

TRİBOLOJİ PRENSİPLERİ ve UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Kısmi Ders Notları

Prof. Dr. Hakan KALELİ
Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü
Otomotiv Anabilim Dalı

(Bu notlar dersimi alan öğrenciler tarafından kullanılacaktır, kopya edilemez, yayınlanamaz ve izin alınmadan kullanılamaz, Telif hakkı Prof. Dr. Hakan KALELİ'ye aittir. Aksi takdirde yasaların öngördüğü esas ve usuller uygulanacaktır).

Prof. Dr. Hakan KALELİ; Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı, 34349 Beşiktaş-YILDIZ- İstanbul – TURKEY Email: kaleli@yildiz.edu.tr

TRIBOLOJİ

1.GİRİŞ

Yağlama, sürtünme ve aşınma ile ilgili olan tribolojinin 19. ve 20. yy'daki sanayi gelişimi ile doğduğu düşünülür. Ancak böyle olmamıştır. Başlangıçtan beri insanoğlu sürtünmeyi azaltmanın ve aşınmayı önlemenin yollarını aramıştır. Bu amaçla ilk çağlardan beri (M.Ö.2000 yılından da eski) çömlek üretiminde kullanılan çarkın millerdeki sürtünmeyi azaltmak için yine zift kullanılmıştır. M.Ö 2400 tarihli Mısır'da bulunan kabartma resimler ağır yüklerin taşınmasını kolaylaştırmada yağlayıcıların kullanıldığını göstermektedir. Hatta Romalıların bilyalı yatağı icat ettiğini genelde bilmemekteyiz. Bize daha yakın bir örnek; resim ve heykeltraşlık alanında iyi tanıdığımız Leonard de Vinci örnek bir matematikçi olup mekanizma, makinalar ve sürtünme üzerindeki çalışmaları ölümünden 2 yüzyıl sonra dahi kullanılmıştır.

La tribologie de l'antiquité à nos jours J. Frene

Triboloji göreceli olarak yeni bir kavram olmasına rağmen, içeriği açısından kayda geçmiş tarihten daha eskilere dayanmaktadır. İnsanlığın ilk buluşlarından biri olan tekerlek gibi bu kelimenin kendisi de, etkileşen yüzeyler boyunca yük taşımalarını ilgilendiren şüphesiz tribolojik bir araçtır. Bununla beraber, bu kelime sadece 1966 yıllarında, matematikçilerin, makine mühendislerinin, malzeme bilimcilerinin, fizikçi ve kimyacıların sürtünme, aşınma, yağlama, temas mekaniği ve benzer problemlere ilişkin çalışmalarını bir araya getirmek amacıyla yaratılmıştır. Bir anlamda bu kelimenin yaratılışı, yağlama ve bunun gibi eski çözüm metodları yerine bağlı harekete bağlı olarak etkileşen yüzeyler boyunca yük taşımaya ilişkin ana problemin önemini vurgulamıştır. Triboloji, kaçınılmaz olarak çok çeşitli konuları içerdigi için hepsinin ötesinde bilimler arası bir etkinliktir.

Tribology Science and Practice, J Halling, Physics in Technology

Triboloji alanındaki çalışmaların amacı, teknolojinin her aşamasında yüzeylerin sürtünmesini konu alan durumlarda sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan kayıpları anlaşılır bir biçimde, en aza indirme ve yok etmedir. Triboloji alanındaki çalışmalar daha büyük tesis verimine, daha iyi performans, daha az bozulma ve kayda değer tasarruflara önderlik etmektedir.

Triboloji, kayan ve yuvarlanan yüzeyler kullanan modern makineler açısından çok önemlidir. Verimli sürtünmenin örnekleri; frenler, debriyajlar, tren ve otomobillerdeki tahrik tekerlekleri, somunlar ve vidalardır. Verimli aşınmanın örnekleri; kalemle yazı yazma, makinede yüzey işleme, parlatma ve tıraşlamadır. Verimsiz sürtünme ve aşınmanın örnekleri; içten yanmalı motorlar ve uçak motorları, dişliler, eksantrikler, yataklar ve sızdırmazlık elemanlarıdır.

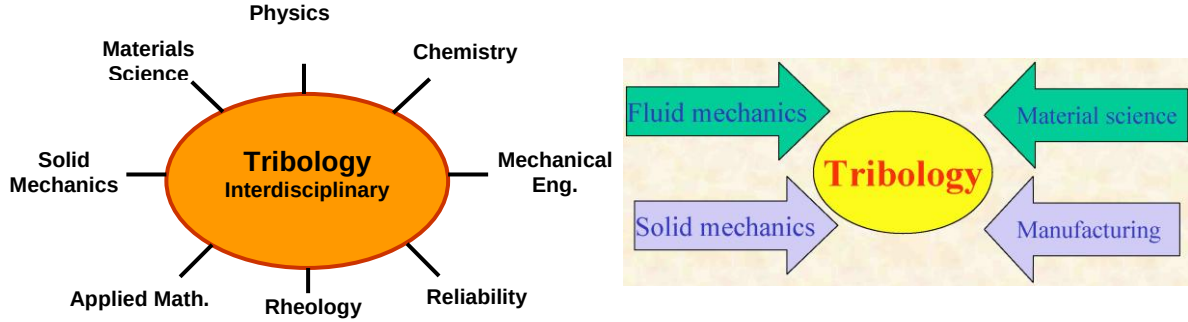
Principles and applications of tribology / B. Bhushan

Triboloji sadece endüstri açısından önem arz etmemekte bunun yanı sıra günden güne yaşamı da etkilemektedir. Örneğin; yazı yazmak tribolojik bir süreçtir. Yazı yazma işlemi kurşun (kurşun kalem) veya mürekkebin (tükenmez kalem) kağıda kontrollü transferiyle tamamlanmaktadır. Kurşun kalemle yazı yazarken, küçük bir kurşun miktarının kağıda aktarılması için kurşun ve kağıt arasında iyi bir yapışma olmalıdır ve kurşunun kırılmaması için yeterli dayanıklılık ve sertliğe sahip olması gerekmektedir. Tıraş olma eyleminde amaç, cilde verilecek en az rahatsızlıkla tüyleri olabildiğince etkili bir şekilde vücuttan uzaklaştırmaktır. Tıraş kremi bir yağlama maddesi olarak tıraş makinesi ve cilt arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Sürtünme, yürüme ve araba kullanma esnasında faydalıdır. Yetersiz sürtünmede, kayabiliriz ve araba savrulabilir! Triboloji ayrıca spor açısından da önemlidir. Örneğin; kayak ve buz arasındaki düşük sürtünme kayak yapma esnasında arzu edilir bir durumdur. B. Bhushan Nanotribology An Introduction

Prof. Dr. Hakan KALELİ; Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı, 34349 Beşiktaş-YILDIZ- İstanbul – TURKEY Email: kaleli@yildiz.edu.tr

1.1 Tribolojinin Alanları (Diğer Bilim Dalları İle İlişkisi)

Triboloji sürtünme, yağlama ve aşınma ile ilgili çalışmaları kapsamakta ve mekanik işlemleri (hareket ve deformasyon) içermektedir. Tribolojist, mekanik bir sistemin performansını (ne kadar) ve güvenilirliğini (ne kadar sürede) tahmin etmek ve iyileştirmek amacıyla mühendislik çalışması uygulamaktadır. Tribolojik arayüzeyinde, birçok karmaşık yüzeyler arası etkileşimler farklı disiplinlerin bilgisine de ihtiyaç duymaktadır:



Tribology applications, modern tribology handbook, Definition and History of Tribology

Triboloji alanı birçok disiplinle; makine mühendisliği, malzeme bilimi, mekanik, yüzey kimyası, yüzey fiziği gibi konuları içine alarak, yüzey karakteristiği, sürtünme, aşınma, yağlama, yatak malzemeleri, yağlayıcılar, yağlama sistemlerinin seçimi ve dizaynı gibi birçok konuları içine alan, mühendisliğin hayati önem taşıyan unsurunu oluşturmaktadır.

2. TRIBOLOJİNİN TANIMI VE TARİHİ

Triboloji sözcüğü ilk olarak bir dönüm raporunda Prof. H. Peter Jost tarafından yayınlanmıştır (1966).

Onun raporuna göre:

Triboloji kavramı 1966 yılında İngiltere eğitim ve bilim bakanlığı raporunda telafuz edilmiştir. Triboloji disiplinler arası bilim ve teknoloji ile, etkileşim halindeki yüzeylerin hareketi ile ilgili konular ve uygulamaları kapsar. O fizik, kimya, katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, malzeme bilimi, kayganlaştırma bilimi, güvenilirlik ve performans bölümlerini içerir.

Principles and applications of tribology / Bharat Bhushan

Triboloji ne demektir?

Triboloji sözcüğü Yunanlılardan gelir *tribos* « *τριβειν* » (Tribein), anlamı sürtme ve « *λόγος* » logos anlamı çalışma ve bilimdir. Öyleki triboloji sürtünme çalışması veya sürtünme bilimidir.

Triboloji, etkileşim halindeki yüzeylerin hareketi ve ilgili konular ve uygulamaların bilim ve teknolojisi olarak tanımlanabilir.

Principles and Applications of Tribology, Bharat Bhushan, Engineering Tribology, Friction Science and Technology From Concepts to Applications, Tribology on the Small Scale, history of tribology Ancient Middle East

2.1 Tribolojinin Tarihi

2.1.1 Klasik İlk Çağ ve 21. Yüzyıl Arasındaki Köprü

Tribolojinin tarihi, yağlayıcıların ham petrolden yapılması gerçeği son iki yüzyıl süresince önemli rol oynamasına rağmen, kaçınılmaz bir şekilde ham petrolün tarihine dayalı kalmaktadır.

Büyük bir ihtimalle ilk ham petrol ürünü uygulaması zift (bitümen) olduğu düşünülmektedir. Bu bilgi hakkındaki belirtiler M.Ö. 6000 yılına geri gitmektedir.



Şekil 2.1 Nuh'un gemisi için sızdırmazlık malzemesi olarak ziftin kullanılması.

İncil'de şu şekilde yazmaktadır : “Tanrı Nuh’la konuştu...Köknar odunundan yapılmış ,birçok odaya sahip bir kutu yap ve bu kutunun sızdırmazlığını içeriden ve dışarıdan zift/bitümen kullanarak sağla...”.

Sumeric	Akkadic	Türkçe	English
	samnum	Şişmanlatıcı yağ	oil, fat
	ittu, kupru	zift	bitumen, pitch
	şaman itti	ziftten yağ	oil from bitumen
	kupru	asfalt	asphalt, mastix
	ittu ellu, ittu namru	parlayan asfalt	shining asphalt
	ittu şadi	madencilik asfaltı	mining asphalt
	şaman şadi	madencilik yağı	mining oil
	ittu me heru	sudan zift	bitumen from water
	ittu isati, ittu şaripu	ziftin alevlenmesi veya yanması	fire or burning bitumen
	apsû	zift (yerin dibinde)	bitumen-abyss (fresh water spring)
	nabātu - naptu	parlayan nafta	shining - naphta

Şekil.2.2 Mineral yağ ürünleri için çivi yazısı karakterleri.

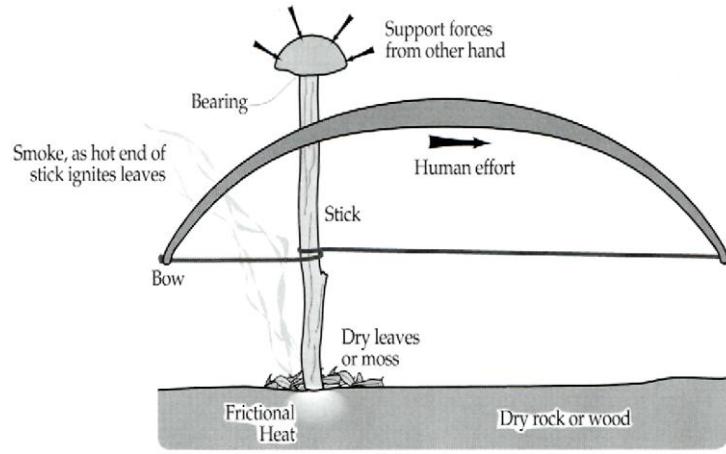
Açıkça, Antik Asya'nın uygarlık dilinin gelişimi ile ham petrol ürünleri içinde çivi yazısı karakterleri geliştirilmiştir.

2.1.2 Tarih Öncesi Çağ



Şek.2.3 Ateşin yakılması.

Hareketin engellenmesi örneğin iki parça odun arasındaki sürtünmeden dolayı alevin meydana gelmesi biliniyordu (100 000 sene önce). Muhtemelen zift (bitumen) hareket temaslarında gıcırdama sesini önlemek için kullanılıyordu.

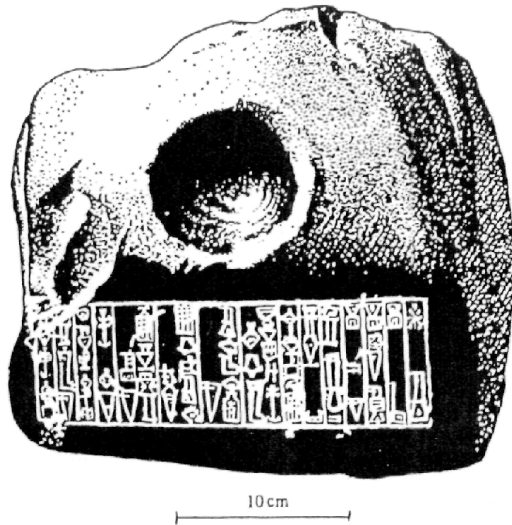


Şekil 2.4. Tribolojiye ait deneye ilk örnek olarak dönen çubuk kullanılarak ateşi yakılması için bir yontma taş devrine ait bir yöntem.

Eski insanlar, ısı, ışık ve vahşi hayvanlardan korunma sağlayan ateşin ürettiği bu kıvılcımın paha biçilmez ticari bir mal olabileceğinin farkına vardılar. Büyük bir ihtimalle deneme veya hata yolları ile geliştirilen kayan yüzeyleri kapsayan daha ileri yöntemler, İki taşı birbirine vurarak ateş üretme gibi ilkel yöntemlerin yerine geçti.

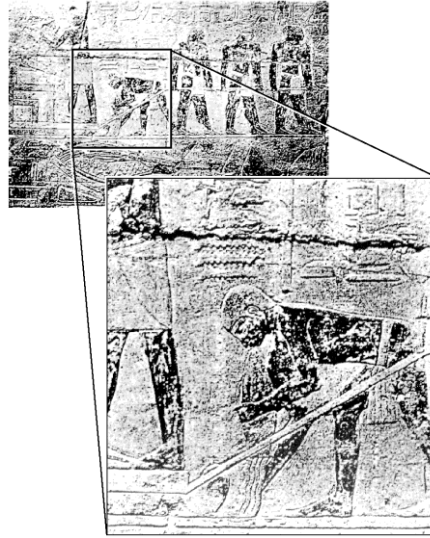
Yüksek hızda kaymanın önemi, ateş oluşturmak için yuvarlatılmış bir çubuk ucunun diğer bir odun parçasına karşı döndürülmesiyle tanındı. Kayma hızını ve çubuğun ucunda oluşan sürtünme ısını arttırmak için, yayın ipi çubuğun çevresine dolandırıldı ve yayın çubuğu daha hızlı döndürmesi için ileri geri itildi. Küçük odun kıymıkları ve kurumuş yapraklar daha sonra dönen çubuğun ucuna yerleştirildi. Yaprak ve odun parçaları dönen temasdaki sıcak yüzeylere dokunduğu zaman ateşi yakalayabileceği bilinmektedir.

Odun parçaları veya yapraklar yanmaya başladığı zaman, ateşi yeterli bir büyüklüğe getirmek için daha fazla odun yada yapraklar eklendi. Dönen çubuk ile ateş yakılması şekilde verilmiştir. **Experimental Methods in Tribology**



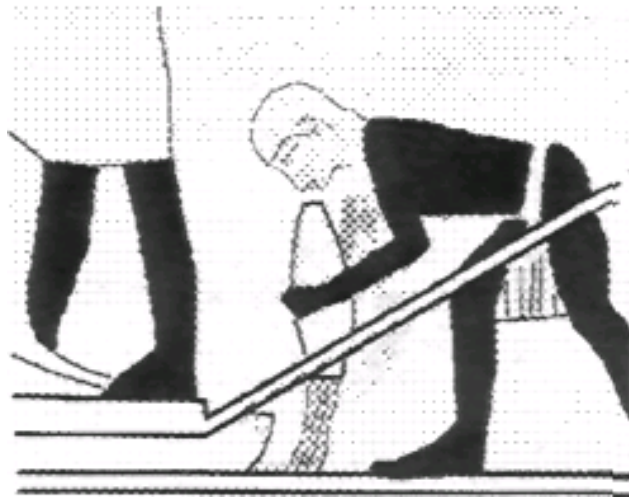
Şekil. 2.5. Tapınak kapısının alt dayanağı için taş soket. Kitabe kaydı, tapınağın restorasyonunun Gudea'da, sümerli Lagosh prensi tarafından yapıldığını gösterir (yaklaşık M.Ö. 2500).

Eski medeniyetler çömlekçi çarkları, kapı menteşeleri ve tekerlekli arabalar gibi oldukça karmaşık tribolojik cihazlar geliştirdi. Bu çağda tribolojik elemanlar, taş ve odunun içinin delinmesi ile sınırlanmıştır.



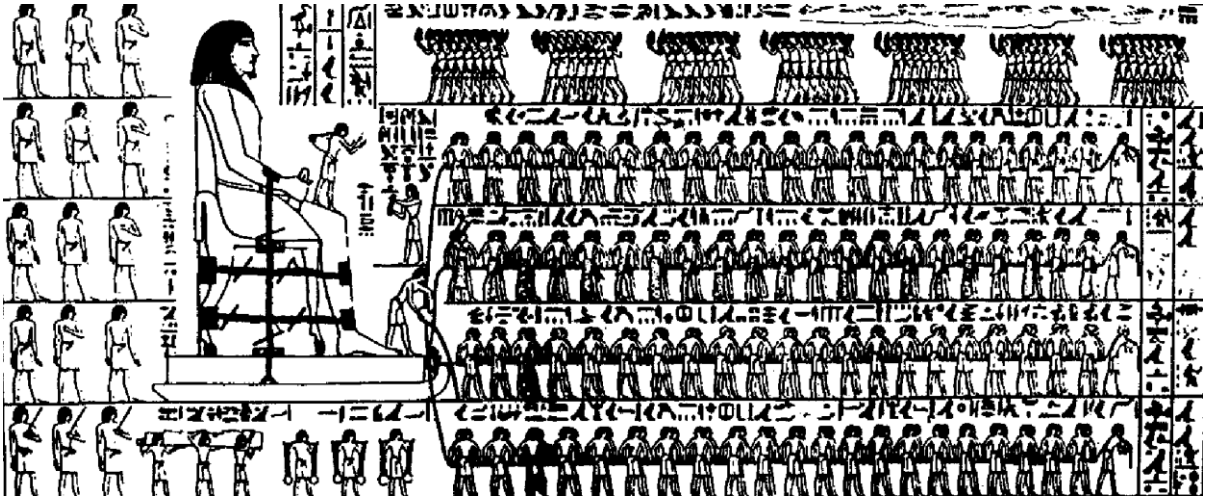
Şek.2.6 Ti'nin heykelinin taşınması (Mısır, Saqqara'daki mezardan, yaklaşık M.Ö. 2400 civarı) - Tarihe geçen ilk tribolojist.

Saqqara'da Tehuti-Hetep heykelinin üzerindeki oymalar bir mısırlı tribolojistin Ti heykelinin taşınmasında kızıağı yağlamak için aşağı eğildiğini gösterir. Ahşap kızak kullanarak taşınan bu Mısırlının dev taş heykeli taşınması yağlayıcıyı uygulayan ilk tribolojisti göstermektedir (Mısır, yaklaşık olarak MÖ 2400)



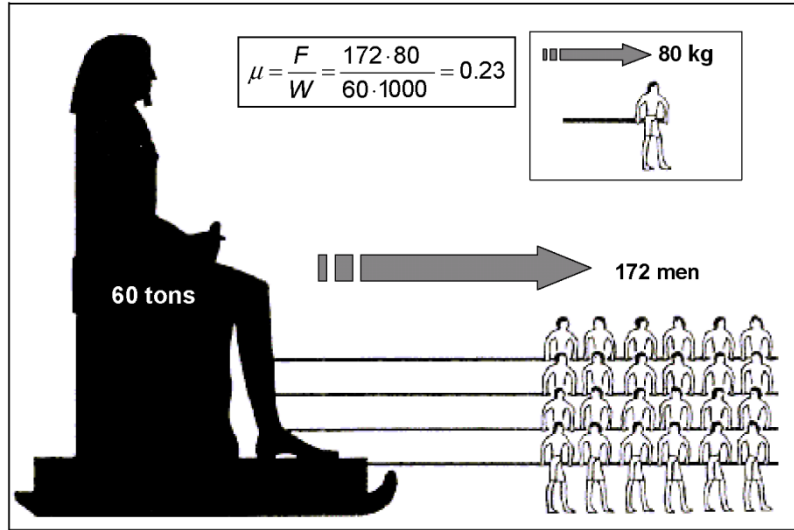
Şekil.2.8 Mısır-Saccara'da bir Ti heykeli'nin üzerinde durduğu kızıağın önünde, muhtemelen yağlayıcı olarak suyu döken bir adam. (Mısır). M.Ö. 2400 dolayları.

Resimdeki en ilginç detay, ayakta duran ve kızıağın önündeki zemine hızlı bir şekilde kavanozdan yağlayıcı döken adamdır. O ilk tribolojisttir. Burada, yağlamanın önemi ortaya çıkmıştır. Bu yağlamanın ilk örneğidir.



Şekil.2.7. El-Beshed’de Tehuti-Hetep heykelinden bir resim (yaklaşık M.Ö.1880) dev mısır heykelinin taşınmasını gösterir. Adam kızak üzerinde.

Yaklaşık M.Ö. 1880 yıllarında, El-Beshed’deki Tehuti-Hetep türbesinden alınan resim, mısırlıların taş taşıma yöntemini anlatır. Bu resim, heykelin makara veya manivela yardımı olmadan, kızak vasıtasıyla hareket ettirildiğini gösterir.



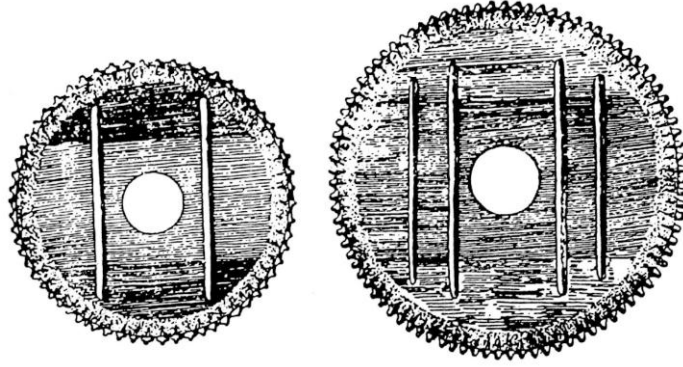
Şekil.2.9 Antik Mısır’da Triboloji; Dev Mısırlı heykelin taşınmasında sürtünme katsayısının hesaplanması.

Sürtünmenin hesaplanması, kızak ve ahşap boşlukları arasında yağlayıcının uygulandığını kanıtlamaktadır. Bu devirde kullanılan yağlayıcı tipleri hakkında bazı varsayımlar bulunmaktadır :

- Su,
- Nil Nehri’nden alınan çamur (ve su),
- Zeytinyağı katkılı Nil Nehri çamuru.

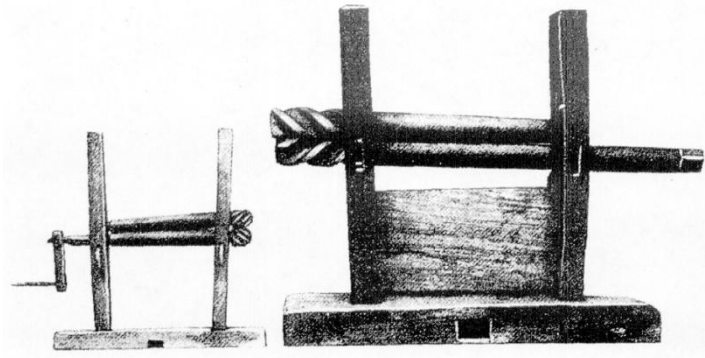
Bir girişim içerisinde bulunan Dowson iddalarını daha da fazla desteklemek için dikkate değer bir hesaplama yaptı (1988). Ona göre El-Bersheh deki resimde 172 adam vardır, bir kölenin gücünü ortalama 800N varsayarak, $172 \times 800 \text{ N} = 137.6 \text{ kN}$ toplam sürükleyen kuvvet elde edilir. Dev heykelin ağırlığını (rastgele) 600 KN varsayarak, “kızak gerçekten yağlamış odun kalaslar üzerinde kayıyordu” sonucuna vararak sürtünme katsayısını $\mu = 60 / 137.6 = 0.23$ olarak hesaplar ve bu değeri nemli odun-odun arasındaki ($\mu = 0.2$) ile kıyaslar.

Aşınmanın azaltılması için kenarlarına bakır çivi çakılmış tekerlekler (Şekil.2.10).



Şekil.2.10 Susa Apadana mezarından, ahşap jantlı çivi çakılmış üç parçalı tekerlek, M.Ö. 2500 civarı.

Helis dişli tekerleklere sahip pamuk çekirdeğini ayırma ekipmanı.



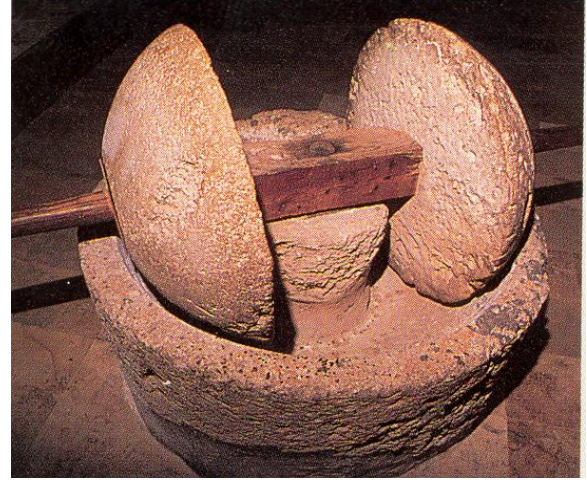
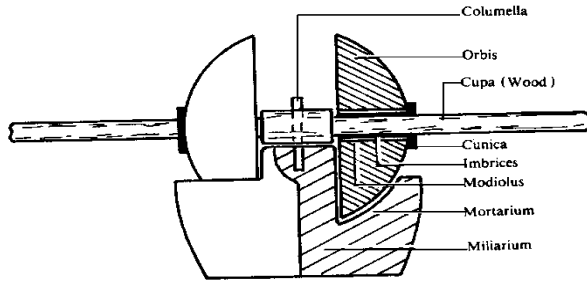
Şekil.2.11 Hindistan'dan pamuk çekirdeği ayırma makinesi.

2.1.3 Yunan Ve Roma Çağı (M.Ö 900'den M.S. 400'e kadar)

Bu çağ kaymalı yatakların, dişlilerin ve rulmanlı yatakların ilk tasarımlarının geliştirilmesi olarak tanımlanmıştır.

Makina elemanlarının bilimsel gelişimini gösteren birçok örnek bulunmaktadır:

1. **Trapetum** olarak bilinen öğütme teçhizatının gelişmesi M.Ö. 4.yy da Yunanistan'da zeytin ezme değirmeni şeklinde ortaya çıktı.

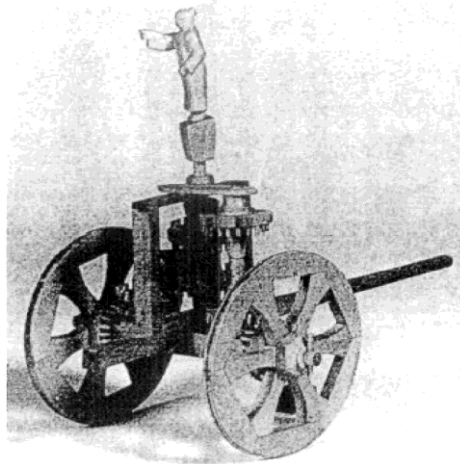


Şekil.2.12 Trapetum bir zeytin ezme değirmeni.

Değirmenin temel özellikleri şekilde gösteriliyor (Şek.2.12 Trapetum bir zeytin ezme değirmeni). Çekirdekleri ezmeden, meyveden ayıklamak için tasarlanmıştır. Daha sonraki safhalarda küspe ezilerek yağ üretilmiştir. "İki yarıküresel taş (Orbis), ana yapıyı oluşturan merkez direğe sabitlenmiş dikey demir muylu (*columella*) etrafında dönen bir ahşap direk (*cupa*) üzerine monte edilmiştir. Bazı durumlarda yuvarlak halka şeklinde öğütücü - tekne (*mortarium*) lavdan (erimiş taş) yapılmıştır.

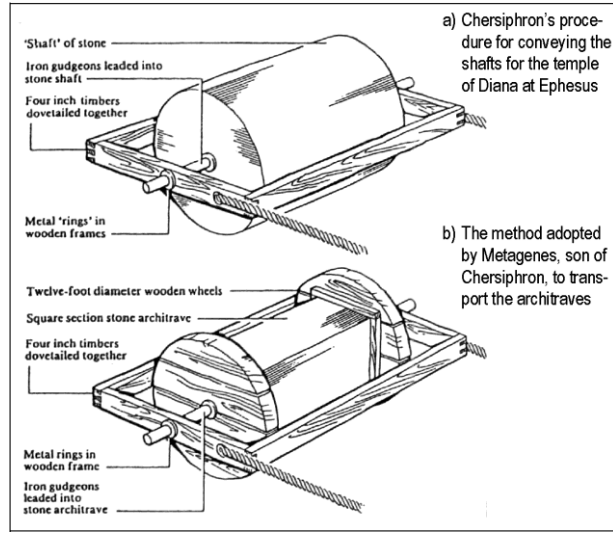
Trapetuma olan tribolojik ilgi, görünüşe göre demirden yapılmış olan Orbis içerisindeki yatakların doğasıyla ortaya çıkar. Eğer taş oduna karşı sürtünürse, *cupa* ile *orbis* arasındaki aşınmanın aşırı olacağı açıktır; bu da makina performansı üzerinde aşınmanın zararlı etkisini tanımda ve problemin çözümü için tribolojik bir yaklaşım açısından mükemmel bir ilk örnek olacaktır. İnsan veya hayvan gücü tarafından, *cupa*'nın iki ucuna eğer yaklaşık eşit ve ters kuvvetler uygulanırsa, *columella* ile *cupa* arasındaki oluşturulan yataklama yüksek miktarda yüklenmemiş olacaktır. Öğütücüde kullanılan contaların ve yatakların kullanımı ilginçtir ve uygun yataklamanın gerekliliği için parçaların ömrü ve yeterli mekanik performansı, boşlukların hassas kontrolü yapılarak gerekli olan makinanın başarılı işletimi sağlanacaktır.

2. Güney yönünü gösteren ünlü iki tekerlekli arabada ahşaptan yapılmış diferansiyel dişliler (Çin, yaklaşık olarak MÖ 255).



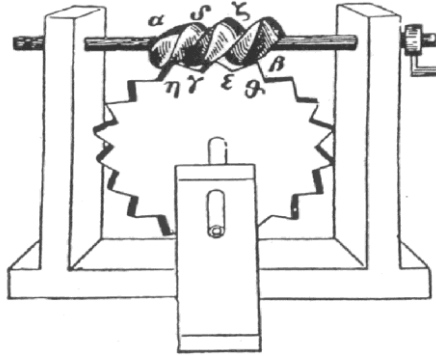
Şekil 2.13 Güney yönünü gösteren iki tekerlekli araba (Çin, yaklaşık olarak MÖ 255).

3. Ahşap/demir temaslarından oluşacak yüksek aşınmayı engellemek için ahşap çerçevenin mile karşı kullanıldığı demir burç yataklar.



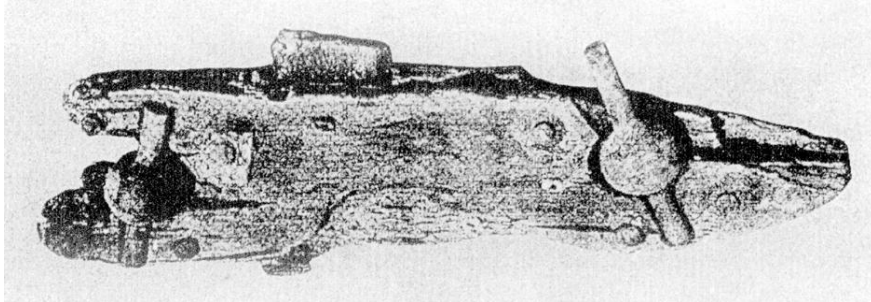
Şekil. 2.14 Oyma taşın taş ocağından yerine taşınması.

4. Tüm elemanları sonsuz dişli olan Arşimed'in dişlileri. (sonsuz veya salyongoz dişli). (MÖ 3.yüzyıl).

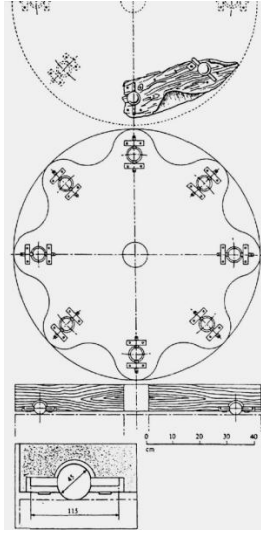


Şekil.2.15 Arşimed'e göre sonsuz dişliler) (MÖ 3.yy).

5. Nemi gölü üzerindeki roma gemilerine ait platformu döndürmek için bilyalı yatak (yaklaşık M.S. 50).
– Bilyalı aksenal yatak parçaları (ahşap platforma karşı bronz bilyalar) (Şekil a1, a2).

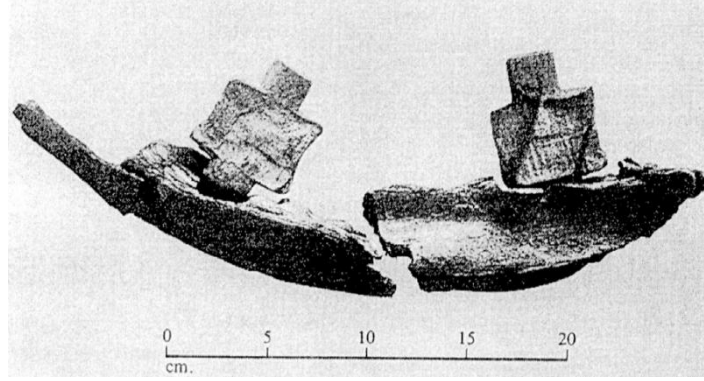


Şekil.2.16 a1: Bronz bilyalar ve kamalar ile dönen odun platform parçaları. (nemi gölündeki gemilerden yaklaşık M.S. 50).

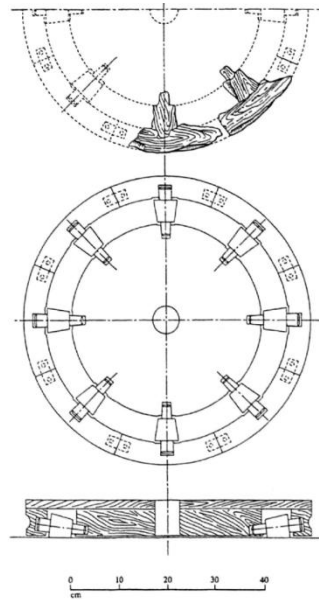


Şekil.2.16 a2 Nemi gölündeki gemilerden alınan bronz bilyalı muyluya (burca) monte edilmiş dönen ağşap platformun teknik resmi.

b. Konik bilyalı yatak parçaları (ağşap bilyalar ağşap platforma karşı) (Şekil b1, b2).



Şekil.2.17 b1. Döner ağşap platform ve iki ağşap bilyanın parçaları (Nemi gölündeki gemilerden yaklaşık M.S. 50).



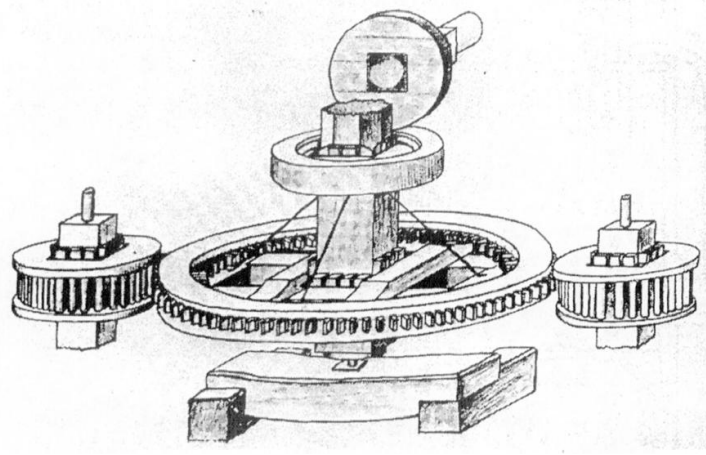
Şekil.2.17 b2. Nemi golundeki gemilerdeki ağşap konik bilyalar üzerinde döner ağşap platformun teknik resmi.

2.1.4 Orta Çağ (MS 400 den MS 1450 ye kadar)

Makina elemanlarının gelişmesi

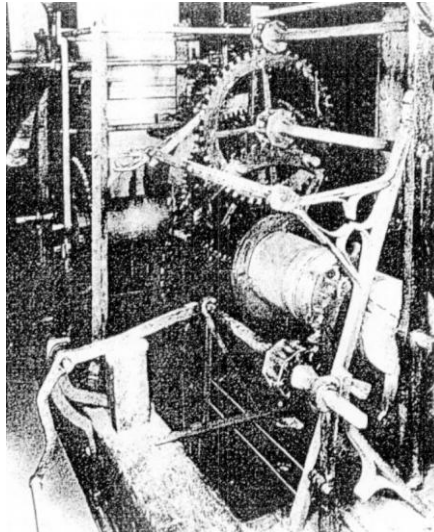
Zamanın bu uzun periyodu boyunca makine elemanlarında çok önemli bir gelişme olmamıştır. Bu çağı durgunluk çağı olarak nitelendirebiliriz. Fakat malzeme seçimine bağlı bazı gelişmeler incelenebilir. Örnek olarak;

- Ahşap dişlilerden oluşan biley taşı (Boxel değirmeni yaklaşık olarak 1200.yıl).



Şekil 2.18. Ahşap dişlilere ahşap iki bileği tasının ana tahrik mili (Boxel değirmeni yaklaşık olarak 1200.yıl).

- Wells Katedrali'nin metal dişlere ve pirinç kaymalı yatağa sahip orta çağ saat mekanizması (1392.yıl).



Wells kilisesinin pirinç kaymalı yataklara sahip orta çağ saat mekanizması (1392).

2.1.5 Rönesans Çağı(1450-1600)



Şekil.2.19 Leonardo da Vinci; Kendini 60 yaşında portre (1512).

Bu yüzyıl dahi ressam, mühendis ve mimar leonardo da vinci'nin (1452-1519) çağıdır. (Şekil. Leonardo da Vinci; otoportre)

Leonardo da Vinci makina elemanları, sürtünme ve aşınmanın birçok yönüyle uğraşmıştır. Kendi çalışmaları esnasında yük ile sürtünme kuvveti arasında bir bağlantı olduğunu buldu. Aynı zamanda kuru temaslar için ilk sürtünme kanunlarını tanımlamıştır :

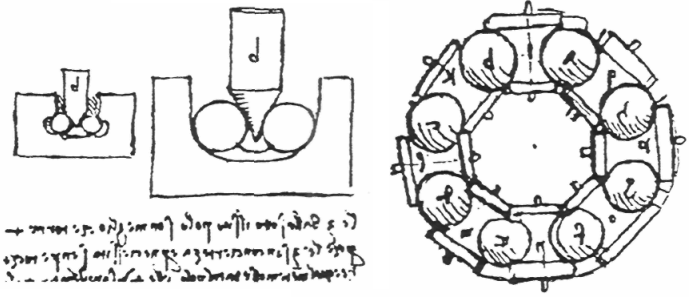
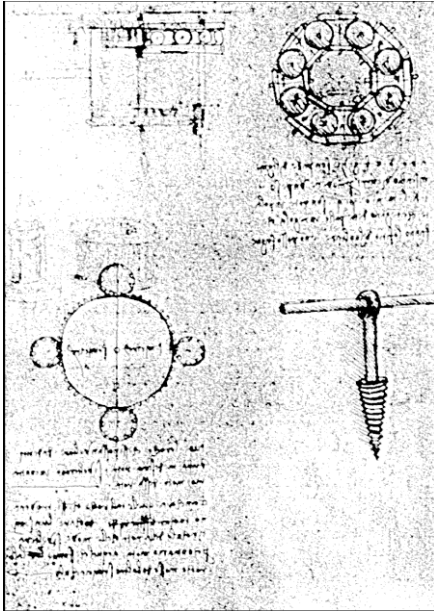
- Sürtünme kuvveti yük ile doğru orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti, temas alanından (görünür) bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır.

Bu sonuçlar gerekli olan sürtünmenin azaltılması için kullanıldığında:

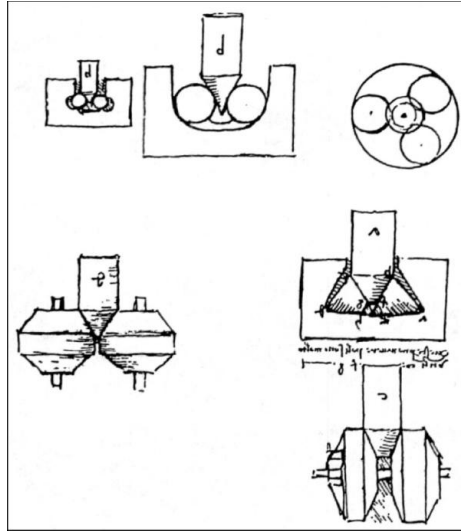
- Kayma sürtünmesine (harekete) karşı yuvarlanma sürtünmesinin avantajları.
- Gerçek temasa karşı nokta / çizgi temasının avantajları.
- Yataklarda yuvarlanan elemanların arasında mesafeyi korunma avantajları.

Onun eskiz defterinden bazı örnekler şunlardır:

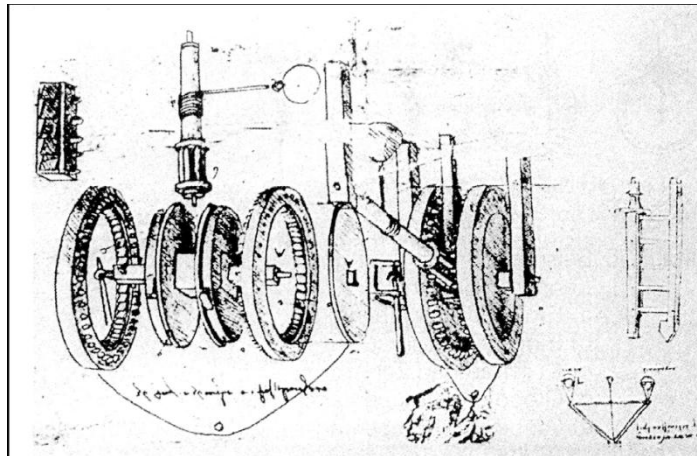
- Rulmanlı yatak kafesinin basitleştirilmiş şekli.
- Bilyalı eksenel, konik ve konik rulman yataklarına ait eskiz çizimleri.
- Kaldırma hareketini döndürme hareketine dönüştüren dişlinin elle çizilmiş resim taslağı.



Bilyaların arasındaki teması önlemek rulmanlı yatakta Leonardo da vinci tarafından önerilen el yazması Madrid I'deki kafes sisteminin ilk şekli.



Leonardo da vinci'nin Madrid I el yazmasındaki bilyalı, konik ve rulmanlı (makaralı) yataklara ait eskizler.

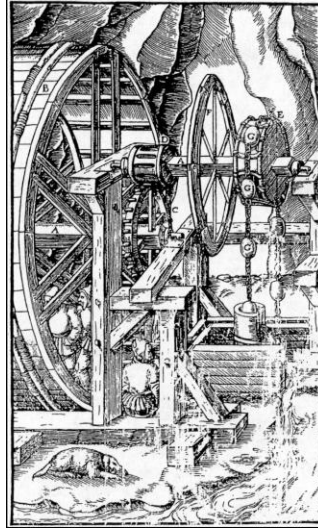


Leonardo da Vinci - Kaldırma hareketini döndürme hareketine dönüştüren dişlinin eskizi.

Prof. Dr. Hakan KALELİ; Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı, 34349 Beşiktaş-YILDIZ- İstanbul – TURKEY Email: kaleli@yildiz.edu.tr

Bu çağ yeni teorik bilgileri pratiğe dönüştürmedeki zorluklar olarak tanımlanmıştır. Bu durumu gösteren bazı örnekler şunlardır:

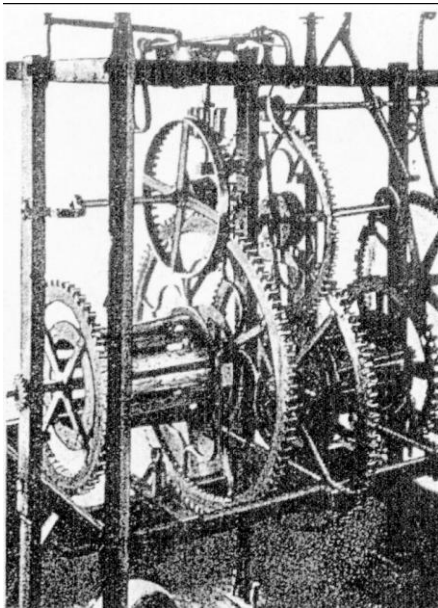
- Su pompalama makinasındaki dişlilerde basit kaymalı yatakların kullanılması (yaklaşık 1500) (Şek. 16. yüzyılda kaymalı yataklar.)



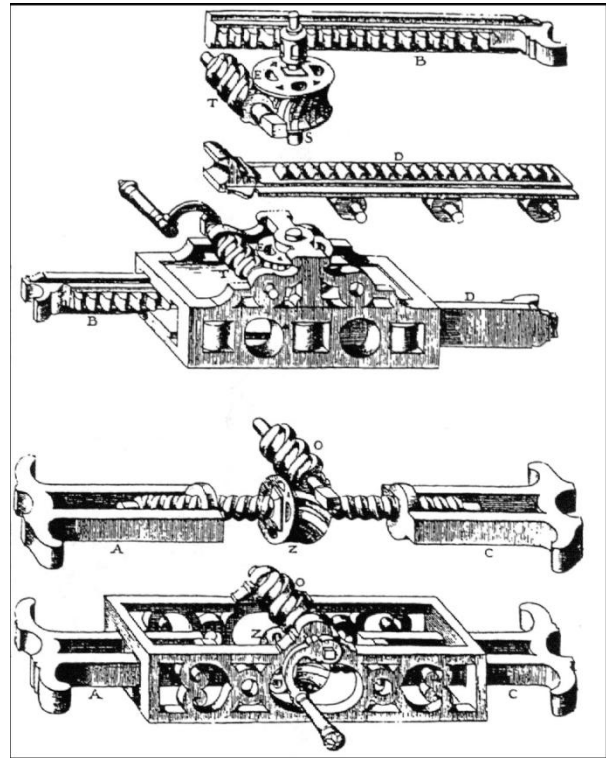
Şek. 16. yüzyılda kaymalı yatakların Agricola adlı zincir dişli su pompasında kullanılması.

Yine de bazı ilerlemeler incelenebilmiştir:

- Überlingen kilisesinin saat çalışma mekanizması (1549),
- Salyangoz dişli mekanizması (1588).

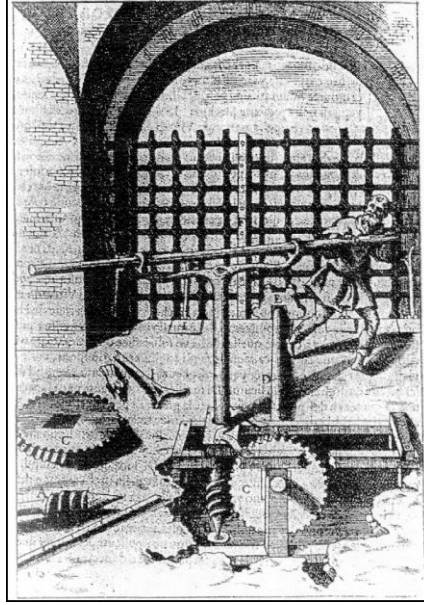


Überlingen kilisesinin saat mekanizması (1549).

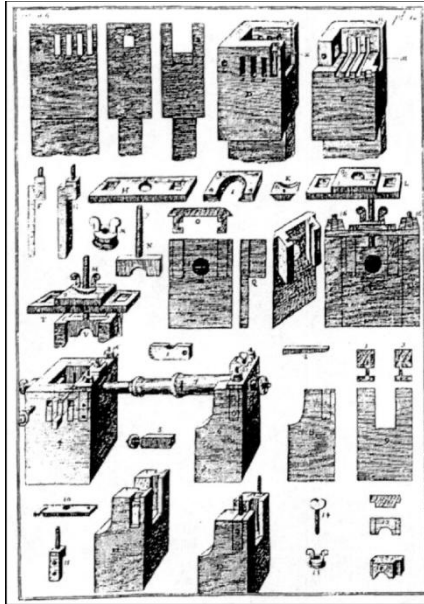


Bağlantı sağlayan elle kumandalı salyangoz dişlilerde kramayer dişliyi desteklemek için makaraların kullanımı (Ramelli'den sonra, 1588).

2.1.6 Endüstri gelişim çağı (1600-1850)



Şekil.2.23 Elle tahrikli sonsuz vidayı destekleyen muylu yatağının eskizi.

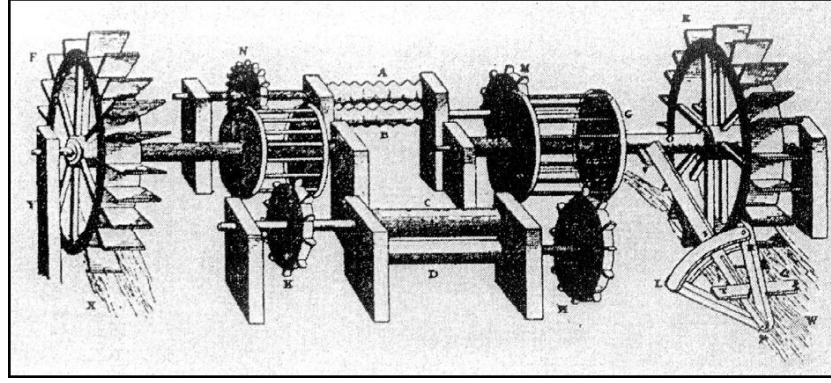


Şekil.2.24 Aşınmanın dengelenmesi için ayrı bir şekilde ayarlanabilir yatak blokları ile takım tezgahlarının yataklanması (Plumis'e göre 1701).

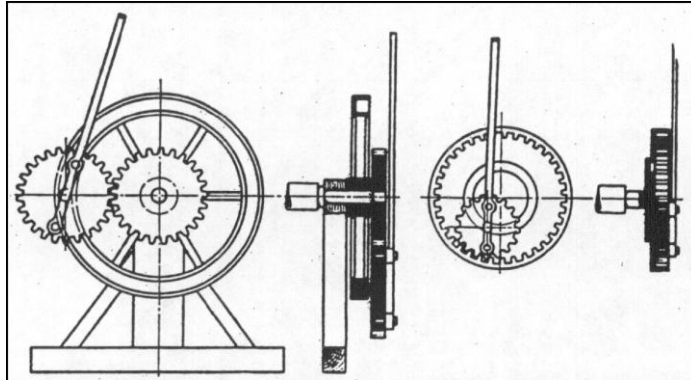
Bu çağ yataklar ve dişliler alanında kayda değer önemli gelişmeler ile nitelendirilmiştir. Bunlara örnek aşağıdaki gibidir:

Bunlara örnek olarak:

- HUYGENS (1665), de la HIRE (1694) ve LEOPOLD tarafından dişli çarkların geometrik prensipleri ve evolvent dişlilerin tanımı.
- Salyangoz dişli ve konik yataklı kapıları açma mekanizması (17.yy).
- PLUMIS (1701) tarafından aşınmanın dengelenmesi için ayrı bir şekilde ayarlanabilir yatak blokları ile takım tezgahlarının yataklanması.



Şekil.2.25 “Genişleme” için elle çalıştırılan salyangoz dişlideki kremayerlerin desteklenmesi için makaraların kullanımı (Ramelli’den sonra, 1588).



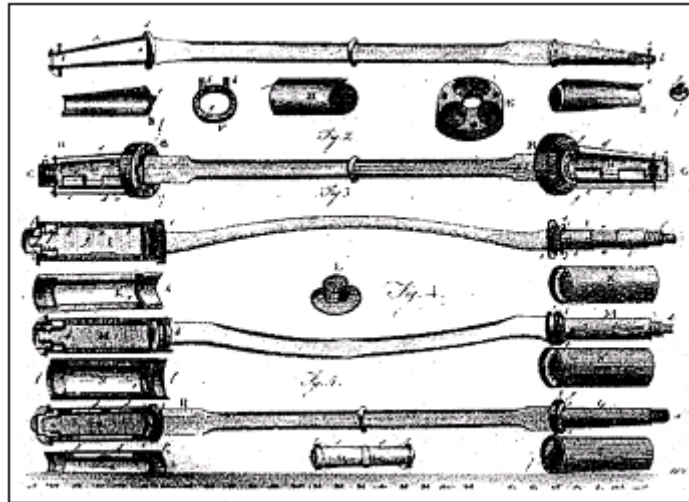
Şekil.2.26 “Genişleme” için elle çalıştırılan salyangoz dişlideki kremayerlerin desteklenmesi için makaraların kullanımı (Ramelli’den sonra, 1588).

Ancak bazı uygulamalar için halen ahşap dişliler kullanılmaktadır.

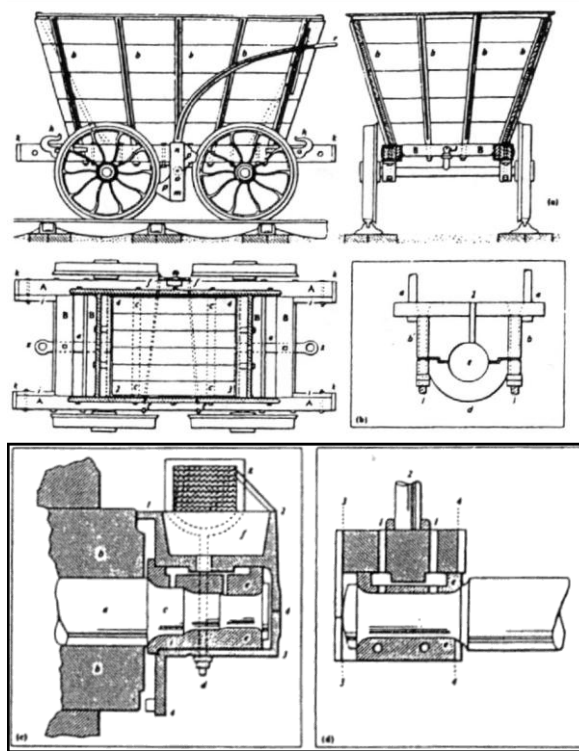
- Saç yuvarlama makinası için dişli tasarımı (1758) (Şek. “Genişleme” için elle çalıştırılan.).
- James Watt tarafından tasarlanan makine (1781). (Şek. “Genişleme” için elle çalıştırılan.).

Geliştirilmiş tasarımların sonucunda makina elemanlarının görevlerini anlamak için bazı ilerlemeler mevcuttur.

Kaymalı yataklara örnekler şunlardır:



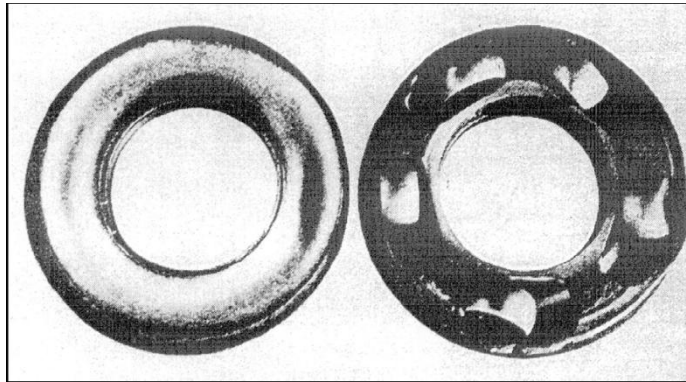
Şek. “Genişleme” için elle çalıştırılan salyangoz dişlideki kremayerlerin desteklenmesi için makaraların kullanımı (Ramelli’den sonra, 1588).



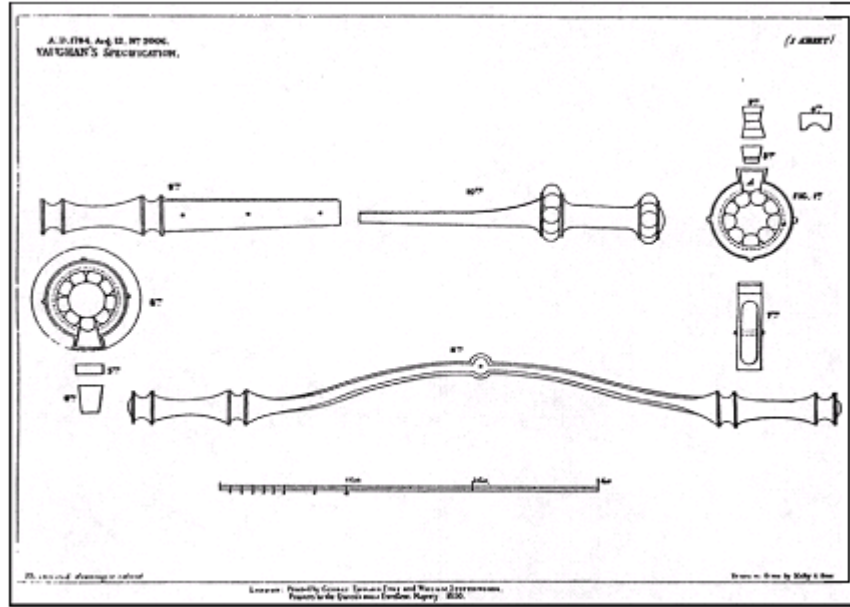
Şekil.2.27 “Yüksek teknoloji” demiryolu tekerlek yatağı (1830).

- FELTOW (1794) tarafından taşıyıcı akslar için kaymalı yatak tasarım önerisi.
- “Yüksek teknoloji” demiryolu tekerlek yatağı (1830) (Şek. “Yüksek teknoloji” demiryolu).

Bilyalı rulmanlara örnekler şunlardır:



Şek.2.28 Bir bilyalı rulmanın ilk şekli (Philadelphia’daki bağımsızlık salonunun rüzgar gülü, yaklaşık 1770).

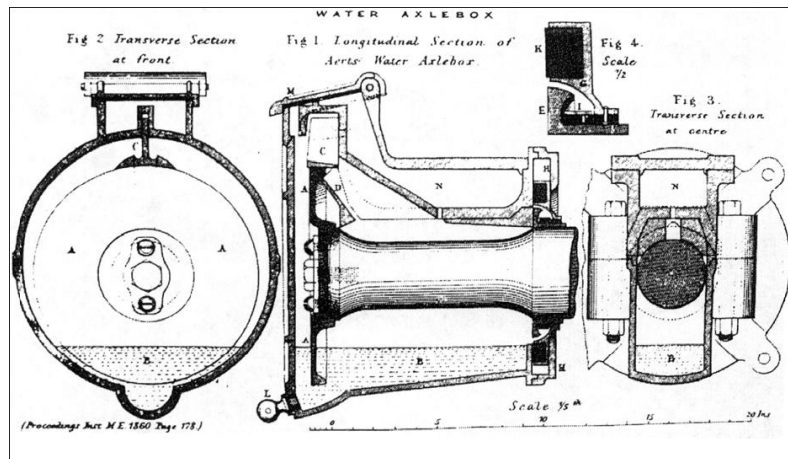


Şek. Philip Vaughan'ın "hafif ve ağır tekerlekli arabalar için bazı miller, aks kolları ve kutuları" için bilyalı yatakları (Vaughan 1794).

- Philadelphia'daki bağımsızlık salonunun rüzgar gülü için bir bilyalı rulmanın ilk şekli (1770) (Şek. Bir bilyalı rulmanın ilk şekli).
- İç bilezik ve kafes olmadan yük taşıma kapasitesini arttırmak için maksimum sayıdaki bilya ile boşluğun doldurulduğu tekerlek rulmanı. (Vaughan patenti, 1794) (Şek. Philip Vaughan'ın bilyası).

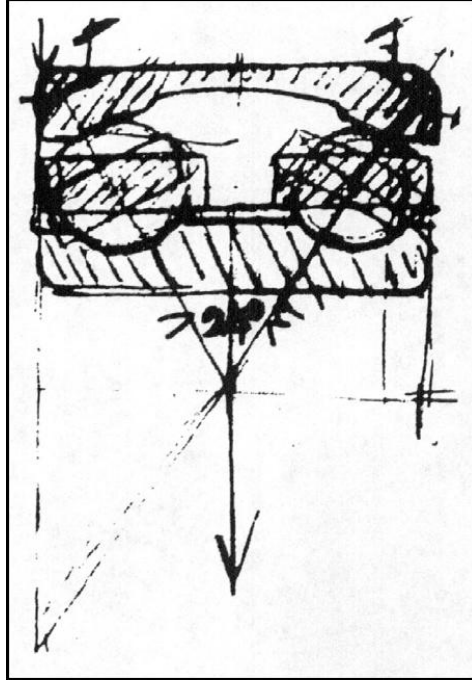
2.1.7 Teknik İlerlemenin 75 yılı (1850-1925)

Oysa henüz dişliler ve yataklarda ilkel tasarımlar ve malzeme seçimleri kullanılmasından ziyade, bazı kayda değer gelişmeler gerçekleşmiştir. Örnek olarak:



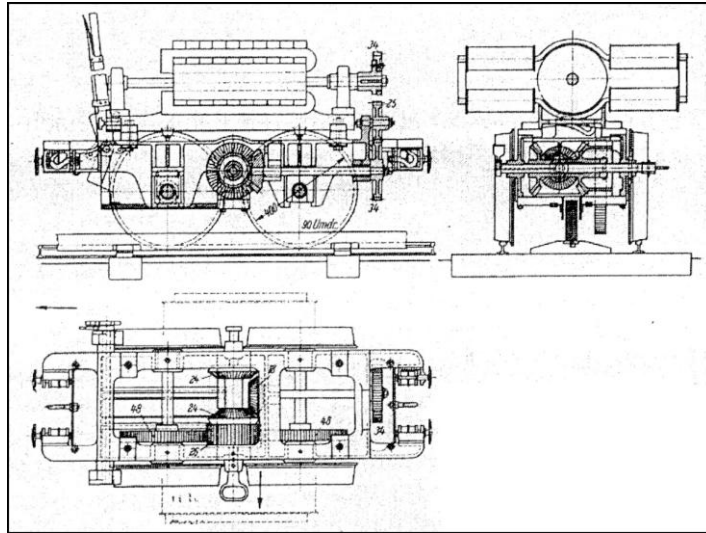
Şekil.2.29 Disk daldırma ile yağlayıcı desteği için aks kutusu için su ile yağlamalı kaymalı yatak (AERTS'e göre yaklaşık 1860).

- AERTS (1860) tarafından tasarlanan bir aks kutusu için su ile yağlamalı kaymalı yatak (Şek. Su yağlamalı kaymalı yatak).



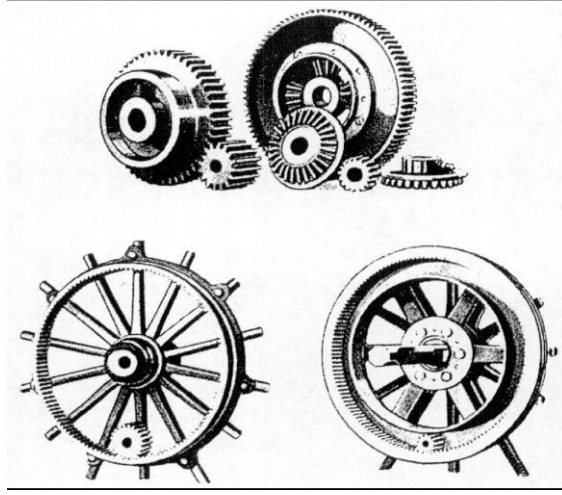
Şekil.2.30 SKF' nin kurucusu WINGQUIST tarafından bilyalı yatakların gelişimi; kendi kendini ayarlayabilen açısız temaslı bilyalı rulman.

- SKF'nin kurucusu WINGQUIST tarafından bilyalı yatakların gelişimi; kendi kendini ayarlayabilen açısız temaslı bilyalı rulman (Şek. Bilyalı yatakların gelişimi).



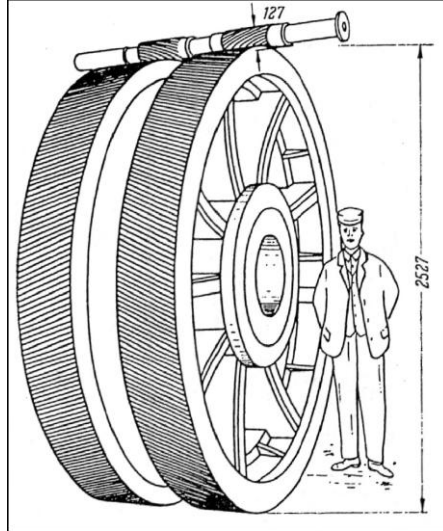
Şekil. 2.31 İlk elektrik motorlu lokomotif için dişli (Siemens 1879).

- Siemens tarafından (1879) ilk elektrik motorlu lokomotif için dişli kullanılması (Şek. İlk elektrikli motor lokomotif).



Şekil.2.32 Bir otomobil için hareket mili dişlisi (1902).

- Bir otomobil için hareket mili dişlisi (1902). (Şek. Bir otomobil için..)



Şekil.2.33 Deniz motoru şanzumanı için Herringbone dişlisi (yaklaşık 1913).

- Deniz motoru şanzumanı için Herringbone dişlisi (Şek. Deniz motoru şanzumanı için..).

1925 ‘den Günümüze – Triboloji çağı

Bu zaman dilimi sadece anımsamak için bazı akılda kalıcı bölümler üzerinde kısaca durulmalıdır. Eğer birisi triboloji, yağlayıcılar ve makina elemanları alanında önemli gelişmeler yapmayı denerse Tribolojinin bu tarihi köprüsünün sınırlarını aşacaktır.

Yataklar ve dişlilerin oldukça bilinen temel ilkelerine dayanılarak, teorik bulguların pratik çözümlere dönüştürülmesi geliştirilmiştir. Bu işlem, tribolojik optimum tasarım, malzemelerin seçimi, yüzey mühendisliği ve yağlama baz alınarak meydana gelir. Bu da makina ve teçhizatda, sorunsuz çalışma ve uzun ömürle nitelendirilerek sonuçlandırılmıştır.

2.2 Sürtünme ve Aşınma Teorilerinin Gelişimi

Gitgide birçok bilimadamı sürtünme teorilerine dahil oldu. Bazı örnekler şunlardır:

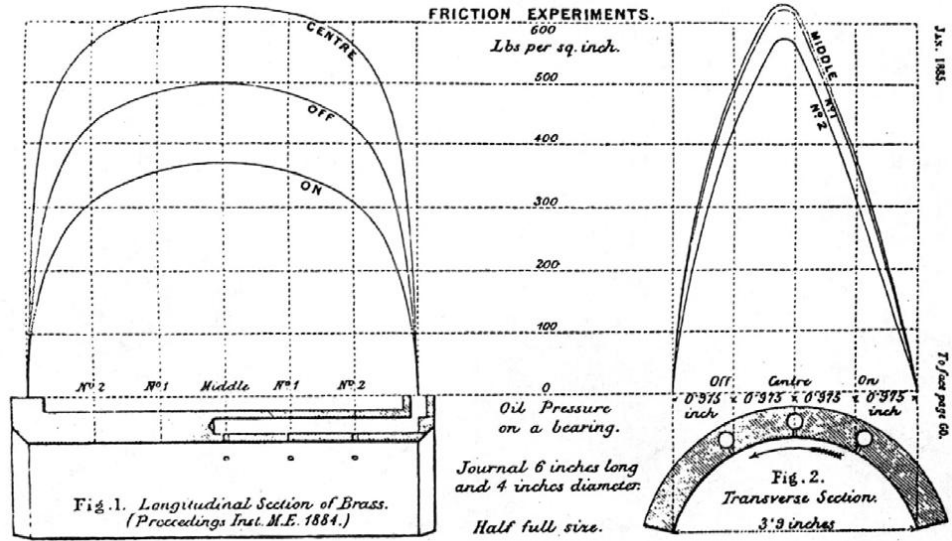
- Robert HOOK (1680): yuvarlanma sürtünmesinin bağlantıları ve kanunları,
- Isaac NEWTON (1687): akan ortamın iç sürtünmesini viskozite olarak tanımlar.
Viskozite= kesme gerilmesi/ kesme oranı (o bu olayı viskozite kelimesini kullanmadan tanımlamıştır),
- Guillaume AMONTONS (1699): Leonard da VINCI'nin sürtünme kanunlarını onaylar.
- Leonard EULER(1750): sürtünmenin analitik tanımı (μ sembolünü sürtünme katsayısı olarak tanımlar).
- Charles Augustin COULOMB (1785): Leonardo da VINCI ve G. AMONTONS' un sürtünme kanunlarını ispatlamıştır.
- George RENNIE (1825):
Sürtünme ve aşınma ölçümleri
Farklı malzemeler için ilk sürtünme katsayısı listesi
Yağlayıcılara göre aşınma
- Charles HATCHETT (1803): Yağlayıcılara göre aşınma
- Claude Louis NAVIER (1822) : viskozitenin tanımlanması ve kullanılması
- George Gabriel STOKES (1845): NAVIER ile birlikte hareket denklemi sonrada hidrodinamik teoremin temellerini tanımlar.

Önemli ve tanınmış bilimadamları, mühendisler ve tribolojistler sürtünme, aşınma ve yağlama arasındaki bağlantıyı incelerken özellikle kaymalı yataklara başvurmuşlardır. Kaymalı yataklardaki en önemli keşif B. TOWER tarafından keşfedilen yatakların dizaynında ve çalışmasında mükemmel sonuçlar veren hidrodinamik basınç gelişimidir. Bazı ünlü isimler:

- Gustav Adolph HIRN (about 1880): Leonardo da VINCI, AMONTONS ve COULOMB' un sürtünme kanunlarını ispatlamıştır.
- Heinrich Rudolf HERTZ (1881) : Kayma sürtünmesinin fiziksel kanunları,

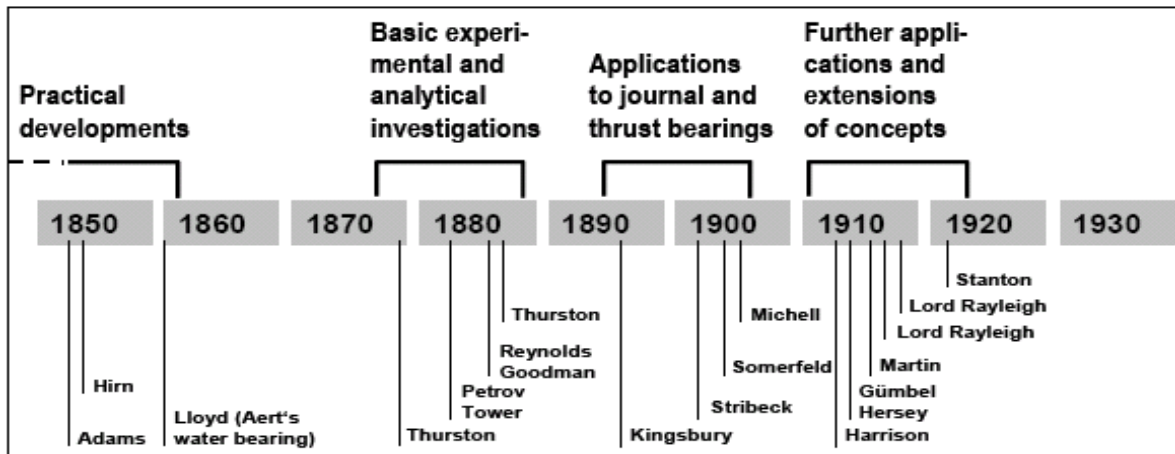


Şekil.2.34 Beauchamp TOWER (1845 - 1904)



Şekil.2.31 B.TOWER tarafından ölçülmüş kaymalı yataklarda hidrodinamik basınç (1883).

B.TOWER (1883): kaymalı yataklarda hidrodinamik basıncı tespit eder. Çevresel ve eksenel yöndeki hidrodinamik basıncın toplamı yatak yükünün ortalamasına eşittir. (Şek. Beauchamp TOWER, kaymalı yataklardaki hidrodinamik basınç),
 Nikolai Parlovich PETROW (1883): kaymalı yataklar için sürtünme kanunları,
 Osborne REYNOLDS (1885): hidrodinamik etkideki matematiksel gelişmeler. Reynold'un hidrodinamik basınç denklemi yatak hesaplarının temelini teşkil eder,
 Richard STRIBECK (1902): sürtünme ölçümleri / hidrodinamik etkiyi ispatlar,
 Stribeck Curve: sürtünme, yükleme, hız ve viskozite arasındaki ilişkiler,
 Reynolds denkleminin yaklaşık çözümleri (e.g. Michel OCVIRK, Du BOIS, KINGSBURY, CAMERON, SASSENFELD/WALTHER),
 Hidrodinamik çalışan makina elemanlarında bu çözümün uygulanması. Uzun ömürlü makina elemanları için hidrodinamik kaymalı yatakların üretilmesi,
 Reynolds denkleminin elektrohidrodinamik çözümü. (Duncan DOWSON HIGGINSON ile birlikte),
 Reynolds denkleminin elektrohidrodinamik çözümü. (Duncan DOWSON HIGGINSON ile birlikte),
 EHD'nin aşırı yüklenmiş yağlanmış temaslar için uygulanması.



Yatakların teorik konularında çalışan bilimadamları.

Şekil: Önemli bilimadamları, kaymalı yatakların teorik yönleri ile ilgilenen ana bilimadamlarını ve mühendisleri gösterir.

2.3 Yağlayıcıların Gelişimi

İşte ham petrolden katran (zift) ve hafif petrol üretimi açıklamaları var. Su pompalarının bağlantı pistonlarındaki ince yağ film bu prosesi pürüssüz yapmak için uygulanmıştır. PLINIUS yağlayıcı olarak kullanılan bitkisel ve hayvansal yağlar hakkında bir liste yayınladı. (A.D 23-79)

Rönesans çağı boyunca çok yeni gelişmeler meydana gelmedi fakat Leonardo da VINCI, uygun bitkisel ve hayvansal yağlar kullanılırsa sürtünmenin azaltılabileceğini farkettiler.

Yeni yağlayıcıların yerine onların uygulamaları daha ve daha fazla önemli oldu. 1967 den bir çince yayında biz şunu okuyoruz “rulmanların içindeki bir damla yağ bir araba yapar ve biraz yaymak gitmeye hazır bir gemi yapar”. Diğerleri ise domuz yağı (AMONTONS), don yağı ve bitkisel yağlar yağlayıcı olarak kullanılabileceğini farkettiler.

Birçok hayvansal, bitkisel ve mineral yağlar, katı yağlar kadar iyi ve kullanışlıdır. Bu dönemde yağlayıcı formülleri için birçok patent verildi. Örnekler:

1812, ingiliz patenti 3573 (Henry Thomas HARDACRE): yatak gresi gibi grafit ve domuz don yağı karışımı (1:4),

1835, ingiliz patenti 6945 (Nathaniel PARTRIDGE): zeytinyağı ile suda çözünmüş kireç karışımı. Yüksek performans uygulamaları için palmye yağı, don yağ ya da grafit eklenmeli.

1848, ingiliz patenti 12109 (Josep John DOULAN): yüksek performanslı yağlayıcının kompleks bileşimi

Yağlayıcıların gelişimi (endüstri devrimi (1750-1850) boyunca):

Defne olarak adlandırılan bitkisel maddenin yaprakları;

Sarmaşık olarak adlandırılan bitkisel maddenin yaprakları ;

Civanın oksimurittenmesi...

Bakır sülfat...çinko sülfat...tartarlanmış antimon;

Pulverize edilmiş roman... grönland veya güneyden balina yağı;

Gelibolu veya zeytin yağı...sperm yağı...palmye yağı;

Kauçuk olarak adlandırılan bitkisel madde;... kahverengi sabun yaygındır;

az olarak beyaz biber...ceruss;

Tuz ve unlaştırılmış şap ve grafit.

Buna ek olarak kurşun karası ve gök mavisi bileşenleri reklendirmek için una eklenmiştir.

Triboloji alanı 1925'ten günümüze aşağıdaki yönleri ile karakterize edilebilir:

Katkı maddelerinin geliştirilmesi ve tanıtılması,

Yeni üretim teknikleri ile baz yağ orjinli mineral yağların geliştirilmesi,

Sentetik baz yağların tanıtımı.

Uzun ömürlü servis yetenekleri yada uzun ömürleri ile yüksek/düşük sıcaklıklar ve yük yük uygulamaları için yüksek performanslı yağlayıcıların formülasyonu.

(HistoryOfTribologyTheBridge..)

ENDÜSTRİ ALANINDA TRİBOLOJİ

Mühendislik tesisi ve makinacılıkta üretim artışına önderlik ederek, verim artışı, geliştirilmiş güvenilirlik ve azaltılmış bakım giderleri arasında Tribolojinin enerji ve malzeme kaynaklarının verimli kullanımında önemli bir görevi vardır. **Roberts, W.H., “Tribology in Industry”.**

Endüstri alanındaki tribolojik problemlerin yaygınlığını ve tiplerini tartışmadan önce, olaya evrensel bir görünümde bakmalıyız. Esas itibarıyla, iki dış etken sonucundan kaynaklanan belirli bir çevre dahilinde iki sert yüzeyin etkileşimi ile ilgilenmekteyiz;

- a) Burada harekete dayanıklılık olan bir enerji kaybı mevcuttur ve bu sürtünme katsayısı ile gösterilmektedir. Bu enerji kaybı temas esnasında bir ısı yayınımına ve küçük ama bazen önemli gürültü miktarına sebep olmaktadır. Şunu vurgulamak gerekir ki; iki sert yüzey birbiriyle sürekli ilişkili olduğundan, sürtünme katsayısı gibi parametreler iki etkileşen malzeme çifti ile iyi ilişki kurmalıdır. Katı madde temasına değinmeksizin sürtünme katsayısından bahsetmek bilimsel olarak yanlış ve hatalıdır. Ayrıca belirtilmelidir ki, sürtünmesiz yüzeyler fikri bilimsel olarak imkansızdır ve ayrıca sıkça kullanılan düşük sürtünme yüzeyin düzgünlüğü ile ilişkilidir iması da esasen yanlıştır,
- b) Kayma süreci esnasında, bütün yüzeyler kendi esas karakterlerinde daha büyük veya daha küçük bir ölçü değişimine maruz kalırlar. Daha yumuşak veya daha sert bir hale gelebilirler, bozulmuş sertlik gibi fiziksel özelliklere sahip olabilirler ve aşınma işlemleri olarak adlandırılan bu durumda bir takım maddeler kaybolabilir. Bu tür yüzey değişimleri kimi zaman yararlı olur,”mesela yüzeylerin alışıp ideal işletme durumuna gelmesi” , kimi zamanda çok zararlıdır,” yüzey hataları oluşup bileşenlerin değiştirilmesi gereken durumlar

Yukarıda anlatılanlara istinaden, hem aşınma hem de sürtünmenin her zaman dezavantajlı olduğu düşünülebilir ama söz konusu durum bu değildir. Bir çok mühendislik uygulamalarında, gereken fonksiyonları yerine getirmek için sürtünmeyi kullanabiliriz. Böylece, vida ve somun sadece ikisi arasındaki sürtünme sonucu çalışabilir basmakalıp sözüne rağmen, frenler, debriyajlar, tren ve araba tekerleklerinin hepsi sürtünmenin varlığında çalışmaktadır. Aynı şekilde, makinelerin aşınması da kimi zaman avantajlıdır. Bileşenlerin aşınması, eskiyen makineleri değiştirmek için güçlü bir motivasyon sağlasa da bileşenlerin daha iyi bir şekilde temasına sebep olan ilk sürtünme açık bir şekilde arzu edilendir. En uç biçimiyle bu, dizaynırların belirlenen yaşam süreli makineleri sağlaması amacıyla sürtünme olayını kullanmaya gayret ettikleri “planlı eskime”ye yol açmaktadır.

TABLE 1.1 FRICTION AND WEAR FROM PIN ON RING TESTS. RINGS ARE HARDENED TOOL STEEL EXCEPT IN TESTS 1 AND 7

	Materials	Coefficient of friction	Wear rate $\text{cm}^3/\text{cm} \times 10^{-12}$
1	Mild steel on mild steel	0.62	157,000
2	60/40 leaded brass	0.24	24,000
3	PTFE	0.18	2,000
4	Stellite	0.60	320
5	Ferritic stainless steel	0.53	270
6	Polyethylene	0.65	30
7	Tungsten carbide on itself	0.35	2

Load 400 g

Speed 180 cm/s

Sürtünme ve aşınmanın yüzeylerin etkileşiminden kaynaklandığı gerekçesiyle birbirleriyle bir şekilde ilişkili olduğuna dair tamamen genel bir yanlış kanı yüksek sürtünme yüksek aşınma basit bağlantısıyla mevcuttur. Tablo 1.1.'de açıkça gösterildiği üzere, en düşük sürtünme en düşük aşınma ile ilişkilendirilmiş değildir. Bu hususla ilgili sonuçlar ayrıca sürtünme katsayıları tamamen makul bir şekilde değişen maddelerin oldukça büyük aşınma oranlarını göstermektedir. Sürtünme ve aşınma arasındaki ilişkinin karmaşıklığı ayrıca kendine özgü sonuçlarla ispat edilmiştir; bazen aynı maddelerin kullanılması suretiyle, gösterim süreci sonucunda meydana gelebilecek olan sürtünme azalması, aşınma oranındaki artma ile ilişkilidir.

Hemen hemen tüm endüstriyel durumlarda, daha büyük ekonomik sonuçlara neden olduğu gerekçesiyle, sürtünmeye ait kayıplara nazaran aşınma etkilerine daha fazla önem atfedilmektedir. Makinanın artırılmış aşınma süresi ile bağlantılı uyumlu tasarrufları sağlaması şartıyla kısmen daha yüksek işletme masraflarıyla birlikte yüksek sürtünme sık sık tolere edilebilir. Sürtünme ve aşınmanın önemli olduğu endüstriyel durumların bazıları sonraki kategoriler ile gösterilmiştir.

2.3.1 Enerji Kayıpları

Sürtünmenin her zaman esas factor olmamasına rağmen, tribolojist sürekli olarak ilişkili enerji kayıplarının mutlak büyüklüğünden ve her olası sonradan meydana gelen ısı yayılımı sonuçlarından haberdar olmalıdır. Böylece, 500 MW üreten bir tesiste açığa çıkan aşırı ısı, bunu yüzde birine yani 0-5 MW a veya tek filamentli 500 tane elektrik sobasının çıkardığı ısıya eş değerdir. Bu sıcaklık sistemin tam anlamıyla yerel bölgesi içinde hapsedilmiştir ve bu sebeple disaynır tarafından özel değerlendirilmelerin yapılmasını gerektirmektedir. Gerçekten, pek çok makinede tribolojik ısı yayılımı, istenmeyen termik aksaklıklara sebebiyet verebilir.

2.3.2 Aşınma

Endüstriyel toplumlarda brüt ulusal ürünün bir buçuk katı, aşınmanın sonuçlarını ve benzer etkilerini ikame etmek amacıyla kullanılmaktadır, böylece bu olaylar bu gibi toplumların gelişmelerinin esasını oluşturmaktadır. Makine alanındaki ilerlemeler yoluyla elde edilen tasarrufların ayrıca ekonomik avantajı da vardır; enflasyonun var olduğu bu günlerde deflasyonist oldukları için özellikle çekici bir vasfa sahiptirler. Hiç kuşkusuz şu da gerçektir ki aşınma, eskimiş makinelerin değiştirilmesi için arzu edilebilir, bu “planlı eskime” konseptidir. Planlı aşınma veya aşınma kontrolünün her türü aşınma işlemlerinin esas

kurallarının değerlendirilmesini beraberinde getirdiği için bu tür konseptler aşınma işlemlerini kavrama ihtiyacını engellemektedir.

2.3.3 Kontrol

Relatif harekette parçaların kesin kontrolünü sağlamak için sofistike makinelerde bir gereksinim mevcuttur. Bu, açıkça uygun bir tribolojik çizim içermektedir ve makine elemanlarının yerleştirilmesi için otomatik kontrol metodları kullanan sistemler için gittikçe artan bir öneme sahiptir. Parçaların oldukça düşük hızda hareket ettiği yerde, sürtünme ile ilgili hareketteki dengesizliklerden kaynaklanan bu tür problemler vurgulanmıştır.

2.3.4 Çevre

Bütün mühendisliğe ilişkin tribolojik problemleri serbest bir yağ tedariki ile çözmek mümkün değildir. Pek çok uygulamada böyle bir yağlama maddesinin kullanımı ya seçim dışı bırakılmış ya da teknik olarak istenmemiştir. Bu tür durumlara ait tipik örnekler ya tamamen ya da kısmen uzay araçları, nükleer reaktörler, kimyasal tesisler, tekstil tesisleri, besin işleme makineleri ve bir çok diğer makine çeşitlerinden kaynaklanmaktadır. Aslında, tribolojistlerin problemleri desaynırların yüksek yük kapasitesi, yüksek hız ve zorlu ve hatta kimi zaman düşman bölgelerde yürütülen operasyonların neden olduğu gereksinimden kaynaklanmaktadır.

2.3.5 Sürtünme Aygıtları

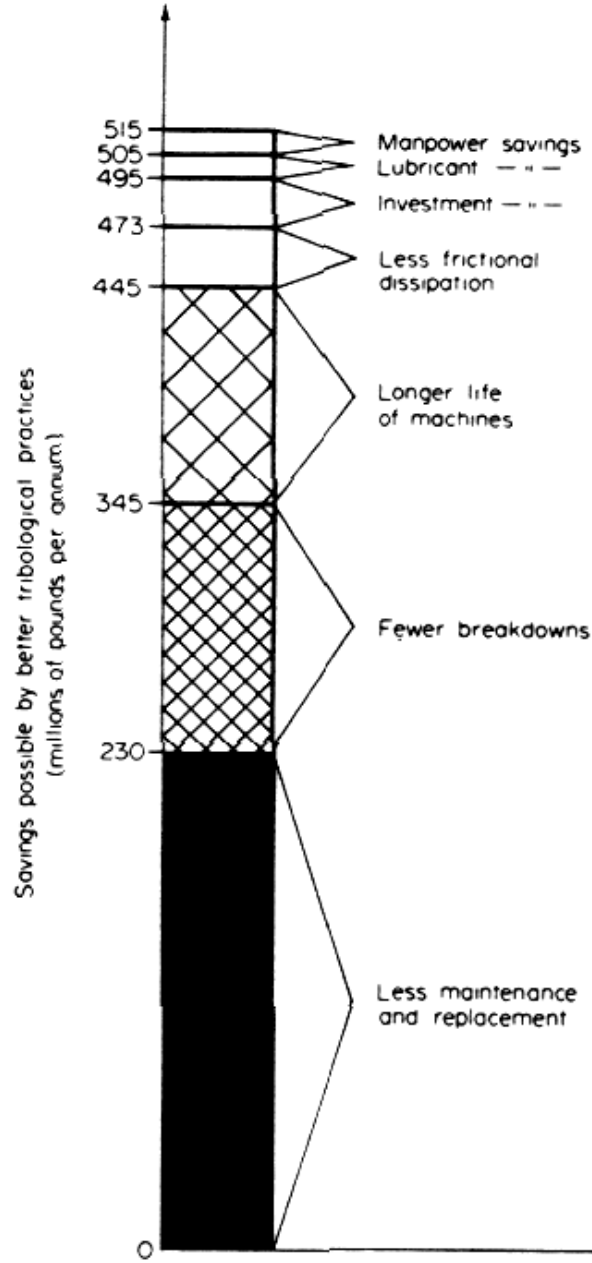
Daha önce de belirtildiği üzere, pek çok durumda sürtünme, aygıtın çalışması açısından öncelikli bir gereksinim arz etmektedir. Bu tür hallerde sıcaklık serbest bırakılır ve aşınma oranı projede, otomobil frenleri ve debriyajlar gibi başlıca dikkat edilmesi gereken hususlar haline gelir.

2.4 Ekonomik Düşünceler

Tribolojinin ekonomik önemi küçük detaylı bir tartışmayı gerektirecek şekilde açıktır fakat yine de bireysel durumlarda tasarruflar genel olarak küçüktür ve hepimiz maksimumu uygulamada zorluk çekeriz “kuruşları birtirirsek liralara arkasından gelir”. Makinelerdeki tribolojik temaslardaki büyük prevelans dolayısıyla her temastaki küçük tasarruflar bir bütün olarak ülke için önemli bir miktar durumuna gelebilir. Böylece, dünya enerji üretiminin bir buçuk katı kadarının sürtünmeyi çeşitli şekillerde ortadan kaldırmak amacıyla kullanılması şaşırtıcı değildir. Hakiki manada, görüyoruz ki daha iyi tribolojik proje ile tasarruf elde etmek gelecek insan soyunun bütününe ilgilendiren koruma tartışmasında kayda değer bir öneme sahip olabilir. Bu nedenlerle, endüstriyel toplumların hükümetleri tribolojinin ekonomik boyutuna artan bir şekilde vurgu yapmışlardır.

Britanya’da tribolojik aktivitelerdeki yeni hızlanmalar büyük ölçüde 1966 D.E.S raporu sayesinde meydana gelmiştir. Yağlama (Triboloji), Eğitim ve Araştırma Raporu (Jost Raporu), daha iyi tribolojik çalışmalarla bu ülkenin her yıl başına 515 milyon €’dan az olmamak üzere tasarruf edebileceğini iddia etmektedir. Bu büyük miktar şema 1.5’te gösterilen tasarruf bileşenlerinden kaynaklanmaktadır ve modern endüstrideki tribolojik başarısızlıklarla uyumlu olarak üretim kaybı içeren bu tür maliyetler v.b. daima hatırlanmalıdır. Buna karşı olarak belirtmek gerekir ki bu tasarruflar yeni çalışmalar gerektirmemekte sadece mevcut bilgilerin kullanımı bu noktada yeterli olmaktadır. Bu alandaki araştırmalar genişlerken daha büyük tasarruflar bile öngörülebilirdi. 1966’dan beri süre gelen deneyimler bu şemaların gereğinden fazla iyimser olmadığını iddia etmektedir ve

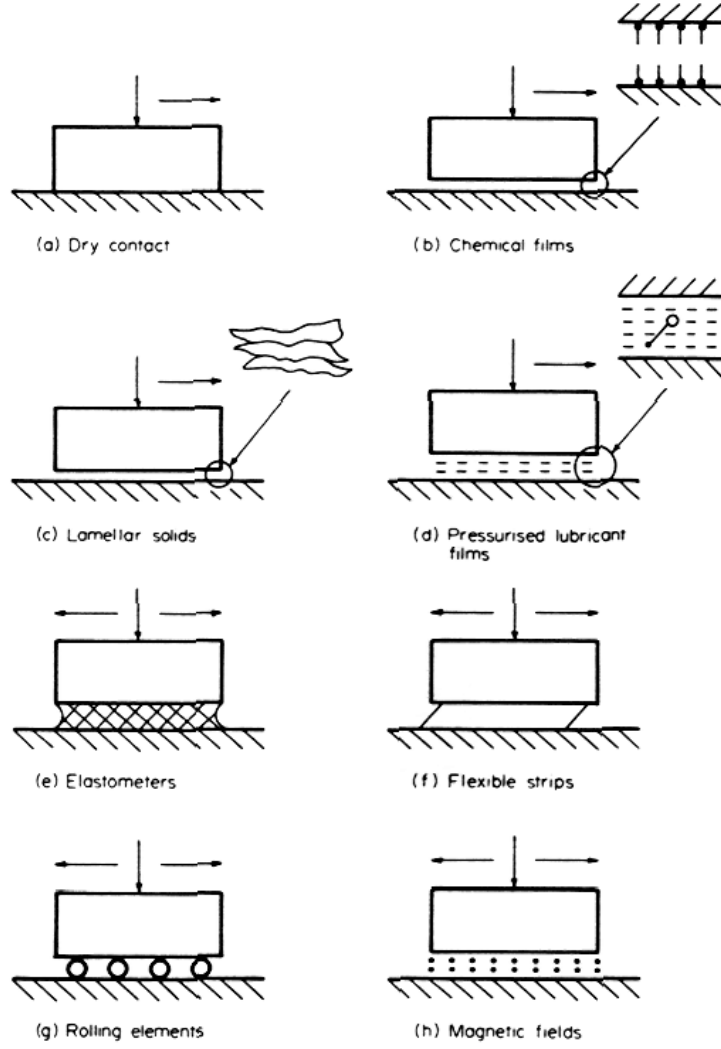
triboloji kelimesinin uygulamaya geçmesi ve ilişkili tanıtımı şimdiden yerleşik davranışlarda ve ülke ekonomisi kazançlarında kayda değer bir etki yaratmıştır.



Şekil 2.32 Jost Raporuna göre yapılan tasaruf diyagramı

2.5 Tribolojik Çözümler

Belki de triboloji kelimesinin uygulamaya geçişinin en önemli etkisi, her sistem için problem odaklı bir bakış açısı ortaya koymasıdır. Böylece, şu ana kadar yağlama mühendisinin benimseme eğiliminde olduğu yağlama çözümü yerine biz şu şekilde düşünme eğilimi gösteririz: “Kabul edilebilir sürtünme ve aşınma ile ara yüzey boyunca yük taşıma problemi için en iyi çözüm nedir?” Bu sebeple, şema 1.6’da gösterildiği ve sonraki metinde tartışıldığı üzere, tribolojik problemler için kullanılabilir çözümleri kategorize ettik.



Şema 2.33 Tribolojik Problemler için Çözüm Yöntemleri

Şema 1.6a Bir anlamda bu, plastik malzemeler kullanıldığında düşük yük taşıma kapasitelerinin kabul edilebileceği anlamına gelse dahi, aslen düşük sürtünme ve/veya aşınma karakteristik özelliklerine sahip olduğu gerekçesiyle temas eden maddeleri seçebiliriz. Bir çok durumda, belirlenmiş birleşenin esas yapısal gereksinimlerini karşılayan alt katmanlarda desteklenen yüzeysel katmanlar gibi malzemeler kullanmak mümkündür. Bu metod otomotiv makinelerinde kullanılan meşhur kusinetler için hizmet vermektedir.

Şema 1.6b Kısmen ana malzemelerin yakın temasını azaltan ve yüzeyleri koruyan kimyasal şeritler kullanabiliriz. Bu sistemlerde, kayma işlemi boyunca yakın temas halinde meydana gelen bölgesel sıcaklıklara bağlı olarak bu tür şeritlerin termal stabilitesi önem arz etmektedir.

Şema 1.6c Enine kaymada dirençsizlik gösterdiği gerekçesiyle sert yüzeyli kaplamalar kullanılabilir; örneğin yumuşak metal katmanlar veya molibden disülfür, grafit gibi katmanlı katı maddeler. Bu malzemelerden ikincisinin, tıpkı bir iskambil destesi gibi normal yükü taşıyabilecek güç ve kaymayı kolaylaştıracak şekilde dik açılı düzlemlerde zafiyet gösteren katlı bir yapısı vardır.

Şema 1.6d Yüzeyler birbirinden sıvı, buhar, gaz gibi kesintisiz akıcı bir şerit ile ayrılabilir. Bu sistemlerde, kullanılan normal yükün etkilerine karşı koymak amacıyla şeridin sabit bir basınca sahip olması gerekmektedir. Bu basınçlar belirgin iki mekanizma tarafından

sağlanabilir. En belirgin, hidrostatik ve aerostatic yatak gibi dıştan basınçlı yataklarda kullanılan harici pompalama sistemi tarafından üretilmiş bir basınçta sıvıyı temin etmektir. Eğer yüzeyler sıvıyı yakınsak bir boşluğa sürüklenme eğilimindeyse, seçimli olarak basınç yüzeylerin bizzat kendi hareketinden üretilebilir. Bu hidrodinamik yatağın hareketi hidrostatik yatağın durumuna nazaran akış direnci özelliklerine daha bağımlı haldedir. Bütün bu akışkan film uygulamalarında, su, yağ, hava hatta nükleer reaktörlerde kullanılan likit metaller gibi geniş bir sıvı aralığı başarıyla kullanıma sokulmuştur.

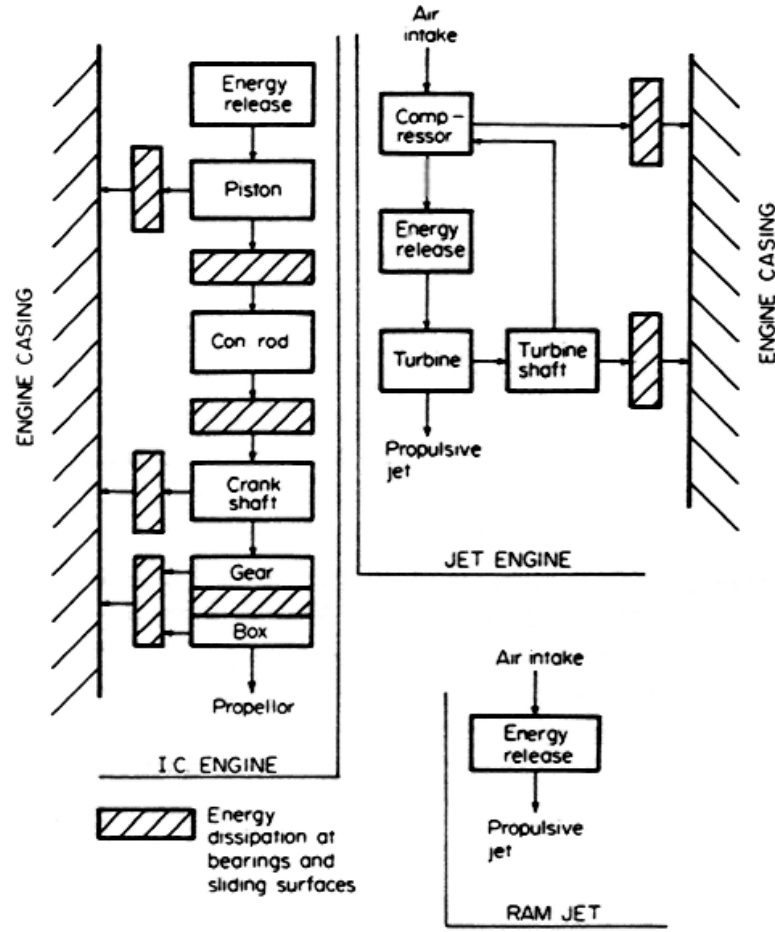
Yer değiştirme derecesinin tam anlamıyla küçük genli olduğu yerde yüzeyler birbirinden bu iki yüzeye bağlanmış elastomerlerle ayrılabilir. Bu, açıkça mükemmel bir tribolojik çözüm ortaya koymaktadır ve şemada gösterildiği gibi seçimli çizimler esnek şeritleri birleştirebilir.

Oldukça kullanılan tribolojik bir çözüm, top, silindir ve buna benzer yuvarlanan elemanları iki yüzey arasında koymaktır. Kullanılabilir çok çeşitli yuvarlanan temas halindeki yataklar, bu özel çözümün değerinin kanıtını oluşturmaktadır.

Manyetik ve buna benzer güç alanları kullanmak suretiyle mekanik temas olmasızın yük taşımak açıkça mümkündür. Bunun gibi bir yatak, dahili elektrik temini ölçer için uygun bulunabilir.

Bu çözüm aralığını akılda tutmak suretiyle, disaynır şimdi taşınacak yük, hız, çevre durumu ve sürtünme ve aşınmadaki her türlü kısıtlamalar gibi faktörleri çizim problemine en uygun cevabı bulmak amacıyla ele almalıdır. Kimi zaman tam bir çizim felsefesi değişikliği ile ya belirli tribolojik problemler ortadan kaldırılabilir ya da en azından neticelenme makinesinden istenilen sonuca ulaşılırken değiştirilebilir. Bu konsept, bir uçak kullanmak için gerekli olan güç ünitesinin yer aldığı şema 1.7’de gösterilmiştir. Burada, içten yanmalı pistonlu motor, jet motoru ve ramjet motoru olarak adlandırılan üç olası motorun tribolojik etkileri dikkate alınmıştır. Gölgelemiş yerler, değişik motor komponentleri arasında meydana gelen ve gözönünde bulundurulması gereken tribolojik temasları göstermektedir; ayrıca bir çizimden diğerine geçerken daha karmaşık hale gelmesine rağmen bunların sayıca ne kadar azaldığı görülmektedir.

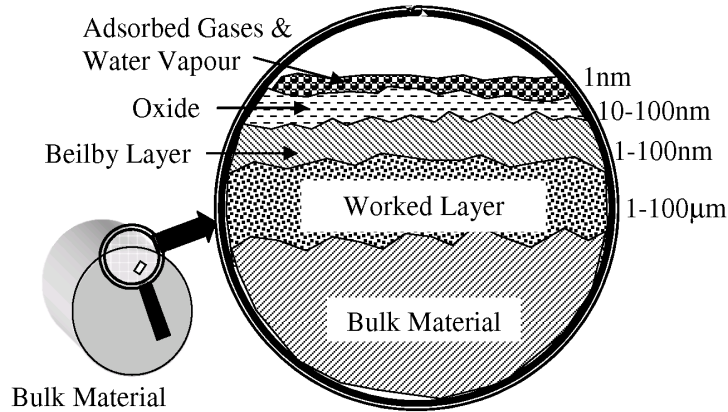
Yukarıdaki hususlar dahilinde, kabul edilmelidir ki yüzeyler, katı maddeler ve çevreleri arasındaki sınırları belirleyen tamamen pürüzsüz düzlemlerdir. Ne yazık ki, bütün mühendislik yüzeyleri buna nazaran daha karmaşıktır; tepeler ve vadilerle değişik geometrik şekillere ve aynı derecede nadiren maddenin derinliği boyunca tek biçimli olmak üzere karmaşık fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Tribolojinin konusunun karmaşıklığına katkısı olan bu yüzey şekilleridir. Bu nedenle, bu kitabın geri kalanında bu tür yüzeylerin durumu dikkate alınmış ve yukarıdaki değişik başlıklarda tartışılan bilimsel ilkeler vurgulanmıştır. [8]



Şekil 2.34 Çalıştırmak amacıyla aygıtlarda meydana gelen enerji kaybı

3.YÜZEY (Özellikler, Ölçüm ve Temas)

3.1 Yüzeyin Tabiatı



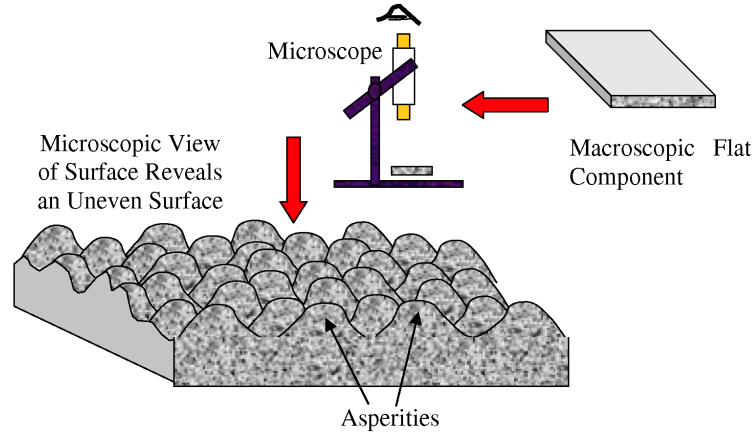
Şekil. 3.1 Metal bir yüzeyin şematik gösterimi.

Yüzey işleme, sıcaklık ve oksit oluşumu gibi dış faktörlerine bağlı olarak yüzeyde oluşan farklı mikro tabakaların varlığına rağmen metal temiz ve parlak görünebilir.

Bu faktörler, yüzeyin fiziksel ve mekanik özelliklerinin ve kristal yapısının ve binlerce moleküler tabakanın etkilendiği metalde derinlemesine olacak şekilde düzensizliğe sebep olmaktadır.

Malzeme üretimini kapsayan imalat prosesine bağlı olarak, malzemenin işleme-sertleşmiş bölgesi bu ek tabakaların esasını meydana getirecektir. Bu işlenmiş tabakanın üst kısmı “Beilby” tabakası olarak adlandırılan, moleküler tabakaların işlenmesi esnasında yüzeysel akma ve ergitmenin sonucu olarak oluşan amorf veya mikro kristal bir yapıdır.

Bu, yüzeylerdeki sözde amorf tabakaya (Beilby tabakası) nın oluşmasına sebep olan pürüzlerin erimesidir ve yüzeyde oksidasyon veya korozyon sonucu ve aşınmanın etkisiyle yüzey pürüzlülüğünün değişmesi, aynı zamanda rodaj veya olası bir hasardan dolayı yüzeylerin kimyasal yapısında bir değişiklik olmaktadır.

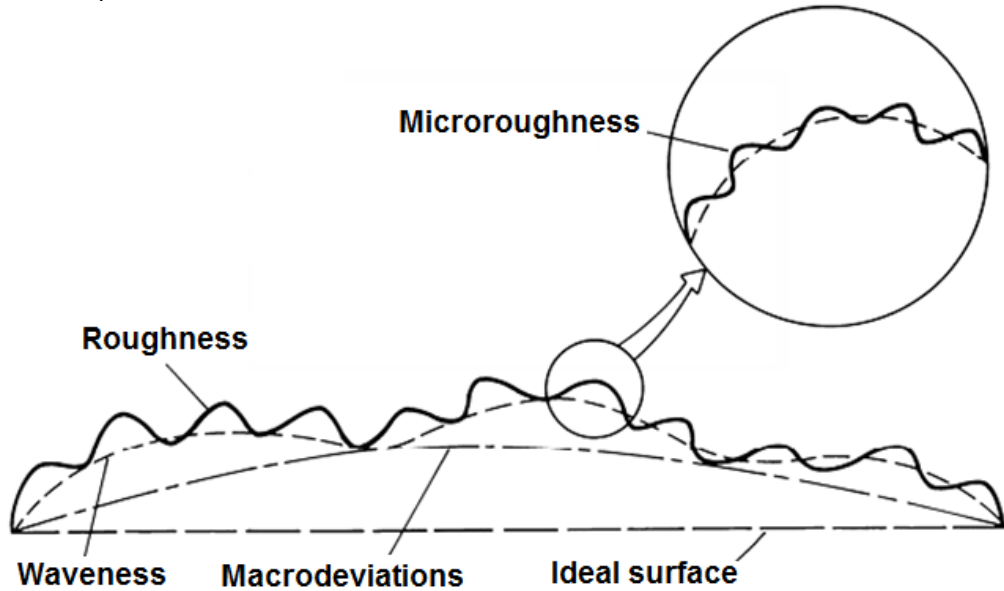


Şekil 3.2 Sembolik düz bir yüzeyin pürüzleri.

Dış çevre ve yüzey oksidasyonu mekanizmasından gelen oksijenin varlığı nedeniyle, oksit tabakası Beilby tabakası'nın üstünde yer almaktadır.

Şekil vermede kullanılan yüzeyin biçimi veya geometrik şekli (topolojisi) oluşum prosesine bağlıdır; bu süreçler kalıplama, döküm, kesim, bileme olmaktadır ve makroskobik olarak görülen düz yüzeyden ziyade çoğu kez pürüzlülük serileri halinde mikroskopik olarak görülmektedir. Geometrik doku yüzeyin profili ile karakterize edilebilir.

introductiontosurfaces



Şekil 3.3 İdeal sert bir yüzeye ilişkin olarak seçilmiş yüzey sapması tiplerinin şematik gösterimi

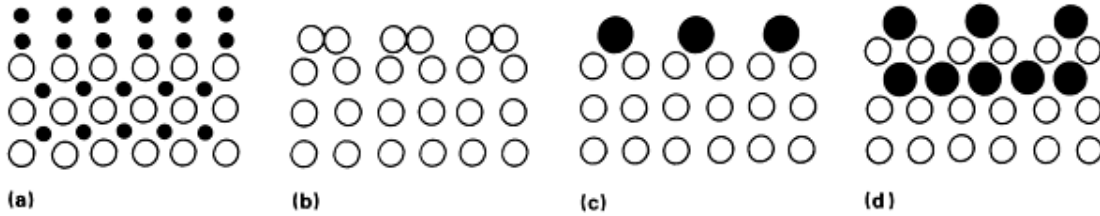
Sıradan yüzeylerin geometrik dokusu, bağlı olarak üretildikleri işleme sürecinin karakteristik özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Çok dikkatli bir işlemeden sonra dahi yüzeylerin yakından incelenmesi, mikroskopik ölçekte bunların hala pürüzlü olduğunu göstermektedir.

Makro sapmalar, sıkça makine sisteminin hassasiyet derecesi ve sağlamlık eksikliğinden kaynaklanan kesit tasarımında meydana gelen düzensiz yüzey sapmalarına bağlı hatalardır.

Dalgalılık, sinüzoidal formda olan ve sıkça işleme esnasında makine-araç-ışlenecek parça sisteminin düşük seviyeli salınımlarıyla belirlenen geometrik yüzeyden periyodik sapmalardır. Tipik olarak, dalga boyu aralığı 1-10mm arasında ve dalga yüksekliği birkaç yüz mikrometreye kadar çıkabilmektedir.

Pürüzlülük, kesici takımının geometrisi ve bunun aşınmasından, işleme şartlarından, işlenecek parçanın mikro yapısından, sistemdeki titreşimler ve buna benzer faktörlerden kaynaklanan dalgalı yüzeyin bizzat kendisine bağlı sapmalardır. Bir yüzey aşınma işleminden geçerken pürüzlülüğü değişir fakat sonradan dengelenebilir.

Mikro pürüzlülük, yüzey pürüzlülüğü ile birleştirilmiş ince pürüzlülüktür. Atoma yakın ölçekte genişleyebilir ve maddedeki dahili kusurlar, yüzeydeki bireysel taneler, yüzey ortaya çıkarken veya çevre etkilerine maruz kalırken meydana gelen korozyon ve oksidasyon sonucu oluşabilir.



Yüzey pürüzlülüğü kusurları üzerinde bileşimin etkileri:
(a) Ayrışma, (b) Yeniden oluşum, (c) Kimyasal tutunma, (d) Bileşik oluşum.

Yüzey yüksek vakum altında olsa dahi, tamamen temiz olamaz. Yüzeylerde meydana gelebilecek bazı olaylar şunlardır:

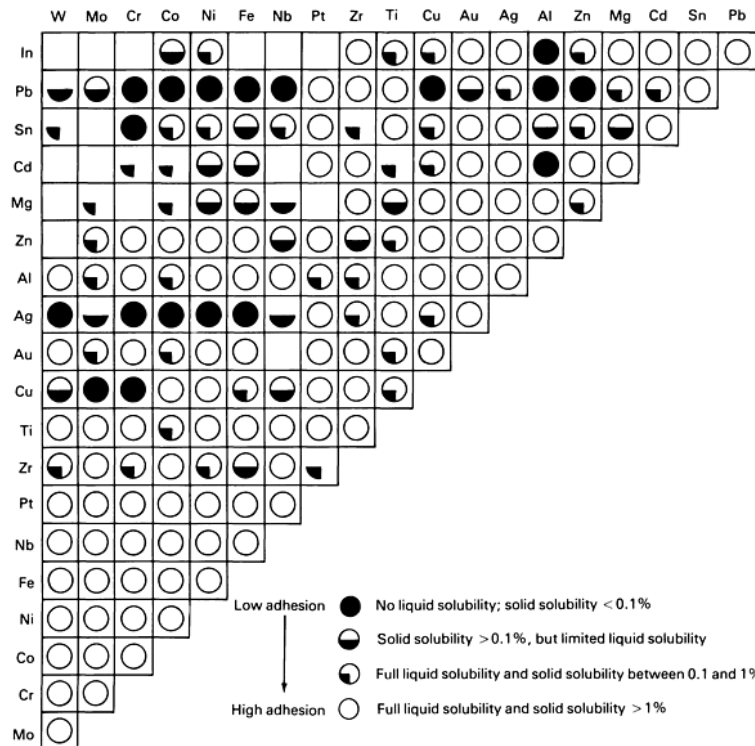
Ayrışma, yeniden yapılandırma, kimyasal tutunma, ve bileşik oluşum.

Ayrışma; alaşım çeşitlerinin tane sınırına ayrışması, mekanik özellikleri derinden etkileyebilen çok iyi bilinen bir olgudur (Şek. a). Ayrıca ayrışma yüzeyde de meydana gelebilir. Bu genellikle işleme veya ısıtma işlem esnasında demirdeki karbon veya nitrojen ara dokuları gibi küçük, hareketli alaşım veya atom kirleri için oluşur. Bazı durumlarda yüzde 1 kadar bile az alaşım elementi yüzeyden ayrışırsa, bu temas eden yüzeyler arasında yapışmayı sağlayabilir. Sürtünme özelliklerinde meydana gelen belirgin değişiklikler demir yüzeylerde karbon, sülfür, alüminyum ve bor ayrışması ve bakır yüzeylerde ise alüminyum ve indiyumun ayrışması olarak gözlenmiştir. Yüzey ayrışmasına bağlı olan sürtünmedeki değişikliklerin tabiatı, özel ayrışmanın söz konusu sebep olduğu yüzeydeki mekanik özellikler, yapışma, oksit film oluşumu vs. olan yüzey tabiatının değişikliğine bağlıdır. Örneğin, içinde bor olan metal tüpler artan sıcaklıkta test edildiği zaman, ilk olarak μ , oda sıcaklığından 350 °C (660 °F) kadar ısıtıldıklarında yüzde 1.0-1.5 ‘dan, yüzde 1.8-2.5 ‘e kadar çıkmaktadırlar. Fakat 500 °C (930 °F) den sonraki sıcaklıklarda ise μ hızla düşmektedir (yaklaşık yüzde 0.25), bu değişiklik yüzeydeki bor nitrat oluşumu ile meydana gelmektedir.

Yeniden oluşum, atomların en dıştaki katmanının kristal yapısı değişikliğe uğradığı zaman meydana gelmektedir (Şek. b). Örnekler, sürtünme esnasında ısınma, karbonun tabakasının gerisinde terk edilme ve elmas yüzey tabakalarının grafitte veya karbona dönüşmesi üzerine silisyumun SiC yüzeyinden buharlaşmasını içermektedir. Yeniden oluşum sürtünme katsayısı üzerinde çok önemli değişiklikler meydana getirmektedir, ancak yeniden oluşumun meydana gelip gelmediği gerçeği sadece dikkatlice yüzey tabakalarının nitelendirilmesiyle belirgin olur.

kimyasal tutunma (Chemisorption) en kolay bir şekilde temiz yüzeylerde meydana gelir (Şek.c). Absorbe edilen parçacıklar, atmosfer veya imalat-işletme sırasında kullanılan yağlayıcılardan türemiş atmosferdeki nem, karbon ve karbon bileşiklerinden oluşan su moleküllerini içermektedir. Ayrıca absorbe edilen parçacıklar insan eli temasından dolayı bileşene geçen çeşitli tuzlar bile olabilir. Absorbe edilen parçacıkların miktarı, yüzeyi kaplama derecesi ve absorbe edilen molekülün durumu iki yüzey arasındaki yapışmayı büyük ölçüde etkileyebilir, dolayısı ile doğrudan doğruya veya dolaylı olarak sürtünme davranışını büyük ölçüde etkiler. Örneğin; tek katmanlı temiz bir metale etan uygulanırsa, çekim kuvveti 400 dyne ‘den 280 dyne düşer. Eğer yüzeye asetilen uygulanırsa çekim kuvveti 80 dyne düşer. Vinil klorit de ise çekim kuvveti 30 dyne düşer, yani değerde ki düşüş temiz bir yüzey için %7-8 ‘dir.

Bileşik oluşum, yüzeyin farklı bir katı madde, gaz veya kimyasal tutunmaya uğramış türlerle temas etmesi sırasında meydana gelebilir. Herhangi bir tribolojik temas olmaksızın, ortamdaki nem ve oksijen kaynaklı reaksiyonlara bağlı olarak bir yüzeyde kolaylıkla oksit ve hidroksit bir tabaka elde edilebilir. İki yüzeyin birbiri arasında sürtünmesi, sürtünmeye bağlı ısınmadan dolayı yüksek sıcaklıklara ulaşan yerel noktalarda yapışmaya neden olabilir; böylece yüzey tabakalarında yerel bileşik oluşumuna neden olarak iç diffüzyon oluşmasına yer alabilir (Şek. d). Bu olay şiddetle sürtünmeyi çok etkiler.

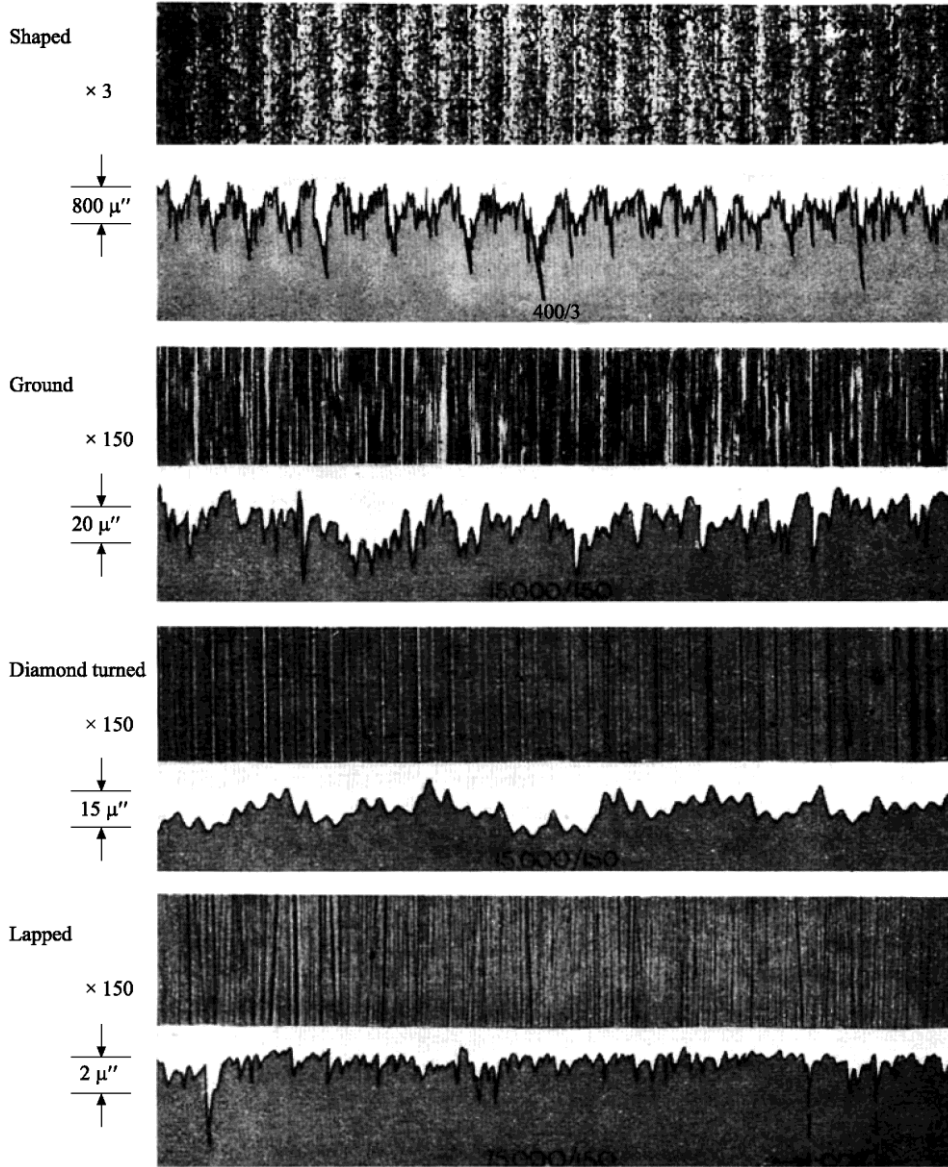


Rabinowicz tarafından geliştirilen tabloda, seçilmiş metal kombinasyonlarından türetilmiş ikili denge diyagramları vardır. Tablo değişik metal kombinasyonları arasındaki muhtemel yapışma (ve bunun sonucunda sürtünme) etkilerini göstermektedir.

Prof. Dr. Hakan KALELİ; Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı, 34349 Beşiktaş-YILDIZ- İstanbul – TURKEY Email: kaleli@yildiz.edu.tr

Örneğin, iyi bilinmektedir ki, birbiri arasında alaşım bileşikleri veya alaşım solüsyonları oluşabilen iki metal arasındaki bu sürtünme, eğer her ikisinde tamamiyle çözünmez maddekinden büyüktür. Bu gerçeğe dayanarak şu şekilde genel bir yol haritası çizebiliriz; hangi metal diğerinin üzerinde güvenle kayabilir veya hangi metal çiftini bu şekilde kullanılmaktan kaçınılmalıdır.

3.2YÜZEY KOMPOZİSYONU (Bileşimi)



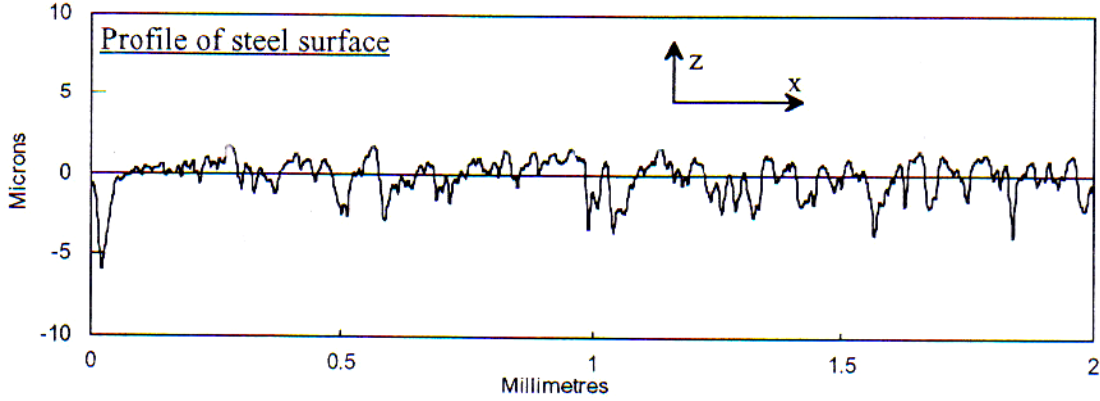
Microfotolar tipik işlenmiş yüzeylerin hem üstten görünüşünü, hemde kesit görünüşlerini (abartılı bir ölçekle) göstermektedir.

Şekil 2.3 deki dalga formlarının incelendiğinde, işleme şekline bağlı olarak çok aralıklı ve tepecik formları farklı şekiller elde edilmektedir. Hatta bu şekiller, yükseklikte 5 kat, aralıkta 3 kata kadar fark göstermektedir. Ayrıca yüzeylerin geometrik yapıları da farklıdır. Yani örnekle, değişik şekillerin enine kesitlerinin profilleride farklıdır, bazıları tırtıklı, kimi daha yumuşak kimi ve kalanlar ise daha rastgele şekiller almıştır. Basitce yüzey pürüzlülüğünde karşılaşılan uğraşılacak olaylar fiziksel olağanüstülükten pratik olarak çok daha karmaşıktır.

3.3 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ (Topoğrafya)

Bütün metal yüzeyler ne kadar mükemmel bir şekilde düzgün ve uniform gözüke bile, mikroskop altında pürüzlüdür. İki yüzey birbirine sürtündüğünde, pürüzler nedeniyle temasla oluşur.

1797 de Brisson şöyle yazmıştır “yüzeyler hiç bir zaman mükemmel bir şekilde pürüssüz ve düz olamaz. Tepe veya pürüzlerin yükseklikleri ve şekilleri bir yatak mekanizmasında performansı büyük ölçüde etkileyebilir.”



Şekil 3.4 Çelik yatak yüzeyinin kesiti – sıfır çizgisindeki gibi olması gereken yüzeydeki tepecikleri gösteren bir grafik

Yüzey pürüzlülüğünün etkileri birçok açıdan, farklı davranışlar sergiler ve metodları vardır, her birini incelemek için belirgin bir beceri, hesap ve ölçüm gereklidir.

Tipik bir yüzey de 10^5 tepecik vardır. Bu nedenle iki işlenmiş yüzeyde ki herbir tepeciğin yüksekliğini, şeklini ve yerini; temasın detaylarını öğrenmek açısından; ölçmek mümkün değildir.

3.3.1 PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİ

Yüzey pürüzlülüğünün öneminden dolayı tribolojinin yanında birçok bilim ve mühendislik alanlarında çok geniş bir yelpazede ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler iki ana katagoriye ayrılabilir:

- Temas edilen metodlar, ölçüm aletleri pürüzlülüğün ölçüleceği yüzeyle direk temas halindedir. Örneğin: sivri uçlu profilometre , tarayıcı iğne mikroskobu.
- Temassız metodlar. Örneğin , optic etkileşim , optic yayınma , tarayıcı electron mikroskobu , elektriksel direnç.

Ölçüm metodunun seçiminde genellikle, ölçülecek alanın ne kadar hassasiyetle ölçülmek istendiği önemlidir. Mesela, ölçülecek yüzeyin büyük olması ve çok fazla hassasiyetle ölçülmek istenmediği durumlarda tipik olarak optic teknik kullanılır. Eğer ilgilenilen alan birkaç milimetreden küçük ise, basit hat taraması yeterlidir ve ölçüm için ince uçlu profile metre uygundur. Eğer yüzey hakkında en yüksek çözünürlükte ve göreceli olarak küçük alanlarda (<100µm boyunda) bilgi alınmak isteniyorsa, tarayıcı mikroskop , örneğin taryıcı iğne mikroskobu (STM) veya atomsal kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılır.

TABLE 2.4 Comparison of Roughness Measurement Methods

Method	Quantitative Information	Three-Dimensional Data	Resolution (nm)		On-line Measurement Capability	Limitations
Stylus instrument	Yes	Yes	15–100	0.1–1	No	Contact type can damage the sample, slow measurement speed in 3D mapping
Optical methods						
Taper sectioning	Yes	No	500	25	No	Destructive, tedious specimen preparation
Light sectioning	Limited	Yes	500	0.1–1	No	Qualitative
Specular reflection	No	No	10 ³ –10 ⁶	0.1–1	Yes	Semi-quantitative
Diffuse reflection (scattering)	Limited	Yes	10 ³ –10 ⁶	0.1–1	Yes	Smooth surfaces (<100 nm)
Speckle pattern	Limited	Yes			Yes	Smooth surfaces (<100 nm)
Optical interference	Yes	Yes	500–1000	0.1–1	No	
Scanning tunneling microscopy	Yes	Yes	0.2	0.02	No	Requires a conducting surface; scans small areas
Atomic force microscopy	Yes	Yes	0.2–1	0.02	No	Scans small areas
Fluid/electrical	No	No			Yes	Semi-quantitative
Electron microscopy						Expensive
Reflection/replication	No	Yes	5	10–20	No	instrumentation, tedious, limited data, requires a conducting surface, scans small areas
Integration of backscattered signal	Yes	Yes	5	10–20	No	
Stereomicroscopy	Yes	Yes	5	50	No	

Ölçüm methodunun son olarak karar verilmesi daha çok kullanıcıya kalmıştır. Kullanılan inceleme yöntemleri speküler yansıma, yansıma emişi veya yüzey ölçümü gibi yollarını da kullanır. Kalite kontrol gibi kısıtlı bilgi istenen deneylerde sıvı veya elektriksel metotlar kullanılabilir. Detaylı pürüzlülük bilgisi gerektiren durumlara ise ince uçlu profilometre yerine dijital optik profilometre veya atomik kuvvet mikroskobu kullanılır. Yumuşak veya çok iyi işlenmiş yüzeylerin incelenmesinde ise optik profilometre veya AFM tercih edilir.

Pürüzlülük ölçülmesinde kullanılan yöntemleri seçerken, kolay kullanım, daha nicelikli sonuç elde edilmek istenmesi, üç boyutlu engemelilik özelliklerinin araştırılması, yatay veya dikey çözünürlük elde edilmek istenmesi, maliyet ve on-line ölçüm yapabilirlik, gibi birçok değişken göz önüne alınır. Tablo 2.4 çeşitli methodların karşılaştırmasını özetlemektedir.

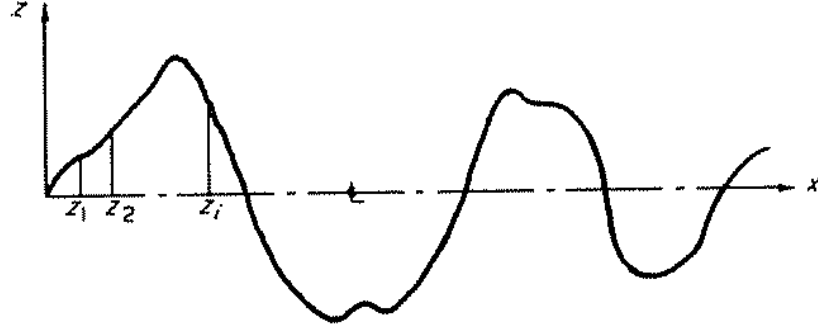
4.YÜZEY PARAMETRELERİ

Yüzey parametrelerinin seçimi belli bir noktaya kadar mutlaka yüzey özelliklerini belirlemek için seçilen metottan etkilenir. İğne metodu yüzey topoğrafyasının sadece tek bir düzlem özelliğini ortaya çıkarır ve bu nedenle yüzeyin nitelenmesini takip eden tek hat profili üzerine dayandırılmalıdır. İmalat mühendisliğinde iki parametreden biri genellikle yüzeylerin dokusunu tanımlamada kullanılır.

$$C.L.A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$$

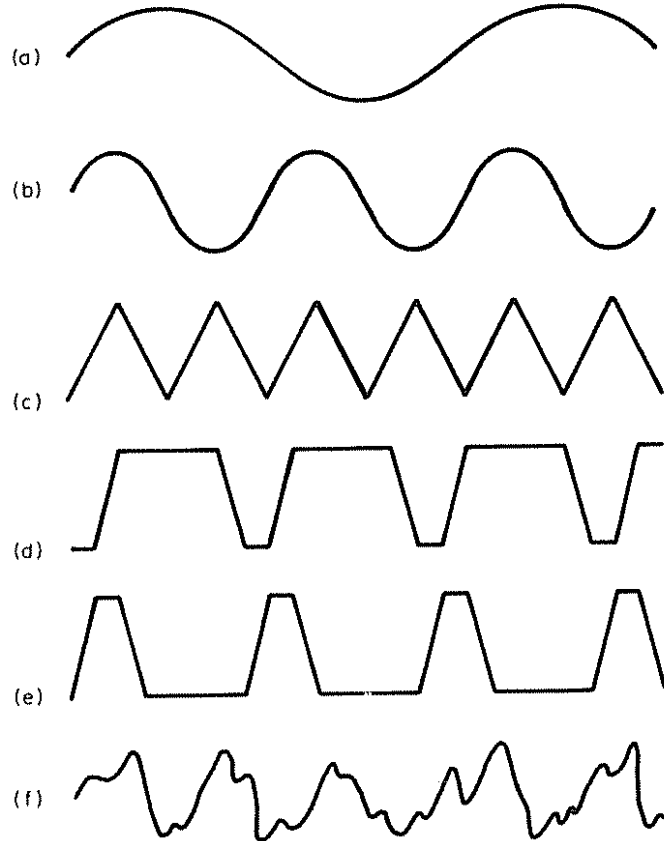
$$R.M.S = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Bu parametreler C.L.A. (Center Line Average) (Ortalama Merkez Hattı) pürüzlülük değeri ve R.M.S. (Root Mean Square) (Ortalama Karekök) değeridir. C.L.A. değeri, profilin ana hattın itibaren dikey sapmasının ortalama aritmetik değeri olarak tanımlanmaktadır ve R.M.S. değeri de bu sapmanın aritmetik ortalamasının karekökü olarak tanımlanmaktadır. Matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterilebilirler:



Şekil 4.1

Burada n , profil sapması z_i 'nin ölçüldüğü orta hat üzerindeki noktaların sayısıdır (Şekil 4.1). Orta hat, profili hatın üstünde kalan ve altında kalan çevrilmiş alanların toplamını birbirine eşit olacak şekilde bölen bir hat olarak belirlenmektedir.

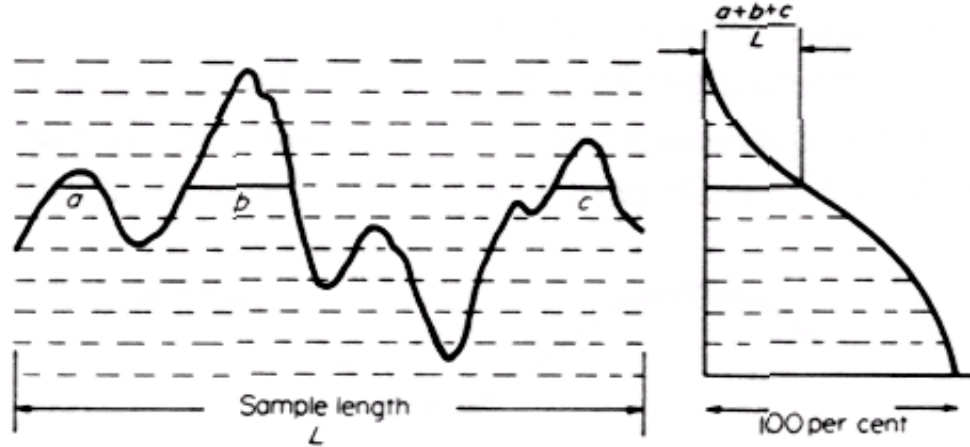


Şekil 4.2 Aynı C.L.A. değerine sahip çeşitli yüzeyler

Görülüyor ki bu parametreler öncelikle profilin sadece dikey yöndeki relatif sapması ile ilgilenmektedirler; bu parametreler pürüzlü yüzeylerin eğimleri, şekilleri ve büyüklükleri ya da ortaya çıkmalarının düzeni ve frekansı hakkında bir bilgi vermemektedir. Bu nedenle çok

farklı profillere sahip yüzeylerin aynı C.L.A. ve R.M.S. değerlerini vermesi mümkündür (Şekil 4.2). Bu tek nümerik parametreler daha çok aynı metotla üretilmiş aynı türden yüzeylerin sınıflandırılmasında kullanışlıdır.

Alıştırılmış yüzeyler, örnek olarak, sadece maruz bırakıldıkları alıştırma bileşiğinin sınıfları farklı olan yüzeyler, aynı pürüzlülük kalıbına sahip olacaklardır ve onları karakterize etmek için tek bir parametre yeterli olacaktır. Fakat daha titiz bir yüzey profili tanımlaması için C.L.A. ve R.M.S. parametreleri yeterli olmayacaktır ve daha fazla bilgi gerekecektir. Yüzeyin dokusunu belirlemek için kullanılacak parametrelerin seçiminin, yüzeyin herhangi bir uygulanabilir durumda belirgin olduğu bilinen yüzey özellikleri ölçülerek belirlenen fonksiyonel gereklilikleri tarafından kontrol edileceğinin farkına varılması önemlidir.



Şekil 4.3 Yatak alanı eğrisinin oluşturulma yöntemi

Profilometrenin bulucuları olan Abbott ve Firestone yüzeylerin aşınma davranışları ile ilgileniyorlardı ve parametrelerini ona göre seçtiler. Yatak alanı eğrisini profilin en alçaktaki noktasının üstündeki farklı noktalarda bulunan örnek uzunluğun fraksiyonunu ölçerek oluşturdukları bir yüzeyin profilini kullanarak bu işlemi gerçekleştirdiler (Şekil 4.3). Yüzeyi yatak alanının en yüksekteki %25'lik kısmı, ortadaki %50'lik kısmı ve en alttaki %25'lik kısmı da kapsayacak şekilde üç yükseklik bölgesine ayırarak sırasıyla pik, medyen ve vadi olarak bu bölgeleri adlandırarak bu üç tanımlı birer parametre olarak belirlediler. Bu bilimadamlarının 39 yıl önce bir tek nümerik parametrenin yüzey dokularının tanımlanmasındaki yetersizliğinin oldukça farkında olması oldukça ilginç bir nokta olarak göze çarpmaktadır. Meyers kayan yüzeyler arasındaki sürtünme ile ilgileniyordu ve profilin eğimi ve eğriliğinin yüzeylerin sürtünme davranışını etkileyeceğini öne sürdü ve ayrıca eğimler ile sürtünme arasında güçlü bir bağlantı buldu.

Yüzeylerin kuru teması üzerine yapılan son çalışmalar gösteriyor ki bu olgu, piklerin şekilleri ve yüzey dokularının yukarı desilleri arasındaki dağılımları ile büyük bir ölçüde açıklanabilmektedir. Gerçekten de bu tür problemlerde vadilerin özellikleri neredeyse önemsizdir. Bu nedenle böyle bir durum için gerekli yüzey parametreleri, dokunun yukarı kısmındaki herhangi bir yükseklikteki pik sayısını, pikler için bir şekil faktörü ve yüzeyin bulunduğu düzlemde bu piklerin meydana gelme frekansının bir ifadesi hakkındaki bilgileri içermelidir. Bu bilgiler özellikle tribolojik durumlar, elektriksel temaslar, termal temaslar ve birleşmiş yüzeylerin yarattığı mafsallık katılıkları gibi oldukça fazla alandaki mühendislik problemlerinde yardımcı olabilmektedir. Buna karşılık yük altındaki yüzeylerdeki gerilim konsantrasyonu bağlamında vadilerin meydana gelmesi ve şekillerinin en önemli parametreler olması beklenir. Yağ filmleri ile ayrılmış yüzeyler için ya da boya gibi katmanlar ile kaplanmış olan yüzeyler için doku karakteristiklerinin bütünüyle ilgilenmemiz gerektiği kolaylıkla görülmektedir.

Şu belirtilmelidir ki istatistiksel terimlerle profillerin yüzeyleri rastgele türde hareketsiz prosesler olarak düşünülebilir ve bu nedenle daha önce anlatılan farklı parametreleri formüle etmek amacıyla yüzeylerin özelliklerini tanımlamak için istatistiksel metotların uygulanması gereklidir.

4.1 Yüzeylerin İstatistiksel Özellikleri

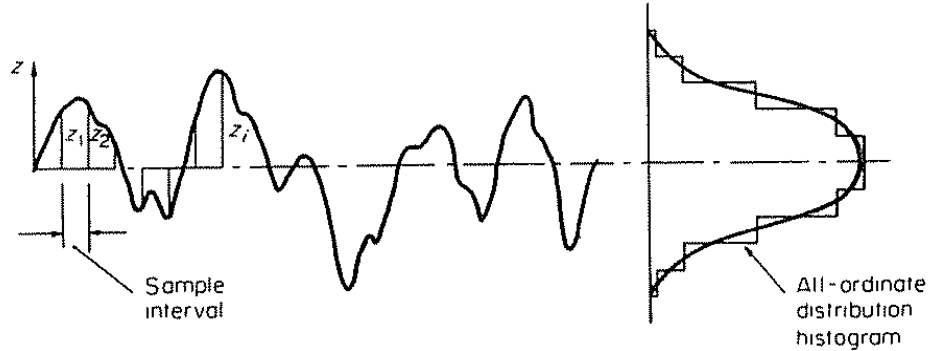
Daha önce anlatıldığı gibi yüzey parametreleri sıkça geometrik varyasyonlarında hem bir periyodik hem de bir rastgele bileşen açığa çıkarırlar. Böylece periyodiklik en çok düzgün şekilli yüzeylerde ve elmas biçimlendirmede göze çarpmaktadır; halbuki taşlama ile imal edilmiş yüzeyler gibi aşındırılmış yüzeylerde oldukça kayda değer derecede bir rastgelelik durumu açıkça göze çarpmaktadır. Periyodik varyasyonları dalgalılık ve sertlik gibi frekans bantlarına ayırmak sıradan bir egzersiz haline gelmiştir. Bir bakıma böyle ayrımlar yapılmaması istenebilir fakat bu bütün frekans varyasyonlarını içeren bir yüzey örneğinin değerlendirilmesini gerekli kılacaktır ve bu durum kaçınılmaz bir şekilde yüzeyin bütününün ölçülmesi gereksinimine yol açacaktır. Bu son gereksinim kabul edilemez olduğundan frekans bantlarına bölme işlemi bu nedenle pratik bir gerekliliktir. Takip eden kısımlarda yüzey sertliği olarak bilinen yüksek frekans tayfının göz önüne alınmasına yoğunlaşılacaktır.

Yüzey Dokularının Yükseklik Dağılımı

Yüzey dokuları profillerinin yüksekliklerinin dağılım fonksiyonları ile uygun olarak tanımlanabilirler. Gerçekten de Abbott ve Firestone'un yatak alanı eğrisi istatistiksel olarak ordinat dağılım eğrisinin kümülatif dağılımıdır. Bu tanım şöyle gösterilebilir:

$$F(z) = \int_{-x}^x \psi(z) dz$$

Burada z , orta hattan ölçülen profil yüksekliklerini gösterirken $\psi(z)$ bu yüksekliklerin dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.4 Ordinat dağılımının türetilme yöntemi

Bu tür dağılım eğrilerinin pratik olarak türetilmesi; z_1 , z_2 ve benzeri yüksekliklerin belli bir soyut l aralığında ölçülmesi ve herhangi bir verilen yükseklik seviyesindeki ordinatların toplanmasını içermektedir. Aslında bu durum profilin sürekli analog sinyalinin, l aralıklarında alınmış soyut bir dijital kayda çevrilmesi olarak değerlendirilebilir. Açık bir şekilde görüldüğü gibi dağılım eğrisi, bu tip bir örnek prosedür tarafından oluşturulan histogram boyunca çizilen en düzgün eğri olarak göze çarpmaktadır.

5. YÜZEYLERİN TEMASI

Açıkça bellidir ki herhangi bir triboloji çalışması katı cisimlerin temasının mekaniğinin ayrıntılı bir incelemesi içine almak zorundadır. Bu, geniş çeşitlilikteki geometrik biçimli cisimlere uygulanan yüklerden kaynaklanan gerilimler ve birleşik deformasyonların çeşidini anlamayı içerir. Özelde, bizler sadece katı yüzeylerdeki gerilim ve deformasyon ile değil aynı zamanda baştan başa yüzey katmanlarının derinlikleri ile de ilgilenmekteyiz. Katıların deformasyonuna neden olan herhangi bir yük kolaylıkla bir normal (dik) ve bir de teğetsel bileşenine ayrılabilir. Çoğunlukla, bu iki etkiyi gerilim ve deformasyondan hangisine neden olduklarına bağlı olarak ayrı bir şekilde dikkate almak ve daha sonra bu ikisini üst üste ekleyerek toplam etkiyi elde etmek uygundur. Bu gibi durumlarda sistemler gerçekte statik olarak belirli oldukları için üst üste koyma ilkesi kabul edilebilir.

Yüklere maruz kalan katı malzemeler ya da elastik ya da plastik bir biçimde deforme olurlar; birinci deformasyon gerilim ve gerinim arasında basit lineer ilişkilerle karakterize edilebilir ve gerçekte tersinirdir. Plastik deformasyon nedeni ile gerilim - gerinim ilişkileri daha karmaşıktır ve yük kalksa bile devam eder ve deformasyonun bir kısmı kalır. Çoğu temas durumlarında elastik ve plastik deformasyonun her ikisinin bir karışımını buluyoruz. Böylece, temas halindeki katılara etkiyen yükler katı cisim hacminde genel bir elastik davranışa neden olabilir, ama esas temasın yüzey pürüz uçlarında olması gerektiği için bunlar uçlarında bölgesel bir plastik deformasyona maruz kalabilir. Plastik / elastik deformasyonun miktarı kesin bir biçimde uygulanan yükün değerine bağlıdır ve plastik deformasyon derecesi yükün artışı ile aynı derecede artar. Bu sebepten, metal işleme proseslerinde nominal temas basınçları aşırı büyük olduğu zaman yüzeylerin plastik deformasyon miktarı artar.

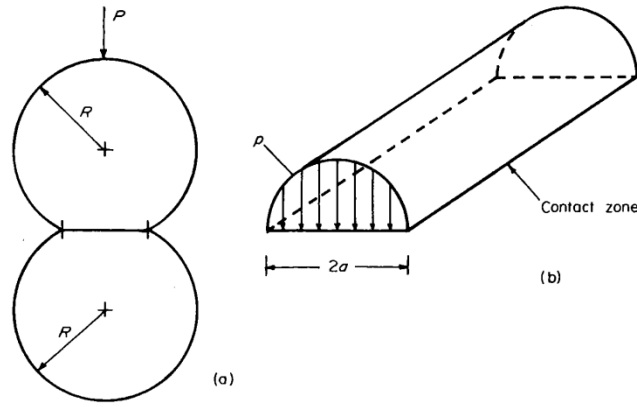
Belirtilenlerin çoğunda deformasyon modellerini silindirlere ve kürelere uygulanan yüklerin neden olduğu şeklinde dikkate almalıyız. Bu çalışma iki sebepten dolayı önemlidir:

- (a) Bir çok mühendislik teması, taşıtların tekerlekleri, rulmanlar, diş temaları, bir çok değiştirilebilir hız sürücüler, kayış ve halat tahriklerindeki gibi cisimlerin teması ile ilgilidir.
- (b) Tüm katı cisimler küresel şekilli kabarcıklar olarak dikkate alınabilecek yüzey pürüzlerine sahiptir. Böylece, gerçekte düz cisimlerin teması böyle küresel pürüzlülüklerin uçlarının deformasyonlarına yoğunlaşmamız gereken yaklaşık olarak küresel olan temaların bir sırasına çalışmak zorunda bırakıyor.

Son olarak, kayar temalarda herhangi bir sürtünmenin üstesinden gelmek için yapılmış olan işin en sonda bir ısı salınımı olarak ortaya çıkacağının hepimiz farkındayız. ; bir halata tutunarak aşağı doğru kaymayı deneyin, bunun acı verici olacağı açıktır. Bu yüzden biz bu ısı salınımının doğası, buna neden olan sıcaklıklar ve temas halinde olan katıların hacimleri boyunca bu sıcaklıkların dağılımı ile yakından ilgiliyiz. Bir halatla aşağı doğru kaymada cildimizin yüzey sıcaklığının elimizin sıcaklığını fazlaca aşacağı aşıkardır.

5.2 Hertz Temaları

Daha önce bahsedildiği gibi bizler özellikle geometrileri dairesel yaylar ile tanımlı cisimler arasındaki temas problemleri ile ilgilenmekteyiz. bu problem ilk defa **Hertz** tarafından elastik temas için çözüldü ve çoğunlukla **Hertz Teması** olarak anılmaktadır.

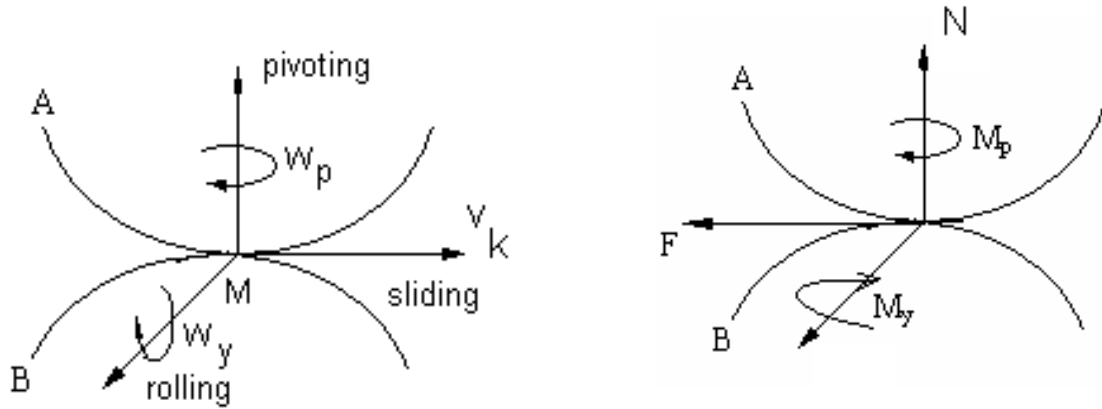


Şekil 5.6 Temas halindeki iki silindir için basınç dağılımı

Yüzey zorlanması şartları altındaki özdeş iki silindir arasındaki teması dikkate alalım. Simetri durumundan, temas bölgesinin silindirlerin düz bir çizgi oluşturmaya yönelik baskılarından oluştuğunu görebiliriz. Yani, düz bir temas yüzeyi oluşur, şekil 5.6.

6. SÜRTÜNME

Sürtünme'yi incelemekten önce birbirine göre bağıl hareket yapan iki parçada ne gibi hareketlerin olduğu bilinmesi gerekir:



A ve B'nin bağıl hareketinde hareket ve hız üç bileşene ayrılabilir:

- 1- V_k = kayma hızı
 - 2- W_y = yuvarlanma açısal hızı (A parçasının B parçası üzerinde yuvarlanma (dönme) hareketidir).
 - 3- W_p = pivotman (topaçlama) açısal hızı (A parçasının kendi etrafında dönmesi).
- M'den geçen ani dönme eksenini etrafındaki dönme bu şekilde iki bileşene ayrılmış olur. A'nın B üzerindeki hareketine karşı direnen kuvvetlere sürtünme kuvvetleri denir. Bu kuvvetler:
- 1) F = kayma sürtünmesi (kayma yönünde ters yönde etki)
 - 2) M_y = yuvarlanma sürtünme momenti (Yuvarlanmada ters yönde moment)
 - 3) M_p = pivotman sürtünme momenti (Ters yönde pivotman moment)
 - 4) N = cisimlerin birbirine üzerine girmesini önleyen normal tepki.

Sürtünmeye neyin neden olduğuna dair evrensel bir düşünce yoktur. Ancak şu açıktır ki, sürtünme birbiriyle etkileşim halinde çalışan mekanizmaların sayısına bağlıdır fakat bu farklı koşullar altında farklı oranlarda görülebilir. Sürtünme bir katı gövdenin diğerinin üzerinde veya yüzey boyunca taşınmaya ve kaymaya gösterdiği dirençtir. Sürtünme günlük hayatımızda belirgin sayıdaki aktivitelerde ve çoğu endüstriyel proseste önemli bir rol oynar. Cismin harekete başlamasına, yönünü değiştirmesine ve sonrada durmasına yardımcı olur. Sürtünme olmadan, cisimleri kolaylıkla hareket ettiremez, cisimleri sıkı tutmayı sağlayamaz, bir kibriti yakamaz ve bunun gibi diğer günlük işlerimizi yerine getiremeyiz. Sürtünme olmadan, çoğu vidalı bağlantı sıklık sağlayamaz, dönen miller çalışmaz ve açıkça sürtünme kaynağı diye bir şey olmazdı. Sürtünme olmadan, ne bir viyolinin sesini ne de bir frenin çılgınlığını duyabilirdik.

6.1 İç ve Dış Sürtünme

Cisimlerde dahili ve harici sürtünmelerin ayırt edilmesi arzu edilir. Genelde yüzey etkileşimleri genel harici sürtünme terimi için sınıflandırılabilirken, moleküler-kinetik olaylar ve cisim malzemesinin hacim enerjisinin dağılmasının meydana gelmesi dahili sürtünmenin sonucudur. Fizikçiler, tabi ki gerçekte var olmayan, sıfır kalınlığa sahip bir sınır yüzey tanımlayacaklardır.

Bu tanım bu yüzden geliştirilmeli ve yüzeye sonsuz küçük değerdeki kalınlık verilerek Angstrom den nano ya kadar olan birimlerle ölçülebilir durumda olmalıydı. Yüzey sürtünme kuvvetlerinin orijini moleküler-kinetik değişiklik içindedir ve bu da tabaka içindeki kayan elemanların ölçülebilir durumda olmasını sağlamaktadır. Bu karma tabaka aktivitesi pratik durumda sıfır boyutlarına yaklaşır.

Katılarda dahili sürtünme, yer yüzeyine yakın ve denge altındaki hacim moleküllerinin yer ile gösterdiği ortak etkileşim veya birbirine olan itme tepkileriyle harekete zorlanmasının direk sonucudur. Bazı hareketler cisim malzemesinde içten kesilmeye neden olur ve bu da iç ısı üretimiyle sonuçlanır. Teğet modülü, teğet kaybı, durdurma kapasitesi iç sürtünmeyi açıklamak için ortak konulardır. Cisimlerde dahili ve harici sürtünmelerin ayırt edilmesi arzu edilir. Genelde yüzey etkileşimleri genel harici sürtünme terimi için sınıflandırılabilirken, moleküler-kinetik olaylar ve cisim malzemesinin hacim enerjisinin dağılmasının meydana gelmesi dahili sürtünmenin sonucudur. Fizikçiler, tabi ki gerçekte var olmayan, sıfır kalınlığa sahip bir sınır yüzey tanımlayacaklardır.

Bu tanım bu yüzden geliştirilmeli ve yüzeye sonsuz küçük değerdeki kalınlık verilerek Angstrom den nano ya kadar olan birimlerle ölçülebilir durumda olmalıydı. Yüzey sürtünme kuvvetlerinin orijini moleküler-kinetik değişiklik içindedir ve bu da tabaka içindeki kayan elemanların ölçülebilir durumda olmasını sağlamaktadır. Bu karma tabaka aktivitesi pratik durumda sıfır boyutlarına yaklaşır.

Katılarda dahili sürtünme, yer yüzeyine yakın ve denge altındaki hacim moleküllerinin yer ile gösterdiği ortak etkileşim veya birbirine olan itme tepkileriyle harekete zorlanmasının direk sonucudur. Bazı hareketler cisim malzemesinde içten kesilmeye neden olur ve bu da iç ısı üretimiyle sonuçlanır. Teğet modülü, teğet kaybı, durdurma kapasitesi iç sürtünmeyi açıklamak için ortak konulardır.

6.3 Genel Sürtünme Teorileri

Kuru sürtünmenin oluşumunu açıkladığı ileri sürülen genel sürtünme teorilerinin bazıları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

6.3.1 Mekanik Kilitlenme

Amontons ve de la Hire 1699'da metal sürtünmesinin yüzeyi pürüzlü elementlerin mekanik kilitlenmesinden oluşabileceğini ileri sürdüler. Bu mekanizma, statik sürtünme katsayısının varlığını açıklar ve dinamik sürtünmeyi de yüzeylerin üstündeki pürüzlülüğü kaldırmak için gerekli olan kuvvet olarak tanımlar.

6.3.2 Moleküler Çekim

1929'da Tomlinson ve 1936'da Hardy, sürtünme kuvvetlerini, materyallerden birinin temas eden yüzeyler üzerindeki atomlarının çekim alanı dışında "kopartılmış" olması halinde enerji kaybı olarak nitelemişlerdir. Sonraki çalışmalar adhezyonel sürtünmeyi enerjinin yüzey ve alt yüzey moleküllerinin gerilme, kırılma ve gevşeme döngüsü içinde yok olduğu moleküler kinetik bant kırılmasıyla ilişkilendirmiştir.

6.3.3. Elektrostatik Kuvvetler

Bu teori 1961'de iç yüzeyler arasında karşıt kutuplaşmalar üreten net elektron akışını meydana getirmesiyle açıklanan metal sürtünme yüzeyleri arasındaki stick-slip (yapışma-kayma) olayı olarak sunulmuştur. Bu yüklenmeler yüzeyleri bir arada tutan elektrostatik çekim olarak varsayılır.

Kaynak, Kesme ve Sürtme Kuvveti

Son önerilen teorilerden biri 1950'de Bowden tarafından yapılmıştır ve metal sürtünmesi için en çok kabul görenlerdendir. Yüksek basınçlar, ayrı temas noktalarında yerel kaynaklar oluşturur ve form alan kesişim noktaları sonradan yüzeylerin kayma etkisiyle kesilir. Sürtme kuvveti daha sert malzemenin pürüzlülüğünden daha yumuşak malzemenin matriksi sayesinde sürtünmenin deformasyon unsurlarına yardımcı olur.

Çok daha önceki teorilerde, fiziksel, kimyasal ve mekanik gerçeklerin detaylı anlaşılmasının eksikliğinden dolayı sürtünme kuralları doğal olarak geometrik ve mekanik olarak tanımlanıyordu. Bu özellikle mekanik kilitlenme ve önceki moleküler çekim teorilerinde doğrudur. Kilitlenme teorisinden, enerji kaybına yol açmayan kayma hareketi sırasında bir yüzeyden diğer yüzeye artan ve azalan pürüzlülüklerden beri vazgeçilebilir ve sürtünme kesinlikle bir kayıp mekanizmadır. Benzer şekilde, elektrostatik teorisi uzun zaman aralıkları boyunca sürtünme katsayısının düşmesine sebep olan ara yüzeylerden elektron kaybını ifade etmektedir ki, henüz bu konuda yeterli gözlem yapılmamıştır. Kaynak-kesme teorisi mikroskobik düzeyde metalik sürtünme için en tatmin edici açıklamayı sunar. Elastomerlerde ise günümüzde moleküler çekim teorisinin en fazla gözüktüğü durum yaşanır.

6.4 Sürtünmenin Temel Mekanizması

Herhangi bir metalik pürüzlü yüzeyin pürüzlerinin yük altında nasıl davrandığı detaylarıyla göz önünde bulundurulduktan sonraki mantıklı adım, yüzeyleri birbirine sürttüğümüzde sürtünme kuvvetlerinin nasıl oluştuğunu araştırmak olacaktır. Bu bölümde, bu konu incelenecektir. Başlangıçta sürtünmenin temel halini göz önünde bulunduracağız.

İki yağlanmamış yüzey arasındaki relatif hareketten oluşan sürtünme iki ana faktör rol oynar. İlk ve genel olarak en önemlisi, gerçek temas bölgesinde meydana gelen adhezyon, ikinci olarak da deformasyon terimi olarak sıralanabilir. İki faktör arasında etkileşim olmadığını farz edersek

$$F = F_{adhesion} + F_{deformation}$$

yazabiliriz. Burada F, toplam sürtünme kuvvetidir. Yük W'ye bölünürse, yeni formül sürtünme katsayısı terimleri ile yazılır.

$$f = f_A + f_D$$

Burada A ve D indisleri sırasıyla adhezyon ve deformasyon terimlerini belirtirler.

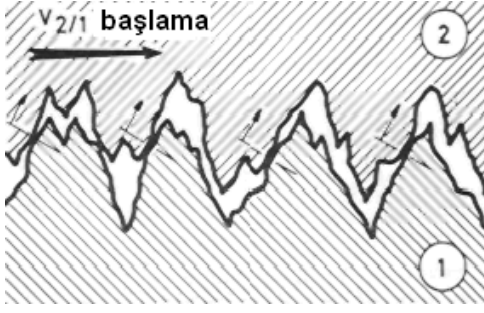
Deney şartlarının dikkatlice seçilmesiyle adhezyon ve deformasyon terimlerini birbirinden ayırmak mümkün olur. Görsel olarak yumuşak yüzeylerin seçilmesiyle pürüzlülük özellikleri hemen hemen elimine edilmiş olur ve deformasyon katsayısı ihmal edilebilir. Ölçülen toplam sürtünme kuvveti adhezyon nedeniyle tek kalır. Alternatif olarak, bağıl hareketi olan iki pürüzlü yüzey arasında yağlayıcı kullanmak adhezyon teriminin hemen hemen elimine eder ve ölçülen sürtünme kuvveti sadece deformasyon bileşeni ile ifade edilir. Normal durumlarda kuru sürtünme yapan iki pürüzlü yüzey arasındaki adhezyonal sürtünme katsayısı deformasyonun katkısından iki kat daha fazladır. Adhezyon ve deformasyondan sorumlu fiziksel mekanizmalar, metaller ve elastomerlerde tamamen birbirlerinden farklıdır.

4. SÜRTÜNME VE AŞINMA

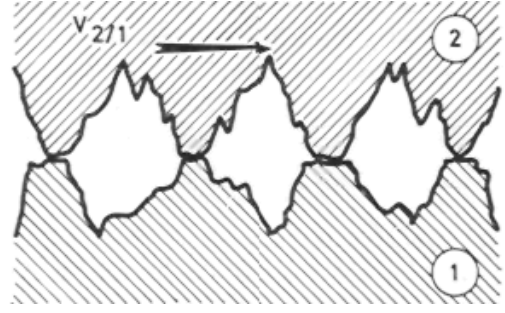
4.1, Sürtünme

Aşınma mekanizmalarını incelemeyen önce sürtünme veya metal sürtünmesi, yağlanma şartlarındaki etkilerinin bilinmesi gerekir. Metallerin birbiri ile sürtünmesi oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu durum yağlama olmaksızın kuru ortamda gerçekleştiği takdirde, kuru sürtünme olarak adlandırılır. Metal yüzeyindeki mekanik ve fiziksel özellikler, kristal yapısı, yüzeydeki binlerce molekül tabakaları bu olaydan etkilenmektedir. Dolayısı ile yüzey durumu, her iki yüzeyin birbirine olan uygunluğu, yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğü yanında bu pürüzlerin asperitleri (pürüz uçları), onların birbirine kaynaması, oksidasyon veya korozyondan dolayı kimyasal yapısının değişmesi veya tamamıyla hasara uğraması sürtünmeye etki eden başlıca faktörlerdir.

Bütün metallerin yüzeyleri ne kadar parlak ve düz bir görünüme sahip olsa da mikroskopik olarak pürüzlüdür. İki yüzey sürtündüğü takdirde, temas, asperitler (pürüz uçları) arasında gerçekleşir. İki pürüzlü yüzeyi ele alalım; statik ortamda, durgun halde her iki zıt yüzlerin birbirlerine göre hareketine Statik Sürtünme adı verilir. Aralarında yağlayıcı bulunmaması nedeniyle sürtünme katsayısı en yüksek değerindedir. Düşük kayma hızlarında ise sürtünme süresizdir. Hareket yapışma-kayma şeklinde devam eder ve hızdaki artış sonucu sürtünme sadece pürüzlerin en uç kısımlarında gerçekleşir. Dolayısı ile sürtünme katsayısı azalır. Bu son duruma Dinamik Sürtünme adı verilir (şekil 6a,b).



Şekil 6a. Statik sürtünme.



Şekil 6b. Dinamik sürtünme.

Pürüz temasının değişmesi sebebiyle yüzeylerdeki gerçek temas alanı ile gizli temas alanları arasında farklar mevcuttur. Bu oran $1/10^3$ ila $1/10^4$ arasındadır. Buda temas basıncını değiştirmektedir.

İki yüzey birbirine göre hareket halinde iken sürtünme etkisi ile yüksek basınçlara bağlı olarak ısı enerjisi oluşur ve temas eden pürüz uçları plastik deformasyon sonucu birbirlerine kaynarlar. Kaynama; soğuk kaynama veya sıcak kaynama şeklindedir. Sıcak kaynama malzemenin yeniden kristalleşmesi ve iç difüzyonu ile ilgilidir. Soğuk kaynama ise düşük sıcaklıklarda metal yapışması şeklindedir.

$$\text{Sürtünme katsayısı} = \frac{\text{Sürtünme Kuvveti}}{\text{Uygulanan Kuvvet}} \quad \text{olarak tanımlanır.}$$

Sürtünme olayı yağlayıcının varlığı ile daha karmaşık bir yapıya sahip olur. Sürtünme katsayısını azaltmak için en uygun yollardan biri yağ filminin oluşturulmasıdır. İçten Yanmalı Motorlarda yağlama şartındaki sürtünmeye etki eden başlıca faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- Yük veya basınç,
- Hareket şekli (Kayma, yuvarlanma, dönme),
- Temas şekli,
- Yüzey sıcaklığı,
- Isı akış şartları,
- Malzeme tipi ve ısıl işlemleri,
- Tolerans boşlukları,
- Yüzey durumu veya topografyası,
- Çevre şartı (tozlu, korozyif ortam),
- Yağlayıcının tribolojik karakteristikleri,
- Yağlayıcının yeni veya kullanılmış olduğu'dur.

Değişik yağlama şekilleri bulunmaktadır. Bunu en iyi açıklayan Stribeck eğrisine bakmak gerekir (şekil 7). Gerçek yağlama şartları için bir çok parametreler bulunmaktadır. Pürüzsüz bir yataktaki yüzeyin herhangi bir anındaki teması esnasında, sürtünme katsayısı değişimini en iyi ifade eden ve Stribeck eğrisi adı altında bulunan boyutsuz Sommerfeld sayısı bize değişik tipteki yağlayıcıların incelenmesinde önderlik eder.

$$Z = \frac{\eta \cdot N}{P} \quad (3.1)$$

Z = Sommerfeld sayısı,

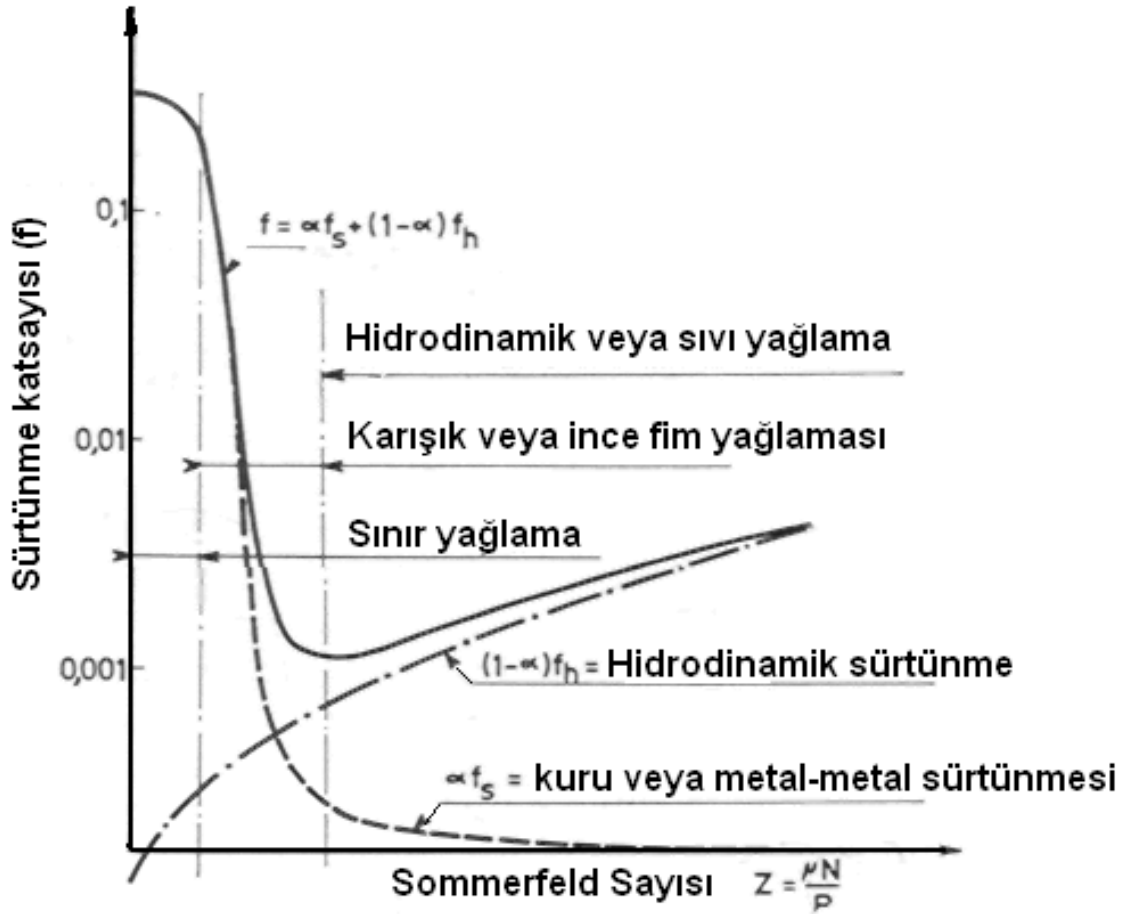
η = Akışkanın dinamik viskozitesi ($N.s/m^2$),

N = Şaftın hızı veya devir sayısı (kayma hızı) (dev/s),

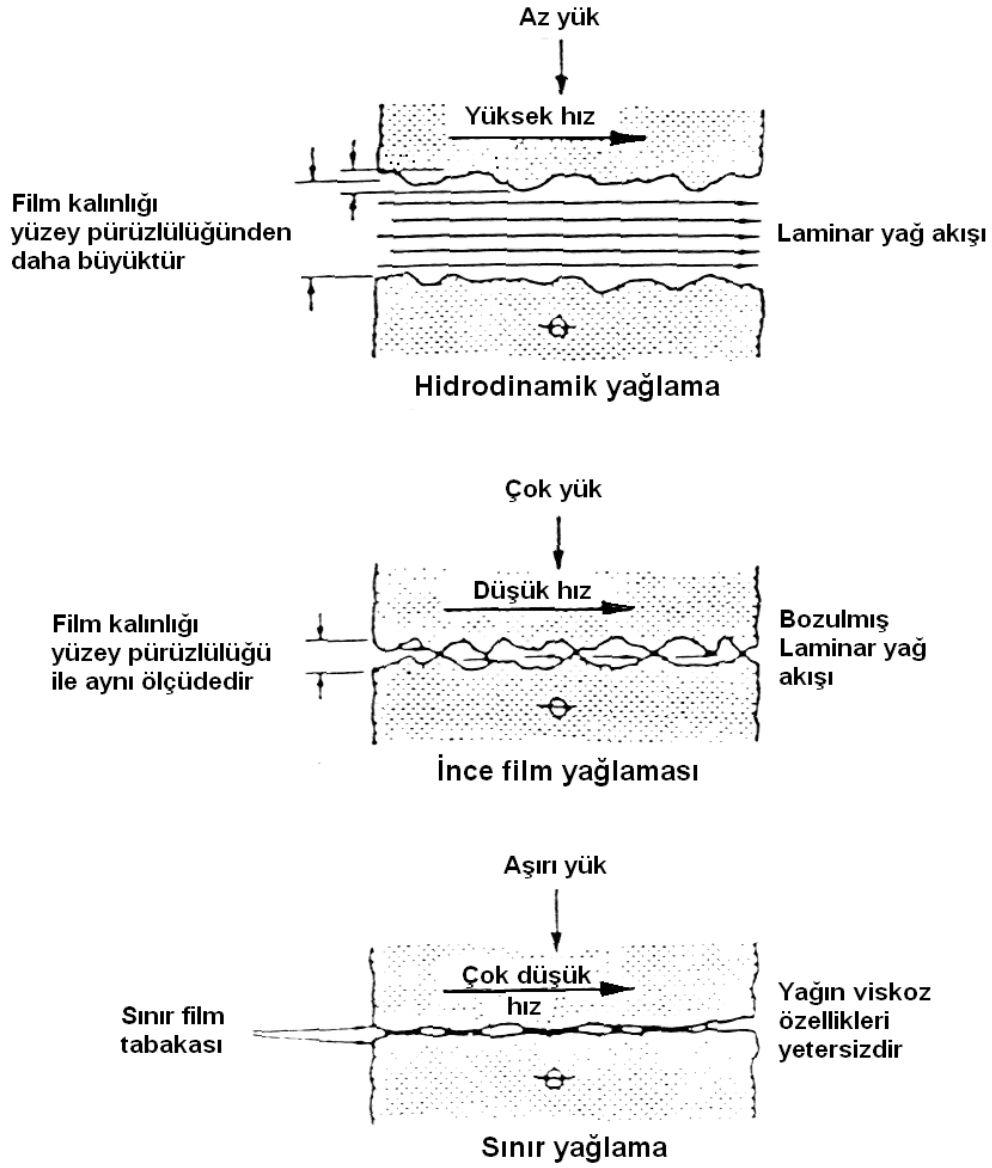
P = Birim yüzeye etki eden yük (temas eden yüzeylerdeki basınç) (N/m^2).

Sürtünme katsayısı f ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$f = \alpha \cdot f_s + (1 - \alpha) \cdot f_h \quad (3.2)$$



Şekil 7 Yağlama Bölgeleri.



Şekil 8. Yağlama Şekilleri.

Burada:

f_S = Metalden metale kuru sürtünme katsayısı.

f_h = Yağlayıcı moleküllerin iç viskoz sürtünmesinden dolayı oluşan akışkan veya hidrokinamik sürtünme katsayısı.

α = 0 ve 1 değerleri arasında değişen metalden metale temas sabiti.

Şayet α 1'e çok yakın bir değer aldığı takdirde $(1-\alpha)$ ihmal edilebilir, dolayısı ile f , f_S değerine çok yakın olur ve sürtünme sınır sürtünme şeklinde olup, kuru (katı) veya metal sürtünmesine yaklaşıp. Yağ filmi bir veya birçok molekül tabakaları arasında yok denecek kadar az olup, pürüz uçları arasındaki metal-metal teması önlenemez.

Şayet α 0'a yaklaşırsa f de f_h sıvı sürtünmesine doğru gider ve yağlayıcı sürtünen yüzeyleri tamamen ayırarak kalın bir yağ filmi oluşturur. Bu durumda sürtünme viskoz veya

hidrodinamik sürtünme olarak adlandırılıp, yağlama şartları "sıvı" veya "tam" veya "dengeli" veya "kalın film" yağlanması şeklinde ifade edilebilir.

Şayet α , 0 ila 1 arasında ise o zaman “iki yağlama şekli birbiri üstüne binmiştir” denir. Sürtünme karışık veya yarı-hidrodinamik olarak adlandırılıp, yağlama şartları ise "kısmi" veya "dengesiz" veya "yarı sıvı" veya "ince film" yağlanması olarak ifade edilebilir (şekil 8).

Günümüzde motor dizaynındaki ilerlemeler yakıt ekonomisini iyileştirme açısından sürtünmelerin azaltılması yönündedir. Sürtünmeden dolayı oluşan güç kaybı yağın kendisindeki ve su soğutmalı radyatördeki ısı kayıplara dönüşmekte, dolayısı ile yakıt harcamındaki iyileşme daha çok ısı kayıpların azaltılması ve yanma veriminin artırılması doğrultusunda ele alınmaktadır. Ayrıca sürtünme kayıplarındaki azalma yağlama yağının çalışma performansını arttırmaktadır.

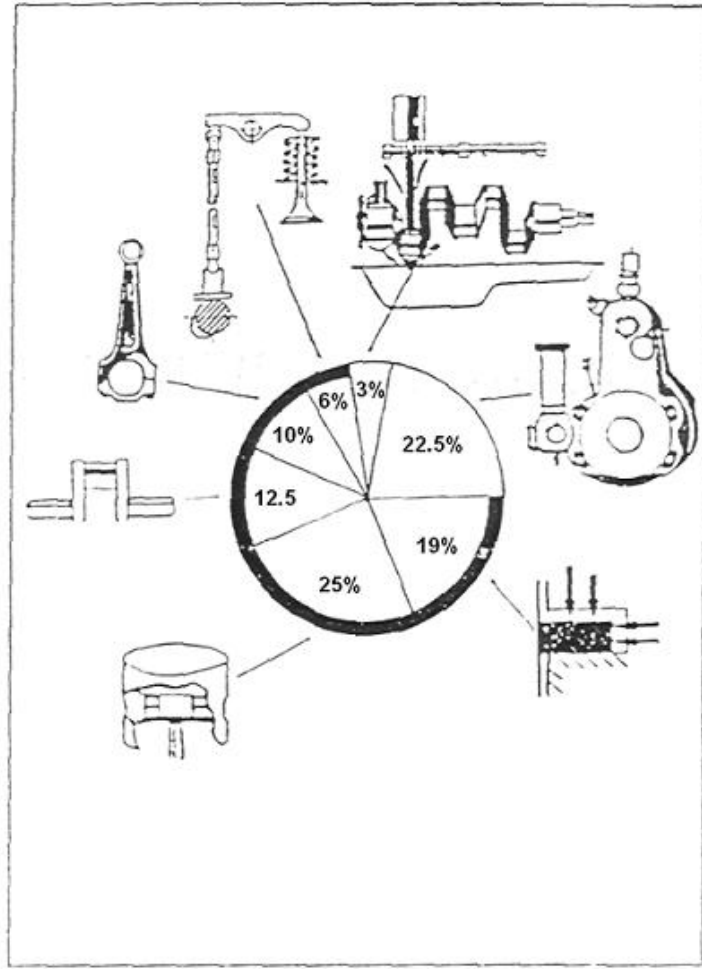
İçten Yanmalı Motorlarda sürtünme kayıpları ısı kayıpların toplamından düşüktür. Dr. Lang (Daimler Benz) tarafından yapılan enerji dağılımına göre yakıttan alınan mevcut olan enerjinin % 30'u egzoz gazlarına, diğer % 30'u silindir soğutulmasına, geri kalan % 40'ı ise motor indike işi olarak verilmektedir.

İçten Yanmalı Motorlarda mekanik kayıplar yaklaşık olarak silindirdeki indike işin % 25'ini kapsamakta olup, toplam enerjinin % 10'unu teşkil etmektedir. Dr. Lang'a göre sürtünme kayıpları toplam mekanik kayıpların % 72.5'ini içermekte olup, geri kalan kısımlar yağ ve su pompaları, soğutma fanı, jeneratör, kompresör ve hidrolik pompalar vs.. gibi yardımcı organlar tarafından harcanmaktadır.

Sürtünme kayıpları şu şekilde ifade edilebilir :

- Biyel yatakları % 10,
- Ana yataklar (krank) % 12.5,
- Piston % 25,
- Segmanlar % 19,
- Supap mekanizması % 6 dır.

$$\begin{array}{r} + \\ \hline \% 72.5 < 100 \end{array}$$



Şekil 9. İçten Yanmalı Motorlarda sürtünme kayıpları dağılımı.

Bu değerler ortalama değerler olup, silindir sayıları farklı olan çeşitli hız ve yüklerde çalışan motorlardan elde edilmiştir; dolayısı ile motor işletim şartlarına ve motor tipine göre değişebilmektedir. Ancak motorlarda meydana gelen sürtünme kayıpları için önemli bir skala oluşturmaktadır. Bu kayıplar en fazla piston ve segmanlarda meydana gelmektedir. İçten Yanmalı Motorlarda enerji tasarrufu açısından sürtünme kayıplarında % 10'luk bir azalma % 1 ila 3 arasında yakıt harcamında ekonomi sağladığı tahmin edilmektedir. Sürtünme kayıplarının azalması ise motor dizaynındaki değişiklik (ağırlığın azaltılması), aerodinamik yapı, uygun yağlama, tekerleğin yola olan dönme direncinin azaltılması gibi unsurlara dayanmaktadır (Davis F.A.: Martin F.A., 1985).

4.1.1. Sınır Yağlama Şartları

Sınır yağlama şartları, motorların ilk hareketinde ve durması esnasında yatak, segman ve silindirlerde; motorların değişik işletim şartlarında ise bilhassa piston-segman ve silindir yüzeyleri arasında, oldukça ağır yük altında çalışan Alt ve Üst Ölü Noktalarda ve yavaş hareket eden supap sapları ve iticilerinde, krank mili yataklarında, yağ pompası dişlilerinde meydana gelir.

Birbirlerine göre bağıl hareket eden iki yüzey arasında, viskozitenin dışında, aşınma ve sürtünmeyi tanımlayan şartlar yüzey özellikleri olduğu kadar yağlayıcı özelliklerini de içermektedir. Aşınma mekanizmalarının en fazla meydana geldiği sınır, yağlama şartları altında sürtünen malzemelerin seçimi, onların fiziksel ve mekaniksel (sertlik, elastiklik, kayma gerilmesi, vs..) özellikleri, metal-sıvı yapışma enerjisi gibi unsurlar önemli rol
Prof. Dr. Hakan KALELİ; Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı, 34349 Beşiktaş-YILDIZ- İstanbul – TURKEY Email: kaleli@yildiz.edu.tr

oynamaktadır. Sınır yağlama şartlarındaki yağlayıcı özellikleri genel olarak yüzey polaritesi veya kimyasal etkinliği, yani metallerle olan reaksiyonudur. Bu yüzden sınır yağlayıcılar poler moleküllere sahip olup; kükürt, fosfor ve deterjan-dispersan gibi katıkları ihtiva etmektedir. Diğer bir deyişle; bu yağlayıcılar organik metal yapıya sahiptirler.

Sınır yağ filmi çeşitli tabakalardan meydana gelmiştir. Moleküller metal yüzeylerine dik, bu yüzeyler arasında ise paralel şekilde yer almışlardır. Sadece ilk tabaka sınır yağlamada önem taşımaktadır.

Sıvı yağ molekülü hidrokarbon zincirinden oluşmuştur. Bu da onların yüzeye yapışmasını sağlar. Bazı poler gruplar (örneğin COOH grubu), reaksiyon kabiliyeti olan metaller ile kimyasal reaksiyona girebilirler. Bu metaller bakır, kurşun, kalay, kadmiyum vs.. olabilir. Reaksiyon sonucunda en uygun sınır yağlayıcılar olan tuz, metalik sabun gibi yapılar oluşur. Reaksiyonun oluşmadığı hallerde ise kimyasal nüfuz meydana gelir. Kimyasal nüfuz ise basit bir fiziksel yapışma şeklindedir. Bu şekle sınır yağlamada oldukça sık rastlanır.

Sınır yağlamada sıcaklığın etkisi de önem taşımaktadır. Sıcaklıkların yükselmesi sınır film tabakasını etkiler, ısı enerjisinin artması ile poler moleküller hareketlenir ve yönleri bozulur. Ancak, bu durumda film yırtılma eğiliminde olup, metal metale temas sonucunda kritik basınç ve sıcaklıkların etkisi ile sürtünme katsayısı ve aşınmalar artar (Schilling A., 1972).

4.1.2. Hidrodinamik Yağlama Şartları

Hidrodinamik yağlama; birbirine göre bağıl olarak hareket eden veya kayan iki yüzey arasında yeterli sıvı filminin ve basıncının oluştuğu sürtünme sistemidir. Herekete karşı direnç yağlayıcının viskozitesi ile oluşmuştur. Bu şartlar altında sürtünme katsayısı çok düşüktür ($f=0.001$ ila 0.005) ve aşınma teorik olarak sıfırdır.

Aşınma, malzemelerin birbirine uygun olmadığı ve Z gibi yüksek Sommerfeld sayılarında (şekil 7), metal metale temasın olmadığı durumlarda da meydana gelebilir. Sıvının, kayma gerilmesinin yüksek olması metal alaşım taneciklerinin yüzeyden kopmasına neden olur ve aşınmaları hızlandırır. Diğer yandan, kalın yağ filminde viskoz sürtünme ile oluşan termal enerji yüksek Z (Sommerfeld) değerlerinde alaşımı ergitmeye neden olabilir. Genellikle hidrodinamik yağlama şartında bu durum biyel yataklarında söz konusu olmaktadır.

Hidrodinamik akış Newton-Navier kanunu ile tanımlanabilir:

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dU}{dh}$$

Biri sabit diğeri hareket eden iki yüzey arasında akış laminardır.

F: Kesme kuvveti (N)

η : Dinamik viskozite (poise)

S: yükün taşıdığı alan (m^2)

dU: iki tabaka arasındaki hız farkı (m/s)

dh: Sıvı film kalınlığı (m)

Hidrodinamik yağlamada yağlayıcının tek önemli özelliği viskozitesidir.

Viskozite işletme şartlarında sıcaklık, basınç gibi parametrelerden etkilenmektedir (Schilling A.,1972).

$$\eta = \frac{F.dh}{S.dU} \quad \text{olarak tanımlanır.}$$

1) Yağlayıcı akışı Laminerdir. Bildiğimiz gibi hareket Laminer olduğu takdirde akışkan ipcikleri birbirine karışmaz. Hızı arttırsak belirli bir hız sınırından sonra ipcikler karışır ve akış laminarlikten çıkıp türbülanslı akış haline dönüşmüş olur. Bu değişimi sağlayan hıza kritik hız denir ve Reynolds sayısı ile ifade edilir.

$$R = \frac{V.D}{\nu} = \frac{L.T^{-1}.L}{L^2.T^{-1}} = 1 \text{ Genel olarak } R < 2000 \text{ olduğu takdirde akışın laminar}$$

- Birbirine göre bir eğimi olan iki yüzey olsun;** BK bir v hızı ile hareket etmekte AG ise sabit durmaktadır. Bu iki yüzey arasında bir akışkan vardır ve bir akışkanın M noktasında da bir molekülü gözönüne alalım. Kuramsal olarak ağırlık ve atalet kuvvetlerini ihmal ettiğimize göre M parçacığına tesir eden ve denge halinde olan kuvvetler basınç ve viskoz kuvvetleridir.

53

$\frac{dV}{dh}$

Biliyoruz ki $F = \eta \cdot s \cdot \frac{dV}{dh}$ dir.

Buradaki F sürüklenmeyi sağlayan gerekli kuvvettir. $dh \downarrow \quad dv/dh \uparrow \quad F \uparrow$. F artınca P basıncı da artar.

İki yüzey arasındaki h aralığı devamlı küçüldüğü için dV/dh büyümektedir yani F büyümektedir. M parçacığını etkileyen basınç ve makaslama (kesme) kuvveti devamlı denge halinde olduğu için aynı şekilde basınçta artacak demektir. Akış Laminer olduğu için hız eğrisinin kesit içinde değişimi önemlidir. $V_A=0 \quad V_B=V$ olmalıdır. Sınır tabakası kabulüne göre AB' deki hız eğrisinin eğrilik yarıçapı matematikten bildiğimiz gibi;

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2V/dh^2}{[1+(dV/dh)^2]^{3/2}} \text{ dir.}$$

O halde bu eğrilik yarıçapının işareti sadece d^2V/dh^2 'nin işaretine bağlıdır.

Debinin sabitliğini sağlamak için eğri gittikçe şişmektedir. DE de eğrilik yarıçapı $+\infty$ olur ve işaret değişerek $-\infty$ dan itibaren artarak eksi değerler alır. Bu şekilde hız gradyanında bir şişme meydana gelir. BE arasında F büyüdüğü için basınçta artar.

DG arasında ise çıkış ucunun yakın olması ve burada basıncın sıfır olması nedeni ve DG arasında d^2V/dh^2 'nin negatif olması yani hız gradyanının küçülmeye başlaması nedeni ile basınç da azalmaya başlar.

Sabit debi $Q = \frac{1}{2} h' V$ ve $h_1 = 3/2 h' \quad h_2 = 3/4 h'$

7.AŞINMA

Aşınma, yüzey hasarıdır ya da birbiri ile ilişkili olarak kayma, yuvarlanma ve çarpma hareketi yapan iki katı yüzeyin birinden veya her ikisinden malzemenin kopartılmasıdır. Aşınma bir çok durumda yüzey boyunca pürüz uçlarındaki etkileşimlerde meydana gelir. Hareket sırasında öncelikle yüzeye temas eden malzeme yer değiştirebilir; böylece katı gövdenin özellikleri en azından yüzeyde ya da yüzeye yakın konumda değişir, ancak malzeme kaybı ya çok azdır ya da hiç yoktur. Sonra malzeme bir yüzeyden kaldırılabilir ve birbirine geçen yüzeyler arasında transfer edilmekle sonuçlanabilir ya da bir aşınma partikülü olarak ayrılabilir. Yüzeylerden birinden aşındırma olmasına rağmen (net kütle ya da net hacim kaybı ile) bir yüzeyden diğerine transfer olma durumunda ara yüzeydeki net hacim net kütle kaybı sıfırdır. Aşınma hasarı, aslında malzeme kaybıyla önde gelir ve aynı zamanda bağımsız olarak meydana gelebilir. Aşınmanın tanımı genellikle malzeme kaybına dayandırılır. Fakat hasarın, ağırlık veya net hacimde değişiklik olmadan belirli bir gövdede malzemenin yer değiştirmesinden dolayı meydana geldiğinin ve aynı zamanda aşınmayı oluşturduğunun vurgulanması gerekir.

Aşınma, sürtünme olarak bir malzeme özelliği değildir, bir sistemin cevabıdır. İşletme şartları arayüzey aşınmasını etkiler. Bazen hatalı bir şekilde yüksek sürtünmeli arayüzeylerin yüksek aşınma oranı sergileyeceği varsayılır. Bu her zaman doğru değildir. Örneğin katı yağ bulunduran arayüzeyler ve plastikler az sürtünmeye nispeten yüksek aşınma sergilerler, oysa seramikler orta bir sürtünmede aşırı derecede küçük aşınma sergilerler.

Aşınma hem iyi hem de kötü olabilir. Yararlı aşınma örnekleri, kalem ile yazma, tornalama, cilalama ve talaşlamadır, bunlar kontrollü aşınma gerektirir. Neredeyse bütün makine uygulamalarında aşınma istenmez, örneğin; yataklar, contalar, dişliler, kamlar... Nispeten küçük bir malzemenin çıkartılmasından ya da yüzeyin gereğinden fazla pürüzlenmiş olup olmadığı durumuna göre elemanları değiştirmek gerekli olabilir. İyi dizayn edilmiş tribolojik sistemlerde, malzemenin çıkarılması çok yavaş bir süreçtir fakat çok kararlı ve sürekli. Aşınma parçacıklarının boyutuyla küçük ilgisi bulunan boşlukların olduğu makine uygulamalarında aşınma partiküllerinin meydana gelmesi ve dolaşımı, bir miktar aşınmanın olmasından daha büyük problem olabilir.

7.1 Aşınma Mekanizmalarının Sınıflandırılması

Aşınma mekanizmaları kısaca mekanik, kimyasal ve termal olarak sınıflandırılır, bunların aşınma tipleri ve şekillerine göre daha alt sınıflandırmaları vardır.

7.1.1 Mekanik Aşınma

Mekanik aşınma, aşınmanın çoğunlukla deformasyon ve kopma işlemi tarafından belirlenmesi olarak tanımlar. Deformasyon işlemi, sünek malzemelerin baştan başa aşınma işleminde büyük bir role sahiptir, kırılma işlemi ise gevrek malzemelerin aşınma işleminde büyük bir role sahiptir.

7.1.2 Kimyasal Aşınma

Kimyasal aşınma, aşınmanın bir kimyasal reaksiyon filmi tarafından belirlenmesi olarak tanımlar. Filmin büyüme oranı, mekanik olarak sürtünme tarafından hızlandırılır. Bu yüzden kimyasal aşınma “tribokimyasal” aşınma olarak adlandırılır.

7.1.3 Termal Aşınma

Termal aşınma, aşınmanın sürtünme ısısından dolayı yüzeyin bölgesel erimesi tarafından belirlenmesi olarak tanımlanır. Diffusive aşınma aynı zamanda termal aşınma terimi içine dahildir, çünkü diffusive aşınma yalnızca önemli ölçüde yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Gevrek malzemenin aşınması termal şoklara ve kırılmalara neden olabilir, bu da termal aşınmaya dahil edilebilir. Aşınmanın bu üç tanımlaması, aşınmayı kısaca karakterize etmek için gereklidir. Bunlar aşınma oranını tahmin etmek ve aşınma tiplerini ortaya koymak için yeterli değildir. [12]

7.2 Aşınma Mekanizmaları Tipleri

Aşınma tipleri ya da biçimleri, temas şartlarının özel bir diziliminde karşılığı olan malzemenin çıkarılmasının iyi tanımlanmış kurallı bir işlemiyle aşınma mekanizmalarının belirli kombinasyonları olarak tanımlar. Temel aşınma mekanizmaları:

- ✱ adhezif,
- ✱ abrazif,
- ✱ korozi,
- ✱ yorulma

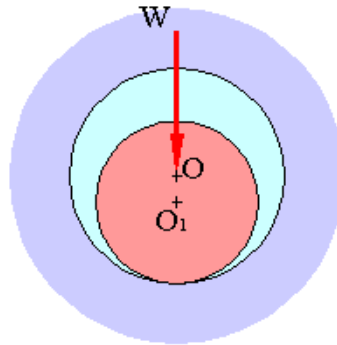
Temel aşınma mekanizmalarına ek olarak en çok bilinen aşınma mekanizmaları:

- ✱ **fretting - spalling**, (titreşimli aşınma-kabarıp dökülme)
- ✱ **pitting - scoring**, (çukurlaştırma-çizme)
- ✱ **scuffing - galling**, (kazıma-sürtme)
- ✱ gouging - cavitation, (oyarak-kavitasyon)
- ✱ electrical wear (elektriksel aşınma)
- ✱ solution wear (çözünme aşınması)
- ✱ melt wear (erime aşınması)
- ✱ impact wear, (çarpışma aşınması)
- ✱ diffusive wear, (yaygın aşınma)
- ✱ mild wear (hafif aşınma) ve
- ✱ severe wear (şiddetli aşınma)

13.YAĞ KAMASI TEORİSİ (EK BİLGİ)

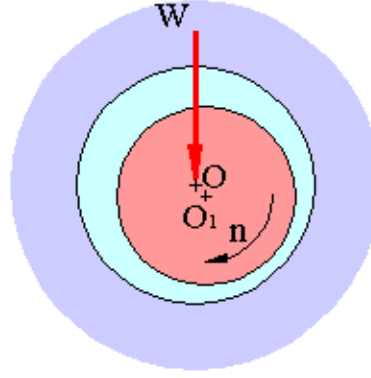
Bir muylu-yatak sisteminde hidrodinamik yağlamanın nasıl meydana geldiğini açıklamak için önce :

Şekil 13.1.a da olduğu gibi muylunun yatak içerisinde hareketsiz ve yatak yükünün de **W** olduğunu göz önüne alalım. Bu durumda yatak zarfı ile muylu arasındaki boşluğun yağ ile dolu olduğu kabul edilir. Yatak boşluğu yağ ile dolu olmasına rağmen $n = 0$ olması halinde yatak ile muylu arasında metal teması vardır.



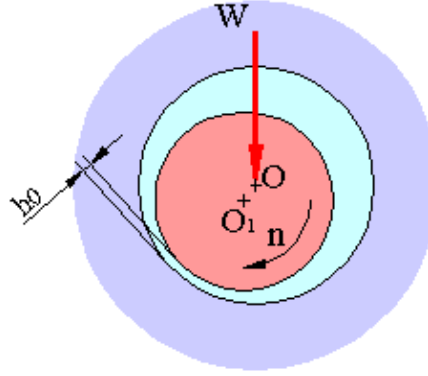
Şekil 13.1.a

Muylu yatak içinde ve **W** yükünün altında dönmeye başladığı zaman Şekil 13.1.b de olduğu gibi metal teması (kuru sürtünme) söz konusu olduğundan yatak içerisinde önce sağa doğru tırmanır. Yağ muylu üzerine çok iyi yapışmış olduğundan dönmenin devam etmesi halinde, yağ filmi muylu ile yatağın temas eden yüzeyleri arasına çekilerek **yağ kaması** oluşturur ve muylu yatak cidarından uzaklaşır.



Şekil 13.1.b

Eğer hidrodinamik yağlama için gerekli şartların tamamı mevcutsa Şekil 13.1.c'deki gibi denge durumu meydana gelir. Bu şartlarda yüzeyler birbirinden minimum kalınlığı h_0 olan bir yağ filmi ile ayrılır.

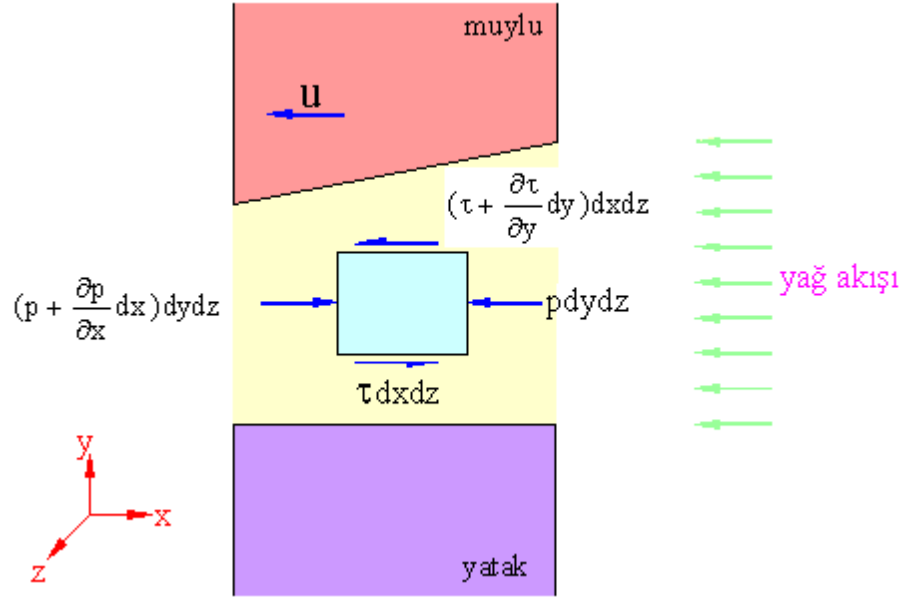


Şekil 13.c

Minimum yağ filmi kalınlığının değeri ve muylu ile yatak merkezlerini birleştiren doğrunun pozisyonu aşağıda belirtilen faktörlere bağlıdır.

- Yatak yükünün büyüklüğü
- Dönen muylunun çevresel hızı
- Muylu ile yatak arasındaki boşluk
- Yatak genişliği
- Yağlayıcının özellikleri ve çalışma sıcaklığı

Bir muylu yatak sisteminde muylunun saat yönünde döndüğü ve değişken kalınlığı h olan bir yağ filmi ile desteklendiği kabul edilsin. ω açısal hızı ile dönen muylu sabit bir u çevresel hızına sahiptir. Yüzeylerin eğriliği ihmal edilebilir kabulü kullanılarak xyz referans eksen takımı Şekil 13.2'deki gibi alınabilir.



Şekil 13.2: Muylu yatak sistemi ve bir yağ elemanının serbest cisim diyagramı

Kenar uzunlukları dx , dy ve dz olan yağ elemanına etkiyen kuvvetlerin statik denge şartı yazılırsa;

$$\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz + \tau dx dz - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy \right) dx dz - p dydz = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz = \frac{\partial \tau}{\partial y} dx dy dz$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (1)$$

denklemleri elde edilir. Newton kanununa göre;

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

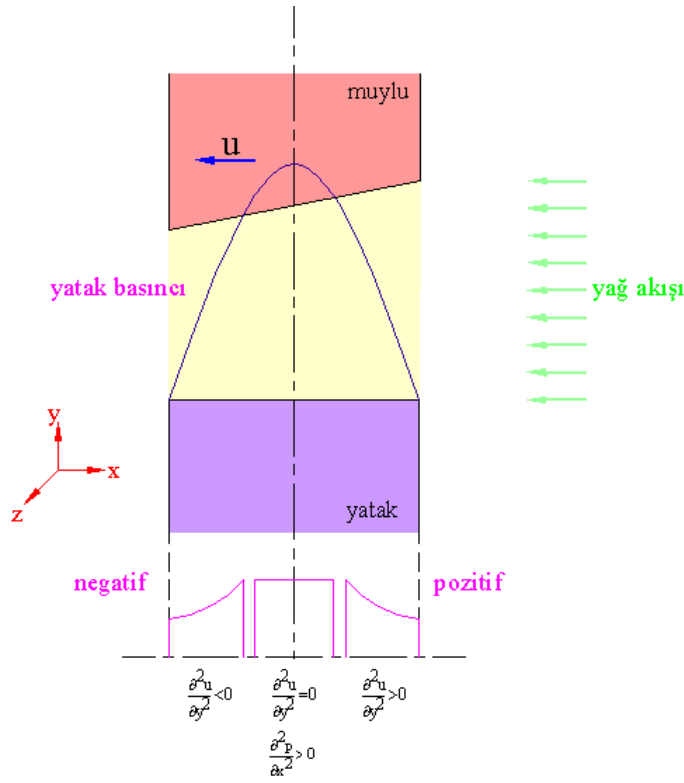
dir. (2) ifadesi (1)'de yerine yazılırsa;

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3)$$

veya

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Bu denklemden hız gradyanının yüzey boyunca her bölgede sabit olması halinde $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ 'nin sıfır, yani basınçtaki değişimin sıfır olacağı sonucu çıkarılabilir. Bunun anlamı yağ filminde bir basınç artışı meydana gelmeyeceği ve sonuç olarak yüzeylerin hiçbir dış yükü taşıyamayacağıdır. Buna göre hidrodinamik yağlama için şart hız gradyanının değişken yani yağ film kalınlığının Şekil 13.3'teki gibi kama şeklinde olmasıdır.



Şekil 13.3

Şekil 13.3'te verilen yüzeylerin girişinde $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} > 0$ ve bu nedenle $\frac{\partial p}{\partial x}$ pozitiftir. Yani x'in değeri azaldıkça film içinde meydana gelen p basıncı artmaktadır.

- Yüzeylerin orta bölgesinde $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$ ve $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ olur. Bu ise p basıncının maksimum olması demektir.
- Yüzeylerin çıkışında $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} < 0$ olduğundan $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$ olur. Bu ise x değeri azaldıkça film içinde meydana gelen p basıncının azalması demektir.
- Yapılan bu açıklamalardan da anlaşılacağı gibi yağ filminde meydana gelen basınç (yatak basıncı) Şekil 13.3'te gösterildiği gibi bir değişim gösterecektir. Yağ filminde meydana gelen yatak basıncı kendine eşdeğer bir yatak yükünü yüzeylerin metal teması olmadan taşıyabilir. Bunun içinde Şekil 13.3'te görüldüğü gibi yağ filminin hareket yönünde daralması gerekir. Yağ filminin şekli kamaya benzediğinden daralan yağ kaması adını alır. Yüzeyler paralel olursa veya hareket yönünde genişlerse basınç alanı meydana gelmez ve bu durumda yüzeylerin yük taşıma kabiliyeti yoktur.