksek ergime noktası	Çok
Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı	Çok
Küçük atom yarıçapı	Çok

Kuru veya sınır sürtünme halindeki fonksiyonun yüzeylerinin birbirleriyle değme halinde olan pürüz tepelerinde, özellikle akma sınırı aşıldığında kuvvetli bir adhesiv veya sıcaklık etkisiyle de teşvik edilen kohezif bir bağ meydana gelmektedir. Bu bağ, metelsel değme yüzeylerine kadar temiz ise orada kuvvetli olmaktadır. Pürüz tepecikleri arasında bu tür bağlar oluşmuş olan iki yüzeyi birbirine nazaran kaydırduğumuz zaman, bağlanmış tepeciklerin birbirlerinden ayrılmaları dört şekilde olabilir:

1. Bağ ara yüzeyinin kesme direnci, her iki yüzeye ait malzemelerin iç kesme direncinden daha küçüktür. Bu tür adhesiv aşınmada, aşınma miktarı en azdır.
2. Ara yüzeyin kesme direnci, I nolu malzemedan küçük II nolu malzemedan büyüktür. Bu takdirde ayrılma II nolu malzeme içinde olur. Ayrılan malzeme I nolu yüzeye bağlanır. Buna pratikte "sıvanma aşınması" da denir.
3. Ara yüzeyin kesme direnci, yüzey malzemelerin birinden küçük, diğerinden ise çok az farklı, heterojen yapıda olan ikinci malzemeye ise yer yer eşit olabilir. Bu takdirde gene yumuşak malzemedan sert malzemeye bir madde geçişi vardır. Ancak bazı noktalarda parçacık kopmaları kendini gösterecektir. Madde geçişi yanında madde ayrılmaları suretiyle daha büyük bir madde kaybı ortaya çıkacaktır.
4. Ara yüzeyin kesme direnci her iki yüzey malzemesinin kesme direncinden büyüktür. Ayrıca kuvvetli bir plastik şekil değişmesi sonucu pekleşmiş ve kırılgan hale gelmiştir. Belirli bir kayma mesafesinde yüzeyden kopup ayrılacak, kuvvetli bir aşındırıcı olarak, yüzeyler arasında adhesiv aşınmaya ek olarak abrasiv aşınmaya da neden olacaktır. Bunun sonucu olarak her iki yüzeyde de kuvvetli bir aşınma hasarı

meydana gelecektir. Mukavemet özellikleri birbirine yakın malzemeler arasında (örnek olarak çelik-çelik) bu tip adhesiv kökenli şiddetli aşınma hallerine rastlanır.

Bu dört eşit adhesiv sürtünme şeklinde ölçülen sürtünme katsayıları arasındaki fark çok azdır. Kısaca sürtünme direnci hemen hemen aynı kalır. Buna karşın I ve IV arasındaki aşınma miktarı eşit koşullarda bir ile yüz kat arasında değişir. Görülüyor ki, adhesiv bağ sürtünme direncinin tanımlanması bakımından bize yeteri kadar güvenilir bir bilgi vermektedir.

Buna karşılık aşınma bakımından adhesiv bağa bağlı olarak kesin birşey söylemek mümkün olmamaktadır.

5.2. Abrasiv Aşınma (Yırtılma ve çizme aşınması)

Bu tip aşınma sert bir cismin yumuşak bir cismi kazıyıcı bir etki göstererek tahrip etmesidir. Bu olay genel olarak iki şekilde meydana gelir. Birinci halde sert bir metal yumuşak bir metali eğeleyerek tahrip eder. İkinci halde ise dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Bu sert parçacıklar bir zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğelemeye ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine sebep olurlar. Sert partiküllerin abrasiv aşındırmasına endüstride geniş ölçüde rastlanır.

Saf metallerin abrasiv aşınma miktarları sertlikleri ile orantılıdır. Sertleştirilnn fakat normalize edilmeyen çeliklerde de aynı davranış görünmektedir. Normalize edilmiş çeliklerde aşınma karakteristikiği değişmekle beraber, sertlik ve aşınma sırasında bir lineerlik görülmektedir.

Sertlikten ayrı olarak bir yüzeyin yapacağı elastik deformasyonda abrasyon aşınmasına karşı önemli bir özellik olarak ileri sürülmektedir. İzafi hareket esnasında sert ve yumuşak metallere ibaret bir yüzey çifti arasına sert bir toz parçası girmesi halinde yumuşak yüzey elastik deformasyon yaparak aşınmadan kurtulabilir. Yatak

malzemelerinden bilhassa istenen bu özellik için elastik modülünü küçük olması lazımdır. Bu halde muhtelif maddeler için elastik sınırında uzama oranı bu aşınma hakkında yol gösterici olarak fikir verir.

Partiküllerin Vickers sertliği aşındırıcı yüzeyin Vickers sertliğinden 1.5 katı büyükse ve partiküller keskin köşe ve kenarlara sahiplerse bu şartlar için, abrasiv aşınma hızı oldukça yüksektir.

Isıl işlemle sertleştirme abrasyon direncini geliştirebilir. Diğer taraftan abrasyondan önce işlem sertleşmesi aşınma direncinde gelişmeyle sonuçlanmaz. Abrasyon aşınması sonucunda faz değişimleri de meydana gelir. Tamamiyle soğuk işlemde abrasyon direnci ile sertlik arasında doğrusal ilişkinin bir sonucu olarak metallerin çok sert yüzey tabakalarıyla kaplanması aşınma direncinin artmasında büyük rol oynamaktadır.

Abrasyon aşınmasını önlemek için alınan tedbirler de şöyle özetlenir:

- Yüzeyler sertleştirilmelidir.
- Dışarıdan sert maddelerin yüzeyler arasına girmesi iyi bir sızdırmazlık tertibatıyla önlenmelidir.
- Makineler ve sistemler talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir.

5.2.1. Abrasiv aşınmanın sınıflandırılması

Abrasiv aşınmayı iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlar:

1. İki elemanlı abrasiv (oymalı sürtünme)
2. Üç elemanlı abrasiv (öğütmeli sürtünme)

Karşıt yüzeylerden birisinin üzerindeki mikroboyutlu sert pürüzlerin neden olduğu iki elemanlı abrasiv aşınmada yüzeyin aşırı deformasyonu sözkonusudur. Üç elemanlı abrasiv aşınma ise, ağır yükler altında aşınma parçalarının kırılarak küçük keskin köşeli parçacıklar oluşturup yüzeyi delerek ve çizerek malzeme kaybına neden olması sonucu meydana gelir.

5.3. Tabaka Aşınması

Abrasiv aşınma olayında aşınma yüzeyinde malzemenin yüzeye yakın yerinin (sınır yüzeyinin) özelliğinin pek önemi yok iken, tabaka aşınmasında önemi çoktur. Çevredeki gazların ve ara malzemenin etkisiyle meydana gelen aşınma yüzeyi sınır tabakası, tabaka şeklindeki aşınma parçacığı olarak (yassı çizilme ile) sıyrıldığında, daima yeniden meydana gelir. Bunun için en önemli özellik, aşınma yüzeyinde meydana gelen tabaka olup, malzemenin rolü ikinci derecededir. Örnek; sürtünme oksidasyonu.

5.4. Titreşim Aşınması

Titreşim aşınması, titreşen zorlanmalarda zaman ve yorulma kırılması hasarı olarak meydana gelir. Bu aşınmada, iç yapı tahribatı, çatlamlar ve bölge ayrılmaları meydana gelir. Örneğin; dişliler veya rulmanlarda meydana gelen çukurlaşma (pitting) olayı gibi.

5.5. Ablativ Aşınma

Ablativ aşınma bölgesel olarak aşırı zorlanan ve fiziksel ya da kimyasal değişmeler nedeniyle ısınan yerlerde meydana gelir. Örneğin; uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklılığı, fren balataları.

5.6. Aşınma Çeşitleri

Çeşitli şekillerdeki enerji iletimi veya aşınma olayına etkiyen büyüklüklerin çeşitli kombinasyonlarına göre ayrıca kinematik görüşle aşınma şekilleri sınıflandırılabilir:

5.6.1. Kayma aşınması

Taneli mineraller tarafından meydana getirilen kayma aşınması mineral sertliğine bağlı olarak belirlenir. Metaller yüksek ve alçak aşınma bölgeleri gösterirler.

Geçiş bölgesi, mineral sertliğinin metal sertliği oranına bağlıdır. Eğer mineral sertliği, metalin sertliğinden fazlaysa, aşınma miktarı da artar. Ayrıca yüksek aşınma

bölgesinde, tane keskinliği aşınma miktarını arttırıcı yönde rol oynar.

Metal olmayan sert malzemelerde aşınma, metallere farklı olarak, mineral tanelerin sertliği ile artar. Sert malzemelerin aşınma yüzeylerinde gevrek kırılmalar meydana gelir. Saf metaller, normalize tavlama yapılmış çelikler ve metal olmayan sert malzemelerin yüksek aşınma bölgesinde aşınma dirençleri ile malzeme sertliği arasında lineer bir bağlantı vardır. Yani malzeme sertliği, aşınma direncinin büyüklüğünü tayin eden bir faktördür.

Çeliklerin ısı işlemleriyle sertliklerinin arttırılması, saf metallerin sertliklerine göre aşınma direncine daha az etki yaparlar. Soğuk şekil değiştirme veya içyapı ayrışması sonucu meydana gelen malzeme sertliğindeki artışla, aşınma direncinde hiçbir artma görülmez. Aynı sertlikle fakat deformasyon kabiliyeti fazla olan malzemelerin aşınma direnci daha fazladır. İç yapısında kalıntı östenit bulunan çelikler için, malzeme içyapısı aşınma direncine önemli şekilde etki eder.

5.6.2. Metal-metal aşınması

Hidrodinamik sürtünmede genellikle hiçbir aşınma olmaz ve malzeme çiftinin de önemi yoktur. Çünkü bu halde malzemeler birbirlerine temas etmemektedirler. Fakat burada tam yağlama için minimum bir hız gereklidir. Yani harekete başlama ve durma anında malzeme çiftleri birbirlerine temas ettiklerinden buralarda istenen bazı özelliklerin bulunması gerekmektedir.

Karışık yağlamada kuvvet kısmen hidrodinamik, kısmen de katı cisimlerin temasıyla tanışır. Bu temas noktalarında malzemelerin özellikleri ve kayma yapan malzeme çiftleri ile yağlayıcı maddenin etkisi vardır.

Özellikle yağsız yüzeylerin sürtünmesinde aşınma durumu malzeme çiftinin yüzeyine bağlıdır. Çünkü çevrede bulunan gazlar ve buharlar bir oranda yağlayıcı madde gibi etki yaparlar. Vakum içinde yapılan sürtünme deneyinde de (kuru sürtünme) daha ziyade yumuşak metallerin temas noktalarında sarma ve kaynaklaşma olayı görülür.

Aşınma miktarları yükü devamlı şekilde artarken karışık aşınma bölgesinde “Severe Wear” birdenbire bir sıçrama ve aşınma yüzeyinde parlak noktalar görülür. Karışık aşınma “Severe Wear” yalnız yumuşak çeliklerde metalik temas sonucu çizilen yüzeyler ve büyük metalik aşınma sonucu meydana gelir. Aşınma yüzeyinde sürtünme

martenziti parlak noktalar şeklinde meydana geldiğinde (oksidik) aşınma olmaktadır ve aşınma miktarı da azalmaktadır. bu noktalar, yüzeyin taşınma noktalarıdır ve yükselen enerji yoğunluğu ile yüksek sıcaklıklar (şimşek sıcaklığı) meydana gelmekte ve sertleşebilen çeliklerin kristallerinde dönüşüm olmakta ve kendiliğinden ani soğuma sonucu sürtünme martenziti meydana gelmektedir.

5.6.3. Püskürtme aşınması

Püskürtme aşınmasında, püskürtme açısının önemi büyüktür Kayma, eğik çarpma, püskürtme aşınması olarak sınıflandırılırlar.

Püskürtme aşınması malzeme ve onun özelliklerine çok bağlıdır. Her malzemenin püskürtme aşınmasına karşı dayanıklılığı farklıdır. Verilen deney şartlarında yumuşak ve deforme olabilen malzemeler küçük püskürtme açısında (kayma püskürtmesi) büyük aşınma gösterirken, sert ve gevrek malzemelerde büyük püskürtme açılarında (çarpma püskürtmesi) aşırı zorlanarak maksimum bir aşınma gösterir.

5.7. Erozyon (Erosiv Aşınma)

5.7.1. Erozyonun tanımı

Erosiv aşınma veya daha yaygın kullanıldığı şekliyle erozyon, bir gaz akımı veya bir akışkan sıvı vasıtasıyla taşınan sert partiküllerin malzeme yüzeyine çarpmasıyla meydana getirdikleri bir aşınma mekanizmasıdır. Bazı yönleriyle abrasiv aşınmaya benzeyen erozyon, pulverize kömür, ısı üretim ve sentetik yakıt santralleri, dizel motorları, gaz, buhar ve dizel türbinleri, akışkan yataklar ve madencilikte kum/su çamur (slurry) taşınma sistemleri gibi alanlarda oldukça yüksek tamir ve değiştirme maliyetlerine yol açmaktadır.

5.7.2. Erozyon çeşitleri

Erozyon genellikle sert ve aşındırıcı partiküllerin mevcut olduğu ortama ve aşınan malzemenin erozyon hızının çarpma açısıyla değişimine bağlı olarak iki şekilde

sınıflandırılmaktadır. Partiküllerin mevcut olduğu ortama göre erozyon;

- Katı partikül erozyonu,
- Sıvı partikül erozyonu,
- Kavitasyon erozyonu,
- Kıvılcım (spark) erozyonu

şeklinde dört grupta toplanmaktadır. Pratikte en fazla rastlanılan erozyon tipi, katı partikül erozyonudur. Erozyonda hasara neden olan partiküller, değişik kaynaklar tarafından üretilirler. Ziraat aletleri ve madencilikte kullanılan kum/su karışımı taşıma sistemleri gibi alanlarda sert partiküller, zaten doğal olarak mevcuttur. Diğer bazı durumlarda ise partiküller, giderilmesi oldukça zor olan yabancı maddeler şeklinde bulunabilir. Bu durum özellikle kumlu ve paslı ortamlarda kullanılan motorlarda yaygındır. Fe_2O_3 gibi sert partiküller, tribolojik sistem bileşenlerinin aşınması veya oksidasyonu da üretilebilir.

Diğer sınıflandırma şekli ise, malzemenin erozyon hızının partikülle çarpma açısıyla değişimine bağlı olarak yapılan sünek ve gevrek erozyon türüdür.

Erozyonda çarpma açıları, çarpma yüzey düzlemine göreceli olarak tanımlanır. Çoğu metaller gibi sünek malzemelerin erozyon davranışı (plastik deformasyon), büyük oranda partiküllerin çarpma açısına bağlıdır. Bu tip malzemeler 20° - 30° ler arasında maksimum erozyon hızı verir ve daha sonra artan çarpma açısıyla erozyon hızında bir düşüş kaydedilir.

Seramikler gibi gevrek malzemelerin erozyon hızı ise, çarpma açısına bağlı olarak artmaktadır. Erosiv partikül çarpması gevrek kırılmaya neden olduğunda malzeme çatlakların oluşumu ve birbiriyle kesişimi sonucu yüzeyden kaldırılır. Çarpma yönü yüzeye normal olduğunda partikül çarpmasıyla oluşan çatlama derecesi çok şiddetlidir ve bu şartlar altında erozyon çok hızlı gerçekleşir.

5.7.3. Erozyonu etkileyen faktörler

Verilen bir uygulama için kullanılan malzemenin erozyon dayanımını etkileyen faktörleri üç grupta toplamak mümkündür:

Aşındırıcı Partikül Özellikleri: Boyut, şekil, sertlik, süneklik ve kırılma mukavemeti,

Erozyona Uğrayan Malzemenin Özellikleri: Sertlik, kırılma tokluğu, süneklik, yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme.

Erozyon Şartları: Aşındırıcı hızı, çarpma açısı ve aşındırıcı partikül miktarı.

5.8. Yorulma Aşınması

Değişken ve tekrarlı yükler sonucu ortaya çıkan yorulma aşınması, temas yüzeylerinde çok küçük çukur ve oyukların meydana gelmesi şeklinde kendini gösterir. Bu tip aşınma özellikle rulmanlar, dişli çarklar ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan parça yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bu durum bir malzeme yorulmasının sonucudur. Zira yukarıda bahsedilen parçalarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde meydana gelen Hertz basınçları, temas yüzeylerinin hemen altında kayma gerilmeleri oluşturur. Böylece değişken zorlanma nedeniyle malzemede bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket eder, büyür ve yüzeyde küçük çukurcuklar oluşturur. Yorulma aşınmasını önlemek için alınacak en önemli tedbir, temas yüzeylerini sertleştirmektir.

5.9. Oksidasyon Aşınması

Temas yüzeyleri genellikle hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, kimyasal maddelerin mevcut olduğu ortamlarda kullanılan makina parçalarının yüzeyleri, bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar aşınmaya neden olurlar. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar sert bir tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder.

5.10. Seramiklerin Aşınması

Seramiklerde aşınma temel olarak gevrek kırılma, plastik deformasyon ve tribokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Çoğu uygulamalarda bu üç mekanizma beraber meydana gelir. Seramiklerde, uygulanan yüke ve aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak, aşınma mekanizmalarında bir geçiş söz konusudur. Düşük yükler veya küçük partiküller ile kırılma bastırılabilir ve aşınma sadece plastik deformasyon ile meydana gelir. Daha büyük yükler ve partiküller için, aşınma hızında hızlı bir artışa neden olarak gevrek kırılma oluşur. Düşük kırılma tokluğuna sahip seramikler sert malzemelerdir ve gevrek kırılma ile abrasiv aşınmaya olan dayanımları, toklukla artar. Metallerde ise tam tersi bir durum söz konusudur [3].



BÖLÜM 6. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ

6.1. Kayma Aşınması İçin Deney Yöntemleri

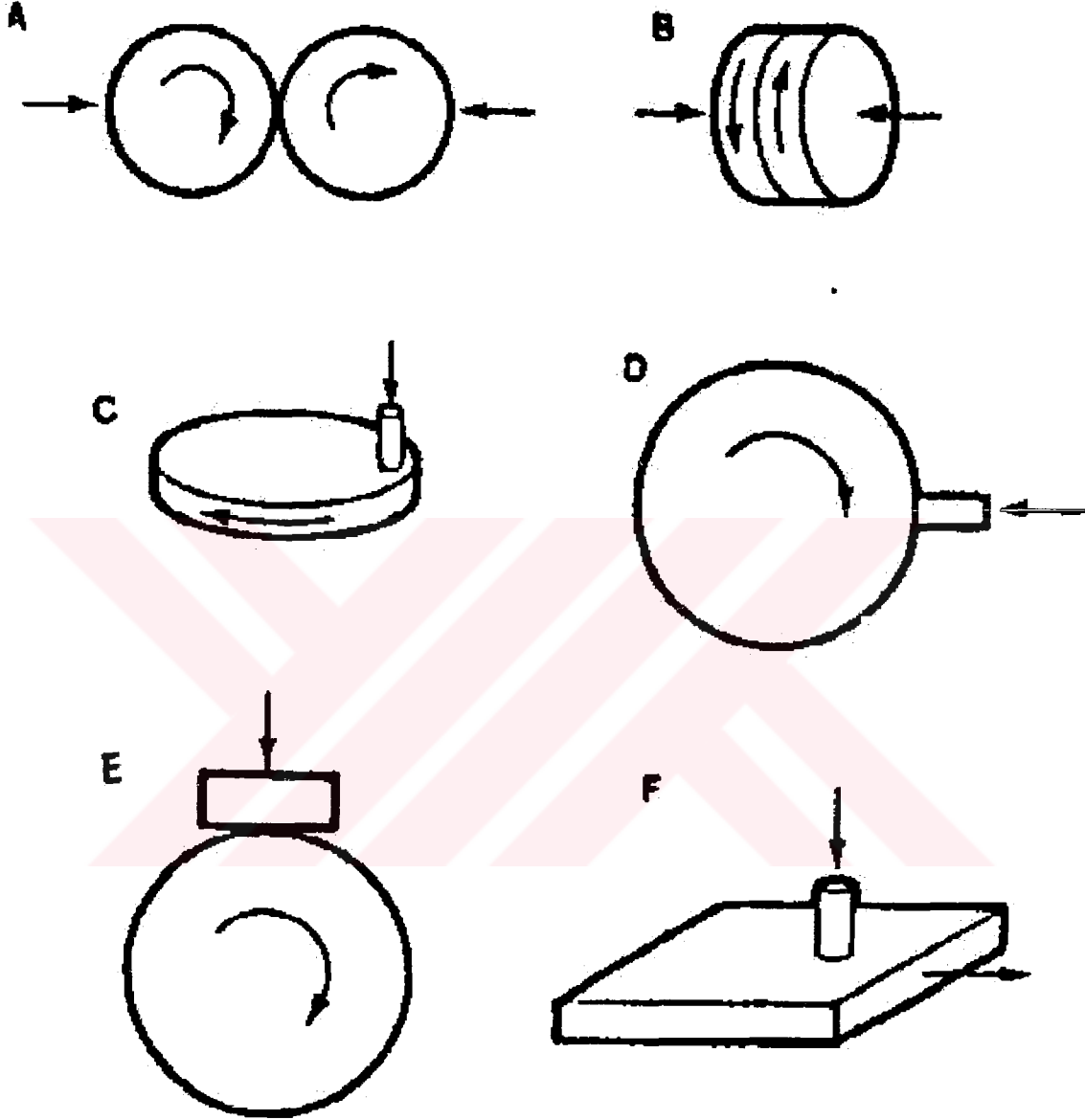
Kayma aşınması çalışmalarında birçok değişik deneysel düzenlemeler kullanılmaktadır. Aşınma için yapılan laboratuvar araştırmaları, genellikle hem oluşan aşınma mekanizmalarının incelenmesini hem de pratik uygulamaların benzeşiminin yapılması ve aşınma oranları ile sürtünme katsayıları için kullanışlı dizayn verilerinin elde edilmesini ortaya çıkarmaktadır. Her iki amaç için de aşınmayı etkileyebilen tüm değişkenlerin kontrol ve ölçümü oldukça önemlidir. Aşınma oranı ve sürtünmenin çoğu zaman kritik olarak kayma şartlarına bağlı olduğunun bilinmesi oldukça önemlidir. Görünüşe göre şartlardaki önemsiz çok küçük değişiklikler hakim olan mekanizma içerisinde köklü değişikliklere yol açabilir ve aşınma oranı ile birleşir. Eğer test sonuçları ya da bir pratik uygulama benzeşimi veya daha geniş alandaki bilimsel maksatlar için kullanışlı ise kapalı kontrol ve izleme gereklidir [5].

Şekil 6.1 yaygın olarak kullanılan birkaç tip aşınma ve test aparatlarının geometrik düzenlerini göstermektedir. İlk defa 1774 yılında sürtünme ölçmek için kullanılan bir alete isim olarak verilen Tribometre kelimesi bazen birkaç aparat için kullanılmaktadır. Daha fazla son zamanlarda kabaca tibotester ve bunun fiil ile birleşmiş hali oluşan terimler için uydurulmaktadır.

Şekil 6.1’de görülen metotlar iki tipe ayrılabilirler. Bunlardan birincisi aşınma oranının her iki kayma yüzeyinde de aynı malzemedenden olsa bile aşınma oranlarının farklı olduğu asimetric düzendedir.

Simetrik düzen, aşınma çalışmasında pek sık kullanılmaz. Bu düzene Şekil 6.1’deki A ve B düzenleri örnek olarak gösterilebilir. Bu düzen tipinde ya çevreleri boyunca

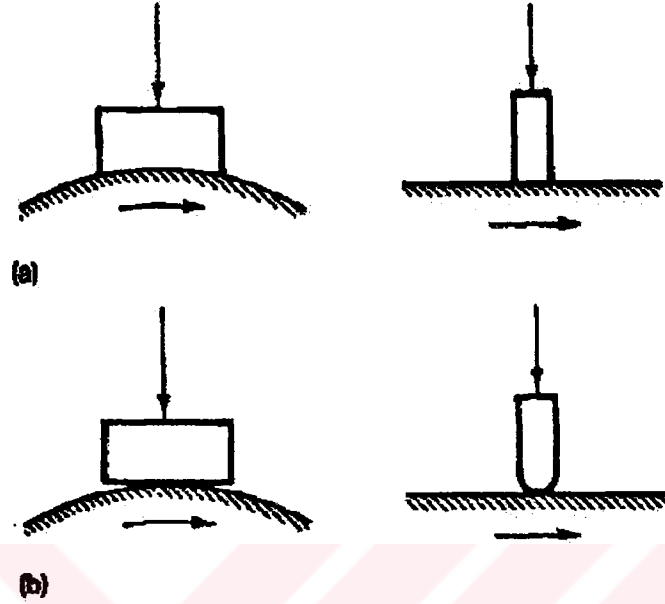
temas halinde olan (A) ya da yüzeyleri boyunca temas eden (B) her ikisi de dönen bilezik veya iki disk bulunur [5].



Şekil 6.1. Kayma aşınması testlerinde kullanılan geometrik düzenler [5]

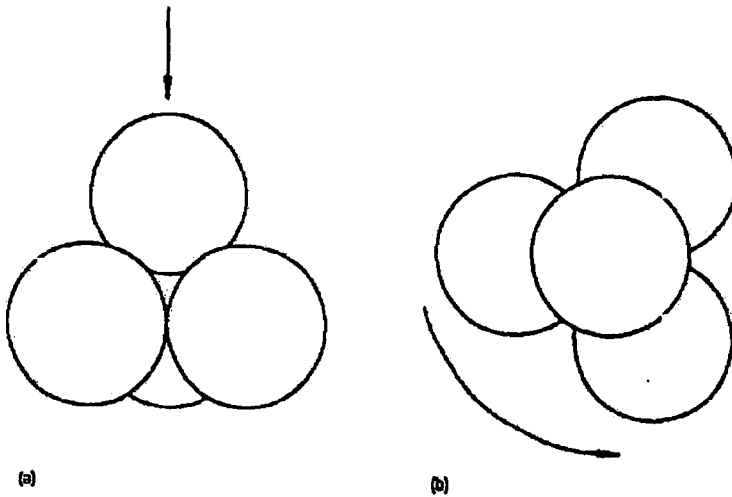
Çok yaygın olan asimetrik test cihazlarında bir diske karşı bastırılan bir pim kullanılır. Bu pim diskin ya düz yüzeyi üzerine (C) ya da kenarına (D) bastırılır. Bu düzen tipi bir bileziğe karşı bastırılan bir blok (E) veya düz bir yüzey üzerine bastırılan bir pim (F) şeklinde de olabilir. Bu test cihazlarında temas şekilleri, belirli bir alan teması (örneğin, düz bir disk üzerinde düz uçlu bir pim veya bir bilezik üzerinde tam yerleşmiş bir blok) veya sadece bir nokta ya da çizgi teması (örneğin bir disk üzerinde düz uçlu bir veya

bir bilezik düz bir blok) şeklindedir. Bu temas şekilleri Şekil 6.2’de detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.2. a) Çizgisel temas b) Noktasal temas geometrileri [5]

Diğer test geometrisi Şekil 6.3’de gösterilen dört top testidir. Alt taraftaki üç top bir taşıyıcı içerisinde hep birlikte döner ve üst taraftaki topa doğru izafi olarak hareket eder. Üstteki top, yerinde sabittir ve aşağıya doğru normal bir yük bastırılmaktadır. Bilyalar, standart rulmanlı yatak çeliğinden yapılmıştır. Bu test, malzeme davranış çalışmalarından çok; yağlama performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir metottür.



Şekil 6.3. Genellikle iyi bir yağlama sağlamak için kullanılan dört top testi

a) Perspektif görünüş b) üstten görünüş [5]

Laboratuarda aşınma testinde, numune boyutları genellikle mm'ler seviyesinden cm'ler seviyelerine kadar uzanır. Asimetrik teste pimler ve bloklar 25 mm boyutundan daha küçük buna rağmen bilezikler ve diskleri bir kaç cm'ler civarındadır. Yükler, bir newton'dan birkaç kilonewtona kadar geniş bir aralıkta kullanılır. Sürtünme ve aşınmayı etkileyen ve aşınma testinde kontrol edilmesi gereken değişkenler, hız ve yük gibi belirli veya numune boyutu gibi daha az belirlidir.

Bazı aşınma test metotları ulusal standartların konusudur. Örneğin, bilezik üzerinde blok (ASTM G77), çapraz silindir (ASTM G83), disk üstü pim (ASTM G99), Disk üstü küre (DIN 50324) ve düz yüzey üzeri döner pim (ASTM G98) [5].

Aşınmanın basit bir modeli kayan bir kütleden ayrılan malzeme miktarının kayma mesafesi ve temas bölgesi üzerindeki nominal basınca (normal yük/nominal temas alanı) bağlı olması gerektiğini önermektedir. Aşınma ölçümü ya numunenin aralıklı olarak tartılması ve ölçülmesi ile ya da pozisyonunu bir elektriksel veya mekanik transdüser kullanarak sürekli olarak ölçülmesiyle yapılır. Aşınma, numunenin boyutundaki bir değişim ile tespit edilir. Noktasal ve çizgisel temas durumlarındaki aşınma temas alanının artmasına sebep olur. Bu aşınma miktarı numune üzerinde oluşan aşınma boyutunun ölçülmesiyle tespit edilir. Bu metot yaygın olarak kullanılan bir aşınma belirleme metodudur.

Bir aşınma testi esnasında sürtünme kuvvetini sürekli olarak ölçmek ve kaydetmek uygundur. Bu, genellikle numune üzerindeki teğetsel kuvvetin ölçülmesi ile veya dönen diğer parça (disk, bilezik vs) üzerinden torkun ölçülmesi ile yapılır. Sürtünmenin sürekli olarak kaydedilmesi sadece nümerik değerlerinin elde edilmesini değil, aynı zamanda kayma davranışındaki değişmelerin izlenmesini de sağlar (örneğin μ değerlerinin artması veya azalması ve düz bir izdeki değişmeler). Bu değişmeler, yüzey doğallığı veya topoğrafyasındaki ya da aşınma mekanizmasındaki değişimlerin habercisidir. Örneğin test cihazı çalışırken koruyucu oksit veya yağlayıcı film

tabakasındaki bozulma bu yol ile keşfedilebilir. Böyle değişimlerin bilinmesi bazen mutlak aşınma oranının ölçülmesinden daha fazla değerlidir. Numune ile karşı eleman arasındaki elektriksel temas direncinin sürekli olarak ölçülmesi bazı maksatlar için bilgi vericidir. Böyle bir ölçüm oksit tabakasının veya EHL (Elastohidrodinamik yağlama) kalınlığı ile ilgili ortalama bir değer verir. Elektriksel kapasite ölçümleri, böyle bilgilerin diğer kaynağını verir.

Kayma şartları altındaki aşınma, kayma aralığına ayrıca kayma hızı ve test süresinin her ikisinin birden büyüklüğüne bağlıdır. Kayma hızı sürtünme enerjisinin dağılma oranını ve böylece iç yüzeydeki sıcaklık oranını etkiler. Bir aşınma testinin sonuçları ile bu aşınma testinin yarı süresi fakat iki kat hızı ile elde edilen bir başka aşınma testinin sonuçlarının aynı olması düşünülemez. Kayma hızı değişirken aşınma mekanizması ve oranında ani geçişler olabilir. Aşınma ayrıca kayma yüzeyleri arasındaki nominal temas basıncına da bağlıdır. Temas basıncındaki değişimlerin oluşturduğu geçişleri de içerirler. Temas basıncından bağımsız olarak numunenin lineer boyutları da önemlidir. Uzun bir numunenin kenarına yakın bir yerdeki aşınma hasarı, temas bölgesinden geçişi esnasında kısa bir numunedeki aşınma hasarına göre daha etkilidir.

Normal yük, temas alanı, kayma hızı ve test süresindeki büyük değişikliklerden başka diğer çeşitli faktörler de aşınma testinde hesaba katılmalı ve izlenmelidir. Test sıcaklığı malzemenin mekanik özellikleri üzerine ve sıcaklığın harekete geçirdiği işlemler üzerine etkisinden dolayı önemlidir. Yağlı sistemlerde yağ viskozitesi üzerine olan etkisinden dolayı test sıcaklığı önemlidir. Atmosferik bileşenler de önemlidir. Su buharı ve oksijen gibi reaktif bileşenler tüm malzemelerde aşınma oranını ve mekanizmasını kuvvetli bir şekilde etkiler. Yağlı sistemlerde, yağ filmindeki basınç dağılımı ve bunun sonucu film kalınlığı ve yağlayıcı maddenin miktarı da önemli faktörlerdir. Bu etkilerin geniş listesi, bir pratik uygulamanın laboratuvar benzeşimi kurmanın mümkün olmadığını ve sadece aşınma testinin bir servis deneyi olduğunu akla getirebilir. Fakat çıkan sonuçların benzeşimi yapılan gerçek şartlardan çok uzak olduğu bilinmelidir. Temas gerilmeleri, termal şartlar, kayma hızları ve kimyasal ortam herhangi bir aşınma testinde hepsi çok önemli bileşenlerdir. Sürtünmenin ölçülmesi ile ve testten sonra aşınan yüzeylerin ve aşınma hasarının son muayenesi ile bu önem daha

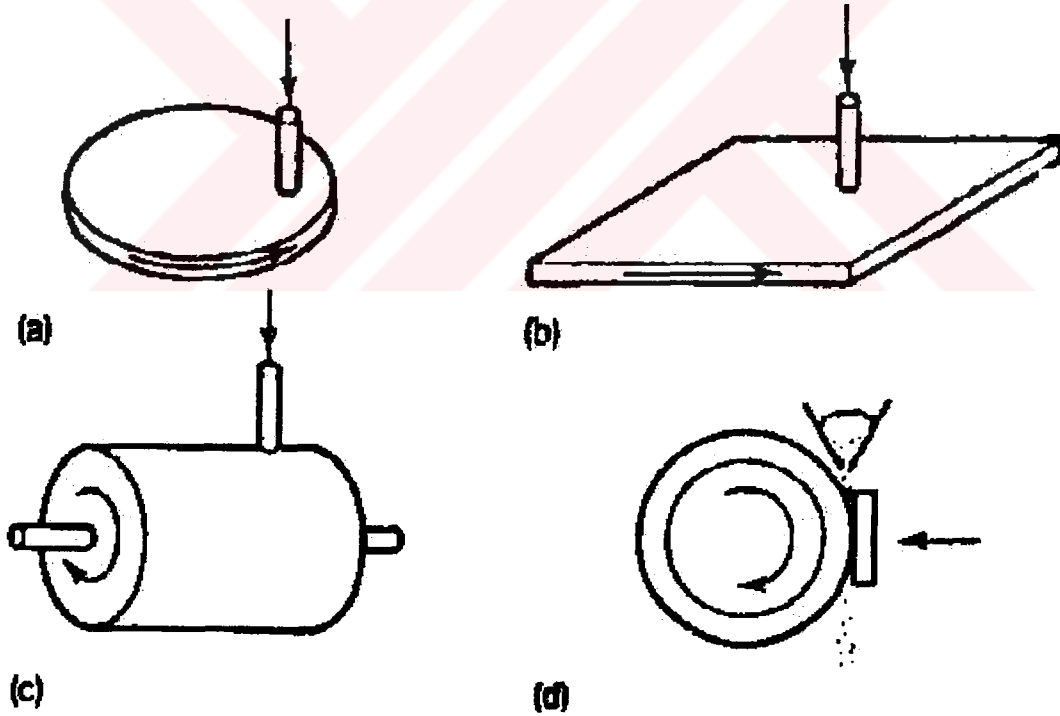
iyi fark edilir. Aşınma mekanizması, servis uygulamalarına olduğu gibi testte de aynıdır. Bir laboratuvar testinin sonuçları güvenle pratik bir probleme uygulanabilir.

6.2. Abrasiv Aşınma İçin Deney Yöntemleri

Abrasiv aşınma için kullanılan en yaygın laboratuvar test yöntemleri şu iki esasa göre yapılır: Bunlardan birincisi, sabitleştirilmiş bir abrasiv malzeme üzerinde pim şeklinde hazırlanmış numunenin kayması, ikincisi ise, dönen bir tekerlek ve ona temas halinde kayan düz bir numune arasına serbest abrasiv partiküllerin sürekli olarak dökülmesidir. Şekil 6.4. a)'dan c)'ye kadar olan yöntemler bu birinci esasa göre yapılmış iki kısımlı abrasiv aşınma metotlarıdır. Bu yöntemlerde genellikle abrasiv malzeme olarak abrasiv kağıtlar veya bezler kullanılır. Bu kağıt ve bezler üzerine abrasiv partiküller çok dar aralıklarda serpiştirilmiş durumdadırlar. Yapıştırıcı olarak çok kuvvetli reçineler kullanılır. Bu abrasiv malzemelerde aşınma oranı numunenin aynı iz üzerinden geçmesinin tekrarı ile azalır. Bu azalmanın sebebi meydana gelen birçok değişik kimyasal, fiziksel ve mekanik olaylardır. Bu olayların miktarı ve önemi, numunenin malzemesi, yük, kayma hızı, atmosfer ve diğer faktörlerle değişir. Şekil 6.4. a)'daki disk üzeri pim geometrisinde, pimin disk üzerinde radyal olarak hareket etmesiyle test yapılmaktadır. Bu esnada disk üzerinde spiral bir iz oluşur. Diğer bir geometri Şekil 6.4. b)'deki bir abrasiv levha üzerinde dik olarak kayan pimden oluşan geometridir. Üçüncü geometri de Şekil 6.4. c)'deki üzerine abrasiv kağıt sarılmış dönen bir silindirin üzerinde aksenal olarak hareket eden pimden oluşan geometridir. Bu durumların her birinde pim üzerine sabit bir yük uygulanır. Testten önce ve sonra pim tartılarak aşınma miktarı ölçülür. Bu dizaynlarda pimin pozisyonunu sürekli olarak izleyen elektriksel transdüserler kullanılarak pimin uzunluğu her an ölçülerek aşınma ölçülür. Bu yolla test esnasında aşınmanın sürekli olarak kaydedilmesi mümkün olabilir[5].

Şekil 6.4 iki tip abrasiv aşınma testini şematik olarak göstermektedir. Bir levha veya blok şeklindeki numune sabit bir yük altında, dönen bir tekerleğin çevresine bastırılır. Amerikan standartlarında olduğu gibi çoğu kez çelik bir disk üzerine geçirilmiş sertliği ve elastik modülü belli lastik bir çerçeveden ibaret olan çerçeve kullanılır. Standart

olarak lastik çerçevenin kalınlığı 12.7 mm, genişliği 12.7 mm ve çapı 228.6 mm'dir. Dönme hızı dakikada 200 devirdir. Numuneyi bastırma kuvveti belirlidir. Çok küçük boyutlardaki (silika) kuartz partikülleri özel bir cihazla sabit bir hızla temas bölgesine yedirilir. Aşınma, numunenin tartılmasıyla ölçülür. Yük, kayma hızı, lastiğin sertliği ve partikül yedirme hızı gibi diğer test değişkenleri de ölçülür. Şekil 6.4'te gösterilen iki tip test metodunda numune birbirinden oldukça farklı şartlara maruz kalır. Lastik tekerlek testinde serbest abrasiv partiküller bulunduğu için bu test metodundaki şartlar iki kısımdan abrazyondan fazla üç kısımlı abrazyona daha çok benzer. Ölçülen aşınma miktarları üç kısımlı abrazyon testlerindeki değerlere gerçekten yakındır. Sabit abrasivler üzerinde kayan pim numuneleri içeren test metotları ise kesinlikle iki kısımlı abrazyon şartları meydana getirirler. Tüm bu abrazyon test tiplerinin sonucuna birçok deney değişkenleri etki eder. Tüm şartlara ve ölçümlere büyük hassasiyetle dikkat edilmesi gerekir. Birçok durumlarda test şartlarını kalibre etmek için standart bir referans malzeme kullanılır.



Şekil 6.4. Malzemenin aşınma miktarını ölçmek için en yaygın kullanılan dört metodun şematik gösterilmesi. a) abrasiv disk üstü pim, b) abrasiv düzlem üstü pim, c) abrasiv tambur üstü pim, d) lastik tekerlekli abrazyon testi [5]

BÖLÜM 7. ÇİNKO - ALÜMİNYUM İÇEREN ALAŞIMLAR (ZA ALAŞIMLARI)

Son yıllarda çinko endüstrisi yüksek oranlarda alüminyum içeren yeni bir seri çinko-alüminyum esaslı döküm alaşımları geliştirmiştir. Bu alaşımlar günümüzde ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımları olarak tanınmakta ve sahip oldukları son derece iyi mekanik ve döküm özellikleri yanısıra ekonomik olarak da üretilebilir olmaları nedeniyle birçok endüstriyel alanda kullanılmakta ve kullanımları hızla artmaktadır [2].

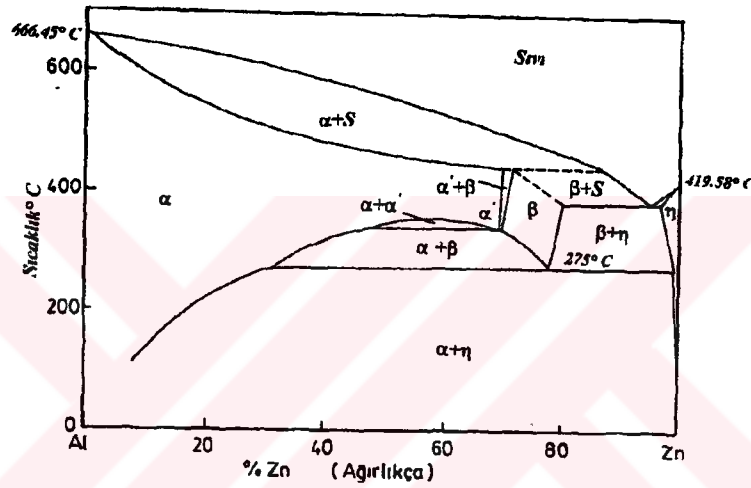
Bu alaşımlar birçok uygulamalarda beyaz metal, bazı alüminyum alaşımları, dökme demir, pirinç ve bronz gibi geleneksel döküm alaşımlarının yerini almaktadır. Bu alaşımların üstün mekanik özelliklerinin yanısıra sundukları en önemli avantaj, hemen hemen bilinen bütün döküm yöntemleriyle başarılı bir şekilde üretilebilmeleridir. Bu yöntemlerden en çok tercih edileni ise, seri üretim için uygun ve ekonomik olan basınçlı dökümdür. ZA alaşımlarının üçü de soğuk kamaralı basınçlı döküm yöntemi ile dökülebilmekte ve ayrıca ZA-8 düşük ergime sıcaklığı nedeniyle sıcak kamaralı basınçlı döküm yöntemi ile de üretilebilmektedir.

Tablo 7.1. Çinko-Alüminyum esaslı alaşımların % ağırlıkça kimyasal bileşimleri [2]

Element %	ZA - 8	ZA - 12	ZA - 27
Al	8.0 - 8.8	10.5 - 11.5	25 - 28
Cu	0.8 - 1.3	0.5 - 1.2	2.0 - 2.5
Mg	0.015 - 0.030	0.015 - 0.030	0.010 - 0.020
Ti			
Cr			
Fe max.	0.075	0.075	0.075
Pb max.	0.006	0.006	0.006
Cd max.	0.006	0.006	0.006
Sn max.	0.003	0.003	0.003
Zn	Kalan	Kalan	Kalan

6.1. Çinko-Alüminyum Denge Diyagramı

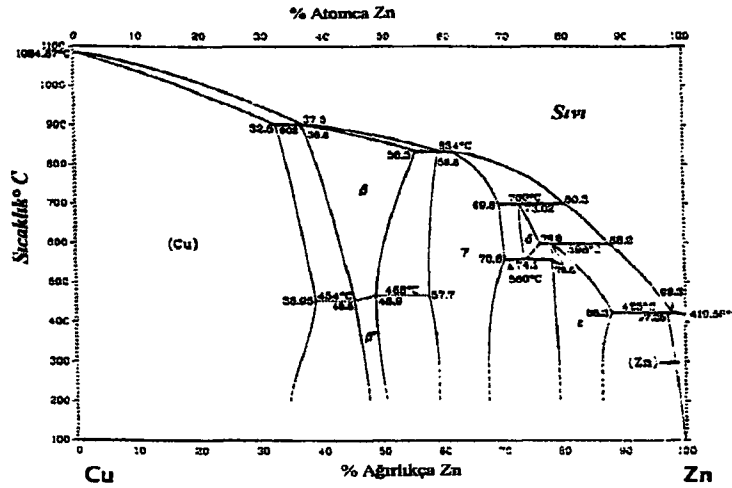
Aşağıda çinko-alüminyum denge diyagramı görülmektedir. Diyagramda da görüldüğü gibi çinko, alüminyum içerisinde yaklaşık olarak %80'e kadar çözünerek α , α' ve β olarak adlandırılan üç tane faz oluşturmaktadır. Alüminyumca zengin eriyiğe α , monoötektoidin çinkoca zengin kalan tarafına α' , çinkoca zengin peritektik faza β ve çinkoca zengin katı eriyiğe de η denilmektedir. İkili sistemde %70 Zn ve 443 °C'de peritektik, %94.9 Zn ve 382 °C'de ötektik ve %78 Zn ve 275 °C'de ise ötektoid dönüşümler meydana gelmektedir.



Şekil 7.1. Zn - Al ikili denge diyagramı [39]

7.2. Çinko - Bakır Denge Diyagramı

Aşağıda Zn - Cu ikili denge diyagramı görülmektedir. Bu diyagramda bakır, her oranda çinko ile alaşım yapabilmektedir. Diyagramda beş tane peritektik reaksiyon meydana geldiği görülmektedir ve bunlardan dördü (β , γ , δ ve ϵ) ara fazlardır. δ hariç diğer fazların katı eriyik aralığı geniştir.



Şekil 7.2. Zn - Cu ikili denge diyagramı [39]

Çinko - alüminyum esaslı alaşımlar, alaşım elementi olarak az miktarlarda bakır içerirler. Bu nedenle Zn - Cu ikili diyagramında bu alaşımlar ile ilgili olan kısım çinkoca zengin olan kısımdır. Diyagramın çinkoca zengin olan bu uç kısmında 424 °C'deki maksimum bakır çözünürlüğü %2.7'dir.

7.3. ZA Alaşımlarının Mikroyapıları

7.3.1. ZA-8 alaşımının mikroyapısı

ZA-8 alaşımının katılaşması sıvı metal içerisinde önce primer β oluşumuyla başlar. İlk oluşan β fazı yaklaşık olarak %75 Zn içermekte, ötektik sıcaklığa inildikçe bileşimdeki çinko miktarı artmakta ve ötektik sıcaklıkta bu değer %80 Zn oranına ulaşmaktadır. β dendiritlerinin oluşumu sırasında sıvı fazın bileşimi çinkoca zenginleşir ve 382 °C sıcaklığın altında ötektik dönüşüm ile primer β dendiritlerinin etrafında $\beta+\eta$ ötektik matrisi oluşur. β fazı 275 °C'nin altında karırsız bir yapıdadır ve ötektoid dönüşüm ile $\alpha+\eta$ fazlarına dönüşmektedir. Bu nedenle ZA-8 alaşımının oda sıcaklığındaki mikroyapısı ötektoid dönüşüme uğramış β dendiritleri ve bu dendiritleri çevreleyen $\alpha+\eta$ ötektik matrislerinden oluşmaktadır [2].

7.3.2. ZA-12 alaşımının mikroyapısı

ZA-12 alaşımının katılaşması ZA-8 alaşımına benzer şekilde meydana gelmektedir.

ZA-12 alaşımının katılaşmasında da önce primer β fazı çekirdeklenmeye başlar ve 382 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta $\beta+\eta$ ötektik matriksi oluşur. Fakat ZA-12'de oluşan primer β fazının içerdiği alüminyum miktarı (yaklaşık %30), ZA-8'de oluşan primer β fazındakinden daha yüksektir. Ayrıca ZA-12'deki ötektik matriks miktarı ZA-8'dekinden daha düşüktür. ZA-12 alaşımında da β fazı 275 $^{\circ}\text{C}$ 'nin altında ötektoid dönüşüm ile $\alpha+\eta$ ye dönüşmektedir [2].

7.3.3. ZA-27 alaşımının mikroyapısı

Kompleks bir mikroyapıya sahip ZA-27 alaşımının katılaşması ise diğer iki alaşımdan daha farklı olup katılaşma sürecinde peritektik ve ötektoid dönüşümler meydana gelmektedir. Zn - Al denge diyagramından görüldüğü gibi %27 Al içeren alaşımda önce alüminyumca zengin YMK α fazı sıvı içerisinde dendiritik olarak büyür. Yaklaşık %60 Al içeren α dendiritlerinin bu oluşumu esnasında, sıvı faz çinkoca zenginleşir ve 443 $^{\circ}\text{C}$ 'ye gelindiğinde α dendiritlerinin sıvı ile peritektik reaksiyonu sonucu dendiritler etrafında çinkoca zengin β fazı oluşur. YMK kristal yapıdaki α ve β fazları sadece kafes parametreleri ve bileşimleri ile birbirlerinden ayrılırlar. Katılaşma peritektik reaksiyondan geriye kalan aşırı soğumuş ve çinkoca zengin sıvının ötektik dönüşümü ile tamamlanır. Daha sonra yapıdaki β fazı 275 $^{\circ}\text{C}$ 'deki ötektoid dönüşüm ile $\alpha+\eta$ kararlı fazlarına dönüşür [2].

7.4. ZA Alaşımlarının zellikleri

7.4.1. Fiziksel zellikleri

Zn - Al ikili denge diyagramında görüldüğü gibi artan alüminyum miktarı ile alaşımın ergime noktası ve katılaşma aralığı değişmektedir. ZA-8 alaşımı için likds sıcaklığı 404 $^{\circ}\text{C}$ ve katılaşma aralığı 29 $^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu değerler ZA-12 için 432 $^{\circ}\text{C}$ ve 55 $^{\circ}\text{C}$, ZA-27 için ise 484 $^{\circ}\text{C}$ ve 109 $^{\circ}\text{C}$ 'dir. ZA alaşımlarının genelde bilinen fiziksel özellikleri diğer bazı geleneksel döküm alaşımları ile birlikte karşılaştırmalı olarak Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7.2. ZA alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması [2]

	ÇİNKO			PİRİNÇ		BRONZ	DÖKME DEMİR	
	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE 40	SAE 60		GG 30	31510
Özellik	Kokil ve Basınçlı	Kokil	Kum	Kum	Kum	Kum	Kum	Kum
Yoğunluk (gr/cm ³)	6,3	6,03	5,0	8,83	8,93	8,88	7,19	7.2-7.45
Ergime Aralığı (°C)	375-404	377-432	375-484	855-1010	855-975	762-928	>1176°C	>1232°C
Isıl Genleşme Katsayısı (µm/mK)	23,2	24,1	26,0	18,0	18,0	18,5	12,1	11,9
Isıl İletkenlik (W/mK)	115,0	116,0	125,5	72,0	59,0	46,9	49-52	-
Elektrik İletkenliği (% IACS)	27,7	28,3	29,7	15,0	12,0	10,1	-	6,0
Elektriksel Direnç (µΩcm)	6,2	6,1	5,8	11,5	14,4	17,1	82,0	38,0

Burada artan alüminyum miktarı ile ZA alaşımlarının elektrik iletkenliği, ısıl iletkenlik, spesifik ısı ve soğuma aralığının arttığı görülmektedir. Üç alaşımın yoğunluğu alüminyum miktarı ile ilgilidir. Yoğunluğu 5 g/cm^3 olan ZA-27 alaşımı ZA-12'den %17, ZA-8 alaşımından ise %21 daha hafiftir.

ZA-12 ve ZA-27'nin yatak malzemesi olarak kullanılmaları düşünüldüğünden, özellikle sıkı olarak yerleştirilen yataklarda ısıl genleşme katsayısı önem kazanmaktadır. ZA alaşımlarının 20-100 °C sıcaklık aralığındaki termal genleşmeleri $23-26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 'dir. Bu değer Al ve Cu'dan yüksektir ve dökme demirin yaklaşık iki katıdır. Bu nedenle tasarımda bunun göz önüne alınması gereklidir. Ayrıca bu üç alaşımın 24 °C'deki ısıl iletkenliği $115-125.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ aralığındadır ve bu değer birçok alüminyum alaşımından iyidir ve ticari bakır döküm alaşımlarının üzerindedir.

7.4.2. Mekanik özellikleri

7.4.2.1. Oda sıcaklığındaki mekanik özellikler

Çinko-alüminyum esaslı ZA alaşımlarının birçok uygulamalarda geleneksel Zamak alaşımı, pirinç, bronz, bazı alüminyum alaşımları ve dökme demirin çok kısa sürede yerini almasının sebebi; bunların mükemmel dökülebilirliklerinin yanısıra göstermiş oldukları yüksek mekanik özelliklerdir.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri, bazı alüminyum alaşımları ve dökme demirler ile karşılaştırmalı olarak Tablo 7.3'te gösterilmiştir.

ZA-8, ZA-12 ve ZA-27'nin üçü de mekanik özelliklerin iyi bir bileşimine sahiptir. Özellikle ZA-27 alaşımı kuma döküm ve basınçlı döküm şartlarında göstermiş olduğu yüksek çekme mukavemetiyle ayrı bir öneme sahiptir. ZA-27 alaşımı basınçlı döküm şartlarında yaklaşık 440 MPa'lık bir çekme mukavemetine sahiptir.

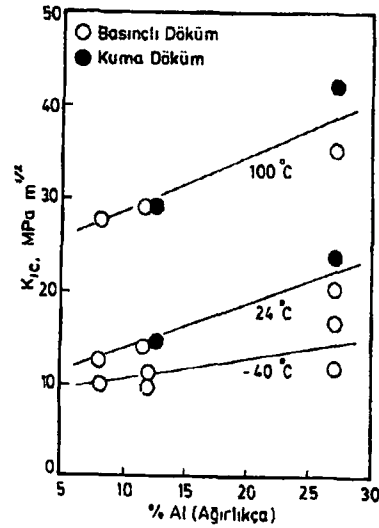
Ayrıca ZA alaşımlarının bilinen sertlik değerleri Al ve Cu alaşımlarından daha iyidir. ZA-27 alaşımı yaklaşık olarak 119 BSD'lik bir değer ile diğer ZA alaşımları içinde en yüksek sertlik değerine sahiptir. Fakat bu değer yine de dökme demirin sertliğinden oldukça düşüktür.

ZA-8 alaşımı %8'lik bir çekme uzaması ile en iyi süneklik değerine sahiptir. Bu değer ZA-12'de %5 ve Za-27'de ise %2-3.5 aralığındadır.

7.4.3. Darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı

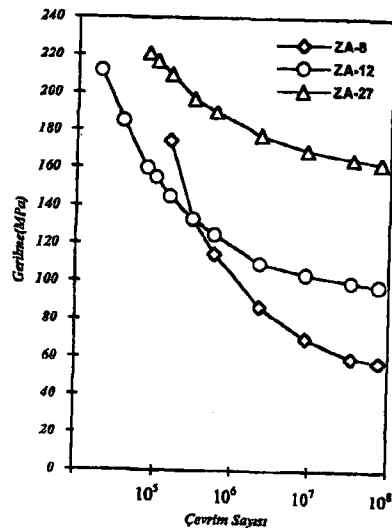
ZA alaşımlarında çentik hassasiyeti olduğundan, darbe deneyleri çentiksiz numuneler ile yapıldığında daha tutarlı sonuçlar elde edilmektedir. Bu alaşımların oda sıcaklığındaki darbe özellikleri, diğer döküm alaşımları ve özellikle dökme demir ile alüminyum alaşımlarından daha yüksektir [2].

ZA alaşımlarının kırılma tokluğu üzerine yapılan araştırmalarda, kuma döküm ve basınçlı döküm ZA-27 alaşımının en yüksek kırılma tokluğu değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu değer homojenleştirme ısıl işlemi ile bir miktar arttırılabilmektedir. ZA alaşımlarının kırılma tokluğu değerleri, diğer döküm alaşımları özellikle alüminyum alaşımları ve dökme demirler ile karşılaştırılabilecek seviyededirler. Bunun yanında, ZA alaşımlarının alüminyum içeriğinin artması ve artan ortam sıcaklığı kırılma tokluğu değerlerini arttırmaktadır (Şekil 7.3). Ayrıca, Şekil 7.3'de görüldüğü gibi, kuma döküm ZA-27'nin kırılma tokluğu değerleri basınçlı döküm ile üretilen ZA-27'den yaklaşık %30 daha yüksektir. Ayrıca, %2'ye kadar porozitenin kırılma tokluğu değerlerini önemli oranda etkilemediği belirlenmiştir.



Şekil 7.3. Kırılma tokluğunun sıcaklık ve Al miktarı ile değişimi [2]

ZA alaşımlarının oda sıcaklığı yorulma dayanımı değerleri 5×10^8 çevrimlik bir ömür için Tablo 7.2'de diğer bazı döküm alaşımları ile birlikte verilmiştir. Tablo 7.2'deki değerler incelendiğinde, basıncı döküm ile üretilen ZA-8 alaşımının yorulma dayanımı değerinin, kokil döküm ZA-8 alaşımının yorulma dayanımının yaklaşık iki katına eşit olduğu ve kuma döküm ZA-27 alaşımının, basıncı döküm yöntemi ile üretilen ZA-27 alaşımından daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. ZA alaşımlarının eğmeli yorulma deneyi ile belirlenen S-N eğrileri Şekil. 7.4'de verilmiştir. ZA-27 alaşımı yaklaşık 150 MPa'lık bir yorulma dayanımı ile üç alaşım içerisinde en yüksek değere sahip olan alaşımdır.



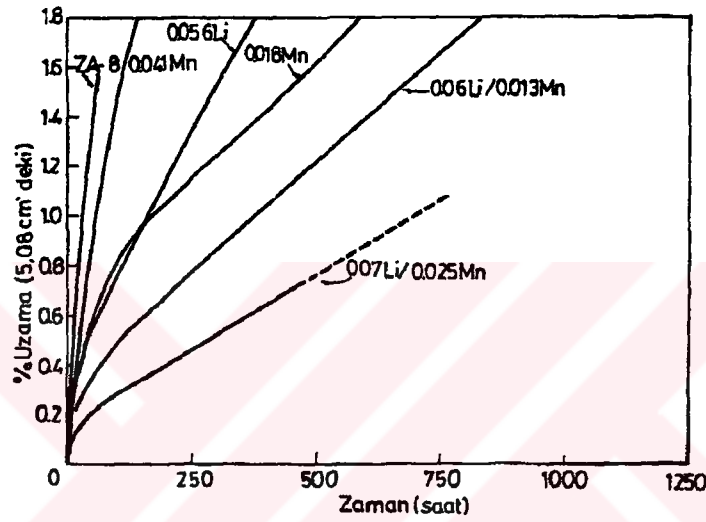
Şekil 7.4. ZA alaşımlarının eğmeli yorulma deneyi ile elde edilen S-N eğrileri [2]

Tablo 7.3. ZA alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [2]

	ÇİNKO						PİRİNÇ			BRONZ	
	ZA-8		ZA-12		ZA-27		SAE40	SAE660	SAE64		
	Kokil	Basınçlı	Kum	Kokil	Basınçlı	Kum	Basınçlı	Kum	Kum	Kum	
Özellik											
Elastisite Modülü (GPa)	85,5	85,5	82,7	82,7	82,7	77,9	77,9	83	100	80	
% Uzama	1-2	8	1,5	2,2	5	4,5	2,5	30	20	20	
% 0.2 Akma Dayanımı (MPa)	208	290		268	320	365	371	117	124	124	
Çekme Dayanımı (MPa)	240	374	299	328	404	421	426	255	240	240	
Brinel Sertlik	85-90	103	94	89	100	90	119	60	65	60	
Basma Akma Dayanımı (MPa)	210	252	290	234	269	330	359	258,8	317,4	324	
Kırılma Tokluğu MPa√m		12,6	14,5		14,4	23,7	20,2				
Darbe Direnci (J)	20	42	26	20	29	48	12	15	8	15	
Yorulma Dayanımı 5x10 ⁸ Çevrim (MPa)	52	103	103		117	172	117	75,9	110,4	89,7	
Kayma Dayanımı (MPa)	242	275	253		296	292	325				

7.4.4. Zn-Al alaşımlarının aşınma özellikleri

Çinko - alüminyum alaşımlarının diğer önemli bir üstünlüğü de aşınma ve yatak özellikleridir. Bu alaşımların aşınma özellikleri ve yatak malzemesi olarak kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar 1981-86 yılları arasında yoğunluk kazanmıştır. Yapılan alışmalar neticesinde, Zn-Al esaslı alaşımların özellikle kaymalı yatak uygulamalarında beyaz metal, bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini alabileceği tespit edilmiştir.

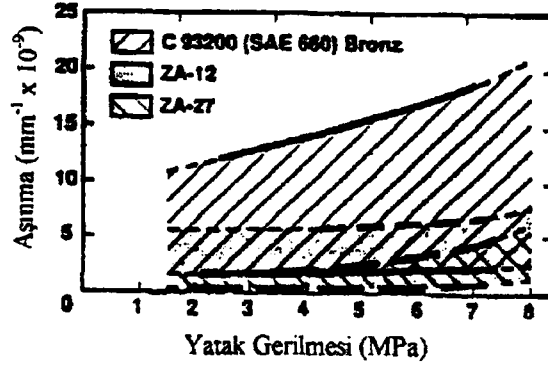


şekil 7.5. Basınçlı döküm ZA-8 alaşımının sürünme dayanımına Li ve Mn elementlerinin etkisi [2]

İlk olarak %40 Al - %2 Cu içeren Zn-Al alaşımının iyi aşınma özelliklerine sahip olduğu Marczah ve Ciach tarafından tespit edilmiştir. Bu zelliklerin, uygulanan ısıl işlem ile meydana gelen çok fazlı yapı ile yatak yüzeyinde oluşan çinko oksit ve alüminyum oksitten kaynaklandığı ileri sürülmektedir. Yüzeyde oluşan alüminyum oksit sert olduğundan yatağın aşınma direncini arttırmaktadır. Çinko oksit ise, yumuşaktır ve yatak-mil arasında sıkışma olması durumunda yağlayıcı görevi yapmaktadır.

Barnhust ve Forge, ZA alaşımlarının aşınma özelliklerini geleneksel döküm malzemeleri ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Halka üzerinde blok aşınma düzeneğinde yapılan bu çalışmada; kuma döküm ZA-27 alaşımının Al bronzu ve Al-Sn alaşımına eşdeğer, SEA 660 Pb-Sn bronzundan ise daha iyi aşınma dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir (şekil 7.6). Ayrıca, ZA alaşımından yapılan yataklar çalışma

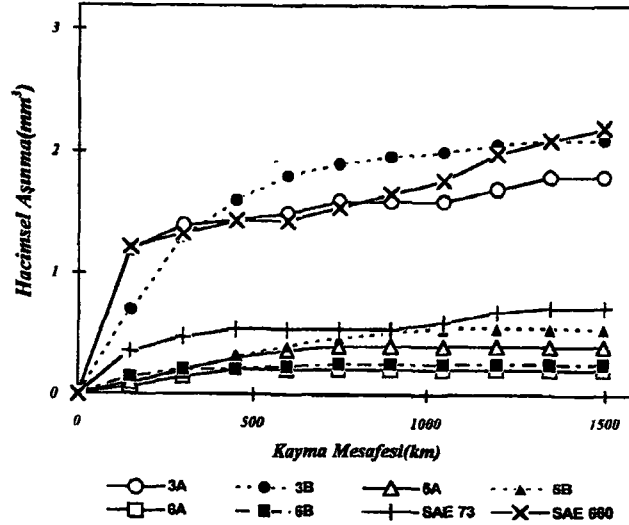
enasasında Pb-Sn bronzu yataklara nazaran çok daha düşük yatak sıcaklığı meydana getirirler. Bunun sebebi, ZA alaşımlarının, bronzun yaklaşık iki katı ısı iletkenliğe sahip olmasıdır. ZA alaşımlarının sahip olduğu bu yüksek aşınma dayanımının matriksin sertliğine ve yapıda bulunan $\epsilon(\text{CuZn}_4)$ fazının varlığına ve miktarına bağlı olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 7.6. ZA-12 ve ZA-27 alaşımları ile SAE 660 bronzunun, aşınma miktarı-yatak gerilmesi arasındaki ilişki [2]

Bununla birlikte çinko-alüminyum esaslı alaşımların yatak olarak kullanılmasını zorlaştıran bazı faktörler mevcuttur. Bunların başında, yapıda bulunan yararlı fazların boyutsal kararsızlığa neden olması gelmektedir. Savaşkan ve Murphy yapmış oldukları araştırmada [31], bu problemin uygun ısı işlemleri ile giderilebileceğini göstermişlerdir. Fakat, bu esnada alaşımların aşınma dayanımı ve mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği belirtilmiştir [32].

Yine aynı araştırmacılar, alüminyum oranı yüksek Zn-Al esaslı alaşımların disk üzerinde pim aşınma deneylerinde, Zn-Al alaşımlarının SAE 660 Pb-Sn bronzu ile SAE 73 pirincinden daha iyi, fosfor bronzu ve dökme demir ile karşılaştırılabilecek değerde aşınma dayanımına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 7.7'de döküm halinde ve ısı işlem görmüş %3.1 Cu, %2.7 ve %4.1 Si içeren Zn-%25 Al alaşımının aşınma miktarının diğer yatak malzemeleri ile karşılaştırması verilmektedir. Bu alaşımlara ilave edilen Cu ve Si elementlerinin, aşınma dayanımlarını önemli oranda arttırdığı ve özellikle Zn-Al matriks içerisinde bulunan Si partiküllerinin yük taşıyıcı faz olarak davranarak mükemmel bir aşınma dayanımı sağladığı gözlenmiştir.



Şekil 7.7. Bileşiminde; %3.1 Cu(3), %2.7 Si(5) ve %4.1 Si(6) içeren Zn-%25 Al alaşımının döküm hali (A) ve ısıl işlem görmüş hali (B) ile SAE 660 bronz ve SAE 73 pirincinin hacimsel aşınma değerlerinin kayma mesafesi ile değişimi [2]

Benzer şekilde ZA-27 alaşımına ilave edilen manganezin aşınma ve sürtünme özelliklerinin olumlu yönde etkilediği ve bunun yapıda oluşan manganezce zengin sert partiküllerden kaynaklandığı da tespit edilmiştir.

Son yıllarda yapılan araştırmalarda; ZA-27 alaşımına MoS₂ partikülleri, Zamak 3 ve ZA-12 alaşımına ise saffil alümina fiberleri ilave edilerek üretilen kompozit malzemelerin aşınma dayanımlarının önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir [35]. Ancak ilave edilen bu takviye malzemelerinin, alaşımların çekme mukavemeti değerlerini olumsuz şekilde etkilediği görülmüştür.

Çinko içerisinde bakırın çözünürlüğü çok sınırlı olmasına rağmen, çinko-alüminyum alaşımlarında alüminyum miktarına bağlı olarak bakırın çözünürlüğü artmaktadır. Zn-Al esaslı alaşımlar da mukavemet ve sertliği arttırmak amacıyla bakır ilave edilmektedir. %2'ye kadar Cu ilaveleri çekme mukavemeti ve sertlikte artmaya sebep olur iken, % uzama değerini azaltır. Ayrıca, bakır ilaveleri sürtünme ve korozyon direncini arttırmaktadır.

7.5. ZA Alaşımının Kullanım Alanları

Basınçlı döküm ZA alaşımları; endüstri makinalarında, bilimsel ekipmanlarda, ev gereçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv uygulamalarında kollar ve kilitlerde, mekanik parçalarda, konstrüksiyon amacıyla çeşitli yerlerde ve aydınlatma malzemesi gibi birçok değişik alanda uygulama alanı bulmaktadır.

Günümüzde ZA alaşımları, değişik uygulama alanlarında kullanılmakta ve birçok alanda da kullanımı düşünülmektedir. Ulaşım endüstrisinde; süspansiyon ve aks parçaları, vites kutusu, iletim (aktarma) parçaları, yakıt enjeksiyon pompa kapakları ve koltuk kolları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca traktörler için hidrolik kollar, tekerlekli sandalye kelepçeleri, pnömatik güç ünitesi parçaları ve otomatik bisiklet vites dökümleri bu alaşımlardan yapılmaktadır [2].

Bunların yanında, madenlerin tehlikeli bölgelerindeki elektrik ekipmanları, korozyonun önemli olduğu boru ve kelepçeler, yangın söndürme ekipmanları (nozül, kelepçe), gazmetre kutusu ve kapağı, daktilo kapağı, teçhizat kapağı, hassas elektronik sistem kutuları ve bazı destek plakaları ZA alaşımlarından üretilmektedir [33].

ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarının en önemli kullanım alanları, iyi aşınma dayanımları nedeniyle yataklar, burçlar ve aşınan parçalardır. Bu alaşımlar yüksek yük, düşük hız uygulamalarından, diğer yatak malzemeleri ve özellikle bronzlara nazaran daha iyi performans göstermektedirler. Traktörlerde bronz yerine, çinko-alüminyum alaşımlarının kullanılması yatak çalışma ömrünü 1800-2000 saatten 5000-7000 saate çıkarmıştır. Ayrıca, ZA alaşımı yataklar bronz nazaran %50 daha ucuzdur.

ZA alaşımlarının sönüm kapasitesinin yüksek olmasından dolayı, ZA-12 alaşımı havalı çekiçlerde, ZA-27 ise otomobil motor rakorları, arazi motosikletlerinin kam mili tahrik kasnaklarının yapımında kullanılmakta ve gürültüyü azaltmak amacıyla hava değiştirici (air-conditioning) kompresörlerin motor bloklarının dökümünün ZA-27'den yapılması planlanmaktadır [33].

7.6. Yatak Alaşımları

Endüstride aşınma yatağı olarak kullanılan bronz türlerinden biri alüminyum bronzlarıdır. Alüminyum bronzları ağırlıkça % 5-12 arasında alüminyum içeren bakır esaslı alaşımlardır. Temel alaşım elementleri Fe, Ni, Mn ve Si'dir. Alaşım elementlerinin konsantrasyonunu değiştirerek 400 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir mükemmel korozyon dayancına ve yüksek mukavemete sahip ticari alaşımlar elde etmek mümkündür [6]. Bu yüksek mukavemet ve aşınma dayanımı özellikleri, onları darbeli veya ani yüklemeli ortamlarda kullanma olanağı sunar. Bu mükemmel özellikleri özellikle karbon açısından, düşük-karbonlu çelikler ve dökme demirle kıyaslandığında alüminyum bronzlarını çok önemli bir mühendislik malzemesi yapar [7].

Son yirmi yılda alüminyum bronzlarının tribolojik davranışları üzerinde daha fazla durulmuştur. Sullivan ve arkadaşları, bunların çelik üzerinde sınır yağlama koşullarında aşınmalarını incelemişler ve teorik bir aşınma modeli geliştirmişlerdir [8-12].

Alüminyum bronzlarının sürtünmesi üzerine yapışmanın ve sertliğin etkileri incelendiğinde, sürtünme katsayısıyla kütle sertliği, pekleşme hızı ve yüzey sertlikleri arasında hiçbir ilişki olmadığı ifade edilmiştir [13,14]. Daha öncelerde Poggie ve arkadaşları, sürtünme üzerine yüzey durumunun etkisini ve alüminyum bronzlarının aşınma davranışlarını sistematik bir biçimde incelemişlerdir [15,16]. Bunlar alüminyumun yüzeye dağıldığını ve alüminyum miktarı arttıkça alüminyum-oksit olarak tabaka oluşturduğunu bulmuşlardır [17,18].

Çözünabilirlik sınırına kadar artan alüminyum miktarıyla sürtünme katsayısının azaldığı bildirilmiştir, bu arada çeliğe karşı çalıştığı durumlar aşınma kayıpları artmaktadır [19,20].

Al_2O_3 'e karşı, aşınma oranı da alüminyum miktarıyla artar ve sürtünme katsayısı vakumlu ortamda yükselir. α -fazında alüminyumun çözünabilirlik sınırının üzerinde aşınma davranışı daha karmaşıktır. Çünkü β -fazı içeren bronzlar yüksek sıcaklıklarda,

farklı yapılar elde etmek için ısı işleme tabi tutulabilirler [21,22]. Bu işlem görmüş ikili ötektoid martensitik yapıdaki alaşım, işlem görmemiş aynı ötektoid alaşıma oranla daha iyi aşınma dayanımı gösterir [23,24].

Yatak malzemesi olarak üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar günümüzde büyük bir hızla sürdürülmektedir [26]. Söz konusu alaşımlar, kaymalı yatak imalatında beyaz metal (Babbitt), bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaktadır [27]. Son zamanlarda, kullanımı gittikçe yaygınlaşan çinko-alüminyum esaslı alaşımların geleneksel yatak malzemelerine göre pek çok üstünlüklere sahip oldukları bilinmektedir [28]. Bu üstünlüklerin başında, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yüksek aşınma dayanımına sahip olmaları, özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, üretimlerinin kolay ve ekonomik olması sert parçacıkları yutma özelliğine sahip olmaları ve ağır yük ve yetersiz yağlama koşullarında bile ideal tribolojik davranış sergilemeleri gelmektedir [29]. Söz konusu alaşımların bütün bu üstünlüklerinin yanında, bazı dezavantajlarının da olduğu bilinmektedir. Bu dezavantajların başında da, özellikle bakır içeren alaşımlarda meydana gelen boyutsal kararsızlık problemi gelmektedir [30]. Bu problemin, alaşımları uygun bir ısı işlem uygulamak suretiyle giderilmesi gerekir. Ayrıca, söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemetlerinin sıcaklığa çok duyarlı oldukları bilinmektedir [31]. Bu nedenle, günümüzde çinko-alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesi için yürütülen araştırma çalışmaları, bu alaşımların kullanımlarını kısıtlayan etkenlerin ortadan kaldırılması noktasına yoğunlaştırılmıştır.

Son zamanlarda geliştirilen çinko-alüminyum-silisyum alaşımlarının üstün aşınma dayanımlarına sahip olmalarına karşın, mukavemet değerlerinin bakır içeren üçlü alaşımlardan daha düşük olduğu görülmüştür [32]. Bugüne kadar, çinko-alüminyum esaslı alaşımların tribolojik özellikleri, daha çok sürtünme veya aşınma numuneleri kullanılarak incelenmiştir. Ancak, bu alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların tribolojik özellikleri, gerçek kullanım koşullarında yeterince incelenmemiştir.

Diğer bir yatak malzemesi de babbitt (beyaz metal) alaşımlarıdır. İki tür babbitt alaşımı

vardır: Birincisi; kalay esaslı % 8 Cu, %4-8 Sb içeren SAE11 ve SAE12; ASTM B23 normuyla ifade edilen babbitle, ikincisi ise; maksimum %10.7 Sn, %9.5-17.5 Sb içeren SAE13-16 normlarıyla ifade edilen alaşımlardır [34].

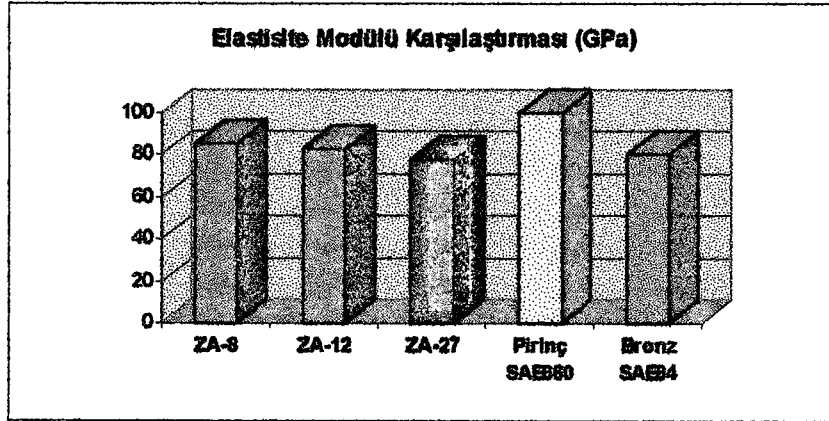
Yatak alaşımlarının klasik olarak kullanılagelenleri bu çalışmada detaylı olarak incelenen bronzlardır. Yatak bronzları üç kategoride incelenebilir; kurşun bronzları, kalay bronzları ve alüminyum-bazlı bronzlar [34].

Yatak malzemesi elde etmek için toz metalurjisi yöntemlerine de başvurulabilir. Kendinden yağlamalı, sinterlenmiş, toz metalurjisiyle üretilen yataklar, kurşun bronzlarından, yüksek ve düşük yoğunluklu bronzlardan, demir-bakır, demir-bakır-karbon alaşımlarından ve alüminyum-kalay alaşımlarından imal edilirler. Bu tür yataklarda yağlayıcı, parça hacminin % 10-35 'ini tutan gözeneklerin, boşlukların arasına dolar ve çalışma sırasında aşınma yüzeyini yağlayarak besler [34].

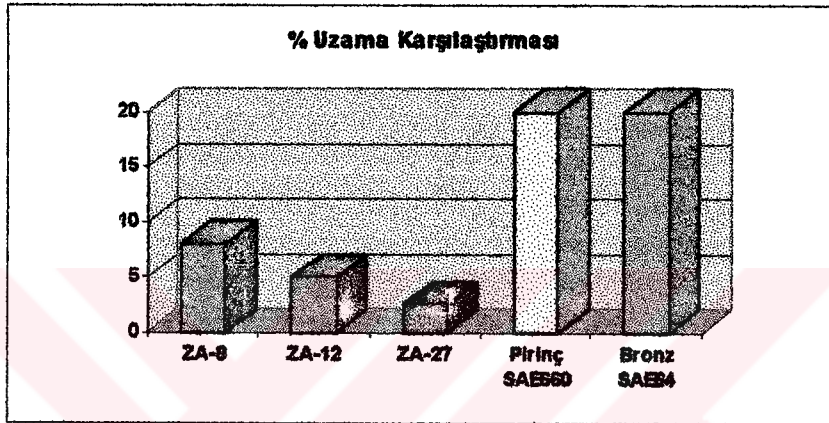
7.7. ZA ve Bronz Alaşımlarının Göreceli Karşılaştırılması

Bölüm 7.4.2'de ZA-alaşımları ile geleneksel yatak malzemesi olarak kullanılan bronz alaşımlarının kıyaslaması yapılmış ve bunlar Tablo 7.3'de de gösterilmiştir.

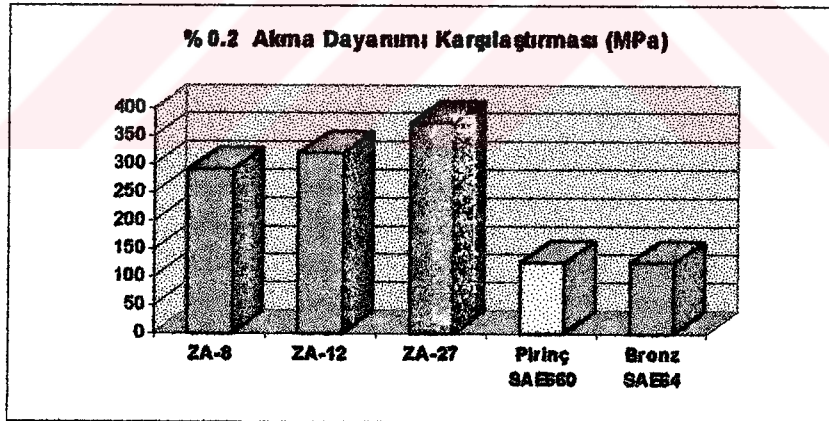
Aşağıdaki Şekil 7.8'de ise ZA-alaşımlarının mekanik özelliklerinin daha çarpıcı bir biçimde görülmesi için (a) dan (j) ye kadar olan bar grafikleri verilmiştir.



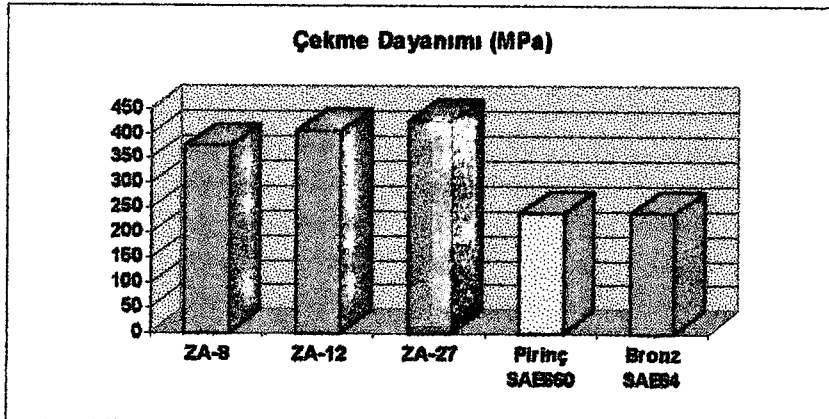
(a)



(b)

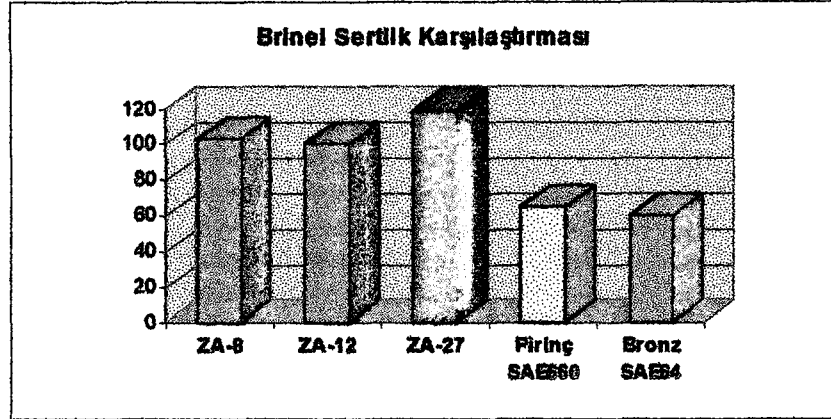


(c)

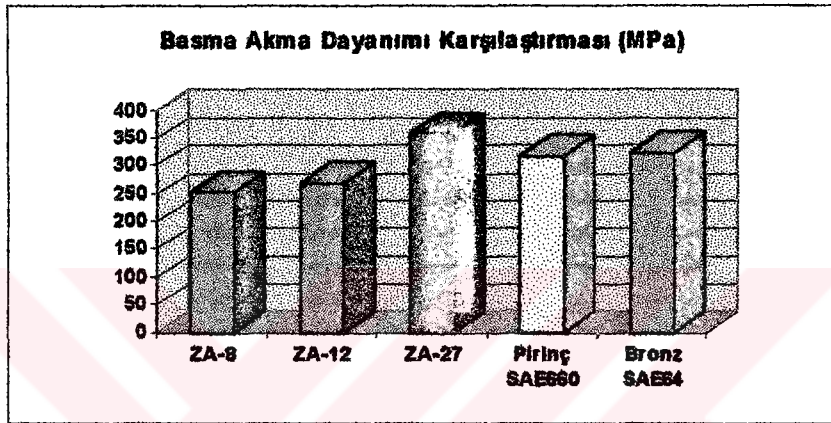


(d)

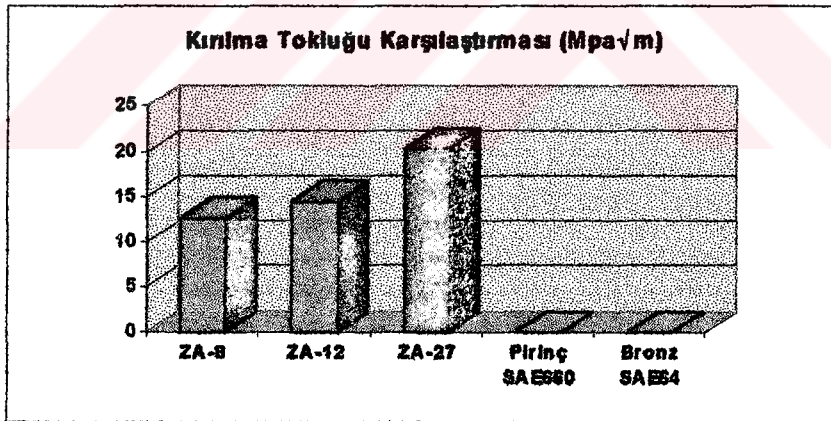
Ŗekil 7.8. Mekanik özelliklerin karşılaştırılması



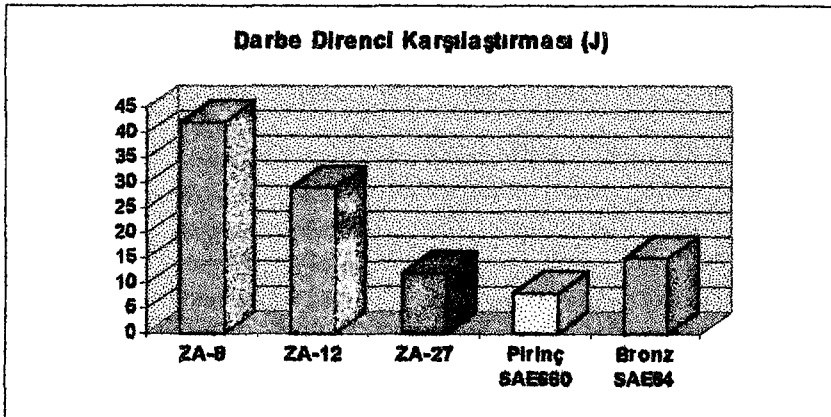
(e)



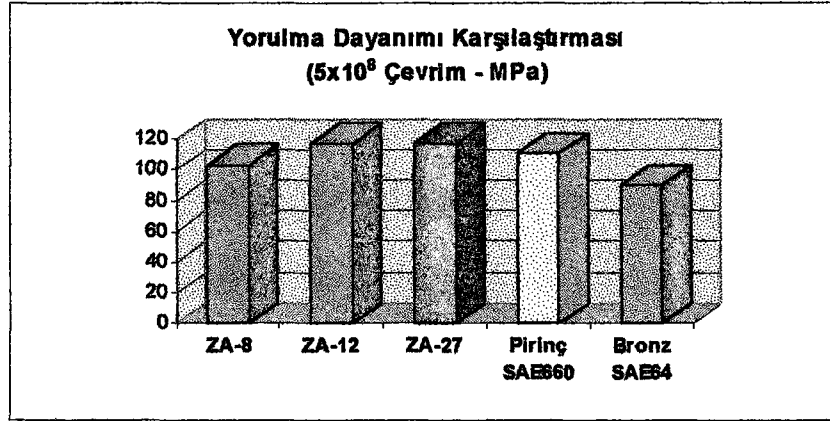
(f)



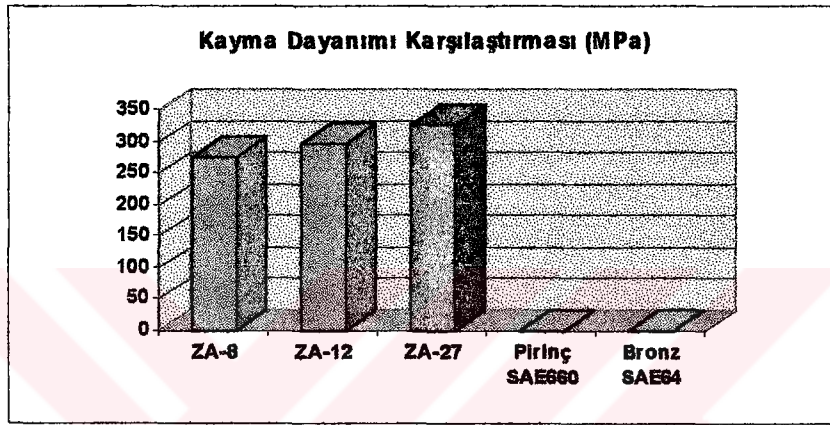
(g)



(h)



(i)



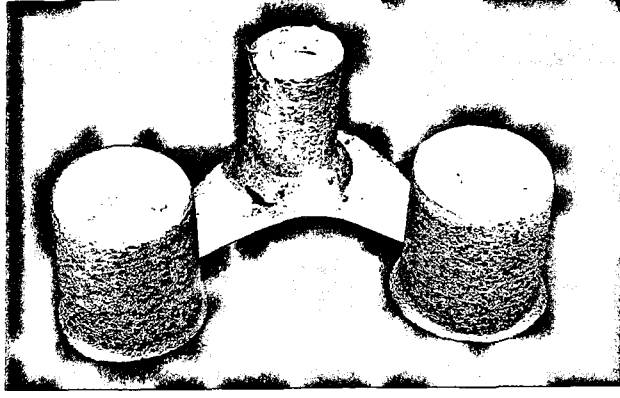
(j)

BÖLÜM 8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

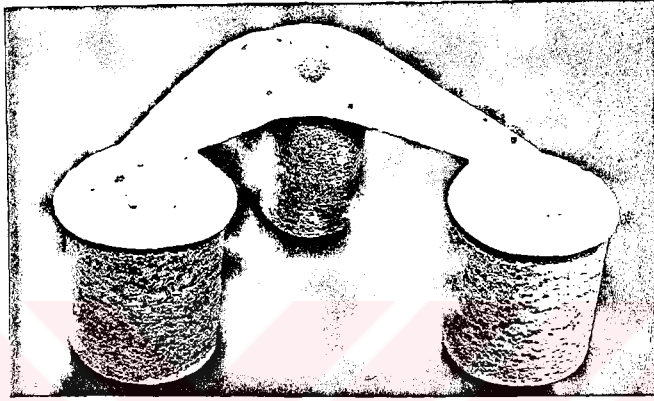
Bu çalışma için yatak malzemesi yapımında eskiden beri kullanılan yataklık fosfor bronz (RB1) ile kurşunlu kalay bronzları (RB4 ve RB7) ile son yıllarda geliştirilmiş olan çinko-alüminyum alaşımlarından ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 kullanılmıştır.

8.1. Numunelerin Üretilmesi

Deneylerde kullanılacak olan numunelerden ZA-alaşımları reçineli kum kalıba döküm yapılarak üretilmiştir. Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’de bu numunelerin döküm sonrası fotoğrafları gösterilmiştir.

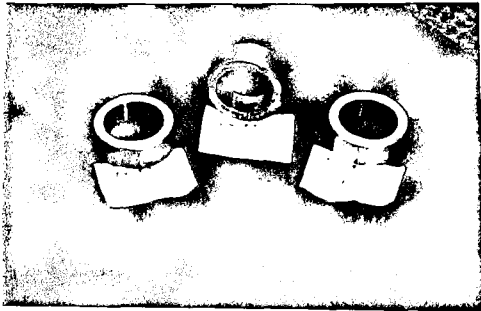


Şekil 8.1. Döküm sonrası numunelerin üstten görünüşü

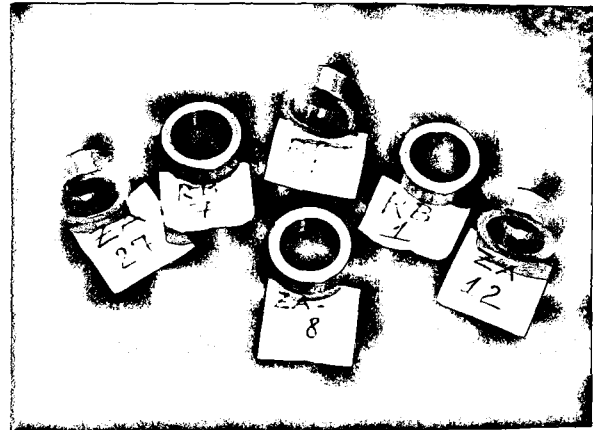


Şekil 8.2. Döküm sonrası numunelerin alttan görünüşü

Bronz numuneler ise savurma döküm teknolojisi kullanılarak imal edilmektedir. Bu numuneler sanayiden hazır dökülmüş olarak alınmıştır. Numuneler daha sonra torna tezgahlarında yatak haline getirilmiştir. Yüzey hassasiyeti sağlamak amacıyla yataklık burçların içleri 0.025 hassasiyetinde taşlanmıştır. Şekil 8.3'de bu bronz numunelerin resmi, Şekil 8.4'de ise yatak aşınması deneyinde kullanılan numunelerin toplu resimleri görülmektedir.



Şekil 8.3. Bronz burçlar



Şekil 8.4. Yatak aşınması deneyinde kullanılan numuneler

8.2. Spektrometrik Analiz

ZA alaşımlarının analizleri Tablo 7.1'de verilmişti. Bronz numunelerin kompozisyonlarını tespit etmek için yapılan spektrometrik analiz sonuçları Tablo 8.1'de verilmiştir. Bu sonuçlar Ek B'de verilmiş olan geleneksel bronz alaşımlarının kimyasal kompozisyonlarıyla uyum içindedir.

Tablo 8.1. Bronz numunelerin spektrometrik analiz sonuçları

Sample	Cu*R	Zn	Sn	Al	Ni	Pb	P	Mn	Si	Fe	Sb	S	Mg
AV-RB1	62310	0.546	10.29	<0.000	0.122	0.114	0.037	<0.000	0.011	0.126	0.027	<0.002	-
AV-RB4	Burn 1	77505	1.10	0.43	0.11	6.80	0.08	0.01	<0.00	0.05	0.065	<0.002	<0.002
	Burn 2	77116	1.09	0.43	0.11	6.71	0.08	0.01	<0.00	0.05	0.063	<0.002	<0.002
	Average	77311	1.09	0.43	0.11	6.75	0.08	0.01	<0.00	0.05	0.064	<0.002	<0.002
AV-RB7	Burn 1	69533	1.58	0.45	0.58	0.12	0.05	0.01	<0.00	0.20	<0.008	<0.002	<0.002
	Burn 2	68935	1.59	0.46	0.58	0.12	0.05	0.01	<0.00	0.20	<0.008	<0.002	<0.002
	Average	69234	1.59	0.45	0.58	0.12	0.05	0.01	<0.00	0.20	<0.008	<0.002	<0.002

8.3. Aşınma Deneyleri

Laboratuarlarda yapılan iki çeşit aşınma deneyi vardır. Bunlardan birincisi; uygun geometrideki numunelerin birbirlerine karşı hareket ettirilmesiyle gerçekleştirilen deneylerdir. Bunlarda parametreler belli zamanlarda değiştirilir ve daha sonra bunlarla “aşınma oranı” arasında bağlantı kurulur. Bu tür testler, basit kıyaslamalı aşınma çalışmalarından, temel aşınma mekanizmalarını anlamak için yapılan, titizlikle kontrol edilen deneylere kadar çeşitlilik gösterir. İkinci grup deneyler, pratikte karşılaşılma olasılığı olan en kötü aşınma durumlarında yapılacakları gösteren deneylerdir.

Güvenilir sonuçlar elde etmek için en uygun test metodunu seçmek gereklidir. Temel aşınma testlerinde en yaygın olarak kullanılan numune geometrileri disk-üstü-pim ve silindir-üstü-pimdir.

8.3.1. Disk-üstü-pim aşınma cihazı

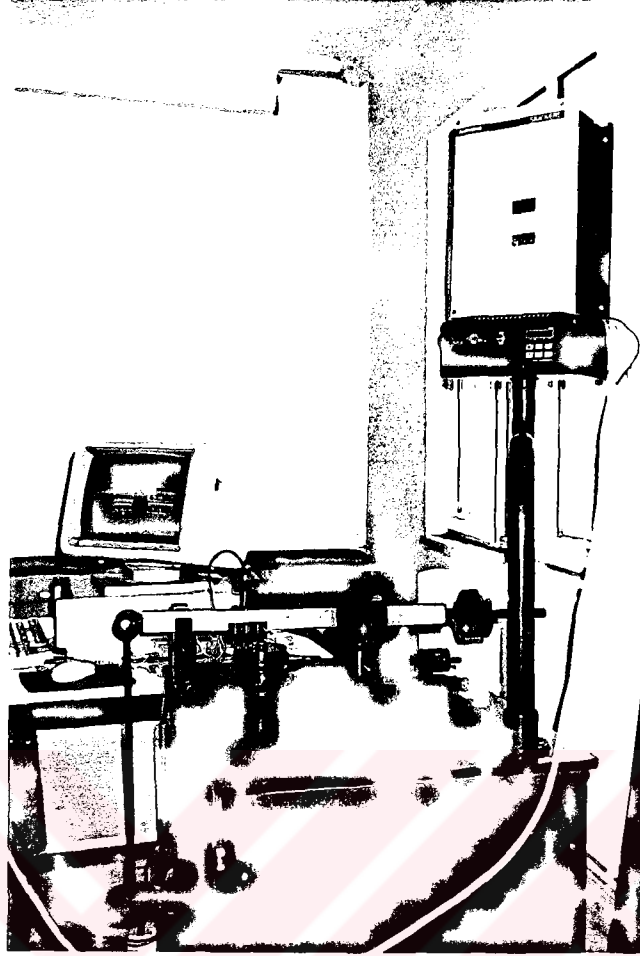
Bu cihazda sürtünme kuvveti ve aşınmanın miktarı iki adet doğrusal değişen diferansiyel transdüserler tarafından ölçülür. Her ikisi de potansiyometrik bir kayıt ediciye bağlanmışlardır [36].

Pim ve disk arasındaki sürtünme kuvveti, mesnet üzerine etki eden yük kolu üzerinde bir burulma meydana getirir. Bu mesnetin sapsması yatay olarak yerleştirilmiş olan doğrusal transdüserle ölçülür.

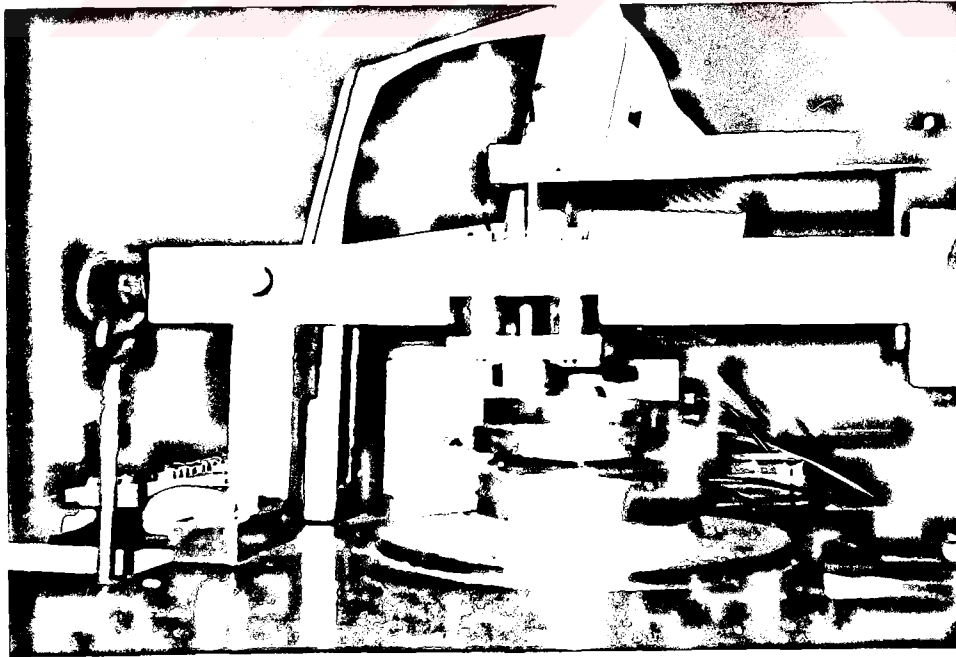
Aşınma, dikey olarak yerleştirilen doğrusal transdüser aracılığıyla deney piminin uzunluğundaki değişme olarak ölçülür.

Sürtünme kuvvetleri mesnete yük asılmak suretiyle uygulanan statik yüklerin bir kart üzerinde kayıt edilmesiyle ayarlanır [36].

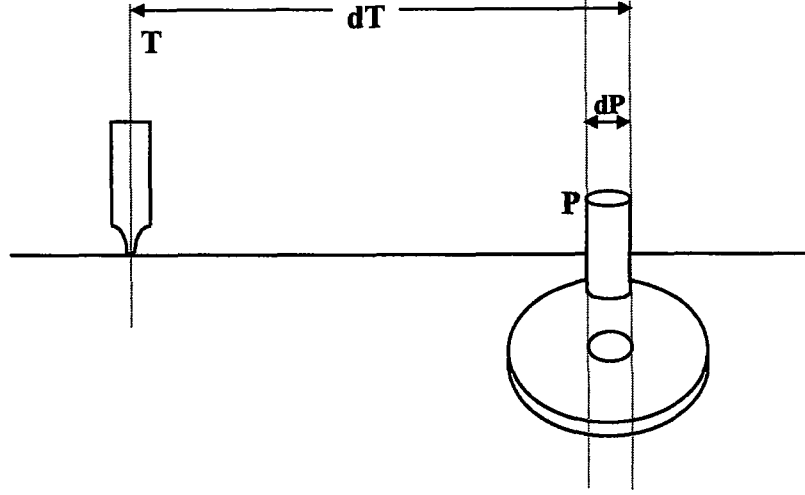
Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’da disk-üstü-pim aşınma deney cihazının fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 8.5. Disk-üstü-pim aşınma deney cihazı



Şekil 8.6. Disk-üstü-pim aşınma deney cihazı



Şekil 8.7. Disk-üstü-pim testinin şematik gösterimi

Şekil 8.7’de disk-üstü-pim aşınmasının şematik gösterimi verilmiştir. Burada P; deney numunesi olan pimi, T ise; pimin uzunluğundaki değişmeyi ölçen transdüseri simgelemektedir. Pim üzerine etki eden kuvvete F_p , transdüser üzerindeki kuvvete F_T ve pimin diskin bir kez dönmesiyle katettiği mesafeye de dP dersek;

$$F_T \cdot dT = F_p \cdot dP \quad (8.1)$$

olur. Cihaz üzerinden alınan ölçümlere göre $dT = 38$ cm ve $dP = 26.1$ cm’dir. F_T değeri daha önceden yapılmış olan voltaj(V)-aşınma miktarı(gr) kalibrasyonundan ortalama voltajın karşılığı olarak bulunur.

Bütün bu verileri eşitlik (8.1)’de yerlerine koyduğumuzda F_p değeri kendiliğinden açığa çıkacaktır. Eşitlik (3.3)’teki bağıntıya göre;

$$F_p = \mu \cdot N \quad (8.2)$$

Burada N; uygulanan normal yük, μ de sürtünme katsayısıdır. Bu yöntemle 10N, 20N ve 40N’luk uygulanan yüklerde ZA-8, 12, 27 ve RB-1, 4, 7 alaşımlarının sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

8.3.2. İşlem değişkenleri

Yük: Deneyler 10 N, 20 N ve 40 N'luk yüklerde yapılmış olup, bu da sırasıyla pim üzerinde 0,37 MPa, 0,73 MPa ve 1,46 MPa'lık bir basma gerilmesi meydana getirmektedir.

Dönme hızı: Deneylerde kullanılan hız sabit olup 1 m/s 'dir.

Kayma mesafesi: İki saat boyunca sürekli olarak dönen disk bu süre sonunda her bir deneyde 7200 m yol almış olur.

8.3.3. Aşınma deneyi prosedürü

1. Pim ve diskin birbiriyle tam olarak teması sağlanmalıdır. Bunun için deney pimleri aşındırıcı kağıtlar yardımıyla tam düz ve pürüzsüz bir yüzey elde edilinceye kadar zımparalanır.
2. Hem test pimleri hem de disk metil alkol içinde ultrasonik titreşimlerle temizlenir.
3. Kütlesel kayıpları tespit etmek için pimin deneyden önceki ilk ağırlığı tartılarak kaydedilir. Tartımlar, 10^{-4} hassasiyete sahip GEC AVERY marka terazide yapılmıştır.
4. Test pimi, aşınma makinasının yük kolu üzerindeki yerine monte edilir ve gerekli yük ve hız uygulanır.
5. Sürtünme ve aşınmayı ölçecek doğrusal transdüserler kaydedicide sinyal olarak sıfırı gösterecek biçimde ayarlanır. Daha sonra tam yükleme yapılarak deney başlatılır.
6. Gerekli dönme mesafesine erişildiğinde deney durdurulur. Bu çalışmada, disk üstü pim yöntemiyle yapılan aşınma deneylerinin her biri ikişer saat sürmüştür.
7. Deneylerden sonra pimlerin ağırlığı tekrar tartılarak kaydedilir. Aradaki farktan ağırlık kaybı tespit edilmiş olur.

8.3.4. Yatak aşınması deney cihazı

ZA-8, ZA-12, ZA-27 ve Bronz alaşımlarının yüksek hızlarda ve yüksek yüklerde aşınma yatağı olarak kullanımlarının incelenmesi ve performanslarının ölçülmesi amacıyla bir deney cihazı oluşturuldu. Bu cihazın fotoğrafları Şekil 8.8 ve Şekil 8.9’te görülmektedir.

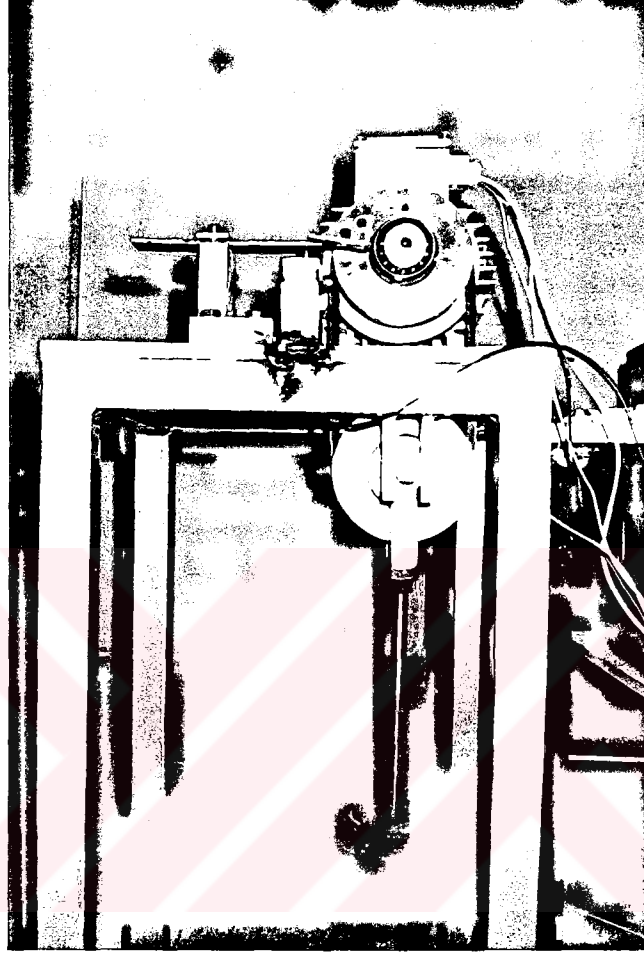
Cihazın oluşumu ve çalışma biçimini şu şekilde tanımlayabiliriz: Bir Siemens marka üç fazlı motorun göbeğine çapı 24.8 mm olan bir mil geçirilmiş ve sabitlenmiştir. Bu mil indüksiyon sertleştirme yöntemiyle sertleştirilen bir mildir. Burada istenen aşındırılacak yatak numunesinden daha sert bir aşındırıcı elde etmektir.

Deney numunesi olan yatak bir yuvada sıkıştırılır. Daha sonra radyal dikey bir yükleme sistemi altında mile karşı yüklenir. Ağırlıklar bir kayış ve kasnak yardımıyla asılır. Mil döndürülmeye başlandığında, yatakla mil arayüzeyinde oluşan sürtünme direncini yenebilmek için bir kuvvet açığa çıkarır. Bu kuvvet, dönme yönünde mil eksenine boyunca yuvayı oynatmaya çalışan bir moment meydana getirir. Bir yatay plakanın alt kısmına monte edilmiş bir transdüser yardımıyla bu momentin sonucunda plakada oluşan sapmalar voltaj olarak değerlendirilir ve bilgisayarın kartında toplanır.



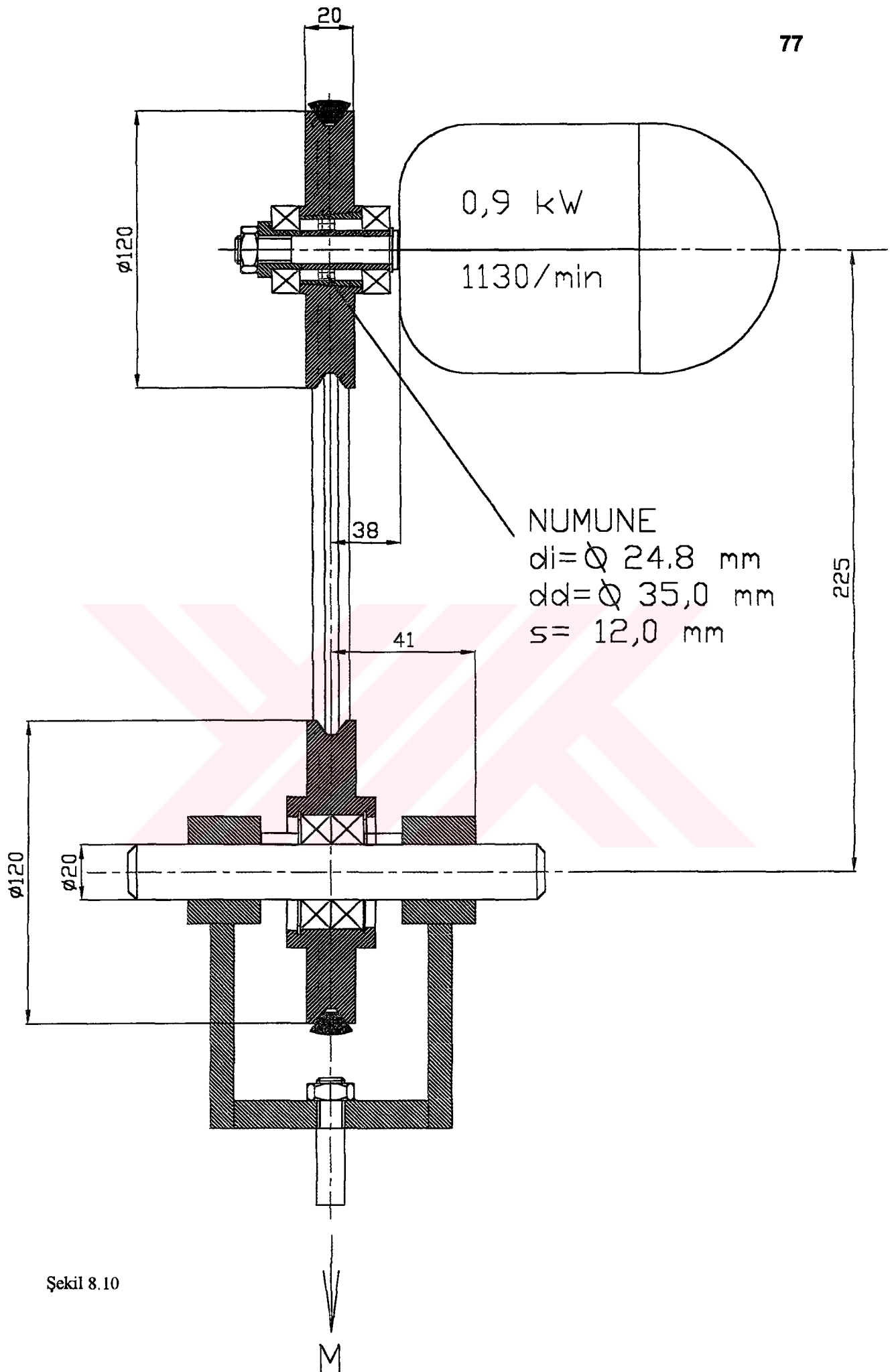
Şekil 8.8. Yatak aşınması deney cihazı

Burada her 10 saniyede bir defa okuma yapılarak bilgisayardaki kartta veriler toplanır. Yatağın toplam aşınma süresi iki saat olup milin dönme hızı 0.5 m/s olarak ayarlanmıştır.



Şekil 8.9. Yatak aşınması deney cihazı

Sanayide üretilmiş olan bu cihazın AutoCAD ile çizilmiş imalat resmi de Şekil 8.10'te görülmektedir.



Şekil 8.10

BÖLÜM 9. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

ZA-8, ZA-12, ZA-27 ve RB-1, RB-4, RB-7 numunelerinin hem disk-üstü-pim hem de yatak aşınması deneyleri sonrasında sürtünme katsayıları hesaplanmış, ağırlık ve hacimsel kayıpları bulunmuştur. 10N, 20N ve 40N'larda yapılan deneylerin bilgisayar kartında toplanan değerleri Excel ortamına aktarılmış ve disk-üstü-pim aşınma deneyi için birinci transdüserden alınan pim boyundaki azalmayı gösteren Voltaj(V)-Aşınma mesafesi(m) ve ikinci transdüserden alınan, sürtünme katsayısını bulmakta kullanılan Voltaj(V)-Kayma mesafesi(m) dataları grafik olarak gösterilmiştir.

Numunelerin isminden önce gelen sayılar deney sırasında uygulanan yükü göstermektedir.

Yatak aşınması deneyi sırasında sürtünme katsayısını tespit etmek için tek bir transdüser kullanılmıştır. Bu yüzden hacimsel kayıp hesaplanmayıp sadece hassas terazide tartım yapılarak ağırlık kaybı hesap edilmiştir.

Bunlardan disk-üstü-pim aşınma deneyine göz atıldığında ZA-alaşımının bronz alaşımından daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Şekil 9.1.a'da 10 N'luk normal kuvvette alaşımların sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Burada ZA-8, 0.530'luk değerle en düşük, RB-7 ise 0,637'lik değer ile en yüksek sürtünme katsayısına sahiptirler.

Şekil 9.1.b'ye bakıldığında, 20 N'da yine ZA-8'in sürtünme katsayısı değerinin en küçük olduğu görülmektedir. RB-1 ve RB-7 sırasıyla 0.585 ve 0.591 ile en yüksek değerlere sahiptirler.

40 N'luk yükle yapılan deneylerin sonuçları Şekil 9.1.c'de gösterilmiştir. Daha önceki iki durum burada da geçerliliğini korumuştur. Her üç yükte de ZA-alaşımlarının sürtünme katsayısı değerleri 0.5'ler mertebesindeyken bu durum RB-alaşımları için 0.6'lara yükselmiştir.

Şekil 9.2'de ise yatak aşınması deneyinden elde edilen sonuçlar bar grafikleri biçiminde verilmiştir. 10 N'da yapılan deneylerde ZA-27 en düşük sürtünme katsayısına sahiptir (0.57). RB-4, 0.73'lük değerle en yüksek μ 'ye sahiptir. 20 N'luk yük uygulandığında ise her üç bronz alaşımı da yaklaşık olarak aynı μ değerini göstermiştir (0.75). Şekil 9.2.c'de ise 40 N'daki deney sonuçları verilmiştir. 40 N yatak aşınması deney cihazında oldukça yüksek bir yükür, yataktan gelen aşınma sesleri ve gürültü artar. Aşınma izleri daha belirginleşir. Yine 40 N'da da ZA-27'nin sürtünme katsayısı değeri diğer beş numune içinde de, kendi ZA-alaşımları içinde de en düşüktür.

Şekil 9.3 ve Şekil 9.4'te ağırlık kaybı sonuçları verilmiştir. Her iki deneyde de bronz numuneler çok bariz bir biçimde aşınmıştır. 10 N yükte her iki deneyde de en çok ağırlık kaybına uğrayan RB-1'dir. Aşınma dayanımı en iyi kabul edilen ZA-27 burada da en az ağırlık kaybına uğrayan numune olmuştur. ZA-alaşımları içinde ZA-27'yi ZA-12 ve ZA-8 izlemektedir. Bronz numunelerde ise en az ağırlık kaybına uğrayan RB-7, sonra sırasıyla RB-4 ve RB-1'dir. Sıralamanın 20 N ve 40 N'luk yüklerde değişmediği görülmüştür.

Yapılan ağırlık ölçümleri sonunda 10 N'luk yükte bronz alaşımlarının ZA-alaşımlarından yaklaşık 4 kat, 20 N'da 9 kat ve 40 N'da da 14 kat fazla aşındığı ortaya çıkmıştır.

Uygulanan normal yük arttıkça, bulunan ağırlık kayıpları da artmıştır.

ZA-alaşımları içinde de aşınma mukavemeti en iyi olan, her üç yükte de ağırlık kaybı en az olan alaşım, ZA-27 olmuştur.

Disk-üstü-pim aşınma deneylerinde sistem iki adet transdüser kullanımına olanak

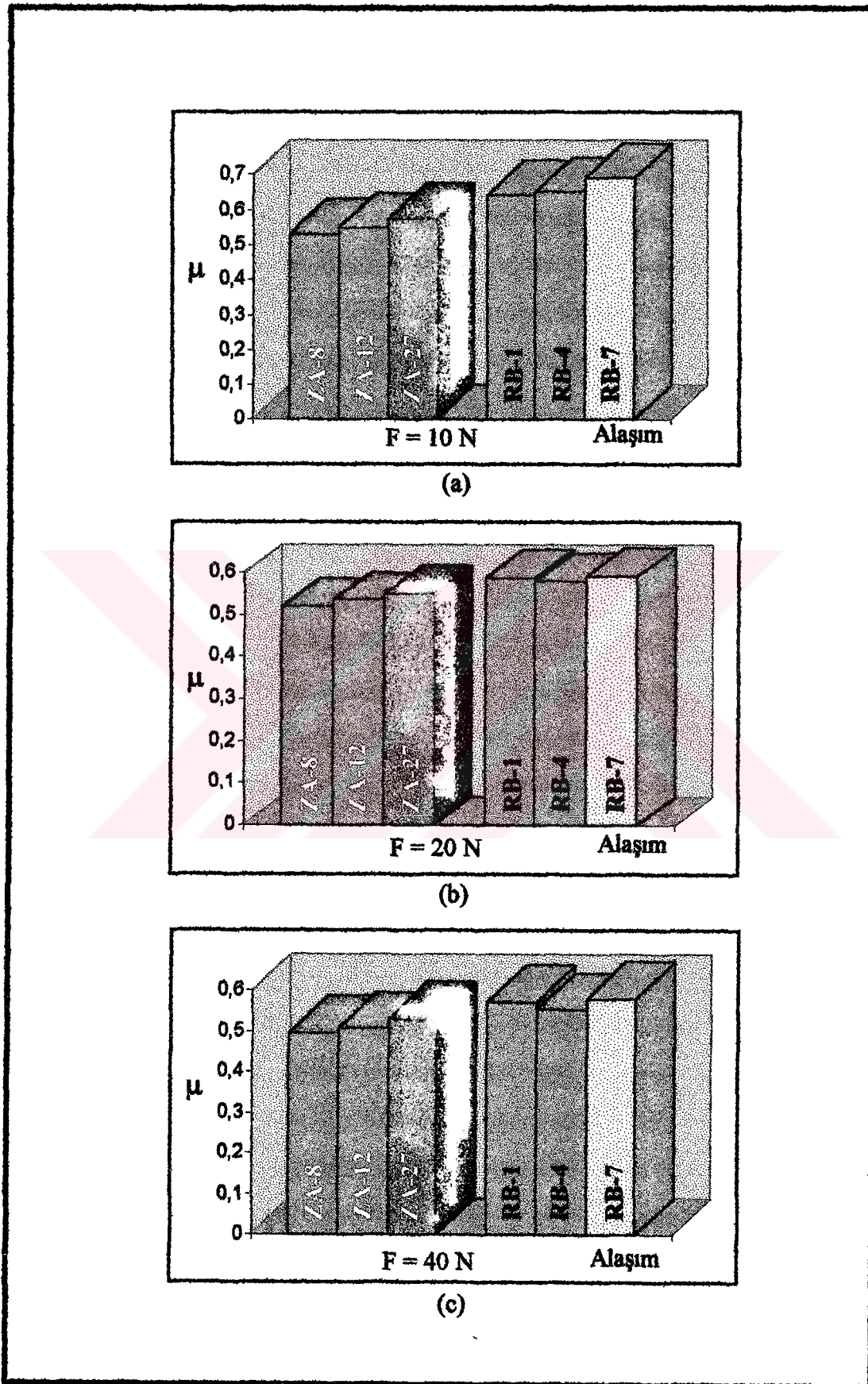
vermiştir. Bunlardan biri sürtünme katsayısı tespitinde kullanılmış, diğer transdüserle de numune boyundaki azalma dolayısıyla hacimsel kayıp ölçülmüştür. Yatak aşınması deney cihazında ise sadece tek bir transdüser kullanımına olanak vardır ve bu da sürtünme katsayısını belirlemede kullanılmıştır.

Buna göre, disk-üstü-pim aşınma cihazındaki azalışı gösteren transdüserden alınan veriler iki saatlik deney süresi sonunda voltaj(V)-aşınma mesafesi(m) olarak grafiğe dökülmüştür. Grafiklerden görüldüğü gibi aşınma miktarı artan voltaj değeri ile birlikte doğrusal olarak artmaktadır. Yine burada da dikkat çeken nokta ZA-alaşımının grafikleri düşük bir eğime sahip iken RB-1, RB-4 ve RB-7 olarak belirtilen bronz alaşımının çok daha dik eğimlere sahip oluşlarıdır. Bu da onlardaki boyut azalışının yani hacimsel kayıpların daha çok olduğunu göstermiştir. Artan normal yüklerle birlikte voltaj-aşınma mesafesi grafiklerinin eğimleri, her iki tür numune grubu için de artmıştır.

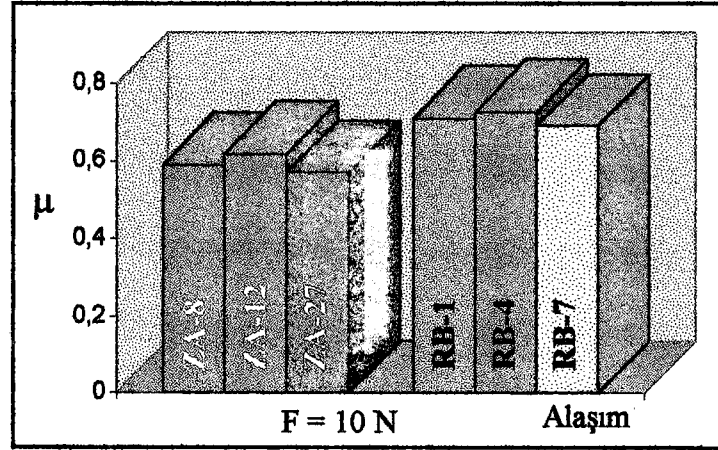
Yatak aşınması deneyinden elde edilen grafiklerin başlangıç kısımlarında bir zikzaklanma görülmektedir. Bu, deneyin başlangıcında milin, yatağın iç kısmını birden bire aşındırmasından (chipping off) kaynaklanmaktadır. Mil yüzeyi ile yatağın aşınan yüzeyi ve dolayısıyla burada oluşan aşınma izleri kendi aralarında belli bir düzene girince sapmalar (zikzaklanmalar) azalmış ve belli bir değer aralığında zamanla sabitlemiştir. Burada sürtünmeden dolayı numuneden kopan çok küçük parçacıklar mil ile yatağın aşınan yüzeyi arasındaki temas alanını azaltmakta, dolayısıyla sürtünme katsayısı azalmaktadır. Sürtünme katsayısı (μ) değerleri, daha önceden yapılan kalibrasyondan elde edilen veriler ışığında bu ortalama voltaj değerleri kullanılarak hesap edilmiştir.

Her iki deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 9.1 ve Tablo 9.2’de gösterilmiştir.

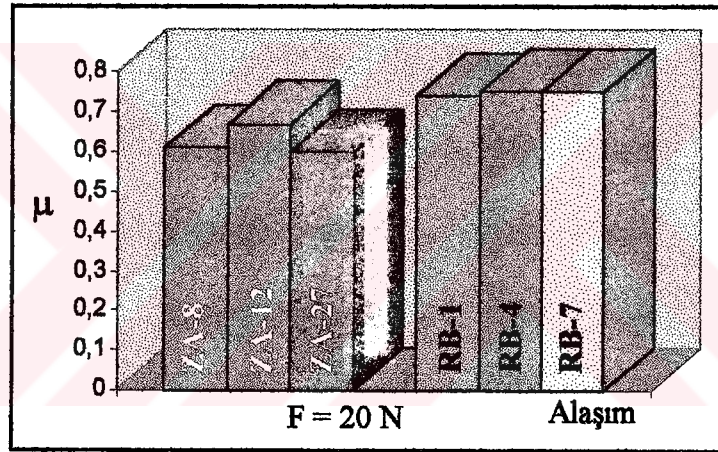
Bu deneylerin grafikleri Ek A’da gösterilmiştir. Bunlardan “-ring” olarak gösterilenler yatak aşınması deneyinin grafikleridir.



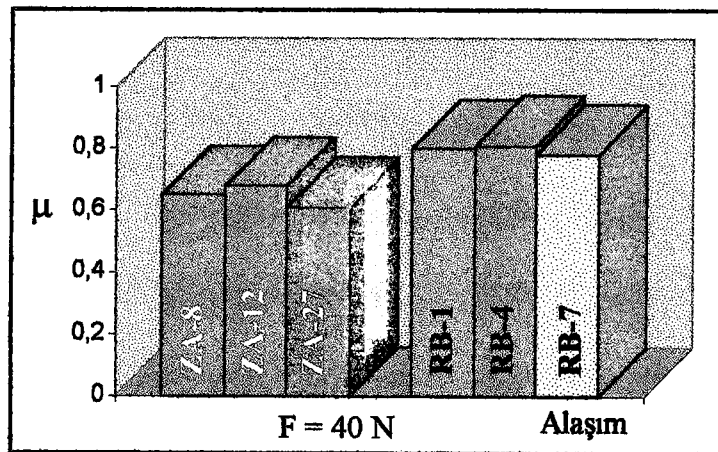
Şekil 9.1. Disk-üstü-pim aşınma deneyi sürtünme katsayısı sonuçları



(a)

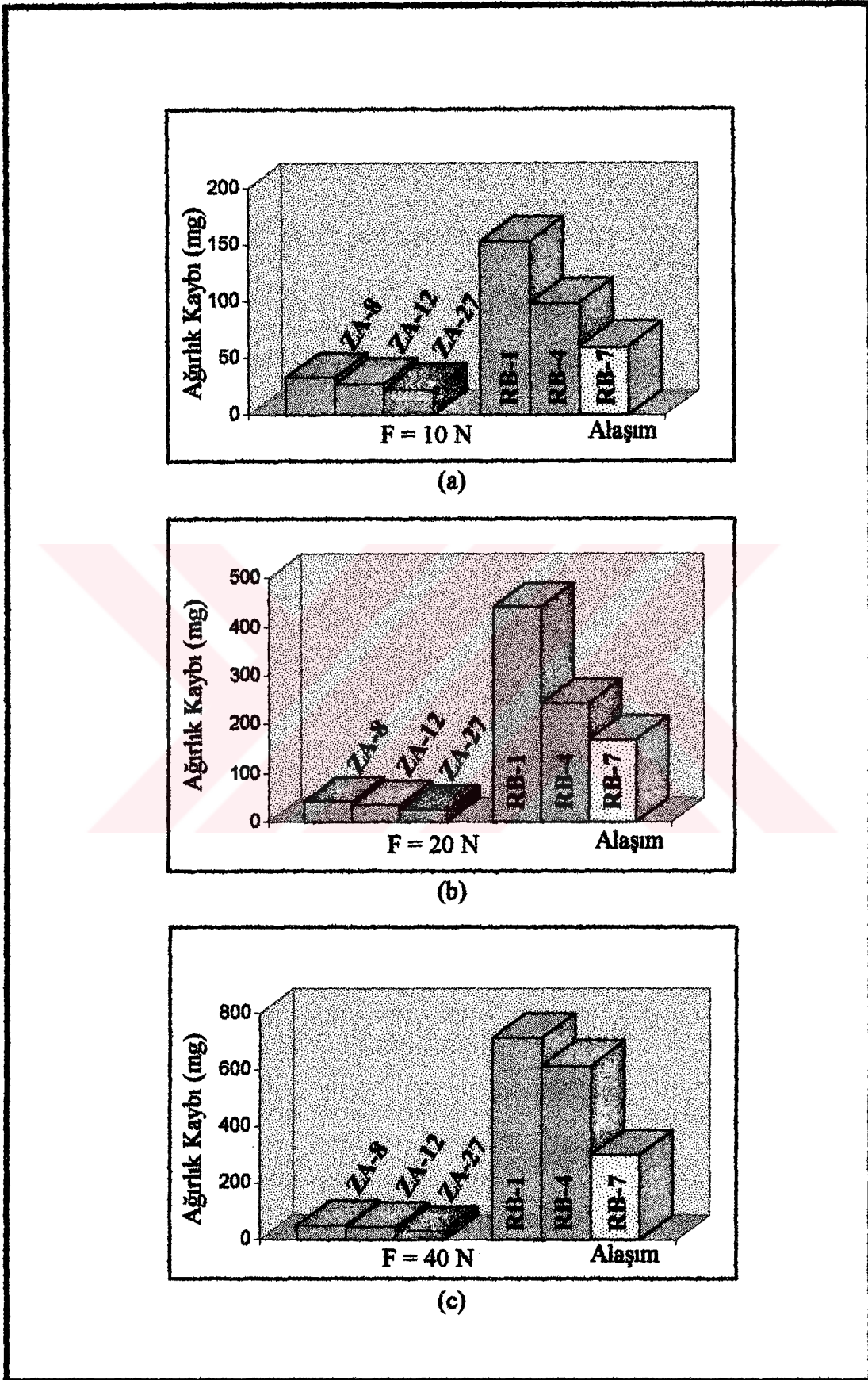


(b)

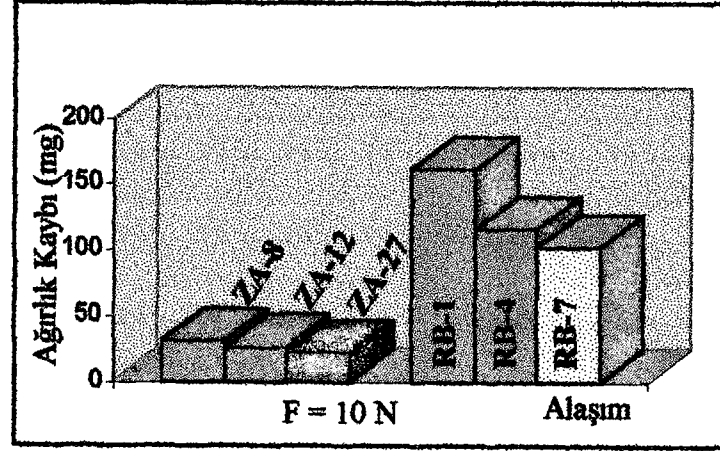


(c)

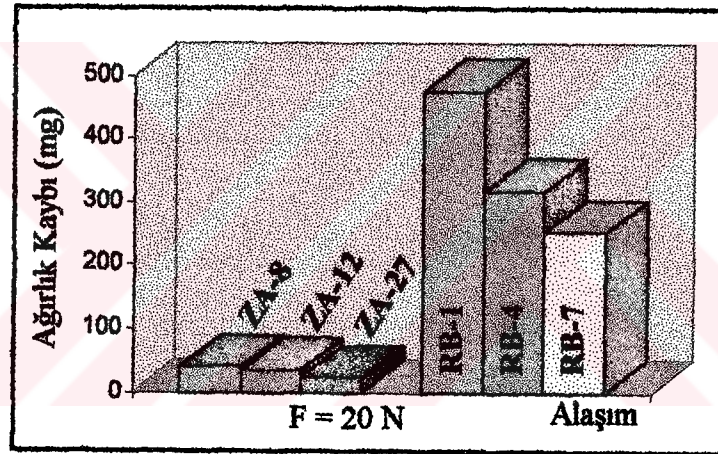
Şekil 9.2. Yatak aşınması deneyi sürtünme katsayısı sonuçları



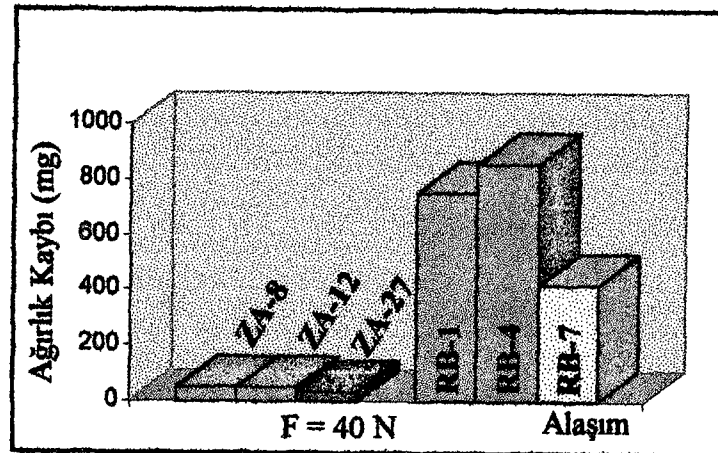
Şekil 9.3. Disk-üstü-pim aşınması ağırlık kaybı sonuçları



(a)



(b)



(c)

Şekil 9.4. Yatak aşınması deneyi ağırlık kaybı sonuçları

Tablo 9.1: Disk-üstü-pim aşınma deneyi sonuçları

NUMUNE	YÜK (N)	HACİMSEL KAYIP (mm ³)	DENEYSEL AĞIRLIK KAYBI (mg)	SÜRTÜNME KATSAYISI (μ)	W _{HACİM} (mm ³ /km)	W _{KÜTLE} (mg/km)
ZA8	10	9.02	32.4	0.530	1.25	4.50
	20	16.13	41.8	0.519	2.24	5.80
	40	24.33	49.4	0.495	3.38	6.86
ZA12	10	5.20	27.3	0.547	0.72	3.79
	20	13.67	33.7	0.534	1.90	4.68
	40	23.79	44.1	0.506	3.30	6.12
ZA27	10	9.57	22.3	0.573	1.33	3.10
	20	11.48	24.1	0.555	1.59	3.35
	40	23.51	30.2	0.528	3.26	4.19
RB1	10	14.11	153.0	0.641	1.96	21.25
	20	25.15	440.6	0.585	3.49	61.2
	40	32.53	714.3	0.571	4.52	99.2
RB4	10	21.60	98.9	0.650	3.00	13.74
	20	32.58	242.7	0.579	4.52	33.71
	40	33.63	615.2	0.553	4.67	85.44
RB7	10	15.30	60.0	0.637	2.12	8.33
	20	21.45	169.3	0.591	2.98	23.51
	40	34.81	301.5	0.580	4.83	41.88

Tablo 9.2: Yatak aşınması deney sonuçları

NUMUNE	YÜK (N)	DENEYSEL AĞIRLIK KAYBI (mg)	SÜRTÜNME KATSAYISI (μ)	W _{KÜTLE} (mg/km)
ZA8	10	30.5	0.59	8.47
	20	38.9	0.61	10.80
	40	50.0	0.65	13.89
ZA12	10	25.8	0.62	7.17
	20	34.9	0.67	9.69
	40	49.1	0.68	13.64
ZA27	10	21.5	0.57	5.97
	20	23.1	0.60	6.42
	40	33.0	0.61	9.17
RB1	10	161.3	0.71	44.80
	20	475.8	0.74	132.17
	40	751.2	0.80	208.67
RB4	10	115.5	0.73	32.08
	20	318.0	0.75	88.33
	40	850.4	0.81	236.22
RB7	10	101.7	0.69	28.25
	20	253.8	0.75	70.50
	40	420.5	0.78	116.80

BÖLÜM 10. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, son zamanlarda kullanılmaya başlanan çinko-alüminyum (ZA) alaşımlarının kuru sürtünme koşullarında aşınma davranışları hakkında birtakım sonuçlar elde etmektir. Eskiden beri kullanılan kurşunlu, kalaylı-bronzlar ile bu ZA-alaşımlarının kıyaslamalı olarak aşınma performanslarının belirlenmesi ve aşınma olayını kontrol eden faktörleri anlayarak tanımlanmış deney koşulları altında karakterize edilebilmesi hedeflenmiştir.

Bu amaçla disk-üstü-pim aşınması ve yatak aşınması şeklinde iki farklı tür aşınma deneyi yapılmıştır. Bu deneylerden çıkan sonuçlar şu şekildedir:

1. Deneyler sırasında bronz mamuller çok fazla aşınmıştır. Hatta önceden belirlenmiş kayma mesafesinde tam olarak dönmeden boyları kısalmıştır.
2. Bundan dolayı bronz malzemeler için herhangi bir belirli basınç tespit edilememiştir. Oysa ki, çinko-alüminyum esaslı malzemeler bronzdan daha iyi karakteristik özellikler göstermişlerdir.
3. Disk-üstü-pim aşınması deneyleri 10 N, 20 N ve 40 N'luk üç değişik yükte her iki numune grubuna uygulanmıştır. Her üç yükte de bronz numunelerin sürtünme katsayılarının (μ), çinko-alüminyum esaslı numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür.
4. Sürtünme katsayısının tespiti için aynı çalışma yatak aşınması deney cihazıyla da yapılmış ve RB1, RB4, RB7 olarak adlandırılan bronz numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin, ZA8, ZA12, ZA27 olarak adlandırılan çinko-alüminyum esaslı numunelerinkinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
5. Yatak aşınması deneyinden elde edilen grafiklerde görülen zikzaklanmalarla ilgili önemli bir nokta, ZA-alaşımlarında zikzakların bronz numunelerden daha az sürmesi ve daha çabuk kendilerini toparlamış olmalarıdır.

6. Uygulanan normal yük arttıkça yukarıda sözü edilen sapmalar yani zikzaklanmalar daha şiddetli olmuştur.
7. Çinko-alüminyum alaşımları ekonomiktirler. Yoğunlukları düşüktür. Döküm yoluyla üretilmeleri mümkündür. Şekillendirilmeleri için de daha az enerji gerekir.
8. Yatak uygulamalarında bu ZA-alaşımları iyi aşınma direnci sağlarlar. Ağır yükler altında ve orta hız koşullarında daha düşük sürtünme katsayısı olanağı sunarlar. Bu alaşımlar verimli, etkili olarak yavaştan orta hızlıya kadar olan tribolojik uygulamalarda kullanılır.
9. Bu çinko-alüminyum alaşımlarında malzemenin kalkmasına neden olan aşınma mekanizması sınırlıdır, bu durum kurşun-kalay brozları için de geçerlidir. Numunelerde abrasiv aşınma meydana gelmiştir.



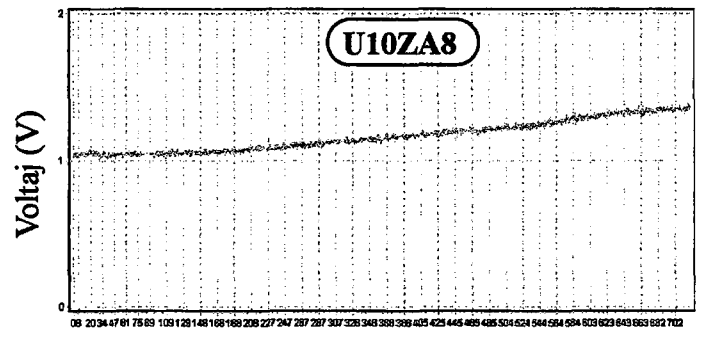
10.1. Öneriler

1. Bu çalışmada kuru sürtünme koşullarında meydana gelen aşınma davranışı incelenmiştir. Yatak aşınmasını araştırmak için sanayide yaptırılan deney cihazında yağlı ortamda aşınma deneyleri yapmak mümkündür. Hatta cihazın üzerinde, bir yağdanlıktan numunenin aşınacak yüzeyine yağ akışını sağlayacak bir kanal bile açılmıştır. Böylece hem ZA-alışımlarının hem de bronz malzemelerin yağlı ortamdaki aşınma davranışları incelenebilir.

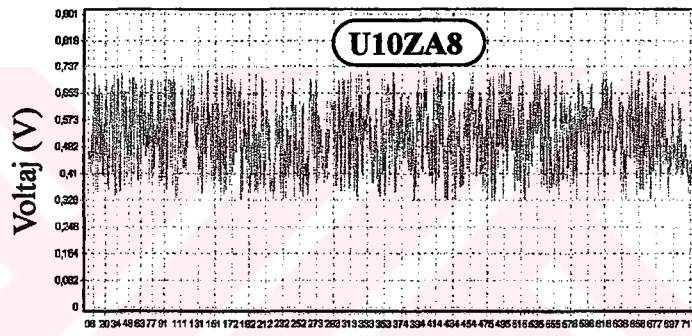
2. Disk-üstü-pim aşınma deneyi 1 m/s, yatak aşınması deneyi de 0.5 m/s'lik sabit hızlarda yapılmıştır. Aynı deneyler değişik hızlarda yapılabilir. Böylece deney hızının aşınma miktarına olan etkisi bir parametre olarak incelenebilir.

3. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların ışığında, aşınmanın meydana geldiği mühendislik uygulamalarında eskiden beri kullanılan bronz alışımlarının yerine aşınma dayanımları yüksek, mekanik özellikleri çok daha iyi olan ZA-alışımlarının kullanılabilceği görülmüştür.

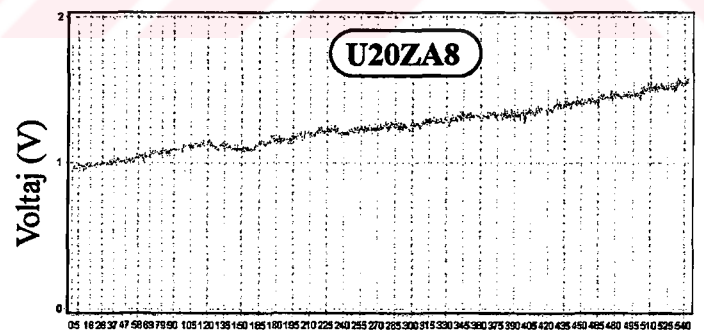
EK A



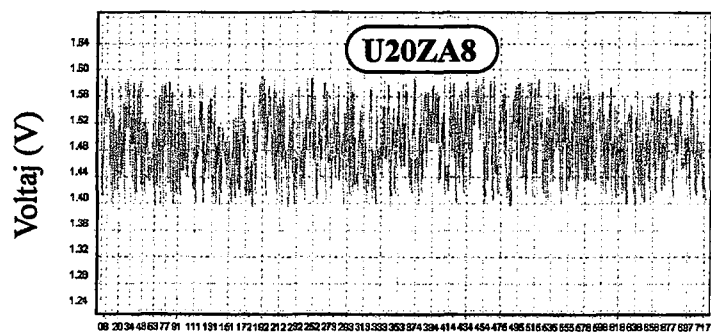
Aşınma Mesafesi (m)



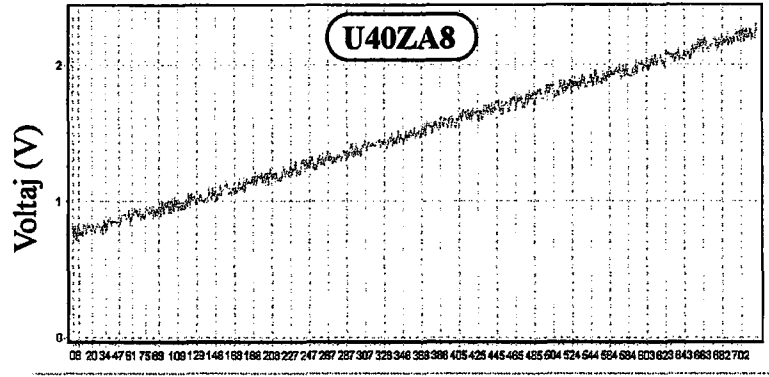
Kayma Mesafesi (m)



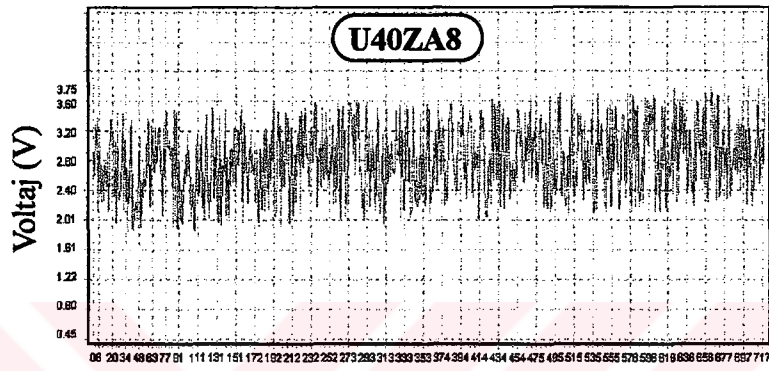
Aşınma Mesafesi (m)



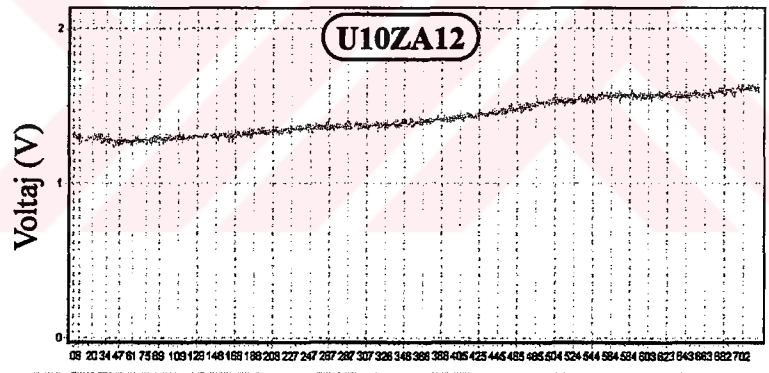
Kayma Mesafesi (m)



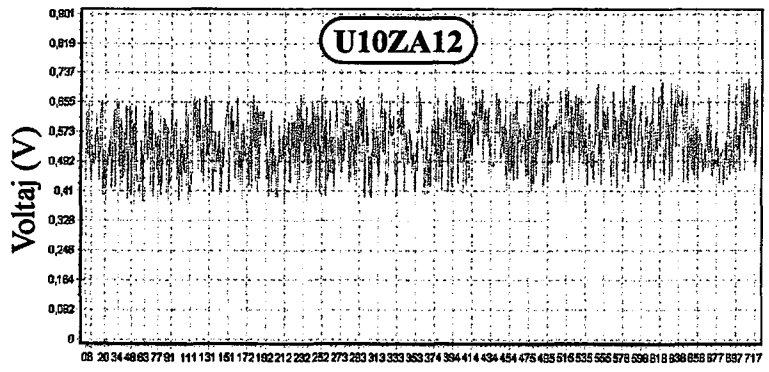
Aşınma Mesafesi (m)



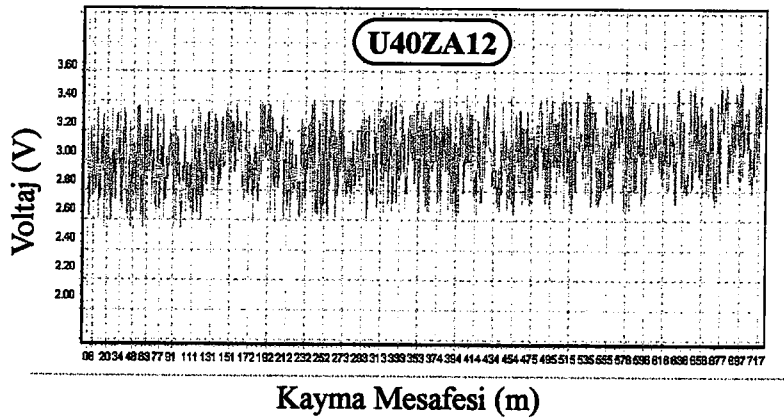
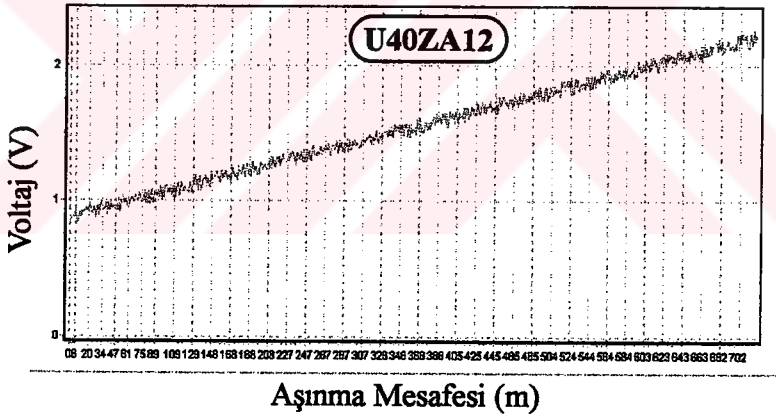
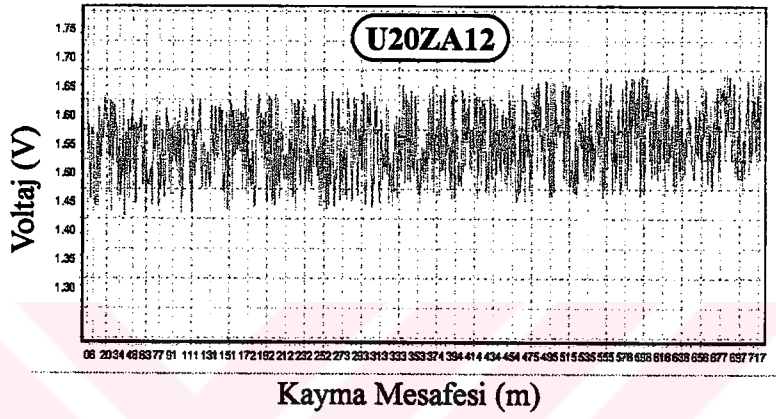
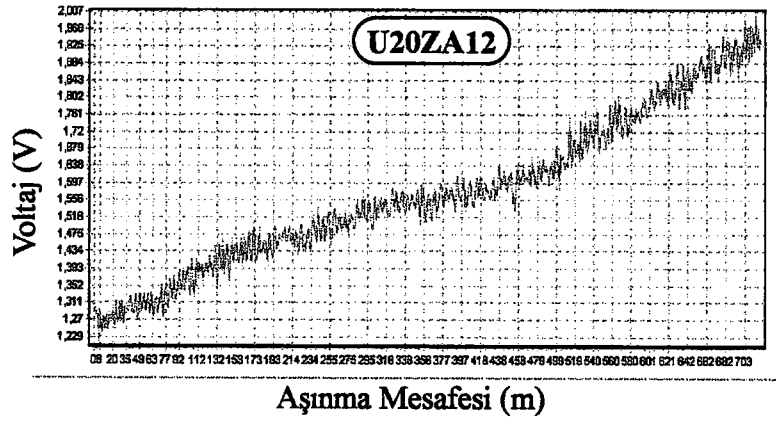
Kayma Mesafesi (m)

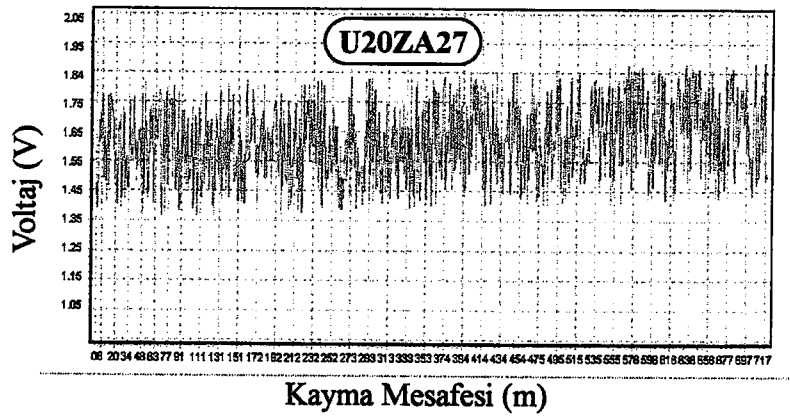
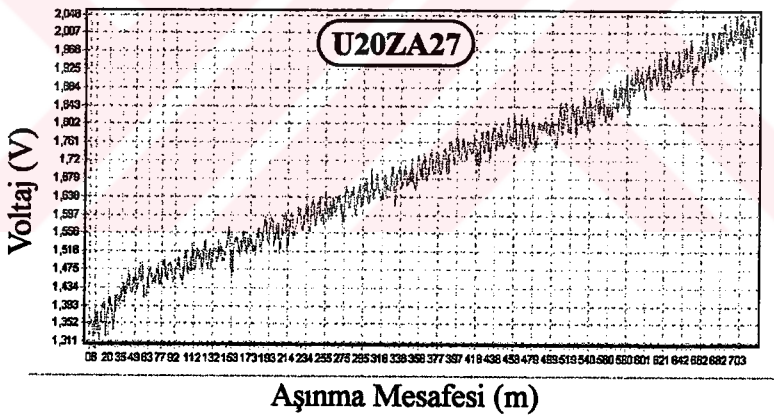
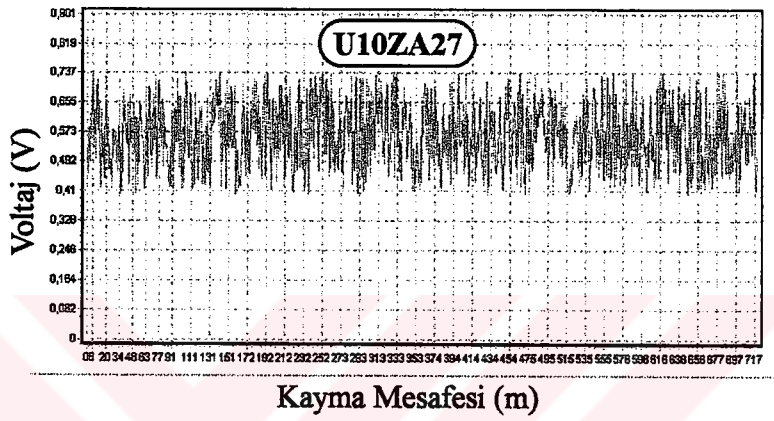
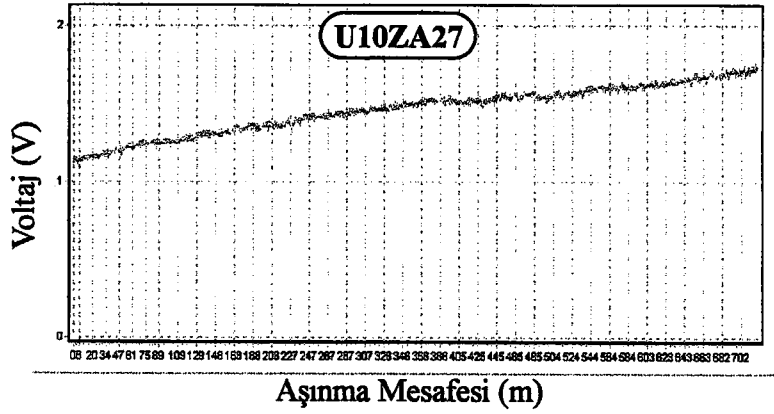


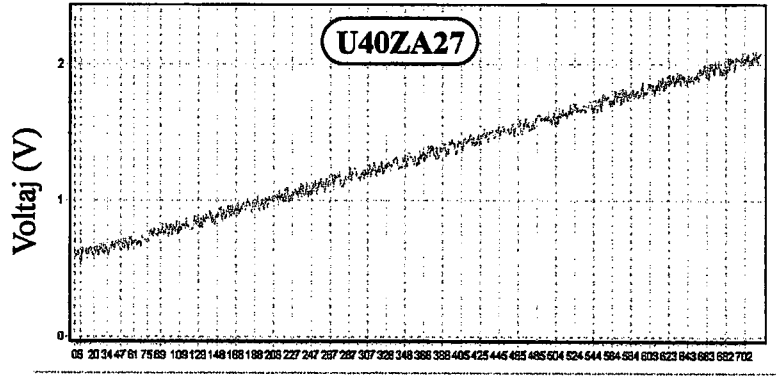
Aşınma Mesafesi (m)



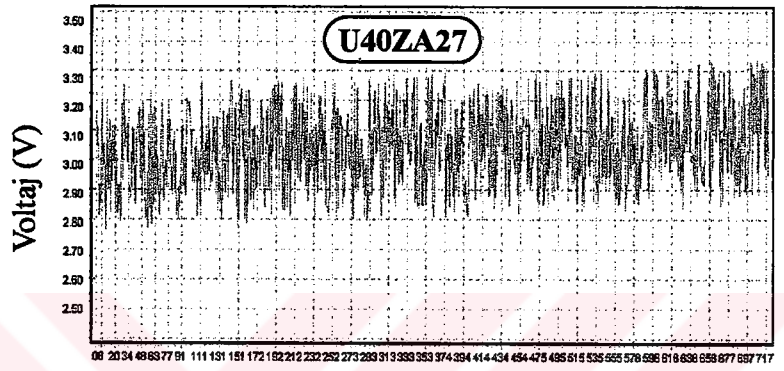
Aşınma Mesafesi (m)



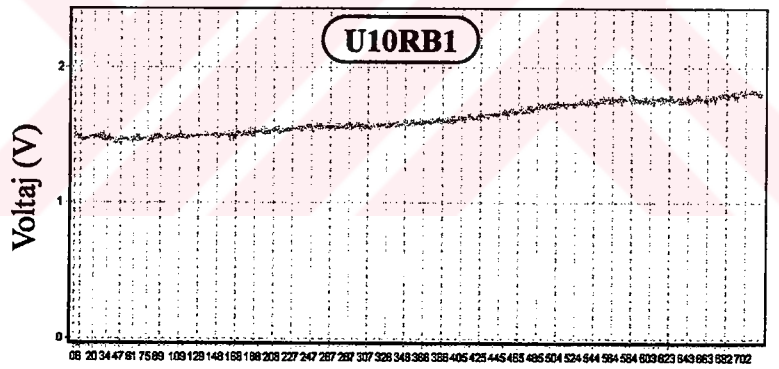




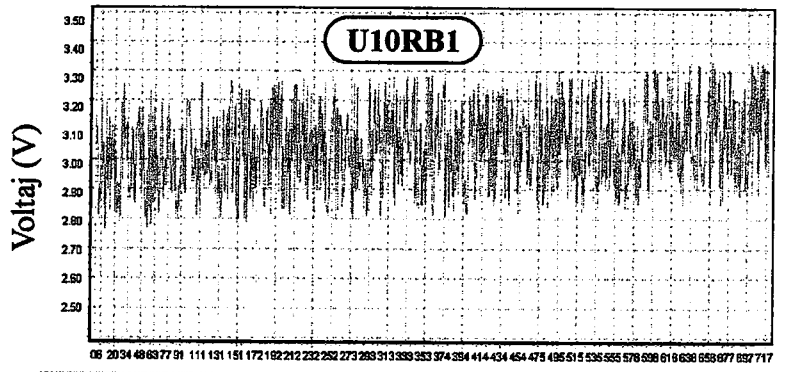
Aşınma Mesafesi (m)



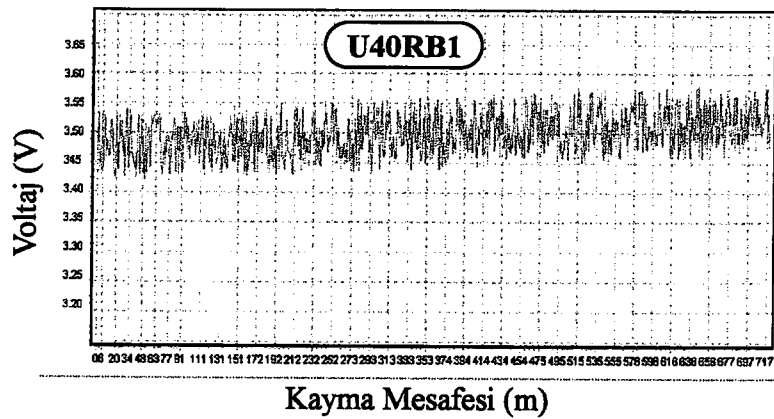
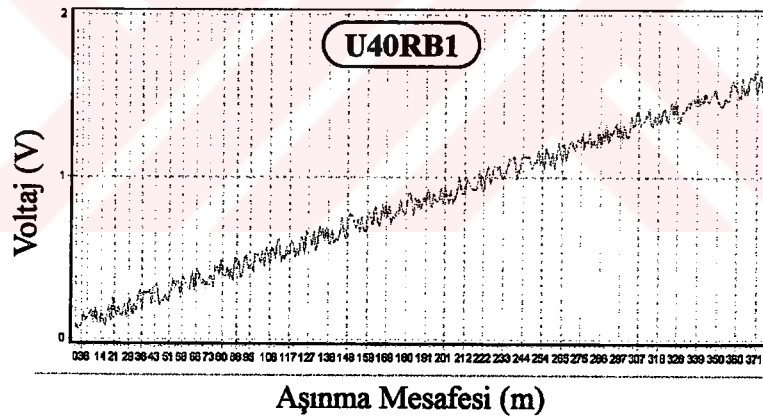
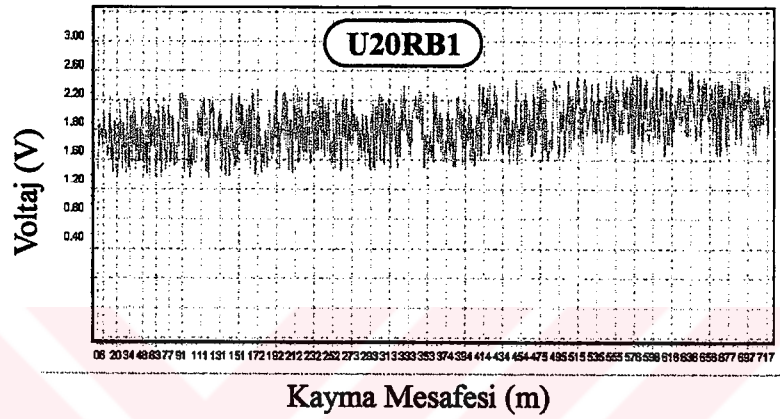
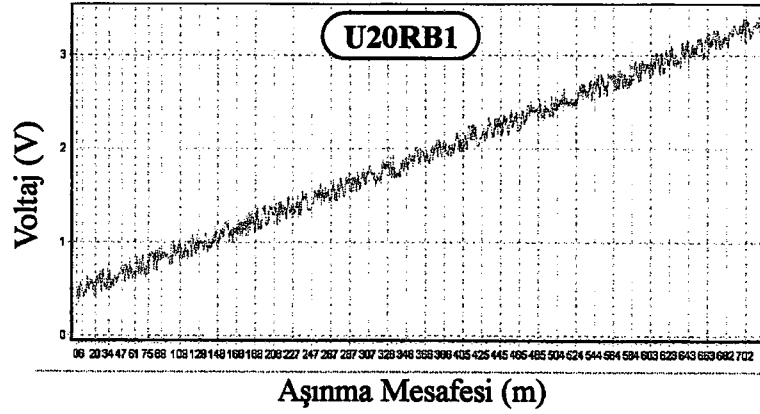
Kayma Mesafesi (m)

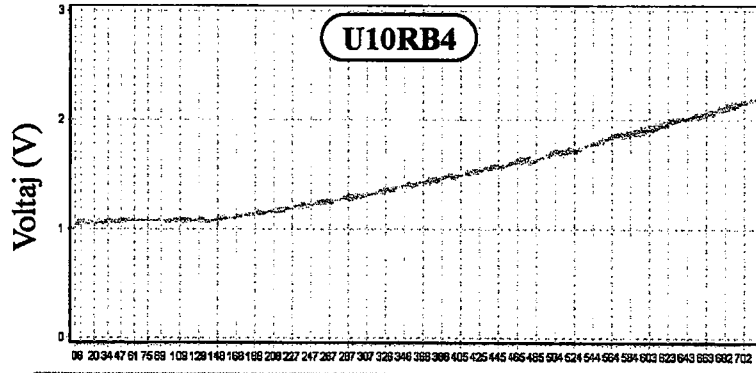


Aşınma Mesafesi (m)

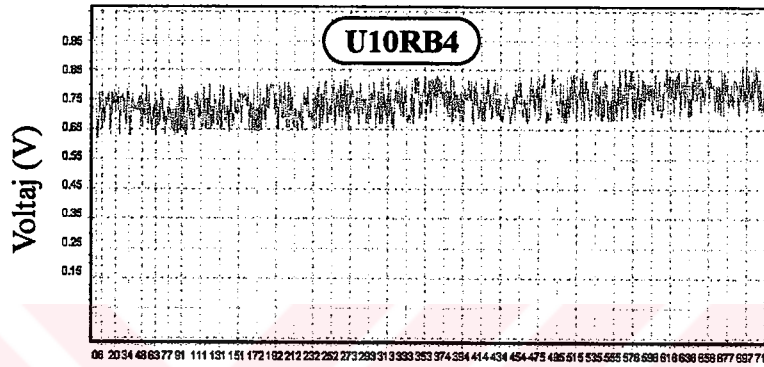


Kayma Mesafesi (m)

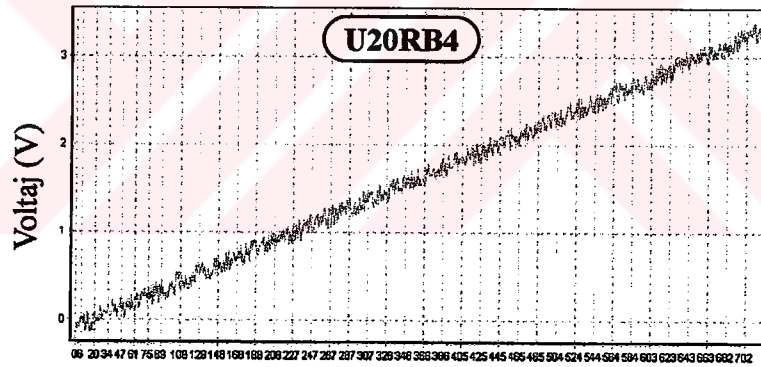




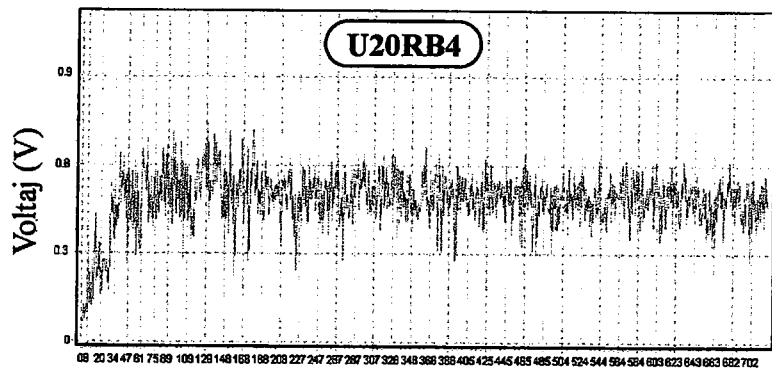
Aşınma Mesafesi (m)



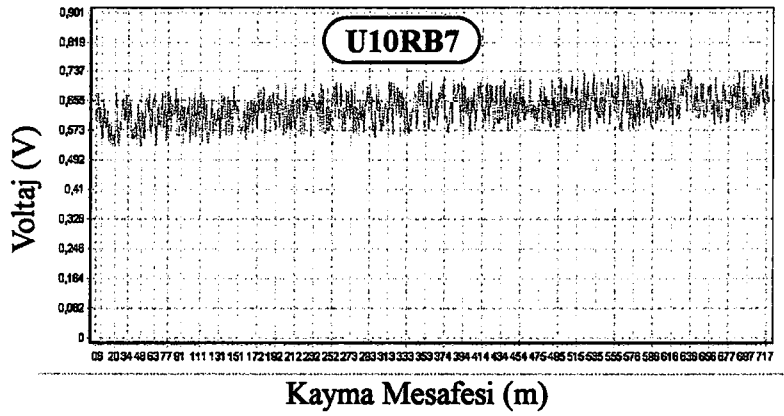
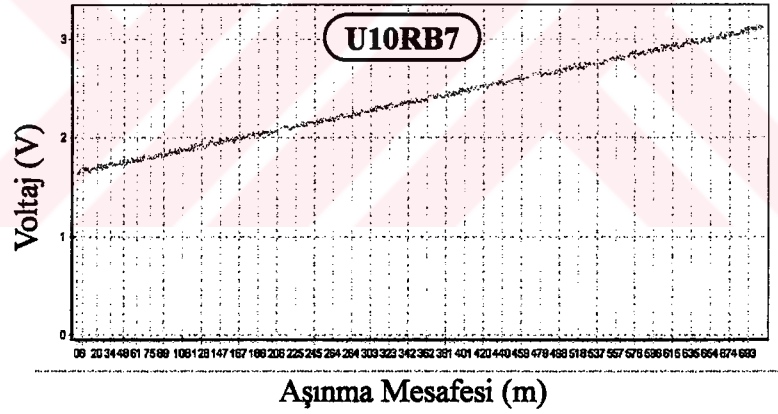
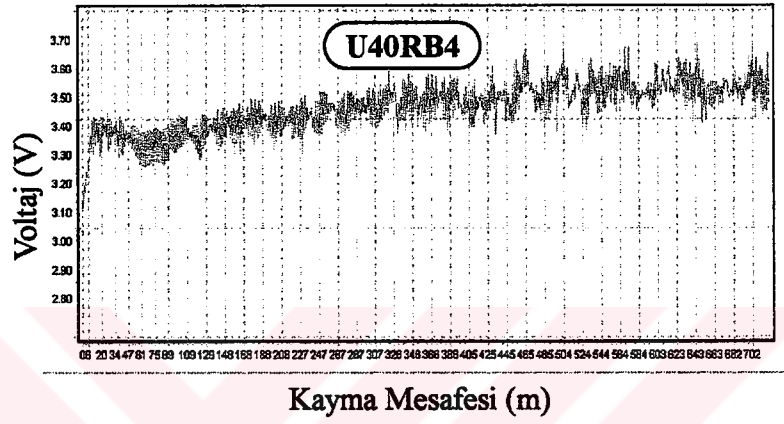
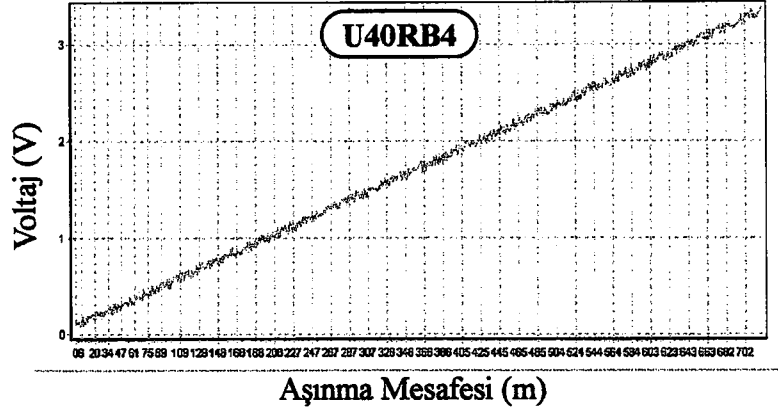
Kayma Mesafesi (m)

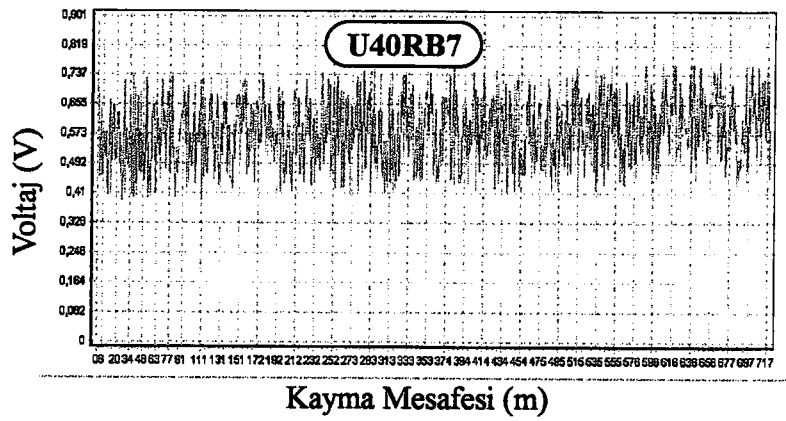
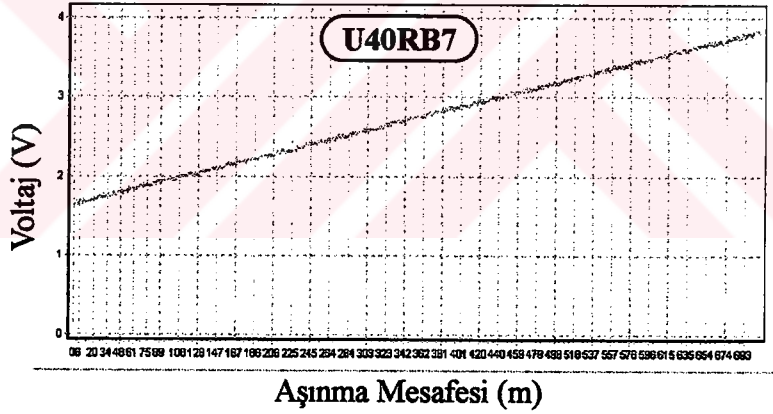
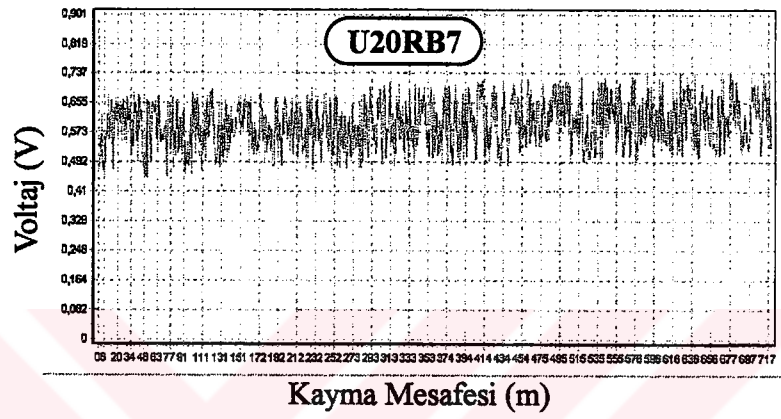
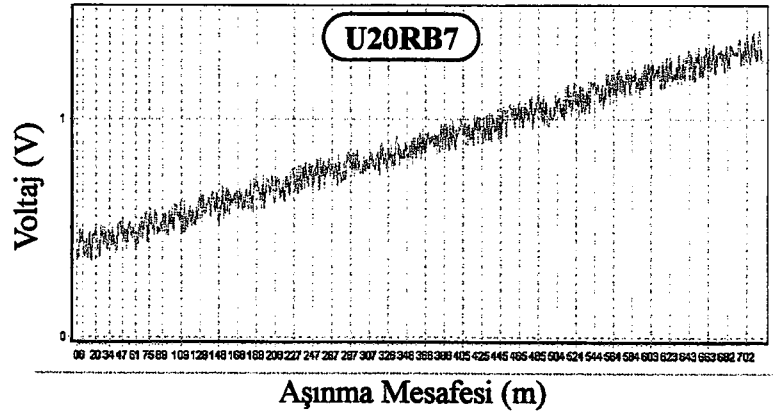


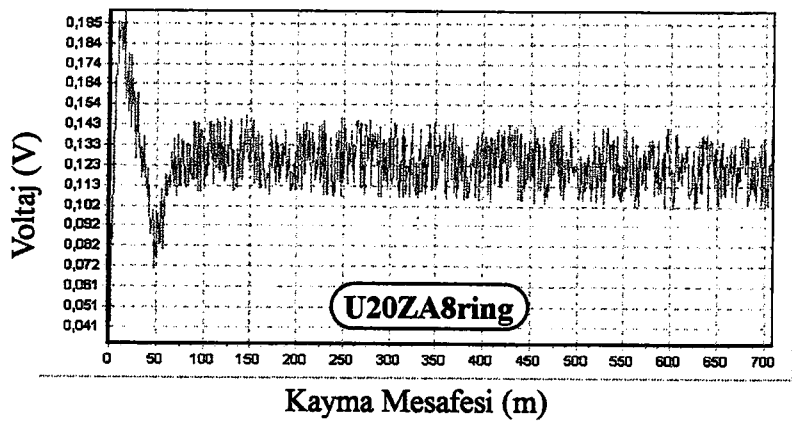
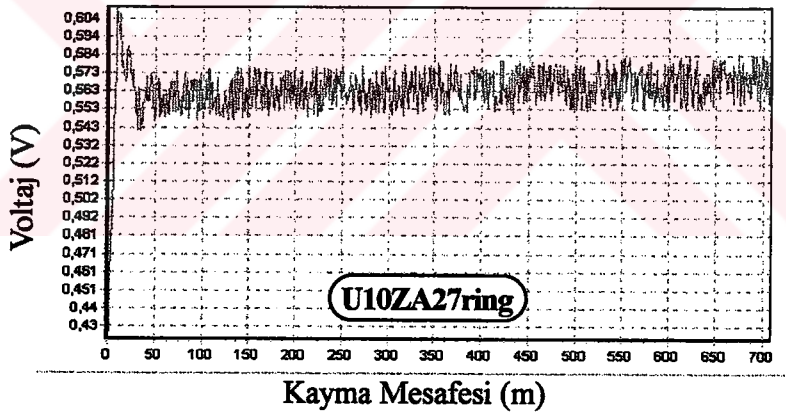
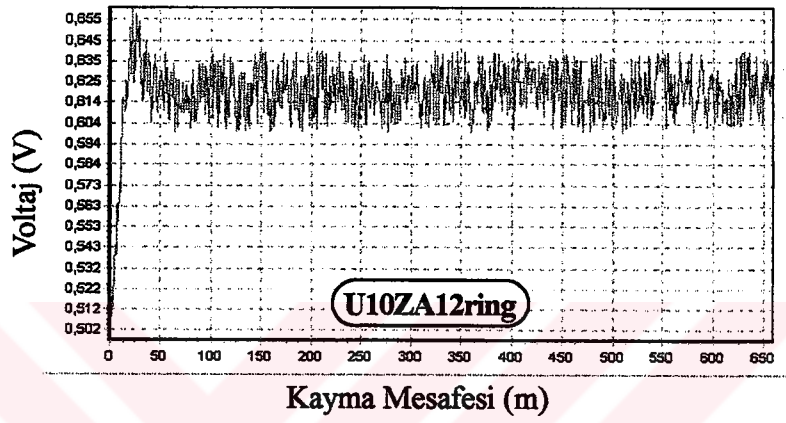
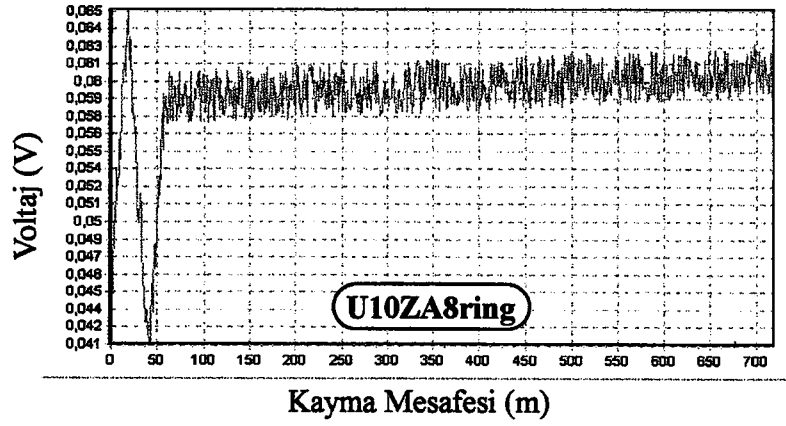
Aşınma Mesafesi (m)

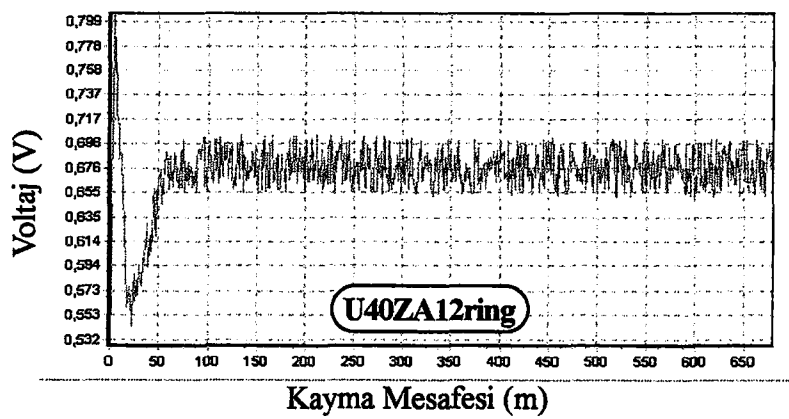
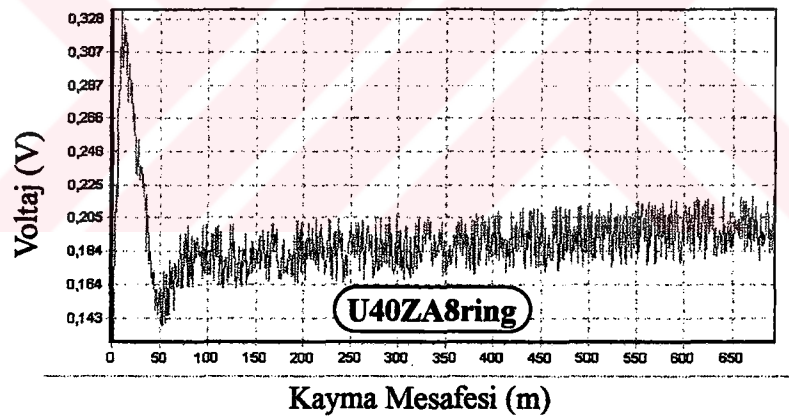
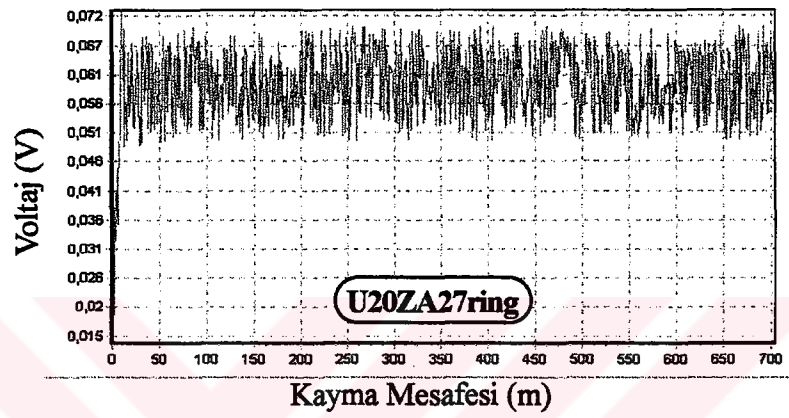
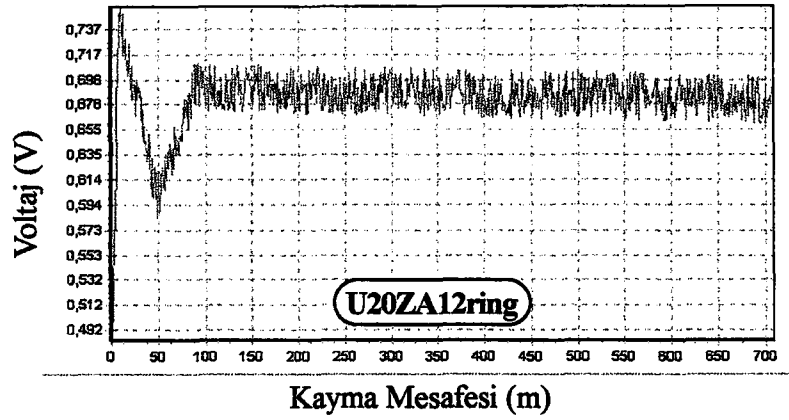


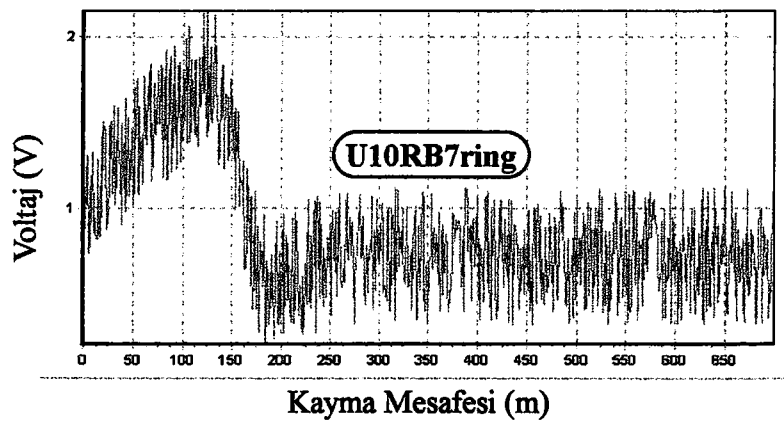
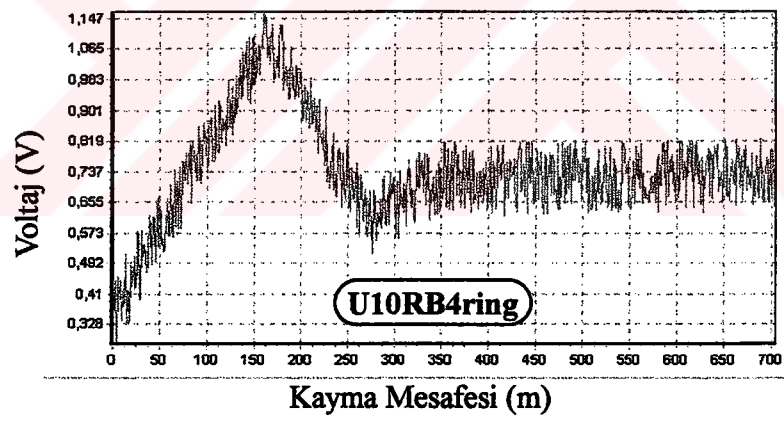
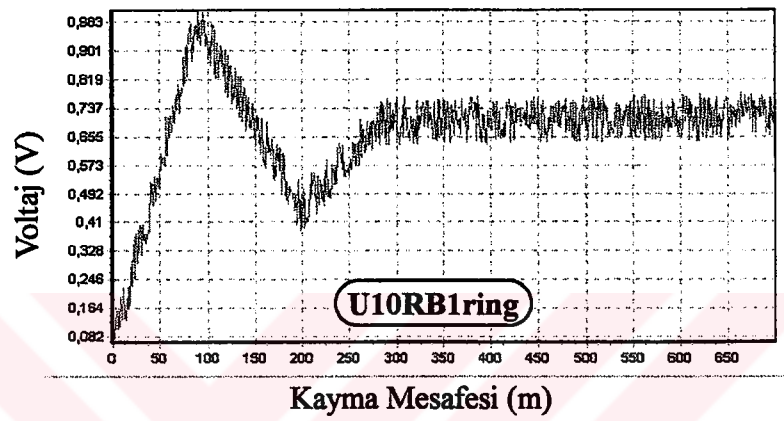
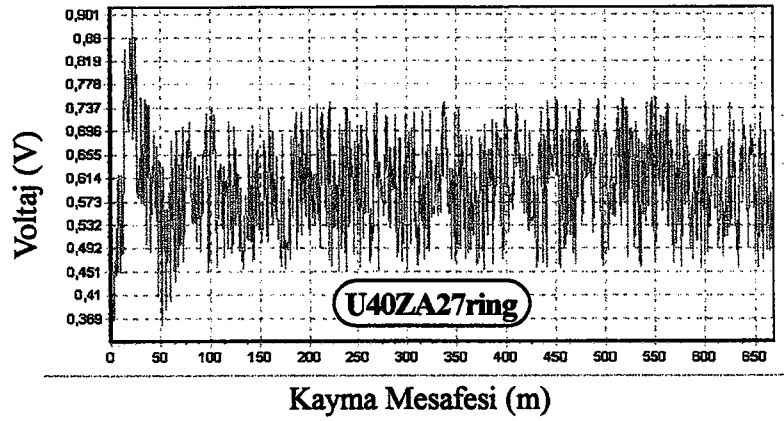
Kayma Mesafesi (m)

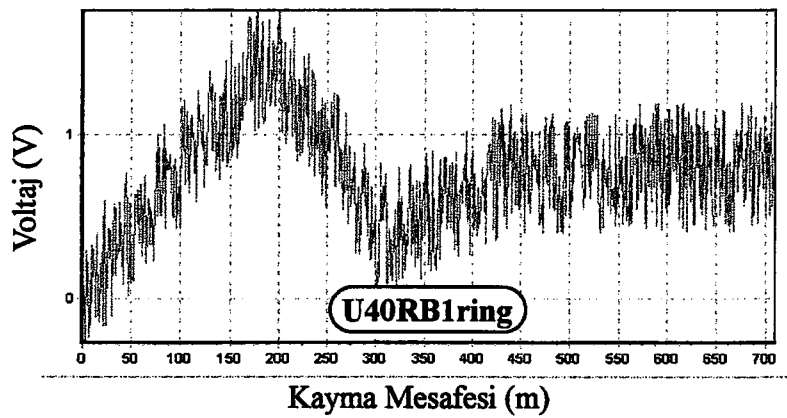
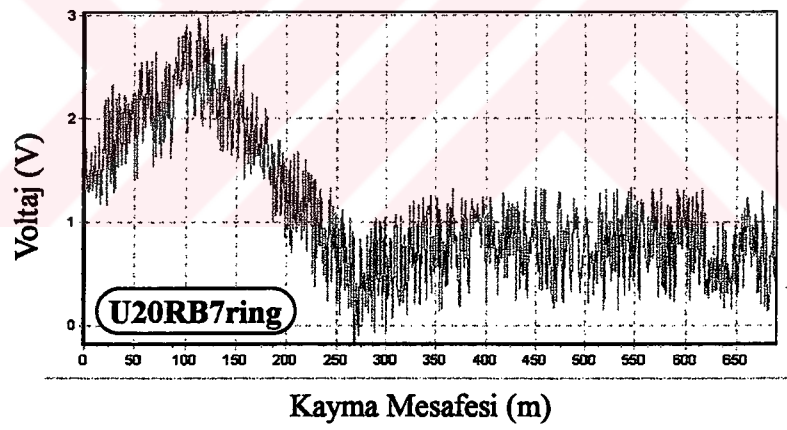
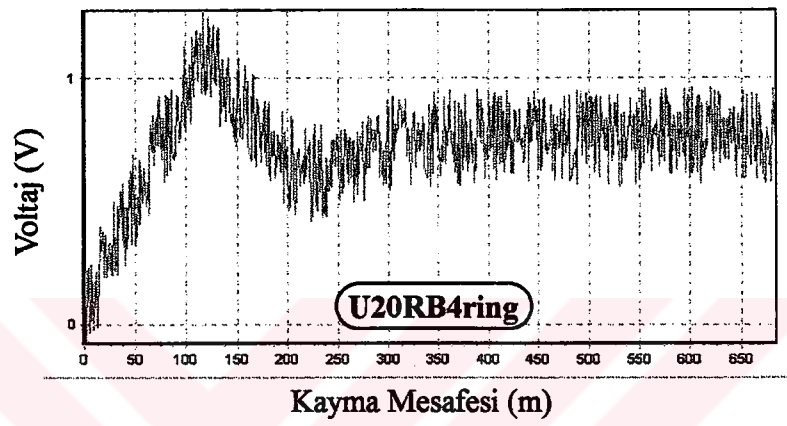
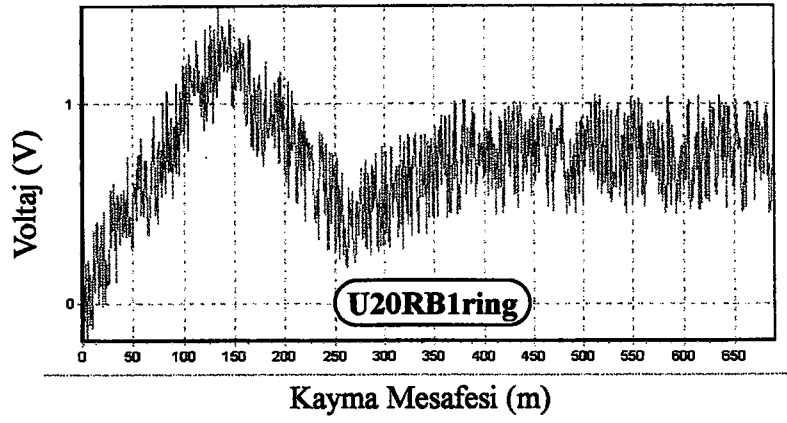


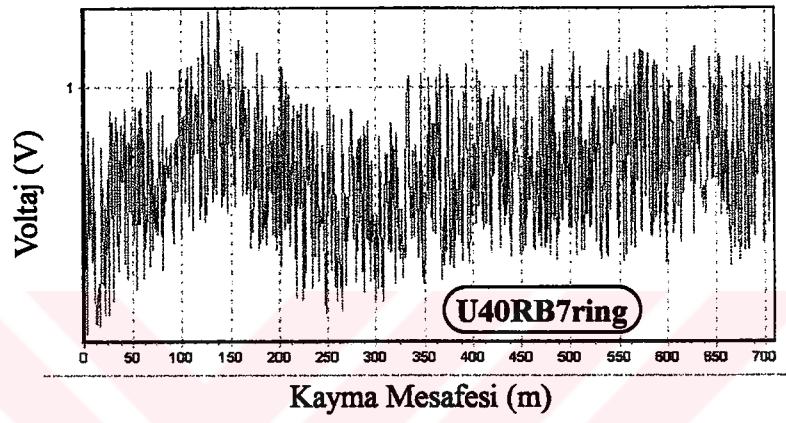
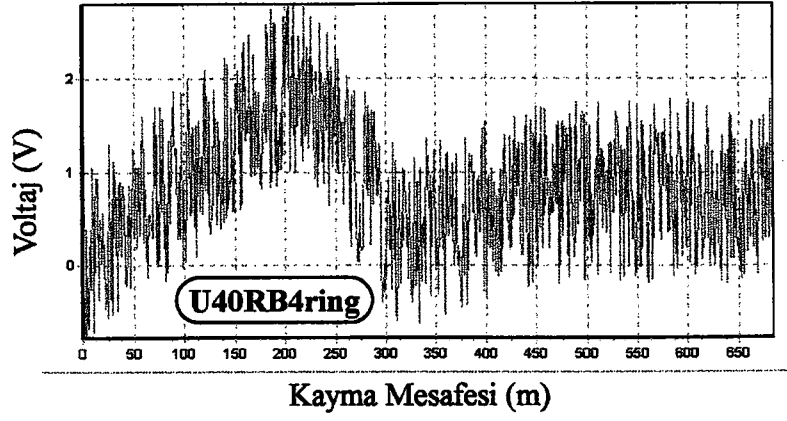












Bronz Alaşımın Kimyasal Kompozisyonu (%)

Kod No	Cu	Sn	Ni	Pb	Sb	Zn	Fe	P	S	Al	Mn	Si	As	Σ	DIN Normu
AV-RB 1	89.0/91.0	9.0/11.0	0.1	1.0	0.025	0.5	0.20	0.04	0.05	-	-	-	-	1.0	SnBz10
AV-RB 2	84.0/89.0	11.0/13.0	1.0	1.0	0.25	0.5	0.20	0.4	0.05	-	-	-	-	1.0	SnBz12
AV-RB 3	85.0/87.0	13.0/15.0	1.0	1.0	0.25	0.5	0.20	0.2	0.05	-	-	-	-	1.0	SnBz14
AV-RB 4	84.0/87.0	9.0/11.0	1.5	4.0/6.0	0.35	1.0	0.25	0.1	-	-	-	-	-	0.5	SnPbBz5
AV-RB 5	78.0/82.0	9.0/11.0	1.5	8.0/11.0	0.50	1.0	0.25	0.1	-	-	-	-	-	0.5	SnPbBz10
AV-RB 6	75.0/79.0	7.0/9.0	2.0	13.0/17.0	0.50	3.0	0.25	0.05	-	-	-	-	-	0.5	SnPbBz15
AV-RB 7	77.0/79.0	13.5/15.5	2.5	0.2	0.50	3.0	0.25	0.05	-	-	-	-	-	0.5	SnPbBz20
AV-RB 8	84.0/86.0	4.0/6.0	2.0	4.0/6.0	0.35	4.0/6.0	0.30	0.05	-	-	-	-	-	0.5	Rg-5
AV-RB 9	81.0/85.0	6.0/8.0	2.0	5.0/7.0	0.35	3.0/5.0	0.25	0.05	0.1	-	-	-	-	0.5	Rg-7
AV-RB 10	86.5/89.0	8.5/11.0	1.0	1.5	0.35	1.0/3.0	0.25	0.05	0.1	-	-	-	-	0.5	Rg-10
AV-RB 11	77.0/81.0	0.20	4.0/6.5	0.1	-	0.30	4.0/6.0	-	-	8.0/10.5	1.5	0.10	-	0.3	NiAlBzF70
AV-RB 12	83.0/89.5	0.30	2.5	0.2	-	0.50	2.0/4.0	-	-	8.5/11.0	1.0	0.20	-	0.5	FeAlBzF50
AV-RB 13	88.0/92.0	0.30	1.0	0.3	-	0.50	1.2	-	-	8.0/10.5	0.5	0.20	-	0.8	AlBz9
AV-RB 14	61.0/66.0	-	0.0/0.5	-	-	geçir kalkan	0.5/3.5	-	-	2.5/7.5	2.0/5.0	0/0.5	-	-	-
AV-RB 15	4.0/5.0	90.0/92.0	-	0.35	4.0/5.0	0.0	0.08	-	-	0.0	-	-	-	-	-
AV-RB 16	3.0/4.0	88.0/90.0	-	0.35	4.0/5.0	0.0	0.08	-	-	0.0	-	-	-	-	-
AV-RB 17	7.5/8.5	83.0/85.0	-	0.35	7.5/8.5	0.005	0.08	-	-	0.005	-	-	-	-	-
AV-RB 18	2.5/3.5	74.0/76.0	-	9.3/10.7	11.0/13.0	-	-	-	-	-	-	-	0.15	-	-
AV-RB 19	1.5/2.5	64.0/66.0	-	17.0/19.0	14.0/16.0	0.01	0.08	-	-	0.01	-	-	0.15	-	-

KAYNAKLAR

- [1] SARI, N.Y., KALUÇ, E., “Karbonlu Çeliklerin Abrasiv Aşınması”, Mühendis ve Makina, Cilt: 37, Sayı: 443, S 19, 1996
- [2] TÜRK, A., “Çinko-Alüminyum Esaslı ZA-8 Alaşımında Alaşım Elementlerinin Mekanik Özelliklere ve Mikroyapıya Etkisi”, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bil. Enst., Eylül, 1996
- [3] OĞUZ, B., “Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları”, Oerlikon Yayını, İstanbul, 1993
- [4] ALTINKÖK, N., “Sert Dolgu Kaynağı ve Plazma Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ, Fen Bil. Enst., Mayıs, 1997
- [5] ÇINAR, S., “Partikül Takviyeli Alüminyum-Silisyum Esaslı Metal Matriks Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, İ.Ü., Fen Bil. Enst., Ağustos, 1995
- [6] LI, Y., NGAI, T.L., XIA, W., “Mechanical, Friction and Wear Behaviors Of A Novel High-Strength Wear-Resisting Aluminum Bronze”, Wear 197, 130-136, 1996
- [7] DAWSON, R.J.C., Engineering Materials And Design, 22, 282, 1978
- [8] POOLE, W., SULLIVAN, J.L., ASLE Trans, 22, 151-161, 1979
- [9] POOLE, W., SULLIVAN, J.L., ASLE Trans, 23, 401-408, 1980

- [10] SULLIVAN, J.L., WONG, L.F., *Tribol. Int.*, 18, 275-281, 1985
- [11] SULLIVAN, J.L., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 19, 1999-2011, 1986
- [12] SULLIVAN, J.L., *Scemierungstechnik*, 18, 41-45, 1987
- [13] REID, J.V., SCHEY, J.A., *Wear*, 104, 1-20, 1985
- [14] REID, J.V., SCHEY, J.A., *Wear*, 118, 113-125, 1987
- [15] POGGIE, R.A., WERT, J.J., HARRIS, L.A., *J. Adhesion Sci. Technology*, 8, 11-28, 1994
- [16] POGGIE, R.A., WERT, J.J., *Wear*, 156, 315-326, 1992
- [17] WERT, J.J., SINGERMAN, S.A., CALDWELL, S.G., QUARLES, R.A., "The Role of Stacking-Fault Energy and Induced Residual Stresses On The Sliding-Wear of Aluminium Bronze", *Wear*, 91, 253-267, 1983
- [18] BUCKLEY, D.H., "Possible Relation of Friction of Copper-Aluminium Alloys With Decreasing Stacking-Fault Energy", NASA Tech. Note, NASA TN D-3864, 1967
- [19] TAGA, Y., ISOGAI, A., NAKAJIMA, K., "The Role of Alloying Element In The Friction and Wear of Copper Alloys", *Wear*, 44, 377-394, 1977
- [20] BLAU, P.J., "Investigation of The Nature of Micro-Indentation Hardness Gradient Below Sliding Contacts In Five Copper Alloys Worn Against 52100 Steel", *J. Mater. Sci.*, 19, 1957-1968, 1984
- [21] MACKEN, P.J., SMITH, A.A., "The Aluminium Bronzes", CDA Publication 31, London, 1966

- [22] BREZINA, P., "Heat Treatment of Complex Aluminium Bronzes", *Int. Met. Rev.*, 27, 77-120, 1982
- [23] BLAU, P.J., "Effect of Heat Treatment and Electron Beam Surface Melting On The Friction and Wear Behavior of A Cu-12 wt.% Alloy", *Wear*, 94, 1-12, 1984
- [24] SHI, Z., BLOYCE, A., SUN, Y., BELL, T., "Electron Beam Surface Melting To Increase Hardness and Wear Resistance of Aluminium Bronze", *The Institute of Materials*, 431-442, 1995
- [25] DEUIS, R.L., SUBRAMANIAN, C., YELLUP, J.M., "Abrasive Wear of Aluminium Composites – A Review", *Wear*, 201, 132-144, 1996
- [26] PÜRÇEK, G., KÜÇÜKÖMEROĞLU, T., SAVAŞKAN, T., "Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi", *Mühendis ve Makina*, Cilt: 37, Sayı: 443, S 35-41, 1997
- [27] CALAYAK, T.S., "The Practicality of Using Zinc-Aluminium Alloys For Friction-Type Bearings", 25th CIM Conf. of Metallurgists Int. Symp., 305-312, 1986
- [28] GERVAIS, H., "ZA Alloys-A Challenge To The Metals Industry", *CIN Bulletin*, 80, 67-72, 1987
- [29] GERVAIS, E., LOONG, C.A., "New ZA Alloys In Die Casting", 11th International Pressure Die Casting Conference, 1-25, 1984
- [30] APELION, D., PALIWAL, M., HERRSCHAFT, D.C., "Casting With Zinc Alloys", *Journal of Metals*, 12-19, 1981
- [31] SAVAŞKAN, T., MURPHY, S., "Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25Al-Based Alloys", *Wear*, 116, 211-224, 1987
- [32] LEE, P.P., SAVAŞKAN, T., LAUFER, E., "Wear Resistance and

Microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu Alloys”, *Wear*, 117, 79-89,1987

[33] MURPHY, S., SAVASKAN, T., “Comparative Wear Behavior of Zn-Al-Based Alloys In An Automotive Engine Application”, *Wear*, 98, 151-161, 1984

[34] METALS HANDBOOK, Vol. 10, 397-401

[35] KURNAZ, C., “ δ -Alümina (Saffil) Takviyeli ZA-12 Esaslı Kompozit Malzemelerin İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bil. Enst., Şubat, 1993

[36] ERQUICIA, R.B., “Wear of High Aluminium Zinc-Based Alloys In Plain Bearing Applications”, Ph. D. Thesis, The University of Aston, Birmingham, 1993

[37] BAI, M., XUE, Q., GUO, H., “Wear Mechanisms”, *Wear*, 194, 126-136, 1995

[38] BLOMBERG, A., OLSSON, M., HOGMARK, S., *Wear*, 171, 77-89, 1994

[39] CALLISTER, W.D., “Materials Science and Engineering”, John Wiley & Sons, Inc. USA, 1985



1996 yılında SAÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Mekanik Metalurji Ana Bilim Dalına araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevini sürdürmektedir.

okuldan 1995 yılında mezun oldu.

1971 yılında Çorum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Çorum'da yaptı. 1989 yılında ODTÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü'ne girdi. Bu

ÖZGEÇMİŞ