

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜNİVERSAL AŞINMA TEST CİHAZI  
TASARIMI VE İMALATI**

**YÜKSEK LİSANS**

**Teknik Öğretmen Süleyman SOYDAŞ**

**Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği**

**Danışman: Prof. Dr. Muharrem YILMAZ**

**KOCAELİ, 2006**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ\*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜNİVERSAL AŞINMA TEST CİHAZI  
TASARIMI VE İMALATI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

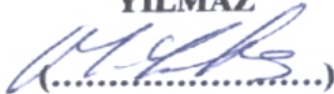
**Teknik Öğretmen Süleyman SOYDAŞ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 02.06.2006**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 13.07.2006**

**Tez Danışmanı**

**Prof. Dr. Muharrem  
YILMAZ**

  
(.....)

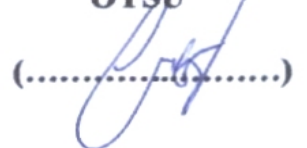
**Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Yavuz  
SOYDAN**

  
(.....)

**Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Cüneyt  
OYSU**

  
(.....)

**KOCAELİ, 2006**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Günümüz teknolojisinde triboloji kendine özel bir yer edinmektedir. Nano teknoloji bünyesinde ve üretim sektörünün hemen hemen her aşamasında önemi gittikçe artmaktadır. Bu aşamalar farklı deneysel çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Yapılan aşınma test cihazı da bunun en güzel örneğidir.

Tez çalışmam süresince önerisini, desteğini ve tecrübesini benimle paylaşan danışmanım Prof. Dr. Muharrem YILMAZ' a, bu cihazın imalatında değerli zamanını ve yardımlarını esirgemeyen Teknisyen Abdülkadir YAYLA' ya teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ.....	v
SİMGELER.....	vi
ÖZET.....	vii
İNGİLİZCE ÖZET.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. TRİBOLOJİ.....	2
2.1 Sürtünme.....	2
2.1.1 Genel tarif ve sınıflandırma.....	2
2.1.2 Kuru sürtünme.....	3
2.1.3 Sınır sürtünmesi.....	8
2.1.4 Sıvı sürtünme.....	10
2.1.5 Yuvarlanma sürtünmesi.....	13
2.1.6 Sürtünme kanunları.....	15
2.1.7 Sürtünme katsayısı.....	15
2.2 Aşınma.....	18
2.2.1 Genel tanımlama.....	18
2.2.2 Aşınma türleri.....	19
2.2.2.1 Adhesiv aşınma.....	19
2.2.2.2 Abrasivaşınma.....	25
2.3 Aşınma deneyleri ve ölçüm yöntemleri.....	28
2.3.1 Ağırlık farkı metodu.....	29
2.3.2 Kalınlık farkı metodu.....	32
2.3.3 İz değişim metodu.....	32
2.3.4 Radyoizotop Metodu.....	32
2.4 Yağlayıcı maddeler.....	33
2.4.1 Genel ifadeler.....	33
2.4.2 Katı yağlayıcı Maddeler.....	33
2.4.3 Sıvı yağlayıcı maddeler (yağlar).....	34
2.4.4 Yarı katı yağlayıcı maddeler (Gresler).....	36
2.4.5 Gaz yağlayıcı maddeler.....	36
3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	37
4. TASARIM VE İMALAT.....	58
4.1 Cihazın tasarımı.....	58
4.1.1 Giriş.....	58
4.1.2 Yağlama ünitesinin tasarımı.....	59
4.1.3 Yatak baskı siteminin tasarımı.....	60
4.1.4 Mil yatak tasarımı ve motor seçimi.....	61
4.1.5 Aşınma test cihazının genel konstrüksiyonu.....	68
4.2 Cihazın imalatı.....	69



5. SONUÇLAR .....	70
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	73

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Sürtünme Çeşitleri.....	2
Şekil 2.2 Kuru sürtünme modeli.....	4
Şekil 2.3 Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu.....	5
Şekil 2.4 Mikro kaynakların oluşması.....	6
Şekil 2.5 Sınır Sürtünmesi.....	8
Şekil 2.6 Sıvı Sürtünme.....	10
Şekil 2.7 Hidrodinamik sıvı sürtünmesi.....	11
Şekil 2.8 Sürtünme katsayısının değişimi .....	12
Şekil 2.9 Hidrostatik sürtünme.....	12
Şekil 2.10 Yuvarlanma sürtünmesi.....	13
Şekil 2.11 Elastohidrodinamik sürtünmesi.....	14
Şekil 2.12 Statik ve dinamik sürtünme katsayıları.....	16
Şekil 2.13 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi.....	18
Şekil 2.14 Adesiv aşınmasının oluşması.....	20
Şekil 2.15 Aşınma çeşitleri.....	20
Şekil 2.16 Adezyon aşınmasının zamanla gelişmesi.....	22
Şekil 2.17 Yağlamalı ve yağlamasız adesiv aşınma deney yöntemler.....	29
Şekil 2.18 Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler.....	30
Şekil 3.1 Bilgisayar destekli aşınma-sürtünme test metodolojisi.....	38
Şekil 3.2 Toplam ağırlık kaybı ve sürtünme katsayısı ile ilişkisi.....	40
Şekil 3.3 Aşınma oranı ve zamanın sürtünme katsayısı ile ilişkisi.....	40
Şekil 3.4 Yüzey analiz değerleri.....	41
Şekil 3.5 Dört EP test cihazının kesit görünüşü.....	43
Şekil 3.6 Deney düzeneği.....	51
Şekil 3.7 Bir blok-halka aşınma testini şematik görünümü.....	55
Şekil 3.8 Karşılıklı hareket eden tabaka üzerindeki pinin aparatının temas etmesi ile elde edilen şemayı göstermektedir.....	56
Şekil 4.1: Test cihazının perspektif görünüşü.....	58
Şekil 4.2: Yağlama ünitesi.....	59
Şekil 4.3: Yatak baskı sistemi.....	60
Şekil 4.4: Pnömatik sistem.....	61
Şekil 4.5: Mil.....	64
Şekil 4.6: Yataklama ünitesi.....	66
Şekil 4.7: Redüktörlü elektrik motoru.....	67
Şekil 4.8: Test cihazının ön görünüşü.....	68
Şekil 4.9: Aşınma test cihazının genel görünüşü.....	69

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1 Değişik malzeme ve malzeme çiftleri için kinetik sürtünme katsayıları....	17
Tablo 2.2 Metallerin (adesyonunu) etkileyen faktörler.....	24
Tablo 2.3 Adesiv aşınma proseslerinin içerdiği tipik aşınma hızları.....	27
Tablo 3.1 Karşılık hattının düzeltilmiş yüklemesi toplamı.....	44
Tablo 3.2 Kaydedilmiş test sonuçlarından tavsiye edilmiş değerler.....	44
Tablo 3.3 Örneklerin sürtünme katsayısı değerleri.....	48
Tablo 3.4 Motor yağı ve katkı madde ilaveli yağ karışımın özellikleri.....	52
Tablo 3.5 Yatak aşınma değerleri.....	54
Tablo 4.1 Pinomatik sistemde kullanılan basınç yük değerleri.....	61

## SEMBOLLER

$A_n$	: görünen temas alanı
$a$	: çapraz çentik uzunluğunun yarısı
$a$	: termal difüzyon katsayısı
$c$	: ortalama çatlak uzunluğu
$d$	: yoğunluk
$F_y$	: yay kuvveti
$F'$	: normalize edilmiş yük
$F_n$	: kuvvet
$H_0$	: oda sıcaklığında ki sertlik
$H_y$	: vickers sertlik değeri
$h$	: lineer aşınma
$k$	: yay sabiti
$l$	: özgül ağırlık
$n$	: devir sayısı
$P$	: basınç
$P_{em}$	: emniyet yüzey basıncı
$P_m$	: ortalama yüzey basıncı
$r_i$	: iç çap
$r_o$	: dış çap
$r_m$	: radyüs
$r_0$	: görünen temas alanının yarı çapı
$\rho$	: numune kalınlığı
$s$	: kayma yolu
$V$	: kayma hızı
$V'$	: normalize edilmiş kayma hızı
$V_h$	: aşınan bölge hacmi
$W$	: birim kayma yoluna tekavül eden aşınma hızı
$W'$	: normalize edilmiş aşınma
$W_a$	: aşınma
$WF$	: aşınma faktörü
$W_r$	: aşınma direnci
$WS$	: aşınma orantı sayısı
$\Delta G$	: ağırlık farkı
$\Delta w$	: aşınma miktarı
$\mu_m$	: mikrometre
$\mu$	: sürtünme katsayısı

# ÜNİVERSAL AŞINMA TEST CİHAZI TASARIMI VE İMALATI

**Süleyman SOYDAŞ**

**Anahtar kelimeler:** Triboloji, Aşınma, Deney Cihazı

**Özet:** Ekonomik açıdan önemli bir yeri olan triboloji geçmişte göz ardı edilmiştir oysa ki günümüzde, aşınmadan kaynaklanan zararın ciddi boyutlara ulaştığı anlaşılmıştır. Uçak şirketleri, otomotiv sanayii ve bir çok endüstriyel kuruluş, ufak görünen bu etmenden önemli ölçüde etkilenmişlerdir. Yapılan gözlemler sonucunda aşınmadan kaynaklanan zararın önüne geçilmesi için deneysel çalışmalara gidilmiştir. Aşınma olayı karmaşık bir yapı arz ettiğinden yüzlerce deneysel tasarım göz önüne alınmış ve uygun ortamlarda denenmiştir. İmalatı yapılan bu cihazda bunlardan bir tanesidir.

İmalatı gerçekleştirilen test cihazı, New Jersey Institute of Technology nin Makine mühendisliği laboratuvarında kullanılan aşınma deney cihazının bir benzeridir. Model alınan cihaz üzerinde bazı değişiklikler yapılarak imalatı tamamlanmıştır. Test cihazı daha sonra Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği laboratuvarına teslim edilmiştir.

# DESIGN AND PRODUCTION OF UNIVERSAL WEAR TESTING DEVICE

Süleyman SOYDAŞ

**Key words:** Tribology, Wear, Test Device

**Abstract:** Tribology has less been highlighted in the past although it has substantial position in economically. We are well aware of the losses caused by wear, the airway companies, automotive industry as well as a lot of industrial establishments have been seriously affected by this factor. The experimental studies have been carried out to avoid the losses caused by wear. A hundred of experimental design has been taken into consideration because the wear has may complicated aspects and they have been experimented in appropriate milieu.

The device that has been produced recently is similar to the wear test device using in the Mechanical engineering labs at New Jersey Institute of Technology. The production has been completed by some modifications made on the device and testing device then has been delivered to Mechatronics Engineering at Kocaeli University, Faculty of Engineering.

## 1. GİRİŞ

Günümüz laboratuvar donanımları piyasası farklı boyutlarda aşınma ve sürtünme ölçüm aletleri sunmayı hedeflemiştir. Bazı araştırmacılar ve endüstri mühendisleri sürtünme ve aşınma test aletlerinin bazı özel uygulamalar için uygun olmasını amaçlamaktadırlar. Bilgisayar kontrollü sürtünme test aygıtlarının (TMI Şirketler Grubu) ve sürtünme - aşınma test aygıtlarının (CSM Aygıtları) geliştirilmesi için bazı uygulamalar da vardır fakat geniş kesim tarafından onaylanan ve her türlü uygulama için kullanılabilir bir standart laboratuvar donanımı bulunmamaktadır.

Genellikle, sürtünme test aygıtları piyasada sınırlı bir aralık için bulunmaktadır. Örnek olarak sıfırdan 10N' e kadar ve ağır işler için uygulanabilir değildirler ve birkaç makine parçası birleşimlerinde bulunmaktadır. Diğer bir problem de birçok ürünün sadece bir özelliği önlemek için kullanılıyor olmasıdır. Sürtünme katsayısı veya aşınma oranı ve bu da hem sürtünme hem de aşınma göz önünde bulundurulmak istendiğinde uygun olmadıkları anlamına gelir. Piyasadaki birçok test aygıtının diğer bir dezavantajı ise, manuel olarak veri toplamalarıdır. Tepkisiz testlerde bu durumun çok da önemli olmamasına rağmen, sürtünme katsayısı zaman içerisinde yavaşça değiştiğinde, dinamik testlerde kritik bir rol oynamaktadır.

Sürtünme ve aşınma test aygıtlarının en önemli ve öncelikli dezavantajı bu test aygıtlarının disk üzerindeki mil, dört toplu, çapraz silindri ve diğerleri gibi birbirine değen parçalardaki geometrik düzenlemeleri için hiç de uygun olmamasıdır. Bu konfigürasyonlar gerçek makine temaslarını temsil etmezler, bunlar çoğu durumda bir ring üzerinde bloklardan oluşmuşlardır. Aşınma ve sürtünmeli makineler bu konfigürasyonlar baz alınarak gerçek temas simülasyonu ve araştırmacılara sürtünme olayını daha iyi anlamalarını sağlamaktadır.

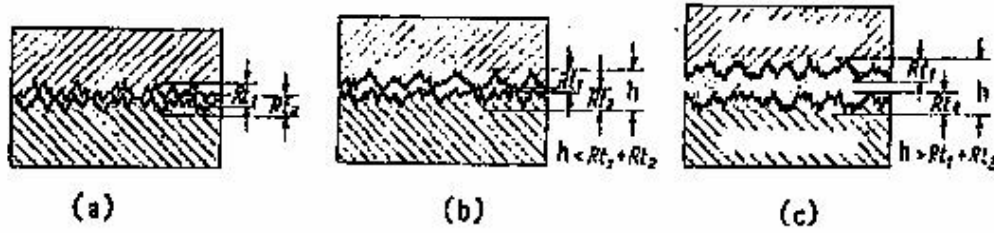
Bütün bunlar hem sürtünme katsayısını hem de aşınma oranını aynı zamanda ölçebilen Aşınma-Sürtünme test makinelerinin gelişimine önderlik ederler.

## 2. TRİBOLOJİ

### 2.1. Sürtünme

#### 2.1.1. Genel tarif ve sınıflandırma

Genel anlamda sürtünme temasta olan ve izafi hareket yapan bir cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirençtir. Birbirlerine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma mevcut olabilir. Böylece sürtünme kinematik bakımdan kayma, yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur.



Şekil 2.1: Sürtünme çeşitleri

a: Kuru      b: Sınır      c: Sıvı

İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğaldan doğruya temasta bulunan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir (Şekil 2.1.a). Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir ve esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur; bu hale sıvı sürtünmesi denir (Şekil 2.1.c). İkinci durumda yani yüzeyler tamamıyla ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır (Şekil 2.1.b).



### 2.1.2. Kuru sürtünme

Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için şekli 2.2.a'da gösterilen model kullanılmaktadır. Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin ( $F_n$ ) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı  $F_s = \mu F_n$  değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada  $\mu$ -sürtünme katsayısıdır.

Genel ifadeye göre sürtünme izafi hareket yapabilme olanağına sahip olan yüzeylerde oluşur. Şekil 2.2.'a da cisimlerin herhangi birine teğetsel bir  $F$  kuvveti tatbik edilirse, durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda  $F_s > F$  yani sürtünme kuvveti kuvvetinden daha büyük olabilir. Bu halde  $F$  kuvvetine rağmen cisimler birbirleri üzerinde kaymazlar. Ancak hareket olanağı olduğundan, yüzeyler arası statik sürtünme denilen bir direnç meydana gelir. Kavrama, fren gibi sürtünme esasına göre çalışan elemanlarda bu sürtünme hali vardır ve bu elemanların hesabı bu denkleme dayanır. İkinci durumda  $F_s < F$  yani sürtünme kuvveti  $F$  kuvvetinden daha küçük olabilir. Kinematik sürtünme denilen bu halde,  $F$  kuvvetin etkisi altında yüzeyler birbirleri üzerinde kayarlar.

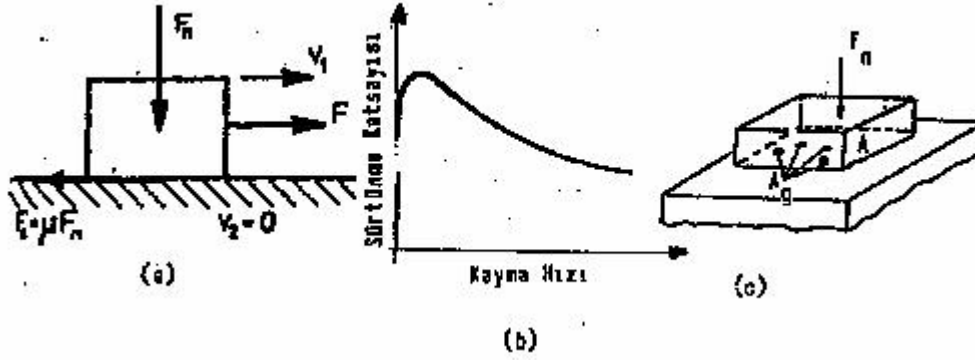
Teknikte sürtünme hem istenilen hem de istenilmeyen bir olay olarak çıkar. Fren, kavrama, sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında sürtünme istenilen bir olaydır. Bu gibi yerlerde sürtünme arttırılır. Bunların dışında, bütün izafi hareket yapan yüzeylerde istenilmeyen bir olay olarak ortaya çıkan sürtünmenin azaltılması gereklidir.

Coulomb-Amontons kanunu olarak tanınan (2.1) bağıntısına göre sürtünme katsayısı

$$\mu = F_s / F_n \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Genellikle statik sürtünme katsayısı ( $\mu_0$ ), kinematik sürtünme katsayısı daha büyüktür. Kayma hızı arttıkça kinematik sürtünme katsayısı azda olsa azalır (Şekil 2.2.b.). Şekilden de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Buna karşılık normal kayma hızlarında hıza göre

sürtünme katsayısının değişimi çok az olduğundan sürtünme katsayısı sabit sayılabilir. Sürtünme ile ilgili bir başka kavram  $\tan X = \mu$  şeklinde ifade edilen sürtünme açısıdır. Kitlenmeli sistemlerde büyük önem taşıyan bu açı, normal kuvvet ile normal ve sürtünme kuvvetlerinin meydana getirdiği  $F_r$  bileşke kuvveti arasındaki açıdır (Şekil 2.2.a)

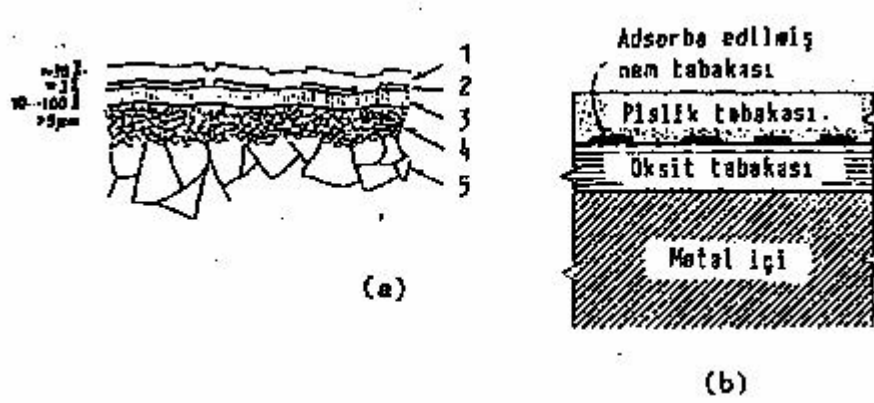


Şekil 2.2: Kuru sürtünme modeli

Sürtünme olayı incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam madensel temiz olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır. Şekilden de görüldüğü gibi yüzeyler birbiri ile pürüzlerinin tepelerinde temas etmektedirler; böylece temas alanı esasen çok küçük temas alanlarından meydana gelmektedir (Şekil 2.2.c) bu küçük temas alanlarının toplamı ( $A_g$ ) gerçek temas alanını oluşturmaktadır. Bu alan temas yüzeyinin sınırlarını tayin eden ( $A$ ) geometrik alanda çok daha küçüktür. Yapılan deneyler temas alanının  $A_g = (1/500... 1/1000)A$  arasında olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra  $F$ , yükleme kuvvetinin uygulaması ile pürüzler şekil değiştirirler ve bunun sonucu olarak temas yüzeyleri artar.

Yüzeylerin durumuna gelince, yapılan inceleme ve deneylere göre kuru olarak tarif edilen madenlerin yüzeyleri aslında atmosferi teşkil eden elemanların etkisi altında oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları ile kaplıdır (Şekil 2.3.a-b). Adsorpsiyon yolu ile oluşan ve ancak elektronik mikroskoplarla varlığı kanıtlanabilen bu tabakalar madensel yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin

fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Ayrıca yüzeylerde ki oksit tabakası ani olarak oluşmaktadır; şöyle ki talaş kaldırarak işlenmiş veya temizlenmiş yüzeyler atmosfere maruz kalırsa, yüzeylerde derhal bir oksit tabakası meydana gelmektedir.



1. Pislik tabakası;
2. Adsorbsiyon tabakası;
3. Oksit tabakası
4. (Soğuk) Şekillendirilmiş tabaka;
5. Metal içi

Şekil 2.3: Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu

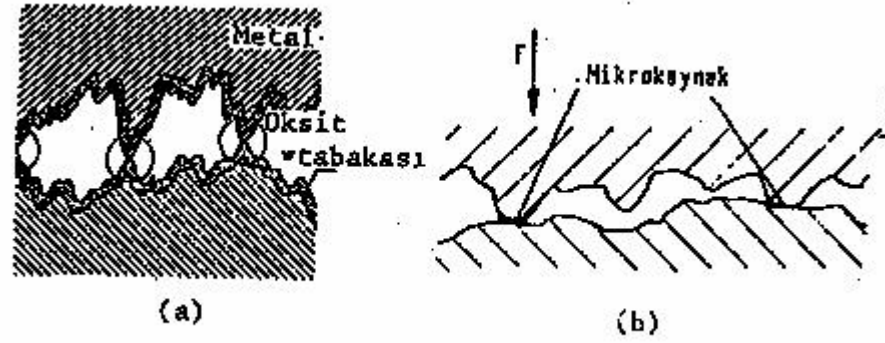
Sonuç olarak şu söylenebilir. Teknikte kullanılan elemanların yüzeyleri çeşitli kimyasal bileşikleri ihtiva eden tabii bir adsorpsiyon tabakası ile kaplıdır. Bunun sonucu olarak doğrudan doğruya temas eden yüzeyler arasında daima bu tabakalar bulunur.

Sürtünme olayını açıklamaya çalışan bir çok teoriler vardır. Bunlardan gerçeğe en yakın olanı Bowden ve Tabor' un kaynak bağları teorisi'dir. Yukarıdaki olaylara dayanarak bu teori şu şekilde açıklanabilir.

Yüksüz durumda yüzeyler belirli pürüzlük noktalarında temasta bulunur (Şekil 2.4.a); bu noktalarda tabii tabakalar arasında bağlar oluşur. Yük tatbik edildikten sonra çok küçük olan temas yüzeylerinde çok büyük basınçlar meydana gelir. Bu basınçların altında bazı temas noktalarındaki tabii tabaka kopar, metalik temas

meydana gelir ve yüksek basıncın etkisi altında bu noktalarda moleküler bağ şeklinde mikroskobik kaynak bağları oluşur. Bu bağlar, tabii tabaka bağlantısından çok daha kuvvetlidir. Temasta bulunan elemanların izafi hareketi ancak bu bağların kopması ile mümkündür.

O halde sürtünme gerek metalik, gerekse tabii tabaka bağlarının oluşturduğu dirençtir; sürtünme kuvveti ise bu bağların kopması için gereken kuvvettir (Şekil 2.4.b).



Şekil 2.4: Mikro kaynakların oluşması

Yukarıdaki teoriye göre sürtünme katsayısını analitik olarak ifade etmek mümkündür. Buna göre yükü taşıyan  $A_g$  temas alanında oluşan metalik bağların yüzdesi  $a$ , bunların kesme mukavemeti  $\tau_{km}$ , tabii tabakalar arasındaki bağların kayma mukavemeti  $\tau_{ko}$  ve tabakanın kopma mukavemeti  $\sigma_{ko}$  ifade edilirse, sürtünme katsayısı Bowden ve Tabor'a göre;

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} = a \frac{\tau_{km}}{\tau_{ko}} + (1-a) \frac{\tau_{ko}}{\sigma_{ko}} \quad (2.2)$$

olarak bulunur. Gerçek temas alanı tamamen metalik temas noktalarından meydana geldiği durumda  $a = 1$  olur ve böylece;

$$\mu = \frac{\tau_{km}}{\tau_{ko}} \quad (2.3)$$

yazılır. Diğer taraftan sadece tabii tabaka bağları olduğu halde  $a=0$  olur ve sürtünme katsayısı için

$$\mu = \tau_{ko} / \sigma_{ko} \quad (2.4)$$

olarak elde edilir,  $\tau_{km}$   $\sigma_{ko}$  değerlerinin tayini çok güç olduğundan pratikte yukarıdaki bağlantıların kullanılması olanaksız gibi görünür. Buna rağmen bu bağıntılardan şu sonuçları çıkarmak mümkündür.

a. Sürtünme katsayısı, metal kaynak bağ teşkil etmiş olan temas noktalarının kesme mukavemetine ( $\tau_{km}$ ), tabakanın kopma mukavemetine ( $\sigma_{ko}$ ) ve tabii tabaka bağlarının kayma mukavemetine ( $\tau_{ko}$ ) bağlıdır,  $\sigma_{ko}$  m ve  $\tau_{ko}$ 'ın ise büyük olması halinde, sürtünme katsayısı da küçük olur.

b. Metal kaynak bağı teşkil eden olan temas noktalarının kesme mukavemeti, temas halindeki malzemelerin cinsine bağlıdır. Bu bakımdan:

- Birbirleriyle kolayca alaşım haline gelebilen demir, krom ve nikel gibi sert malzemeler arasında kuvvetli kaynak bağlantısı oluşmaktadır. Sürtünme katsayısı düzensiz olarak değişmekte, yüzeyler üzerinde izler ve bir yüzeyden diğerine malzeme transferi görülmektedir. Bazı hallerde kaynama noktaları o kadar şiddetli olur ki, yüzeyler birbirine kilitlenir, hareket sağlansa bile yüzeyler tamamen bozulmuş olur. Buna yenme (yalama) denir. Bu olay yukarıdaki malzemelerin alaşımları için de geçerlidir.

- Benzemeyen ve birbirleriyle ilgili olmayan malzemeler daha hafif ve düzenli bir sürtünme oluşmakta ve yüzeyler üzerinde çok ince izler görülmektedir.

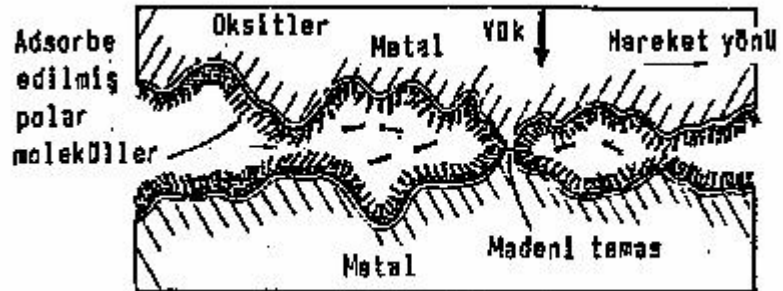
- Birbiri üzerinde kayan malzemelerin biri sert, diğeri yumuşak (örneğin, kalay, kurşun, indiyum ve bunların alaşımları) olduğu takdirde, yumuşak malzeme diğeri malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile derhal kaplar ve bu

şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış gibi rol oynar. Bunun sonucunda sürtünme katsayısı azalır ve bu yüzeyler arasında yenme olayı meydana gelmez. Pratikte kalay alaşımlarının çok iyi yatak malzemeleri olmalarının nedeni bu olaya bağlıdır. Şu halde küçük bir sürtünme katsayısı elde etmek ve aşırı aşınmayı önlemek için malzemeler aynı veya birbiriyle kolayca alaşım haline gelebilen cinsten olmamalıdır. Ayrıca malzemelerden birinin yumuşak, diğerinin sert olması gerekir.

### 2.1.3. Sınır sürtünmesi

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulamadığı durumda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme kat sayısı genel olarak 0,02 ile 0,1 arasında değişir.

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması haline yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar. Yapılan deneyler göstermiştir ki, polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil grupları ile madensel yüzeylere bağlanmaktadır (Şekil 2.5). Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorpsiyon tabakaları oluşmaktadır.



Şekil 2.5: Sınır sürtünmesi

Yağın bu özelliğine yapışma (oiliness) kabiliyeti denir. Bu özellik yağ ve madensel yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır. Oluşan bu tabaka, tabii tabakada olduğu gibi,

metalik yüzeylerin doğrudan doğruya temasa geçmesini önler. Ancak yağ tabakası ile tabii tabaka arasında önemli bir farktır. Havanın etkisi ile oluşan tabii tabakanın esası oksit tabakasıdır; burada tesadüfen bulunan yağ molekülleri çok azdır. Yağ tabakası ise tamamen yağ moleküllerinden oluşur ve özelliğini buraya yağlamak amacıyla konulan yağ maddesinden alır. Yağ tabakasının tabii tabakaya göre kopma mukavemeti çok daha büyüktür ve bunun sonucu olarak doğrudan doğruya madensel temasta olan yüzeyler daha azdır. Yapışmış yağ tabakasının kopma mukavemeti  $\sigma_{kf}$  ve kayma mukavemeti  $T_{kf}$  ile ifade edilir. İyi bir yağlama sisteminde  $a$  çok küçük olduğundan sürtünme katsayısı;

$$\mu \sim T_{kf} / \sigma_{kf} \quad (2.5)$$

olarak bulunur. Burada önemli olan yağ tabakasının kopma ve kayma mukavemetleridir. Adi yağların oluşturduğu yağ tabakasının kopma mukavemetinin büyütme veya kayma mukavemetini azaltmak için yağlara katık (aditif) denilen bir takım ek maddeler konulur.

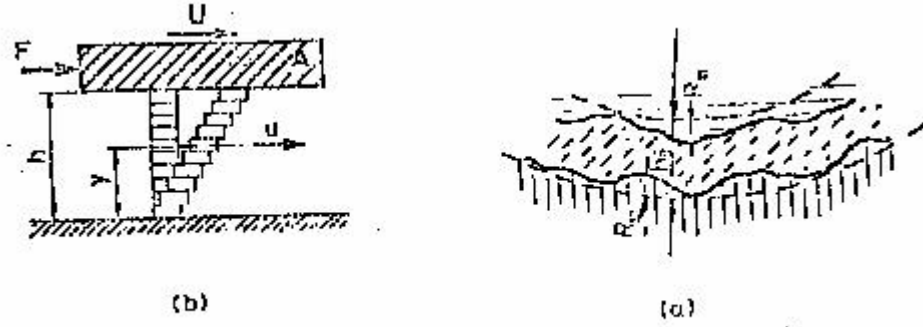
Genellikle organik yağlardan oluşan katık maddeleri yağ içerisine çok az miktarda konulur. Bu maddeler metalsel yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerler ve yüzeyler arasında, kopma mukavemeti yüksek olan yarı sıvı halinde madeni sabunlar meydana getirirler.

Böylece sınır sürtünme; sırf adsorpsiyon tabakalarından oluşan fiziksel veya kimyasal reaksiyonu sonucu meydana gelen tabakalarından oluşan kimyasal esasına dayanabilir.

Pratikte kuru sürtünmede olduğu gibi sınır sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerin sürtünme katsayıları deney ile tayin edilir.

#### 2.1.4. Sıvı sürtünme

Sıvı sürtünmesi, madeni yüzeylerin bir yağ tabakası tarafından tamamen ayrılmış olduğu sürtünme halidir. yüzeylerin pürüzlülüğü göz önüne alınırsa, analitik bakımından sıvı sürtünmesi



Şekil 2.6: Sıvı Sürtünme

$$H_o > R_{t1} + R_{t2} \quad (2.6)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada  $R_{t1}$  ve  $R_{t2}$  her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğüdür(Şekil 2.6).

Madensel yüzeylerle doğrudan doğruya temasta bulunan yağ tabakaları, adsorpsiyon yolu ile bu malzemelere tamamen yapışmış olduğu görülür; şöyle ki U hızıyla hareket eden yüzeye yapışmış olan tabakanın hızı U; sabit yüzey üzerindeki tabakanın hızı ise sıfırdır (Şekil 2.6.b). Ara tabakalarının hızı y mesafesine bağlı olarak U ile sıfır arasında değişir. Böylece sıvı sürtünmesi halinde sürtünme esas itibariyle birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşmaktadır. Viskoz bir akışkanda meydana gelen kayma gerilmeleri Newton kanununa göre

$$t = \frac{du}{dy} \quad (2.7)$$



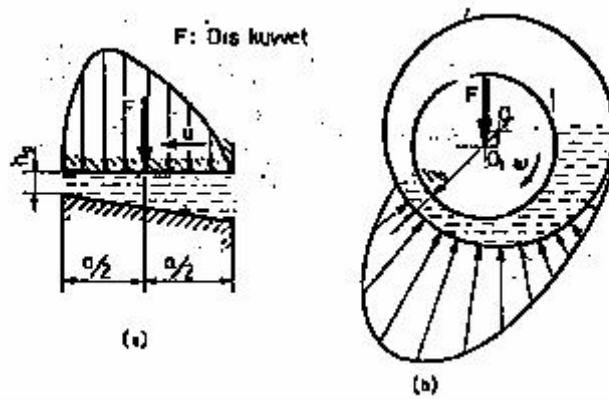
şeklinde, belirtilebilir. Burada  $\eta$ -yağın viskozitesi,  $du/dy$ -y mesafesine göre hız değişimi (gradyanı) veya kayma oranıdır. Kayma gerilmelerine bağlı olan sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı

$$F_s = \frac{du}{dy} A \quad ; \quad \eta = F_s / F \quad (2.8)$$

olarak yazılır. Burada  $\eta(\mu/h)A$  şekline ifade edilir, burada h-yağ tabakasının kalınlığıdır.

Sıvı sürtünmenin oluşumunda rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır. Basınç oluşumu Hidrodinamik ve Hidrostatik olmak üzere iki olaya bağlıdır.

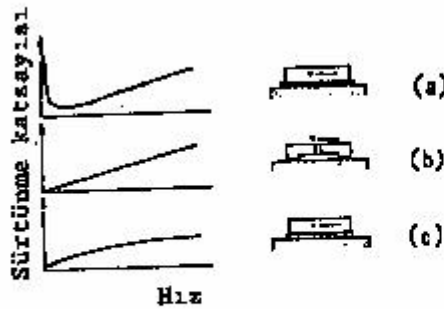
a. Hidrodinamik sıvı sürtünmesinde, yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olarak yağ tabakasında kendi kendine bir basınç alanı oluşur. Basıncılı bir yağ filminin oluşabilmesi için kinematik ve geometrik şartlar, yüzeylerin birbirine göre belirli bir izafi hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasıdır. Pratikte bu iki şart, eğik düzlemsel yüzeylerde (eksenel yataklarda, Şekil 2.7.a) ve birbirine göre eksantrik bir durumda olan silindirik yüzeylerde (radyal yataklarda, Şekil 2.7.b) gerçekleşir.



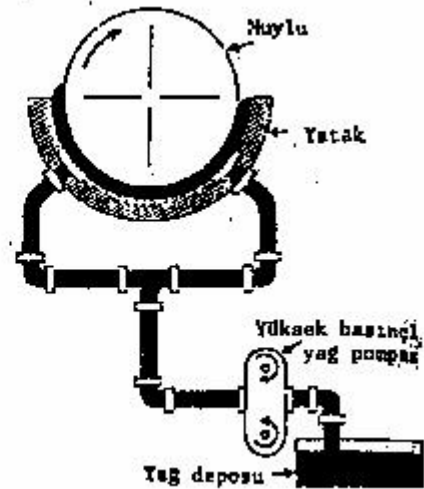
Şekil 2.7 : Hidrodinamik sıvı sürtünmesi

Hidrodinamik sıvı sürtünmesi kinematik ve dinamik şartlara bağlı olduğundan uygulama alanı sınırlıdır. Genellikle bu sürtünme hali, izafi hareketin sürekli olduğu ve yağ tabakasının hareket yönünde daraldığı sistemlerde oluşur. Öteleme hareketi sırasında hareket yönünde daralan bir yağ tabakası olduğu takdirde, çok kısa süreli bir sıvı sürtünmesi hali gerçekleşebilir; ancak bu sürtünme hali hiçbir zaman sürekli olmaz Şekil 2.8'a da hidrodinamik sıvı sürtünmesinde sürtünme katsayısının hız ile değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi hidrodinamik sıvı sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında kuru ve sınır sürtünmesi halleri ve bunlara bağlı olarak aşınmalar meydana gelir. Bu nedenle hidrodinamik sıvı sürtünmesi halinde sitemlerin aşınması tamamen önlenmez. Hidrodinamik sıvı sürtünmede yağlayıcı maddeler olarak sıvı, gaz veya gres kullanılabilir. Buna göre sıvı sürtünmesi halleri Hidrodinamik, Gazodinamik veya Reodinamik olarak isimlendirilir.

b. Hidrostatik sıvı sürtünmesi halinde, dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için gereken basınç, bir yüksek basınçlı pompa vasıtası ile dışardan sağlanır ve yağ basınç, ile yüzeyler arasına gönderilir (Şekil 2.9). bu durumda bütün sistemlerde, yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olmaksızın sıvı sürtünmesi sağlanabilir; yani hidrostatik sıvı sürtünmesi hareketsiz yüzeylerde de oluşturulabilir. Böylece bu gibi sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında sıvı sürtünmesi hali vardır (Şekil 2.8.b), kuru veya sınır sürtünmesinin bulunmadığı bu yağlama durumunda aşınma da yoktur.



Şekil 2.8: Sürtünme katsayısının değişimi  
a.Hidrodinamik; b. Hidrostatik, c.Rulmanlar



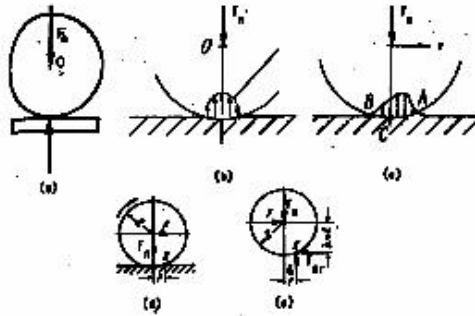
Şekil 2.9: Hidrostatik sıvı sürtünme

Bu üstünlüklerine rağmen hidrostatik sıvı sürtünmesi ile çalışan sistemlerin dezavantajları şu şekilde özetlenebilir. Tesisat bakımından (motor, pompa, süzgeç, dirençler) oldukça karışık ve pahalı bir sistemdir; bu tesisatta bir arıza olduğu ve yatağa yağ gönderilmediği durumda, yüksek hızda çalışan elemanlar direkt temasa geçerler ve şiddetli bozulmalar meydana gelir. Ancak modern sistemlerde, bu durumu önlemek için uyarıcı cihazlar konulur. Yağlayıcı maddeler sıvı, gaz veya gres olabilir. Buna göre sistemler Hidrostatik, Gazostatik veya Reostaitik olarak isimlendirilir.

Teknolojinin gelişmesi ile yağlama alanında da yeni yöntemler uygulanmaya başlanmıştır. Örneğin sıvı sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerdeki yağlayıcı elektromagnetik alan içerisinde bulunursa, bu sistemlere, sıvı sürtünmesinin cinsine göre Magnetohidrodinamik, Magnetogazodinamik, Magnetohidrastatik denilmektedir.

### 2.1.5. Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir. Teorik bakımdan tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan tam silindirik veya küre şeklinde bir elemanın, rijit pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanmasında (Şekil 2.10), hiçbir sürtünme kuvveti meydana gelmez. Aslında bu tür elemanların temas yüzeylerinde Hertz tipi elastik ve daha az olarak da plastik deformasyonlar oluşur(Şekil 2.10.b). Ayrıca hareket yönüne doğru temas alanında bir dalga meydana gelir.



Şekil 2.10: Yuvarlanma sürtünmesi

(Şekil 2.10.c). Dolayısıyla  $F_n$  kuvvetine karşı basınçların tepkisi  $f$  değeri ile ileri kayar (Şekil 2.10.d). Bu durumda, elemanın yuvarlanmasında meydana gelen yuvarlanma sürtünme momenti (Şekil 2. 10.e)

$$M_{sr} = F_n \cdot f \quad (2.9)$$

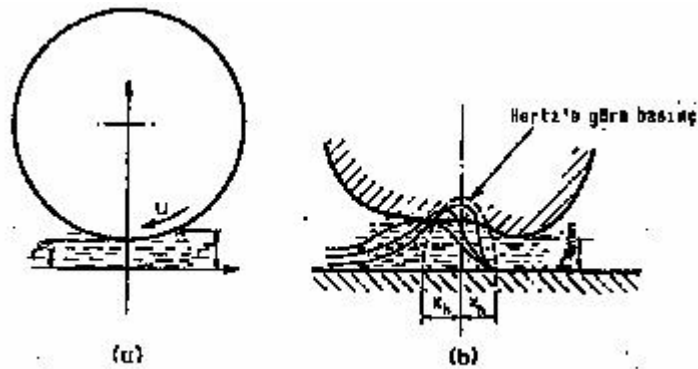
ve yuvarlanmayı gerçekleştiren kuvvet  $F_h = F_n \cdot f$  bağıntısından  $h \approx R$  değeri ile;

$$F = (f/h)F_n \approx (f/R)F_n = \mu_r F_n \quad (2.10)$$

olarak bulunur. Burada:  $f$ -mm veya cm ile ifade edilen yuvarlanma sürtünmesinin kolu ve  $\mu_r = f/R$ -yuvarlanma sürtünme katsayısıdır (2.10) bağıntısına göre yuvarlanmada harekete karşı direnci simgelemeyen sürtünme kuvveti

$$F_{sr} = \mu_r F_n \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu kuvvet  $F_{s0} = \mu_r F_n$  statik sürtünme kuvveti ile karşılaştırılırsa  $F_{sr} < F_{s0}$  yani  $\mu_r = f/R < \mu_0$  olduğu durumda eleman kaymaksızın sadece yuvarlanır;  $F_{sr} > F_{s0}$  yani  $\mu_r = f/R > \mu_0$  olduğu halde eleman yuvarlanmaz, sadece kayar. Yuvarlanma hareketi ve buna bağlı olan yuvarlanma sürtünmesi, yukarıda gösterilen olaylardan çok daha karışıktır. Harekete karşı direnç, temas yüzeylerinde oluşan kayma, histerezis, yüzey enerji kayıpları, geometrik düzensizlikler gibi olaylara bağlıdır.



Şekil 2.11: Elastohidrodinamik sürtünmesi

Yuvarlanan yüzeyler arasında yeterli yağ bulunduğu durumda, bir hidrodinamik sıvı sürtünmesi oluşabilir.(Şekil 2.11.a); ancak Hertz basıncı ve şekil değiştirmeler de dikkate alınırsa burada esasen Elastohidrodinamik denilen bir sıvı sürtünmesi meydana gelir (Şekil 2.11.b). Pratikte yuvarlanma hareketi dışı, kam mekanizmalarında ve rulmanlarda rastlanır. Bu nedenle yukarıda gösterilen olaylar bu sistemlerde önemlidir.

#### 2.1.6. Sürtünme kanunları

Sürtünme kanunlarının belirlenmesinde iki temel esas vardır ve bunlar büyük oranda uyumluluk gösterirler. Birinci kanun; temas eden yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvveti, görünür temas alanından bağımsızdır. İkinci kanun; sürtünme kuvveti,cisimler arasındaki normal yükü doğru orantılıdır. Böylece bir cisim diğeri üzerinde kayarken eğer normal yük iki katına çıkartılırsa, sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Bu kural daha çok Amontos kuralı olarak bilinir ve ilk kez 1699 yılında Fransız bilim adamı Amantos tarafından açıklanmıştır. Üçüncü bir kural olarak da; kinetik sürtünme kayma hızından yaklaşık olarak bağımsızdır. Bu kuralın ilk ikisine göre uygulanabilirliği daha düşük değerlerlerdir. Üçüncü kural Coulomb tarafından 1785 yılında açıklanmıştır.

#### 2.1.7. Sürtünme katsayısı

Bilindiği gibi iki malzeme birbirine temas edecek şekilde yerleştirilirse, malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete dik yönde olacak şekilde, bir sürtünme kuvveti oluşur. Kaymayı başlatan kuvvet ( $F_s$ ) ile temas yüzeyine etki eden kuvvet ( $F_n$ )arasında,

$$F_s = \mu_s \cdot F_n \quad (2.12)$$

Bağıntısı mevcuttur. Burada  $\mu_s$ , statik sürtünme katsayısıdır. Şekil de ki malzeme lerin herhangi birine teğetsel bir kuvvet uygulanırsa, iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda, teğetsel kuvvete rağmen cisimler birbiri üzerinde kayamaz, yani

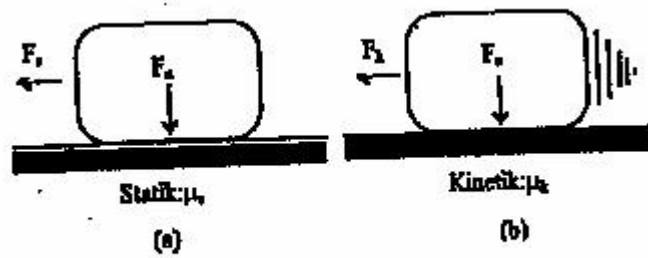
hareket edemezler. Bu durumda hareket olanağı olmadığından yüzeyler arasında "statik sürtünme" denilen bir direnç oluşur ve Newton kanununa göre  $F_s$  sürtünme kuvveti teğetsel sürtünme kuvvetine eşit ve ters yöndedir. Böylece;

$$F_s = F_t \quad (2.13)$$

yazılabilir. Kavrama ve fren gibi sürtünme ile çalışan sistemlerde gerçekte bu sürtünme hali mevcuttur. Diğer durumda ise,  $F_t$  teğetsel kuvvetin etkisi altındaki yüzeyler birbiri üzerinde kayarlar. Şekil 2.12.b'de görüldüğü gibi, kinetik veya dinamik sürtünme kuvveti denilen bu halde,  $F_s$  sürtünme kuvveti  $F_t$  teğetsel kuvvetinden daha küçüktür ve harekete ters yöndedir. Kaymanın başlamasıyla birlikte sürtünme kuvvetinde bir azalma görülür ve bu durumda,

$$F_s = \mu_k F_n \quad (2.14)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada  $\mu_k (<\mu_s)$  kinetik sürtünme katsayısıdır (şekil 2.12).



Şekil 2.12: Statik ve kinetik sürtünme katsayıları.

Kinetik sürtünme katsayısı  $\mu_k$ , statik sürtünme katsayısı  $\mu_s$ ' den daha küçük değerdedir. Bunun sebebi, dinamik haldeki yüzeylerde bulunan küçük çıkıntılar statik haldeki gibi yapışmak, ç, n gerekli zamanı bulamazlar. Bu nedenle geçilmesi gereken temas alanı azalır, 1 numaralı eşitlik göz önüne alınacak olursa,  $\mu_k$  değeri  $\mu_s$ '

ye göre daha küçük değer alacaktır. Kayma durur durmaz, sürtünme temas yüzeylerinin çok az büyümesine müsaade eder ve burada,yayınma mekanizması bağların kuvvetlenmesini sağlar. Böylece sürtünme katsayısı yeniden  $\mu_s$  değerine ulaşıır. Sürtünme katsayısının belirlenmesi için kullanılacak yöntemler ASTM G 115-93' de açıklanmıştır. Tablo 2.1 de değişik malzeme çiftleri için  $\mu_k$  değerleri verilmiştir.

Tablo 2.1 Değişik malzeme ve malzeme çiftleri için kinetik sürtünme katsayıları

Malzeme ifti	$\mu_k$
Vakumda temiz metaller	Yapışma, $\mu > 5$
Havada temiz metaller	0,8-2,0
Kuru yatak metali (kurşun) zerinde/elik	0,1-0,5
Seramik üzerinde (r.elmas)/elik	0,1-0,5
Seramik üzerinde/seramik	0,05-0,5
Polimer üzerinde/polimer	0,05-1,0
Metallerin sınır tabaka yağlanması	0,05-2,0
Yüksek sıcaklık yağlayıcıları (grafit)	0,05-2,0
Hidrodinamik yağlama	0,001-0,005

Pratikte sürtünme denilince akla gelen kinetik sürtünmedir ve aşınmada, enerji kaybı ve sıcaklık artışı gibi olaylar sürtünme sebebiyle oluşmaktadır.

Bu açıklamaya bağlı olarak, uygulama alanları göz önünde bulundurulursa, sürtünmenin hem istenen, hem de istenmeyen bir olay olduğu söylenbilir. Fren, kavrama ve sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında istenilen bir olay olduğu için, sürtünme artırılmaya çalışılır. Oysa, diğer izafi hareket yapan bütün sistemlerde, sürtünme istenmeyen bir olaydır ve azaltılması istenir.

## 2.2. Aşınma

### 2.2.1. Genel tanımlama

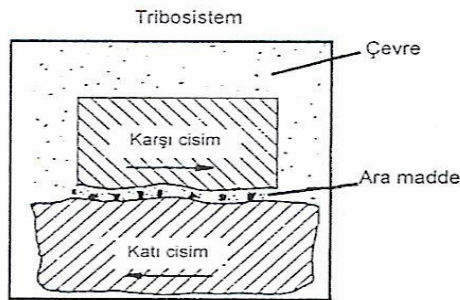
Aşınma katı cisimlerin yüzeylerinden çeşitli etkenlerle sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkmasıdır. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma;"kullanılan malzemelerinin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması" şeklinde tanımlanmaktadır.

Katı cisimlerin yüzeyleri oksitlerle yada yağlayıcılarla kaplansalar bile oksit filminin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının absorpsiyonunun zayıf olduğu yerlerde, yer yer katı-katı teması olur. Bu temaslar ise aşınmaya neden olmaktadır. Bu şekilde, yüzeyler ilk şekillerini kaybederler. Parçalar arasındaki boşluklar büyür, gürültü ve titreşimler meydana gelir, verim azalır. Kısaca makine amaçlanan fonksiyonunu normal bir şekilde yerine getiremez.

Bir aşınma sisteminde;

- 1- Ana malzeme (aşınan),
- 2- Karşı malzeme (aşındıran),

temel unsurlar olarak sayılabilir. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılır ve Şekil 2.13 de böyle bir sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.13: Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi.



### **2.2.2. Aşınma türleri**

Aşınma, hareketli makine parçalarının ömürlerini, performanslarını azaltan ve bu parçaların bozulmasına neden olan çok önemli bir faktördür. Bu sebeple, ekonomik açıdan aşınmasının neden olduğu kayıplar ve hasarlar çok büyük olmaktadır.

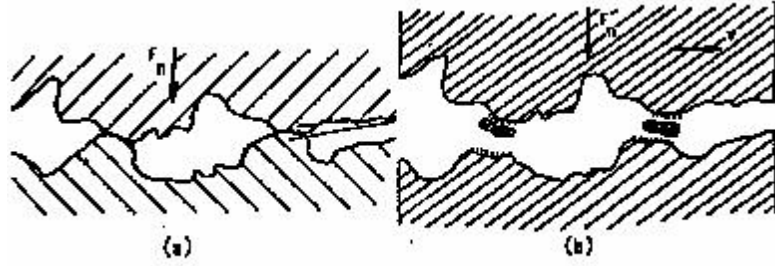
Rabinowicz aşınmayı dört temel grupta toplamıştır. Bunlar; adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, kalkma veya oyuklanma ve kimyasal veya korozif etkidir. Problemin doğru olarak çözülmesi için aşınma mekanizmasının çok iyi anlaşılması gerekmektedir.

Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerinin değiştirilmesinden etkilenmektedir. Aşınmanın gözlenmesinde ortaya çıkan izler mekanizmanın belirlenmesinde oldukça önemlidir. Ancak Dorrison oluşan izlerden mekanizmanın belirlenmesinin oldukça zor olduğunu göstermiş, çoğu zaman bir mekanizmanın etkili olduğunu belirtmiştir. Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin sonucudur. Dış etkileri, fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle pratikte, bir aşınma hali değil, bir çok aşınma halleri vardır. Adhesiv, abresiv, oyuklanma ve kalkma, kazıma olmak üzere dört grupta toplanır.

#### **2.2.2.1. Adhesiv aşınma**

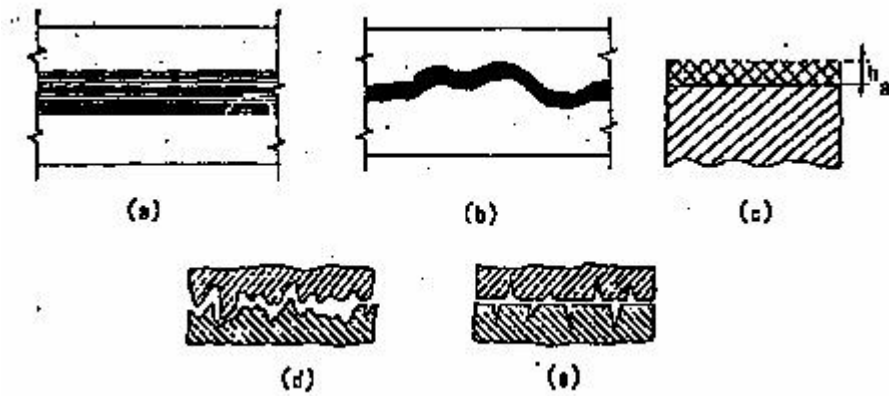
Yapışma aşınması olarak ta bilinen adhesiv aşınma en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle adhesiv aşınma hasarlarının etkisi bulunmaz. Bu tür aşınma iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi sırasında yapışması ve kayması sonucunda küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşmaktadır. Teorik olarak, malzeme yüzeyinde bulunan düzensizlikler sebebiyle birbirine temas etmekte olan iki yüzey arasında uygulanan yüke bağlı olarak bir çok noktada temas gerçekleşir. İki metal yüzeyi birbiri ile temas ettiği taktirde, malzemenin yüzeylerinde bulunan izler, düzensizlikler malzeme yüzeyinde bölgesel yüksek basınçlar oluştururlar ve yüzey filmlerinin kırılmasına neden olurlar. Temiz metal yüzeyleri birbirlerine temas ettirildikleri zaman, yüzeylerdeki elektrostatik

düzensizlikler sebebiyle, kaynama için bir eğilim söz konusudur. Eğer bir yüzey diğer yüzey üzerinde hareket halinde ise, kaynamanın olduğu bölgeler kırılacaktır. Kırılma düzlemi orijinal ara yüzey olabilmekte ve ana malzemede bir zayıflamaya neden olmaktadır. Adhesiv aşınmanın esası kaynak bağı teorisi ile açıklanabilir. Daha önce belirtildiği gibi yüzeyler arasındaki gerçek temas alanı çok küçük olduğundan temas noktaları büyük bir basınç altında bulunmaktadır. Normal olarak yüzeylerde adsorbe edilmiş olan tabii veya yağ tabakaları basınç altında parçalanır; malzemelerin molekülleri doğrudan doğruya temasa gelir ve bölgesel kaynak bağları oluşur. Bu kaynak bağlarının kopması ile meydana gelen malzeme kaybı, adhesiv aşınmayı oluşturur (Şekil 2.14 a,b).



Şekil 2.14: Adhesiv aşınmasının oluşması

Adhesiv aşınması, yüzeylerde bir takım çizikler şeklinde (Şekil 2.15a) veya tam tersine yüzeyleri parlatmış gibi görülmektedir; bu şekilde yüzeylerden bir tabaka kaldırılmaktadır. Teorik olarak bu tabaka Şekil 2.15c de gösterildiği gibi olur. Aşınma bu tabakanın  $h_a$  kalınlığı veya aşınma alanı  $A_h$  ile gösterilirse aşınma hacmi  $V_h = h_a \cdot A_h$  ile ifade edilebilir .



Şekil 2.15: Aşınma çeşitleri

Adhesiv aşınması temas yüzeylerde meydana gelen basınç  $P-F_n / A$  ve kayma  $v$  tarafından önemli şekilde etkilenmektedir. Ayrıca aşınmanın zamana bağlı olarak geliştiği göz önünde tutulursa, analitik olarak adhesiv aşınması

$$h_a = k_a pvt \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilebilir.

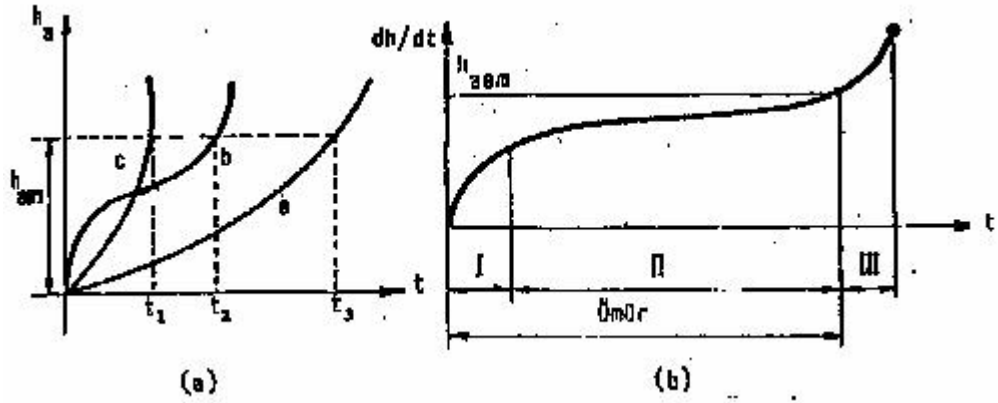
Burada  $k_a$  temasta bulunan malzeme çiftine bağlı olan ve deneylerle tayin edilen bir faktördür. Aşınmanın yanı sıra pratikte aşınma hızı (veya şiddeti)

$$dh/dt = k_a pv \quad (2.19)$$

de önem taşımaktadır. Belirli bir  $(pv)$  değeri için zamana bağlı olarak aşınma, Şekil 2.52a da gösterildiği gibi çeşitli şekilde gelişebilir. Bunlardan şekil 2.15b deki model seçilirse, aşınmanın esas üç bölgeden meydana geldiği görülür. I. Bölgede; yani parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj denilen bu aşama parçaların birbirine alıştırılma safhasıdır.

Bazen imalatın devamı olarak sayılan bu safhada pürüzlükler eşitlenir; Şekil 2.15 de rodajdan önce (d) ve rodajdan sonra (e) yüzey durumu gösterilmiştir. Rodaj parçanın daha sonraki aşınmasını büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle parçaların rodajlarının iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi gerekir. Genellikle rodaj, yüksüz ve normal hızdan daha küçük hızda yapılır. Rodajın iyi ve kısa süre içinde tamamlanması için bu safhaya ait olan özel yağlar kullanılır.

II. Bölgede esasen çalışma sırasındaki meydana gelen aşınmadır; burada aşınma hızı az ve sabittir. Ancak zaman geçtikçe parçalar arası boşluklar büyür, dinamik ve titreşimlerinin artması ve yağlama koşullarının kötüleşmesi sonucu aşınma gittikçe artar ve şiddetli denilen aşınmanın III. Bölgesine girilir. Bu safhada parçaların kırılması tüm makinanın bozulması beklenebilir.



Şekil 2.16: Adezyon aşınmasının zamanla gelişmesi

Elemana ait, çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı ( $h_{em}$ ) tayin edilirse, aşınma-zaman diyagramından elemanın normal çalışına zamanı veya ömrü hesaplanabilir. Şekil 2.16a dan görüldüğü gibi aynı  $h_{em}$  için aşınma şiddetine bağlı olarak çeşitli ömürler karşılık gelir. Bu zamandan sonra parça değiştirilmeli veya tamir edilmelidir.

Yukarıda açıklanan zamana bağlı aşınmanın yanı sıra yenme adını taşıyan ani aşınma tipide vardır; bu aşınmada yüzeyler arasında kuvvetli kaynak bağları oluşur, parçalar birbirine kilitlenir veya hareket ettiği halde yüzeyler tamamen bozular. Genellikle yenme; eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan, basınç veya kayma hızlarının çok büyük ve yağlanmanın yetersiz olmasından kaynaklanır. Yenmede görülen şiddetli kaynama, o noktanın sıcaklığının artmasından ileri gelir. Sıcaklık arttıkça, yapışmış tabakanın düzeni bozulmaya başlar, belirli bir sıcaklıkta kopar ve metalik kaynak bağları oluşur. Bu sıcaklığa tabakanın kritik sıcaklığı da denilir.

Adezyon aşınmasının hesap bağıntıları;

$$P_m = F/A < P_{em} \quad \text{veya} \quad (P_m v) < (P_m v)_{om}$$

şeklinde yazılabilir.

Burada;

- $P_m$  - ortalama yüzey basıncı,  
 $F$  - temas yüzeyine normal kuvvet,  
 $A$  - temas yüzey alanı,  
 $P_{em}$  - emniyet yüzey basıncı,  
 $V$  - kayma hızıdır.

$(P_m V)_{em}$  değerleri aşınmaya maruz kalan makine elemanına bağlı olarak verilmektedir.

Rabinowicz ve Tabor aşınma ve yağlayıcılar üzerine bazı çalışmalar yapmışlar ve yüzeylerde yağlayıcı olmazsa yüzeye dik olan yükün artışına bağlı olarak, aşınmanın da lineer olarak arttığını bulmuşlardır. Yüzeye yağlayıcı uygulanması durumunda ise, malzeme transferinin azalması kadar, sürtünme katsayısının da düşürüldüğünü gözlemlemişlerdir.

Skorski çoğu metaller için yapışma sabitinin sürtünme katsayısı ile ilişkili olduğunu göstermiştir ve malzeme transferindeki azalmanın şüphesiz olarak, yapışmanın boyut ve sayısındaki azalmanın bir sonucu olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar adhesiv aşınmanın bazı genel özelliklerinin çıkartılmasında faydalı olmuştur.

Bunlar;

- 1 -Aşınma miktarı normal yük ile orantılıdır
- 2-Aşınma miktarı kayına mesafesiyle orantılıdır
- 3-Aşınma miktarı aşınan yüzeyin sertliği ile orantılıdır.

Bu çalışmalar, gösterilen parametrelerin değiştirilmesine bağlı olarak, bir çok aşınma probleminin çözülebileceğini göstermektedir. Metalografik çalışmalar sonucunda belirlenen başlıca özelliklerden biri de, malzeme taşınımının yumuşak metal yüzeyinden sert olan metal yüzeyine doğru olmasıdır.

Adhesiv aşınmanın etkisini azaltmak için düşünölen bir çok faktör vardır. Bunlar içerisinde yağlayıcı uygulaması tatmin edicidir ve malzeme seçiminde en çok çalışılan konular arasındadır. Araştırmalar ve deneyler sonucunda adhesiv aşınmanın azaltılmasında bazı uygulamaların faydalı olduğu görölmüşür. Bunlar;

1. Malzeme çiftleri düşük katı çözünürlüğe sahip olmalıdır. Roach, Goadzeit, ve Hunnicut adhesiv yapışmada alaşımlamanın çok etkili bir parametre olduğunu belirtmişlerdir.

2. Malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde mümkün olduğunca sert olması gerekmektedir. Genellikle sert metaller çok zor plastik davranış gösterirler ve daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler. Rabinowicz silisyumun çok iyi bir şekilde kayma sistemine sahip olarak yüzey sarma etkisinin olduğunu işaret etmiştir. Skorski, metallerin yapışmasını etkileyen faktörleri özetlemiştir. Bu faktörler Tablo 2.2 de görölmektedir.

Tablo 2.2: Metallerin (adhesyonunu) etkileyen faktörler

Özellik	Tür veya Büyüklük	Adhesyon Katsayısı
1 . Yüzeye yardımcı bir madde süre	Yüksek	Düşük
2. Kristal sistemi	Kübik Hegzagonal	Düşük
3. Deformasyon sertleşmesi katsayısı	Yüksek	Yüksek
4. Saflık	Yüksek	a
5. Sertlik	Yüksek	Düşük
6. Elastik modül	Yüksek	Düşük
7. Ergime sıcaklığı	Yüksek	Düşük
8. Yeniden kristalleşme sıcaklığı	Yüksek	Düşük
9. Atomik yarıçap	Düşük	Düşük
10. Yüzey enerjisi	Yüksek	a

- Adhesiv aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu bakımdan malzeme çiftinin birisi sert (örneğin çelik) diğeri yumuşak, (örneğin bronz) veya kalaya dayanan yatak malzemesi olması şeklinde seçilmelidir.

- Yağlanmanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adezyon aşınmasını önlemektedir. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katı (aditifli) bir yağ konulursa, aşınma ve bilhassa yenme önlenir. Buna göre adezyon aşınmasını önlemek için iyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katıklar kullanılmalıdır. Yenmeyi önleyen yağlara, yüksek basınçlı (YB;HB) yağlar denilmektedir.

a. Hegzagonal sıkı paket yapıda olan çinko metali üzerinde çalışılmıştır. Büyük oranlarda bir değişimin olmamasına karşın yüzey merkezli kübik yapıda olan bakır üzerindeki çalışmalar büyük ölçüde etkinin var olduğunu göstermiştir.

b. Fizikokimyasal olarak yapılan araştırmalara bağlı olarak yüksek yüzey enerjisinin yüksek adhesyona neden olacağı söylenmektedir. Mekanik açıdan yüksek yüzey enerjili malzemeler oldukça serttir ve düşük adhesyon katsayısına sahip malzemelerdir.

#### **2.2.2.2. Abrasiv aşınma**

Çok hızlı bir şekilde gelişen, etkisini anında belli eden ve çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve de sistemin hasarına sebep olacak şekilde gelişen bir aşınma türüdür.

Abrasiv aşınma iki yüzeyden birinin çok sert ve yüzeyin pürüzlü olduğu şartlarda oluşan bir aşınmadır. Benzer davranış çok sert partiküllerin daha yumuşak bir yüzeye batmasıyla da görülmektedir. Etki, yumuşak malzemenin üzerinde gelişen belirgin çizikler şeklinde ortaya çıkmaktadır. Aşınma etkisi sert partikülün, yumuşak

malzemenin yüzeyinden parça kopartarak uzaklaştırmasıyla olur ve parçanın kopması sırasında yapışmanın olmadığı bir sistemle gerçekleşmektedir. Yüzeyden malzeme kaybının çok hızlı geliştiği bir aşınma mekanizmasıdır.

Genel olarak abrasiv aşınma türleri üç ana grupta toplanmaktadır. Bunlar; oymalı sürtünme aşınması, öğütmeli sürtünme aşınması ve erozyondur. Bir çok karakteristik açıdan bu aşınma türlerini birbirlerine benzemelerine rağmen, tek tek incelendikleri zaman, birbirlerinden önemli farklılıklar sergiledikleri görülür.

Oymalı sürtünme aşınması, kütleli bir şekilde yüzeyin deformasyonu sonucunda oluşan bir aşınma türüdür, aşırı yüklemeler etkisi ile meydana gelen oymalı sürtünme aşınmasına örnek olarak, ağır koşullar altında çalışan kazıcı, kırıcı gibi maden araçlarında görülen aşınmalar verilebilir.

Öğütmeli sürtünme aşınması, iki yüzeyin birbiri üzerinde hareket etmesi sonucunda ortaya çıkar ve ara yüzeyde abrasyona dayalı parçacıklar bulunmaktadır. Bu ara yüzeyde yer alan taneler, ya bir yüzeyden aşınarak gelir yada her iki yüzeyin birlikte aşınması sonucunda ortaya çıkar. Abrasiv aşınma, keskin köşelere sahip olan abrasiv tanelerin yüzeye yük uygulanması durumunda parçanın yüzeyini kazıyarak veya kaldırarak parçalar kopmasıyla hasara neden olmaktadır. Örnek olarak bilyalı değirmenler gösterilebilir.

Erosiv aşınma ise, aşındırıcı tozların askıda durduğu sıvı veya hava gibi akışkan bir ortam vasıtasıyla malzeme yüzeyine çarpma etkisi ile gerçekleşmektedir. Her bir temas malzeme yüzeyinden küçük bir parçanın kaybına neden olmaktadır. Normal şartlar altında aşınma hızı düşüktür. Ancak yüksek sıcaklıklarda, malzemenin akma dayanımı düşmekte ve yüksek akış hızlarında eroziv aşınma, hız kazanmaktadır. Bazı şartlarda, malzemenin yüzeyinin her tarafını korozyon ürünleri kaplayabilmektedir. Buna erozyonun korozyon etkisi de denilmektedir. Örnek olarak gemi pervaneleri verilebilir.



Tablo 2.3’de tipik abrasiv aşınma uygulamaları ve aşınma miktarları verilmektedir. Burada görülmekte olan önemli bir durum, oymalı sürtünme aşınmasının son derece yüksek aşınma hızlarına sahip olduğudur. Diğerleri, eğer yüksek uygulama hızlarına sahip değilseler, örneğin kum çarpması gibi bu kadar yüksek aşınma hızlarına sahip olmazlar.

Tablo 2.3: Abrasiv aşınma proseslerinin içerdiği tipik aşınma hızları

Mekanizma	Aşınma miktarı (mils/h)
1.Oymalı sürtünme aşınmasında ostenitik mangan çeliği	
a. Darbeyle <i>toz</i> üretiminde kullanılan çekişler	5-1000
b. İş makinelerinin dalıcı dişleri	5-500
c. Kaba cevher kazıyıcılarının aşındırıcı bıçakları	4-15
d. Top milli kepçe ağızlan	2-20
e. Silis cevherlerinin kırılması için kırıcı bantlar	0.1-1.0
f. Kaba silis cevherlerinin tutulmasında kullanılan oluk bantlar	
2.Yüksek gerilmeli (öğütmeli) abrasiv aşınmada düşük alaşımlı yüksek karbonlu çelikler	
a. Silis cevherlerinde kullanılan çubuk ve bilyeli mil bantları	0,5-5
b. Islak öğütülmüş silis cevherlerinin aşındırma bilyelerinde	0.15-0.45
c. Islak öğütülen ham çimento çamurundaki öğütücü bilyeler	0.05-0.15
d. Kuru öğütülen çimento klinkerlerinde kullanılan öğütücü bilyeler	0,005- 0.015
3.Düşük gerilmeli abrasiv aşınma (Eroziv)'da perlitik beyaz dökme demir	
a. Kum püskürtme nozülleri	100-1000
b. Kum taşıma bantları	50-250
c. Aşındırıcı mineral çözeltilerinin pompalanmasında kullanılan yükleyici vanalar	0,1-5 0.05-1
d. Abrasiv mineral çözelt. ajitasyon ve flotasyon pervaneleri	0,05-0,2
e. Kum çözeltilerinde vida tipi sınırlandırıcıların aşınan papuçları	

Bir malzemenin diğer bir malzeme tarafından önemli ölçüde abrasiv aşınmaya tabii tutulabilmesi için, ikinci malzemedен çok daha yumuşak olması gerekir. Bu sebeple abrasiv aşınmayı minimuma indirmek için aşınmaya uğrayan malzemenin diğer malzemeye göre daha sert olması istenir. Bu özellik değişik metotlarla sağlanabilir. Örnek vermek gerekirse,

Bunlar;

- a) Alaşımlamayla malzemelerin sertlikleri iyi bir şekilde artırılabilir.
- b) Isıl işlem uygulamaları yine malzemelerin sertliklerini önemli ölçüde değiştirebilir.
- c) Malzemelerin yüzeylerine dışarıdan müdahale ederek sert yüzey tabakası oluşturabilir. Buna örnek olarak anodizasyon, elektro-kaplama, alev püskürtme, nitrasyon, plazma sprey, borlama ve bunun gibi birçok diğer uygulamalar örnek olarak verilebilir. Bir çok yüzey işlemi aşınmayı azaltmak ve sınırlandırmak amacıyla uygulanmaktadır.

### **2.3. Aşınma deneyleri ve ölçüm yöntemleri**

Endüstride kullanılan alet ve ekipmanlarda aranılan özelliklerden bir tanesi de servis ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini artırdığı gibi, onarım için geçen süre de üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmaktadır.

Bu malzemelerin tespiti için de bir çok laboratuvar deneylerinin yapılması gereklidir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışır. Bu model, basit geometrik şekil'e sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir. Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

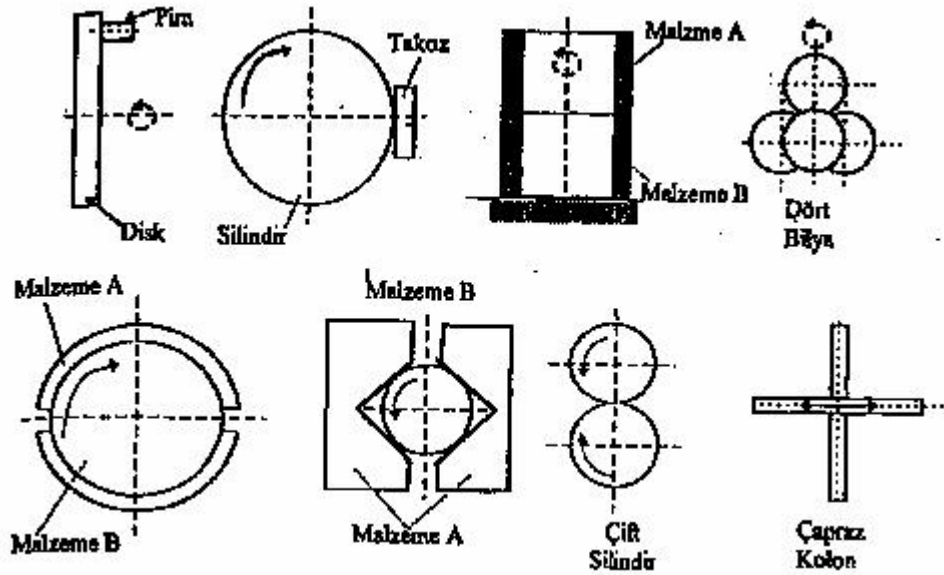
a.) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemelerinin adhesiv (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler (Şekil 2.17).

b.) Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneyler (Şekil 2.17).

ASLE (American Society of Lubrication Engineers, 1976) tarafından yüz kadar deney sistemi belirtilmiştir. Bunlardan en çok kullanılanları Şekil 2.17 ve 2.18 de görülmektedir. Aşınma farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyoizotop metotları sırasıyla açıklanmıştır.

### 2.3.1. Ağırlık farkı metodu

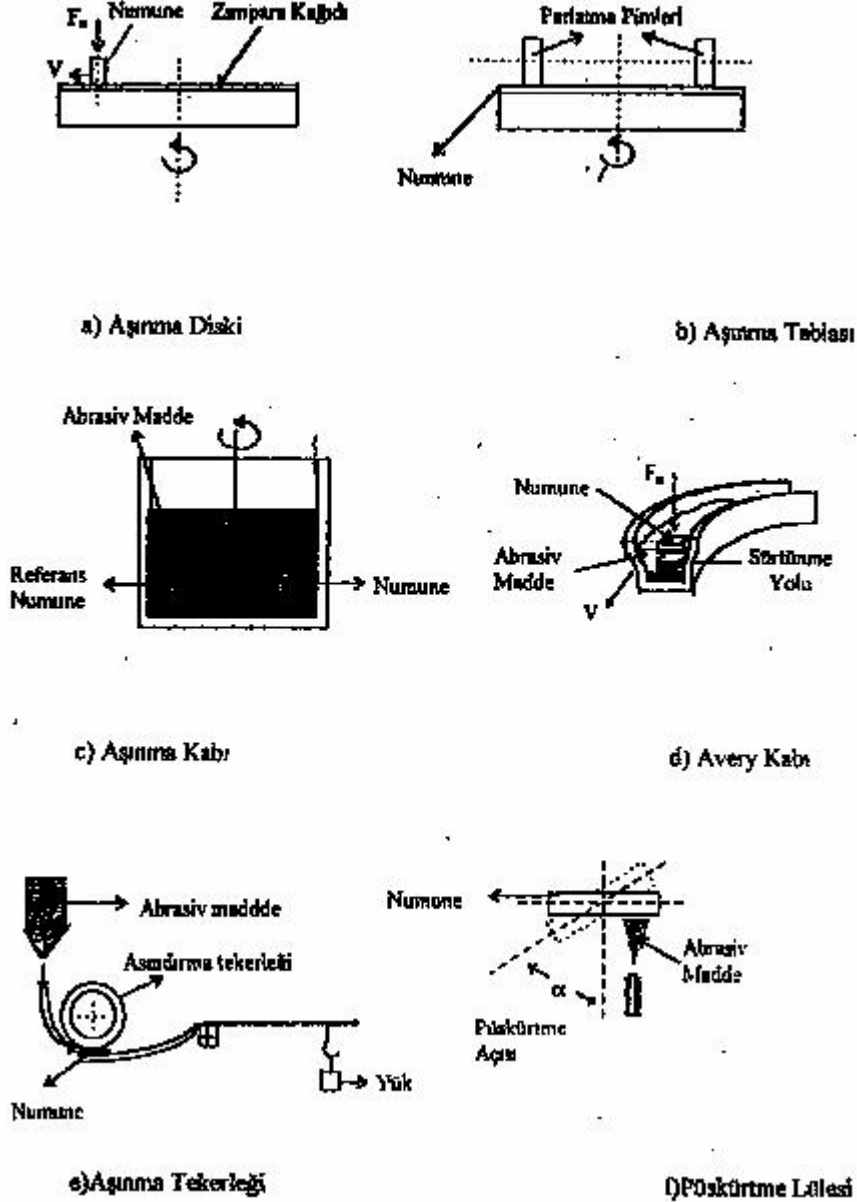
Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınmaması, bu yöntemin dezavantajıdır.



Şekil 2.17: Yağlamalı veya yağlamasız adhesiv aşınma deney yöntemleri

Ağırlık kaybının ölçülmesi  $10^{-3}$  veya  $10^{-4}$  gr. hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram ve miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı, (gr/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle,

kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yüklemeye ağırlığı hesaba katılmak suretiyle, birim yol ve birim yüklemeye ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir.



Şekil 2.18: Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler.

Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağıntılar şunlardır.

$$W_a = \frac{G}{d \cdot M \cdot S} \quad (\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}) \quad (2.20)$$

Burada;

$W_a$ : Aşınma oranı ( $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ ),

$\Delta G$ : Ağırlık kaybı (mg),

M: Yükleme ağırlığı (N),

S: Aşınma yolu (m),

d: Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ )

olarak verilmiştir. Aşınma ( $W_a$ ) ters değeri de aşınma direnci ( $W_r$ ) olarak gösterilir.

$$W_r = \frac{1}{W_a} \quad (\text{N.m/mm}^{-3}) \quad (2.21)$$

Başka bir bağıntı olarak da, bir kilometre kayma yoluna kabul eden yükseklik kaybı bağıntısı vardır ki, genellikle iki elemanlı abrasiv aşınmanın hesaplanmasında kullanılır.

$$W_s = \frac{10^4 G}{F \cdot d \cdot s} \quad (\mu/\text{km}) \quad (2.22)$$

Burada;

$V_s$ : Bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı ( $\mu\text{m}$ ),

$\Delta G$ : Ağırlık kaybı (mg),

F: Aşınma yüzeyi ( $\text{cm}^2$ ),

d: Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ ),

s: Kayma yolu (km)

olarak alınır. Deney malzemesi yükseklik kaybının, mukayese malzemesinin (örneğin Fe 37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma orantı sayısını ( $W_s$ ) verir.

$$W_s = V_g(\text{deney numunesi}) / V_s (\text{Fe 37 çeliği}) \quad (2.23)$$

Bu orantı sayısının ters değende bağıl aşınma direnci R, olarak kullanılır.

$$R = \frac{1}{V_s} \quad (2.24)$$

Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, genellikle DIN 50320 standardında verilen boyutsuz aşınma oranı formülü yaygın olarak kullanılır.

### **2.3.2. Kalınlık farkı metodu**

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırılması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır, kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla  $\pm 1 \mu\text{m}$  duyarlılıkta ölçülmelidir.

### **2.3.3. İz değişimi metodu**

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir.

### **2.3.4. Radyoizotop metodu**

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya  $\alpha$ -parçacıklarıyla bombardıman edilerek, radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır. Fakat ekonomik olmaması

nedeniyle ancak özel amaçlarla kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metod değildir.

## **2.4. Yağlayıcı Maddeler**

### **2.4.1. Genel ifadeler**

Yağlayıcı maddeler; sürtünmeyi azaltmak: aşınmayı kısmen veya tamamen önlemek için sıcaklığın yükselişini önlemek için kullanılmaktadır. Sürtünme bakımından, çeşitli sürtünme halleri için yağlayıcı maddenin fonksiyonu farklıdır. Sıvı sürtünmesinde yüzeyler arasında bulunan yağ tabakası yüzeyleri birbirinden tamamen ayırdığından burada önemli olan husus yağın viskozitesidir. Bu nedenle sıvı sürtünmesi halinde genellikle sıvı bazı hallerde gaz yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Sınır sürtünmesi halinde yağlayıcı maddenin yapışma kabiliyeti ve buna bağlı olarak kimyasal bileşimi önemlidir. Bu nedenle sınır sürtünmesi halinde katı ve katı katı sıvı yağların önemli bir fonksiyonu, sürtünmeden dolayı yüzeylerde oluşan ısının, yağın akması ile dışarıya taşınmasıdır.

Yağlayıcı maddeler fiziksel hallerine göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz yağlayıcılar olmak üzere dört gruba ayrılabilir.

### **2.4.2. Katı yağlayıcı maddeler**

Katı yağlayıcılar yalnız başlarına veya sıvı yağlar veya greslerin içine karıştırılarak kullanılır. Bu son durumda katı yağlayıcılar katık rolünü oynamaktadır. Pratikte en çok kullanılan katı yağlayıcılar grafit veya molibden disülfittir. Toz veya ince ve düzgün levhacıklar şeklinde kullanılan grafit; yüksek sıcaklıklarda (500°C nin üstünde) yalnız başına; diğer hallerde yağ veya gres yağı ile bir süspansiyon oluşturacak şekilde karıştırılarak kullanılmaktadır. Grafitin başlıca yağlama özelliği, madensel yüzeylerin üzerinde, kayma gerilmesi küçük ve kopma mukavemeti yüksek bir tabaka oluşturmasından ileri gelmektedir. Bu özellikler hava veya suyun

bulunmaması halinde, örneğin vakumda grafit, yağlama özelliği bir yana çok kuvvetli bir aşındırma elemanıdır.

Molibden disülfid, madensel yüzeylerin üzerinde grafit benzer olarak bir tabaka oluşturur. Bu tabakanın oluşması hava veya suya bağlı değildir. Bu nedenle vakumda veya oda sıcaklığında molibden disülfid çok iyi bir yağlama özelliğine sahiptir. Grafit ve molibden disülfidin ısı stabiliteyi çok iyidir. Grafitin özgül ağırlığı daha küçük olduğundan sıvı ile grafitin karıştırılmasıyla elde edilen karışım, molibden disülfidinkinden daha stabildir. Yağlayıcı madde olarak kullanılan grafit ve bilhassa molibden disülfid çok temiz olmaları gerekir; aksi durumda yüzeyleri şiddetli bir şekilde aşındırırlar. Bazı durumlarda grafit ve molibden disülfid döküm sırasında metalik malzemeye karıştırılarak kullanılır.

#### **2.4.3. Sıvı yağlayıcı maddeler (yağlar)**

Sıvı yağlayıcı maddeleri; organik (hayvansal ve bitkisel), madensel (mineral) ve sentetik yağlar olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür.

a- Hayvansal ve bitkisel yağlar iyi yağlama özelliklerine sahiptirler; ancak ömürleri çok kısadır. Bundan başka gıda maddeleri olarak kullanıldıklarından ve fiyatları da çok yüksek olduğundan sanayide çok az kullanılırlar. Ayrıca kimyasal bakımdan metallerle karşı madensel yağlar kadar etkisiz değildirler. Hayvansal esaslı kemik ve mafsallık yağları cihazlarda kullanılmaktadır.

b- Sıvı mineral yağların başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir: Sürtünme halinde bulunan yüzeyler arasına kolayca girip çıkabilirler; ısıyı dışarıya taşıyabilirler; kolayca depo edilebilirler; basit tertibatlarla yüzeye temiz ve soğutulmuş halde sürekli olarak gönderilebilirler. Bu nedenle sıvı mineral yağlar, diğer yağlardan çok daha çok kullanılırlar. Bunun yanı sıra çeşitli metaller ve lastik gibi malzemelere karşı kimyasal bakımdan etkisizdirler; örneğin metalleri oksitlemezler, aksine oksitlenmeye karşı koruyucudurlar. Ayrıca büyük miktarda üretilebilirler; bu husus



dünyadaki petrol rezervlerine bağlıdır. Madensel yağlar ham petrolden damıtma yöntemi ile elde edilir. Ham petrol doğada üç grup halinde bulunur. Birinci grup parafin esasından olup içinde yağlayıcı niteliği olmayan vaks vardır. İkinci grup naften esasından olup en son buharlaşma kısımlarında asfalt bulunur. Üçüncü grup karışık ham petrol esasından olup içinde vaks ve asfalt vardır. Böylece madensel yağlar da ham petrolün esasına göre parafin, naften ve karışık ham petrol esaslı yağlar olmak üzere üç gruba ayrılır. Damıtma yoluyla elde edilen yağların özellikleri düşüktür. Bu sebepten basit ve önemsiz yağlama işlerinde kullanılmaktadır. Yağlara daha yüksek özellikler kazandırmak için damıtmadan sonra yağlar tasfiye (rafine) edilir. Böylece daha yüksek yağlama özelliklerine sahip olan rafine yağlar elde edilir.

Madensel yağların sınıflandırılması, genellikle SAE cetvel sistemine göre yapılır. Burada numaralar belirli bir sıcaklıkta, Saybolt Üniversal Saniye (SSU) cinsinden viskozite değerlerini ifade ederler. Bunun yanı sıra kullanma alanına göre yağlar: mekik yağı (4...19cSt), ince makina yağı (19...40cSt); ağır makine yağı ve içten yanmalı motor yağı (40...215) ve silindir yağı (250...700cSt) gibi sınıflara ayrılabilir; parantez içindeki viskozite değerleri 100°C için geçerlidir.

DIN standartlarında, SAE sınıflandırma istemi kabul edilmekle beraber, yağların 50°C sıcaklıktaki dinamik viskozitelerini esas alan birer harf ve numara ile ifade edilen ayrı bir sınıflandırma sistemi vardır. Örneğin N4, N9, NJ6 vs; D4, D9, D16 vs; TDI6, TD25 vs. gibi. Burada N-makine alanında kullanılan "Normal yağlar"ı (DIN51501), D-DfN5J504'e göre yağlan, TD-türbin yağlarını (DIN51515) göstermektedir. Numaralar, 50°C sıcaklıktaki dinamik viskozitesini ifade ederler.

c- Sentetik yağlar genellikle kimyasal maddelerden imal edilen suni yağlardır. Bu yağlar tek başlarına veya madensel yağların özelliklerini iyileştirmek için katkı (aditif) olarak kullanılmaktadırlar. Sentetik yağların sınıflandırılması genellikle bu tür yağların imalinde kullanılan kimyasal maddelere göre yapılır. Örneğin dibazik asit esteri, fosfat esteri, silikon, silikat esteri yağları gibi Bazı teknolojik nedenlerle

henüz nispeten az miktarda imal edilen bu yağlar, gelecekte yağlama alanında önemli rol oynayacaklardır.

#### **2.4.4. Yarı katı yağlayıcı maddeler (gresler)**

Gresler, içinde katılaştırıcı madde bulunan sıvı yağlardan oluşan yarı katı yağlayıcı maddelerdir. Katılaştırıcı madde olarak genellikle alüminyum, baryum, kalsiyum, lityum, sodyum gibi madensel sabunlar ve bunların yanı sıra bentonit, mika veya organik esaslı sabun olmayan maddeler de kullanılabilir. Gres, katılaştırıcı maddeye, sıvı bileşene veya kullanma alanına göre isimlendirilir. Örneğin en çok kullanılan katılaştırıcı maddeye göre; alüminyum sabunu, baryum sabunu, kalsiyum sabunu gibi gresler vardır. Gresler genellikle açıkta şahsan ve uzun yağlama süreleri olan düşük ve orta hız ve yük altında çalışan sistemlerde kullanılırlar.

#### **2.4.5. Gaz yağlayıcı maddeler**

Yüksek hız ve az yüklü sıvı sürtünmeli sistemlerde, gaz niteliğini yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Bunların viskoziteleri sıvılara göre çok küçük olduğundan kullanıldığı sistemlerde oluşan sürtünme ve bunun sonucunda sıcaklık çok az olur. Ancak bu sistemlerin yük taşıma kabiliyetleri çok azdır. İlk zamanlarda hava, hidrojen ve azot gaz yağlayıcıların ana malzemeleri olduğu halde günümüzde kükürt heksafloridler, sıvı nitrojen, buhar ve organik buhar kullanılmaktadır. Böylece ultrasantrifüjlerde, yüksek hızlı taşlama tezgahlarının ana millerinde, jiroskoplarda, elektrik motorlarında uygulanan bu yağlama usulü, gaz türbinleri, jet motorları, roketler, nükleer reaktörler gibi sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır.

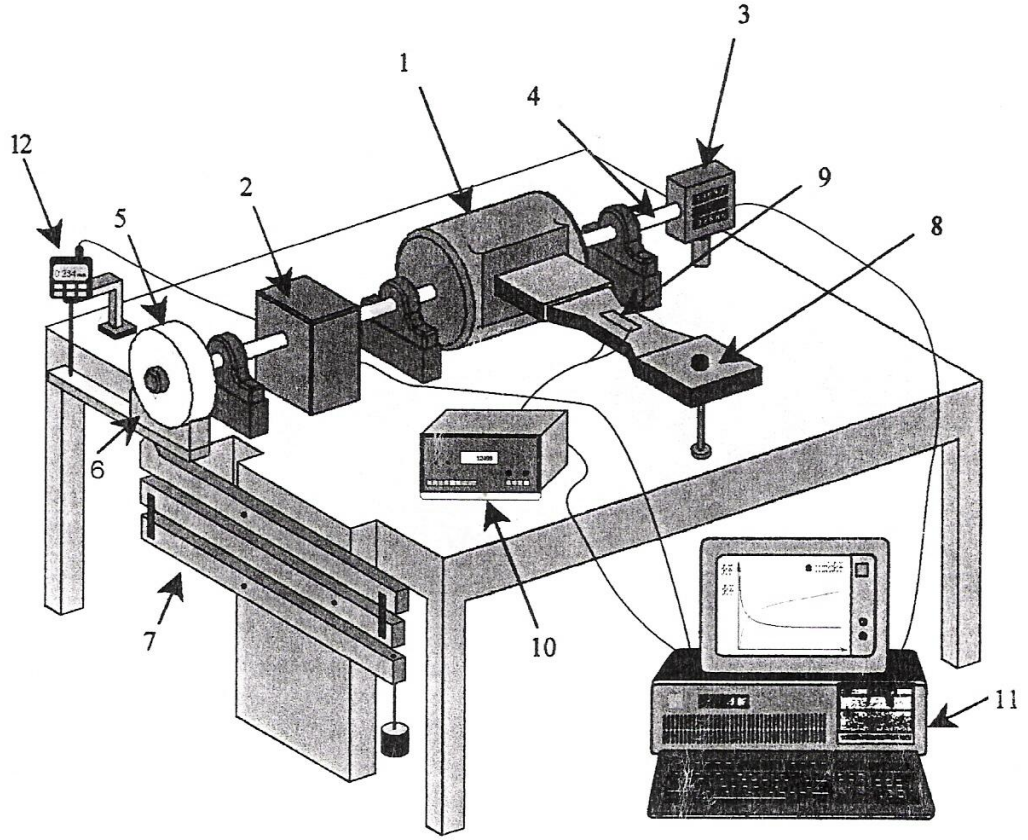
### 3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Herkes tarafından da bilinir ki sürtünme çok karmaşık bir hadisedir ve günümüzde bir malzemenin diğerine sürtünmesi esnasında yer alan süreç tamamen anlaşılmıştır. Sürtünmeye etki eden yüklemeler, kayma hızı, ısı, kayan cismin yapısı gibi birçok girdi faktörü olmasına rağmen, sadece iki temel girdi parametresi bulunmaktadır; sürtünme katsayısı ve aşınma oranı ki bunlar tüm sürtünme olayını tanımlar. Sürtünmeden doğan aşınma makine parçalarında vakitsiz arızalara neden olur. Aşınmadan kaynaklanan kayıplar çok büyüktür ve aşınma ve sürtünmeyi azaltmak, maliyeti düşürmek açısından çok önemlidir[2].

Günümüzde birçok bilim adamı ve mühendis bu alana muazzam ilgi göstermekte ve çok çeşitli araştırmalar yapmaktadır, aşınma ve sürtünmenin azaltılması üzerine odaklanmış birçok yeni materyal ve fikir için çok fazla kaynak tüketilmektedir. Olayı daha iyi anlamak ve eldeki malzemelerle yağlama materyallerini güvenilir bir şekilde karşılaştırmak için bilgisayar kontrollü aşınma-sürtünme test metodolojisi gibi, uygun ölçüm aletlerine sahip olmak gereklidir[3].

R. Dubrovsky ve A. Titov tarafından NJIT’ da ki Yüzey Mühendisliği laboratuvarında geliştirilen aşınma test metodolojisi, hem nicelik hem de nitelik analizleri deney çıktıları açısından çok çeşitli araştırma tekniklerinden meydana gelmektedir. Bu metodlar sürtünme katsayısını ve aşınma oranının değerlendirilmelerini ve deneyden önce ve sonraki yüzey deneylerini içermektedir.

Bilgisayar kontrollü aşınma-sürtünme test metodolojisi ile, laboratuvar malzemeleri piyasasında ki diğer test aygıtlarına göre daha fazla avantaj sağlaması amaçlanmıştır. Bunlardan en önemlisi sürtünme katsayısı ve aşınma oranı için online veri toplamasıdır. Çalışmada elde edilen bu veriler, bilgisayarın ekranında test esnasında görünmekte, sürtünme olayının daha iyi anlaşılması için datalar sunmaktadır[4].



1-Elektrik motoru 2- asılı stator redüktör, 3- dönüş sayacı, 4- shaft 5- sürtünme çifti – merdane 6- yatak 7- yükleme mekanizması 8- strain geyç çubuğu 9-strain geyç 10- strain indikatör, 11- bilgisayar ve 12- dijital lineer indikatör

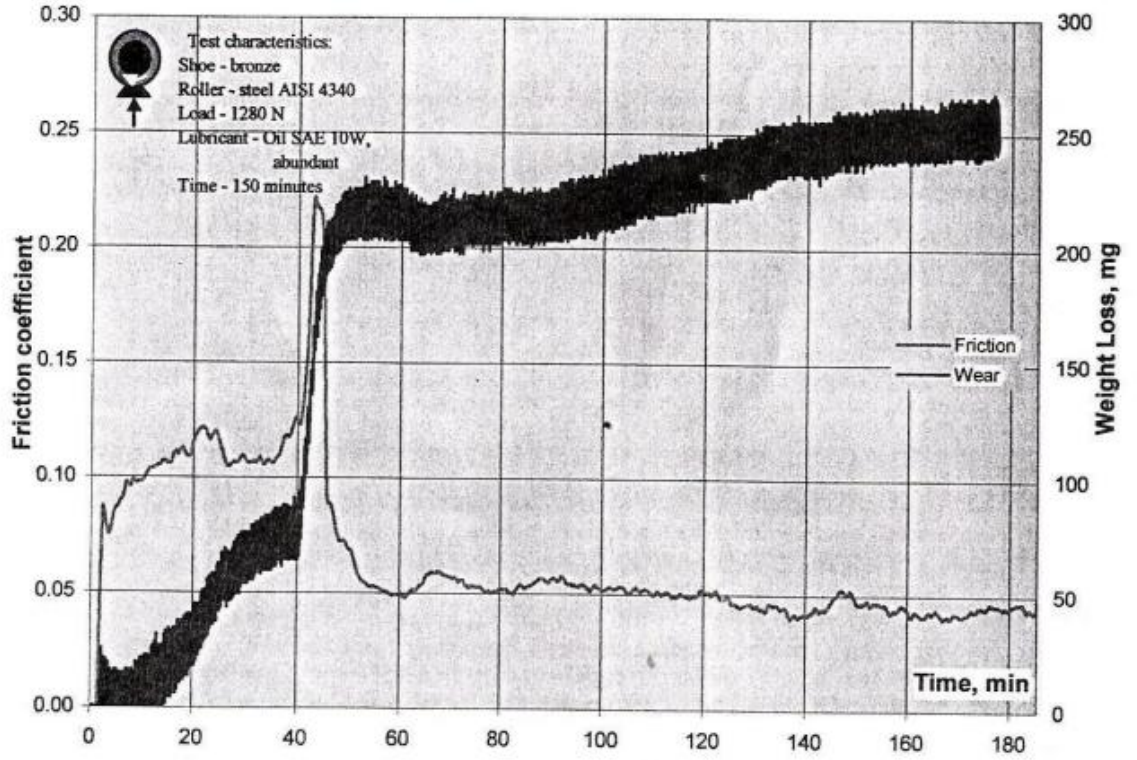
Şekil 3.1: Bilgisayar destekli aşınma-sürtünme test metodolojisi

Bu araştırmacılara ait Aşınma Test Makinesi (WTM) nin tüm tasarımı Şekil 3.1’ de gösterilmektedir. Sürtünme ölçümlerinin verilerini toplamak ve işlemek için, LabView yazılımı geliştirilmiştir; aşınma ölçümleri için Görsel C++ programı kurulmuştur. Sürtünme çifti, merdanelerin AISI 4340 çelik olmasına uygun olarak seçilmiştir ve yastık bronz SAE 40’dan yapılmıştır. Çift, daha yumuşak malzemelerdeki aşınma ve ağırlık kaybını araştırmak üzere tasarlanmıştır. Sürtünme-aşınma testi esnasında yumuşak yastığın aşınmasını elde etmekte ve sürtünme katsayısını kaydedebilmektedir[4,5].

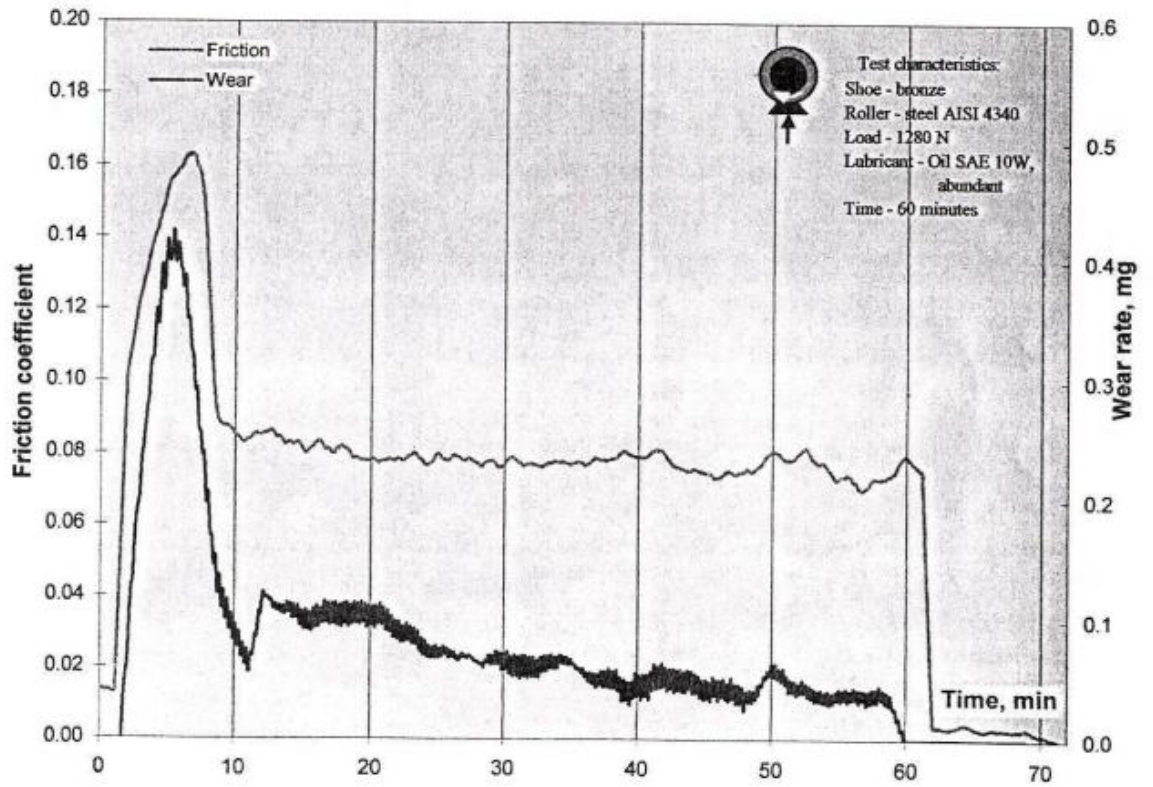
Bilgisayar kontrollü aşınma-sürtünme test makinesinin orijinal fikri, her iki yatak arasında yer alan geçici elektrik motorunun kullanımı baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu durum, direğin birini elektrik motorunun statorunun sonuna eklemeye, diğerini de durdurucunun sonuna masada kımıldamayacak şekilde sabit olarak eklememize olanak sağlar. Eğer motorun statoru yürütücü şaft etrafında dönerse, direk eğilir ve eğim baskısı oluşturur. Bu baskı motorun harcadığı güce bağlıdır ve direğin ortasındaki strain geyç ile ölçülebilir. Strain geyçten alınan veriler, strain geyç amplifikatörden bilgisayara doğru gider. Bilgisayar verileri toplar, işler ve kaydeder. Bu tasarım, yastık ve merdane arasındaki sürtünme gücündeki değişiklikler ile başlayan motorun güç değişimlerini hesaplamaya olanak sağlar[6].

Buna ilave olarak, aşınma test makinesi online test edilen malzemenin aşınma oranını da kaydedebilir. Bu amaçla, aşınma test makinesi dijital lineer geyç ile donatılmıştır (DLG), ki bu hareketli yatak kavrayıcı ile sabit masa arasına yerleştirilmiştir ve sadece silindirin merkezi ile yastık yatağı arasındaki uzaklığı online kaydedebilir. DLG 1 mikronluk yüksek doğruluğa sahiptir ve bilgisayar tarafından kaydedilen uzaklık farklarının okunmasında kesinlik sağlar. Bu uzaklık nominal temas alanı ve malzeme miktarı ile çarpılır, bu da bize test edilen malzemenin kaybettiği ağırlığı verir. Aşınma ve kütle kaybı için daha güvenilir ölçümler için, test edilen örneğin testten önce ve sonra tartılmış olması gerekmektedir. Gerçekleştirilen testler göstermiştir ki, online veriler ile testten önce ve sonraki ağırlık ölçümleri arasında %5 farkla uyuşma elde edilmektedir.

Bilgisayar tarafından veri toplandıktan sonra, okunan veriler Microsoft Excel' de işlenmiştir. Nihai test verileri, normal yükleme, uygulanan normal güç, strain geyç okumaları, sürtünme gücü, sürtünme katsayısı, dijital lineer geyç ve kaybedilen ağırlık gibi testin tüm temel karakteristiğini içermektedir. Şekil 3.2 ve şekil 3.3 te Sürtünme katsayısının grafiği ve aşınma her birinin diğerine etkisi ve zamana bağımlılığı gösterilmiştir.



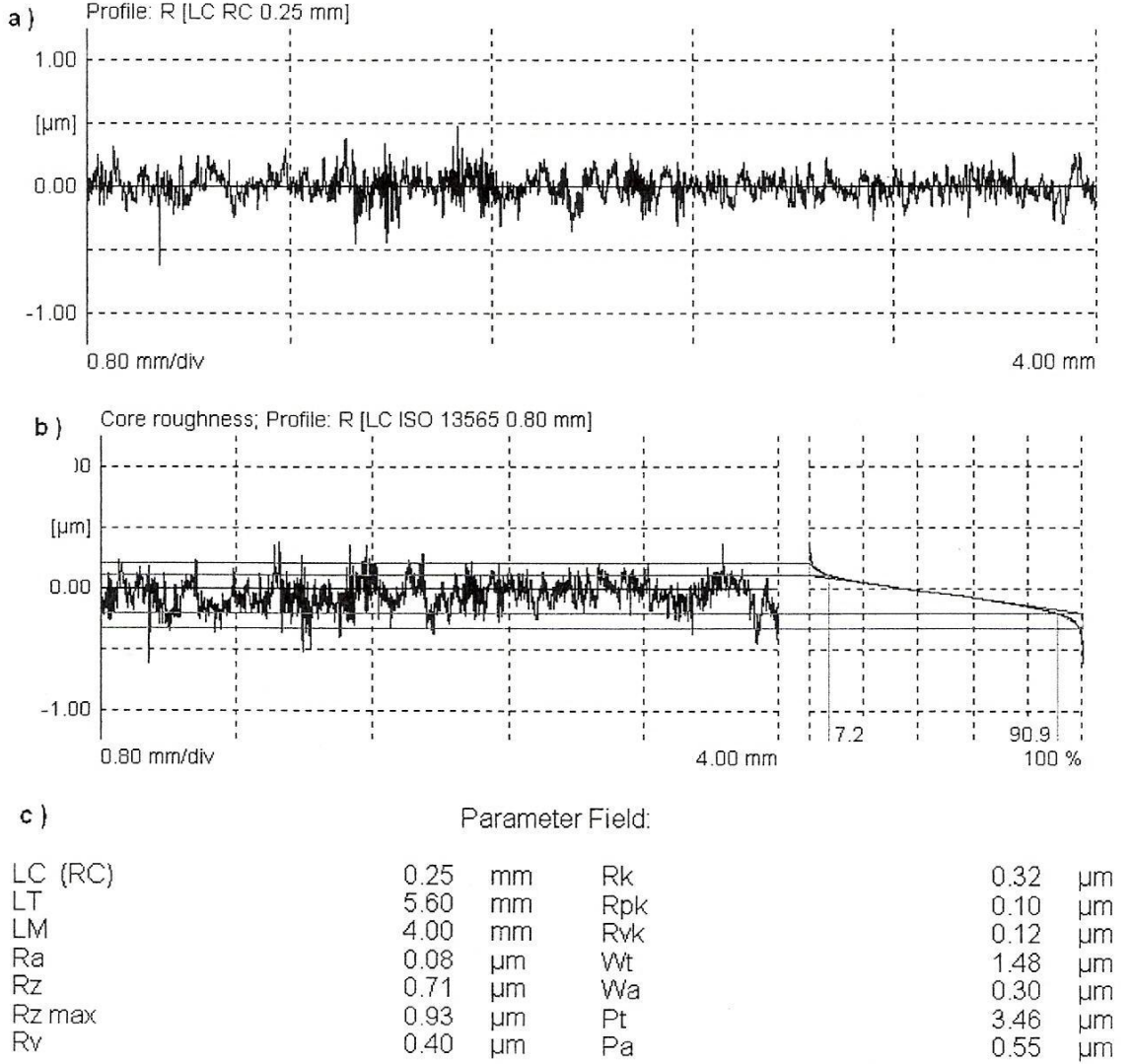
Şekil 3.2: Toplam ağırlık kaybı ve zamanın sürtünme katsayısı ile ilişkisi



Şekil 3.3: Aşınma oranı ve zamanın sürtünme katsayısı ile ilişkisi



Aşınma oranı ve sürtünme katsayısındaki ölçümlerin yüksek doğruluğu ve bu terimler arasındaki ortak korelasyon, makinenin güvenilirliğini artırmaktadır.



Şekil 3.4: Yüzey analiz değerleri

Bu konfigürasyon, makinelerde en çok kullanılan makine parçalarının temasını simule etmektedir. Makinenin diğer bir avantajı da sürtünen parçaların temasına uygun olmasıdır. Aşınma ve sürtünme test metodolojisinin prosedürleri, testten önce ve testten sonraki malzeme yüzey değerlendirmeleri ile elde edilir. Bu bize malzeme yüzeylerinin birbirine sürtünmesi esnasındaki uygulanan işlemin sürecini vermektedir. Şekil 3.4 de yüzey analiz değerleri verilmektedir.

Diğer bir test metodu da Dört Top Metodu dur. ASTM nin D 2596-97 nolu bu metod, gres ile yağlanan, yüklenen malzemenin belirlenmesini içerir. İki tespit yapılmıştır:

- \* Yükleme-Aşınma Endeksi
- \* Dört Top Uç Basınç (EP) Testinden elde edilen ile Kaynak Noktası

Test aygıtı, dönel yüklemeye karşılık yatak içerisinde yer alan üç çelik topa karşılık gelen bir çelik top ile yürütülmüştür. Dönme hızı  $1770 \pm 60$  rpm' dir. Yağlayıcı gres  $27 \pm 8$  °C ( $80 \pm 15$  °F) olarak alınmıştır ve 10-s test serileri kaynak oluşumundan önce artan yüklemelerdeki süreyi hedef almaktadır[7].

Bu test metodu, uç basınç özelliklerinin düşük, orta ve yüksek seviyelerdeki gres yağları arasındaki farklar gibi özel amaçlar için kullanılır. Sonuçların servis sonuçları ile karşılaştırılması gerekmez[8].

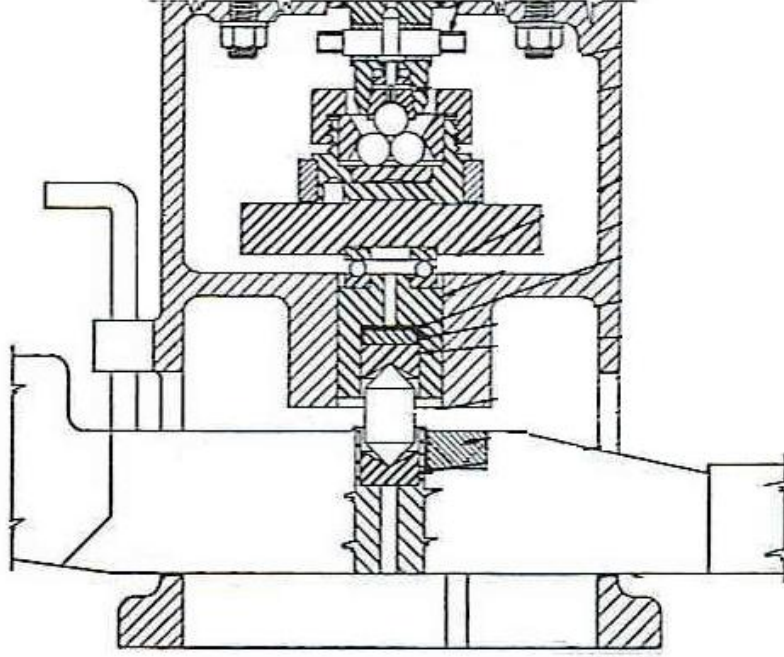
Gres yağları, kendi sıvı bileşimi olan bir silikon, halojene silikon veya silikon sıvısı ve petrol yağı içeren bir karışım içermesinden dolayı bu test metodu için uygun değildirler.

Dört Toplu EP Test aygıtı ile Dört Toplu Aşınma Test Aygıtı arasındaki farklılıklar önemlidir. Dört Toplu Aşınma Test Aygıtı çeşitli test ortamlarında 490 N (50 kgf) ye kadar yüklenebilir. Dört Toplu EP Test Aygıtı daha özel koşulların test edilmesi için tasarlanmıştır ve Dört Toplu Aşınma Test Aygıtında hassasiyet yoktur.

Dört yeni test topu, topların yatağı ve fırlatma parçalarının güzelce temizlenmesinden önce Stoddard solventi ile yıkanmaktadır ve daha sonra ASTM n-heptan ile işlem görerek, hava ile kurutulur.

Karbon tetraklorid gibi veya diğer uç basınç özelliklerinin sonuçlarına etki edip bozacak türden solventler kullanılmaz. Kaldıraç yardımıyla piston başlığı düşürülür. Kaldıraç kolunu yükselen pozisyonda bu amaç için düzenlenmiş bir sabitleyici/kilit yardımıyla sabitlenmiştir.





Şekil 3.5: Dört top EP test cihazının kesit görünüşü

Test edilecek yağlayıcı madde  $27 \pm 8$  °C ( $80 \pm 15$  °F)' ye getirilir. Top yatağı tamamen test edilecek gres ile doldurulmalıdır, hava kabarcıklarının olmamasına dikkat edilmesi ve Üç çelik top gres içersisine yerleştirilmesi sağlanır. Kilit yüzüğünü dikkatlice üç top üzerinden yerleştirip ve kilit somunu yavaşça çevrilmelidir. Kilit somununa baskı yapan fazla gres alınır. Bir topu, top fırlatıcının içine bastırılır ve fırlatıcının içinde sabitlenir.

Her çalıştırmadan sonra top fırlatıcısı dikkatlice kontrol edilmektedir. Fırlatıcı sürekli olarak aşınma ve azalma durumuna maruz kalacağından top fırlatıcısı tutucusunun içerisinde kendi ağırlığını desteklemeyecek kadar küçüldüğünde veya topun merkezi bize küçülmenin işaretini verdiğinde yenisi ile değiştirilmektedir. Top yatağını test aparatı üzerine dördüncü top ile temas edecek şekilde yerleştirilerek montaj diskini top yatağı ve itici yatak arasına monte edilmesi sağlanır. Ağırlık tablası ve horizontol kol üzerinde ki ağırlığı 784 N luk test dolumu için çentiğe yerleştirilir. Test işlemleri sırasıyla gerçekleştirilir. Tablo 3.1 ve tablo 3.2 teste ait sonuçlar verilmiştir[7].

Tablo 3.1: Karşılık hattının düzeltilmiş yüklemesi toplamı

Last Nonselzure Load, kgf <sup>A</sup>	Weld Load, kgf <sup>A</sup>											
	800	620	500	400	315	250	200	160	126	100	80	
200	583	639	684	720	749	770						
160	410	466	511	547	576	597	615					
126	269.8	325.8	370.5	407	435	457	474	489				
100	159.7	215.8	260.5	296.7	325.3	346.9	364.4	378	390			
80	71.6	127.7	172.4	208.6	237.2	258.2	276.3	290	302	311.0		
63		56.1	100.8	137.0	165.6	187.1	204.7	218.8	230.4	239.3	246.7	
50			44.7	80.9	109.5	131.0	148.6	162.7	174.3	183.2	190.6	
40				36.2	64.8	86.4	103.9	118.0	129.6	138.6	145.9	
32					28.6	50.2	67.7	81.8	93.4	102.4	109.7	
24						21.6	39.1	53.2	64.8	73.8	81.1	
20							17.6	31.6	43.2	52.2	59.2	
16								14.1	25.7	34.6	42.0	
13									11.6	20.6	27.9	
10										9.0	16.3	
8											7.4	

Tablo 3.2: Kaydedilmiş test sonuçlarından tavsiye edilmiş değerler

Column 1 Applied Load, kgf <sup>A</sup> (L)	Column 2 Scar Diameter Ball 1, mm	Column 3 Scar Diameter Ball 2, mm	Column 4 Scar Diameter Ball 3, mm	Column 5 Average Scar Diameter, mm ( $\bar{X}$ )	Column 6 Compensation Scar Diameter, mm	Column 7 Compensation Scar Diameter, +5 % mm	Column 8 $LD_n$ Factor
6	...	...	...	...	...	...	0.95
8	...	...	...	...	...	...	1.40
10	...	...	...	...	...	...	1.88
13	...	...	...	...	0.21	0.22	2.67
16	...	...	...	...	0.23	0.24	3.52
20	...	...	...	...	0.25	0.26	4.74
24	...	...	...	...	0.26	0.27	6.05
32	...	...	...	...	0.29	0.30	8.87
40	...	...	...	...	0.31	0.33	11.96
50	...	...	...	...	0.34	0.36	16.10
63	...	...	...	...	0.37	0.39	21.86
80	...	...	...	...	0.40	0.42	30.08
100	...	...	...	...	0.44	0.46	40.5
126	...	...	...	...	0.47	0.49	55.2
160	...	...	...	...	0.52	0.55	75.8
200	...	...	...	...	0.58	0.61	102.2
250	...	...	...	...	...	...	137.5
315	...	...	...	...	...	...	187.1
400	...	...	...	...	...	...	258
500	...	...	...	...	...	...	347
620	...	...	...	...	...	...	462
800	...	...	...	...	...	...	649

Akışkan yağların uç basınç özelliklerinin ölçülmesinde de yine standart Dört top metodu uygulanmıştır. ASTM de bu metod hakkında bilgi verilmiştir. Test Aygıtı, dönel yüklemeye karşılık yatak içerisinde yer alan üç çelik topa karşılık gelen bir çelik top ile yürütülmüştür. Dönme hızı  $1760 \pm 40$  rpm' dir. Yağlayıcı gres de  $35.0^{\circ}\text{C}$  ( $65 \pm 95^{\circ}\text{F}$ ) olarak alınmıştır ve 10-s test serileri kaynak oluşumundan önce artan

yüklemelerdeki süreyi hedef almaktadır. Kaynak noktası üzerinde on adet test yapılmıştır. Eğer kaynak oluşumu esnasında on tane dolum yapılmadı ise, başka dolum yapmaya gerek kalmayacağı vurgulanmıştır.

Bu test metodu, uç basınç özelliklerinin düşük, orta ve yüksek seviyelerdeki gres yağları arasındaki farklar gibi özel amaçlar için kullanılır. Bu metodun kullanıcısı kendi isteğine göre bu test prosedürünün sonuçlarını ana performansa göre bağlantısını veya diğer tezgah test makinelerinin bağlantılarını belirleyebileceği ifade edilmektedir.

Dört yeni test topu, topların yatağı ve fırlatma parçalarının güzelce temizlenmesinden önce Stoddard solventi ile yıkanmalıdır ve daha sonra ASTM n-heptan ile işlem görmeli, hava ile kurutulmalıdır. Kaldıraç yardımıyla piston başlığı düşürülerek; Kaldıraç kolunu yükselen pozisyonda bu amaç için düzenlenmiş bir sabitleyici/kilit yardımıyla sabitlenmektedir.

Test toplarını test yağlama kabı içerisine yerleştirilir. Kilit yüzüğünü test topları üzerinden geçirilerek kilidi dikkatlice kapatılır. Üç topun üzeri kapanıncaya kadar yağlama sıvısıyla doldurulur. Test edilecek yağlayıcı madde  $18 \pm 35$  °C ( $65 \pm 95$  °F)' ye getirilmektedir. Bir topu, top fırlatıcısının içerisine bastırılıp ve fırlatıcıyı fırlatma tutucuya monte edilir. Top yatağı test aparatı üzerine dördüncü top ile temas edecek şekilde yerleştirilir. Montaj diskini top yatağı ve itici yatak arasına monte edilmektedir. Ağırlık tablasını yerleştirip ve horizontal kol üzerindeki ağırlığı 784 N (80 kgf) lik ilk test dolumu için doğru çentiğe yerleştirilmektedir. Seviye kolunu serbest bırakıp ve toplara doğru yavaşça test yüklemesine başlanılır. Top yatağının ve montaj diskinin ortalanmış olduğundan emin olunduktan sonra eğer opsiyonel sürtünme-ölçüm aygıtı kullanıyorsa, ayar kolu top yatağı üzerindeki indikatöre temas edecek şekilde klips ve tel yardımıyla yerleştirilmiştir. Klips ve indikatör desteğine uygulanan yüklemeye karşılık gelen sayı üzerine tertibatlandırılmıştır. Motoru çalıştırılmış ve  $10 \pm 0,2$  s' ye ayarlanmıştır.

Bu metod ta hassasiyeti açıklamak gerekirse; Kesinlik – Bazı kriterler, 400 kg veya daha az kaynak noktasına sahip ve karşılaştırma hattını takip eden test sonuçlarının

(%95 olasılıkla) akışkan yağların kabul edilebilirliğini gösterdiği sonucuna gidilmiştir.

Yükleme aşınma endeksi:

-Yinelenebilirlik: Aynı işlemci tarafından aynı gereçle istikrarlı çalışma koşulları altında, özdeş deney malzemeleri kullanılarak yapılan iki test arasındaki fark uzun süreçte normal ve doğru test yöntemlerinin uygulanması koşuluyla, aşağıdaki değerleri aşmaktadır:

\* Ortalama değer %17' si

-Yeniden üretilebilirlik: Farklı laboratuvarlarda özdeş test maddeleri üzerinde farklı işlemciler tarafından iki tek ve bağımsız sonuç arasındaki fark, uzun süreçte test yönteminin normal ve doğru çalışması koşuluyla aşağıdaki değerleri aşmaktadır:

\* Ortalama değer % 44' ü

Kaynak Noktası:

Yinelenebilirlik: Aynı işlemci tarafından aynı gereçle, istikrarlı çalışma koşulları altında, özdeş deney malzemeleri kullanılarak yapılan iki test arasındaki fark uzun süreçte normal ve doğru test yöntemlerinin uygulanması koşuluyla, yalnızca 20 olayın birinde bir artış yükünü aşmaktadır:

\* Bir tane yavaş yavaş artan yükmeden daha fazla

Yeniden üretilebilirlik: Farklı laboratuvarlarda özdeş test maddeleri üzerinde farklı işlemciler tarafından iki tek ve bağımsız sonuç arasındaki fark, uzun süreçte test yönteminin normal ve doğru çalışması koşuluyla yalnızca 20 olayın birinde bir artış yükünü aştığı ifade edilmektedir[9].

Daha öncede belirtildiği gibi triboloji alanında bir çok deneysel çalışma vardır. Deneysel çalışmalar yatak malzemeleri için de yapılmıştır. Bakır esaslı alaşımlar bunun güzel bir örneğidir. Bakır esaslı alaşımlar iyi korozyon direnci, yüksek

termal ve elektrik iletkenliği, ve iyi aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı, özellikle T/M üretimleri ( gözenekli oluşlarından dolayı) kendi k e ndini yağlayabileceklerinden uzun zamandan beri yatak malzemesi olarak kullanılmak tadırlar. Bakır alaşımlarında kalayın etkisi aşınma dayanımında önemlidir. Kalay içeren bakır alaşımlarından kalay bronzları yüksek aşınma direncine sahip oldukları için yatak malzemesi olarak kullanıla gelmektedir. Yatak malzemesi olarak kalay bronzu, büyük ve darbeli yüklerde ve aynı zamanda korozyon tehlikesi olan yüksek sıcaklıklarda uygundur. Kaymalı yatak beklentilerine uygunluğu ile en yaygın kullanılan % 90 Cu ve % 10 Sn içeren kalay bronzudur (Pratt, 1973). Kaymalı yatak malzemelerinin düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, yüksek yükleme kapasitesi, iyi korozyon dayanımı, iyi ısı iletkenlik, düşük ısı genleşme katsayısı ve yabancı partikülleri gömme gibi özellikler, yatak sisteminde aranan özelliklerdir (Schatt and Wieters, 1997)[10,11].

Kaymalı yataklarda görülen aşınma ve aşınma mekanizmalarının aşınma prosesine katılım oranları da birçok faktörlere bağlıdır. Bu faktörler ve etkileri tribolojik sistem içinde incelenebilir. Bunlar; temel sürtünme elemanı, karşı sürtünme elemanı, ara maddesi, çevre, yükleme ve hareketten oluşur. (Demirci,1982; Ünlü ve ark., 2002). Bu mekanizmalardan adhezyon aşınması, yataklarda özgül yatak yükü (p) ve yatak çevresel hızı(v) büyüklüklerinden de önemli şekilde etkilenmektedir. Aşınmanın zamana bağlı olarak geliştiği göz önüne alındığında p.v değeri aşınma miktarı analizinde dikkate alınan bir büyüklüktür. Yatakların uygun p.v değerlerinde kullanılması durumunda aşınma miktarı azalmaktadır (Varol, 2001)[13].

B.S.Ünlü ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, kaymalı yatak malzemesi olarak CuSn10 bronzu alınıp, kuru ve yağlı ortamda radyal kaymalı yatak aşınma test cihazında, aşınma deneyleri yapılarak, malzemenin sürtünme katsayısı, aşınma sırasında oluşan yatak ve mil sıcaklık değerleri ile kaymalı yatak ve milde oluşan aşınma miktarları ölçülmüştür. Bu cihaz kaymalı yatak aşınmasının yanında mil malzemesinin de aşınmasını inceleyebilecek şekilde tasarlanmıştır. Deney malzemeleri; karşı sürtünme elemanı mil SAE 1050 çelik, temel sürtünme elemanı yatak malzemesi CuSn10 bronzdur[12,15].

Bu araştırmacıların deneylerde kullandığı yatağın iç çapı  $d = 10$ , genişliği  $B = 10$ , dış çapı  $D = 15$  mm, milin ise çapı  $d = 10$  mm'dir. Aşınma deneyi; 10, 20 N yük uygulanarak, devir sayısı 750, 1500 d/dak, aşınma ortamı kuru ve SAE 90 yağı kullanılan yağlı ortam seçilerek yapılmıştır. Aşınma miktarını saptamak için örnekler her 30 dakikada hassas terazi ile ağırlık kaybı miktarının ölçümü yapılmak koşuluyla toplam 150 dak. aşınma deneyleri yapılmıştır. CuSn10 bronzunun yüzey pürüzlülüğü değerleri, yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında ölçülerek kaymalı yatak malzemesinin  $Ra = 1.5$   $\mu$ m, ve milin ise  $Ra = 0.5$   $\mu$ m olarak bulunmuştur.

Örneklerin sürtünme kuvveti değerleri, aşınma deneyi düzeneği geliştirilerek herbir durum için ölçülmüş ve sürtünme katsayısı değerleri ( $\mu$ ) elde edilmiştir. Bu deney düzeneği kaymalı yataklarda oluşan sürtünme kuvvetini, yatakların ve ayrıca milin aşınmasını doğrudan inceleyebilecek şekilde tasarlanmıştır.

Deney düzeneğinde, milin ilk hareketinden itibaren yatakta oluşan sürtünme kuvveti, gerekli bağıntılarda ( $F_S = \mu FN$ ) yerine konularak sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Belirlenen bu sürtünme katsayısı değerleri Tablo 3.3'de gösterilmiştir[15].

Tablo 3.3: Örneklerin sürtünme katsayısı değerleri

Ortam	İşlem Süresi (dakika)					
	0	30	60	90	120	150
Kuru	0.89	0.76	0.82	0.84	0.79	0.69
	0.86	0.79	0.84	0.85	0.87	0.88
	0.66	0.57	0.57	0.52	0.60	0.50
	0.72	0.63	0.68	0.68	0.67	0.66
Yağlı	0.12	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04
	0.16	0.08	0.06	0.06	0.08	0.08
	0.12	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
	0.16	0.11	0.09	0.08	0.08	0.08

B.Ünlü ve N. Köksal' a ait başka bir çalışmada ise endüstride kullanım alanı sınırlı olan, saf Cu, Sn ve Zn'den üretilen kaymalı yatakların aşınma özellikleri incelenmiştir. Radyal kaymalı yatak aşınma deney cihazında gerçekleştirilen deneyler sırasında sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve oluşan ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Bu alaşım elementlerinin yaygın olarak kullanılan bronz ve pirinç yatakların aşınma özellikleri ile karşılaştırılması da yapılmıştır.

Deney malzemeleri olarak; mil numunesi için SAE 1050 çelik mil kullanılmıştır, yatak numunesi olarak ise % 99.9 oranında saf Cu, Zn ve Sn'den döküm yöntemi ile üretilen yatak malzemeleri seçilmiştir[16].

Aşınma deneylerinde kullanılan numuneler, döküm yöntemiyle üretildikten sonra, iç çapı  $d=10$  mm, genişliği  $B=10$  mm, dış çapı  $D=15$  mm, milin ise çapı  $d=10$  mm olarak hazırlanmıştır. Aşınma deneyleri radyal kaymalı yatak aşınma deney cihazında yapılmıştır. yatak aşınmasının yanında mil malzemesinin de aşınmasını ölçebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu deney düzeneğinde, SAE 90 yağı kullanılarak yağlı sistem oluşturulmuştur. Numunelere uygulanan yük 20 N, devir sayısı 1500 d/dak, her 30 dakikada bir sistem durdurularak ölçüm yapılmak koşulu ile toplam 150 dak sürede deneyler gerçekleştirilmiştir.

Numunelere ait sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı başlangıçta ve her ölçüm sırasında hesaplanmıştır. Mil dönmeye başladığı anda mil-numune arasında oluşan sürtünme kuvveti deney cihazına yerleştirilen komparatörde belirli bir deplasman oluşturur. Ölçülen bu sapma değeri yardımıyla sürtünme kuvveti değerleri elde edilmiş ve numunelerin sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Çalışma ortamında oluşan yatak sıcaklıkları, 30 dak sonunda düzenek durdurulmazdan hemen önceki sıcaklık değerleri olup dijital termometre yardımıyla ölçülmüştür. Aşınma deneyleri sonunda mil ve yatak numunelerindeki ağırlık kayıpları, her defasında numuneler temizlenip, hassas terazide ölçülerek belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde, Cu numunelerin diğerlerine göre başlangıçta ve işlem süresince daha büyük, Sn ve Zn numunelerin ise çok daha küçük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Yatak sıcaklığının işlem süresi ile değişimleri incelendiğinde, ilk 60 dak süreden sonra numunelerin sıcaklığında çok fazla değişim olmadığı ve Cu numunesinin diğerlerine göre daha büyük değerlerde olduğu elde edilmiştir İşlem süresince numunelerde ve mil malzemesinde oluşan ağırlık kayıplarının değişimi, En fazla ağırlık kaybının Sn malzemede olduğu görülmüştür. Mil malzemesinde oluşan ağırlık kaybı değerleri incelendiğinde, en fazla bakır yatak malzemesinin bu malzemede ağırlık kaybı oluşturduğu elde edilmiştir[16].

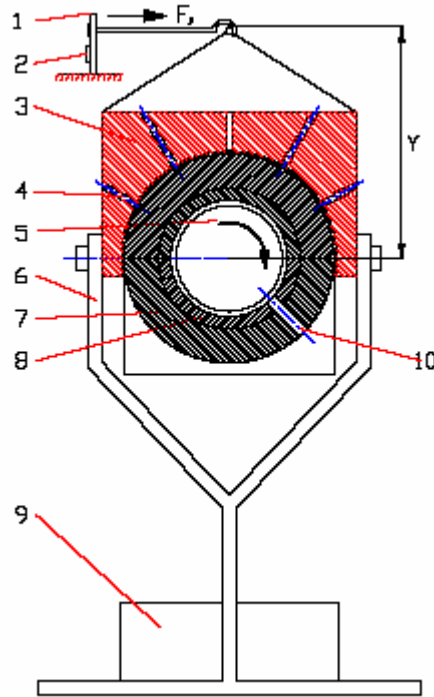
Aşınmayı minimum seviyeye indirmek, yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemek dolayısıyla sürtünme karakteristiği geliştirmek ve enerji kaybını azaltmak yağlama yağlarının en önemli rolüdür. Yağlama yağlarından, metallerde bozulmayı engelleme ve pas önleme direncini geliştirmek ikinci fonksiyon olarak istenmektedir. Bu nedenle baz yağın tek başına yetersiz olduğu pek çok fonksiyon, baz yağda çözülebilen özel katkı maddeleri tarafından sağlanmaktadır. Genel olarak, yağlara istenen bazı yeni özellikleri kazandırmak, mevcut özellikleri geliştirmek, yağın istenmeyen bazı özelliklerini de yok etmek veya en aza indirmek amacıyla yağlama yağlarına sonradan ilave edilen maddelere katkı maddesi denilmektedir.

R.F.Tunay ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, 25 °C sıcaklıklarda çalışan sabit yüklü radyal kaymalı yataklarda meydana gelen sürtünme katsayısı ve aşınmaya, ticari olarak satılmakta olan iki farklı yağ katkı maddesinin etkisi, üç farklı yük büyüklüğünde ve üç farklı hız kademesinde deneysel olarak incelenmiştir.

Sabit yüklü radyal kaymalı yataklarda; uygulanan yükün, mil hızının, yağın ve yağa hacimce % 3 konsantrasyon oranında ilave edilen iki adet ticari katkı maddelerinin yatakta oluşan sürtünmeye etkisinin sıcaklıkla değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Yağlama literatüründe özellikle Stribeck eğrisinin elde edilmesinde bu çalışmada kullanılan deney setine benzer deney setleri kullanılmaktadır(Pathak, vd., 1997; Batra vd.), böyle sistemlerde gerçek çalışma şartlarına ulaşmak için ( farklı hız, yük, sıcaklık, yağ debisi ve benzeri ilave donanımlarla deneyler yapılabilmektedir. Söz konusu deney düzeneği basınçlı yağlama sistemi, hız kontrol ünitesi, moment ölçme devresi, kaymalı yatak yuvası, yatak mili, hidrostatik yastık, AC motoru ve yük askısı gibi elemanlardan oluşmaktadır. Deney milleri, SAE 1030 çeliğinden imal edilerek, 55 HRC değerine kadar sertleştirilmiştir. Deney milinin çapı 50.730 mm' dir. Rölatif yatak boşluğu ( $\psi$ )  $1.00 \cdot 10^{-3}$  ' dir. Milin yüzey pürüzlüğü 5  $\mu\text{m}$ , yatağın yüzey pürüzlüğü ise 3  $\mu\text{m}$  ' dir. Deney mili iki adet yuvarlanmalı yatakla desteklenmiştir. Test milinin devir sayısı, alternatif akım hız kontrol ünitesi vasıtası ile 30-1200d/d aralığında ayarlanabilmektedir[17].



Deneyleerde kullanılan radyal kaymalı yataklar ticari olarak satılmakta olan beyaz metal yatak alaşımıdır. Test yatak iç çapı 50.780 mm, test yatağının orta kısmında yağın iyice dağılmasını sağlayan 5 mm genişliğinde çevresel bir yağ kanalı ve dört adet 6 mm çapında yağ girişdeliği bulunmaktadır. Yatak genişliği 25 mm'dir. Kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 3.6'da verilmiştir (Durak, 1998; Durak vd.,2001)[14,17].



1 -Sürtünme Momenti Ölçüm Levhası, 2-Strain-Gauge, 3- Yük Yastığı,  
4-Basınçlı Yağ Deliği, 5-Mil, 6- Yük Askısı, 7-Yatak Yuvası, 8-Kaymalı Yatak,  
9- Askı Ağırlığı, 10-Yatak Yağ Deliği

Şekil 3.6: Deney düzeneği

Deneyleerde motor yağı olarak SAE 20W50 kullanılmıştır.

Deneyleerde kullanılan katkı maddeler ise ticari olarak satılmaktadır. Deneyleerde kullanılan motor yağ ve katkı maddelerine ait özellikler Tablo 3.4' de verilmiştir. A katkı maddesi yağ film dayanımını artıran ve viskozite

endeksini yükseltici yapıya sahip ve piyasada kayganlaştırıcı olarak bilinen yağ katığıdır. B katkı maddesi ise PTFE içeriklidir. Bu katkı maddeleri uzun zincirli yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir.

Tablo 3.4: Motor yağı ve katkı madde ilaveli yağ karışımının özellikleri

SAE 20W50 spesifik yoğunluk (15 °C)	0.891
SAE 20W50 Akma noktası(°C)	-30
SAE 20W50 motor yağın dinamik viskozite (mPa.s)(25°C)	365.6
SAE 20W50 motor yağın parlama noktası (°C)	218
Viskozite İndeksi (VI)	120
SAE 20W50 motor yağın + % 3 A katkı madde ilaveli karışımın dinamik viskozite (mPa.s)(25°C)	325.46
SAE 20W50 motor yağın + % 3 B katkı madde ilaveli karışımın dinamik viskozite (mPa.s)(25°C)	365.92

Yağın yatağı terk ettiği bölgede yağ sıcaklığı deney süresince bir termometre ile ölçülmüştür. Yağ deposuna yerleştirilen bir soğutma aparatı ile oda sıcaklığındaki deneyler 25 °C’de gerçekleştirilmiştir. Deneyler süresince sıcaklık farkını minimuma indirmek amacıyla soğutucu aparat sürekli devrede tutularak yağdaki sıcaklık değişimi en aza indirilmeye çalışılmıştır. Dolayısıyla yapılan deneylerde yağ sıcaklığındaki değişimler minimum seviyede tutulmuş ve sıcaklık değişimi  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ’de gerçekleşmiştir. Test sırasında sürtünme momentinin yatak yuvasını serbestçe hareket ettirmesini sağlamak ve böylece sürtünme katsayısının ölçümüne etkisini minimuma indirmek için test yatağına sıcaklık ölçer yerleştirilememiştir. Bu nedenle deneylerde sadece yağın yataktan çıkış sıcaklığı termometre ile ölçülebilmştir. Bu nedenle bu araştırmada yatak sıcaklığındaki değişimine yağ ve katkı maddelerinin etkisi ölçülememiştir. Ayrıca yağdaki sıcaklık artışı kontrol edebilme için yağ deposu da oldukça büyük seçilmiştir. Ayrıca test yatağının bulunduğu bölgede hava ile soğutma ile de sıcaklık artışı kontrol altına alınmaya çalışılmıştır. Sürtünme momenti, uzama ölçerlerden kurulan Wheatstone köprüsü devresinden yararlanılarak ölçülmüştür.

Bunun için 10x120x2 mm boyutlarındaki yay çeliğinden imal edilen ölçüm levhasının alt ve üst yüzeylerine iki adet strain gauge yapıştırılmıştır. Tam Wheatstone köprü oluşturmak için iki adet strain gauge de pasif olarak devreye bağlanmıştır. Test yatağına gönderilen yağın besleme basıncı 0.1 bar'a ayarlanmıştır. Yatak yuvasının serbestçe dönmesini sağlamak ve sürtünme kuvvetini mümkün olduğunca doğru ölçmek için yatak yuvası ile yük yastığını birbirinden ayırmak gerekmektedir. Bunu sağlamak için de bu iki parça arasında hidrostatik bir yağ filmi oluşturmalıdır. Buradaki hidrostatik yastık yağ basıncı ise 8 bar' a ayarlanmıştır. Oluşan sürtünme momentine ait sinyaller kaydedilerek, daha önceden elde edilen kalibrasyon doğrusu yardımı ile alınan bu sinyal değerleri sürtünme momentine çevrilmiştir. Deneylere başlarken mili tahrik etmeden önce test yatağına ve yükü taşıyan yük yastığına yağ gönderilmektedir. Böylece yatak yuvası ile yük yastığı arasındaki metalik temas kesilmiş olmaktadır[17].

Ayrıca mil ile yatak yüzeyi arasında da bir yağ filmi oluşturulmaktadır. Böylece tahrik başlangıcındaki ve /veya bitimindeki büyük aşınmalar önlenmektedir. Ayrıca deney setine monte edilen elektrik devresi ile test süresince test yatağı ile mil arasında ve yatak yuvası ile yük yastığı arasında herhangi bir metalik temasın olup olmadığı kontrol edilmiştir. Yatakta oluşan ortalama basıncın sürtünme katsayısına etkisini belirlemek için yatak boşluğu sabit tutularak 260N, 360N ve 460N (yatak gövdesinin ağırlığı dahil olmak üzere) üç yük büyüklüğünde sürtünme deneyleri yapılmıştır.

Deneylere referans motor yağı ile başlanılmıştır. Her üç yük örneği için çeşitli hız aralıklarında sürtünme katsayıları ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra piyasada bulunan iki adet ticari katkı maddesi ile deneyler tekrar edilmiştir.

Aşınma deneyleri için yatak numuneleri deneyden önce hegzan ile temizlenip kurutulduktan sonra 0.001 gram hassasiyetli terazi ile tartılıp deney sonrasında

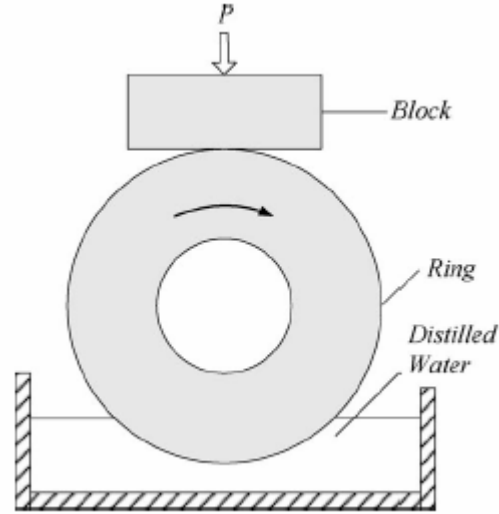
aynı işlemler tekrarlanarak aşınma miktarları tespit edilmiştir. Aşınma deneyleri için kat etme mesafesi olarak 3000 m seçilmiştir. Bu nedenle 300 d/d test şartında yaklaşık 64 dakika, 600 d/d testte ise 32 dakika ve 1200 d/d hızda ise 16 dakika deney süresi olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.5: Yatak aşınma değerleri (g)

	Motor Yağı	M.Yağı+%3 A Katık	M.Yağı+%3 B Katık
F(N)		n=300d/d	
260	0.0153	0.0155	0.004
360	0.0044	0.0196	0.0041
460	0.0134	0.0168	0.012
		n=600d/d	
260	0.0068	0.0102	0.0046
360	0.0093	0.0098	0.0026
460	0.0161	0.0169	0.0042
		n=1200d/d	
260	0.00956	0.01251	0.0052
360	0.0079	0.0087	0.0031
460	0.0096	0.0099	0.0073

Sonuç olarak R.F.Tunay ve arkadaşlarınınca yapılan deneylerde ilave edilen katkı maddeleri ile yatakta meydana gelen sürtünme katsayısı ve aşınma gibi tribolojik özellikler araştırılmıştır. Sürtünme katsayısı ve aşınma yönünden yatak performansına yağlayıcıların etkileri farklı hız ve yüklerde incelenmiştir. Ayrıca katkı maddelerinin etkisinin mil hızı ve yatağa etkiyen yük ile değiştiği de tespit edilmiştir. Piyasadan ticari katkı maddeleri seçilirken, mil hızı, yatağa etkiyen kuvvet, yatağın çalışma sıcaklığı gibi faktörlere göre karar verilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Oda sıcaklığında test edilen ticari katkı maddelerinden A, genellikle sürtünme katsayısı ve aşınma miktarlarında büyük artışlara yol açarken, B katkı maddesi ise düşüşler meydana getirdiği gözlemlenmiştir[17].

J.Wu ve X.H. Cheng tarafından yapılan farklı bir çalışmada; Kuru kayganlar ve su ile yağlama koşulları altındaki Kevlar hamuru ile güçlendirilmiş epoksi kompozitlerin sürtünme ve aşınması M-2000 sürtünme ve aşınma test aygıtı kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmada Şekil 3.7 de gösterildiği şekilde Blok-Halka tipi sürtünme ve aşınma test aygıtının şematik diyagramı kullanılmıştır. Aşınma testi için örnekler 20mmx10mmx10x geometrisi ile makineden geçirilmiştir. Güçlendirilmiş ve dikkatlice cilalanmış yüzeyi olan paslanmaz çelik halkalar (GCr15: Young modülleri, 208 GPa; Poisson oranı, 0.33) ve  $Ra = 1.25_{\mu m}$  lik pürüzlü bir iç yüzey ayrılmaz birer parça olarak sağlanmıştır. Halkaların çapı ve genişliği sırasıyla 40 ve 10 mm ve dönüş hızı 200 r/dk. dir, örneğin kayma hızı 0.42 m/s. Sabit normal güç olarak 100N uygulanmıştır. Her bir örnek 2 saat boyunca test edildiği, her bir deney için beş örnek kullanıldığı ve tüm deneyler sıcaklığın 10- 20 °C ve ortalama nemin %60 olduğu laboratuvar koşullarında yürütüldüğü ifade edilmektedir[18].

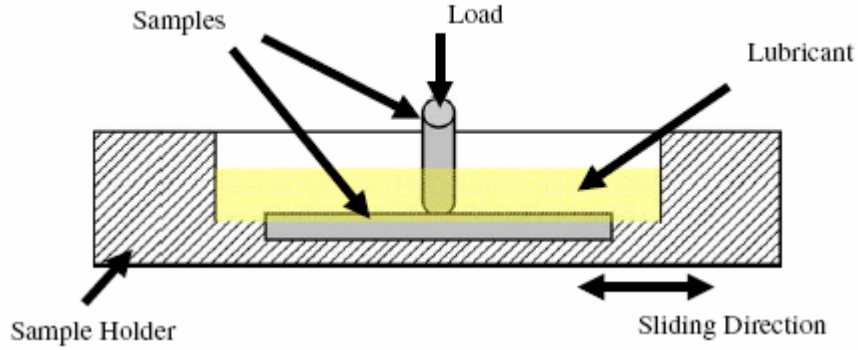


Şekil 3.7: Bir blok-halka aşınma testini şematik görünümü

Sonuç olarak Kevlar hamurunun epoksi içerisine karıştırıldığında sürtünme katsayısı ve malzemelerin hem kuru kayganlar hem de su yağlama şartları altında paslanmaz çeliğe karşı kaymalarındaki spesifik aşınma oranı belirli biçimde azaldığı ifade edilmektedir. Optimum aşınma rezistansı özelliği Kevlar hamuru içeriğinde %40 yoğunlukta olarak hesaplanmıştır.

Saf epoksi ve Kevlar hamuru/epoxy kompozitlerin de daha az sürtünme olduğu ve su ile yağlama altında kuru kayganlardan daha iyi anti-aşınma özellikleri gösterdiği ve bunda yağlama -soğutma etkisinin düşünüldüğü belirtilir[18].

A.Morina' nın yaptığı bir çalışmada sınır yağlama şartlarında yağın test edilmesinde karşılıklı hareket eden tabaka üzerinde pin tribometresi kullanılmıştır. Bu tribometre, iki yönlü dolun hücreleri aracılığıyla aşınma gücünü 58.8N ortalamasında ölçmek üzere donatılmıştır ve  $\pm 0.0037$  N hata vermektedir. Kombine hata, yükleme hücresi duyarlılığı üzerinde doğrusal olmayış, yavaşlama ve ısı etkileri gibi birkaç hatayı da kapsamaktadır. Yükleme hücresi, geçen süreyi ve her bir veri setindeki nokta adedini kontrol eden bir bilgisayar programına bağlıdır. Sürtünme gücünün okumaları her bir 10 dk. Da 2 s (120 nokta) olarak yapılmıştır, bu da iki çarpma devrine karşılık gelmektedir. Çarpma uzunluğu 10 mm' dir. 120 noktanın ortalaması, sürtünme katsayısının hesaplanmasında kullanılacak sürtünme gücünü verir. Dahasonra hesaplanan sürtünme katsayısı test süresi boyunca geçen sürenin fonksiyonu olarak ele alınmıştır[19].



Şekil 3.8: Karşılıklı hareket eden tabaka üzerindeki pinin aparatının temas etmesi ile elde edilen şemayı göstermektedir.

Bu işin ilk parçası olarak, pin ve tabaka için kullanılan malzeme AISI 52100 çelik ile kaplanmıştır. Pinler 20mm uzunluğunda ve 6mm çapında ve pinlerin uçları 40 mm eğrilik yarıçaplı işleme tabi tutulmuştur. Dörtgen tabaka  $15 \times 5 \times 3$  mm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Parçalar 60-64 HRC ile güçlendirilmiş ve yüzey kayma yönüne doğru

Ra  $\frac{1}{4}$  0.15–0.2 mm' dir. Temas ikilileri test edilecek yağlama maddesine daldırılmışlardır. Her bir test için 3 ml yağlama malzemesi kullanılmıştır[19].

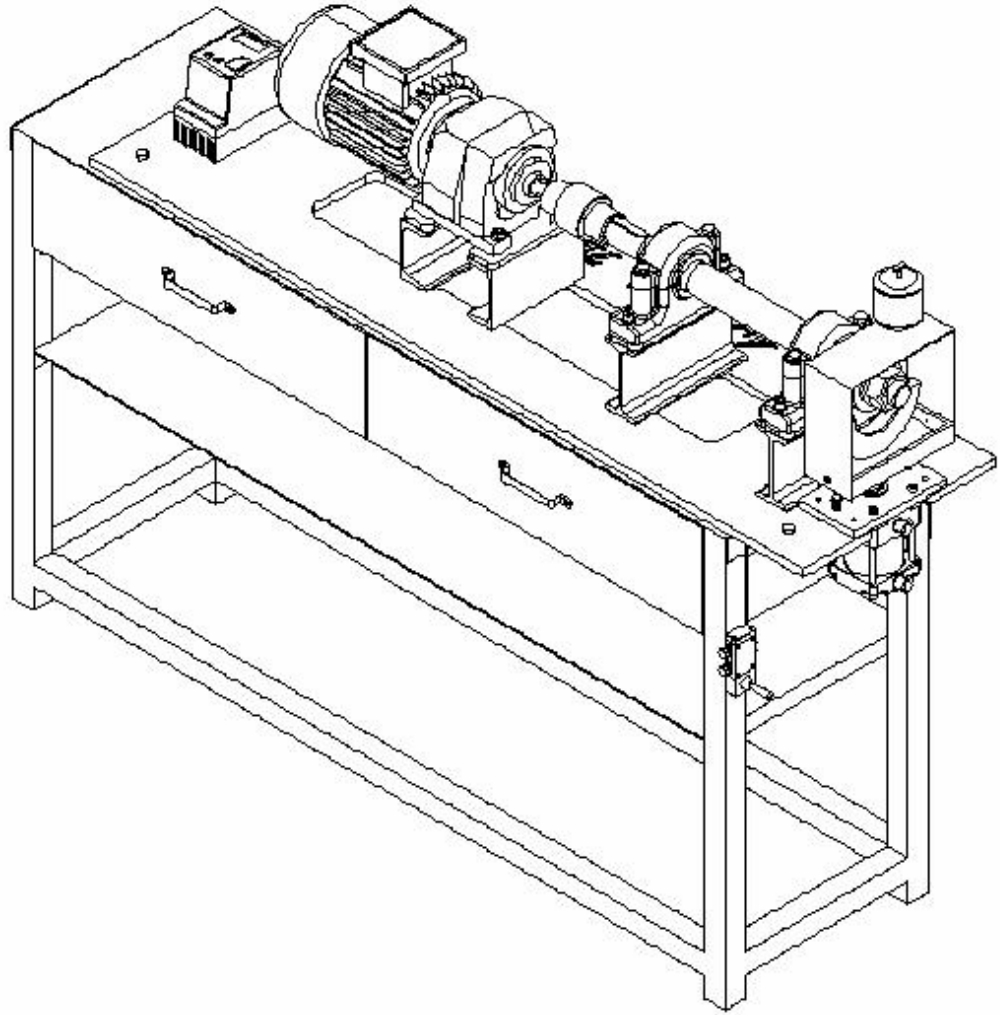
Görüldüğü üzere tiboloji hakkında bir çok makale bulunmaktadır. Genel itibarla aşınmanın ölçülmesi ve yağlayıcıların aşınma üzerinde ki etkileri değişik parametrelerle incelenmiştir.

## 4. TASARIM VE İMALAT

### 4.1 Cihazın Tasarımı

#### 4.1.1 Giriş

Bu çalışmada öncelikle yataklarda kullanılan yağların performansını belirleyecek bir test cihazı amaçlanmıştır. Cihazda yağlamanın yapıldığı kısım portatif olup çıkarılabilir olarak düşünülmüştür. Bu kısım çıkartılıp testi yapılacak küçük boyutlu parçalar konularak abraziv aşınma testleri yapılabilecektir.



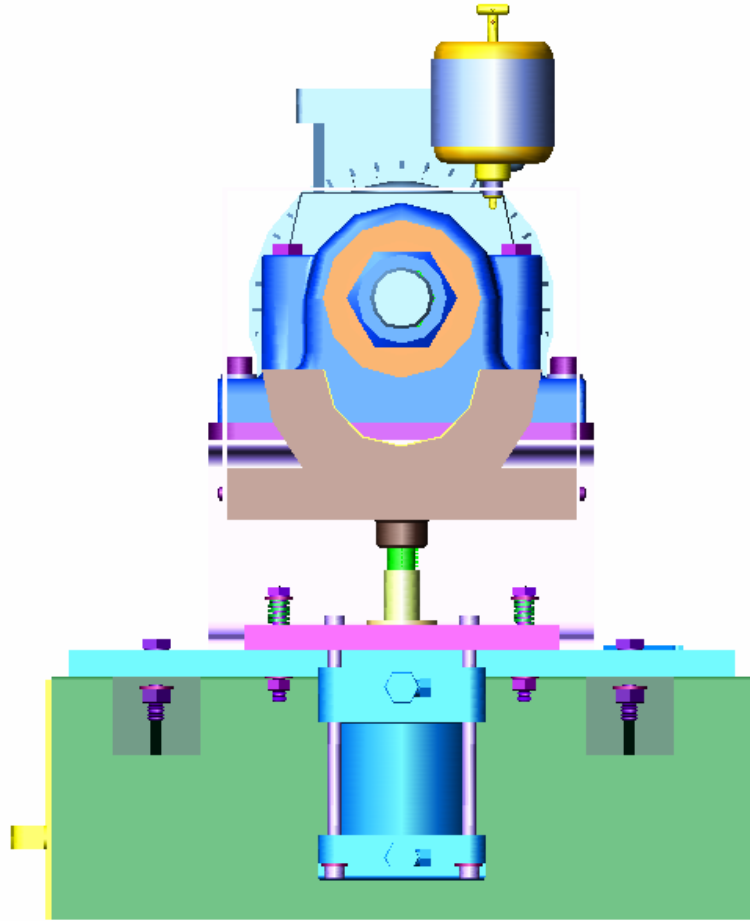
Şekil 4.1: Test cihazının perspektif görünüşü



#### 4.1.2 Yağlama ünitesinin tasarımı

Cihazda yağlama görevini üstlenen düzenek, koruma sacının üst kısmına monte edilmiştir. Yağlama küçük bir depodan (şekil 4.2) mil yatağını istenilen miktarda beslemektedir. Yağlama deposunda yaylı bir ayarlama sistemi bulunmaktadır. Böylelikle yağın akış debisi manuel olarak değiştirilmesi sağlanır.

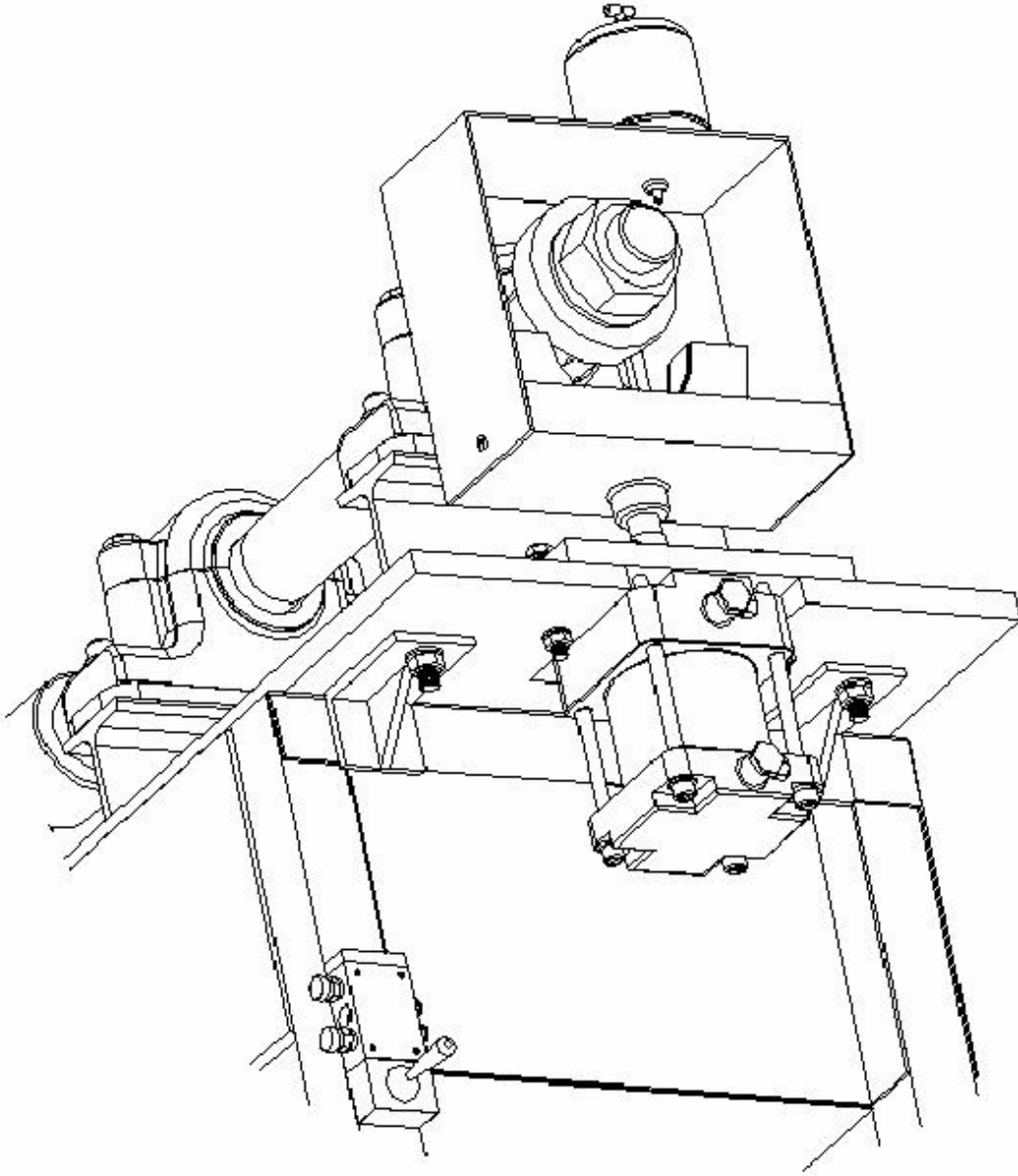
Gerektiğinde sıvı yağ akışı kısılarak, aşınan yatağa katı yağlamada yapılmakta hatta yağlama düzeneği çıkarılarak abrazif aşınmanın yapılabilmesi için uygun ortam oluşturulmaktadır.



Şekil 4.2: Yağlama ünitesi

### 4.1.3. Yatak baskı sisteminin tasarımı

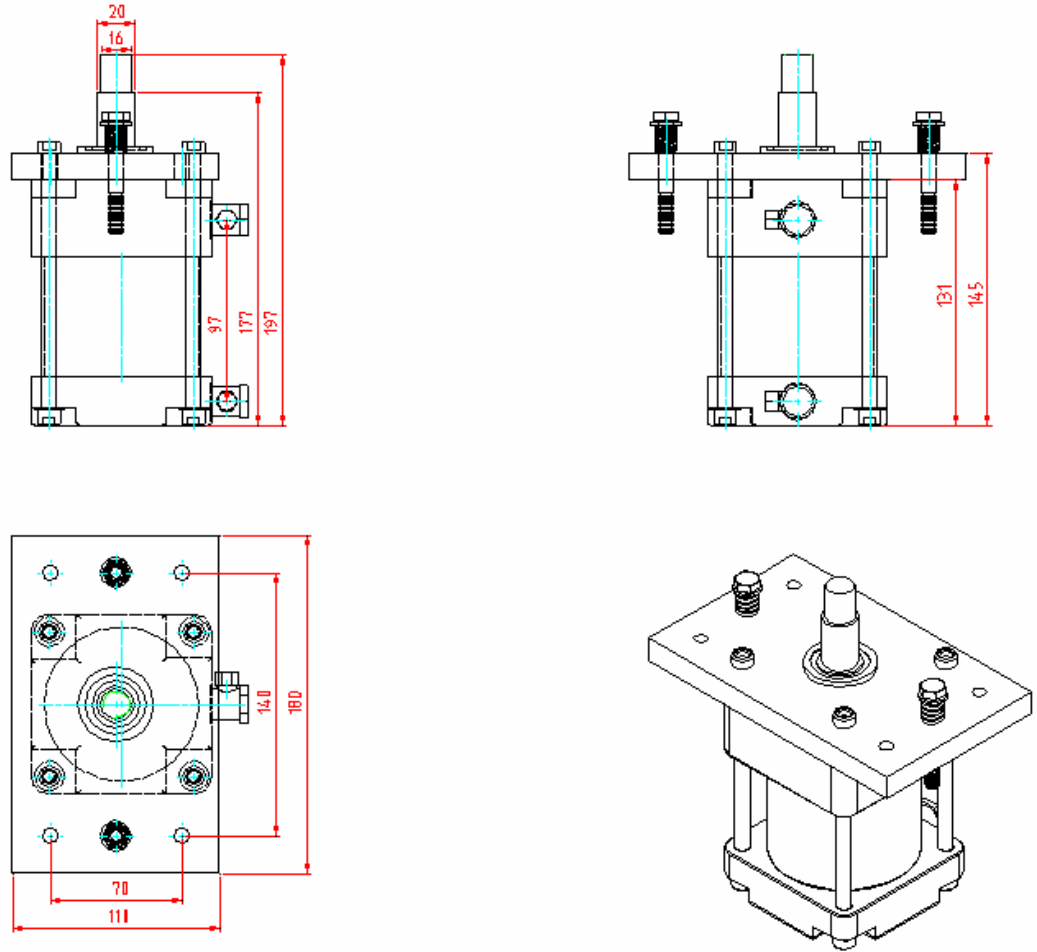
Bu sistemde yükü devamlı arttırıp gerektiğinde yükü sabit tutacak ve bilgisayardan kontrol edilebilecek bir yük uygulama sistemi düşünölmüştür. Bu amaçla hidrolik bir yükleme sistemi gerekmektedir. Ancak başlangıç olarak küçük yüklerle çalışıldığından ve ekonomik nedenlerle laboratuarda mevcut, 100mm silindir çapına sahip pnömatik silindir seçilerek yük uygulama sistemi şekil 4.3 de ki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 4.3: Yatak baskı sistemi

Tablo 4.1: Pnomatik sistemde kullanılabilir basınç yük değerleri

1.63 bar	$1.63 \cdot \pi \cdot (0.1)^2 / 4$	1280 N (sistem için $F_N$ )
3 bar	$3 \cdot \pi \cdot (0.1)^2 / 4$	2355 N
5 bar	$5 \cdot \pi \cdot (0.1)^2 / 4$	3925 N
6 bar	$6 \cdot \pi \cdot (0.1)^2 / 4$	4710 N



Şekil 4.4: Pnomatik sistem

#### 4.1.4 Mil, yatak tasarımı ve motor seçimi

Çalışma sırasında mile gelen maximum radyal kuvvet,  $F_N$ : 1280N seçilmiştir. Bu yükün seçiminde, Aşınma ve sürtünme test metodolojisi hakkında çalışmalarda bulunan New Jersey Teknoloji Enstitüsü araştırmacılarından R.Dubrovsky ve

A.Titov' un deneysel uygulamaları ve standart universal aşınma test cihazlarında kullanılan yükler referans alınmıştır[4,5]. Aynı zamanda bu kuvvet endüstride kullanılan yataklarda oluşabilecek bir çok yükü simule edebilmektedir.  $F_N$ : 1280 N'a göre gerekli hesaplar aşağıdaki gibi yapılmıştır.

a.) Mil hesabı

Mil çapı hesabı:

$$\sum M_A = 0 + \downarrow$$

$$F_B \cdot 270 = 1280 \cdot 370$$

$$F_B = 1754 \text{ N}$$

$$F_A = 1754 - 1280$$

$$F_A = 474 \text{ N}$$

$$M_{emem} = F \cdot 100 = 1280 \cdot 100 = 128\ 000 \text{ Nmm}$$

$$= 1280 \text{ daNcm}$$

Birleşik momente göre mil çapı hesabı

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{eş}}{\pi \cdot \sigma_{eşem}}} \quad (4.1)$$

$$M_{eş} = \sqrt{M_e^2 + \frac{1}{2} M_b^2} = \sqrt{1280^2 + \frac{1}{2} (480)^2} \quad (4.2)$$

$$M_{eş} = \sqrt{1753600} = 1324 \text{ daNcm}$$

mil malzemesi ANSI 4140 seçilmiştir.( ANSI 4140 için  $\sigma_{eşem} = 1000 \text{ daN/cm}^2$  )

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{eş}}{\pi \cdot \sigma_{eşem}}}$$

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 1324}{3.14 \cdot 1000}}$$

$$d \geq \sqrt[3]{13.5} = d \geq 2.38 \text{ cm} = 23.8 \text{ mm}$$

İletilen moment (redüktör çıkış momenti) = 480 daNcm (yılmaz redük.tablolar)

$$\tau_{tm} = \frac{T}{Wt} = \frac{Mb \cdot 16}{\pi \cdot d^3} \quad (4.3)$$

$M_{max_{eğilme}} = 1280 \text{ daNcm}$

$$\sigma_b = \frac{1280 \cdot 32}{\pi \cdot d^3} = \frac{1280 \cdot 32}{3.14 \cdot (4.5)^3} = 143.15 \text{ daN/cm}^2$$

$$\tau_b = \frac{T \cdot 16}{\pi \cdot (4.5)^3} = \frac{480 \cdot 16}{3.14 \cdot (4.5)^3} = 26.84 \text{ daN/cm}^2$$

$$\sigma_{eş} = \sqrt{(143.15^2 + 3(26.84)^2)}$$

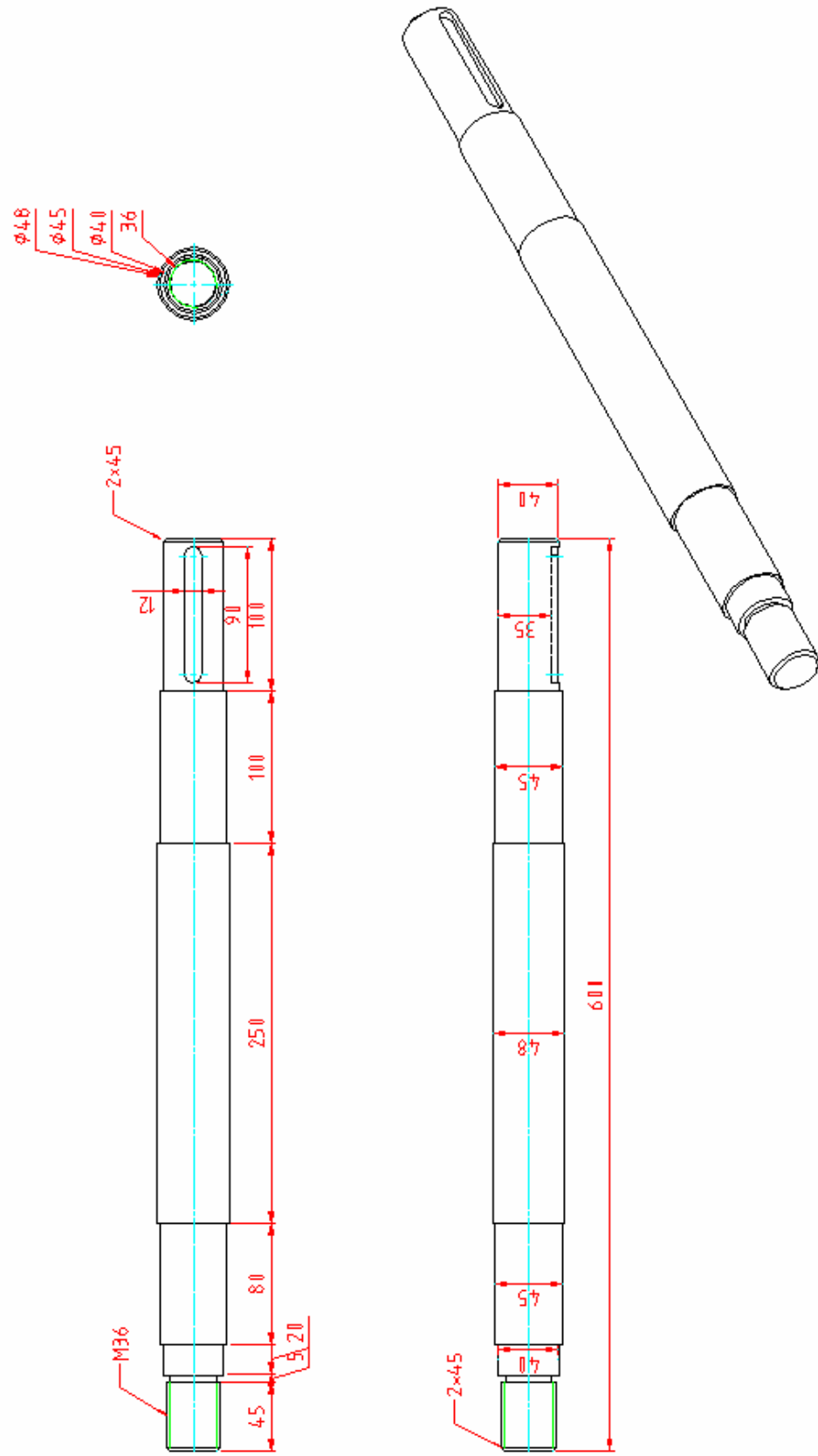
$$s_{eş} = 150.5 \text{ daN/cm}^2$$

$$s_{em} = 1000 \text{ daN/cm}^2$$

$$\frac{s_{em}}{s_{eş}} = \frac{1000}{150.5} = 6.6$$

ANSI 4140 malzemesinden seçilerek tasarlanan milin, elde edilen sonuçlardan güvenlik değerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Sistemin güvenli bir şekilde çalışmasının yanı sıra; uzun ömürlü, ileride oluşabilecek test değişkenlerine ve test amaçlarına göre reformu sağlanabilecek alt yapıya sahip bir sistem düşünülmüş ve bu paralelde tasarım aşamaları uygulanmıştır. Bu amaçla milin boyutlandırılması, yatak ve motor seçimi için gereken değerler, belirtilen özellikleri barındıracak nicelikte alınmıştır.



Şekil 4.5: Mil

b.) Yatak hesabı

F: dinamik eş değer yük

Fa : aksenal kuvvet

x: yatağın radyal faktörü

y: yatağın aksenal faktörü

Fr: radyal kuvvet

C: dinamik yük sayısı

C0: statik yük sayısı

Fa:1.75 kN      Fr:1.6 kN

Mbr: 480 daNcm

Fr: 1584 N

Çalışma saatinin 10 000 saat olup olmadığının kontrolü

Kullanılan rulman için;

C0: 64 kN

C: 72 kN

$$L_h = \frac{L * 10^6}{n * 60}, L = \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad (4.4)$$

$$P = xFr + yFa \quad (4.5)$$

$$\frac{Fa}{C_0} = \frac{1.75}{64} = 0.0273 \Rightarrow e \approx 0.27$$

$$\frac{Fa}{Fr} = \frac{1.75}{1.6} = 1.09 > e$$

$$X = 0.67 \quad Y = 2.9$$

$$P = 0.67 * 1.6 + 2.9 * 1.75$$

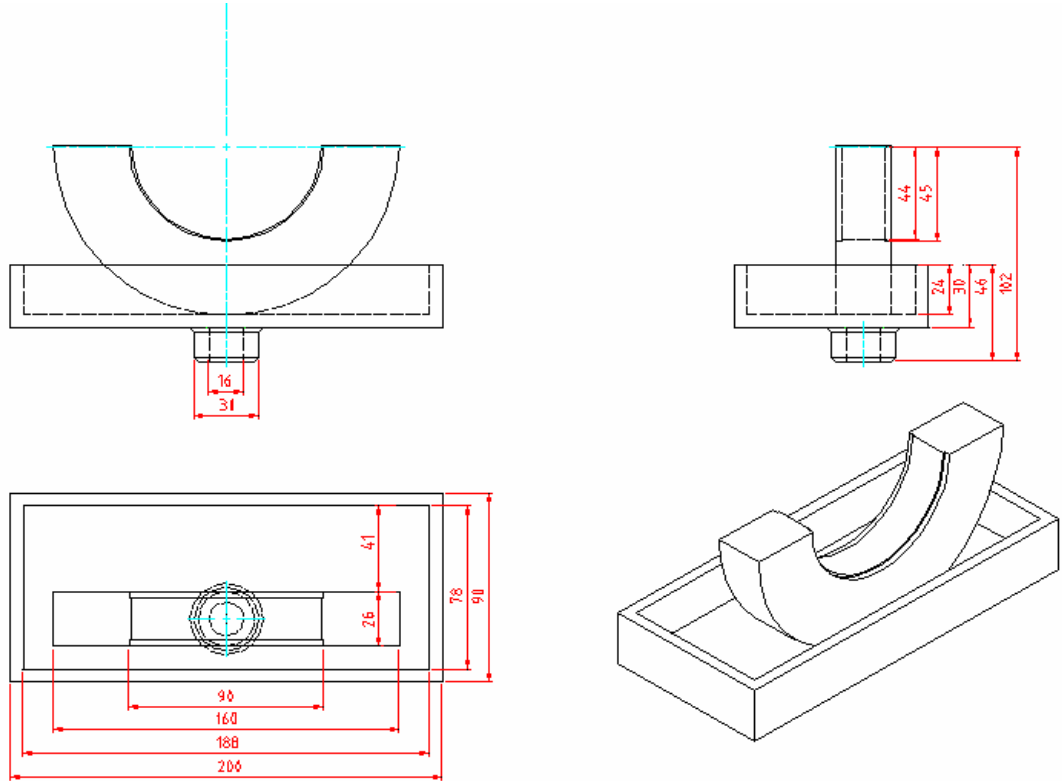
$$P = 6.14 \text{ kN}$$

Sistemde oynak makaralı radyal yatak kullanılmıştır, yataklarda çizgisel temas olduğu için  $p = 10/3$  olarak alınmaktadır.

$$L_h = \frac{10^6 \left( \frac{72}{6.14} \right)^{3.3}}{424 * 60} = 132\ 655 \text{ saat}$$

Oynak makaralı radyal yatak, ağır yükleri karşılamaya elverişli olması ve büyük aksenal yükleri taşıyabilmesi açısından sistem için tercih edilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere seçilen yataklar, ömür hesabı bakımından sistem için elverişlidir.

Yataklama ünitesi de test cihazına uygun olarak şekil 4.6 gibi tasarlanmıştır. Alt kısmından pnomatik sistemle bağlantısı yapılarak aynı eksen doğrultusunda hareket etmesi sağlanmıştır. Test numunesi, yataklama ünitesinin içine yerleştirilmektedir.



Şekil 4.6: Yataklama ünitesi



c.) Motor seçimi

Redüktörün çıkış momenti: 480 daN.cm (Yılmaz redüktör tablolar)

$$M_{br}: \dot{i}r.M_{bm}: 6.6*72.7 = 480 \text{ daN.cm} \quad (4.6)$$

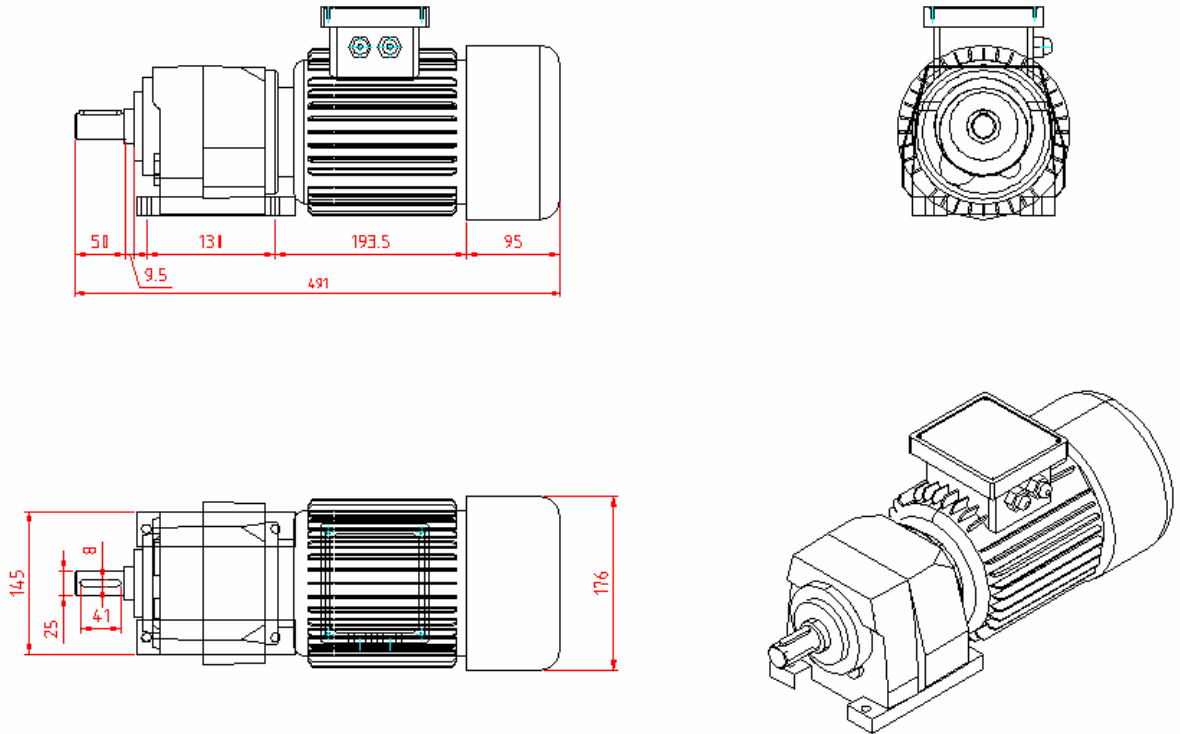
Motor momenti: 7.27 Nm = 72.7 daN.cm

Motor devri  $n_m$ : 2800 d/dak

Redüktörün çevrim oranı :  $\dot{i}r = 6.6$

Redüktörün çıkış devri:

$$n_r: \frac{n_m}{i_r} : \frac{2800}{6.6} : 424 \text{ dev/dak} \quad (4.7)$$

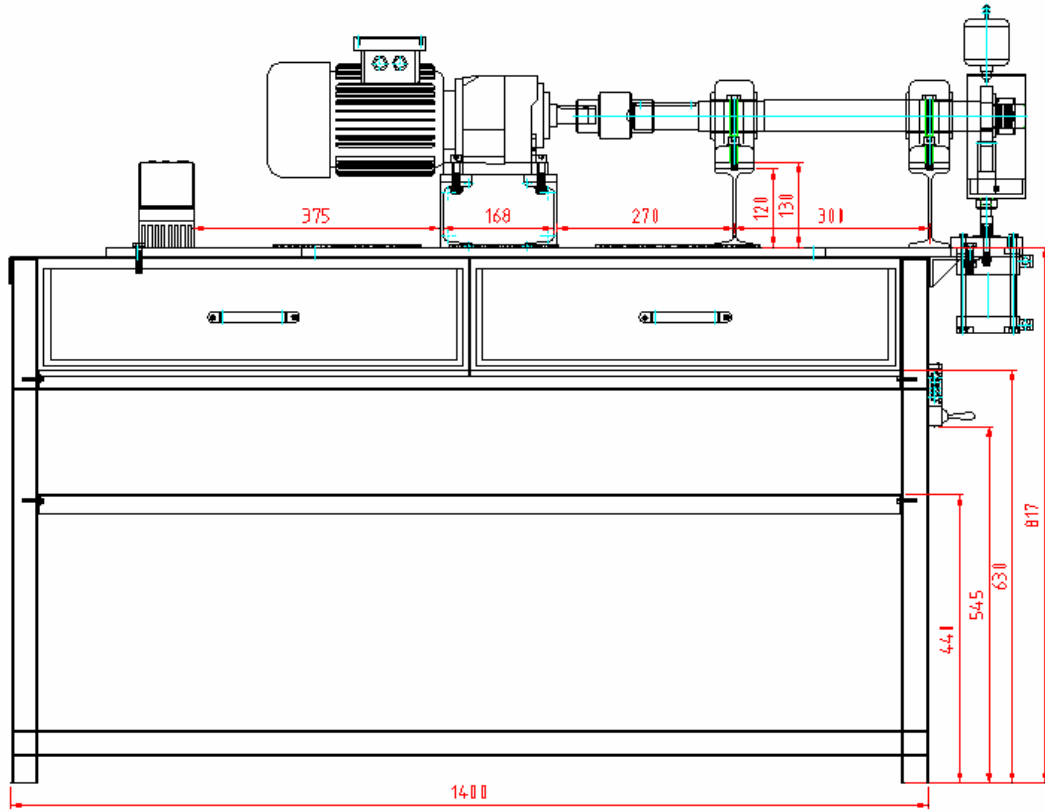


Şekil 4.7: Redüktörlü elektrik motoru

Test cihazında 2.2 kw' lık 3 fazlı redüktörlü AC motoru kullanılmıştır. Motorun kontrolü, sürücüden seri port ile yapılmaktadır; manuel olarak ta kontrol sağlanabilmekte ve gerektiğinde devir, frekans gibi parametreler değiştirilebilmektedir.

#### 4.1.5 Aşınma test cihazının genel konstrüksiyonu

Aşınma test cihazının genel konstrüksiyonu şekil 4.8 deki gibidir. Burada çalışma için gerekli olan tezgah yüksekliği 80 cm seçilmiştir. Diğer boyutlarda şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Test cihazının ön görünüşü

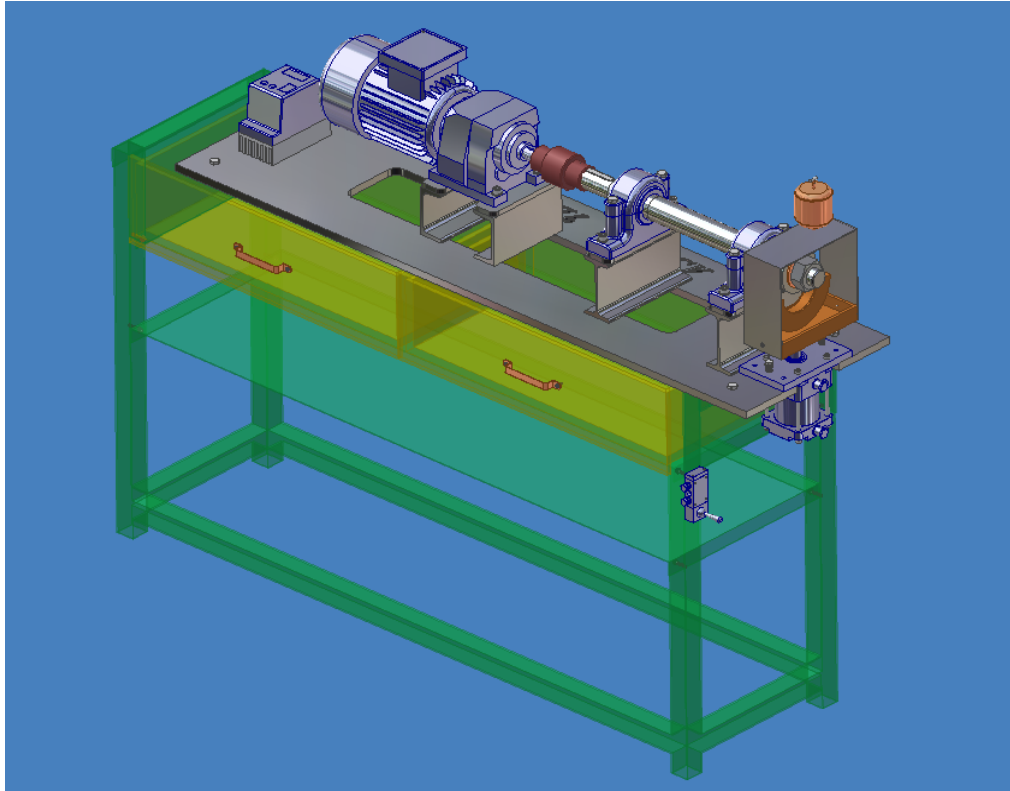
Deney cihazı kullanan kişinin güvenliği, kullanım kolaylığı ve cihazdan daha iyi verim alabilme açısından uygun şekilde tasarlanmıştır.

## 4.2. Cihazın İmalatı

Test düzeneği, bilgisayar ortamında tasarlandıktan sonra imalatı yapılacak parçaların bir listesi çıkarılmıştır. Böylelikle test cihazının imalatı için hazırlık aşaması tamamlanmıştır.

İmalatı yapılan elemanlar:

- \* Tezgah (1400\*400; h: 800mm)
- \* Mil (ANSI 4140)
- \* Aşındırıcı disk (ANSI 4340; S: 20mm, Dd: 90 mm, di: 40mm)
- \* Profiller (2adet SB120\*12 I profil, 2 adet CH 100\*10)
- \* Alt tabla (1400\*380 ebatlarında 14 mm kalınlığında sac)
- \* Yataklama sistemi (bronz yatak, hazne vb.)



Şekil 4.9: Aşınma test cihazının genel görünüşü

## 5. SONUÇLAR

1. Bu çalışmada 1280 N yatak basıncına kadar test yapabilen aynı zamanda yağ performansının belirlenmesinde kullanılacak bir test cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir.
2. Aşınma test cihazında yağlama ünitesi çıkarılıp yerine uygun boyutlarda malzemeler konularak abrazif aşınma testi de yapılabilmektedir. Bu nedenle cihaz universal niteliktedir.

## KAYNAKLAR

- [1].Bau,P.J.,“Friction, Lubrication and Wear Technology”, *ASM Handbook*, Volume18, Cheng, H.S., pp. 79-97, U.S.A (1992). ŞEKERCİ,O, ‘Aşınma ve aşınma test makineleri’,Sunumlu proje, Kocaeli Üniversitesi,(2006).
- [2]. Kostetsky, B., Friction, Lubrication and Wear, Technica, Moscow, 1970, pp.113-121.
- [3]. Annual book of ASTM standart, American Society for Testing and Material, *ASTM*, (2000).
- [4]. Dubrovsky,R., Proceedings of Internatiol Conference on Fatigue, Corrosion Cracing, Fracture Mechanics and Failure Analysis, *ASM*, Salt LakeCity, pp.197-202.(1985).
- [5]. Dubrovsky, R. And Shih,I., *Materials Research Society Symposium Proceedings*,V.140, pp.449-454. (1998)
- [6]. He, D.H. and others, *Wear*, V.239, 2000, pp.10-20.
- [7]. Designation: D 2596-97,. ‘Standart test metod for measurement of extreme-pressure properties of lubricating grase (four- ball method)’,. *ASTM*.
- [8]. Sayles, F.S., et al, National lubricating grease institute spokesman, Vol 32, No. 5 August 1968, pp.162-167.
- [9]. Designation: D 2509-93,.’ Standart test metod for measurement of extreme-pressure properties of lubricating grease’,. *ASTM*.(1993)
- [10]. Schatt, W., Wieters, K. P.1997.“ Powder Metallurgy”,*Processing and Materials*, EPMA, Shrewsbury, U.K., pp. 492
- [11]. Pratt, G.C.1973. “Materials for Plain Bearings”,International *Metallurgical Reviews* , Vol.18, Review 174, pp. 23-25.
- [12]. Ünlü, B. S., Atik E., Meriç, C. 2002. “Kaymalı Yataklarda Aşınma Mekanizmaları”, *Makine Metal Teknolojisi*, Sayı 127, s. 45-50.
- [13]. Varol, R. 2001. “Cu ve Fe Esaslı T/M Yatak Malzemelerinin Aşınma Özellikleri”, *DEÜ Müh. Fak. Fen ve Müh. Dergisi*, Cilt 3, Sayı 1, s. 81-90.
- [14]. Durak, E.“ Farklı Yükleme Şekillerinde Yağ ve Yağ Katkı Maddelerinin Yatak Performansına Etkileri”,*S.D.Ü. Fen Bil. Enstitüsü*, Doktora Tezi, Isparta

- [15]. Ünlü, B, S., Köksal, N, S., Atik,E., Meriç,C., 'CuSn10 yatak malzemesinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi'. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.,sayı:1, syf:41-45 (2005).
- [16]. Ünlü,B,S., Köksal, N,S.,'Saf Cu, Sn, Zn'den Üretilen Yatakların Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi'. *Makina Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (2004).
- [17]. Tunay, R.F.,Tüfekçi, K., Durak,E., Kurbanoğlu, C,. 'Yağ Katkı Maddelerinin Kaymalı Yataklardaki Sürtünme Katsayısına ve Aşınmaya Etkilerinin İncelenmesi, **On Birinci Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi** , Antalya, 13-15 Ekim (2004).
- [18]. J.Wu, X.H. Cheng, 'The tribological properties of Kevlar pulp reinforced epoxy composites under dry sliding and water lubricated condition' *Elsevier*, (2006).
- [19]. A.Morina, A. Neville, M. Priest, J.H Gren, 'ZDDP and MoDTC interactions in boundry lubrication- The effect of temperature and ZDDP/MoDTC ratio', *Elsevier*, (2006).

## ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Malatya’ da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kocaeli’ de tamamladı. 1997 yılında Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü’nde eğitime başladı. 2002 yılında Teknik Öğretmen unvanı ile mezun oldu. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Halen CAD/CAM uygulamaları konusunda çalışmalarında bulunmaktadır.