

KARADENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARADENİZ ÜNİVERSİTESİ	
MERKEZ KÜTÜPHANESİ	
Dem. No:	10531
Flanı :	100-

BAZI MÜHENDİSLİK MALZEMELERİNİN SÜRTÜNME KATSAYILARI
VE
AŞINMA ORANLARININ BELİRLENMESİ

Çalışmayı yöneten:
Doç.Dr.Atila BOZACI

Çalışmayı yapan:
Şeref SOYDAN

Mart - 1986
TRABZON

Bazı mühendislik malzemelerinin sürtünme katsayıları ve aşınma oranlarının belirlenmesi konulu çalışmayı yapma-
m sağlayan ve bu çalışmanın her aşamasında bana yardım-
cı olan değerli hocam Doç.Dr.Atilla BOZACI'ya ve bu a-
lımamda bana yardımcı olan arkadaşlarıma teşekkür ede-
rim.

Trabzon-1986

Seref SOYDAN

İÇİNDEKİLER

I-SÜRTÜNME

1 Giriş	1
2 Genel tanım ve sınıflandırma	2
3 Kuru sürtünme	3
3.1 Sürtünme yasaları	4
3.2 Sürtünmenin esas kaynakları	5
3.2.1 Yüzey pürüzlülüğü	5
3.2.2 Değme alanı	6
3.2.3 Yüzeylerin genel durumu	13
3.3 Metalik temiz yüzeylerin sürtünme özellikleri	14
3.4 Sürtünme davranışları	15
3.4.1 Kararsız sürtünme davranışı	16
3.4.2 İlimli sürtünme davranışı	
3.5 Metallerin adezyonu	18
3.5.1 Adezyon teorisi	19
3.6 Metal olmayan malzemelerin sürtünmesi ...	25
3.6.1 Plastiklerin sürtünmesi	26
3.6.2 Elastomerlerin sürtünmesi	28
3.6.3 Gevrek katıların sürtünmesi	31
4 Yuvarlanma sürtünmesi	33
4.1 Yuvarlanma sürtünmesi kanunları	35
5 Sınır sürtünmesi	35
6 Sıvı sürtünmesi	37

II-AŞINMA

1 Genel tanım ve sınıflandırma	39
1.1 İlimli aşınma	39
1.2 Aşırı aşınma	39
2 Aşınma mekanizmaları	40
2.1 Adeziv aşınma	40
2.2 Abreziv aşınma	42
2.3 Yorulma aşınması	43

2.4 Rulo oluşumu ile oluşan aşınma	44	
2.5 Korozif aşınma	44	
2.6 Yenme	45	
3 Aşınma davranışını etkileyen faktörler	45	
3.1 Sertlik	45	
3.2 Karşılıklı çözünme	46	
3.3 Kristal yapı	46	
3.4 Yüzey filmi reaksiyonu	46	
III-CALIŞMANIN AMACI		
1 Sürtünme ölçüm yöntemleri	48	
2 Aşınma ölçülmesi	50	
2.1 Aşınma ölçümünde kullanılan kriterler ...	50	
2.2 Aşınma ölçümünde kullanılan bazı deney düzenekleri	51	
2.2.1 Yüksek basınç değme testleri	51	
2.2.2 Radyoaktif izleme tekniği	53	
2.2.3 Yüzey incelemesi	53	
IV-DENEY DÜZENEGİNİN TANITILMASI		
1 Çalışma prensibi	54	
2 Deney düzeneğinin yapısı	57	
3 Deney büyüklüklerinin ölçülmesi	59	
3.1 Hız ölçümü	59	
3.2 Kuvvet ölçümü	59	
V -DENEYLERİN YAPILIŞI		64
VI-DENEY SONUÇLARI VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ		
1 Deney sonuçları	66	
1.1 Sürtünme katsayıları	66	
1.2 Aşınma deney sonuçları	85	
2 Deney sonuçlarının irdelenmesi	94	
VII-SONUÇ		96
VIII-KAYNAKÇA		97

I-SÜRTÜNME

1-GİRİŞ

Bir katı yüzey diğeri üzerinde kayarken harēkete karşı gösterilen dirence SÜRTÜNME denir.Sürtünme mekanizmaların çalışmalarını etkileyen çok önemli bir faktördür ve bu konu mühendislikte çok geniş bir alanı kapsar.

Sürtünmenin önemi daha ilk çağlarda ateşin bulunması ile ortaya çıkmıştır.Çeşitli uygulamalarla;tekerlekler,kızaklar, yuvarlanma elemanları ve yağlayıcı madde kullanılarak ağır nesnelere taşınması sağlanmıştır.

Sürtünmenin çok eskiden beri bilinmesine ve uygulanmasına rağmen bilimsel olarak değerlendirilmesi yenidir.Bu konu ile ilgili ilk bilgiler 15.y.y. sonlarında Leonardo da Vinci'nin kendi hislerine geniş ölçüde yer verdiği yazılardır.Onun bu çalışmaları unutulmuş veya dikkate alınmamıştır.Leonardo da Vinci araştırmaları sonucunda "Ağırlık arttıkça sürtünme kuvvetide artar." ve "Farklı boy ve genişliklerde değme olduğu halde hareketin başlangıcında sürtünme kuvveti ile ağırlığın benzerliği vardır." şeklinde sonuçlar çıkartmıştır.1699'da Fransız mühendis Amontons bu kanunları yeniden bulmuştur.

1781'de Coulomb,dinamik sürtünme ile statik sürtünme arasındaki farkı göstermiş ve Amontons'un gözlemlerini doğrulamıştır.Coulomb,yüzeyler arasındaki sürtünmenin moleküler adezyondan olabileceğini göz önüne almış fakat,bu düşündüğü sürtünme şekli kayma yüzey alanı ile orantılı olduğundan ilk düşündüğü sürtünme şekline ters düştüğü için kabul etmemiştir.Coulomb sürtünen yüzeylerin pürüzleri ile birbirlerine temas ettiklerine ve ağırlığın bu pürüzler üzerinde taşındığına karar vermiştir.Coulomb'un ilk görüşü gerçekten doğrudur ve sürtünme,yüzeyler arasındaki adezyondan dolayı büyüktür. /4/

Sürtünme nedeni ile kaybolan enerji,tüketilen toplam enerjinin çok önemli bir bölümüdür.Örneğin;modern motorlu araçlarda gücün %20 si sürtünmeyi yenmek için harcanır.Bu harcanan güç uçak motorundaki pistonlarda % 9,türbojet motorlarında

% 1.5-2 dir. Bizi asıl düşündüren sürtünme ve aşınmanın makinaların bazı önemli parçalarını hasara uğratmasıdır. Sürtünmenin azaltılması; iyi bir tasarımla, eş çalışan malzemelerin uygun secilmesi veya iyi bir yağlama yapılarak sağlanabilir. Bunlar modern teknolojinin çok önemli problemleridir.

Günlük hayatın sürebilmesi için sürtünme yeterli büyüklükte olmalıdır. Eğer sürtünme çok düşük olsaydı yürümek, arabaların kullanılması veya yüklerin taşınması olanaksızlaşmıştı. Bu koşullara kayma diyoruz ve bu durum ortaya çıktığında sürtünmenin arttırılması gündeme gelirdi.

Sürtünmenin gerekliliği iki ana grupta toplanır. Bunlardan birincisi; eğik düzlemde gerektiği zaman, yeteri kadar sürtünme istenmesi veya istenmemesi—ikincisi; sürtünmenin sabit olarak istendiği sınırlı koşullardır. Tipik bir örnek araba freni için verilebilir. Eğer sürtünme çok düşük olsaydı araba çabuk durmayacaktı, bunun yanında sürtünme çok yüksek olsaydı yolcular pencereden dışarı savrulacaklardı. Bunun diğer uygulamaları hareketin hassas ve kusursuz şekilde kontrol edilmesi istenen yerlerdir. Örneğin; hassas cihazlar.

Birçok pratik uygulamada titreşimlerin neden olduğu gıcır-tılı, cızırtılı sesler ve gürültünün azaltılması diğer bir sürtünme problemi olarak karşımıza çıkar. Bazende bu koşulların sağlanması istenir, çünkü violin ailesinden müzik enstürmanları yalnız titreşimle ses üretirler. /5/

2-GENEL TANIMLAR VE SINIFLANDIRMA

Genel anlamda sürtünme, temasta olan ve göreceli hareket yapan iki cismin temas yüzeylerinin harekete karşı gösterdikleri dirençtir. Birbirine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma ve kayma-yuvarlanma olabilir. Böylece sürtünme dinamik olarak;

- Kayma
- Yuvarlanma
- Kayma-yuvarlanma

şeklinde olur.

Göreceli hareket yapan yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı;

- Kuru
- Sınır
- Sıvı

olmak üzere üç durumda incelenir.

Genel anlamda KURU SÜRTÜNME, birbirine göreceli hareket yapan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda her iki yüzey yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılmış olabilir ve asıl sürtünme yağlayıcı madde tabakaları arasında oluşur. Bu duruma SIVI SÜRTÜNME'Sİ denir. İkinci durumda yüzeyler tamamen ayrılmadığı zaman SINIR SÜRTÜNME'Sİ durumu vardır.

Bu sürtünme durumlarından sadece sıvı sürtünme durumu teorik ve analitik olarak tam anlamı ile tanımlanabilir. Kuru ve sınır sürtünmesi fiziksel bakımdan birbirinden farklı geniş sürtünme bölgelerini kapsar. Bu iki bölge arasında belli bir sınır olmamakla beraber şöyle bir ayırım yapabiliriz; yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde istenilerek konulur ve sıvı sürtünmesi hali oluşturulmazsa SINIR SÜRTÜNME'Sİ, yağlayıcı konulmadığı zaman KURU SÜRTÜNME durumu oluşur. /3/

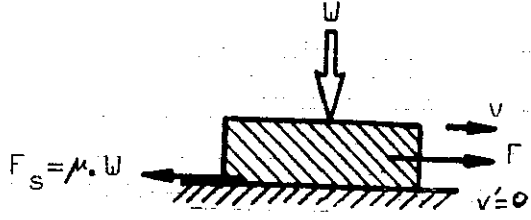
3-KURU SÜRTÜNME

Birbiri üzerinde temas halinde bulunan katı maddeler tamamen kuru iseler harekete başlamaya çalıştıklarında teğetsel yöndeki hareket direnci kuru sürtünmedir. Hareket için gereken kuvvetin yetersiz olduğu ve kayma meydana gelen durumlar belirlenmeli ve her ikisi arasındaki fark bilinmelidir.

Kuru sürtünmeyi teorik olarak tanımlayabilmek için Şekil:1 deki model kullanılmaktadır. Buna göre göreceli hareket yapan ve normal kuvvetin (W) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı

$$F_s = \mu \times W$$

değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada μ sürtünme katsayısıdır.



Şekil 1:Basit değme durumu

3.1 Sürtünme yasaları

Şekil 1'deki gibi W yükünü bir düzleme koyduğumuzu göz önüne alalım. Eğer buna küçük bir kuvvet uygularsak kayma olmaz. Bunun nedeni, yüzeyler arasında F 'ye eşit ve ters yönde bir sürtünme kuvvetinin olmasıdır. Bu sürtünme kuvvetinin birinci nitel özelliğidir. Bu durumda hareket olanağı olduğundan yüzeyler arasında STATİK SÜRTÜNME denilen bir direç oluşmaktadır. Böylece,

$$F_s = F$$

yazılır. Kavrama, fren gibi sürtünme ile çalışan elemanlarda esas olarak bu sürtünme hali vardır ve bu elemanların hesabı yukarıdaki eşitliğe dayanır. F kuvvetinin etkisi altında yüzeyler birbiri üzerinde kaymaya başladıklarında DİNAMİK SÜRTÜNME denilen durum ortaya çıkar. Bu durumda F_s sürtünme kuvveti F kuvvetinden daha küçük ve harekete ters yöndedir. Pratikte sürtünme denildiği zaman bu tip sürtünme akla gelir ve aşınma, enerji kaybı ve sıcaklık yükselişi gibi olaylar bunun sonucunda oluşur. /3/

Sürtünme kuvveti deneysel olarak, F ile ters doğrultuda olduğu halde F yönünde cismin hareketine bağlı olarak bulunmuştur. Bu da sürtünme kuvvetinin ikinci nitel özelliğidir.

Diğer sürtünme kanunları sürtünme kuvvetinin büyüklüğü ile ilgilendirler. Sürtünme kuvveti makroskopik olarak gözlenen büyüklüktür. Sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü açıklayabilmek için, kayma hızı, değme alanının büyüklüğü, uygulanan yük olarak adlandırılan değişkenlerin ilişkisini açıklamak gerekir.

Bu üç niteliğin ilişkisi;

1-Sürtünme kuvveti normal kuvvetle doğru orantılıdır. Böylece sürtünme katsayısı

$$\mu = F/W$$

şeklinde tanımlanır.

2-Sürtünme kuvveti görünen geometrik alandan bağımsızdır.

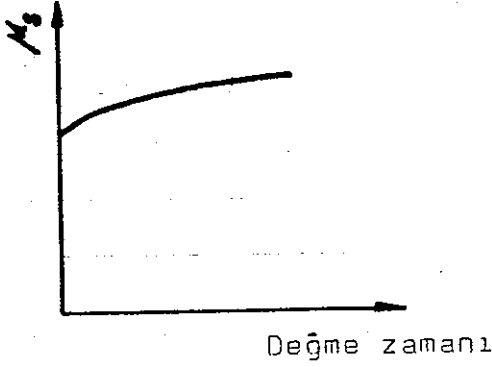
3-Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır.

4-Statik sürtünme kuvveti dinamik sürtünme kuvvetinden büyüktür.

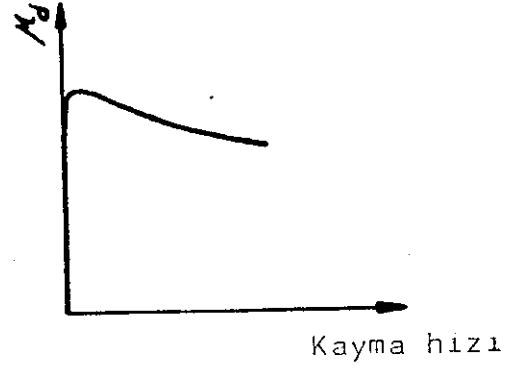
Bunlardan birincisine istisna olarak çok sert(Elmas) veya çok yumuşak(PTFE) malzemeler gösterilebilir.

Sürtünme kuvvetinin yükten bağımsız olduğu durumda yüzeylerden biri ince sert bir yüzey tabakasına ve yumuşak bir alt tabakaya sahiptir. Düşük yüklerde ince sert bir yüzey tabakası parçalanmamış olarak durur ve sürtünme özellikleri iyidir. Büyük yüklerde yüzey tabakası kırılmıştır ve alt tabakanın özellikleri çok önemlidir. Pürüzlülüğü çok çok az ve çok temiz yüzeylerde sürtünme kuvveti yükten bağımsız fakat görünen değme alanı ile orantılı olabileceğinden 2. kanuna aykırı durumlar olabilir.

Birinci ve ikinci kanunlara uymayan durumlar çok azdır. Daha farklı durumlarda üçüncü kanuna dikkat edilir. Bilindiği gibi kayma başlangıcındaki sürtünme kuvveti kayma sırasındaki sürtünme kuvvetinden daha büyüktür ve bu durumda bir statik birde dinamik olarak iki sürtünme katsayısı tanımlanır. Sürtünme katsayıları tablolarında ayrı ayrı verilir. $\mu_s > \mu_d$ fakat aralarında büyük bir fark yoktur. Bununla beraber, dinamik sürtünme katsayısı kayma hızının fonksiyonu iken, statik sürtünme katsayısı değme zamanının fonksiyonu olarak düzeltilmiştir. Şekil 2 ve 3'te statik sürtünme katsayısı (μ_s)--zaman ve dinamik sürtünme katsayısı (μ_d)--hız arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Sekil 2: μ 'nün değme zamanına bağlı olarak değişimi



Sekil 3: μ 'nün kayma hızına bağlı olarak değişimi

Statik sürtünme katsayısının zamanla değişimi çok önemlidir. Statik değme zamanı 0.1 s gibi çok kısa bir süre olarak belirlenmiştir. Değme zamanı uzadığında sürtünme katsayısı değme zamanının logaritmik fonksiyonu olarak gösterilir. Değme zamanı her on kat arttığında fonksiyondaki artış çok azdır. (% 1-2).

Dinamik sürtünme katsayısı genellikle düşük kayma hızlarında artar, yüksek kayma hızlarında azalır. Sürtünme katsayısının değişimi hızın logaritmik fonksiyonu olarak çıkarıldığı zaman geniş hız dağılımlarında eğriler doğrusal Şekil alırlar. Grafikler genellikle küçük ölçekli olarak çıkarıldığından eğriler eğimlidir. Örneğin; sürtünme katsayısını %1-2 değiştirebilmek için kayma hızı 10 kat arttırılmıştır. Sürtünme-hız eğrisinin eğiminin düşük olması nedeniyle hız dağılımı 2.5×10^{-10} m/s den 2.5 m/s ye kadar 10^{10} kat oldu. Sürtünme katsayısı 2.5 m/s den sonraki hızlarda az bir değişim gösterir. Bundan amaç hız dağılımının sınırıdır. Dinamik sürtünme katsayısı sabit ve kayma hızından bağımsızdır.

Hızın artması ile sürtünmenin azalması özellikle kaymalı sistemleri ilgilendirir. Hız dağılımında sürtünme titreşimleri olabilir ve bir çok kayma sisteminde gürültü ve cızırtılar olur.

Sürtünme nedeni ile ortaya çıkan titreşimler çeşitli durumlarda olurlar ve buna göre belirlenirler. Titreşim, uygulanan

kuvvet yönünden, sürtünme hızının artmasından ve kayma sisteminin hareket sırasında sıçrama yapmasından dolayı oluşur. Titreşim istenmediği durumlarda sistem biraz yavaşlatılır veya farklı sürtünme koşulları belirlenir, sistemin rijitliği arttırılır.

3.2 Sürtünmenin olası kaynakları

Temas halindeki malzemelerin atomlarının ortak yüzey üzerinde birbirini çekmesi sürtünme kuvvetinin kaynağı olarak söylenir. Sürtünmenin diğer kaynakları; yüzeylerin pürüzlülüğü ve mekanik kenetlenme, elektro statik kuvvetler, kaynama-makaslama-kazımadır.

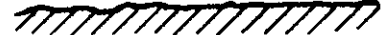
Kuru sürtünmeli yüzeylerdeki sürtünme katsayısı, temas halindeki yüzeylerin yapısına ve yüzey filmine bağlı fakat yükten bağımsız, değme alanı, yüzey pürüzlülüğü ve kayma hızına az miktarda bağlıdır. Bunlar sürtünme katsayısının asıl parametreleridir.

3.2.1 Yüzey pürüzlülüğü

Sürtünen sistemlerin dış yüzeyleri mikroskopik incelemelerle belirlenerek değme alanının durumu ve buna bağlı değme koşulları daha ayrıntılı olarak göz önüne alınmıştır.



Sekil 4: Çok düz yüzey



Sekil 5: Yerel pürüzlülükler ile düz yüzey



Sekil 6: Dalgalı pürüzsüz yüzey



Sekil 7: Dalgalı pürüzlü yüzey

Yüzeyin tamamen pürüzsüz olduğu durum (Şekil 4) üzerinde çok az durulur. Birçok yüzeyde Şekil 5'teki gibi keskin tepelikler vardır veya yüzey Şekil 6'daki gibi pürüzsüz fakat dalgalıdır. Diğer yüzey tipinde hem dalgalı bir yüzey hemde keskin pürüzler vardır (Şekil 7). Pratikte belkide bu dört yüzey

tipinin hepsi birden bulunur. Yüzey pürüzlülüğü mekanik ve elektriksel olarak bir çok yöntemle ölçülür. Ölçülen pürüzlülük değerlerinin standart sapması hesaplanır. Bazı yüzeylerin tipik pürüzlülük değerleri Tablo I'de verilmiştir.

Profil ölçen cihazlar yüzey profilini kusursuz olarak kopya edemezler. Yüzey profilini çıkarmak amacıyla en çok kullanılan cihaz profilometredir. Profilometrede 0.0125 mm çapında elmas ucu olan bir iğne kullanılmaktadır. Kullanılan diğer yöntemler; eğik kesit alma, optik interferometre, elektron mikroskobu, kartografidir. Yüzey gözümüze çok düz görünse de bu aletlerle yüzeydeki pürüzler gösterilir./4/

Yüzey tipi	Pürüzlülük değeri (μm)
Testere ile kesilmiş metal yüzeyi	254-25.4
Tornalanmış metal yüzeyi	5
Kaba yüzey	1.2
İnce yüzey	0.12
Mekanik parlatılmış yüzey	0.05
Elektrolitik parlatılmış yüzey	0.025

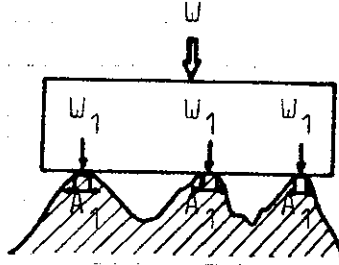
TABLO I: Çeşitli yüzeylerin tipik pürüzlülük değerleri

3.2.2 Değme alanı

Genelde pürüz dağılımının önemli olduğu üç tip vardır. Birincisi; tepeler arasındaki uzaklık büyüktür, ikincisi; tepeler ve vadiler arası çok kısa fakat vadiler ve tepeler dikleşmiş şekilde bir yüzey ortaya çıkmaktadır. Son olarak; dikkatle gözlendiğinde keskin tepeler, vadiler ve çatlaklar görülür. Ayrıntılar şartlara bağlı olarak değişeceğinden genel bir tanımlama yapılmaz. Vadilerin aralığı tipik olarak 2.5 mm dir ve pürüzlerin standart sapması 2.54 μm dir. Dalgalı yüzeylerde vadilerin aralığı 0.025 mm ve pürüzlerin standart sapması 0.25 μm dir.

Bir yüzey üzerine benzer pürüzlülükte diğer bir yüzey getirdiğimiz zaman eğer yük az ise yüzeydeki deformasyonlarda küçüktür. Değme yalnızca yüzey tepeciklerinde olur. Değen pürüz tepecikleri arasındaki uzaaklık 5 μm kadar olabilir. Yalnız

yüksek tepeler birbirine değeri, diğer küçük tepelerde değeri Uniform olmaz. Diğer noktalar arasındaki açıklık $0.5 \mu\text{m}$ kadardır. Değme bölgesindeki kritik uzaklık genellikle 25×10^{-8} mm den daha azdır ve bu bölgelerde oluşan değme, sürtünme kuvvetini oluşturur. Bu da bize gerçek değme alanını gösterir. Düz yüzey ile pürüzlü bir yüzey değdiğinde belirli oturma yüzeyleri vardır.



Sekil 8: Pürüzlü yüzeyde değme

Yüzeyde n tane oturma noktası varsa;
toplam oturma alanı;

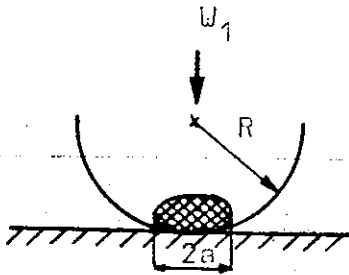
$$A = \sum_1^n A_1$$

Toplam yük;

$$w = \sum_1^n w_1 \text{ dir.}$$

İki yüzey birbiri üzerine oturduğunda bir görünen geometrik oturma alanı birde gerçek oturma alanı vardır. Biz gerçek oturma alanını inceliyoruz.

Her bir değme noktasını bir düzlem küre oturmasına benzetebiliriz.



Burada;

$$a = \left[\frac{3WR(1-\nu^2)}{E} \right]^{1/3}$$

Basınç dağılımı;

$$p = \frac{3W}{\pi a^2} \left(1 - \frac{R^2}{a^2} \right)^{1/2}$$

Sekil 9: Değme noktası modeli

$\pi a_i^2 = A_i$ yazılabilir.

$$a_i \sim W_i^{1/3}$$

$$A_1 = \pi a_1^2 \sim W_1^{2/3}$$

$$A_1 = k_1 \cdot W_1^{2/3}$$

$$k_1 = \left[\frac{3R(1-\nu^2)}{E} \right]^{1/3} \text{ olur.}$$

Diğer taraftan

$$A = n \cdot A_1$$

$$W = n \cdot W_1$$

$$A = n \cdot k_1 \cdot W_1^{2/3}$$

$$A = K \cdot W^{2/3} \text{ yazılabilir.}$$

Plastik deformasyonun olabilmesi için değme bölgesine gelen ortalama basınç;

$$P_m = \frac{W}{\pi a^2} \geq 3 \cdot \sigma_{AK} \text{ olmalıdır.}$$

Malzemenin sertliği;

$$H = \frac{W}{\pi a^2} \text{ (N/mm}^2\text{) dir.}$$

$$P_m = \frac{W}{\pi a^2} \geq 3 \cdot \sigma_{AK} = H \text{ yazabiliriz.}$$

Bir tek değme noktası için;

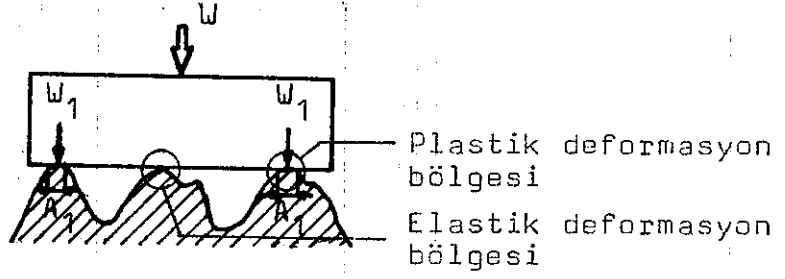
$$H = \frac{W_1}{\pi a^2}$$

$$\pi \cdot a^2 = A_1 = \frac{W_1}{H} \text{ olur.}$$

n tane değme noktası varsa

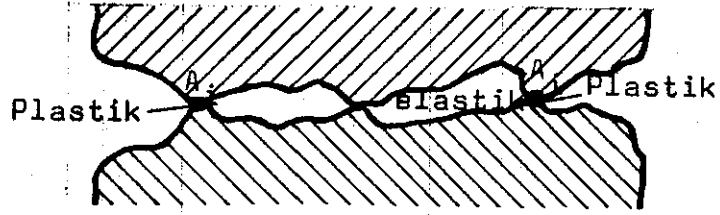
$n \cdot A_1 = n \cdot \frac{W_1}{H}$ veya $A = \frac{W}{H}$ olur. Bu da tamamen plastik şartlarda ortaya çıkan bir durumdur.

Elastik şartlarda alan, $W^{2/3}$ ile orantılı iken plastik şartlarda doğrudan doğruya W (yük) ile orantılıdır. Yük arttıkça plastik deformasyon bölgeleri büyür ve çatlamalar olur.



Sekil 10: Deformasyon bölgeleri

Gerçek alanda, deĝmenin bir kısmı plastik bir kısmı da elastik deformasyon aşamasındadır. İlk önce en yüksek tepeler plastik deformasyon bölgesine girerler. Yük arttıkça diĝer tepelerde deformasyona girer bunların bir kısmı elastik deformasyon bölgesinde kalır.



Sekil 11: Elastoplastik deĝme

Bir deĝme noktasına gelen basınç P_i ve bu deĝme noktasının alanı A_i ise genel olarak

$$W = \sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i \quad \text{yazılabilir.}$$

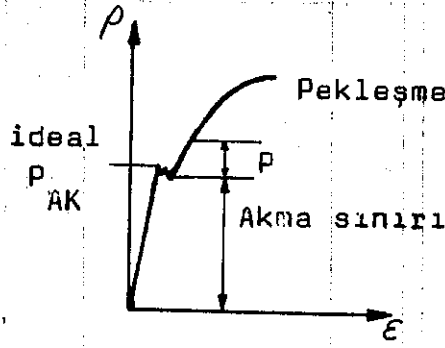
Zayıf malzemenin akmaya başladığı basınca P_{AK} dersek yukarıdaki ifadeyi bir plastik bir de elastik noktalar için yazmak gerekir.

$$W = P_{AK} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} A_i + \sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i$$

Plastik deĝme Elastik deĝme

Burada P_i elastik basınçtır.

Eğer her P_i basıncını ortalama bir P_m basıncı alabilirsek her zaman için $P_{AK} > P_m$ olur.



Şekil 12

Pekleşmeden ötürü akma;

$P_{AK} + \Delta P$ de olur.

$P_m = P_{AK} - \Delta P_m$ yazılabilir.

Ozaman;

$$W = (P_{AK} + \Delta P) \sum_{i=1}^{n_1} A_i + (P_{AK} - \Delta P_m) \sum_{n_1}^n A_i$$

Plastik değmeler Elastik değmeler

Hiç bir zaman ΔP ile ΔP_m birbirinin aynı değildir. Normalde $\Delta P \neq \Delta P_m$ dir. Eğer $\Delta P = \Delta P_m$ olursa, o zaman tamamen plastik duruma geçilmiş olur. Bu durum yalnızca malzemenin plastik davranışında geçerlidir.

$$W = P_{AK} \sum_{i=1}^n A_i$$

$$W = P_{AK} \cdot A \quad \text{olur.}$$

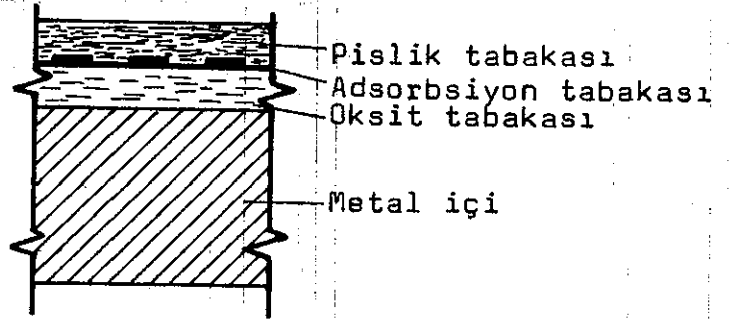
Sonuç olarak:

- 1) Yük arttıkça A toplam değme alanı büyümekte buna paralel olarak değme noktası sayısı (n) büyümektedir. Sonuçta mikro değmenin A/n ortalama büyüklüğü her deformasyon cinsi için sabit kalmaktadır.
- 2) Deformasyonun cinsine (elastik, plastik, elastoplastik) bağılı olmaksızın toplam değme alanı A, W yükü ile doğru orantılıdır.
- 3) Pürüz tepeciğinin eğriliği deformasyon cinsi üzerinde önemli ölçüde etkili olmaktadır. Ortalama elastik basınç P_m ve ortalama plastik basınç P_{AK} yükten bağımsızdır.

4) Mühendislik uygulamalarında elastik sınırlar içinde kullanılan yük altında yüzey pürüzlülüğünün % 10'u sıkışır. Bu yükün üzerinde akma sınırına ulaşılır ve plastik deformasyonlar başlar. Değme noktasında $P_m \geq 3\sigma_{AK}$ olunca plastik deformasyonlar başlar. Gerçek değme alanı A ise $W = 3\sigma_{AK} \cdot A$ yazılabilir. Pürüzler ezilip ana gövde üzerinde oturma başlayınca $W = \sigma_{AK} \cdot A_{geometrik}$ olur. O zaman; $A = (1/3)A_g$ sonucu çıkar. Bu da % 10'luk pürüz ezilmesi ile pratikte ulaşılan bir durumdur.

3.2.3 Yüzeylerin genel durumu

Yapılan inceleme ve deneylere göre kuru olarak tanımlanan metal yüzeyleri endüstriyel şartlarda Şekil 13'te gösterildiği gibi film tabakaları ile kaplıdır. Bu yüzey filmlerinin etkisi ve önemi çok büyüktür.



Şekil 13: Kuru metalin yüzey filmi

Metal yüzeyinden dışarı doğru çıktığında ilk karşılaşılan tabaka oksit tabakasıdır. Altın, Platin gibi değerli metallerin dışındaki metallerde metal ile hava reaksiyona girerek metal yüzeyinde oksit tabakası oluşturur. Oksit filminin kalınlığı metalin yapısı ve çalışma bölgesine bağlı olacaktır. Tipik bir değer olarak oksit tabakasının kalınlığı 25×10^{-6} mm dir.

Oksit tabakasından sonra atmosferden alınan bir adsorbsiyon tabakası vardır. Bu tabakanın yapısı genel olarak oksijen ve su buharı moleküllerinden oluşmuştur. Bu tabakanın kalınlığı 25×10^{-8} mm olduğu halde atmosfer şartlarına bağlı olarak artar.

Endüstrideki yağ veya gres filmi adsorbsiyon tabakasının yerine geçebilir. Bu film, endüstriyel şartlarda yağdamlaları

veya insanların ellerinden yayılarak doğal olarak oluşur. Bu filmin kalınlığı 25×10^{-7} mm veya daha çoktur.

Böyle bir metal yüzeyinde kayma olduğu zaman sürtünme katsayısı genellikle 0.3 ile 0.1 arasında değişir. Eğer yüzeyler kaymaya devam ederlerse yüzey filmi er geç yırtılacağından daha yüksek değerlere ulaşılır.

Metal yüzeyindeki yağ filmi, genellikle Aseton veya Karbon-tetraklorit gibi iyi çözücüler kullanılarak temizlenir. En üstteki tabaka çözücünden etkilenecek hemen çözüldüğü halde son tabaka hala direnerek metal yüzeyinden ayrılmaz. Metal yüzeyi çözücü ile yıkanarak ticari saflığa getirilir.

Metal yüzeyini yağdan temizlemede kullanılan iki ana yöntem vardır. Bunlardan birincisi; kesme prosesi ile yeni yüzeyler oluşturma, ikincisi ise; zımparalama, laplama, parlatma, taşlama ile yüzeylerin aşındırılmasıdır. Diğer bir yöntemde sudkostik eriyiği kullanılarak metal yüzeyindeki yağın temizlenmesidir. Bundan başka bir organik eriyik yüzeyde buharlaştırılır ve pislikler temizlenir. Bazı araştırmacılar aşındırma yöntemini eritme yöntemine tercih ederler.

3.3 Metalik temiz yüzeylerin sürtünme özellikleri

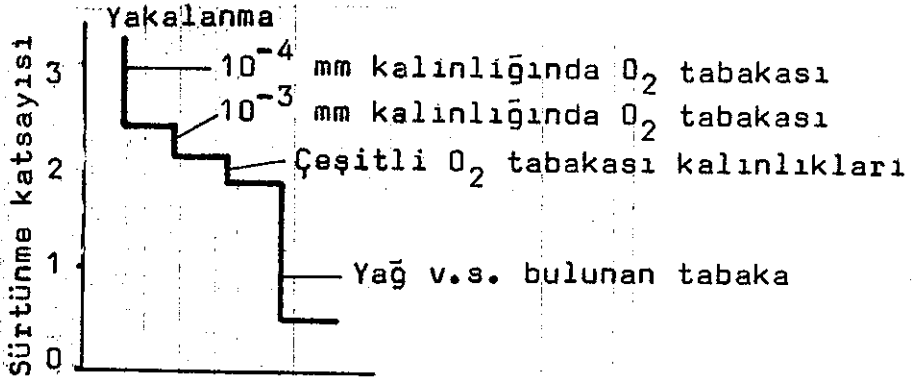
Burada oksit tabakasından arındırılmış metallerin sürtünme davranışları göz önünde tutulmuştur. Altın, Platin gibi metallerin dışında diğer metallerin tümü havada bırakıldıklarında yüzeylerine gaz adsorbe ederler. Metal yüzeyindeki oksit filmi ve adsorbsiyon tabakasını kaldırmak için özel teknik yöntemler kullanılır.

Metal yüzeyindeki filmi temizlemek için yüksek vakum gereklidir (10^{-6} mmHg den daha iyi bir vakum). Yüksek sıcaklıkta ilk yüzey tabakası kimyasal olarak ayrışır veya buharlaşır böylece oksit tabakası gider.

Yüksek vakum şartlarında hazırlanan iki yüzey birbiri üzerinde kaydığı zaman sürtünme katsayısı 5 ile 200 arasında değişen çok yüksek değerlere çıkar. Kayma devam ederse yüzeylerde çok büyük hasarlar olur. Yüzeyler birbirine yapışır ve ayırma için gereken kuvvet oldukça büyüktür. Bu gibi sistem-

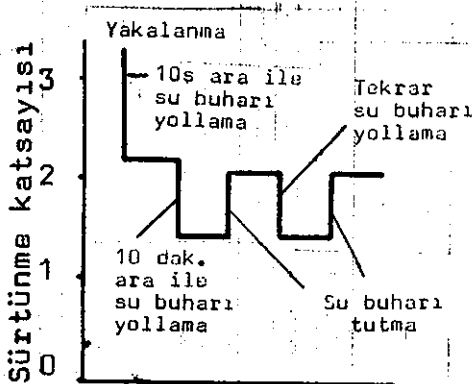
lerde sürtünme kuvveti uygulanan yükten bağımsız olduğundan normal sürtünme kanunları kullanılmaz. Burada sürtünme kuvveti, daha çok değme alanına bağlıdır. Yüzeyle kaynak edilmiş gibi davranırlar.

Eğer temiz metal yüzeyini O_2 miktarı 10^{-4} olan bir ortama bırakacak olursak yakalanmalar önlenir ve sürtünme katsayısında $\mu=2$ gibi fazla bir azalma olur. Genel davranış Şekil 14 te gösterilmiştir.



Şekil 14: Metalik temiz demirde oksijenin etkisi. O_2 miktarında çok az bir artışla $\mu=2$ den $\mu=1$ e inmiştir.

Su buharı ve gazlar benzer etki yaparlar. Su buharı, CO_2 , Cl_2 ve H_2S temiz metal yüzeyindeki sürtünmeyi azaltacaktır. Bu farklı gazların etkisi kimyasal filmin formasyonuna bağlıdır. Kimyasal film sürekli olarak yüzeye bağlıdır. Fiziksel olarak adsorbe edilmiş film basınç azaltılarak uzaklaştırılabilir. Demir yüzeyindeki su buharının etkisi Şekil 15'te gösterilmiştir. İçeriye bırakılan su buharı ile sürtünmede bir azalma olur. Sürtünme bir kaç saniye sabit kalır, sonra kimyasal tabaka bozularak değişik tabakalar oluşur. Su buharı uzaklaştırılırsa sürtünmede küçük bir artış olur.

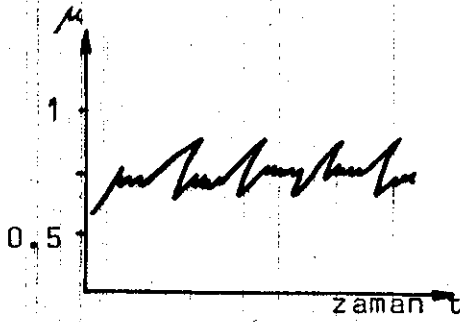


Şekil 15: Temiz metal yüzeyinde su buharının etkisi. Sürtünme, kimyasal filmin formasyonuna bağlı olduğundan yollanan su buharı ile aşırı bir azalma gösterir.

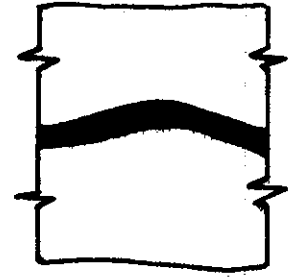
Özetleyecek olursak; Vakum şartlarında yüksek sürtünme katsayıları elde edilir. Atmosfer şartlarında yüzeydeki oksit filminin kırılması ile ve adsorbsiyon tabakasının yırtılmasıyla metallerin gerçek sürtünme davranışları bulunur.

3.4 Sürtünme davranışları

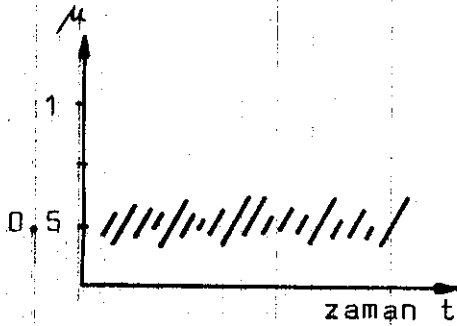
Sürtünme davranışları, ılımlı, aşırı ve kararsız olarak çeşitlilik gösterir,



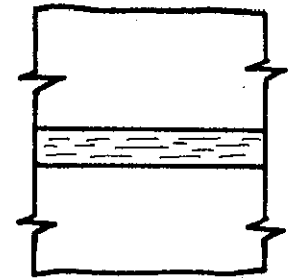
a) Kararsız kayma davranışı



a) Kararsız kayma durumu



b) İlimli kayma davranışı



b) İlimli kayma durumu

Şekil 16: Sürtünme-zaman değişimi

Şekil 17: Kaymadan sonraki yüzey

3.4.1 Kararsız sürtünme davranışı

Aynı cins iki metal atmosferik ortamda eş çalıştıklarında sürtünme katsayısı yüksektir ($\mu=1\div 1.5$). Bu katsayı bazen düzensizleşir (Şekil 16-a) ve yüzeyde kazımlar, ağır hasarlar gözlenir. Bu durum Şekil 17-a'da gösterilmiştir.

Statik sürtünme katsayısı dinamik sürtünme katsayısından büyük olduğu veya yüksek kayma hızlarında çalışıldığı durum-

larda sürtünme kuvvetindeki değişmeler düzensizleşir. Bu sonuç yüzeylerin doğal sürtünme özelliklerinden çıkmıştır. Bununla beraber, kararsız sürtünme davranışı, titreşimin büyüklük ve frekansı, özellikle kayma hızı, taşıyıcı sistemin doğal frekansı ve sönüm gibi dış etkenlere bağlıdır. Genelde, dinamik sürtünme sırasında yüzeyler birbirine yaklaşır ve bu arada statik sürtünme de olur fakat kayma hızının artırılması ile titreşimler azalır. Taşıyıcı sistemin rijitliği arttırılarak ta titreşimler azaltılabilir. Titreşim ve adezyonun etkisi ile yüzeylerde pürüzler oluşur. Kayma yüzeylerinde çizikler, gıcırtılı sesler oluşur.

Yağlama ile titreşimli hareket önlenerek düzgün bir kayma sağlanabilir. Düzgün bir kayma için titreşimin olmaması istenir.

3.4.2 İlimli sürtünme davranışı

Sürtünme katsayısı μ genellikle düşüktür. ,0.7 ile 0.3 arasında değişir. Sürtünme katsayısı genellikle sabittir veya kararsız sürtünme davranışına göre daha düzenlidir. Şekil 16-a'da bu karşılaştırma gösterilmiştir. İlimli sürtünme davranışında adezyon ve sürtünme kuvvetinin değişimi düzenlidir. Bir yüzeyin diğeri üzerinde bıraktığı izler Şekil 17-b de gösterilmiştir. Bu izler küçük çıkıntılar şeklindedir. Çapları 0.025 mm'nin altında olan parçacıklar bir yüzeyden diğerine transfer edilmişlerdir.

Genel bir kural olarak; kayma çiftinde aynı tür metaller kullanıldığında, karasız sürtünme davranışı, farklı metaller kullanıldığında ilimli sürtünme davranışı gözlenir.

Bazı özel durumlarda, örneğin; Kurşun ve İndium gibi çok yumuşak malzemelerde bu kurallar değişir. Bunun nedeni, yumuşak malzemenin kendi oluşturduğu film ile diğer malzeme yüzeyini kaplamasıdır. Çok yumuşak malzemelerin yanında bazı sert metaller de aynı etkiyi gösterirler (Örneğin; Titan, Zirconyum).

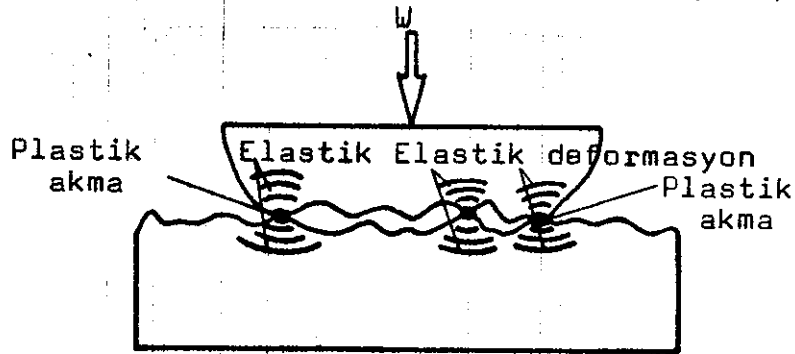
Cr, Ni gibi sert malzemeler birbirleri üzerinde kaydıkları zaman kararsız sürtünme davranışları gösterirler. Nemli atmosfer şartlarında nem parçacıkları metal yüzeyi tarafından

adsorbe edildiğinden bu parçacıklar yağ filmi gibi ince bir film oluştururlar. Yumuşak malzemeler kuru ve nemli atmosferde pek değişmez.

Kayma sırasında normal yük çok az olduğu durumda düzensiz kayma koşulları oluşturulamaz. Her bir metal için minimum bir yük olmalıdır. Metal yüzeyindeki oksit filminin kırılması için gereken minimum yük 0.5 gram olarak belirlenmiştir. Bu minimum yük, yüzey geometrisine, temas yüzeyine ve oksit filmine bağlıdır. Düşük yükler kullanıldığı zaman sürtünme katsayısı genellikle 0.3+0.5 tir ve yüzey hasarı azdır. Bu durum oksit-oksit kaymasının genel karakteristiğidir.

3.5 Metallerin adezyonu

Yüzeyler arasında oluşan adezyonun değerini belirlemek için yüzeyleri birbirine bastıran normal kuvvet ile yüzeyleri birbirinden çekerek ayırmak için gereken kesme kuvvetini karşılaştırabiliriz. Bu karşılaştırmanın yapılmamasının iki nedeni vardır. Birincisi; kayma sırasında oluşan birleşmeler normal yük altında oluşarlardan daha kuvvetli olabileceğinden yüzeydeki oksit vs. gibi pislik tabakası parçalanarak değişir. İkincisi; sürtünme normal yük altında ölçülmüştür. Adezyon normal yük kaldırıldıktan sonra ölçülmelidir. Normal yük kaldırıldığında birleşme bölgeleri etrafındaki elastik deformasyonlar kalkacak ve birleşme bölgelerinde az da olsa ayrılma olacaktır. Adezyon ölçümünde, birleşme yerleri çekilerek ayrılmış ve bu ayırma kuvveti belirlenmiştir (Şekil 18).



Şekil 18: Gerçek değme noktasındaki plastik deformasyon taslağı. Değme bölgesi etrafındaki gerilmeler elastiktir. Yük kalktığı zaman elastik gerilmeler kalkmış ve birleşme noktaları yer yer ayrılmıştır.

Eğer bu mekanizma doğru ise çok yumuşak ve şekil verilebilir metallere arasında güçlü bir adezyon olmasını bekleriz ve bunu deney koşulları ile değerlendiremeyiz. Bu gibi malzemelerde normal yük kaldırıldığı zaman elastik bölgelerin tekrar eski halini alması nedeniyle biçim de değişir ve birleşme noktaları yeteri kadar kuvvet uygulanarak ayrılabilir. Pb gibi yumuşak veya In gibi daha yumuşak bir metal yüzeyi temizlenerek bu yüzeye sert bir küresel metal parçası preslenirse adezyon oluşur ve yüzeyleri birbirinden çekerek ayırmak için güçlü bir teğetsel kuvvet gerekir. Bu teğetsel kuvvet normal kuvvet kadar büyük olabilir ve Pb veya In parçaları küreye yapışık olarak bulunur. Cu, Al gibi daha sert metallere yüzeyleri temizlendiğinde güçlü bir adezyon gösterirler bu da malzemelerin soğuk kaynak tekniğinin temelini oluşturur.

Sıcaklık yeteri kadar arttırılıp değme bölgeleri arasındaki elastik gerilmeler kaldırıldığında adezyon büyük ölçüde kolaylaştırılmıştır. Bu da sinterlemede önemlidir. Normal adezyonun yağ filmi oluşması ile büyük ölçüde azaldığı ileri sürülmüştür.

3.5.1 Adezyon Teorisi

Adezyon ile sürtünme arasında ilişki olduğu açıktır. Sürtünme, gerçek değme bölgelerindeki birleşme noktalarının gerilme kuvveti adezyon ve makaslama kuvvetidir.

Sürtünmeye karşı is yapılar ve sürtünme bir enerji yutulması olayıdır. Pürüzlerin etkileşiminde enerji yutan unsurlar;

- 1) Plastik deformasyonlar
- 2) Elastik deformasyonlar
- 3) Kopmalar, çatlamlar, yırtılmalar ve bu yolla yeni yüzeylerin oluşmasıdır.

Sürtünmenin mekanizmasını oluşturan, adezyon ve deformasyon kuvvetleridir. O halde; sürtünme kuvveti

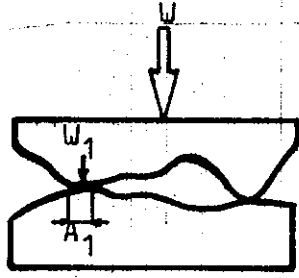
$$F = F_{\text{adezyon}} + F_{\text{deformasyon}}$$

dur ve sürtünme katsayısı

$$\mu = \mu_{\text{adezyon}} + \mu_{\text{deformasyon}}$$

dur.

Basit adezyon teorisinde sürtünme direncinin deformasyon bileşeni ihmal edilir. Yüzeyler birbirine pürüzleri üzerinde oturur ve oturma yüzeyi yük ile orantılıdır. Yük arttıkça oturma yüzeyide artar. Hareket henüz başladığında $\mu_{\text{def.}} = 0$ olabilir.



Bir tek pürüz için;

$$A_1 = \frac{W_1}{H} \text{ yazılabilir.}$$

H : Malzemenin sertliği

$$H = 3\sigma_{AK} \text{ dir.}$$

Şekil 19: Değme bölgesi

n tane değme alanı noktası varsa bunların taşıdığı toplam yük;

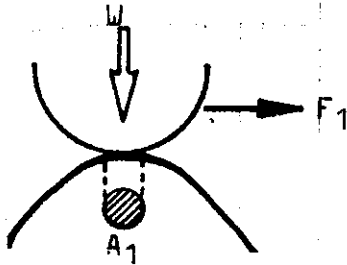
$$W = \sum_{i=1}^n W_i$$

toplam kuvvet ;

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \text{ ve}$$

toplam oturma alanı;

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \text{ dir.}$$



Şekil 20: Bir tek köprücük modeli

Şekil 20'de gösterildiği gibi bir tek köprücük göz önüne alınır. Bu köprücüğe yatay yönde bir F kuvveti uygulanır. köprücüğün kritik kayma gerilmesidir. F_1 köprücüğü kesen kuvvettir ve buradan;

$$F_1 = A_1 \cdot \tau \text{ yazılabilir.}$$

$$A_1 = \frac{W_1}{H} = \frac{F_1}{\tau} \quad \text{dur ve buradan da}$$

$$\frac{F_1}{W_1} = \frac{\tau}{H} \quad \text{yazılabilir.}$$

τ ve H bir bakıma malzeme özelliğidir. Bilindiği gibi, sürtünme katsayısı, kuvvetin yüke oranıdır. Yukarıda gösterilen durum bir tek pürüz için doğrudur. n adet pürüz varsa

$$F = n \cdot F_1$$

$$W = n \cdot W_1 \quad \text{yazılabilir.}$$

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{F_1}{W_1} = \frac{\tau}{H} \quad \text{olur.}$$

Buradan da, sürtünme, malzemenin kritik kesme gerilmesinin sertliğine oranıdır denilebilir.

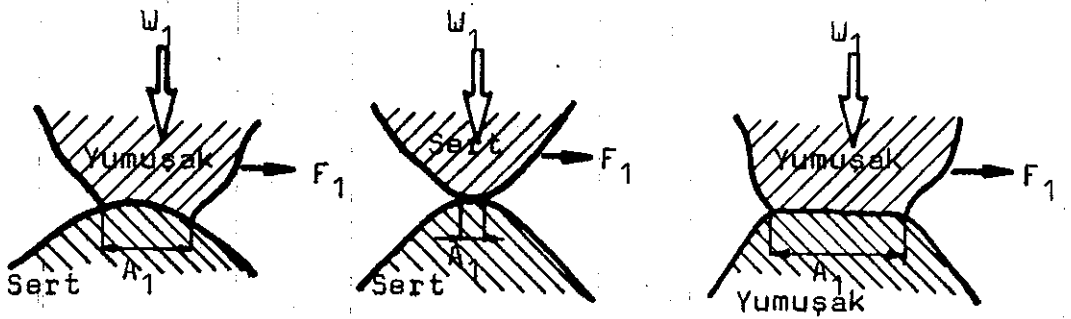
Tam plastik deformasyon başlangıcında $H = 3 \sigma_{AK}$ dir. Elastiziteden $\tau = 1/2 \sigma_{AK}$ olduğu bilinmektedir.

Plastik deformasyon olabilmesi için malzeme yüzeyine gelen ortalama basınç;

$$P_m = 3 \sigma_{AK} \quad \text{olmalıdır.}$$

Bu değerler $\mu = \tau/H$ denkleminde yerine yazılırsa

$$\mu = \frac{1/2 \sigma_{AK}}{3 \sigma_{AK}} = \frac{1}{6} \approx 0.17 \quad \text{bulunur.}$$

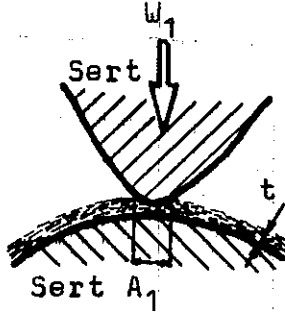


Şekil 21: Çeşitli malzeme eşleşmeleri

Sonuç olarak; bu teoriye göre şekil 21'de gösterildiği gibi çeşitli malzeme eşleşmeleri için sürtünme katsayısı tektir.

$\mu = \tau/H$ tır ve $\mu \approx 0.17$ dir. Daha önce sürtünme katsayısı olarak bu değer kullanılıyordu. Ancak bu yalnızca basit adezyon teorisinden çıkmış bir sonuçtur. /2/

Olaya bir başka açıdan bakılacak olursa; sert-sert malzeme çiftinde bir yüzey filmi ve bu filmin kayma direnci düşünülür. Bilindiği gibi yüzey filmi- nin kayma direnci düşüktür. Çeşitli malzeme eşleşmeleri için $F = A_1 \cdot \tau$ basit adezyon teorisi geçerli olsun.



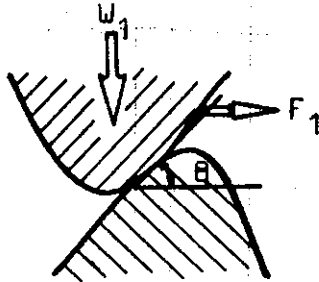
Şekil 22: Yüzey filmi olan sert-sert malzeme çifti

Sert-sert eslesmesinde A_1 düşük τ büyük, yumuşak-yumuşak eşleşmesinde A_1 büyük τ düşük olabilir. Bu eşleşmelerin her ikisinde de F aynı olabilir. τ sabit olduğundan μ 'de sabit olabilmektedir.

Yüzey filmi söz konusu olunca, F_1 küçüldüğünden μ nünde buna bağlı olarak küçülmesi gerekir sonucu çıkar.

Görüldüğü gibi; basit adezyon teorisi her yerde uygulanamaz. Aksi halde sürtünmeyi azaltamaz veya arttırmazdık. Yüzey filmi ile sürtünme değiştirilebilmektedir.

Daha önce pürüzlerin üst üste oturduğu düşünülmüştü ancak pürüzler yamaçları boyunca da oturabilmektedirler.



Şekil 23: Genel pürüz etkileşimi

Daha önce sürtünme yasalarında sürtünme kuvveti F 'nin oturma alanından bağımsız olduğu belirtilmişti. Ancak, Şekil 23'teki pürüzde oturma yüzeyinin etkisi olabileceği görülmektedir ve F 'nin oturma alanını büyütme yönünde katkısı olmalıdır.

Hareket başladığında deformasyon ve kazıma bileşenleri ortaya çıkacaktır.

Daha önce $A_1 = W_1/H$ iken

burada:

$$A_i^2 = \left(\frac{W_i}{H}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F_i}{\tau}\right)^2$$

olmakta ve $\alpha (F_i/\tau)^2$ ifadesi ile deformasyon etkisi göz önüne alınmaktadır. Burada α bir katsayıdır. Bu sonuç sürtünme katsayısını arttırıcı yöndedir.

Basit adezyon teorisi yüzey filmlerini göz önüne almamış, oksit tabakası, kir, yağ, pas gibi maddeler adezyon kuvvetini azaltır demiştir. Basit adezyon teorisinin göz önüne aldığı değeri malzemenin kritik kesme gerilmesidir. Aslında yüzeydeki yağ filminin etkisi de göz önüne alındığında yüzeyin gerçek kesme gerilmesi τ_g olur.

$$\tau_g < \tau \text{ dur.}$$

Bu durumda bir C katsayısı tanımlanabilir.

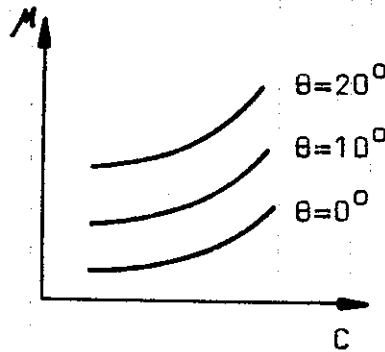
$$C = \tau_g/\tau \text{ ve } 0 < C < 1 \text{ olabilir.}$$

Deformasyon ve yüzey filmi birlikte düşünülerek sürtünme katsayısı;

$$\mu = \frac{C}{[\alpha(1-C^2)]^{1/2}}$$

olarak elde edilir.

Sonuç olarak yukarıdaki bağıntı basit adezyon teorisinin bazı zayıf taraflarını düzeltmiştir.



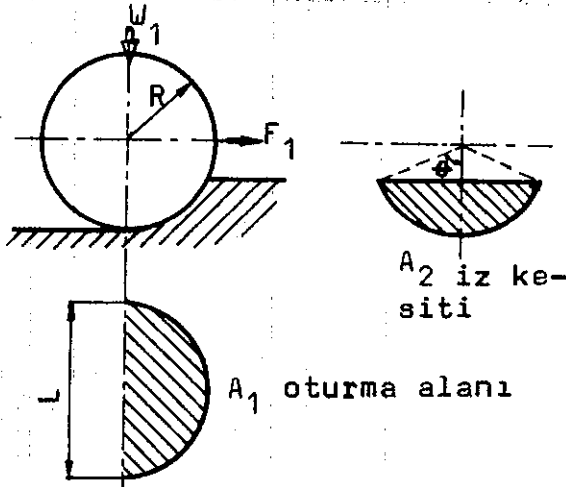
Şekil 24: μ 'nin θ ve C ye bağlı değişimi

$C=1$ 'e yakın değerlerde çalışıldığında μ çok büyür. Bu ancak yüksek vakum şartlarında olur. İki yüzey arasında grafit varsa $\mu=0.001$ 'e iner. Ayrıca θ 'nin etkisi olduğu unutulmamalıdır. θ 'nin artması ile μ lineer olarak artmaktadır. Yukarıdaki işlemler yüzey filmlerinin olduğu durumları hesaba katan iyileştirmelerdir.

Eğer pürüzler yamaçları boyunca oturuyorsa yada sert bir parçacık bir tepeye takılıp daha yumuşak olan pürüzleri kazıyorsa sürtünmenin kazıma bileşeni ortaya çıkar. Bu durum basit modeller düşünülerek incelenir.

Bu pürüz modelleri, küresel, konik ve silindirik seçilir. Burada önemli olan μ deformasyon bileşeninin büyüyen yerini μ kazıma ya bırakmasıdır.

Küre modeli:



Şekil 25: Küre modeli

$$\mu_{\text{kazıma}} = \frac{4R^2}{\pi L^2} (2\theta - \sin 2\theta) = f(L, \theta)$$

$$F_1 = P_{AK} \cdot A_2$$

$$W_1 = P_{AK} \cdot A_1 \quad \text{yazılabilir.}$$

W_1 yükünü A_1 oturma alanı taşımaktadır.

P_{AK} : Yumuşak malzemenin akma-basıncıdır.

$$\mu = \frac{F_1}{W_1} = \frac{A_2}{A_1} \quad \text{olur.}$$

$$A_1 = \pi L^2 / 8$$

$$A_2 = 1/2 [R^2 (2\theta - \sin 2\theta)]$$

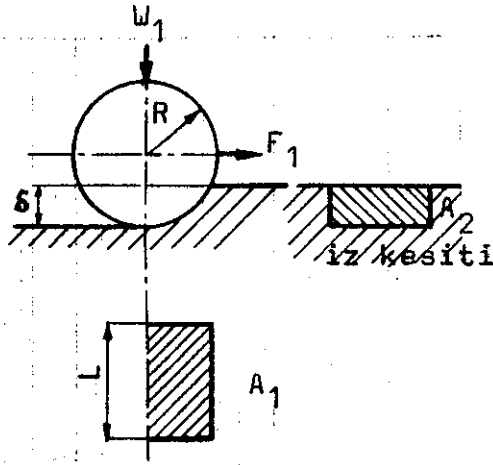
$L=R$ ve $\theta=30^\circ$ için $\mu_k=0.23$ olur. Ancak bu pratikteki değerlerden çok büyüktür. Demekki eksiklikleri vardır.

Aykırı ve dik silindir modeli:

L : Silindir boyu

A_2 : İz kesiti

A_1 : Oturma alanı

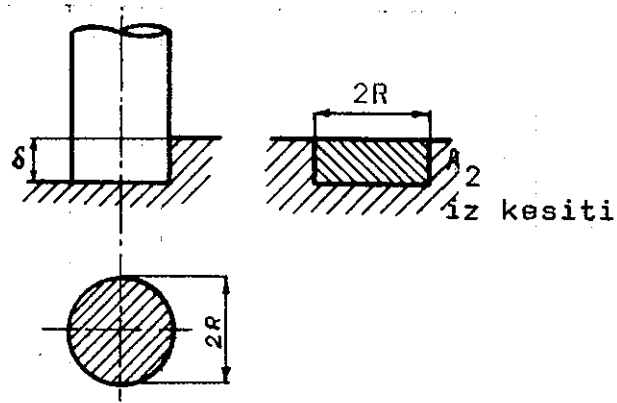


Şekil 26: Aykırı silindir

$$A_2 = L \cdot \delta$$

$$A_1 = L \cdot \sqrt{(2R - \delta) \cdot \delta}$$

$$\mu_k = \frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{1}{2\left(\frac{R}{\delta} - 1\right) - 1}}$$



Şekil 27: Dik silindir

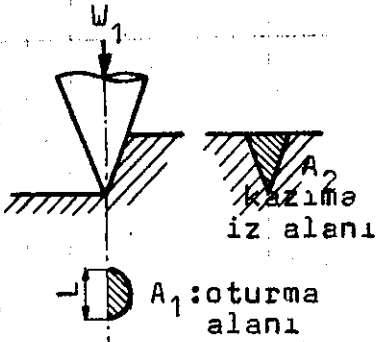
$$A_2 = 2R \cdot \delta$$

$$A_1 = \pi R^2$$

$$k = \frac{2\delta}{\pi R}$$

Burada dik silindir daha küçük değerler verir.

Koni modeli:



$$A_1 = \frac{1}{8} \pi L^2$$

$$A_2 = \frac{1}{4} L^2 \cot \theta$$

$$\mu_k = \frac{A_2}{A_1} = \frac{2}{\pi} \cot \theta$$

$\theta = 60^\circ$ için $\mu_k = 0.32$ bulunur. Ancak deneylerde bu kadar büyük çıkmamaktadır.

Şekil 28: Koni modeli

3.6 Metal olmayan malzemelerin sürtünmesi

Metal olmayan malzemelerle, metaller arasındaki farklı sürtünme özellikleri en basit şekilde metal yüzeylerinin etkisinden doğar. Metal yüzeyi, havadaki su buharı ve oksijen ile kolayca reaksiyona girer, gres filmi ve gazların neden olduğu yüksek bir adsorbsiyon tabakası olduğundan güçlü bir yüzey enerjisine sahiptir. Buna bağlı olarak, metallerdeki sürtünme özellikleri çok geniş dağılım gösterir. Sürtünme özelliği tam ve kesin olarak yüzeyin temizliğine bağlıdır.

Metal olmayan malzemelerde yüzey tabakası önemsizdir. Bu malzemelerin (elmas, plastik, deri, naylon, grafit, ağaç ve buz) sürtünme özellikleri önemli farklılıklar gösterir.

Metal olmayan malzemeler yağlamasız koşullarda kaydıklarında dinamik sürtünme katsayısı (hız oranı 1 cm/s) değişimi 0.4 ± 0.3 , statik sürtünme katsayısı değişimi (değme zamanı 1 ± 100 s) 0.6 ± 0.4 tür. Yüzey hasarı ve aşınma ılımlıdır. Metal olmayan malzemeler genellikle düşük sürtünme katsayılarına sahiptir.

Metal olmayan malzemeler diğer malzemeler üzerinde kaydığı zaman (Metal veya A Metal) yumuşak malzemenin neden olduğu sürtünme özellikleri bulunur. Çünkü sert malzeme yüzeyi yumuşak malzemedan kopan parçacıklar ile kaplanır ve iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kayıyormuş gibi davranış gösterir. Bu malzemeler kayma sürtünmesi kanunlarına genellikle uygun davranış gösterirler. Bununla beraber yapıları nedeniyle ve mekanik özelliklerine bağlı olarak davranışları farklılık gösteren istisnalar vardır.

Bu malzemeler, plastikler, gevrek katılar ve elastik cisimler olarak üç grupta toplanmıştır.

3.6.1 Plastiklerin sürtünmesi

Poliyeten, Flexiglas, Naylon, PTFE gibi polimerik malzemeler çok uzun molekül zincirlerinden oluşmuştur. Benzer malzeme yüzeyleri birbiri üzerinde kaydığı zaman bulunan sürtünme katsayısı Tablo II'de verilmiştir.

Tablo II'de görüldüğü gibi Teflon dışındaki malzemelerin sürtünme katsayıları benzerdir. Kayma sırasında koparma, adezyon bir yüzeyden diğerine plastik transferi gözlenir. Metal ile kaymada yalnızca metale plastik transferi değil, aynı zamanda plastiğe sınırlı bir metal transferi vardır. Çok sert bir malzemenin aşınması yumuşak plastiğe göre çok azdır.

İlk yaklaşımda gerçek değme alanı A, yükle orantılı olarak belirlenmiştir. Sürtünme kuvveti, $F = A \cdot \tau$ şeklinde yazılabilir. Burada τ plastiğin makaslama kuvvetidir (bak Tablo III). Sonuç

Polimer	Kullanılan isim	Kimyasal formül	Sürtünme katsayısı
Polivinil- klorür	PVC	$(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$	0.4 ÷ 0.5
Polistirol	Polistirol	$(-\text{CH}_2-\overset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-)_n$	0.4 ÷ 0.5
Polimetil- metakrilat	Flexiglas	$(-\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_3)_n$	0.4 ÷ 0.5
Naylon		$(\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-)_n$	0.3
Poli-etilen	Poli-etilen	$(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$	0.6 ÷ 0.8
Politetra- flöretilen	PTFE (Teflon)	$(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$	0.05 ÷ 0.1

TABLO II

olarak plastiklerin sürtünme mekanizması metallereinkine benzerdir ve sürtünme katsayısı; $\mu = \tau / P_{AK}$ oranına yaklaşık eşit olabilir. P_{AK} malzemenin akma basıncıdır.

Bu genel mekanizma sıcaklığın etkisinde değişik parametrelerde denenmiştir. P_{AK} ve τ 'nin ölçümü -100°C ile $+80^\circ\text{C}$ 'de yapılmıştır. τ / P_{AK} değerleri, sürtünme katsayısının gözlenen değerleri ile sıcaklığın fonksiyonunda karşılaştırılmıştır.

Polimer	Akma basıncı P_{AK} (N/mm ²)	Kesme kuvveti (N/mm ²)	Sürtünmeden hesaplanan τ
PVC	150	50	7
Polistirol	20	4	8
Flexiglas	20	6	10
Naylon	10	6	5
Poli-etilen	2	1.4	1
PTFE(Teflon)	2	2	0.4

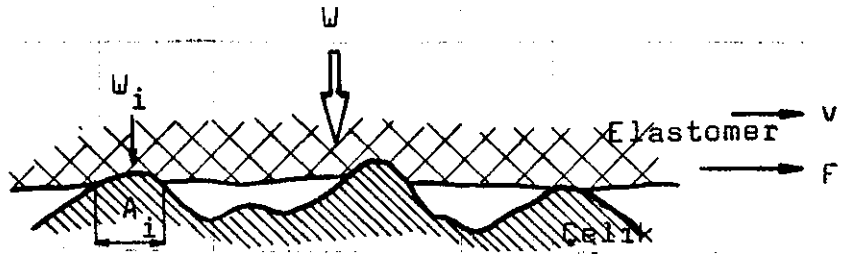
TABLO III

μ sürtünme katsayısı yüksek vakum şartlarında ölçülmüş ve τ/P_{AK} ile μ arasında ılımlı bir değer bulunmuştur. Sıcaklığın etkisi ile τ/P_{AK} oranları değişmiştir.

Metaller ile plastik malzemelerin sürtünme davranışları arasındaki büyük fark yükün etkisi ile ortaya çıkar. Metallerde değme bölgelerindeki deformasyonlar plastiktir ve gerçek değme alanı yükü doğru orantılıdır. Uzun zincirli polimerlerde durum böyle değildir. Bu malzemeler visko-elastiktir ve deformasyonları yüzeyin geometrisine, yükleme zamanı ve yüke bağlıdır. Genelde değme alanı $A \propto W^n$ dir ve burada $n \ll 1$ dir. Sonuç olarak yükün azalması ile sürtünme katsayısı artar. Düşük yüklerde bu etki önemlidir ve özellikle polimerik fibrelere bellidir.

PTFE'nin sürtünme davranışı çok iyidir. Bu moleküller polietilene benzer yalnız burada H atomlarının yerine F atomları geçmiştir. F atomları negatif yüklü, C atomları kafesi pozitif yüklüdür. Moleküllerin birbirine etkisi çok azdır ve sürtünme deneylerinde yüzeyler arasındaki adezyon dikkate değer derecede azalır (bak Tablo III). Bu durum malzemenin bir karakteristiği olmaktadır. Yüksek vakum şartlarında yabancı yüzey filmi uzaklaştırıldığında bile sürtünme katsayısı μ , 0.04 gibi düşük bir değerde kalır.

3.6.2 Elastomerlerin sürtünmesi



Şekil 29: Pürüz tepeciği karşısına gelen elastomerin davranışı

Elastomerde pürüz tepeciğine karşılık gelen kısım çöker. Buradaki deformasyon elastiktir ve yük kalktığı zaman da deformasyon kalkar.

Taşınan yük;

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i \quad \text{dir.}$$

Bütün tepecikler için ortalama bir P_m varsa ve A toplam değ-me alanı ise ,

$$W = A \cdot P_m \text{ olur.}$$

Uygulanan F kuvveti elastomeri harekete geçirmemişse yani $v=0$ iken statik sürtünme olur, $F = \sum_{i=1}^n F_i$ dir. $v \neq 0$ iken yani elastomer harekete geçtiği zaman sürtünme direncinin iki bileşeni vardır. Bunlardan biri adezyon (μ_A), diğeri de histerizis (μ_H) bileşenidir. Buradaki histerizis bileşeni deformasyon bileşenine (μ_D) özdeştir ($\mu_D \equiv \mu_H$).

0 halde sürtünme direnç kuvveti:

$$F = F_A + F_H$$

$$\mu = \mu_A + \mu_H \text{ olur.}$$



Şekil 30: μ_A , adezyon bileşeni Şekil 31: μ_H , histerizis bileşeni.

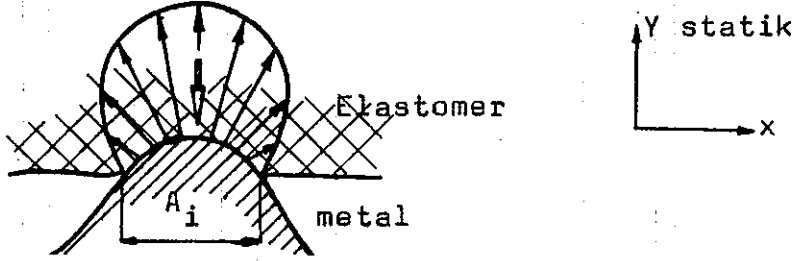
Adezyon terimi: Elastomerlerin büyük molekülleri bir takım serbest zincirler oluştururlar. Hareket sırasında yanı kayarken, yapıyı oluşturan zincirler katı cismin zincirlerine yapışarak tutma olur. Bu şekilde, önce bir zorlanma, kopma rahatlaması sonra tekrar takılma olur. Hareket böylece süre gider.

Burada, $F_A = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \tau_i$ dir.

Ortalama bir kabul edilirse ve A toplam alan ise,

$$\mu_A = \frac{F_A}{W} = \frac{A \cdot \tau}{W} \text{ ve buradanda}$$

$$\mu_A = \frac{\tau}{P} \text{ yazılabilir.}$$

Histerisiz terimi:

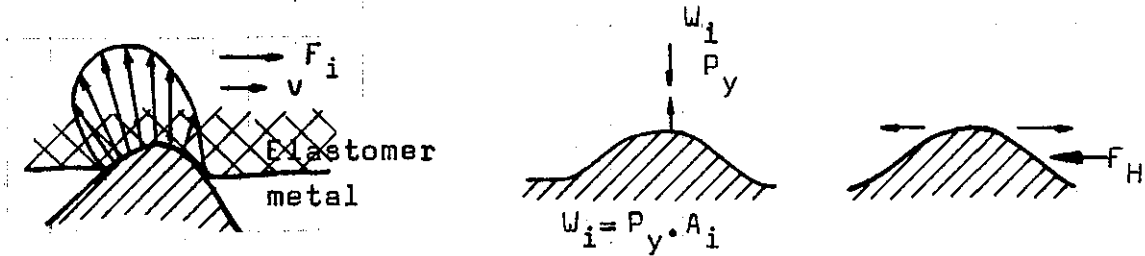
Şekil 32: Hareket yokken pürüz üzerindeki basınç dağılımı

Hareket yokken ($v=0$) pürüz tepesinde simetrik basınç dağılımı vardır. Dolayısı ile;

$$\sum P_y \neq 0 \text{ ve } \sum P_x = 0 \text{ olur.}$$

$v=0$ iken histerisiz etkisi yoktur. $W = \sum P_y \cdot A_i$ dir. Basınç dağılımı simetrik olduğundan $\sum P_x = 0$ dir.

Eğer hareket varsa ($v \neq 0$) hareketin ters yönünde $\sum P_x = F_H$ gibi bir kuvvet meydana gelmektedir.



Şekil 33: Pürüz yüzeyinde asimetric basınç dağılımı

Şekil 34: $v=0$ ve $v \neq 0$ iken pürüz üzerindeki basınç değişimi

Burada F_H sürtünme direncinin histerisiz terimi olup hareketi (kaymayı) engelleme yönündedir. F_H , basıncın x yönündeki bileşenlerinin alan ile çarpımıdır.

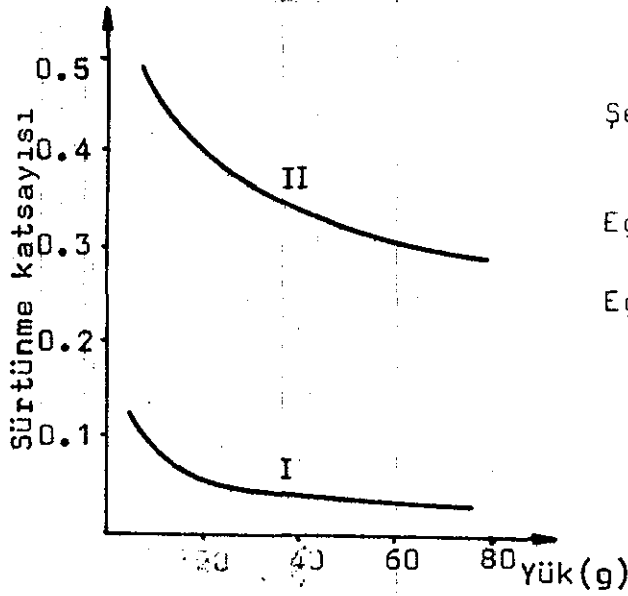
$$F_H = \sum P_x \cdot A_i \text{ dir.}$$

Histerisiz terimi enerji yutmazdır (yutulmuş enerjiyi gösterir.)/2/

3.6.3 Gevrek katıların sürtünmesi

Metallerin sürtünme davranışlarında değme bölgelerinde tam plastik deformasyonların hakim olduğunu görmüştük. Polimerler için deformasyon kısmen plastiktir. Sürtünmeyi belirleyen kanun $F=k.W^n$ dir. Kayatuzu gibi kristallerde kayma sırasında deformasyon tamamen plastiktir. Fakat yüksek basınç kalktığı zaman hemen gevrek moda dönülür. Bazı malzemelerde sürtünme, değme bölgelerindeki elastik deformasyonlarla belirlenmiştir. Burada A değme alanı W yükü ile doğru orantılı değildir ve Amontons'un kanundan sapma gözlenmiştir.

Elmasta gözlenen davranışta böyledir. Elmas, çok sert bir malzemedir ve değme bölgesindeki deformasyonlar elastiktir. (Şekil 35)



Şekil 35:Yük etkisinde elmasın sürtünme davranışı.

Eğri 1 :Yük azaldığında artar.

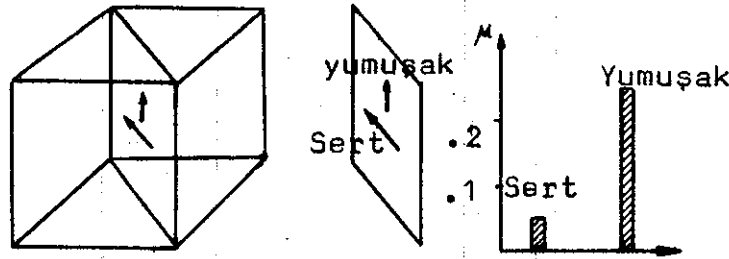
Eğri 2 :Yüzey temizlendiği zaman sürtünme katsayısı yüksek değerlere çıkar.

Şekil 35'te I eğrisi havada yük altında elmasın sürtünme davranışını gösterir. Yük azaldıkça μ artar ve μ yaklaşık olarak $W^{2/3}$ ile orantılıdır. Görünüşte deformasyon elastiktir. Elmas yüzeyi vakum altında yüzeyindeki oksijen ve diğer gazlardan arıtılarak incelendiğinde sürtünmenin metallerdeki gibi çok arttığı görülmüştür. Sürtünme katsayısı $\mu = 0.5$ gibi yüksek değerlere çıkmıştır. Yüzey filmi olduğu zaman μ 0.05 ile 0.1 arasında belirlenmiştir. Bununla beraber sürtün-

me katsayısında aşırı bir değişme olmamıştır. Bunun nedeni malzemenin metallere gibi şekil verilebilir olmaması ve yapışma bölgelerinin küçük olmasıdır.

Elastik deformasyonlar varsayılarak gerçek değme alanı hesaplandığında değme noktalarındaki kesme kuvveti, temiz elmas yüzeyleri birbirini üzerinde kayarken aşırı derecede yüksektir ve elmasın dayanımı ile karşılaştırılır.

Elmastaki deformasyonlar çoğunlukla elastiktir. Son incelemelerde parlatma sırasında elmas yüzeyinde bazı plastik deformasyonlar olduğu belirlenmiştir. Mikroskop yardımıyla parlatma izlerine başka açıdan bakıldığında mat çizgiler görünür. Parlatma tozları değme noktalarında kuvvetli basınç yaptığında elmas üzerinde plastik deformasyonlar oluşmuştur. Bunda yönün etkisi vardır. Şekil 36'da gösterilen elmas kristalinde, farklı yönlerde kayma hareketlerine bağlı olarak bazı sonuçlar gözlenmiştir. Eğer kristal eksenine paralel yönde kayma olursa $\mu = 0.05$ gibi düşük bir değer olarak bulundu.



Şekil 36: Elmasın sürtünmesinde yönün etkisi. Sürtünme yumuşak yönlerde yüksektir.

Safir veya garnet (lal taşı) gibi mücevherlerin sürtünme katsayıları düşüktür. Örneğin safir-safir çiftinde $\mu = 0.2$ iken Safir Çelik çiftinde $\mu = 0.15$ tir. Bunun nedeni koruyucu yüzey filmidir. Vakum şartlarında safir yüzeyinde $\mu \geq 0.6$ değerine kadar çıkabilir.

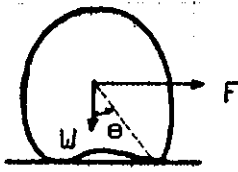
Volfram karbür ve titanyum karbür çok sert malzemeler olarak kesme takımlarında kullanılırlar. Bu malzemeler kobalt gibi bağlayıcı malzeme ile sinterlenerek hazırlanırlar. Uygun koşullarda yüzeylerdeki sürtünme katsayısı $\mu = 0.2$ dir. Kobalt parçacıklarının sert karbür parçacıkları üzerine sı-

vanması ile kobalt yağlama görevini yapmış olabilir. Düşük kayma hızlarında titanyum ve vofram karbür benzer davranış gösterirler. Çok yüksek hızlarda işleme yapıldığında davranış çok farklıdır. Çünkü volfram karbür yüksek sıcaklıktaki demirde çabuk çözülür, fakat titanyum karbür çözünmez. Eğer sürtünme sıcaklığı 1300°C 'yi geçerse vofram karbür çalışma sırasında çözünecek ve takım çabuk aşınacaktır. Yüksek hızlarda çalışıldığında titanyum karbür kullanılarak aşınma azaltılır./5/

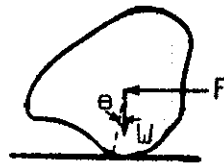
4- YUVARLANMA SÜRTÜNMESİ

Bir cisim diğ erinin yüzeyine değerek yuvarlandığında harekete karşı gösterdiği direnç yuvarlanma sürtünmesidir. Başlangıçta iki ayrı durum olabilir. Birincisi; yuvarlanan cisimler yüzeyden kopan parçacıklar, tozlar vs. gibi maddelerdir. İkincisi; pürüzsüz bir yüzeye ve kusursuz bir geometriye sahip olan yerlerdir.

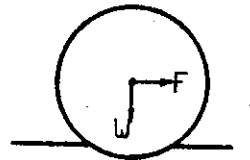
İlk durumda yuvarlanma başlangıcındaki kuvvet $F=W \cdot \text{tg} \theta$ dir. θ , yuvarlanma düzlemi ile cismin ağırlık merkezinin dikeyleri arasındaki açıdır. Yuvarlanma sürtünmesi katsayısı $\mu = F/W$ olarak belirlenebilir. Şekilsiz cisimler için $\mu = \text{tg} \theta$ dir./4/



Şekil 37: Yuvarlanma başlangıcındaki kuvvet.



Şekil 38: Yuvarlanma sırasında gerekli kuvvet.



Şekil 39: Deformasyon ve temasta yuvarlanma başlangıcında gerekli kuvvet.

(Eğer, cisim ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı $\text{tg} \theta$ 'dan daha küçük değerde ise yuvarlanmadan çok kayma olur.)

Yuvarlanma devamınca θ açısı sık sık değişerek Negatif değerler alır (Şekil 38). Bunun üstünlüğü, yuvarlanma sırasında gereken kuvvetin yuvarlanma başlangıcındaki kuvvetten çok daha

az olmasıdır. Bundan sonra çok düşük bir yuvarlanma sürtünmesi katsayısı ile yuvarlanmaya başlamış olacaktır.

Yuvarlanma sürtünmesi, pürüzsüz yüzeyler ve kusursuz bir geometriye sahip elemanlarda çok düşüktür. Yuvarlanma sürtünmesi sertliğe çok az bağlıdır. Sürtünme katsayısı, 5×10^{-3} + 1×10^{-5} arasındadır. Bu direnç bir faktöre değil bir çok faktörün kombinasyonuna bağlıdır. Bazı durumlar için önemli olan faktör diğer durumlar için önemsiz olabilir.

İki cisim bir noktada temas halinde bulunuyorsa bu cisimler arasında kusursuz bir yuvarlanma göz önünde tutulur. Pratikte değme bölgesinde elastik deformasyonlar ve plastik deformasyonlar olur. Değme alanları biraz geniştir ve değme noktalarının oturma düzlemleri farklıdır (Şekil 39). Sonuçta bu yüzeyde kusursuz bir yuvarlanma olmaz. Yuvarlanmayı sağlamak için artan yuvarlanma sürtünmesine göre kuvvet gerekir. Yuvarlanma sürtünmesi katsayısı 10^{-4} veya daha az olduğu söylenirse de kayma nedeni ile bu değer 10^{-3} veya daha yukarıdır. Değme alanı üzerinde eğimler oluşursa bu değerler 10^{-3} ün de üzerine çıkar.

Yuvarlanma direncinin büyük bir bölümünde kayma da oluşmaktadır. Toplam yuvarlanma sürtünmesi katsayısı μ_r de kayma elemanı göz önüne alınarak $\mu_{rs} = \mu \cdot v_s / v_r$ eşitliği yazılabilir.

Burada;

v_s - Kayma hızı

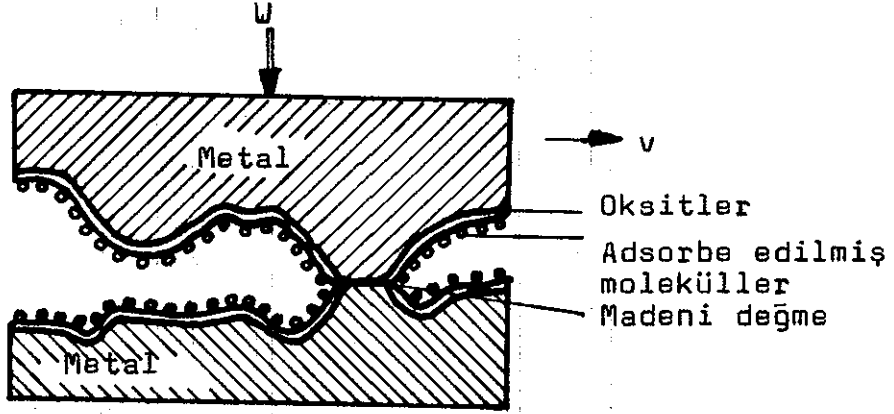
v_r - Yuvarlanma hızı

μ_{rs} - Kayma sürtünmesinin sürtünme katsayısı

Elastik deformasyonların hızın değişimine etkisi hesaplanarak hız farklılığının kayma ile başladığı gösterilmiştir.

Bazı yuvarlanma sistemlerinde (örneğin, rulmanlı yataklar, dişli çarklar) temas yüzeylerindeki kayma yüzey geometrisine ve başka faktörlere bağlıdır ve buradan gerçek sürtünme katsayısı çıkar. Örneğin, dişli çarklarda kavrama özelliği, rulmanlarda koriolis kuvvetleri gibi etkenler kaymayı oluşturur.

çelik yüzeyleri iyi bir şekilde ıslatmayan yağ, kalay yüzeylerinde çok iyi sonuçlar verebilir.



Şekil 40: Metal yüzeylerinde oluşan adsorbsiyon ve oksit tabakaları.

Yüzeyler üzerinde bir yağ tabakasının oluşturulmasında da, kuru sürtünmedeki doğal tabakanın oluşumunda olduğu gibi aynı olay rol oynamaktadır. Buna karşılık bu iki olay arasında nicelik olarak fark vardır. Doğal tabaka esas olarak oksit tabakasından oluştuğundan çok az miktarda yağ molekülü içerir. Bu nedenle yüzeylerde yağ molekülleri ancak tesadüfen bulunabilir. Sınır sürtünmesinde esas olarak yağ tabakası söz konusu olduğundan yağlama görevi yapmak üzere yüzeyler arasında yağ konulur. Yağ tabakasının doğal tabakaya göre kopma mukavemeti çok daha büyüktür ve bunun sonucu olarak doğrudan doğruya madensel temasta olan yüzeyler daha azalır. Yapışmış yağ tabakasının kopma mukavemeti σ_k ve kayma mukavemeti τ_k ile tanımlanırsa,

$$\frac{\tau_k}{\sigma_k} \text{ olarak bulunur.}$$

Burada önemli olan yağ tabakasının kopma ve kayma mukavemetleridir. Adi yağların oluşturduğu yağ tabakasının kopma mukavemetini arttırmak için yağlara katkı denilen bir takım maddeler konulur.

Pratikte kuru sürtünmede olduğu gibi sınır sürtünme bölgesinde çalışan sistemlerin sürtünme katsayıları deneylerle belirlenir.

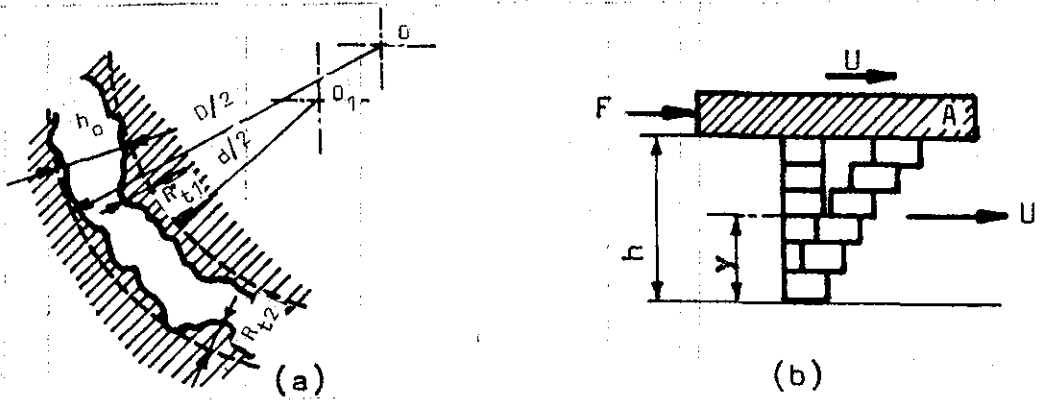
6-SIVI SÜRTÜNME

Sıvı sürtünmesinde madeni yüzeyler arasında bulunan yağ tabakasındaki basınç dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığında yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmış olur (Şekil 41-a). Yüzey pürüzlülüğü göz önüne alınırsa, geometrik bakımdan sıvı sürtünmesi:

$$h_0 > Rt_1 + Rt_2$$

bağıntısı ile elde edilebilir. Burada Rt_1 ve Rt_2 her iki yüzeyin maximum pürüzlülüğüdür.

Madensel yüzeylerle doğrudan doğruya temasta olan yağ tabakalarının adsorbsiyon yoluyla her iki yüzeye tamamen yapışmış olduğu görülür; şöyleki U hızı ile hareket eden yüzeye (Şekil 41-b) yapışmış olan tabakanın hızı u ; sabit yüzey üzerindeki tabakanın hızı ise sıfırdır. Ara tabakaların hızı y uzaklığına bağlı olarak u ile sıfır arasında değişir. Böylece sıvı sürtünmesi halinde sürtünme esas olarak birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşmakta ve bu taba-



Şekil 41

kalar arasındaki kayma gerilmelerine bağlı olmaktadır. Viskoz bir akışkanda meydana gelen kayma gerilmeleri Newton varsayımına göre

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

şeklinde belirtilebilir. Burada yağın viskozitesi, du/dy y uzaklığına göre hız değişimi veya kayma oranıdır. Kayma gerilmelerine bağlı olan sürtünme kuvveti

$$F_s = \eta \frac{du}{dy} \cdot A$$

olarak yazılır. Burada A hareketli madensel yüzey ile yağ tabakası arasındaki değme alanıdır. Böylece kuru ve sıvı sürtünmesi hallerinde olduğu gibi burada da sürtünme katsayısı

$$\mu = \frac{F_s}{F}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Sıvı sürtünmesi oluşmasında rol oynayan esas etken yağ tabakasında oluşan basınçtır. Basınç oluşumu hidrostatik ve hidro dinamik olmak üzere iki olaya bağlıdır.

II- AŞINMA

1- GENEL TANIM VE SINIFLANDIRMA

Aşınma;iki yüzey arasındaki hareket ve sürtünmeden dolayı meydana gelen malzeme kaybıdır.

Aşınma olduğu zaman yüzeyler ilk şekillerini kaybederler,parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal olarak yerine getirilemez.

Aşınma karakteri değme şekline göre;

- Noktasal
- Çizgesel
- Alansal

Hareket tipine göre;

- Yuvarlanma
- Kayma
- Kayma-yuvarlanma

Yağlama durumuna göre;

- Hidrodinamik
- Hidrostatik
- Elastohidrodinamik
- Sınır veya kuru

ve bunların uygulama şekillerine bağlıdır.

Aşınma durumları;ılımlı ve aşırı aşınma olarak kabaca sınıflandırılır.

1.1 İlimli aşınma

İlimli aşınma düşük yüklerde söz konusudur.Bu tür aşınmanın olduğu yerde yüzey filmi ve oksit tabakası vardır.Aşınma ürünü tozlar son derece ince ve oksit tozlarıdır.Aşınma sonucu ortaya çıkan yüzey son derece düzgün ve parlatılmış gibidir.

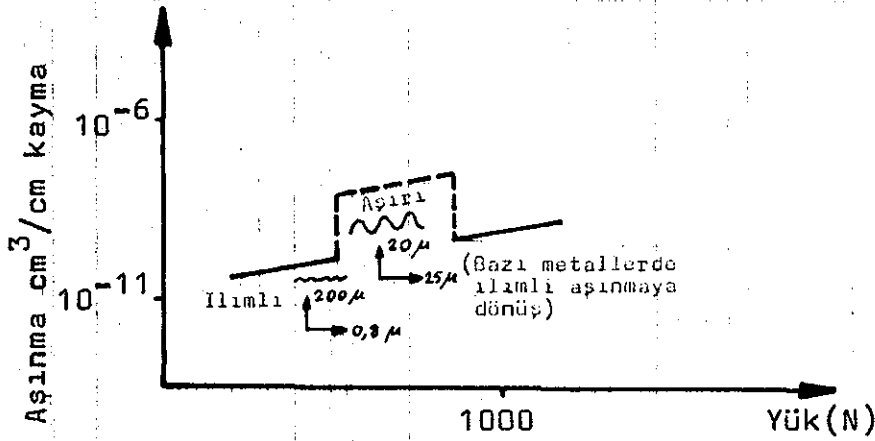
1.2 Aşırı aşınma

Aşınmış yüzey son derece pürüzlüdür,aşınma ürünü tozlar ilimli aşınmaya göre daha kalındır.İlimli aşınmadan aşırı aşınmaya geçebilmek için yükün yarattığı ortalama basıncın

yumuşak malzemenin sertliğinin üçte birini geçmesi gerekir.

$$p_m \geq \frac{H_{\text{yumuşak}}}{3}$$

Aşırı aşınmadan tekrar ılımlı aşınmaya geçilebilmektedir. Bu durum, sıcaklıkla bazı malzemelerin aşınma dirençlerinin artması şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 42: Çelik üzerinde pirinç

Birim olarak aşınmanın tanımı; "Birim kayma yolu için yüzeyden uzaklaştırılan malzeme hacmi veya kütlesi." dir.

2- AŞINMA MEKANİZMALARI

2.1 Adeziv aşınma

Adezyon ancak temiz yüzeylerin birbirini ile etkileşiminden ortaya çıkar. Malzeme yüzeyinde bulunan yüzey filmi ve oksit tabakası her zaman adezyonu değiştirir. Fakat iki yüzey arasında hareket varsa oksit tabakası ve yüzey filmi yırtılır, metal-metal değmesi olur ve adezyon başlar.

Adezyon aşınma denklemi:

Adezyon yolu ile hacimsel aşınma, iki yüzeyin birbirine oturduğu gerçek oturma alanının büyüklüğü ve kayma yolu ile orantılıdır.

$V \propto A \cdot L$ diyebiliriz.

Burada,

V: Hacimsel aşınma

L: Kayma yolu

A: Oturma alanıdır.

$A = \frac{W}{H}$ olarak biliniyor. O halde, $V \propto \frac{W}{H} \cdot L$ yazılabilir.

$V = k \cdot \frac{W}{H} \cdot L$ bağıntısı adeziv aşınma kanunudur.

Burada k orantı katsayısıdır.

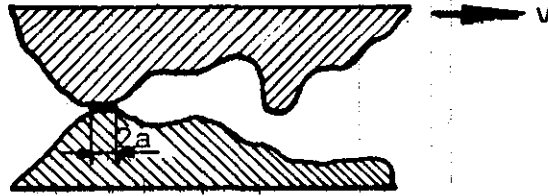
Sonuç olarak:

a) Aşınma hacmi kayma yolu ile orantılıdır. Bu ilişki farklı koşullarda deneysel olarak kanıtlanmıştır.

b) Aşınma hacmi uygulanan yük ile orantılıdır. Bu da belli yük sınırları içinde doğrudur. Bazı malzemelerde yük büyüdüğü halde aşırı aşınmadan ılımlı aşınmaya geri dönüldüğü görülmüştür.

c) Aşınma hacmi yumuşak malzemenin sertliği ile ters orantılıdır. Bu özellik saf metallerde geçerli olmaktadır.

k orantı katsayısının belirlenmesi:



Şekil 43: Köprücük modeli

Şekil 43'teki gibi bir tek köprücük göz önüne alalım. a , köprücüğün yarı çapı ve P_{AK} köprücüğün akma basıncı olsun.

Köprücük tarafından taşınan yük;

$$S_w = P_{AK} \cdot \pi a^2 \text{ olur.}$$

Çapı $2a$ olan köprücüğün kesilmesi için kaymanın en az $2a$ kadar olması gerekir. Kaymadan sonra aşınma ürünü parçacığın düştüğünü düşünelim.

Aşınma ürünü parçacığı $2b$ çapında ve yarım küre şeklinde kabul edersek bu parçacığın hacmi $\frac{2}{3} \pi b^3$ olur.

Birim kayma yolu için hacimsel aşınma

$$\delta V = \frac{2/3 \pi b^3}{2a} \quad \text{olur.}$$

Yüzey 2a kadar kaydığıında 2b kadarlık bir parça kopuyorsa $b < a$ yazabiliriz.

$$\delta V = \frac{2/3 \pi b^3}{2a} \frac{a^3}{a^3}$$

$$\delta V = \frac{\pi a^3 b^3}{3aa^3} = \frac{b^3}{a^3} \frac{\pi a^2}{3}$$

$$\pi a^2 = \frac{\delta W}{P_{AK}} \quad \text{yazılabilir.}$$

$$\delta V = \frac{b^3}{a^3} \frac{\delta W}{3P_{AK}}$$

$$3P_{AK} = H \quad \text{tir.}$$

$$V = \frac{b^3}{a^3} \frac{W}{H} L \quad \text{olur.}$$

0 halde burada $k = \frac{b^3}{a^3}$ tür.

k, parçacık çapının köprücük çapına oranı olmaktadır. Bu k'ya adezyon aşınma katsayısı denir.

$$k = 0.01 \div 0.1 \quad \text{Temiz metallerde}$$

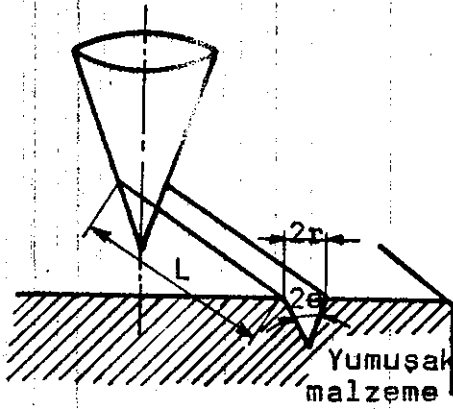
$$k = \div 10^{-7} \quad \text{Yüzey filmi olduğunda}$$

Sonuç olarak; adezyon varsa k vardır ve büyüktür, adezyon yoksa k yoktur veya çok küçüktür.

2.2 Abreziv aşınma

Bu tür aşınma, yumuşak malzemeye sürtülen malzeme yüzeyinin yumuşak malzeme yüzeyini aşındırarak malzeme kopmasıdır. Buna ek olarak; sert pürüzlerin kesme, kazıma etkisi ve esas malzemeden daha sert olan aşınma ürünü tozların yumuşak malzeme yüzeyini aşındırması abreziv aşınma mekanizmasını oluşturur.

Bunu basit bir model üzerinde inceliyelim. Bunun için Şekil 44 de ki gibi bir model göz önüne alınır.



Şekil 44: Pürüz modeli

Kazınan malzeme hacmi; $V = nLr^2 \cot \theta$ dir.

Bu iki denklemden;

$$V = \frac{2 \cot \theta W}{P_{AK}} \cdot L \text{ bulunur.}$$

$P_{AK} = 1/3 H$ yazılabilir.

O zaman;

$$V = \frac{6 \cot \theta}{\pi} \cdot \frac{W}{H} \cdot L \text{ ve buradanda}$$

$$V = K_A \cdot \frac{W}{H} \cdot L \text{ denklemi bulunur. Bu denklem abreziv aşınma}$$

kanunudur. (Ancak eleştirilere açıktır.) K_A ; pürüz geometrisine bağlı bir orantı katsayısıdır. Deneysel olarak, pek çok araştırmacı tarafından bunun doğruluğu belirlenmiştir.

Sert yüzeyin çok temiz işlenmesi sonucunda abreziv aşınma önlenemez. Ancak aşınma ürünü parçacıkların filtrasyonla yüzeyden uzaklaştırılması gerekir. Yüzey üzerinde kanallar açılarak aşınmaya yol açacak tozların burada toplanması ve bu yolla aşınmanın azaltılması sağlanabilir. Abreziv etkiyi gidermek için asıl önemli olan yüzey değiştirme teknikleridir.

2.3 Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, değme bölgelerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Değişken yüklemeler altında malzemede bir yorulma başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyonlara bağlı olarak çok

Burada;

L : Kayma yolu

$Lr^2 \cot \theta$: Süpürülen malzeme hacmi

P_{AK} : Yumuşak malzemenin akma basıncıdır.

Bir tek pürüz tarafından taşınan kuvvet; $\frac{1}{2} \pi r^2 P_{AK}$ 'dır.

n adet pürüz varsa yük;

$$W = \frac{1}{2} n \pi r^2 P_{AK} \text{ olur.}$$

Küçük çatlaklar oluşur. Zamanla bu çatlaklar yüzeyde çukur-
cuklar şeklinde kendini gösterir ve bunlar yüzeyden başla-
yarak yayılırlar. Bu aşınma türü çelik gibi sert malzemeler-
de ortaya çıkmakta yumuşak malzemelerde görülmemektedir. Ab-
raziv veya adeziv aşınma olan yüzeylerde pitting oluşumuna
neden olan koşullar bulunsada bu tür aşınma olmaz.

Bu aşınma tipi özellikle rulmanlı yataklar, dişli çarklar gi-
bi yuvarlanma hareketi yapan makina elemanlarının yüzeyle-
rinde oluşur.

Yüzeyin yağlı olması yorulmayı fazla etkilemez fakat yağ fil-
mi kalınlaştıkça yorulma eğilimi azalır.

2.4 Rulo oluşmu ile oluşan aşınma

Bu aşınma tipi elastomerlerde kendini gösterir. Elastomer düz
bir yüzey üzerinde kaydığı zaman elastomer ile diğer yüzey
arasında oluşan sürtünme katsayısı arttığında elastomerin di-
renci düşük olduğundan bu durum ortaya çıkar. Basınç altında
kaymadan önce akmaya başlayan elastomerde kayma başladığında
çekme nedeni ile hareket yönüne dik çatlaklar oluşur. Sert ve
düzgün yüzey malzemeyi kopartarak altında rulo yapar. Bu olay
deformasyona ve elastomerin özelliğine bağlıdır.

2.5 Koroziif aşınma

Temiz metal yüzeyi ortam ile reaksiyona girerek yüzeyinde bir
film oluşturur. Çelik gibi yüzeyindeki oksit filmi zayıf olan
malzemelerde sürtünme sırasında oksit filmi kırılarak temiz
metal yüzeyi ortaya çıkar. Bu yüzey tekrar oksit tabakası i-
le kaplanır hareket sırasında bu tabaka kırılır. Bu şekilde
devam eden çalışma sonucu yüzeyden devamlı malzeme götürülür
ve aşınma olur.

Alüminyum gibi metallerde yüzeydeki oksit filmi ve bu taba-
kanın kırılması ile oluşan oksit parçacıkları ana malzemeden
daha serttir. Bu parçalar çalışma sırasında aşınmayı hızlan-
dırıcı etki yaparlar. Bunun yanında oksit filmi metal-metal
değmesini önlediğinden aşınmayı azaltıcı etki de yapabilmek-
tedir.

Korozif aşınmayı önlemek için malzeme yüzeyi uygun bir yağlayıcı seçilerek yağlanır veya yüzey fosfatlanır.

2.6 Yenme

Bu tür aşınma mekanizması tamamen ayrı bir tip olarak incelenmemekle beraber, bazı özel durumlarda ortaya çıkar.

Makina elemanlarında yenme, titreşimin etkisi ile ortaya çıkar. Somun-civata, mil-göbek bağlantılarında titreşim etkisi ile yüzeyden kopan parçacıklar iki yüzey arasında kalarak yuvarlanma elemanı gibi davranış gösterirler. Bu durum sürtünmeyi azaltır fakat küçük parçacıklar aşınmayı hızlandırıcı etki yaparlar. Yenme etkisi ile küçük toleranslı işlenmiş parçalar özelliklerini kısa zamanda kaybederek görev yapamaz hale gelirler. Ayrıca metal yüzeyinde oluşan çukurcuklar yorulma çatlaklarının başlangıç yerini oluşturması açısından önem taşır. Çatlak oluşumu bu şekilde kolaylaştığından makina ömrü de azalır.

Makinaların bir yerden bir yere taşınması sırasında taşıyıcı araçtan kaynaklanan titreşimler yenmeyi oluşturur. Bu nedenle taşıma sırasında makinaların kısmen veya tamamen askıya alınarak etkili olabilecek yüklerin kaldırılması gerekir. Diğer yandan yük arttırılarak titreşim önlenebilir.

Temas eden yüzeyler viskozitesi yüksek yağ veya gres ile kaplanarak sürtünme azaltılır. Bu yolla makina elemanlarının boşlukları yağ ile kaplanır. Böylece havanın korozif etkisinden de kaçınılmış olunur. Temas eden yüzeylerde fosfat kaplama yapılarak yağlamanın etkenliği arttırılır. Bundan başka yüzeyleri kurşunla kaplamak da yararlıdır. Taşınma süresince parçalar arasında titreşimi söndürme görevi yapan kaplama normal çalışma koşullarında çabucak aşınarak yerini gerçek malzemeye bırakır.

3- AŞINMA DAVRANIŞINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

3.1 Sertlik

Yapılan incelemelerde sert malzemeler yumuşak malzemelere göre daha az aşınma göstermiştir. Buradan doğal olarak malzeme

sertleştikçe aşınmanın azaldığı sonucu çıkar. Malzeme yüzeyine gelen ortalama basınç malzeme sertliğinin üçte birini aştığında aşınma miktarında da hızlı bir artış görülür. Aşırı aşınmaya geçiş, değme bölgesindeki pürüzlerin plastik akmaya geçmesi ile başlar.

3.2 Karşılıklı çözünme

Değme noktasındaki aşınma oranı malzemelerin karşılıklı çözünmesi ile de ilgilidir. Aşınma karşılıklı çözünme ile doğru orantılıdır. Benzer malzemelerin eşleşmesinde büyük aşınmalar olur. Bu tür eşleşmelerden kaçınılmalıdır.

3.3 Kristal yapı

Malzemelerin kristal yapıları genel olarak KYM, KHM ve kapalı hegzagonaldir. Bunlardan en sınırlı deformasyon karakteristiği olan kapalı hegzagonal kristal yapılardır. Buna rağmen kristal yapı çalışma şartlarına göre değişir. Kobalt, düşük çalışma sıcaklıklarında aşınmaya karşı iyi dayanım gösterir. Ortam sıcaklığı 417 °C'yi geçtiğinde ise kristal yapı hegzagonalden KYM'ye dönüşür ve aşınma çok fazla artar.

3.4 Yüzey filmi reaksiyonu

Atmosfer şartlarında metal yüzeylerinde oluşan oksit filmi malzemelerin metal-metal değmesini sınırladığından aşınmaya karşı koruma görevi yapar. Ayrıca yapay olarak oluşturulan film ile malzemelerin aşınması azaltılabilir. Eğer çalışma şartları ağırlaşır ise yüzey filmi bozulur, yüzeyden sert oksit parçacıkları kopar ve kopan bu parçacıklar aşınmayı hızlandırır.

Yüzeyleri korumak için sınır yağlayıcı denilen yağlayıcılar kullanılmaktadır. Bu yağlar uygulandıkları yüzey ile reaksiyona girerek yüzeyi koruyucu bir tabaka ile kaplarlar. Fakat bunlar sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde kullanılamazlar. 650°C'ye kadar sıcaklıklarda sulfat filmi kullanılır.

Yüzey filmi olarak MoS₂ ve grafit gibi katı yağlayıcılar çok kullanılmaktadır.

III- ÇALIŞMANIN AMACI

Dünya çapında yapılan istatistiklere göre makina elemanlarının %70'inin kullanılmaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Makinaların çalışması için gerekli olan enerjinin önemli bir kısmı sürtünmeyi yenmek için harcanır. Enerji üretimi için yapılan yatırımların maddi değeri göz önüne alınırsa sürtünmeyi yenmek için harcanan enerjinin parasal karşılığının milyarlar tutarında olduğu kolayca anlaşılır. Bu nedenle, uygun bir konstrüksiyonla sürtünmeyi çok az bile olsa azaltarak milyonlar değerinde parasal kazanç sağlarız. Aşınma sonucu oluşan malzeme kaybı ve onarım için harcanan zaman ve iş gücü de göz önüne alınırsa Triboloji konusunun önemi çok daha iyi anlaşılır.

Sürtünme sistemlerinin özellikleri ve deney yöntemleri hakkında fazla sayıda türkçe yayına rastlanmamıştır. Çoğu kez sürtünme malzemelerinin yapısı hakkında genel açıklamalarla yetinilmiş, özellikleri, sürtünme katsayısı ve kullanılabilceği sıcaklık kısaca belirtilmiştir. Bunun yanında bugün dahi sürtünme malzemelerinin deney yöntemleri hakkında geniş fikir ayrılıkları sürmekte, ortak bir yöntem verilememektedir. Önerilen deney yöntemleri arasında büyük farklılıklar bulunmakta ve bu nedenle elde edilen deney sonuçlarını karşılaştırma olanağı zorlaşmaktadır. Malzemelerin sürtünme katsayıları kullanım şartlarına göre değişiklik göstermektedir.

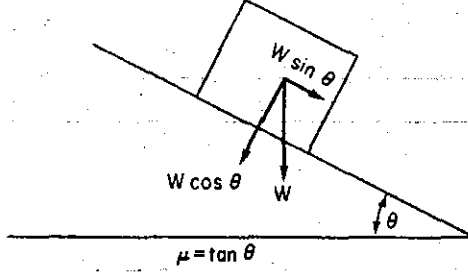
Mühendislerin sürtünme sistemleri ve bunların belirlenmesinde gereken bilgilere sahip olması gerekir.

Bu çalışmada, bir deney düzeneği hazırlanarak kuru çalışma şartlarında bazı mühendislik malzemelerinin sürtünme katsayıları ve aşınma oranları belirlenmiştir.

Burada, sürtünme katsayıları ölçüm deneyleri P (0.1, 0.15, 0.2) N/mm^2 lik yüzey basınçları ve v (18.84, 15.70, 12.04) m/s 'lik kayma hızlarında, aşınma oranlarını belirleme deneyleri ise P (0.075, 0.1, 0.125) N/mm^2 lik yüzey basınçları ile v (18.84, 15.70, 12.04) m/s 'lik kayma hızları ve L (188.4, 356.8, 565.2) m lik kayma yollarında yapılmıştır.

1-SÜRTÜNME ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Katılar arasındaki sürtünmeyi belirlemek için kullanılan yöntemlerden en basiti Şekil 45'te gösterilen eğik yüzey prensibidir.



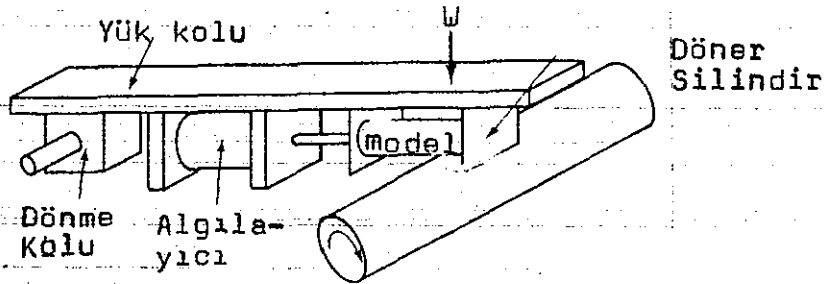
Şekil 45

Burada, normal kuvvet $N=W \cdot \cos\theta$ ve sürtünme kuvveti $F=W \cdot \sin\theta$ dir. Buradan da sürtünme katsayısı

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{W \cdot \sin\theta}{W \cdot \cos\theta} = \tan\theta$$

olarak bulunur. Burada yüzey yerden başlayarak yavaşça kaldırılır ve yüzey üzerindeki yük hareket etmeye başlayıncaya kadar kaldırma işlemi sürdürülür. Yük hareket ettiği zamanki θ açısı belirlenerek sürtünme katsayısı bulunur. Bu basit sistemde kayma hızının incelenmesi tam olarak yapılamaz. Bu sistem ancak küçük yüklerde sınırlı olarak kullanılır.

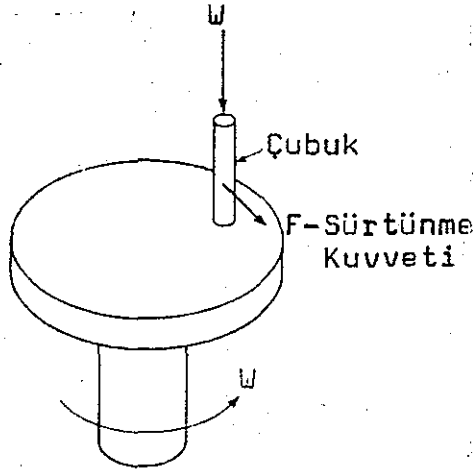
Şekil 46'da gösterilen daha gelişmiş bir düzenek ile eğik düzlem sisteminin dezavantajları giderilmiştir.



Şekil 46: Basit bir çapraz silindir sürtünme-aşınma mekanizması.

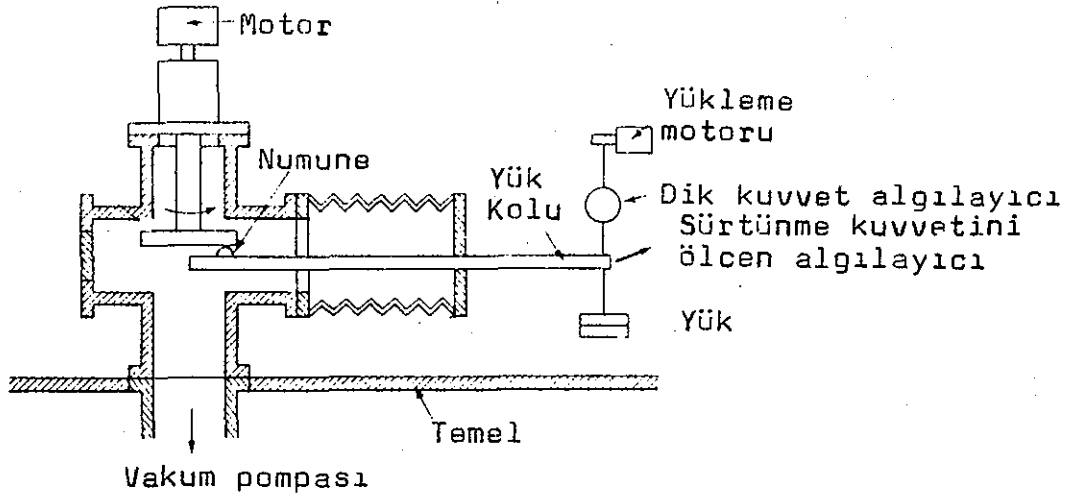
Burada sabit bir numune dönen silindire karşı çalışır. Sistem manivela kolundan genellikle sabit bir W ağırlığı ile yüklenir. Bazen hidrolik veya magnetik yüklemeler kullanılabilir. Model (numune) olarak kullanılan malzemeler iğne, küre, silindir şeklindedir. Bu sistemde sürtünme kuvveti, bir kuvvet algılayıcı transdüser ile kayıt edilir. Örneğin bazı yağlama şekillerinde, istenen yük, hız ve yüzey şartlarında sürtünme değeri kayıt edilir.

Diğer bir yöntem de, Şekil 47'de gösterildiği gibi silindirik bir çubuğun dönen disk üzerine yüklenmesidir. Bu tip düzenekler içinde buldukları gaz veya sıvıların değişikliği ve basınç, nem, sıcaklık gibi farklı koşullardan etkilenir.



Şekil 47: Disk-çubuk sistemi

Aynı tip basit düzeneğe çeşitli ilaveler yapılarak yüksek vakum şartlarında sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Bu tip basit düzenek Şekil 48'de gösterilmiştir. Burada disk mili magnetik kavrama ile motora bağlanmıştır ve motordan aldığı tahrik ile döner. Çubuk şeklinde bir numune manivela kolu ile disk üzerine bastırılır. Yataklanmış esnek körükten geçen manivela koluna uygulanan yük büyüktür.



Şekil 48: Vakum altında sürtünme katsayısı ölçme düzeneği
2-AŞINMA ÖLÇÜLMESİ

Aşınma ağırlık kaybı, hacimde değişim ve boyutta değişim olarak ölçülebilir. Laboratuvar deneyleri aşınmayı hızlandırıcı nitelikte olduğundan sonuç kısa sürede alınır. Bu deney sonuçları gerçek uygulamada belirli bir toleransla göz önüne alınmalıdır.

2.1 Aşınma ölçümünde kullanılan kriterler

1) Lineer aşınma derecesi K_L'

$$K_L' = \frac{\text{Aşınan tabaka kalınlığı}}{\text{Kayma yolu}} = \frac{h}{L}$$

2) Hacimsel aşınma K_V'

$$K_V' = \frac{\text{Aşınan tabaka hacmi}}{\text{Kayma yolu} \times \text{Geometrik alan}} = \frac{\Delta V}{L \cdot A_g}$$

3) Enerjisel aşınma derecesi K_E

$$K_E = \frac{\text{Aşınan tabaka hacmi}}{\text{Sürtünme işi}} = \frac{\Delta V}{F \cdot L}$$

4) Gravimetrik aşınma derecesi K_W

$$K_W = \frac{\text{Aşınan tabaka ağırlığı}}{\text{Kayma yolu} \times \text{geometrik alan}} = \frac{\Delta W}{L \cdot A_g}$$

5) Abrazyona yatkınlık γ

$$\gamma = \frac{\text{Abrazyonla aşınan hacim}}{\text{Sürtünme işi}} = \frac{\Delta V}{F \cdot L} = \frac{\Delta V}{\mu \cdot W \cdot L}$$

6) Abrasyon direnç katsayısı β

$$\beta = \frac{1}{\gamma} = \frac{\text{Sürtünme işi}}{\text{Abrazyonla aşınan hacim}} = \mu \cdot \frac{W \cdot L}{\Delta V}$$

μ : Kayma sürtünmesi katsayısı

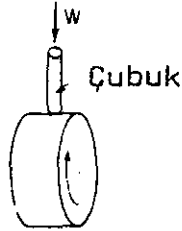
W : Yük

L : Kayma yolu

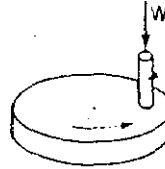
2.2 Aşınma ölçümünde kullanılan bazı deney düzenekleri

2.2.1 Yüksek basınç değme testleri

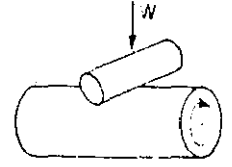
Bu düzeneklerde kullanılan numunelerin alanları küçüktür ve uygulanan yükler büyüktür. Bu nedenle aşınma çabuk oluşur. Bu amaçla çeşitli geometrik eşleşmeler kullanılmaktadır.



Halka üzerinde çubuk



Disk üzerinde çubuk



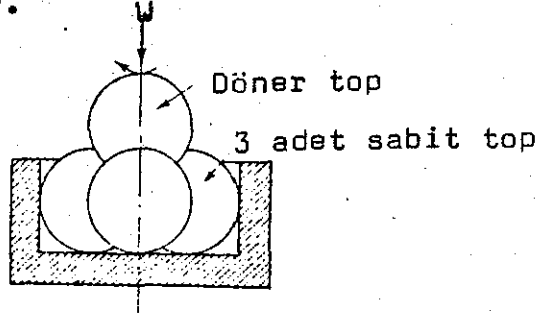
Çapraz silindir

Şekil 49: Aşınma ölçümünde en çok kullanılan yöntemler.

Halka üzerine çubuk şeklinde bir numune radyal yönde bastırılarak çalışmalar yapılmıştır. BOOSER, SCOTT ve WILCOCK 3.5 m/s hızda ve 1700 N/mm^2 lik basınç altında bu yöntemi kullandı. MILNE, SCOTT ve MACDONALD çapraz silindir makinasını kullandı. Burada prensip olarak iki tür test yapılmıştır. Bunlardan birinde mil döner numune sabittir, diğerinde numune döner mil sabittir. Bu mekanizmanın avantajı yüzeyden sürekli malzeme uzaklaştırılmasıdır. MILNE'in deneylerinde hız ve yük değiştirilebilir.

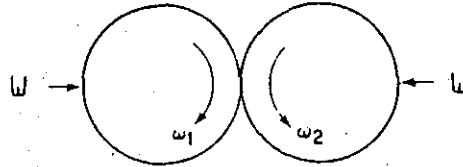
Bu deneylerin hepsinde aşınma miktarı ağırlık kaybı veya bo-

yutta değişim olarak ölçülmüştür. Deney şartları isteğe göre düzenlenebilir. Deneyler atmosfer şartlarında yapılabileceği gibi yüksek vakum şartlarında da yapılabilir. Yüksek vakum şartlarında malzeme yüzeyindeki oksit filmi uzaklaştırılmış olduğundan malzemenin tamamen kendi sürtünme özellikleri incelenmiş olur.



Şekil 50: Dört top aşınma mekanizması (UHV aparatı)

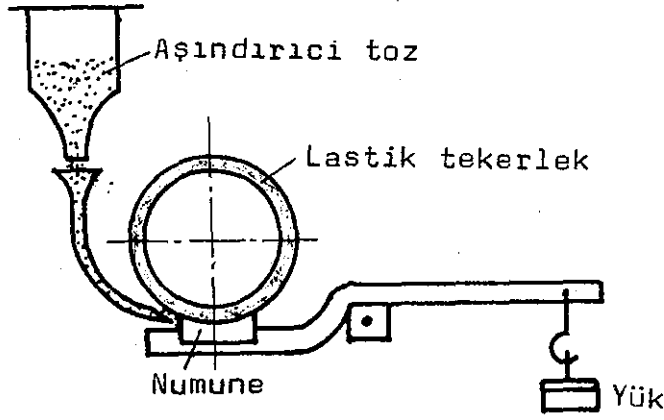
Şekil 50'den de görüldüğü gibi dört top mekanizmasında dönen bir top sabit duran diğer üç topa sürtünerek onları aşındırır. Bu düzenek endüstride çok kullanılır. Rulmanlı yataklar için ucuz ve kullanışlı bir yöntemdir. SCOTT dört top mekanizmasını çok az değiştirerek deneyler yaptı. /6,7/



Şekil 51: Disk makinası

Disk makinasında hem yuvarlanma hem de kayma prosesi etkisi altında ortaya çıkan aşınma durumu incelenir. Burada hızlar eşit olduğunda tam yuvarlanma, hızlar farklı olduğunda da kayma-yuvarlanma söz konusudur. MERRIT 3.6 m/s ile 0.9 m/s lik hızlarda bu tip bir düzenekte çalışmalar yapmıştır.

Şekil 52'de gösterilen düzenekte numune ağırlık koluna uygulanan yük ile lastik tekerlek yüzeyine bastırılır. Bu tekerlek dönerken aşındırıcı tozlar numune ile lastik arasına yollar. Yollanan bu tozların bir kısmı lastik üzerine yapışır ve numuneyi aşındırır. /9/



Şekil 52: Abrasiv aşınma test düzeneği

2.2.2 Radyoaktif izleme tekniği

Temas halinde bulunan malzemeler arasına radyoaktif izotop konulur. Malzemelerden biri radyoaktif izotopla izlenir. Çalışma sırasında bu izotopun izlenen malzeme üzerindeki transferi aşınma hakkında bilgi verir. Aşınma izinin radyografında parlak bölgeler aşınma ürünlerini gösterir. Radyoaktif sayıcılarla aşınma tozları miktar olarak ölçülür. Bu yöntem gerçek makina parçalarının aşınma ölçümünde de kullanılabilir.

Otoradyograf kullanılarak, bir çivi başına çekiçle vurulduğunda aşınma bölgesinin çivi başındaki sırtlarda olduğu ve sadece çividen çekice malzeme transferi olmadığını aynı zamanda çekip başından parçaların koparak çiviye transfer olduğu gösterilmiştir. Aynı durum Al parçasının mengene çeneleleri arasında sıkıldığında da gösterilmiştir. Mengene açıldıktan sonra mengene dişleri üzerinde Al parçacıkları görülmüştür. Al yüzeyi incelendiğinde mengene dişlerinden Al yüzeyine malzeme transferi olduğu gözlenmiştir.

2.2.3 Yüzey incelemesi

Malzeme yüzeyi aşınma devam ettikçe bozulur ve özellikleri değişir. Yüzeylerin durumunun incelenmesi amacıyla son yıllarda profilometreler geliştirilmiştir. Bu aletlerle yüzey profili çıkarılır. Yüzeyin pürüz karakteristiği ve yüzey profili geometrisi en önemli yüzey özellikleridir. Bu özellikleri belirlemek için profilometrelerden başka, optik mikroskoplar, elektron mikroskopu, eğik kesit alma, kartografı, yüzey bas-kıları gibi yöntemler kullanılmaktadır.

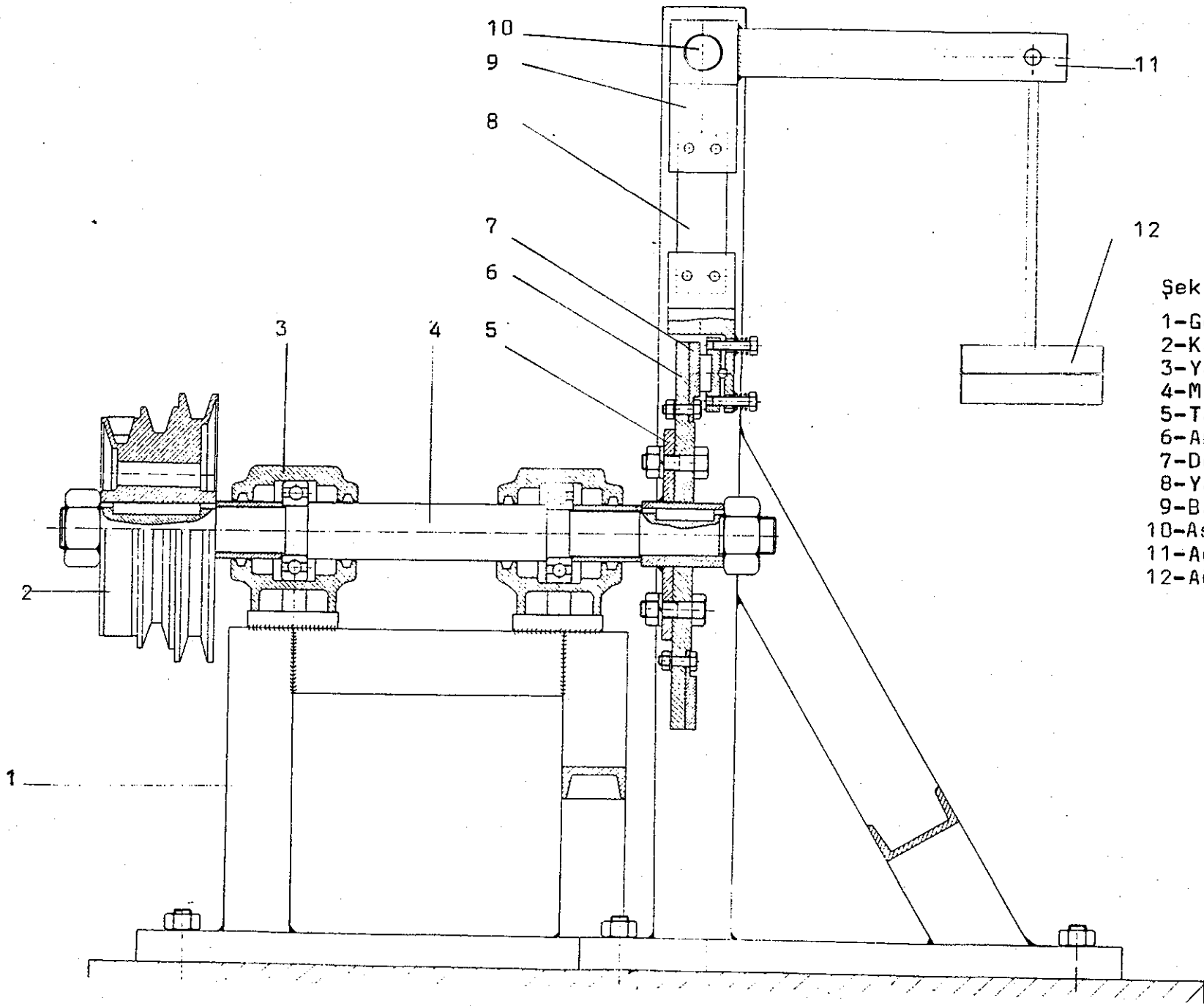
IV- DENEY DÜZENEGİNİN TANITILMASI

1- ÇALIŞMA PRENSİBİ

Çeşitli malzeme çiftleri arasındaki sürtünme katsayısı ve aşınma oranını belirlemek için hazırlanan düzenek Şekil 53'te gösterilmiştir.

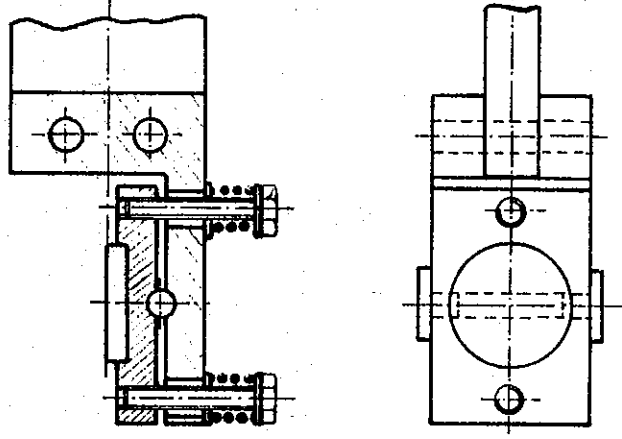
Deney diski yatay bir mil üzerine takılmıştır. Diskin devir sayısı kademeli olarak değiştirilebilir. Deney numunesi baskı kolu ucundaki bir yuvaya yerleştirilerek belirli yükler ile disk yüzeyine bastırılmıştır. Disk ayarlandığı hızda dönünce deney numunesi ile disk arasında göreceli kayma sağlanmış olur. Deney numunesi üzerine gelen yük, yani yüzey basıncı askı sisteminin ucuna asılan ağırlıklarla ayarlanır. Deney numunesinin takılı olduğu yuva silindirik pim üzerinde dönerek baskı sırasında numune yüzeyindeki basınç dağılımının düzgün olmasını sağlar (Şekil 54). Deney parçasını taşıyan kol baskı kuvveti ve sürtünme kuvvetleri etkisi altında deforme olmayacak şekilde boyutlandırılmıştır. Baskı koluna köşe bağlantısından sonra dikdörtgen kesitli bir yaprak yay bağlanmıştır. Bu yayın altına numune tutucu kısım takılmıştır. Yaprak yay numune üzerine uygulanan baskı kuvveti altında kaldığı zaman yerleştirme durumuna ve bu yöndeki kesit atalet momentinin büyüklüğüne bağlı olarak eğilmeyecektir. Bunun yanında yay, sürtünme kuvvetleri yönündeki kesit atalet momentinin az olması nedeni ile bu yönde gelecek küçük bir kuvvet etkisi ile kolayca deforme olabilmektedir. Baskı kolu tamamen rijit yapıldığından tüm deformasyon bu yaprak yay tarafından alınmaktadır. Sürtünme kuvveti etkisi ile yaydaki eğilme yay üzerine yapıştırılmış olan strain-gauge'in uzamasını sağlar. Bu uzama miktarı ölçülerek sürtünme kuvvetinin büyüklüğü belirlenmiştir.

Sistem V kayış-kasnak mekanizması ile tahrik edilmektedir.

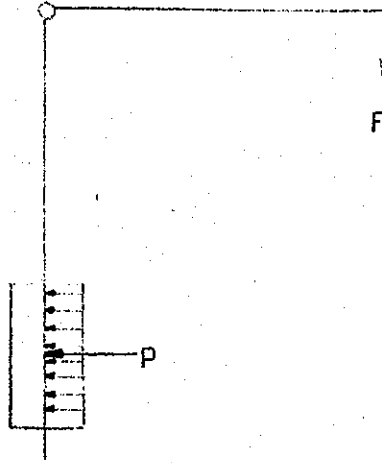


Şekil 53: Deney düzeneği

- 1-Gövde
- 2-Kademeli kasnak
- 3-Yatak
- 4-Mil
- 5-Taşıyıcı disk
- 6-Ana disk
- 7-Deney diski
- 8-Yaprak yay
- 9-Baskı kolu
- 10-Askı mili
- 11-Ağırlık kolu
- 12-Ağırlık



Şekil 54: Deney numunesi yuvası



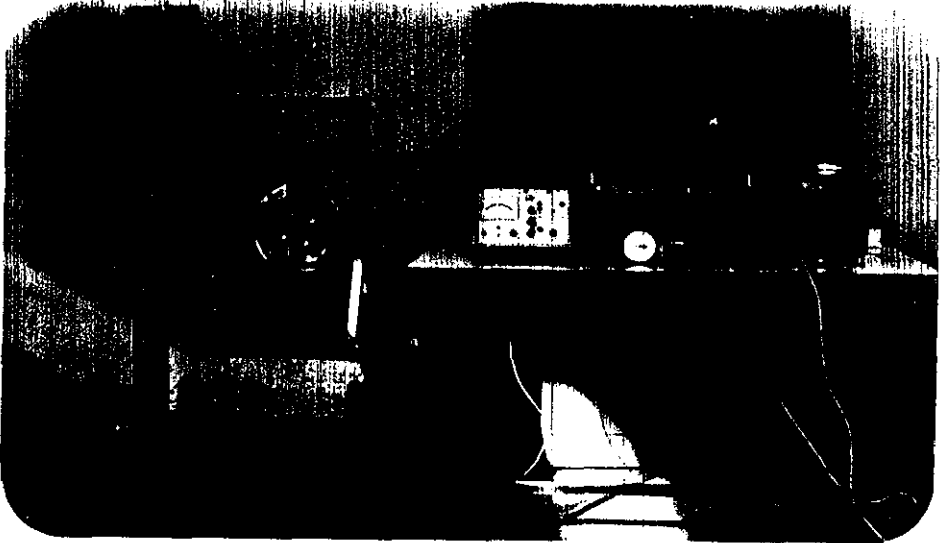
Şekil 55: Yukarıdaki (Şekil 54) konstrüksüyon sabit yuva içindeki deney numunesinde basınç dağılımının düzgün olmasını sağlamaktadır.

2- DENEY DÜZENEGİNİN YAPISI

Deney diski, mil üzerine kama bağlantılı olarak takılmış taşıyıcı bir disk üzerine 4 adet M 10 civata ile bağlanmış ana disk üzerine 6 adet M 6 civata ile takılmıştır. Deney diskinin kalınlığı 8 mm, disk çapı 240 mm ve iç çapı 160 mm dir.



Şekil 56: Deney düzeneğinin yandan görünüşü



Şekil 57: Deney düzeneğinin önden görünüşü

Disk in sürtünme yüzeyinin ortalama çapı 200mm dir. Diskleri ve V-kayışı kasnağını taşıyan mil iki adet tek sıra bilyalı sabit rulman ile yataklanmıştır. Şekil 57'de deney numunesinin bağlı olduğu taşıyıcı sistem görülmektedir. Sistemin yüklenmesi ağırlık koluna asılı ağırlıklarla yapılmaktadır. Düşey olan ağırlık kuvvetleri, birbirine dik olarak bağlı kollar üzerinden disk yüzeyine numuneyi bastıran kuvveti oluşturur. Baskı kolundaki yay parçası 3x30 mm kesitinde olup taraflı eksenlere göre kesit atalet momentleri 1/100 dür ve sürtünme kuvvetleri yönünde kolaylıkla eğilir. Deney numunesini tutan sistem Şekil 54'te gösterilmiştir. Şekil 53'te verilen resimde de görüldüğü gibi deney numunesinin yüklenebilmesi için ağırlık kolu ve baskı kolu askı mili üzerine boşluksuz geçirilmiş kafa üzerine birbirine dik olacak şekilde bağlanmıştır. Yükler ağırlık kolu üzerinde bulunan askıya aşılmaktadır. Numune yüzeyindeki basınç dağılımının dengelenebilmesi için numune tutucu kafa ile baskı kolu arasında silindirik bir pim yerleştirilmiştir. Pim deney numunesinin ortasına gelecek şekilde konulmuştur. Böylece numune, orta eksenini boyunca basınç dağılımını dengeleyecek şekilde hareket edecektir.

Numune yüzeyinin, baskı kolunun ve yayın orta eksenleri üst üste gelecek şekilde yapılmıştır. Baskı kolu, disk yüzeyine bastırılan numune ile dönen disk arasında oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisi ile yayın bulunduğu bölgeden eğilmektedir.

Numune, tutucu kafa içine açılan 3 mm derinlikte ve 23mm çapında bir yuvaya yerleştirilir. Böylece çalışma sırasında numunenin yerinden çıkması önlenmiştir.

Deney numunesi takıldıktan sonra olabilecek oturma düzensizlikleri deney sırasında belirli bir alıştırmaya döneminde sonra giderildi. Her iki yüzey tam olarak oturduktan sonra ölçümler alındı.

Numune tutucu kafa silindirik pim üzerinde dönerken iki adet yay içinden geçen civata ile taşıyıcı kola bağlıdır. Yayların

görevi tutucu kafanın yerinden düşmesini önlemek için cıvatalara ön yükleme vermektir.

Deney düzeneği, N=5.5 KW'lık, n=1500 d/d'lik asenkron elektrik motoru ve buna bağlı V kayış-kasnak sistemi ile tahrik edilmektedir. Motor ve düzenek üzerindeki kasnaklar üç kademeli olarak yapılmıştır. Böylece düzenek üç devir sayısında çalışabilmektedir.

3- DENEY BÜYÜKLÜKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

3.1 Hız ölçümü

Deney diski devir sayısı her hız kademesinde digital takometre ile bosta ve yüklü olarak ölçüldü. Ortalama sürtünme yüzeyi çapı $D_0=200$ mm olduğundan buna göre devir sayılarına bağlı olarak kayma hızları hesaplandı.

$$\text{Kayma hızı; } v(\text{m/s}) = \frac{\pi \cdot D_0 \cdot n}{60}$$

Burada n devir sayısıdır.

n(d/d)	1800	1500	1150
v(m/s)	18.84	15.70	12.04

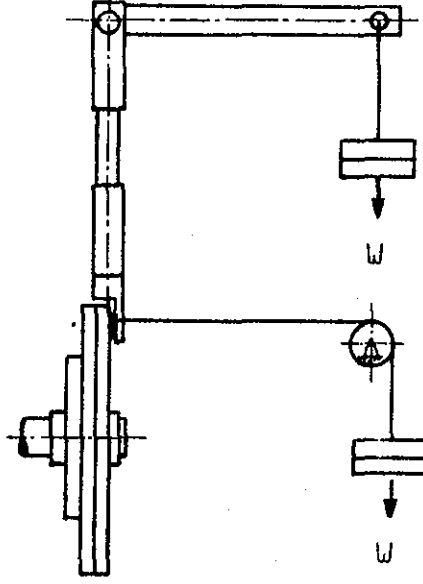
TABLO IV

3.2 Kuvvet ölçümü

Deney numunesine gelen baskı kuvveti sistemin boyutlarından hesaplanabilir. Bunun yanında taşıyıcı kolların imalatı sırasında olabilecek boyut farklılıkları göz önüne alınarak yükleme sistemi kontrol edildi.

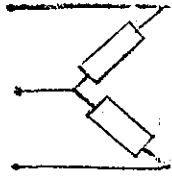
Bunun için deney numunesini tutucu kafanın ortasına tel çekilerek bu tel bir rulmanlı yatak üzerinden geçirildi (Şekil 58). Telin ucuna ağırlıklar asılarak dengeleme yapıldı. Bu kalibrasyon sonucunda baskı ve ağırlık kolları arasında boyut farklılığı olmadığı görüldü. Ağırlık taşıyıcı kol ile baskı kolu aynı uzunluktadır. Yani oran 1/1 dir. Numunenin yüzey basıncı ağırlık kolu üzerindeki ağırlık taşıyıcı kanca bloku üzerine ağırlıklar asılarak yapılır. Kanca blokunun ağırlığı 19 N dir. Yani bu blok üzerine hiç ağırlık asılmadığı durumda

numune yüzeyine uygulanan kuvvet 19 N dur.



Şekil 58: Deney numunesi yüzey basıncının belirlenmesi

Sürtünme kuvvetini ölçmek için kullanılan strain-gauge'ler yarım köprü oluşturacak şekilde yerleştirilmişlerdir.

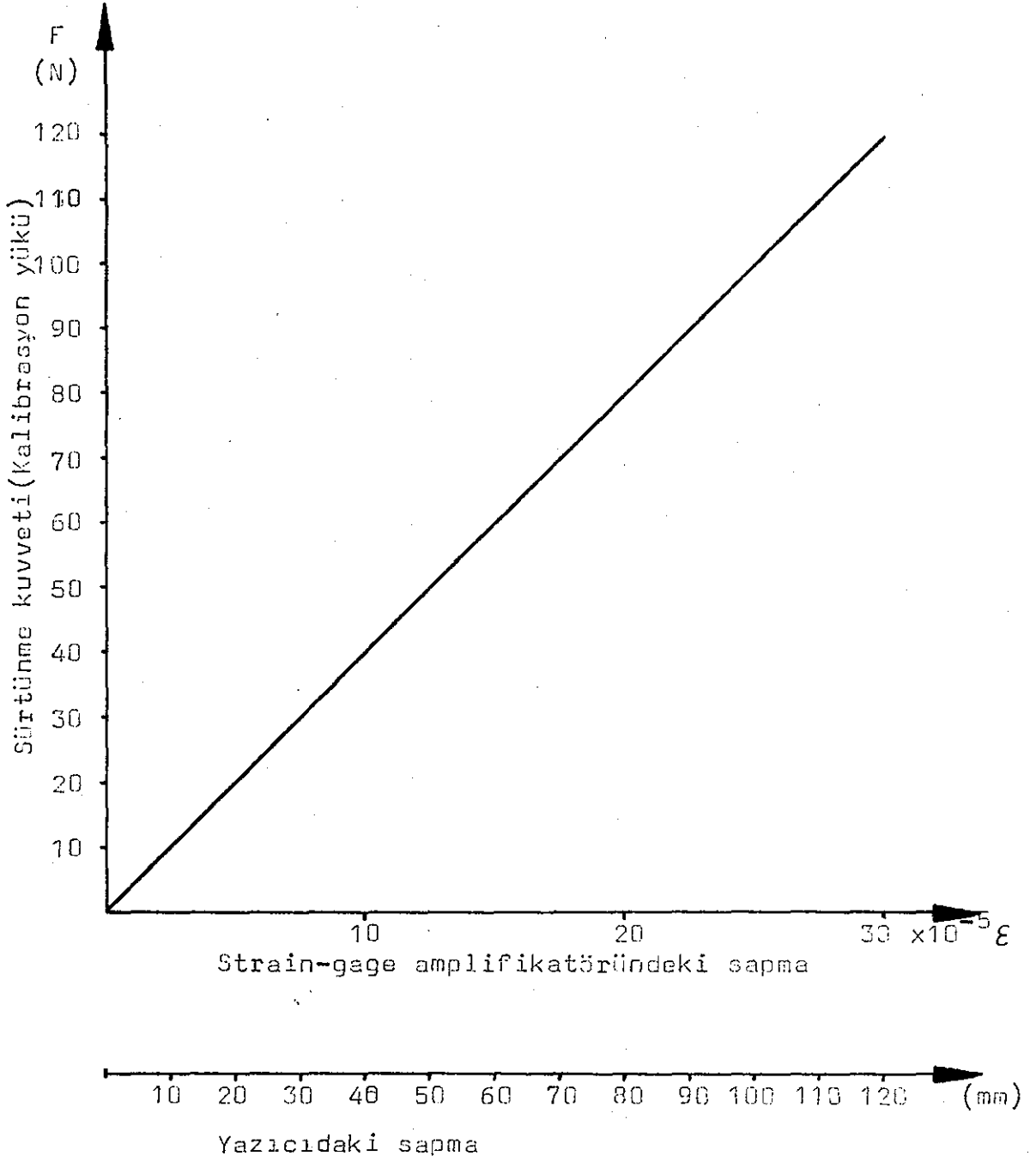


Şekil 59: Strain-gauge köprüsü

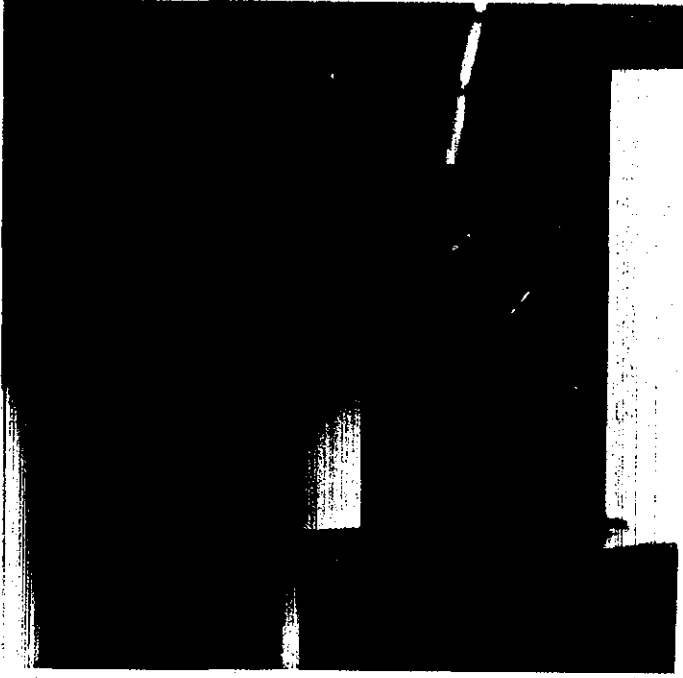
Kullanılan strain-gauge, Hottinger Baldwin Messtechnik firmasının ürünü olup 6/120 LY11 tipidir.

Strain-gaugelerden biri yay üzerine (Şekil 61) diğeri taşıyıcı sistem üzerinde düz bir yere yapıştırılmıştır (Şekil 62). Taşıyıcı

sistem üzerine yapıştırılan strain-gauge her zaman sabit duracak ve yay üzerindeki strain-gauge referans olacaktır. Yay üzerindeki strain-gauge sürtünme kuvvetleri etkisinde kalıp uzayınca bu ikisi arasındaki fark amplifikatörden okunacaktır. Bu düzenekte kullanılan amplifikatör, Hottinger Baldwin Messtechnik firmasının KWS 3072 tipli ürünüdür. Ayrıca bu alıcıya bağlı Rikadenki marka bir yazıcı (kayıt edici) bulunmaktadır. Amplifikatördeki bütün sapmalar bu yazıcıda kayıt edilir. Yazıcıdaki kağıt hızı 1 cm/dak ile 60 cm/dak veya 1 cm/h ile 60 cm/h arasında ayarlanabilir. Bu şekilde sürtünme kuvvetinin değişimi ayrıntılı olarak izlenebilmiştir.



Şekil 60: Amplifikatör ve yazıcının kalibrasyon eğrisi



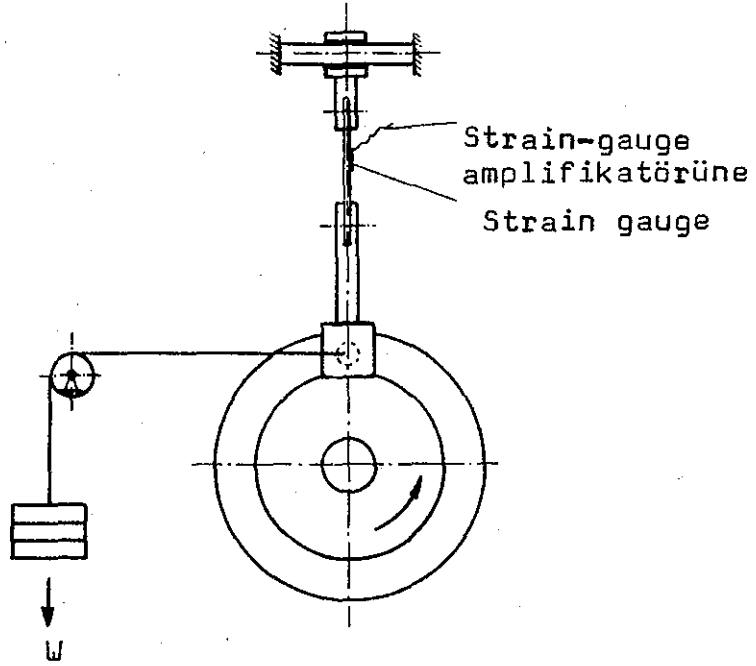
Şekil 61



Şekil 62

Yazıcı amplifikatör ile birlikte kalibre edilmiştir. Böylece ölçülen sürtünme kuvvetlerinden sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

Kalibrasyon için numunenin sürtünme yüzeyi ortasından tel çekilerek bu tel bir rulmanlı yatak üzerinden geçirilip ucuna ağırlıklar asıldı. Bu ağırlıklara karşılık yay üzerindeki strain-gaugein uzaması ile amplifikatördeki sapmalar belirlendi. Yapılan ölçümler sonucu Şekil 60'taki gibi bir kalibrasyon eğrisi çıkarıldı. Çıkarılan kalibrasyon eğrisi yardımı ile sapmalara karşılık gelen sürtünme kuvvetleri belirlenir.



Şekil 63: Strain-gauge kalibrasyonu

V- DENEYLERİN YAPILIŞI

Deney düzeneğinde kullanılan motorun devir sayısı 1500 d/d dir. Burada kullanılan kayış-kasnak mekanizmasından elde edilen devir sayıları 1150, 1500, 1800 d/d'dir. Deney diskinin ortalama yarı çapı 100 mm dir. Buna göre deney hızları,

v (m/s) : 12.04, 15.70, 18.84 tür.

Deneylerde kullanılan numunelerin sürtünme yüzeyi 4 cm^2 ve kalınlıkları 6 mm dir.

Deneylerde kullanılan yüklere karşılık gelen yüzey basınçları Tablo V'te verilmiştir.

$W(N)$	30	40	50	60	80
$P(N/mm^2)$	0.075	0.100	0.125	0.150	0.200

TABLO V

Deneylerde kullanılan malzemeler:

Al 30 BSD 2.5

Pb 15 BSD 2.5

Pb 10 BSD 2.5

Zn 50 BSD 2.5

DD 190 BSD 30

Polietilen

Balata dir.

Deney diski Fe 42 malzemeden olup 123 BSD 30 tür.

Her deneyden önce disk yüzeyi ince zımpara ile temizlendikten sonra alkol ile silinerek yağı alınmıştır.

Deney numuneleri yüzeyi temizlenmiş disk üzerine $P=0.1 \text{ N/mm}^2$ lik basınçta ve $v=15.70 \text{ m/s}$ lik kayma hızında alıştıırıldı. Böylece numunelerin disk yüzeyine tam oturması sağlanarak sürtünme katsayısı ve özellikle aşınma oranının hatalı olarak belirlenmesi önlenmiştir.

Malzemelerin sürtünme katsayıları ölçümü $P= 0.1, 0.15, 0.2 \text{ N/mm}^2$ lik yüzey basınçları ve $v= 18.84, 15.70, 12.04 \text{ m/s}$ 'lik kayma hızlarında yapılmıştır.

Numunelerin sürtünme kuvvetleri strain-gauge amplifikatörüne

bağlı yazıcıda kayıt edilmiştir. Her deney sırasında kayıt edilen sürtünme kuvvetleri kalibrasyon eğrisi ile belirlendi. Deney süresince kaydedilen sürtünme kuvvetinin maximum, minimum ve ortalama değerlerinden deney numunesini bastırma kuvveti yardımı ile $\mu = F/W$ den sürtünme katsayısının max., min. ve ortalama değerleri ile standart sapması ve değişim katsayısı hesaplanmıştır.

Sürtünme kuvvetinin ortalama değeri aritmetik ortalama olarak hesaplandı. Sürtünme kuvvetinin standart sapması σ_{n-1} hesaplandıktan sonra değişim katsayısı $V, \%$ olarak

$$V = \frac{\sigma_{n-1}}{\bar{F}} \cdot 100 (\%)$$

formülünden hesaplandı.

Aşınma deneyleri: $P = 0.075, 0.100, 0.125 \text{ N/mm}^2$ lik yüzey basınçları ve $v = 18.84, 15.70, 12.04 \text{ m/s}$ lik kayma hızları ile $L = 188.4, 376.8, 565.2 \text{ m'lik}$ kayma yollarında yapılmıştır.

Aşınma miktarı ölçümünde Al 30 BSD 2.5, Pb 10 BSD 2.5 Pb 15 BSD 2.5 ve Zn 50 BSD 2.5 malzemeler kullanılmıştır. Al ve Pb 10 BSD 2.5 malzemelerin aşınma deneyleri $L = 188.4, 376.8 \text{ m'lik}$ kayma yollarında yapılmıştır.

Aşınma deneylerinde numuneler disk yüzeyine alıştırıldıktan sonra tartılmıştır. Deney bittikten sonra da tekrar tartılmış ve ağırlık kaybı ölçülmüştür.

Malzemelerin Gravimetrik aşınma derecesi

$$K_W = \frac{\text{Aşınan tabaka ağırlığı}}{\text{Kayma yolu} \times \text{Geometrik alan}} = \frac{\Delta W}{L \times A_g}$$

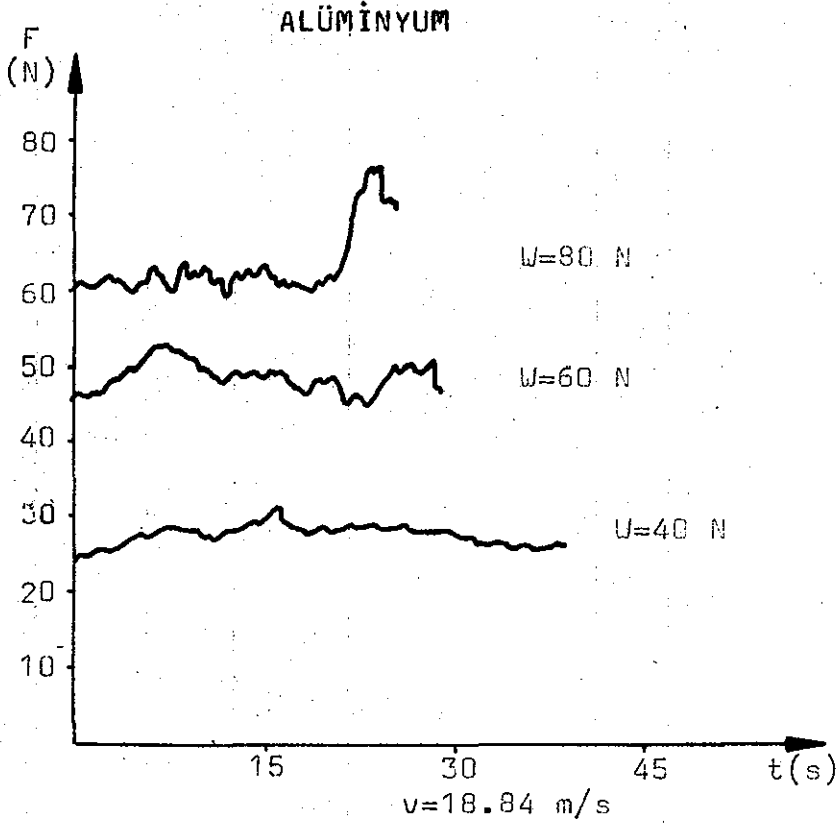
formülünden hesaplanmıştır.

VI- DENEY SONUÇLARI VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ

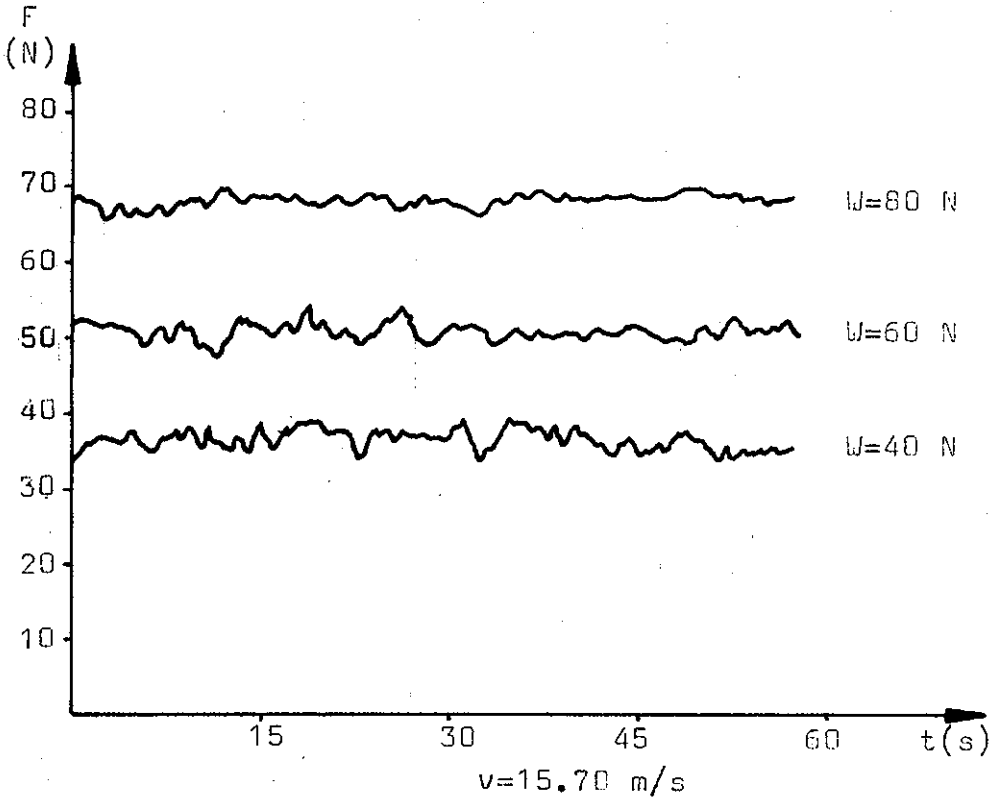
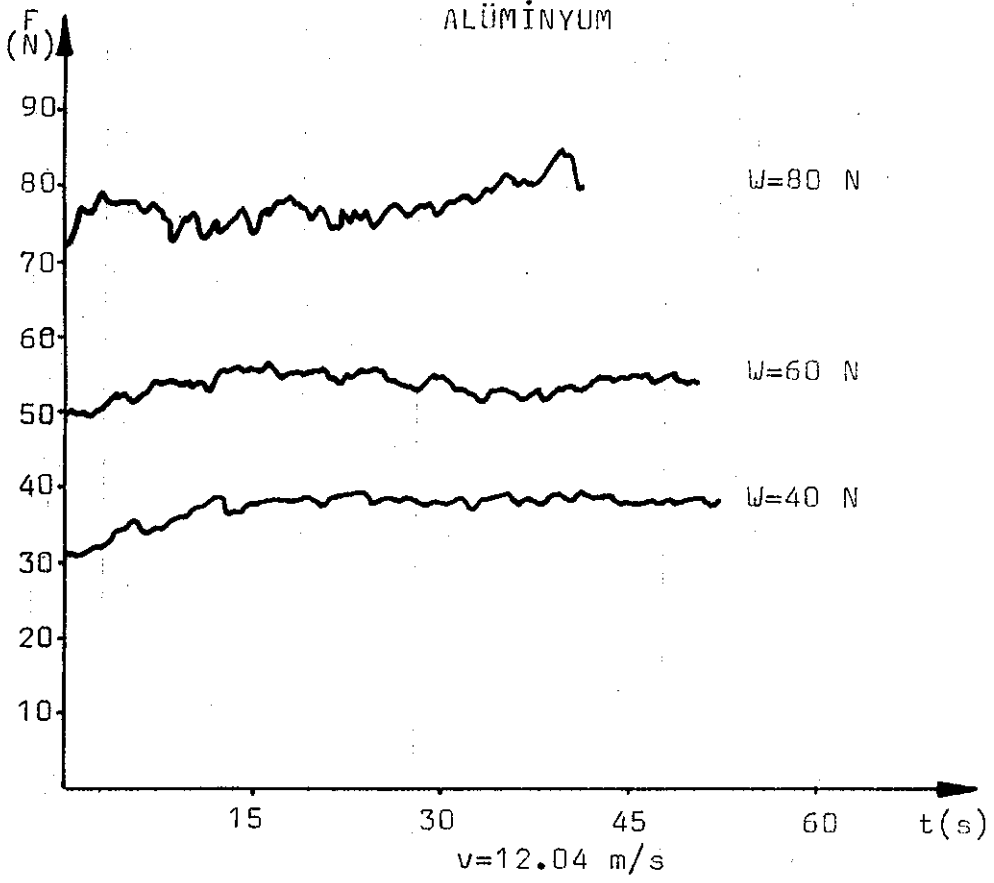
1- DENEY SONUÇLARI

1.1 Sürtünme katsayıları

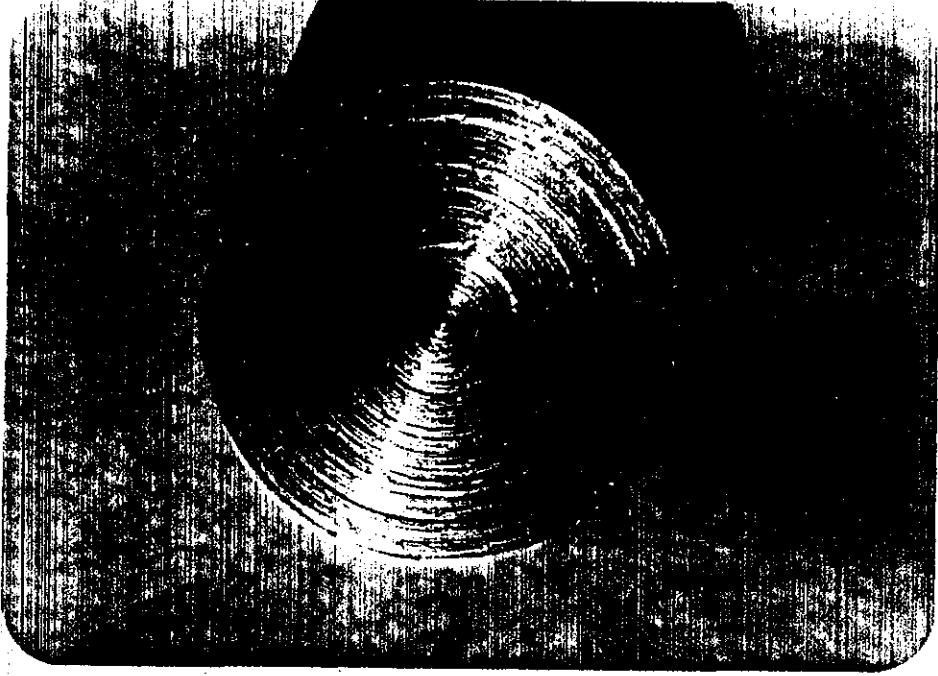
Şekil 64'te sürtünme katsayıları ölçülen malzemelerin sürtünme kuvvetlerinin uygulanan yük ve hızlara göre değişimi ile numunelerin sürtünme deneyine başlamadan önceki ve deney bittikten sonraki yüzey durumları gösterilmiştir.



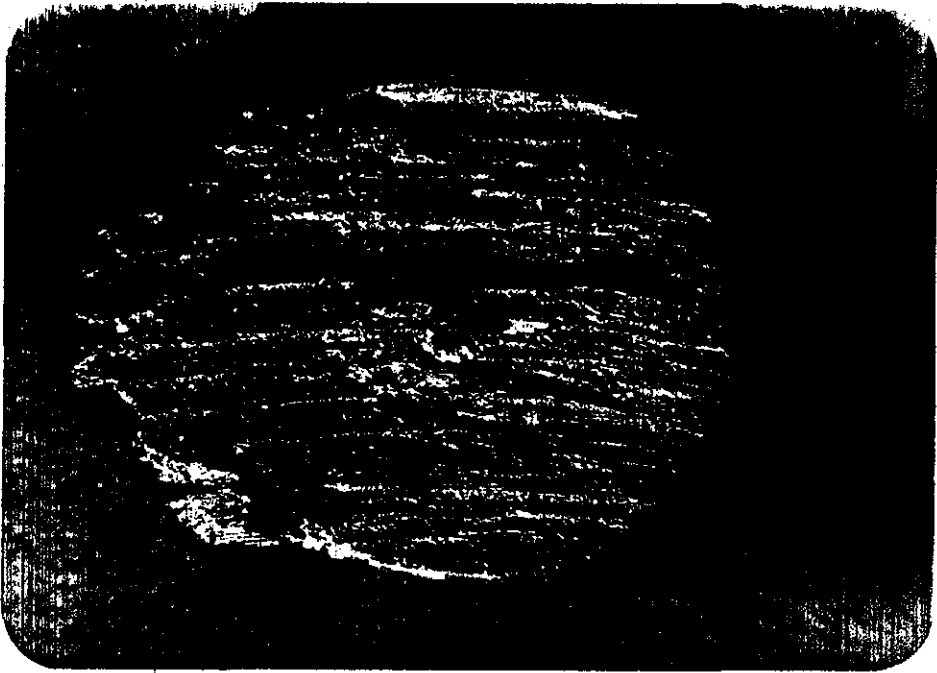
Şekil 64



Şekil 64



Alüminyum numunenin deneye başlamadan önceki yüzey durumu



Alüminyum numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu

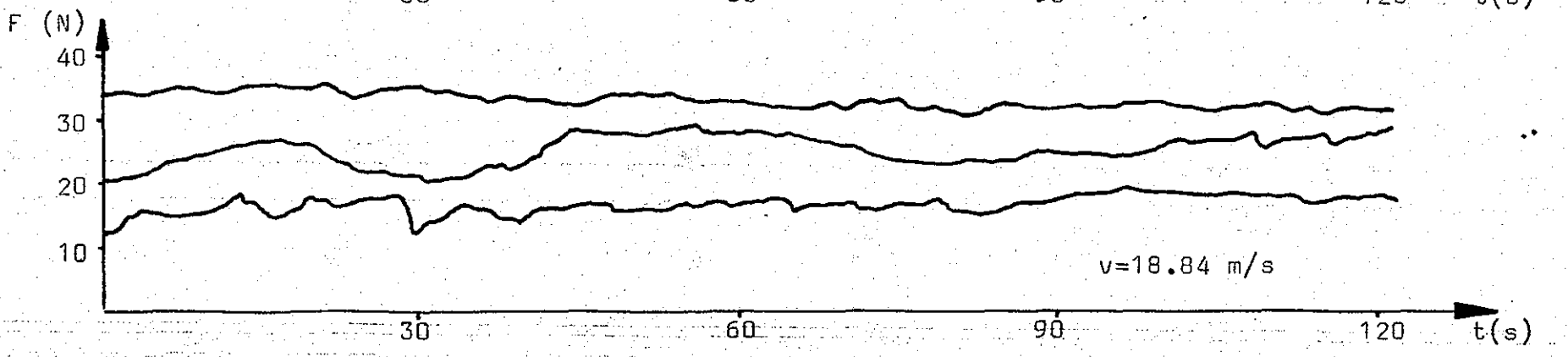
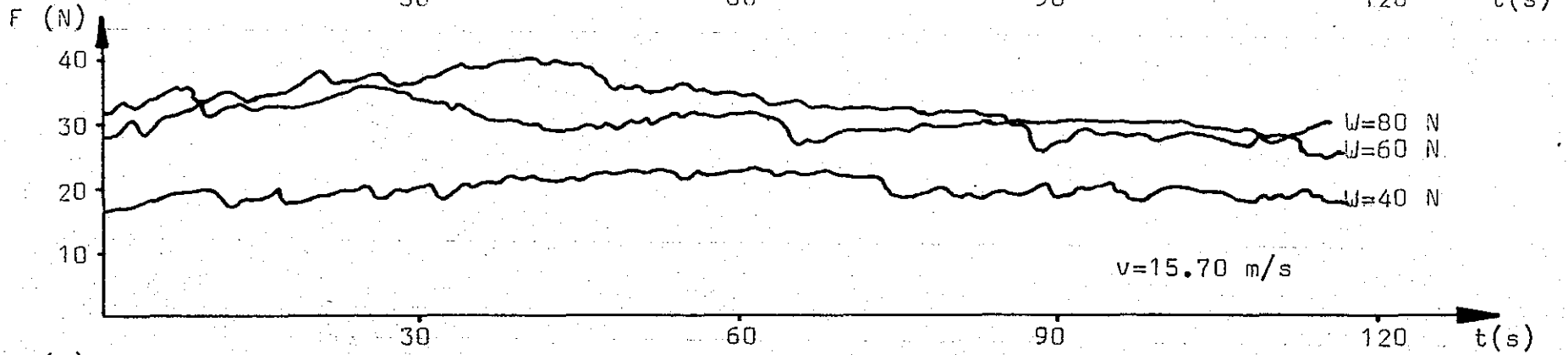
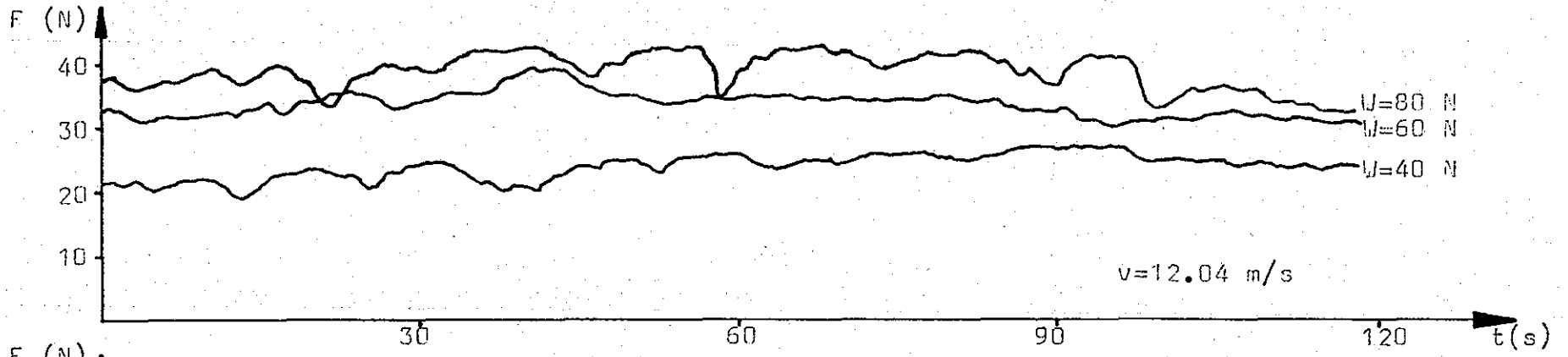


Alüminyum numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu



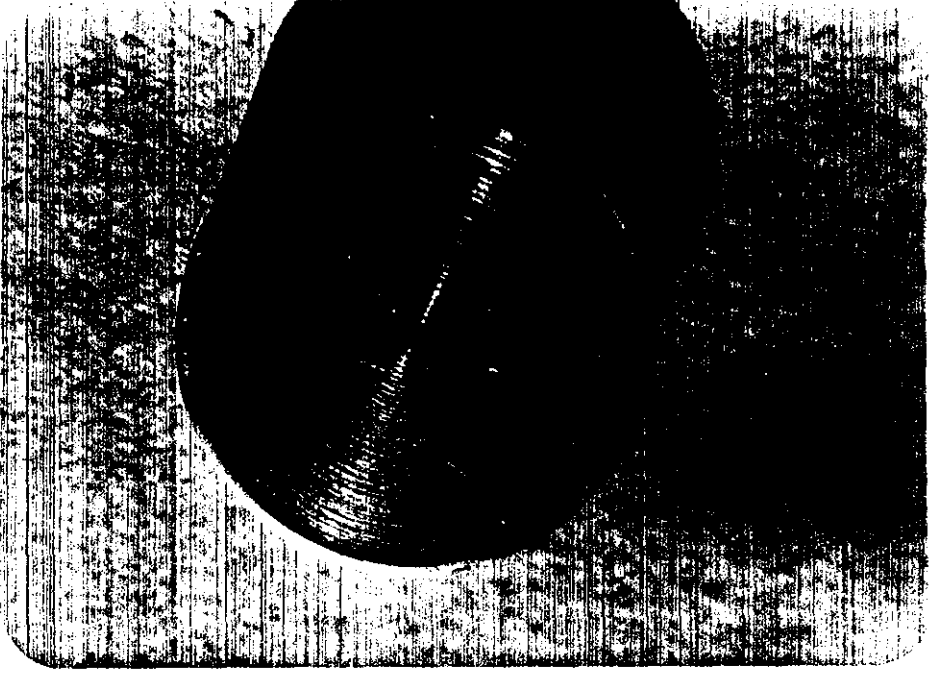
Alüminyum numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu

ÇİNKO

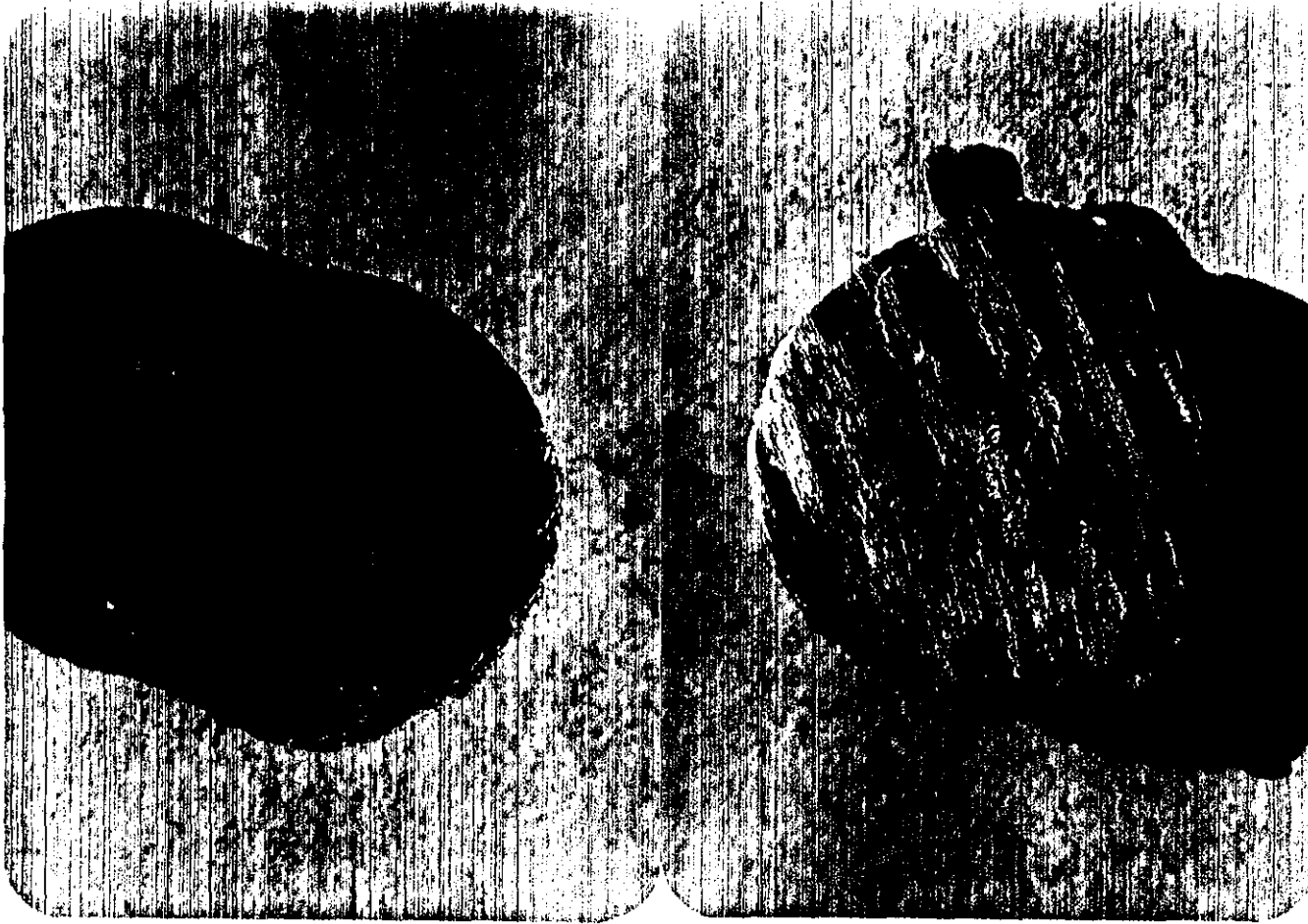


70

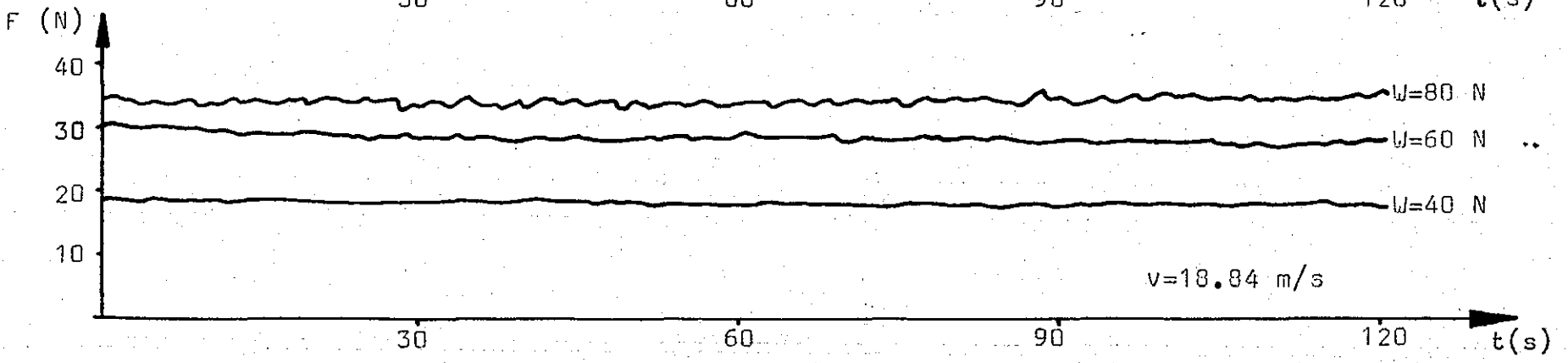
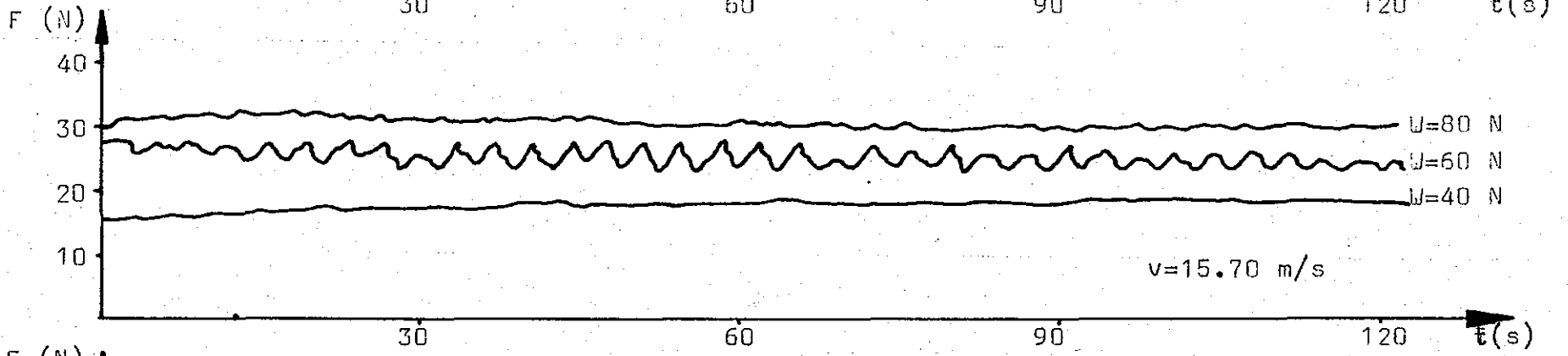
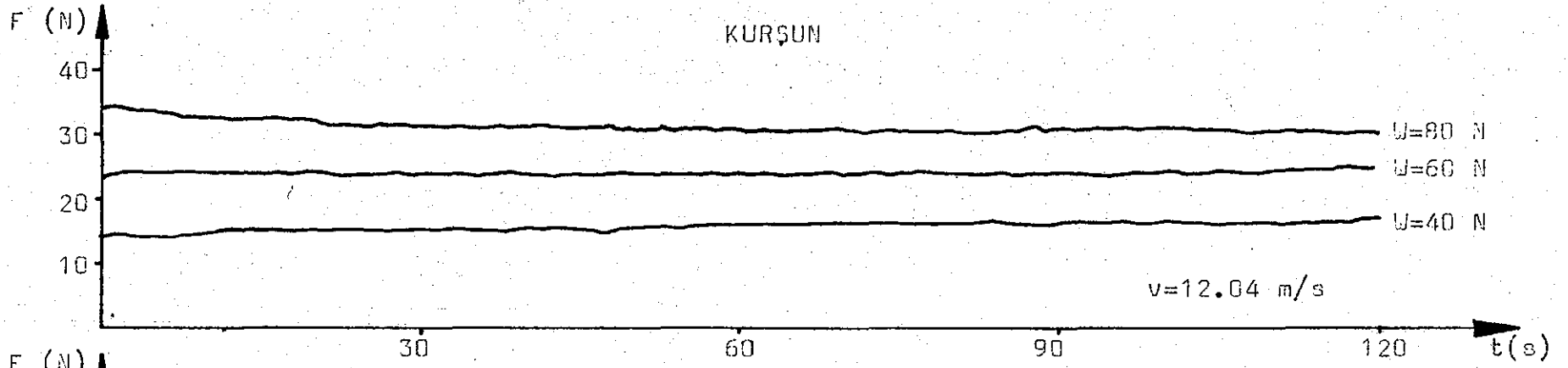
Şekil 64



Çinko numunenin deneye başlamadan önceki yüzey durumu

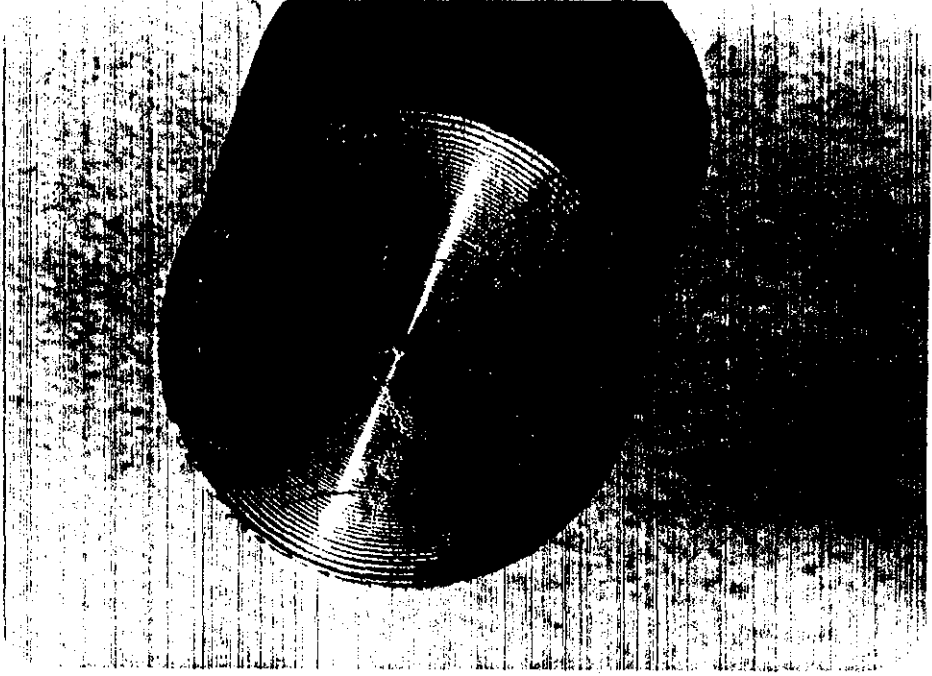


Çinko numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu

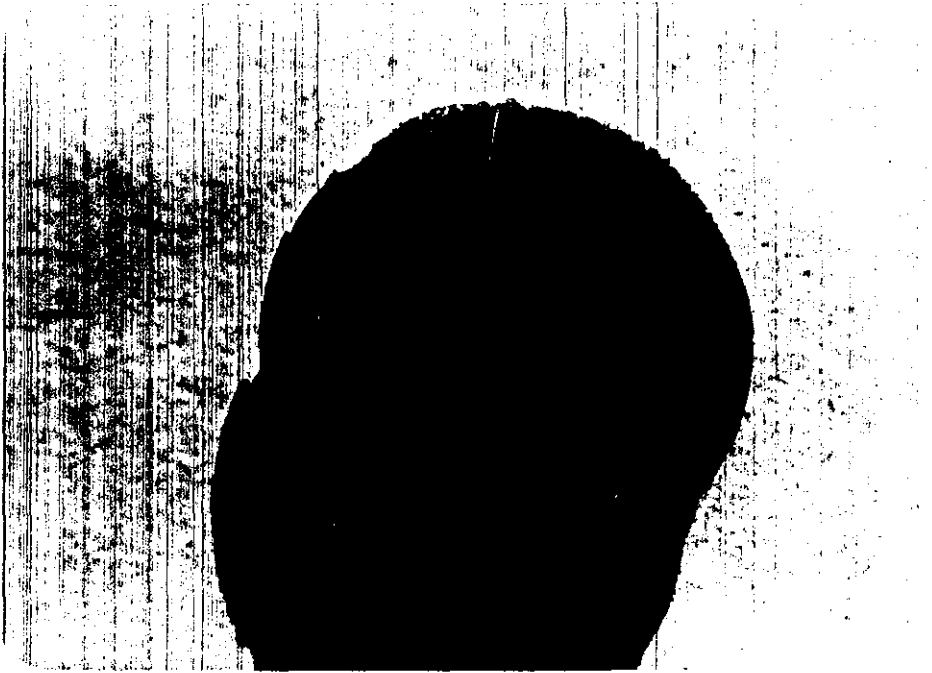


Şekil 64

72



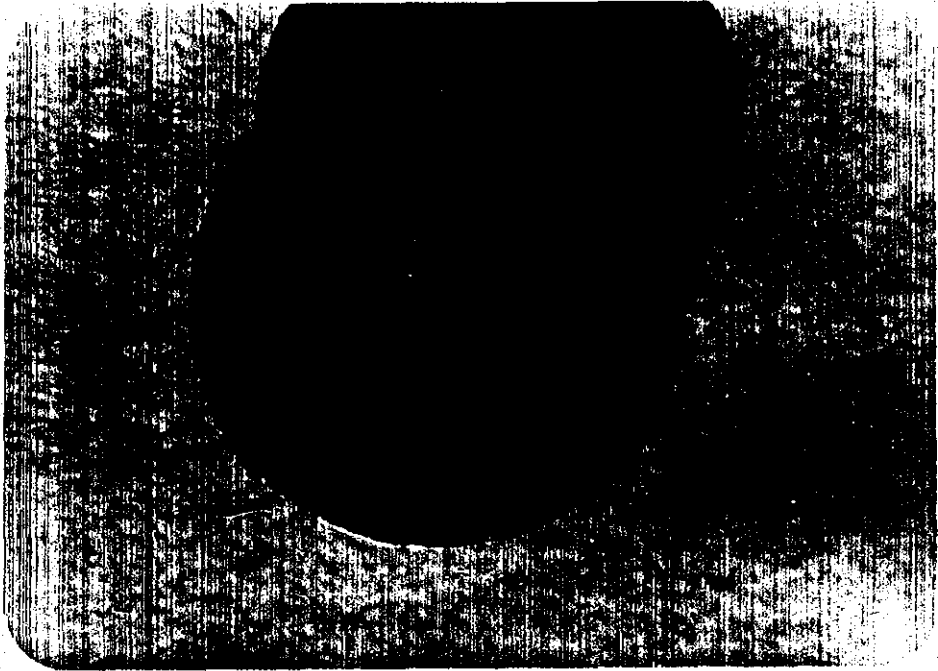
Kurşun numunenin deneye başlamadan önceki yüzey durumu



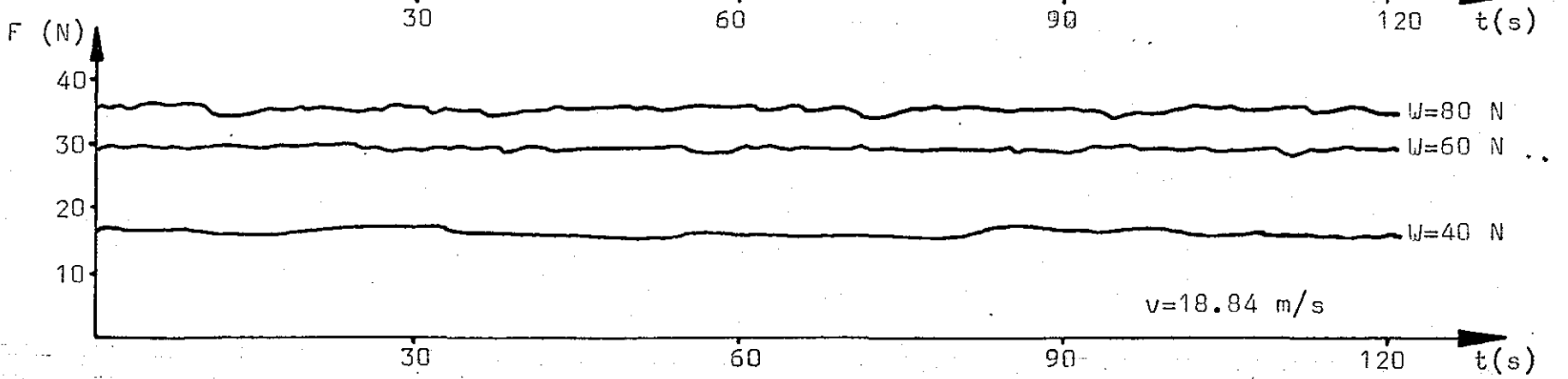
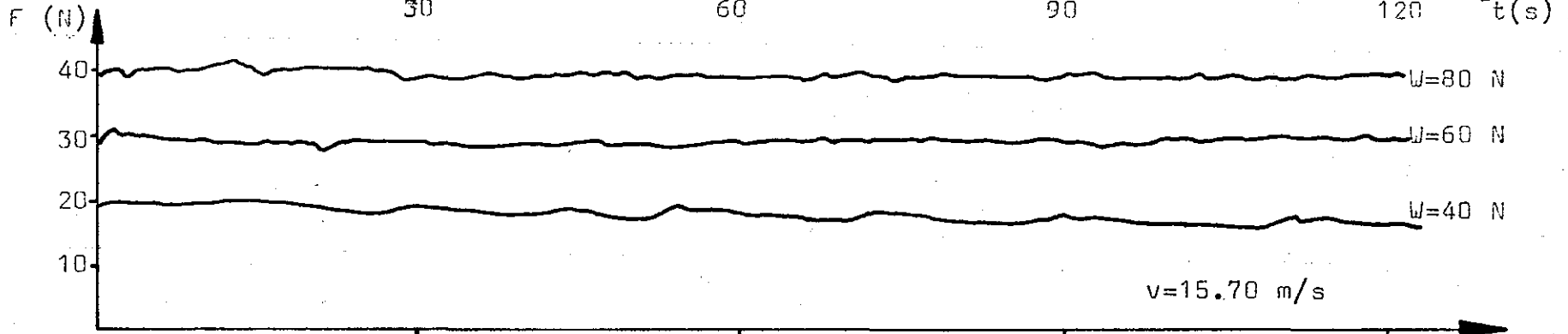
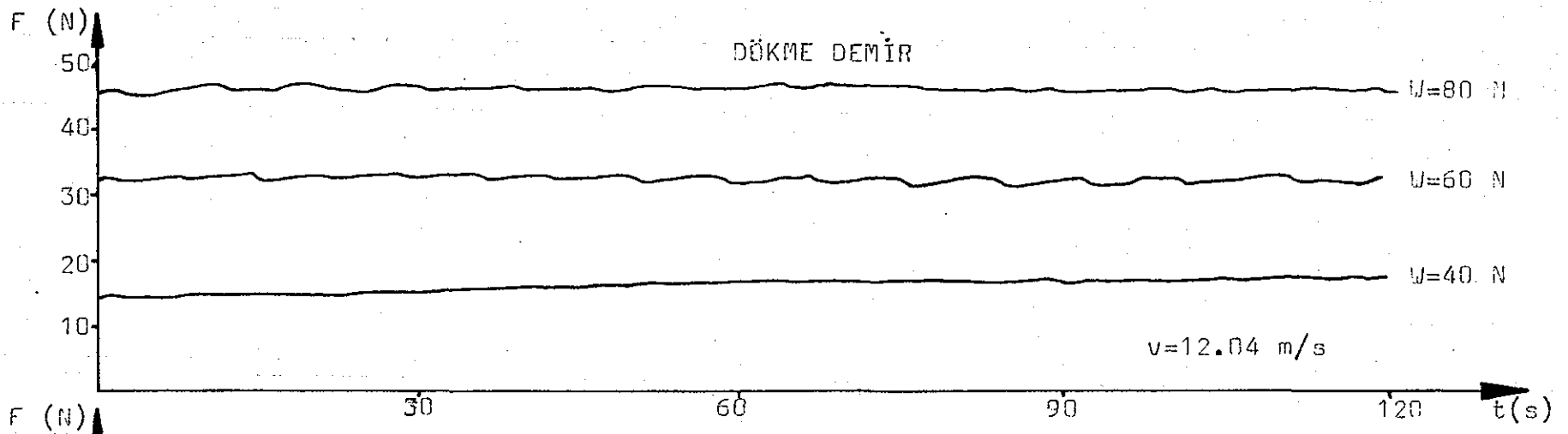
Kurşun numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu



Kurşun numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu

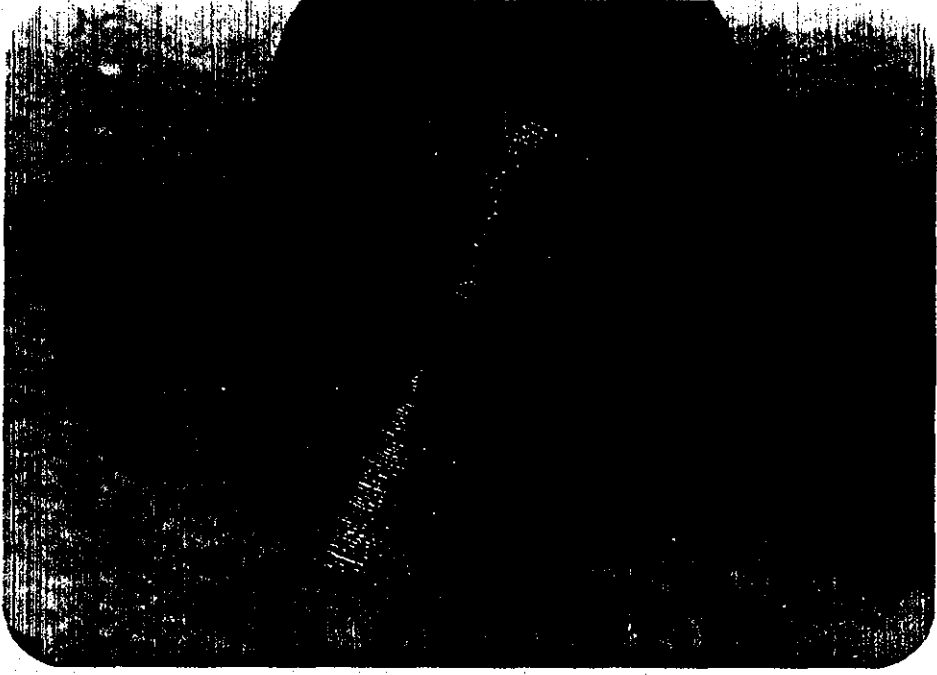


Kurşun numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu

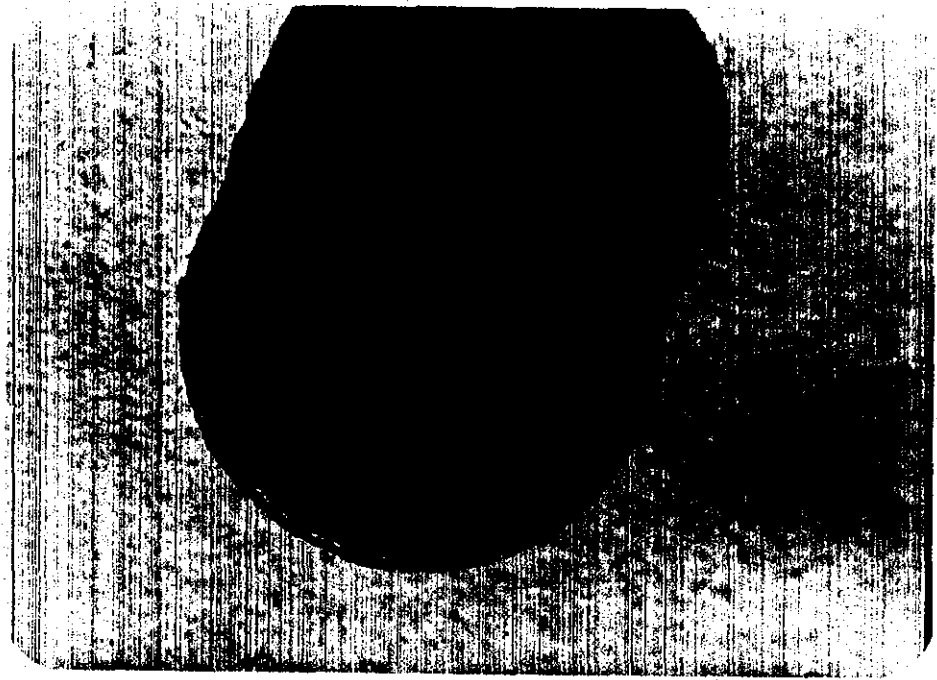


Şekil 64

75

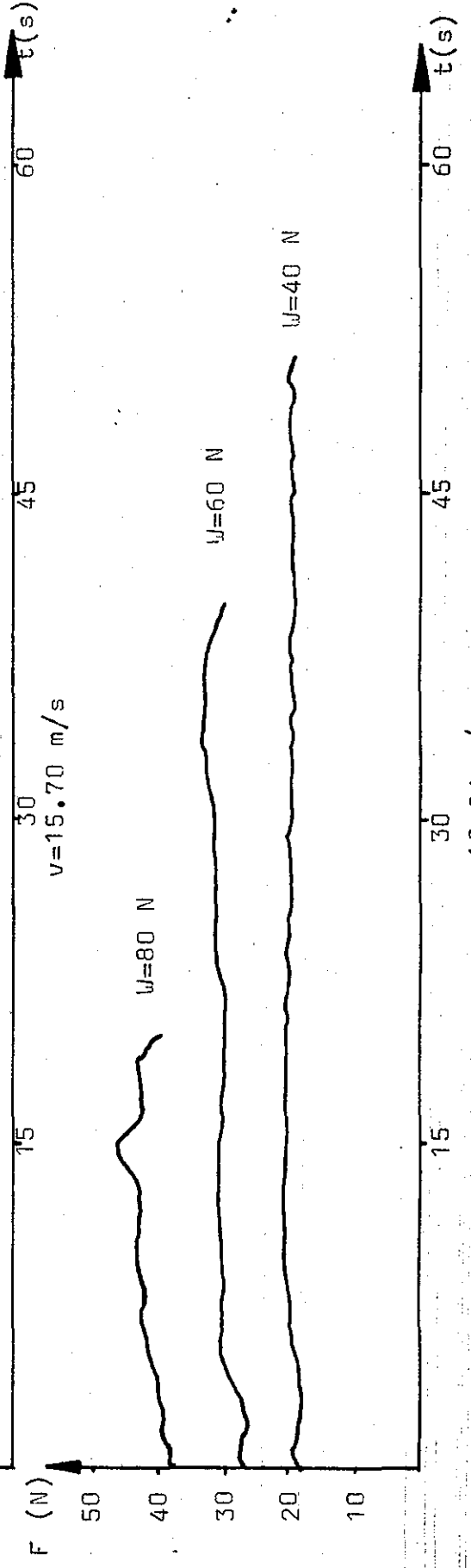
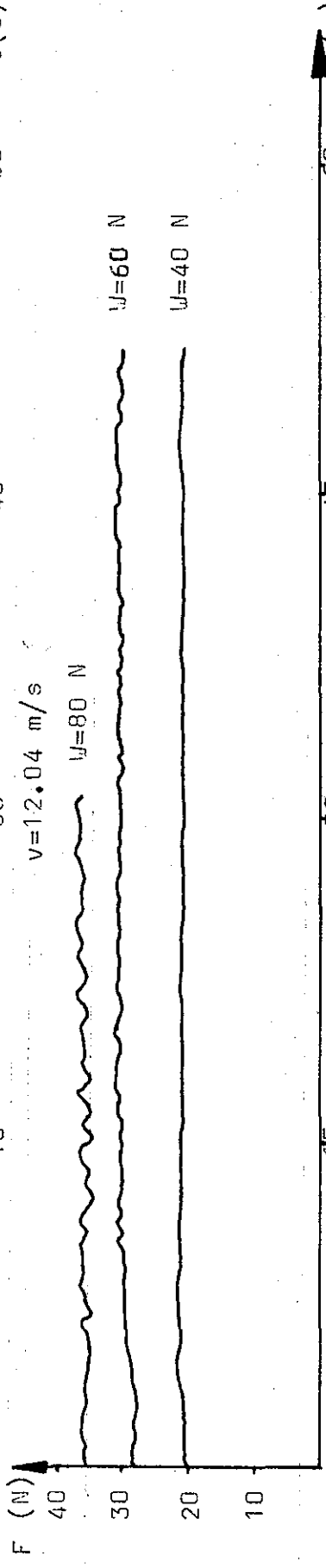
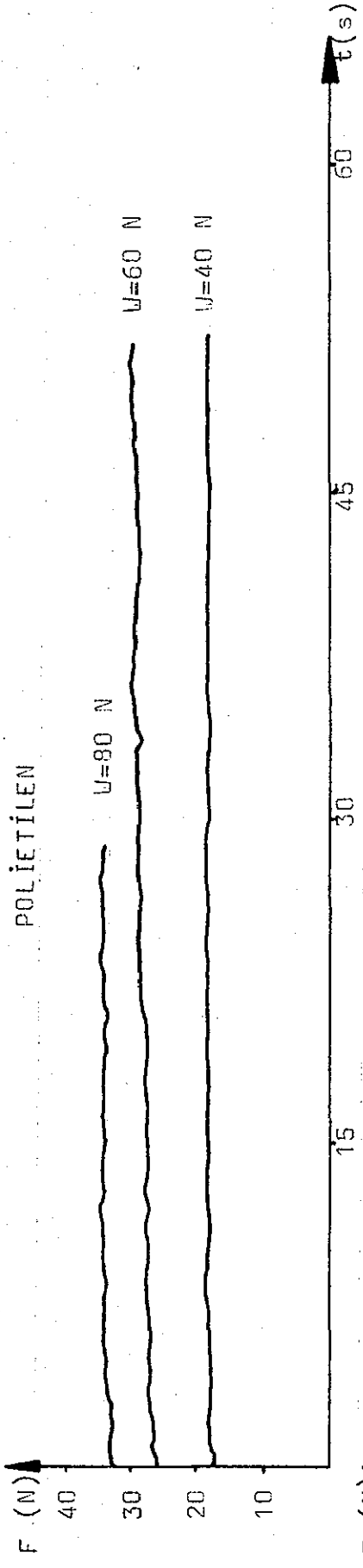


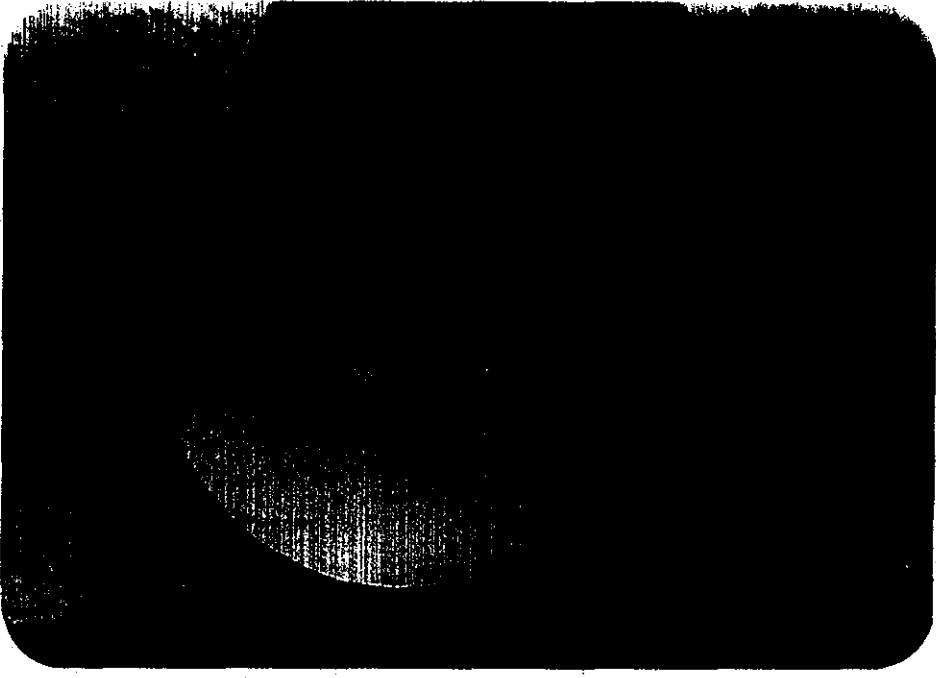
Dökme demir numunenin deneye başlamadan önceki yüzey durumu



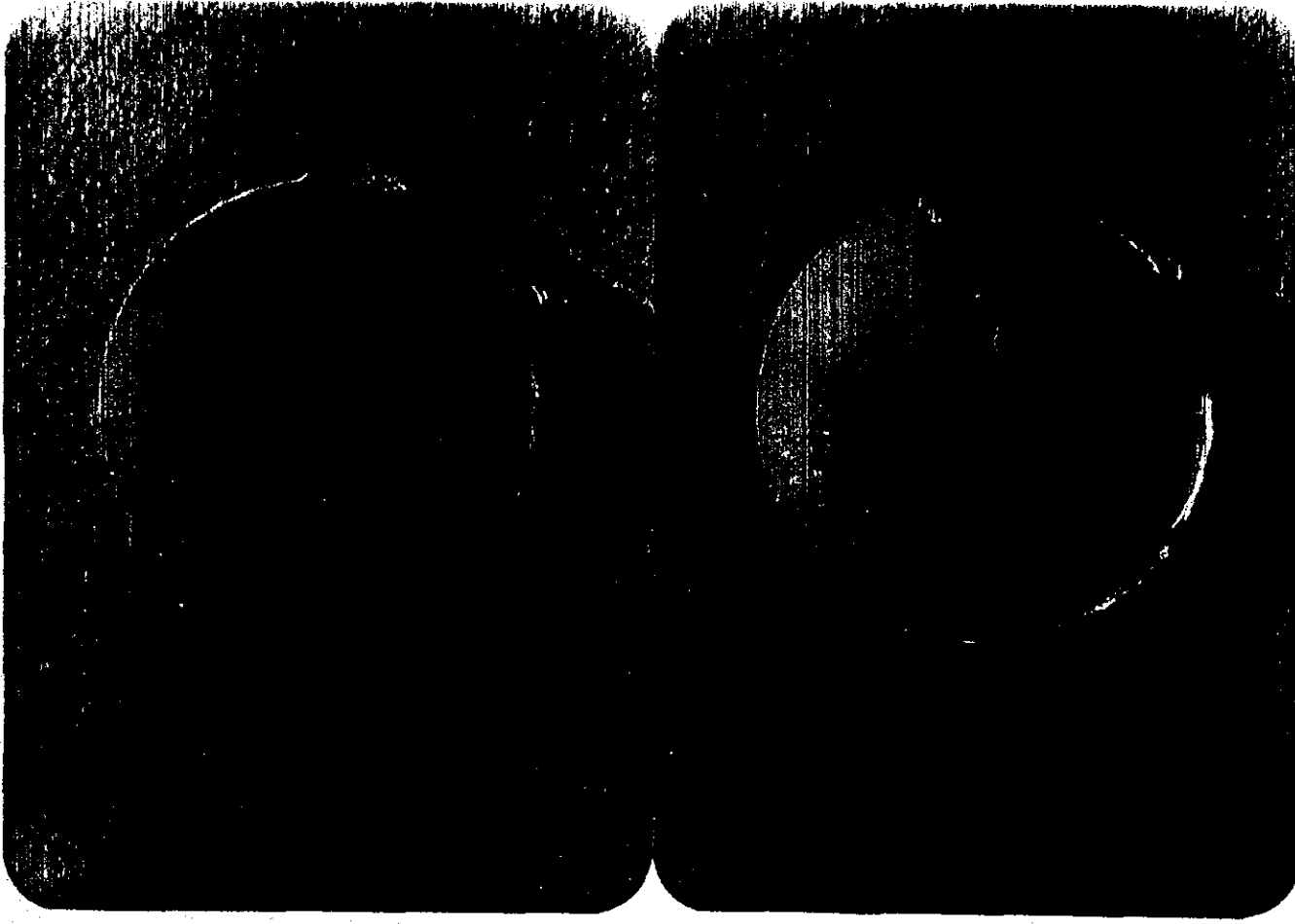
Dökme demir numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu

POLIETILÉN

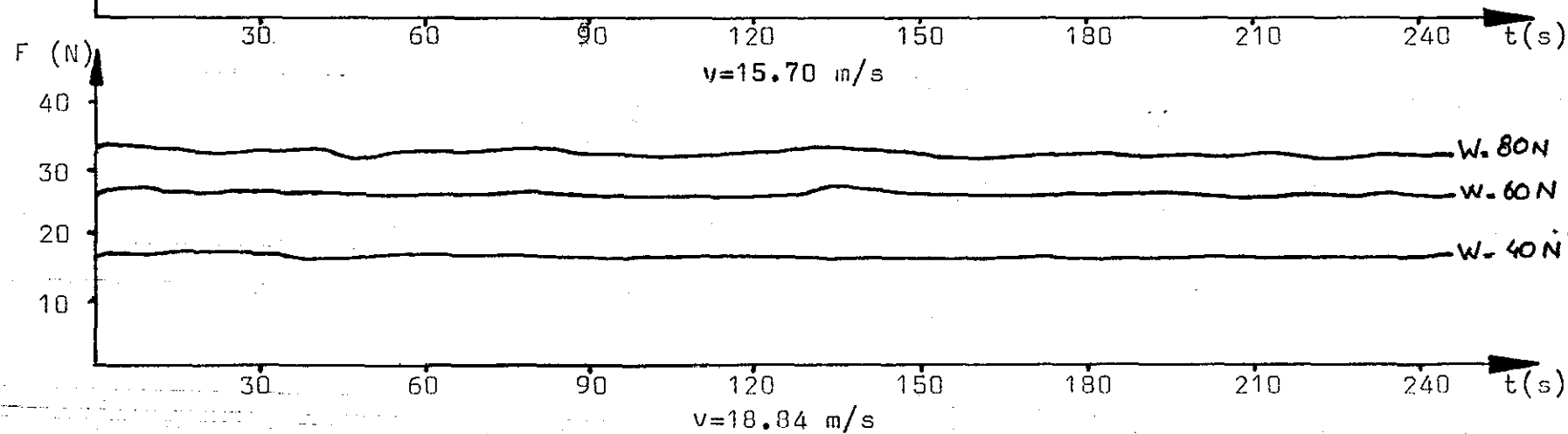
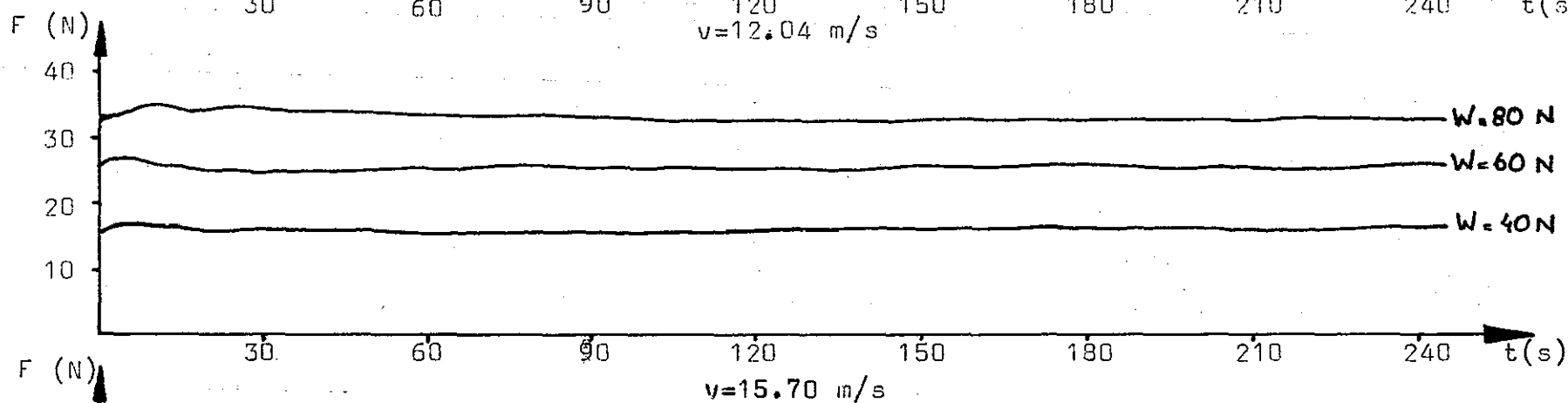
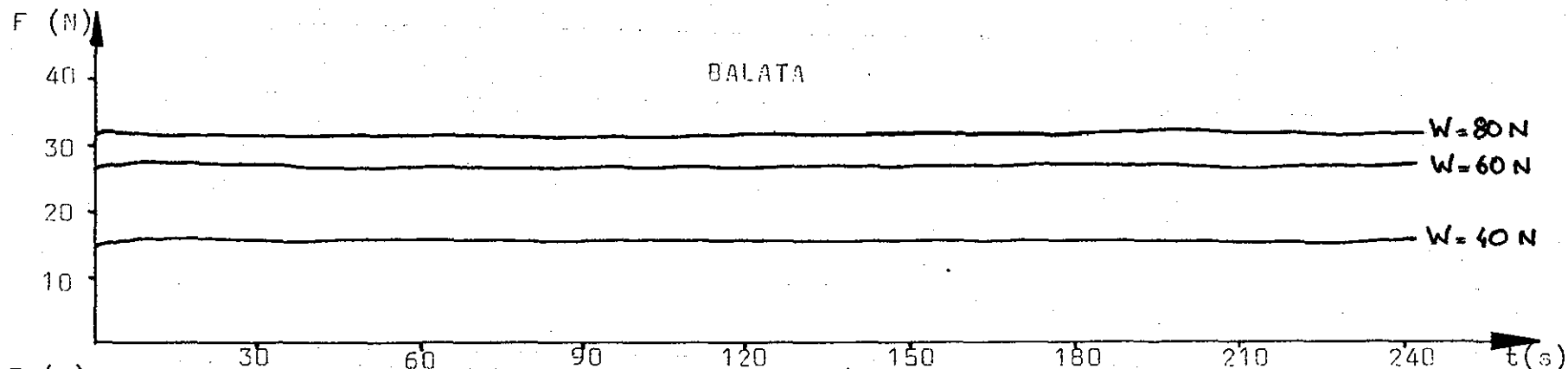


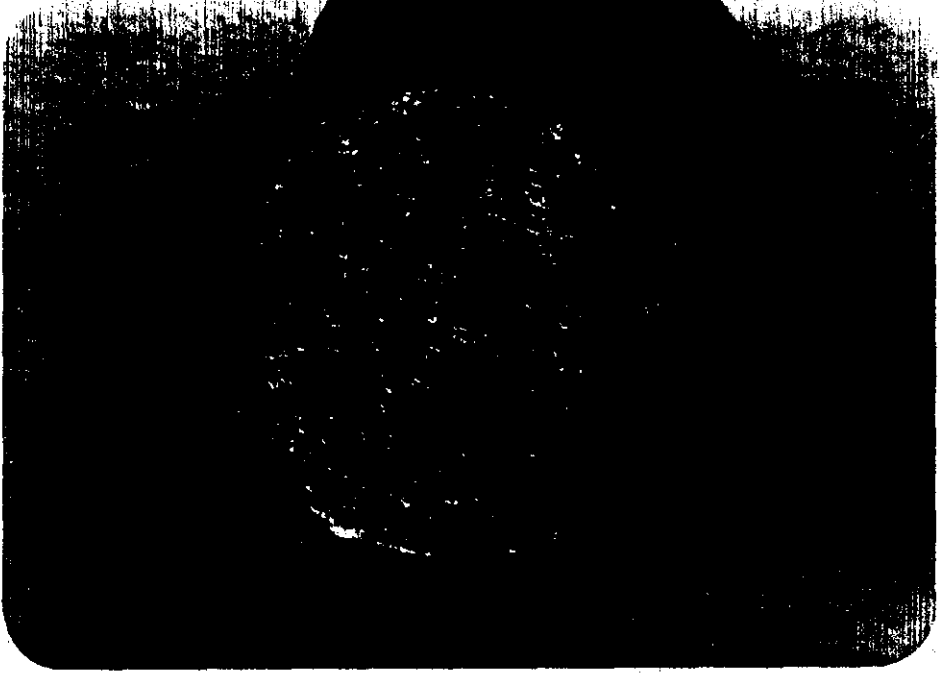


Polietilen numunenin deneye başlamadan önceki yüzey durumu

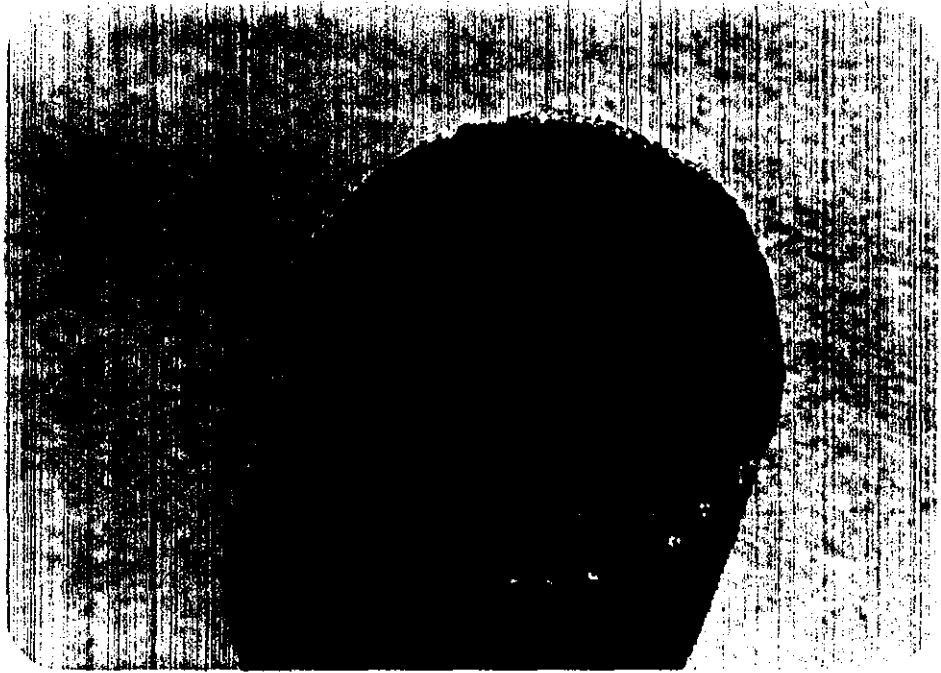


Polietilen numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu





Balata numunenin deneye başlamadan önceki yüzey durumu



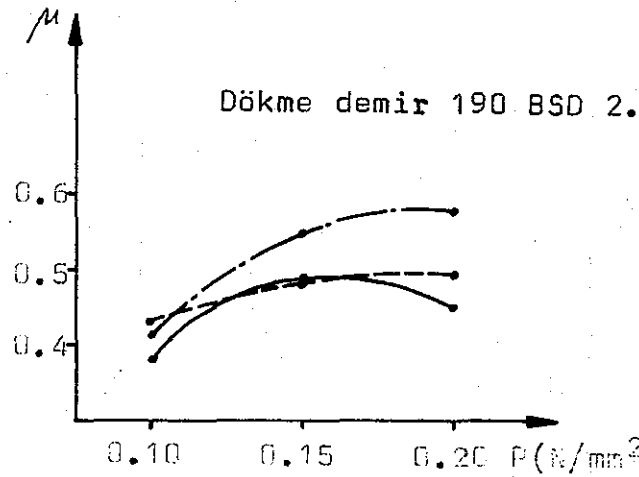
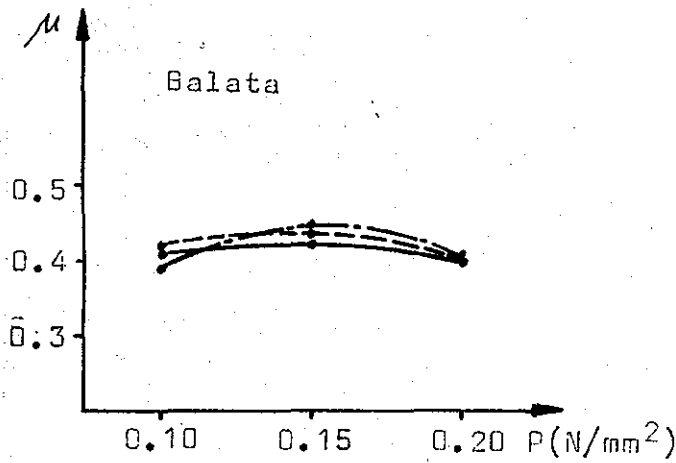
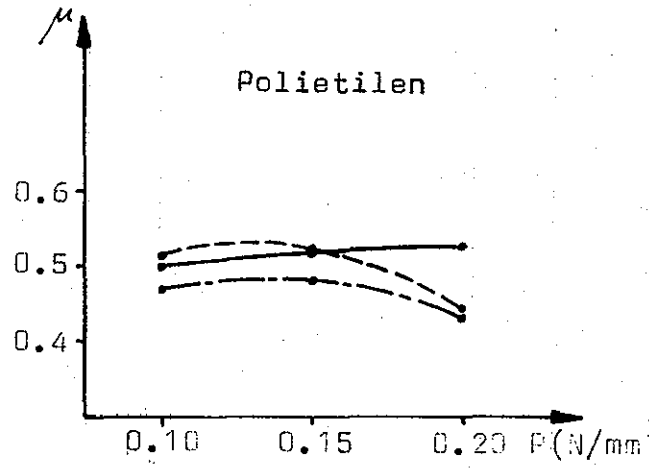
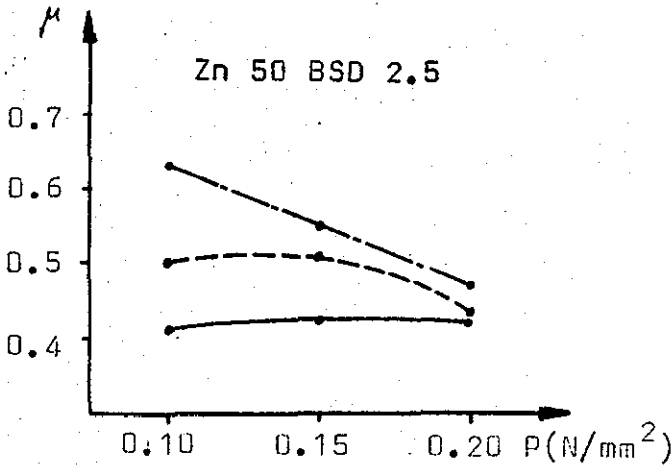
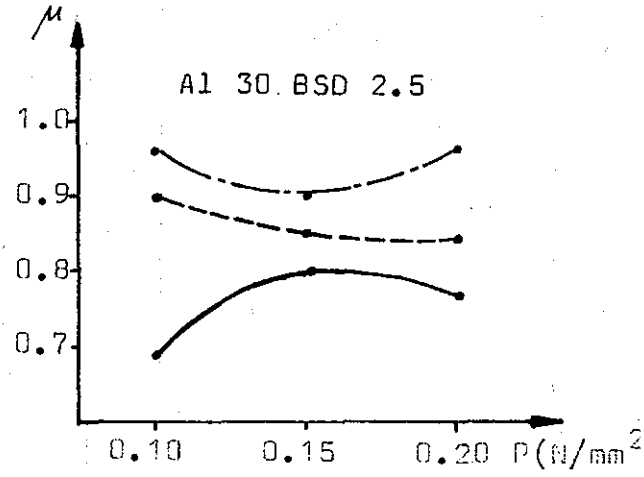
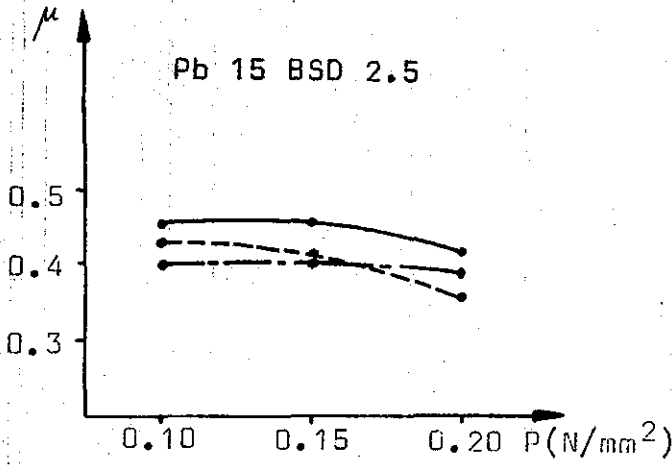
Balata numunenin deney bittikten sonraki yüzey durumu

Malzeme	P (N/mm ²)	v (m/s)	Sürtünme katsayısı			Standart sapma 6n-1	Değişim katsayısı V(%)
			μ_{\min}	$\mu_{\max.}$	$\mu_{\text{ort.}}$		
Kurşun 15 BSD 2.5	0.10	18.84	0.425	0.475	0.450	0.213	1.1
	0.15		0.45	0.5	0.467	0.942	3.3
	0.20		0.412	0.437	0.424	0.686	2.02
	0.10	15.70	0.4	0.45	0.44	0.729	4.12
	0.15		0.38	0.46	0.417	1.72	6.89
	0.20		0.383	0.4	0.378	0.743	2.4
	0.10	12.04	0.35	0.43	0.40	0.699	4.31
	0.15		0.41	0.4	0.4	0.41	1.7
	0.20		0.375	0.425	0.389	0.872	2.79
Alüminyum 30 BSD2.5	0.10	18.84	0.675	0.80	0.692	1.34	4.8
	0.15		0.75	0.883	0.802	2.10	4.3
	0.20		0.737	0.80	0.771	1.47	2.3
	0.10	15.70	0.85	1.0	0.908	3.83	10.0
	0.15		0.783	0.90	0.85	1.21	2.3
	0.20		0.825	0.875	0.841	1.27	1.9
	0.10	12.04	0.925	0.975	0.965	0.809	2.1
	0.15		0.886	0.95	0.90	1.389	2.58
	0.20		0.90	1.05	0.963	2.64	3.41
Çinko 50 BSD 2.5	0.10	18.84	0.30	0.45	0.414	2.343	14.0
	0.15		0.33	0.50	0.426	2.26	8.8
	0.20		0.36	0.46	0.416	1.98	5.9
	0.10	15.70	0.425	0.575	0.507	1.799	8.8
	0.15		0.366	0.60	0.513	2.073	6.7
	0.20		0.337	0.50	0.419	4.01	12.0
	0.10	12.04	0.45	0.65	0.629	1.75	6.9
	0.15		0.45	0.66	0.552	3.11	9.4
	0.20		0.375	0.537	0.468	4.03	10.0

TABLO VI : Sürtünme katsayıları

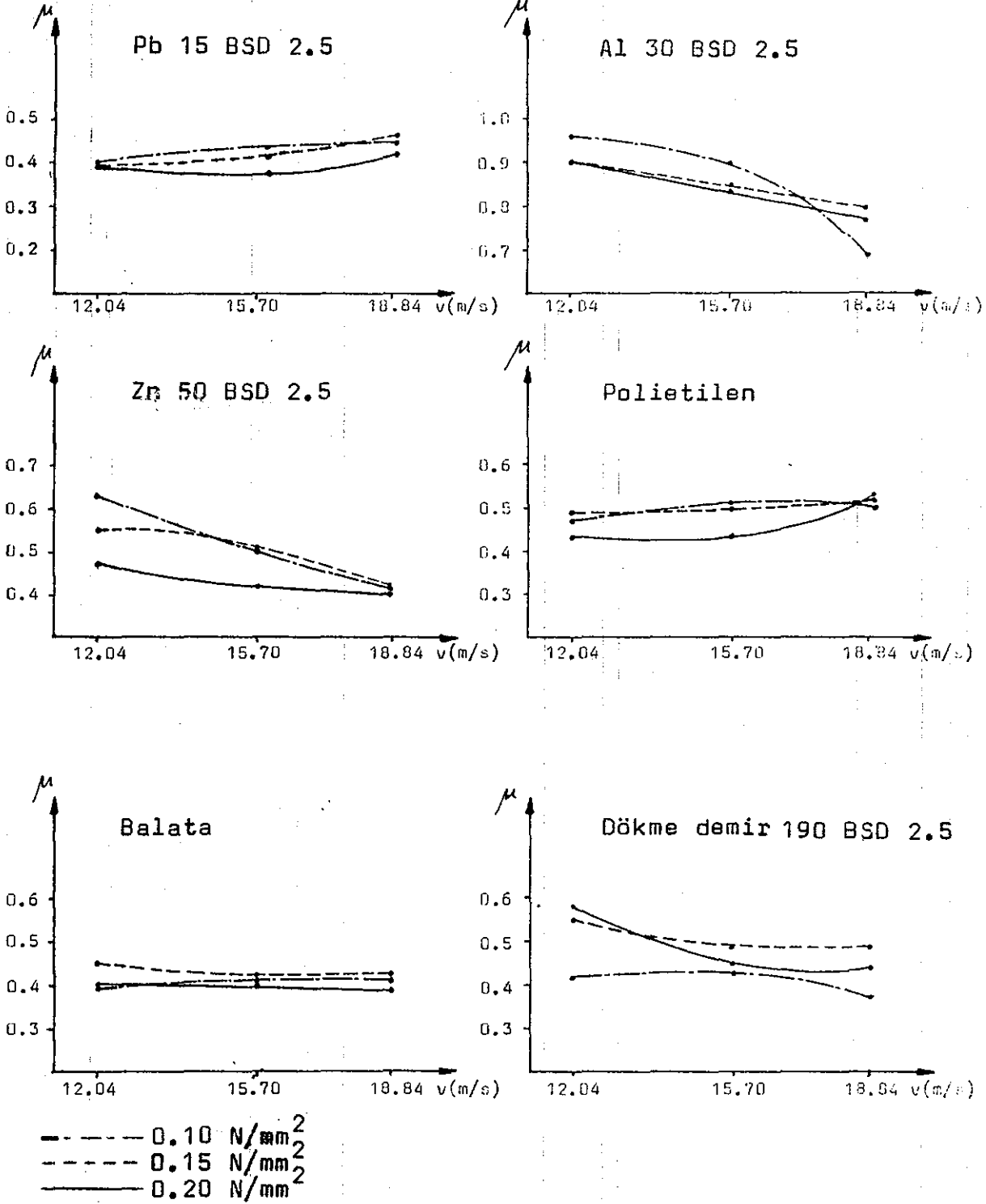
Malzeme	P (N/mm ²)	v (m/s)	Sürtünme katsayısı			Standart sapma σ_{n-1}	Değişim katsayısı V(%)
			$\mu_{min.}$	$\mu_{max.}$	$\mu_{ort.}$		
Polietilen	0.10	18.84	0.45	0.525	0.50	0.59	2.9
	0.15		0.50	0.566	0.52	1.14	3.6
	0.20		0.50	0.587	0.53	1.86	4.3
	0.10	15.70	0.475	0.525	0.516	0.48	2.3
	0.15		0.466	0.516	0.50	0.69	2.3
	0.20		0.425	0.475	0.44	0.73	2.0
	0.10	12.04	0.45	0.475	0.47	0.25	1.3
	0.15		0.466	0.516	0.487	1.04	3.5
	0.20		0.425	0.45	0.434	0.59	1.7
Balata	0.10	18.84	0.40	0.425	0.408	0.10	1.0
	0.15		0.416	0.45	0.435	0.31	1.2
	0.20		0.387	0.412	0.393	8.41	5.7
	0.10	15.70	0.40	0.425	0.41	0.55	3.5
	0.15		0.416	0.433	0.419	0.24	0.9
	0.20		0.40	0.412	0.403	0.52	1.5
	0.10	12.04	0.39	0.40	0.393	0.251	1.5
	0.15		0.366	0.383	0.45	0.43	1.5
	0.20		0.387	0.412	0.403	0.35	1.1
Dökme demir	0.10	18.84	0.375	0.425	0.387	0.721	4.6
	0.15		0.466	0.50	0.494	0.473	1.5
	0.20		0.425	0.45	0.445	0.533	1.4
	0.10	15.70	0.40	0.475	0.428	1.99	11.6
	0.15		0.466	0.50	0.492	0.534	1.8
	0.20		0.475	0.525	0.497	0.584	1.4
	0.10	12.04	0.375	0.45	0.415	0.96	5.8
	0.15		0.55	0.56	0.55	0.51	1.5
	0.20		0.575	0.585	0.58	0.46	1.0

TABLO VI : Sürtünme katsayıları



- 18.84 m/s
- - - 15.70 m/s
- · - 12.04 m/s

Şekil 66: Değişik kayma hızlarında sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi.



Şekil 65: Değişik yüzey basınçlarında sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi.

1.2 Aşınma deney sonuçları

Mal- zeme	Kayma yolu L(m)	p (N/mm ²)	v (m/s)	Aşınan tabaka ağırlığı $\Delta W(g)$	Gravimetrik aşın- ma derecesi $K_w(g/cm^3)$
ÇİNKO 50 BSD2.5.	188.4	0.075	18.84	0.02032	2.70×10^{-7}
		0.100		0.02086	2.76×10^{-7}
		0.125		0.0245	3.25×10^{-7}
	376.8	0.075		0.02121	1.4×10^{-7}
		0.100		0.02663	1.76×10^{-7}
		0.125		0.03441	2.28×10^{-7}
	565.2	0.075		0.02517	1.11×10^{-7}
		0.100		0.04926	2.17×10^{-7}
		0.125		0.10307	4.55×10^{-7}
	188.4	0.075		0.01218	1.61×10^{-7}
		0.100		0.0215	2.85×10^{-7}
		0.125		0.0300	3.98×10^{-7}
376.8	0.075	0.0322	2.13×10^{-7}		
	0.100	0.03823	2.53×10^{-7}		
	0.125	0.12555	8.33×10^{-7}		
565.2	0.075	0.04552	2.01×10^{-7}		
	0.100	0.05913	2.61×10^{-7}		
	0.125	0.21532	9.52×10^{-7}		
188.4	0.075	0.00939	1.11×10^{-7}		
	0.100	0.01934	2.56×10^{-7}		
	0.125	0.0308	4.08×10^{-7}		
376.8	0.075	0.02551	1.69×10^{-7}		
	0.100	0.04004	2.65×10^{-7}		
	0.125	0.06477	4.2×10^{-7}		
565.2	0.075	0.08802	3.89×10^{-7}		
	0.100	0.09453	4.18×10^{-7}		
	0.125	0.13405	5.92×10^{-7}		

TABLO VII

Malzeme	Kayma yolu L(m)	P (N/mm ²)	v (m/s)	Aşınan tabaka ağırlığı ΔW(g)	Gravimetrik aşınma derecesi Kw(g/cm ³)
ALÜMİNYUM 30 BSD2.5	188.4	0.075	18.84	0.01595	2.11 x 10 ⁻⁷
		0.100		0.02398	3.18 x 10 ⁻⁷
		0.125		0.07868	1.04 x 10 ⁻⁶
	376.8	0.075	18.84	0.09363	6.21 x 10 ⁻⁷
		0.100		0.11220	7.44 x 10 ⁻⁷
		0.125		0.33043	2.19 x 10 ⁻⁶
	188.4	0.075	15.70	0.01660	2.20 x 10 ⁻⁷
		0.100		0.05880	7.00 x 10 ⁻⁷
		0.125		0.14386	1.90 x 10 ⁻⁶
	376.8	0.075	15.70	0.04558	3.02 x 10 ⁻⁷
		0.100		0.70777	4.69 x 10 ⁻⁶
		0.125		0.97114	1.04 x 10 ⁻⁵
188.4	0.075	12.04	0.01710	2.26 x 10 ⁻⁷	
	0.100		0.05522	7.32 x 10 ⁻⁷	
	0.125		0.10081	1.33 x 10 ⁻⁶	
376.8	0.075	12.04	0.06472	4.29 x 10 ⁻⁷	
	0.100		0.37758	2.50 x 10 ⁻⁶	
	0.125		0.54926	3.64 x 10 ⁻⁶	

TABLO VII'nin devamı

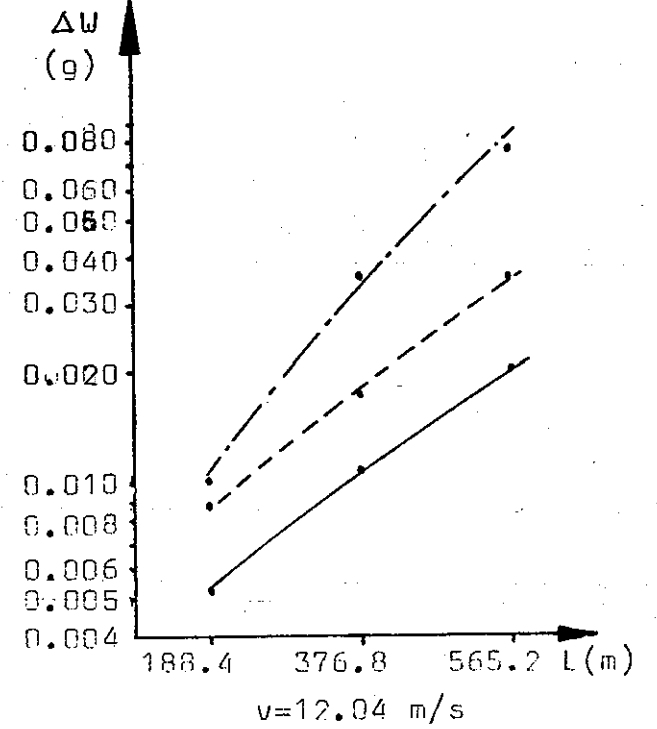
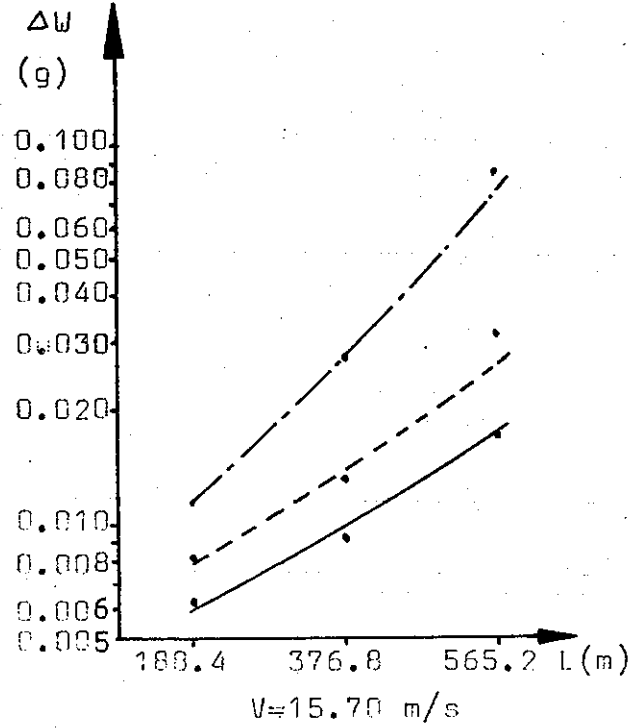
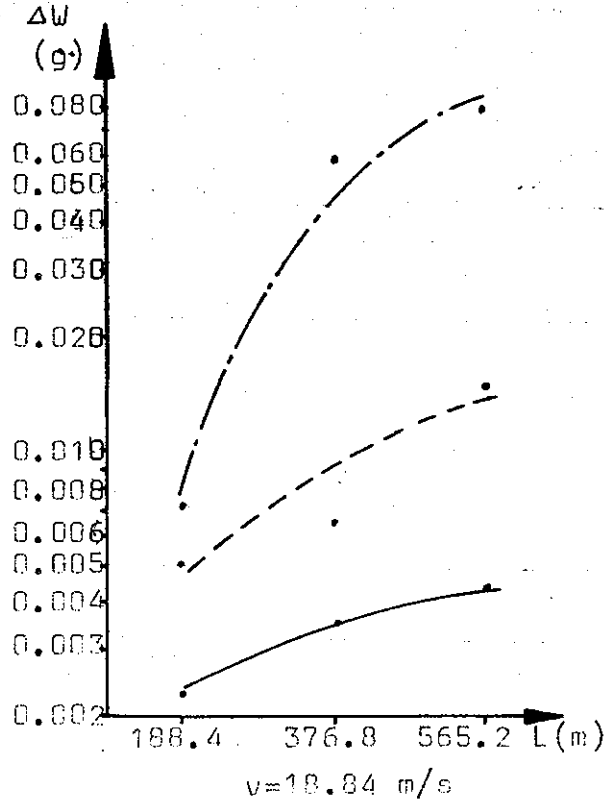
Malzeme	Kayma yolu L(m)	P (N/mm ²)	v (m/s)	Aşınan tabaka ağırlığı ΔW(g)	Gravimetrik aşınma derecesi Kw(g/cm ³)
KURŞUN 15 BSD2.5	188.4	0.075	18.84	0.00231	3.06 x 10 ⁻⁸
		0.100		0.00513	6.80 x 10 ⁻⁸
		0.125		0.00730	9.68 x 10 ⁻⁸
	376.8	0.075		0.00372	2.46 x 10 ⁻⁸
		0.100		0.00645	4.27 x 10 ⁻⁸
		0.125		0.06030	4.00 x 10 ⁻⁷
	565.2	0.075		0.00443	1.95 x 10 ⁻⁸
		0.100		0.01531	6.77 x 10 ⁻⁸
		0.125		0.07908	3.49 x 10 ⁻⁷
	188.4	0.075	15.70	0.00638	8.46 x 10 ⁻⁸
		0.100		0.00722	9.58 x 10 ⁻⁸
		0.125		0.01181	3.49 x 10 ⁻⁷
376.8	0.075	0.00892		5.91 x 10 ⁻⁸	
	0.100	0.01329		8.81 x 10 ⁻⁸	
	0.125	0.02808		1.86 x 10 ⁻⁷	
565.2	0.075	0.01652		7.30 x 10 ⁻⁸	
	0.100	0.03110		1.37 x 10 ⁻⁷	
	0.125	0.08424		3.72 x 10 ⁻⁷	
188.4	0.075	12.04	0.00520	6.90 x 10 ⁻⁸	
	0.100		0.00880	1.16 x 10 ⁻⁷	
	0.125		0.01027	1.36 x 10 ⁻⁷	
376.8	0.075		0.01127	7.47 x 10 ⁻⁸	
	0.100		0.01729	1.14 x 10 ⁻⁷	
	0.125		0.03671	2.43 x 10 ⁻⁷	
565.2	0.075		0.02041	9.02 x 10 ⁻⁸	
	0.100		0.03549	1.56 x 10 ⁻⁷	
	0.125		0.07645	3.38 x 10 ⁻⁷	

TABLO VII'nin devamı

Malzeme	Kayma yolu L(m)	P (N/mm ²)	v (m/s)	Aşınan tabaka ağırlığı W(g)	Gravimetrik aşınma derecesi Kw(g/cm ³)
KURŞUN 10 BSD2.5	188.4	0.075	18.84	0.23172	3.07 x 10 ⁻⁶
		0.100		0.36421	4.83 x 10 ⁻⁶
		0.125		0.55367	7.34 x 10 ⁻⁶
	376.8	0.075	18.84	0.57685	3.82 x 10 ⁻⁶
		0.100		1.10644	7.34 x 10 ⁻⁶
		0.125		2.70633	1.79 x 10 ⁻⁵
	188.4	0.075	15.70	0.12379	1.64 x 10 ⁻⁶
		0.100		0.16709	2.21 x 10 ⁻⁶
		0.125		0.29155	3.86 x 10 ⁻⁶
	376.8	0.075	15.70	0.23180	1.53 x 10 ⁻⁶
		0.100		0.46686	3.09 x 10 ⁻⁶
		0.125		0.84589	5.61 x 10 ⁻⁶
188.4	0.075	12.04	0.14653	1.94 x 10 ⁻⁶	
	0.100		0.26533	3.52 x 10 ⁻⁶	
	0.125		0.74290	9.85 x 10 ⁻⁶	
376.8	0.075	12.04	0.73332	4.86 x 10 ⁻⁶	
	0.100		0.82935	5.50 x 10 ⁻⁶	
	0.125		1.36690	9.06 x 10 ⁻⁶	

TABLO VII'nin devamı

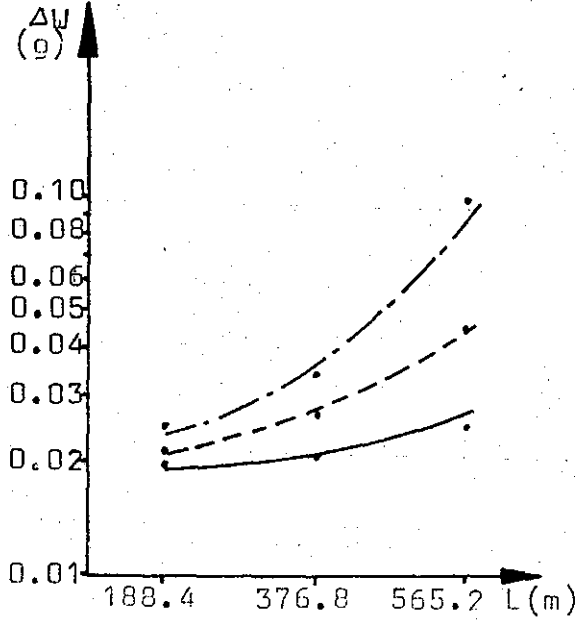
KURŞUN 15 BSD2.5



——— 0.075 N/mm²
 - - - 0.100 N/mm²
 - · - 0.125 N/mm²

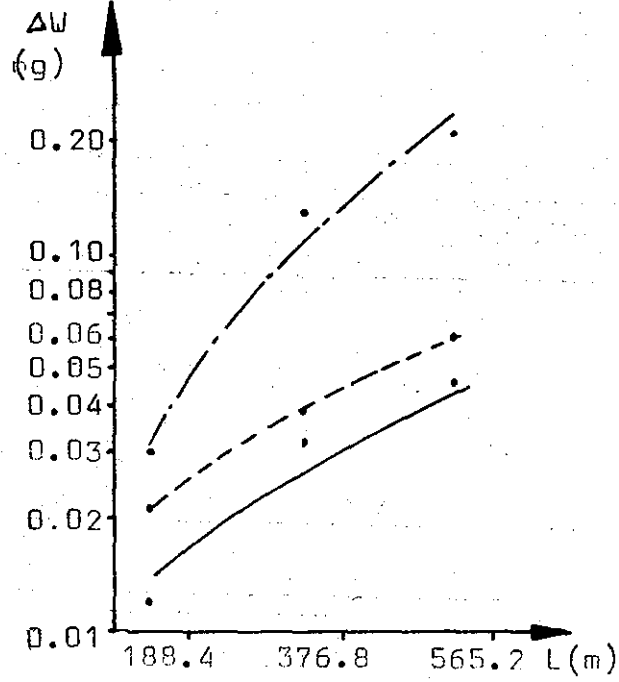
Şekil 67: Değişik kayma yollarında ve kayma hızlarında ağırlık kaybı W nin yüzey basıncı ile değişimi.

ÇİNKO 50 BSD2.5

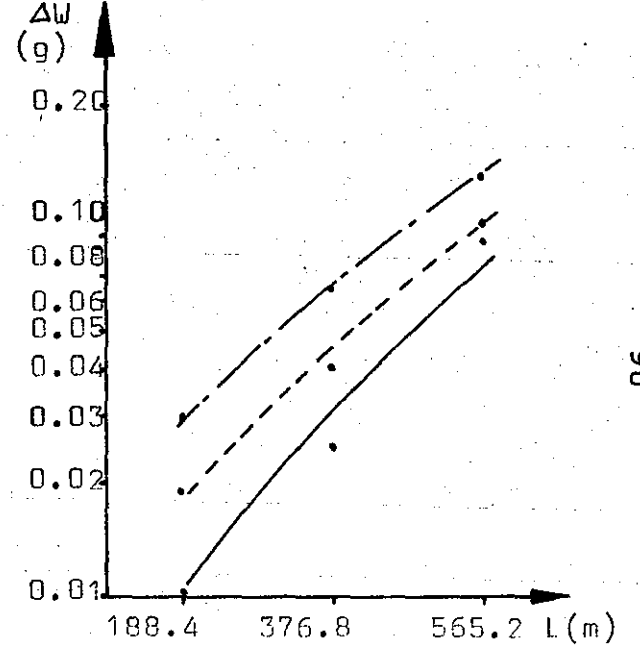


v=18.84 m/s

0.075 N/mm²
0.100 N/mm²
0.125 N/mm²



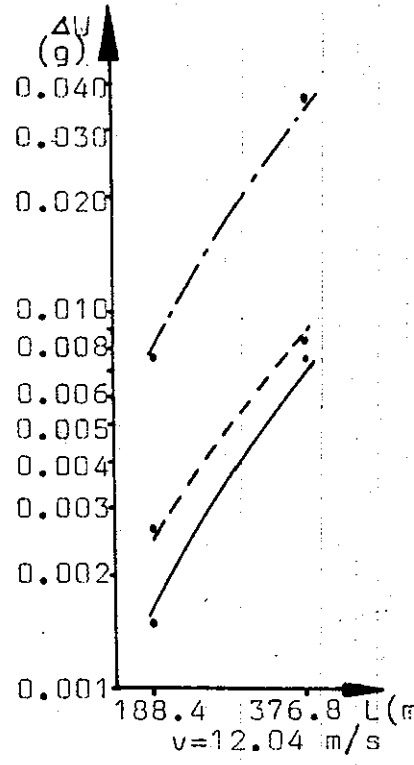
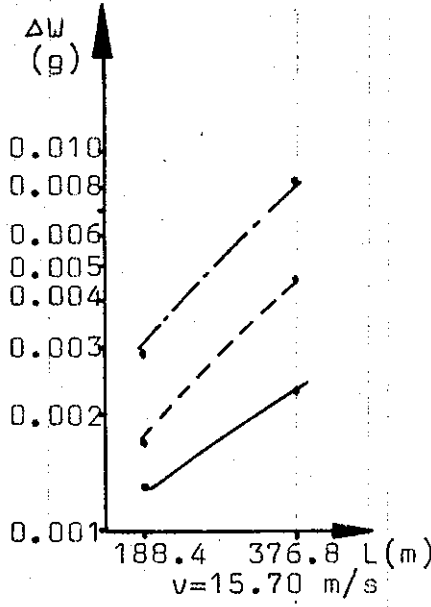
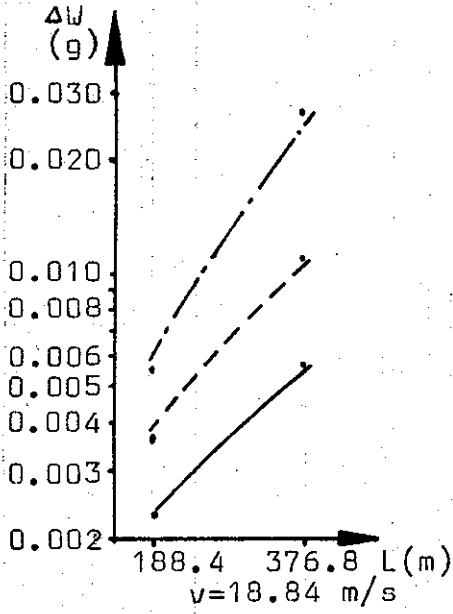
v=15.70 m/s



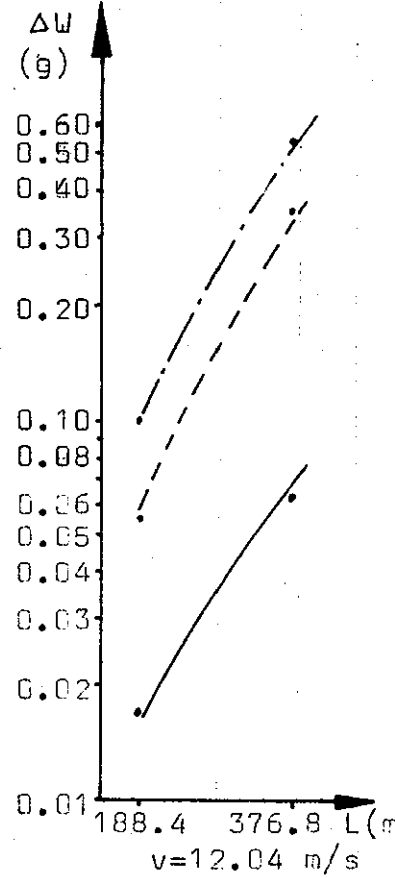
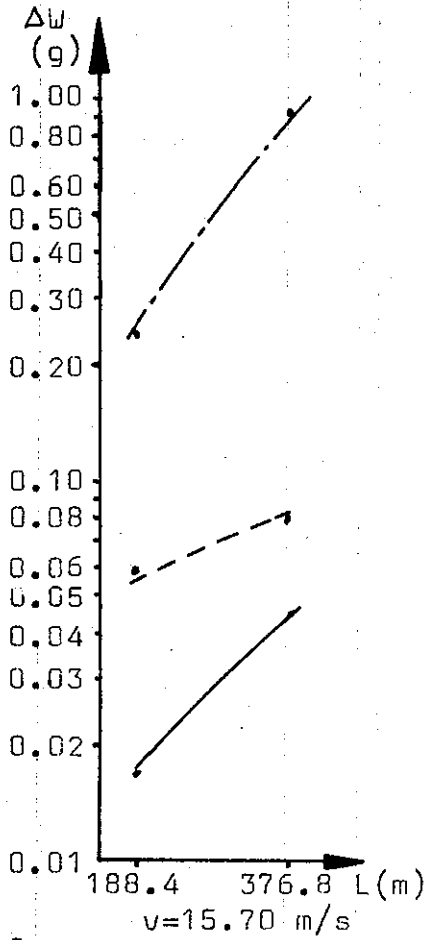
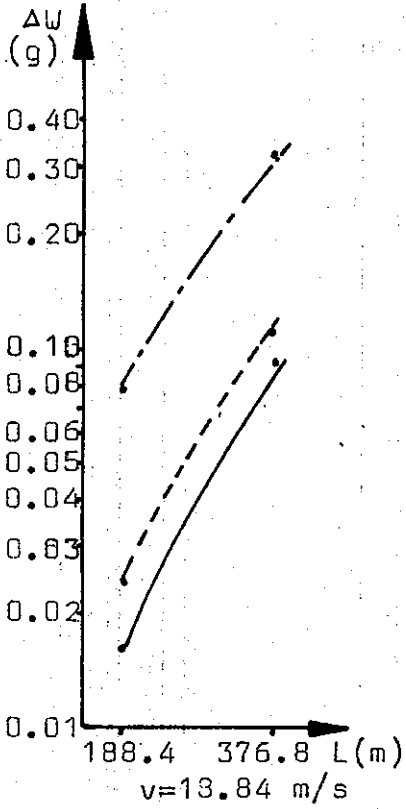
v=12.04 m/s

Şekil 67'nin devamı

KURŞUN 10 BSD2.5

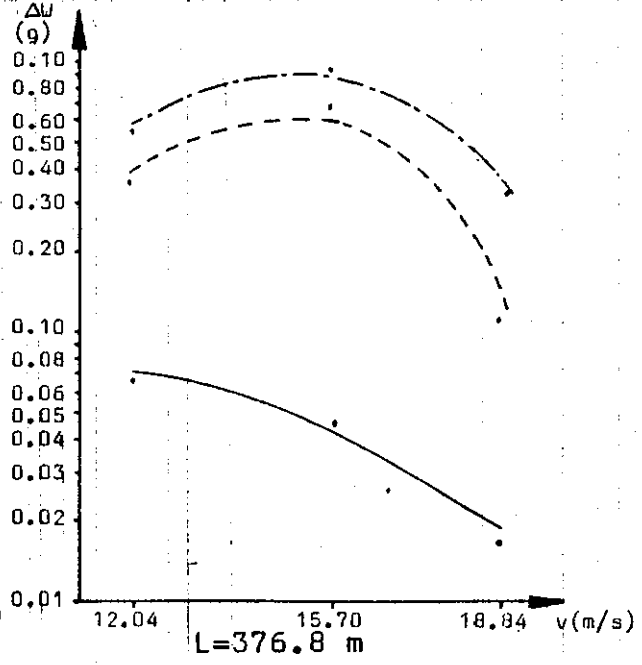
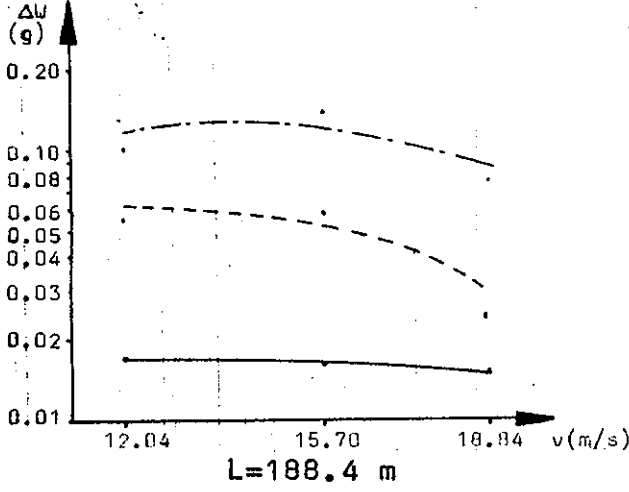


ALÜMİNYUM 30 BSD2.5

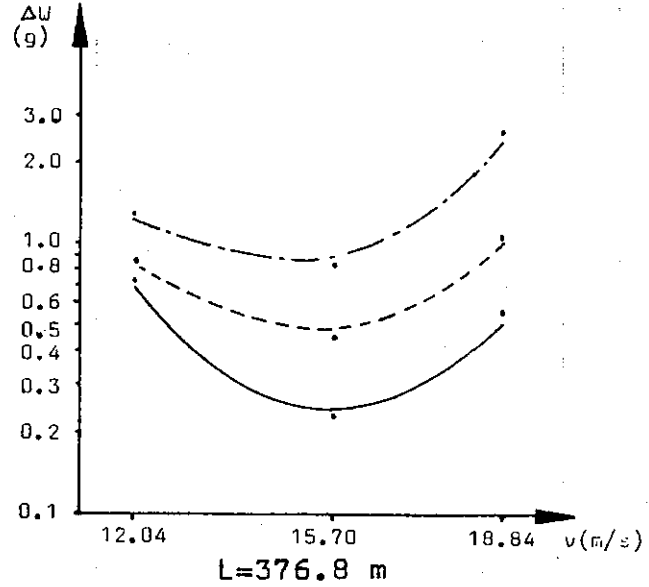
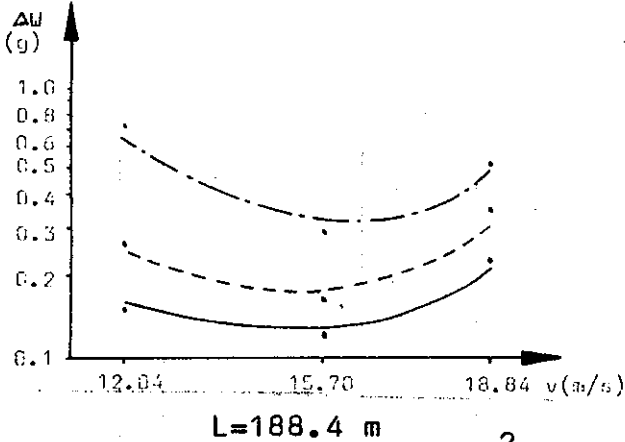


0.075 N/mm²
 0.100 N/mm²
 0.125 N/mm²

Al 30 BSD2.5



Pb 10 BSD2.5

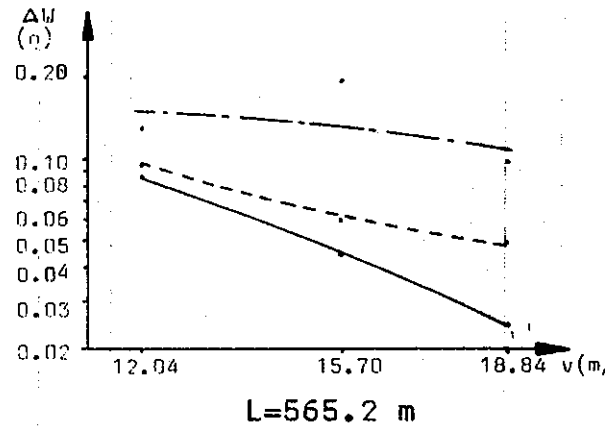
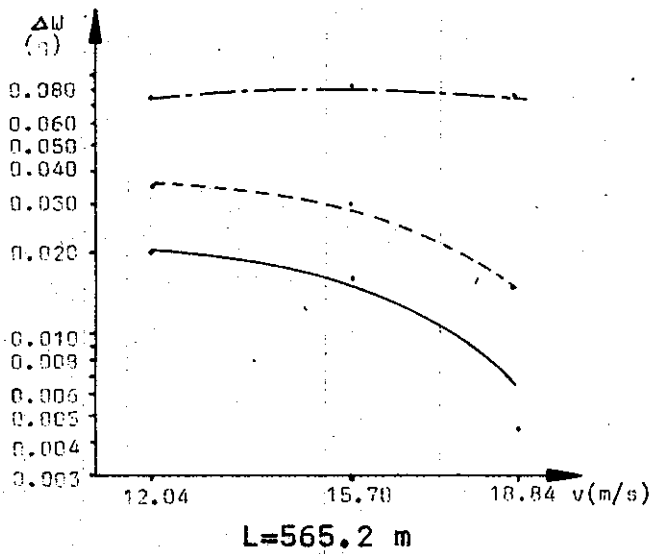
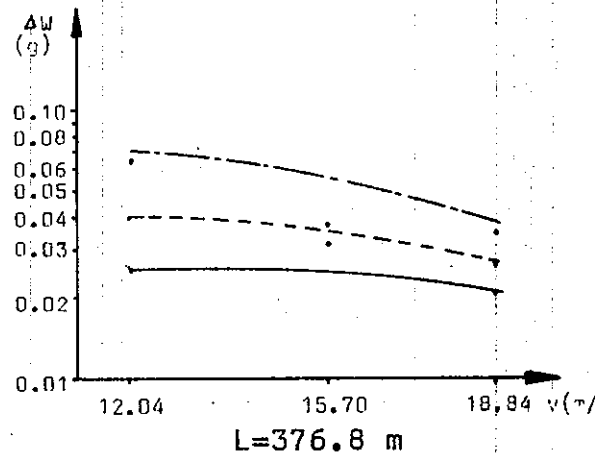
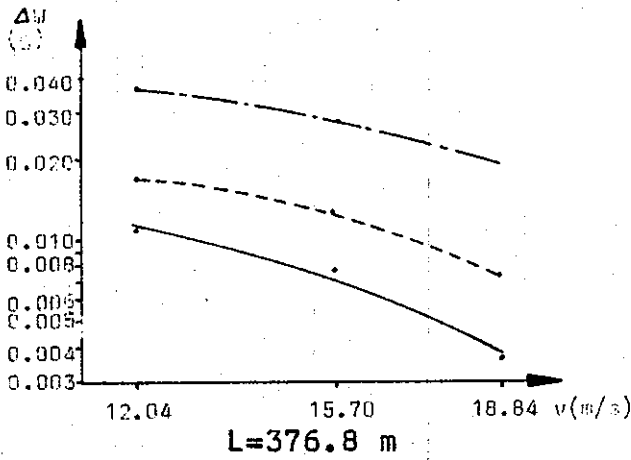
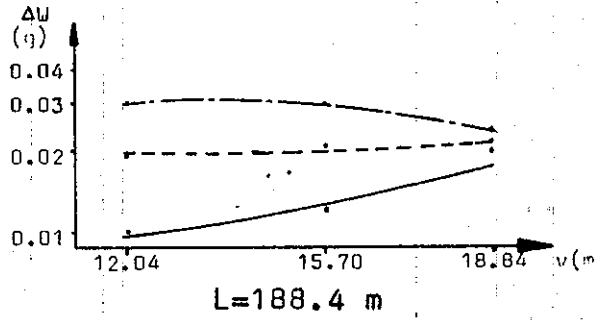
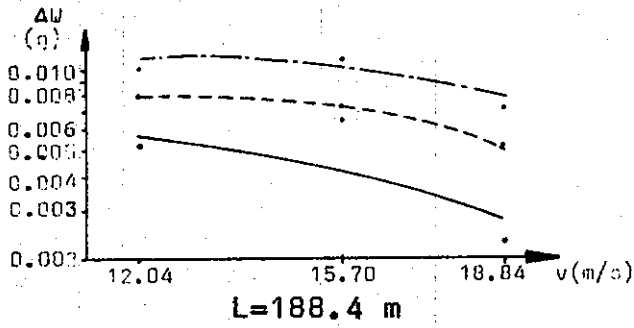


— 0.075 N/mm²
 - - - 0.100 N/mm²
 - · - 0.125 N/mm²

Şekil 68: Değişik kayma hızlarında ve kayma yollarında ağırlık kaybı W 'nin yüzey basıncı ile değişimi.

Pb 15 BSD2.5

Zn 50 BSD2.5



Şekil 68'in devamı.

2- DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Al'da kayma hızı arttığında sürtünme katsayısı azalma göstermiştir. Kayma hızı arttığında sıcaklık artışı olmuştur ve bu nedenle de malzeme yüzeyi yumuşamış buna bağlı olarak kayma sırasında, oluşan metal köprücükleri kesmek için gereken kuvvet (F) azalmış olabilir. Yani yüzeyin kesme gerilmesi azalmıştır.

$F=A \cdot \tau$ olarak bilinmektedir. A değme alanını sabit kabul edersek τ azaldığında F'de azalır.

$\mu=F/W$ dir veya $\mu=\tau/H$ olarak daha önce gösterilmişti. Buradan da görüldüğü gibi τ ve F azalınca μ 'da azalır.

Al'da sürtünme katsayısı kayma hızı sabit tutulup yük değiştirildiğinde düzensiz bir dağılım göstermiştir. Burada adezyon ve kazımanın etkisi ile sürtünme katsayısı değişmiştir. Değme alanında yükle orantılı olarak bir artış olduğu açıktır. Kayma sırasında yüzeyde bir kısım alanda oksit filmi kırılmadan kaydığı zaman μ 'da azalma olur. Kayma sırasında Al parçaları disk yüzeyine yapışmıştır ve bu parçalar yüksek tepelikler şeklindedir. Kayma sırasında yüzey bu parçalar üzerinden geçtiğinden sadece bu forma uyan kısımlarda sürtünme olması sürtünme kuvvetini azaltabilir. Bunun tersine olarak Al parçaları disk yüzeyine daha yoğun olarak yapıştığında yüzeyi keserek ayırmak için gereken kuvvet arttığından sürtünme katsayısı da artmış olabilir.

Sürtünme katsayısı 0.9 + 0.95 gibi yüksek değerlere çıktığında sistemde titreşim ve gürültü arttığı görüldü. Yüzey hasarı artan sürtünme direnciyle artmıştır.

Kurşun ve Polietilende sürtünme katsayısı yük arttığında azalmış, kayma hızının artması ile artmıştır. Bu malzemeler yumuşaktır. Yük arttığında değme alanındaki artış sert malzeme göre daha fazladır fakat burada yüzeyleri bir birinden ayırmak için gereken kesme kuvveti artan yüke göre daha az artmıştır. Bunun nedeni yüzeydeki kesme gerilmesinin küçük olmasından kaynaklanabilir. Küçük olan kesme gerilmesi (τ)

sürtünme kuvveti (F)'yi az bir oranda arttırır. Yük artışı buna göre çoktur. F/W oranı küçüldüğünden sürtünme katsayısı küçülmüş olabilir.

Pb ve PE'de hız arttığında sıcaklık artışı ile birlikte malzemeler disk yüzeyine sıvanmış ve sürtünme kuvveti artmıştır. Kurşun, disk yüzeyine sıvanmış ve kayma hızı arttığında adezyonda da artış gözlenmiştir.

Cinko'da sürtünme katsayısı hem hız hemde yük arttığında azalmıştır. Zn, Al'dan daha sert bir malzemedir. Burada sürtünme kuvveti yükten fazla etkilenmemiştir. Yani yük arttığında sürtünme kuvvetindeki artış azdır ve bu da sürtünme katsayısını azaltmıştır. Sürtünme katsayısının kayma hızı arttığında azalması ise kayma hızına bağlı olarak sıcaklığın artması ile yüzeyler arasındaki kesme gerilmesi τ 'nin azalmasından kaynaklanabilir. τ azalınca sürtünme kuvveti F 'de azalır ve bu da sürtünme katsayısını küçültür.

Dökme demir Zn ve Al'dan daha sert bir malzemedir. Sürtünme katsayısı yük arttığında artmış, hız arttığında ise azalmıştır. Çalışma sırasında yük arttığında değme alanındaki artış azdır fakat yüzeyler arasında oluşan kaynaklanmalar kuvvetli olduğundan kesme gerilmesi artar bu da sürtünme kuvvetini ve buna bağlı olarak sürtünme katsayısını arttırır. Hız arttığında sürtünme katsayısının azalmasının nedeni çalışma sıcaklığının artması ile yüzeydeki kesme gerilmesinin azalması şeklinde açıklanabilir.

Balatada sürtünme katsayısı yük ve hız değiştiğinde belirgin bir değişim göstermemiştir. Bu da balatanın sürtünme açısından kararlı bir malzeme özelliğine sahip olduğunu gösterir.

Zn, Al ve Pb 15 BSD2.5 malzemelerinin aşınma deneylerinde sabit kayma yolu ve sabit yüzey basıncında kayma hızı arttıkça aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Pb 10 BSD2.5 malzeme de kayma hızı arttığında aşınma miktarı da artmaktadır.

Kayma hızı ve yüzey basıncı sabit tutularak kayma yolu arttırıldığında aşınma oranı artmaktadır. Bu durum bütün deney malzemelerinde gözlenen ortak bir özelliktir.

VII- SONUÇ

Çalışma sırasında kayma hızı arttığında Pb,PE gibi malzemeler sert malzeme yüzeyine sıvanarak iki eş malzeme çalışıyormuş gibi davranış göstermiş ve bu da sürtünme katsayısını arttırma yönünde etki yapmıştır.Bu malzemelerde yük arttığında sürtünme katsayısı da artmıştır.

Al,Zn,DD malzemelerde kayma hızı arttığında sürtünme katsayısı azalmıştır.

Balata sürtünme açısından kararlı bir malzemedir.

Sürtünme katsayısı atmosfer şartlarına,malzemenin sertliğine ve yüzey filmine bağlı olarak değişim gösterir.Çalışma sırasında sürtünme katsayısı arttığında sistemde gürültü ve titreşim artmıştır.

Kayma hızı ve yüzey basıncı sabit tutularak kayma yolu arttırıldığında aşınma oranı artmaktadır.

VIII -KAYNAKÇA

- 1-Gediktaş, M., :Sürtünme malzemelerinin deneysel tayini:Fren kaplamaları(Doçentlik tezi).İ.T.Ü. Matbaası 1968
- 2-Bozaci, Atila:Triboloji ders notları
- 3-Akkurt, M., :Makina Elemanları cilt II, İ.T.Ü Matbaası 1980
- 4-Rabinowicz, E., Standart Handbook of Lubrication Engineering chapter 1: Dry Friction
- 5-Bowden, F.P., ve Tabor, D., :Friction and Lubrication of solids Oxford university press, London part I 1954, part II 1963
- 6-Hirst, W. :Basic principles of wear testing, Review paper 3 proc Instn Mech Engrs 1967-1968, vol:182
- 7-Barwell, F., B.Sc., Wh.Sc., :A report of the papers on wear Review paper
- 8-Hirono, F., ve Gato, S. :Fatigue cracks of bearing metals caused by reciprocating rubbing. Season 2, paper 13 proc Inst. Mech Engrs. 1966-67 vol 181
- 9-Broeder, J.J., ve Heijnekamp, J.W. :Abrasive wear of journal bearings by particles in the apparatus, experiments and observations. Proc Instn Mech Engrs. 1965-66 vol 180 pt 3K