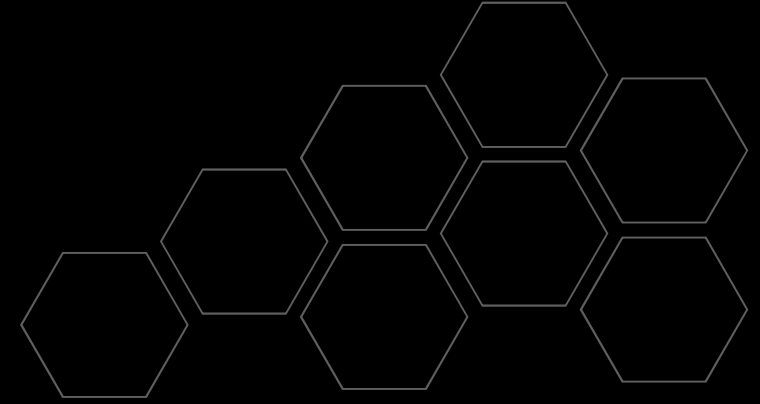
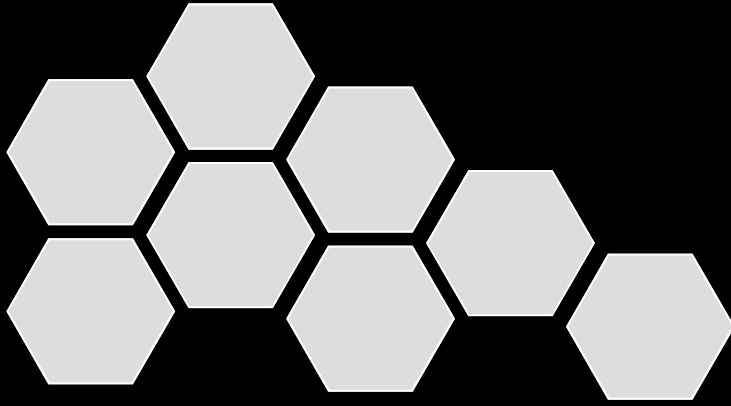
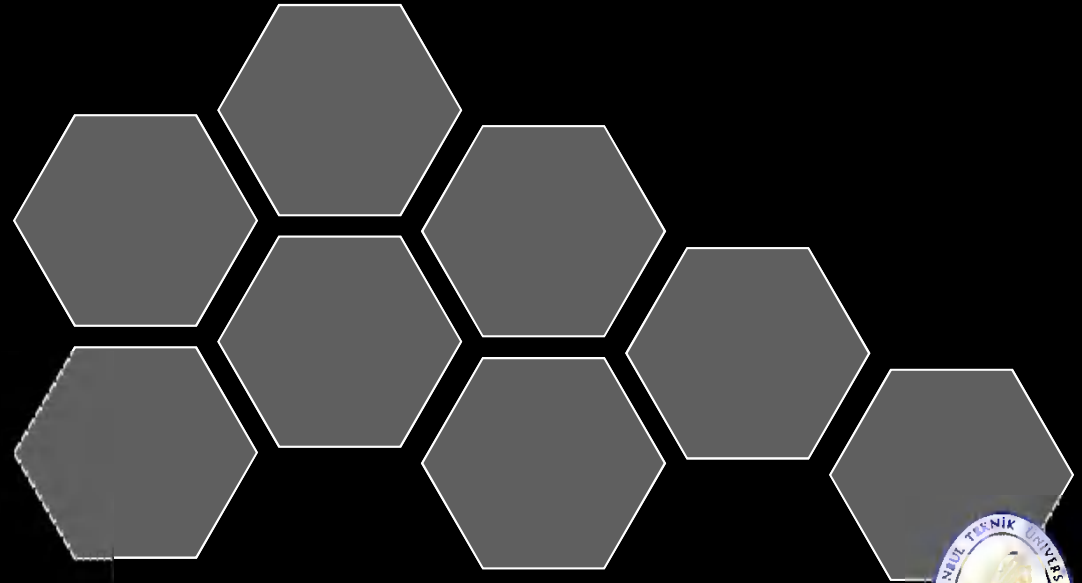
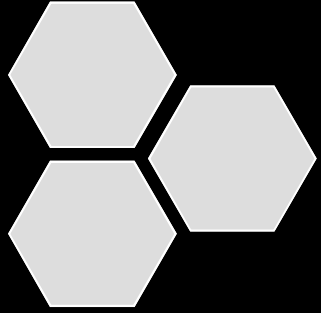




Triboloji

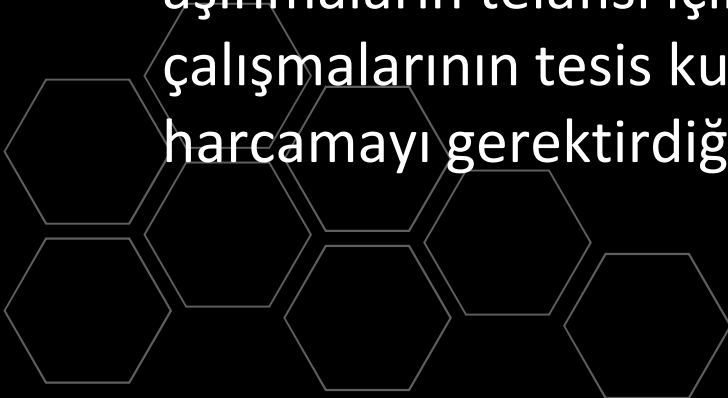
Vedat Temiz





Genel Bilgiler

- Dünyada çeşitli kuruluşlarca yapılan bazı araştırmalarda üretilen enerjinin yaklaşık **üçte birinin** sürtünme sonunda harcandığı gerçeğini ortaya koymuştur.
- Diğer yandan makinaların fonksiyon yüzeylerinde meydana gelen aşınmaların da çok büyük ekonomik kayıplara yol açtığı benzer araştırmalar sonucu tespit edilmiştir.
- Somut bir örnek vermek gerekirse, büyük bir entegre çelik tesisinde (yıllık üretim kapasitesi 10...15 milyon ton) çeşitli tip aşınmaların telafisi için gereken yıllık bakım, onarım ve yenileme çalışmalarının tesis kuruluş maliyetinin **%10 ila 15'** i kadar ek bir harcamayı gerektirdiği hesaplanmaktadır.



Genel Bilgiler

- Artan hızlar ve zorlanmalar, makina sistemlerinin güvenilirlik ve ömür koşullarının daha dar toleranslara sokulması, aşınmanın sınırlandırılmasını ve kontrol altında tutulmasını gerektirmektedir.
- Esnek ve katı otomasyon uygulayan fabrikalarda, uçak, roket sistemlerinde, nükleer reaktörlerde ve daha bir çok ileri teknolojinin uygulandığı sistemlerde sürtünme, aşınma ve bunlarla ilgili olarak yağlama en önemli boyutlandırma kriter ve parametrelerinin içine girmektedir.
- Bu gereksinimlerin bir sonucu olarak son 30 yıl içinde sürtünme, aşınma ve yağlama konularını içeren yeni bir bilim dalı kurulmuştur. “Triboloji” veya “Tribo-teknik” olarak adlandırılan bu disiplin gerek üniversitelerde gerekse teknikte geniş bir ilgi görmüştür.



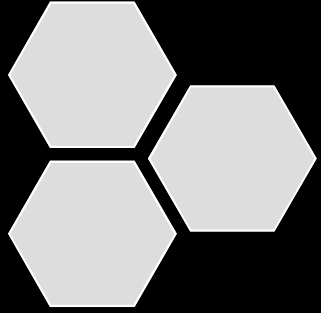
Genel bilgiler

Triboloji

Sürtünme

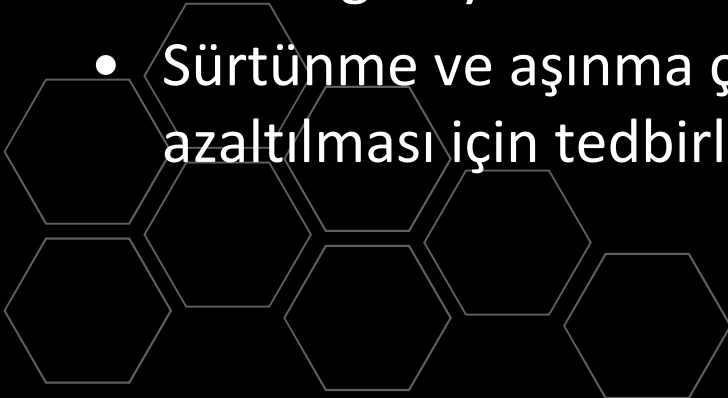
Aşınma

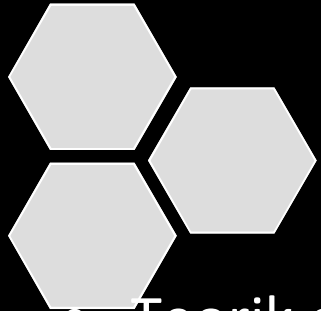
Yağlama



Sürtünme

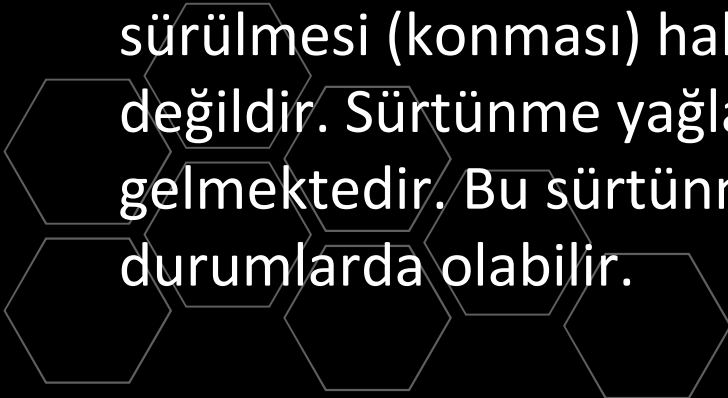
- Birbiri ile temas halinde bulunan ve izafi kayma veya yuvarlanma hareketi yapan iki fonksiyon yüzeyi arasında, genel olarak bir sürtünme hali mevcuttur. Birçok halde sürtünmenin sayısal değeri çok küçük olabilir, fakat pratik olarak daima mevcuttur.
- Hipotetik olarak fonksiyon yüzeyleri arasında hiçbir kuvvet alanının bulunmaması ve kesin olarak aralarında mutlak vakumdan başka bir ortam bulunmaması halinde sürtünmenin olmadığı söylenebilir.
- Sürtünme ve aşınma çok eski tarihlerden beri gözlenen ve azaltılması için tedbirler alınan konulardır.



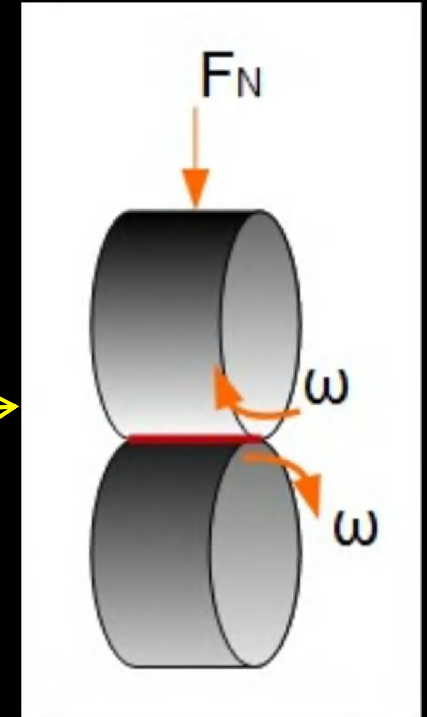
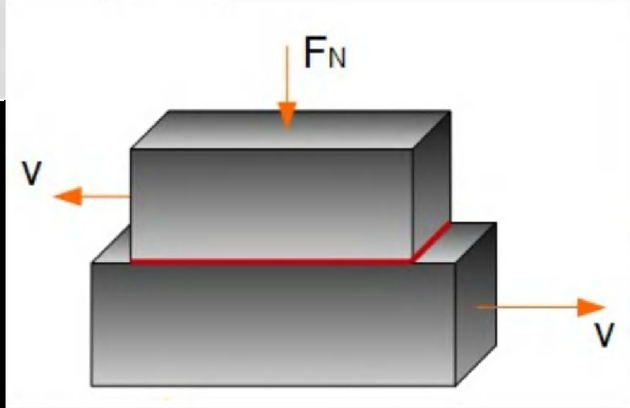


Kuru ve yağlanmış yüzey kavramları

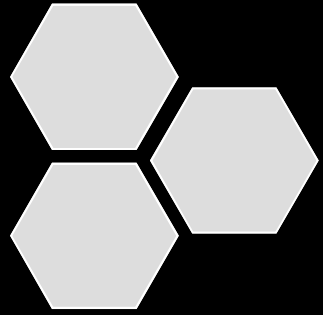
- Teorik olarak **mutlak kuru sürtünme**, yabancı maddelerden tamamen arındırılmış ve mutlak vakumda birbiri üzerinde sürtünen yüzeyler arasında mevcuttur.
- Yüzeyler daha önceden temizlenmiş olsa dahi, atmosfer şartları altında birbirlerine sürtünürken aralarında çok ince de olsa absorpsiyon tabakaları ve tribo-mekanik reaksiyon tabakaları meydana gelecektir. Genellikle bu tip sürtünme hali de pratik olarak kuru sürtünme kabul edilir.
- Yüzeylerin üzerine (veya aralarına) özel yağlayıcı maddelerin sürülmesi (konması) halinde yüzeyler artık pratik olarak da kuru değildir. Sürtünme yağlanmış yüzeyler arasında meydana gelmektedir. Bu sürtünme hali sınır veya hidrodinamik durumlarda olabilir.



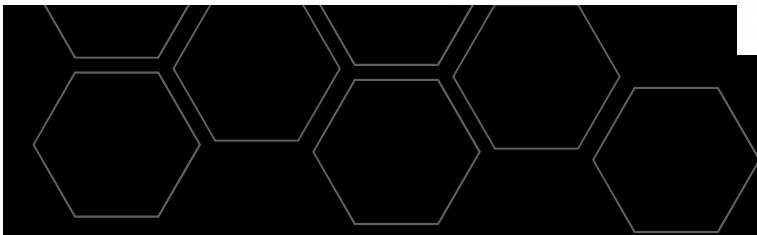
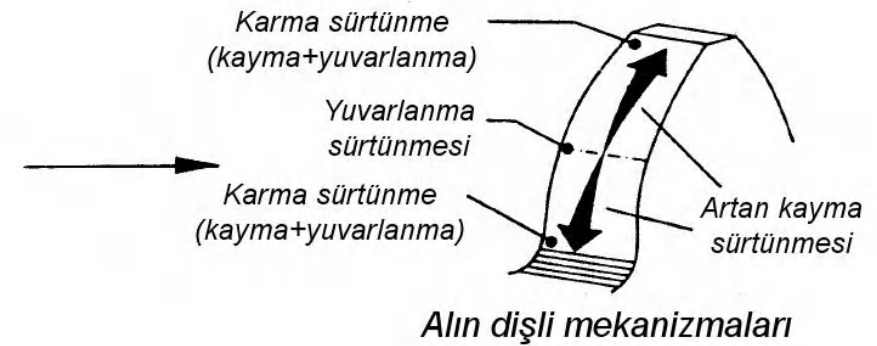
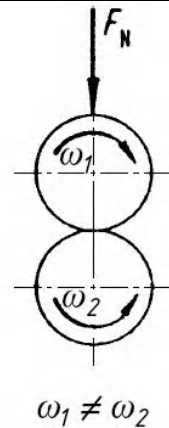
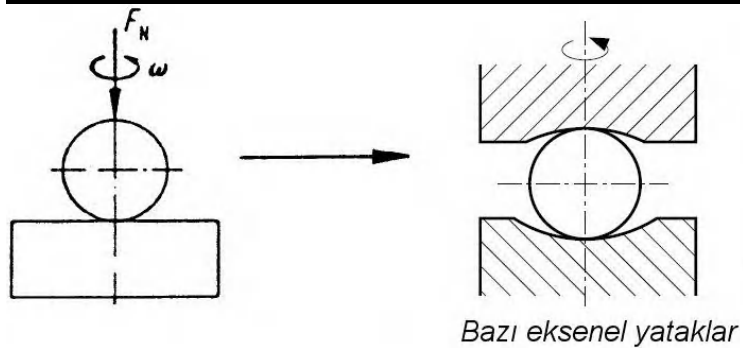
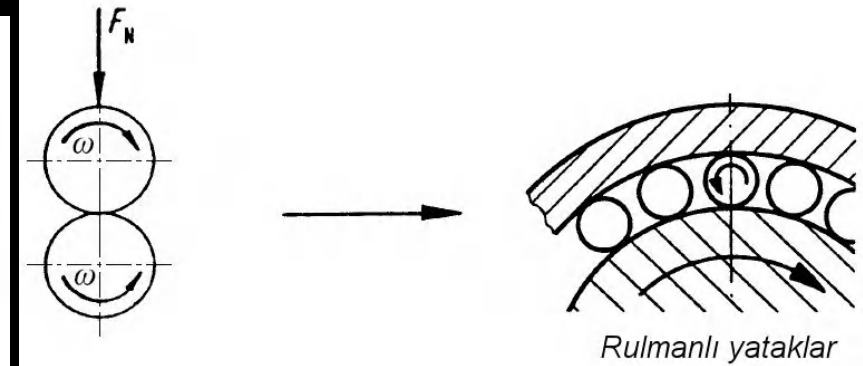
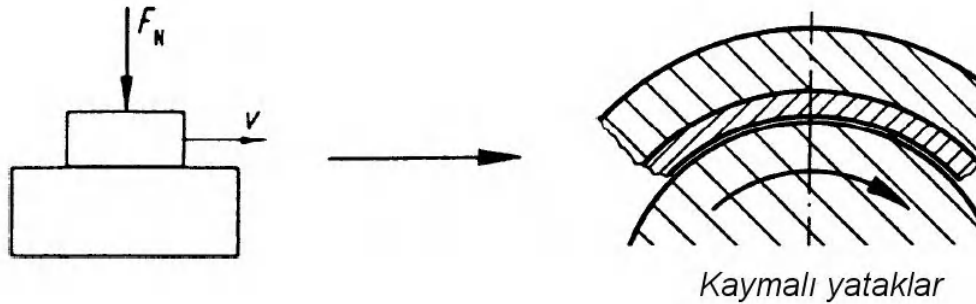
Kayma ve yuvarlanma sürtünmesi



- Sürtünmeyi en genel anlamda **kayma** ve **yuvarlanma** sürtünmesi olarak ikiye ayırmak mümkündür.
- Sürtünmeyi meydana getiren fiziksel nedenler incelendiğinde bu ayrımın makroskopik görünüm için geçerli olduğu, mikroskopik bölgede ise her iki sürtünme halinin benzer nedenlerden meydana geldiği anlaşılır.

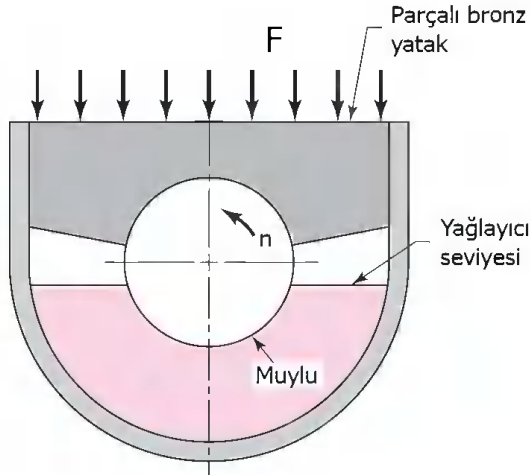


Kayma ve yuvarlanma sürtünmesi UYGULAMALAR

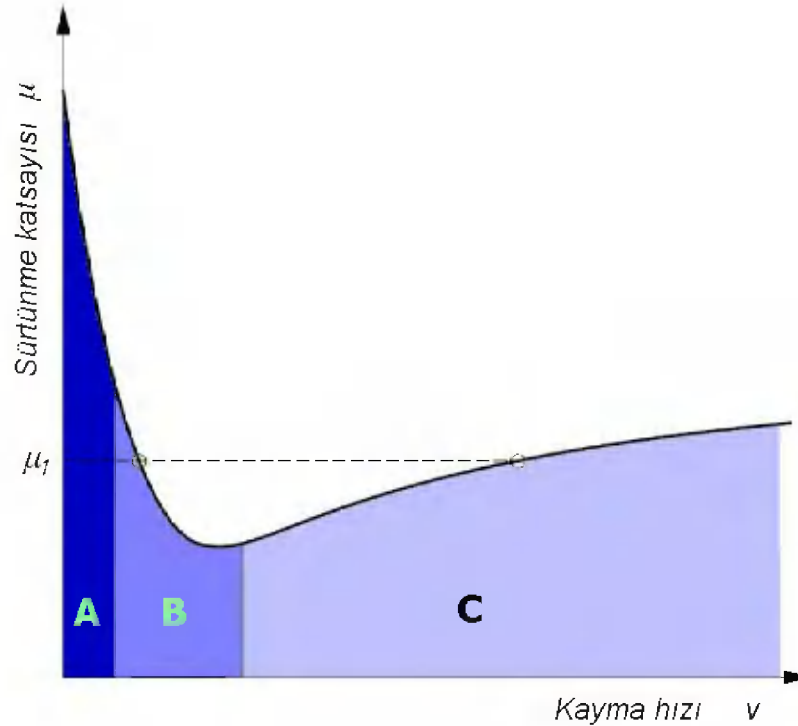


Stribeck eğrisi

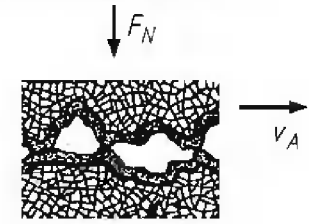
İki yüzeyi birbirine göre yük altında kaydırabilmek için belirli bir direncin yenilmesi gerektiğini, yüzeylerin üzerine bir yağlayıcı madde sürülmesi halinde ise bu direncin azaldığını deneyimlerimiz sonucu hepimiz biliriz. 1901 yılında Stribeck tarafından yayınlanan bir çalışmada radyal bir kaymalı yatağın üç değişik sürtünme durumunda çalışabileceği belirtilmiştir



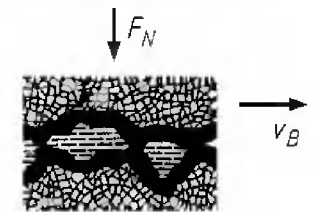
- Kuru sürtünme
- Sınır sürtünme
- Film sürtünmesi



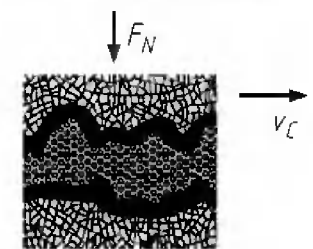
A: Kuru sürtünme

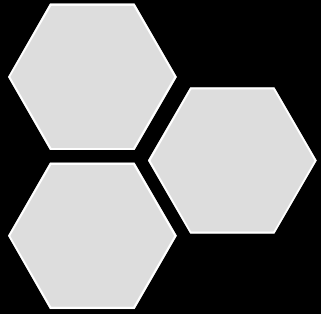


B: Sınır sürtünme



C: Film sürtünmesi





Sürtünme halinin sayısallaştırılması

- Stribeck eğrisinde görülen sürtünme hallerinin isimlendirilmesi için basit bir oran kullanılır. Bu oranda temas yüzeylerindeki minimum yağ filmi kalınlığı ve temas yüzeylerindeki ortalama yüzey pürüzlülüğü yer almaktadır.

- $\lambda = \frac{h_{min}}{R_a}$ Minimum yağ filmi kalınlığı
Ortalama pürüzlülük

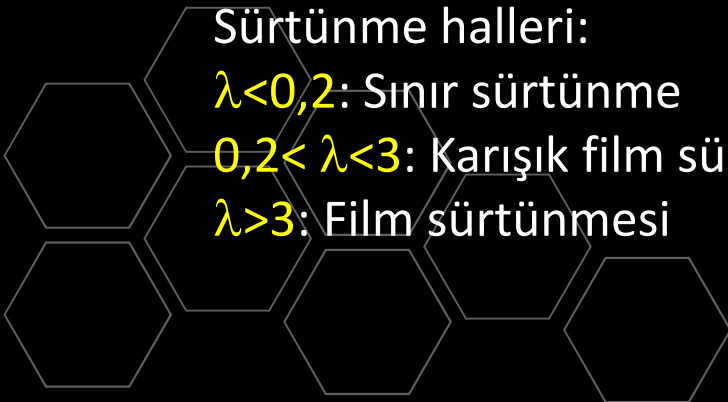
İki yüzeyin pürüzlülüğü farklı ise ortalama değer: $R_a = 0,5 \cdot (R_{a1} + R_{a2})$

Sürtünme halleri:

$\lambda < 0,2$: Sınır sürtünme

$0,2 < \lambda < 3$: Karışık film sürtünmesi (çoğunlukla film mevcut)

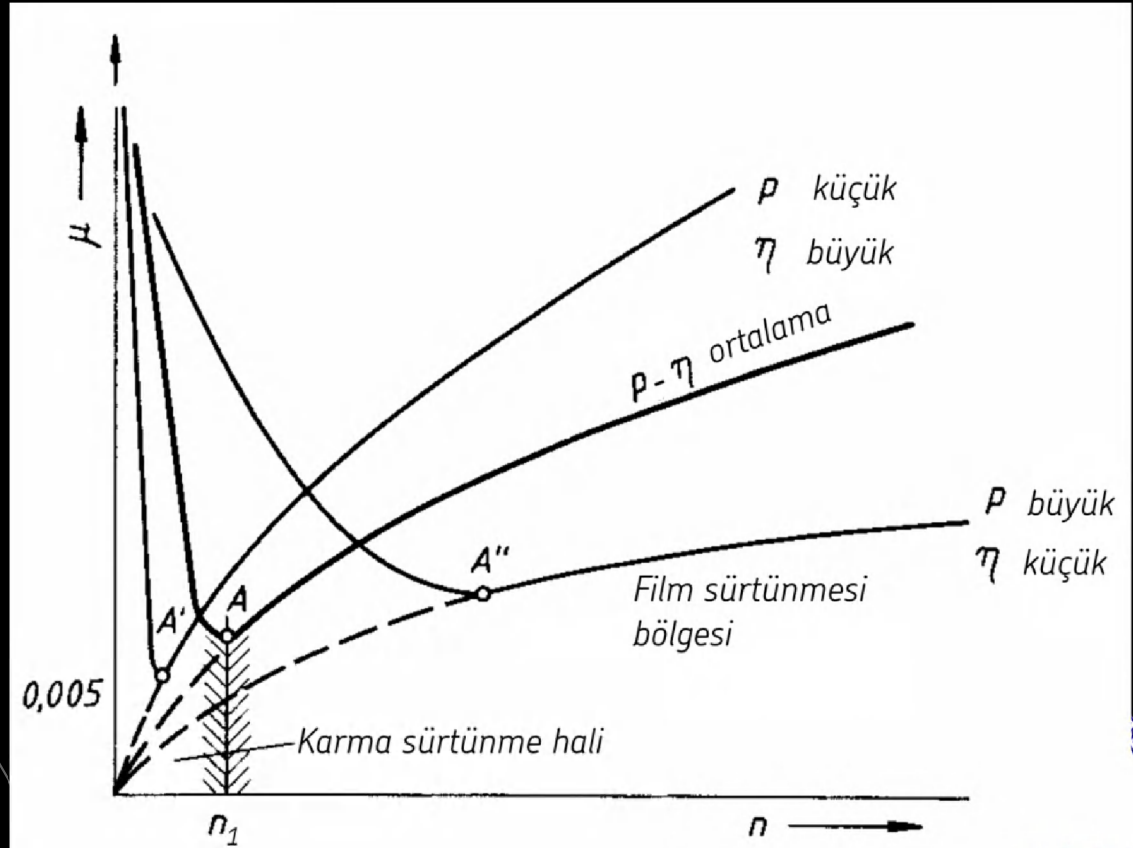
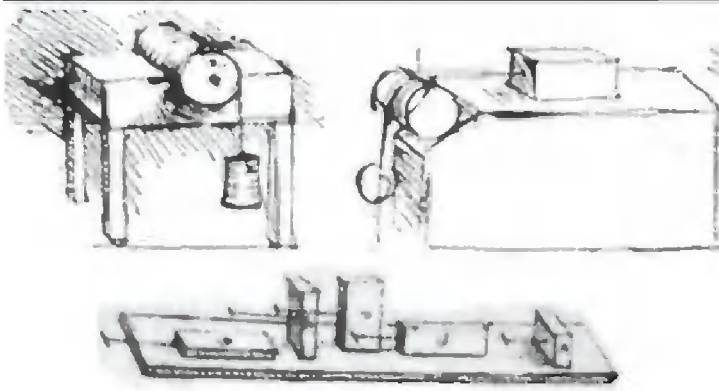
$\lambda > 3$: Film sürtünmesi





Stribeck eğrisi

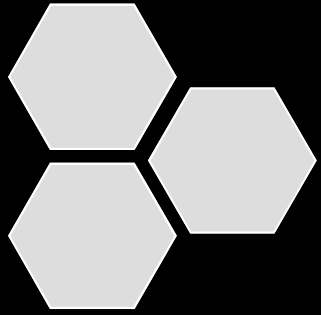
Stribeck eğrisi sürtünme katsayısı ve dönme hızı arasındadır. Ancak, deneyler değişik viskozitede akışkanlar ve değişik yüzey basınları için de tekrarlanabilir.



Sürtünme Teorileri

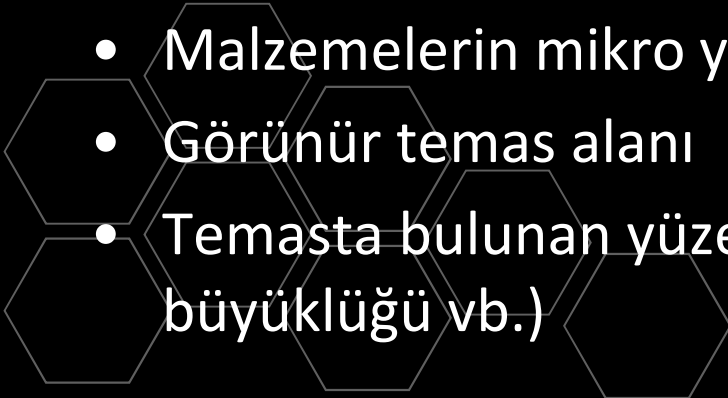
- **Amonton (1699) - Coulomb (1785) teorisi:** Bu teoriye göre sürtünme, yüzeylerdeki pürüz tepelerinin takılmasından doğan direnç olarak tariflenmektedir. Ancak bu teori, sürtünmedeki enerji kaybını ve çok iyi işlenmiş yüzeylerdeki sürtünme artışını açıklayamamaktadır.
- **“Moleküler Etkileşim” teorisi (Tomlison-Hardy):**
- **“Elektrostatik Çekim” teorisi:** Bu teoriler sürtünme olayının mekanizmasını deneysel verilerle uyum sağlayacak şekilde açıklamakta yetersiz kalmışlardır.
- **“Kaynama, Kesme, Sürme” teorisi (Bowden ve Tabor):** Bowden ve Tabor sürtünmenin meydana gelmesinde en büyük etkenin yüzeylerin birbirine değen tepeciklerindeki adeziv ve koheziv bağlar olduğunu, bunlara ilave olarak tepeciklerdeki deformasyonların da direnç arttırıcı etkileri bulunduğunu öne sürmüşlerdir. Bu teori çeşitli etkenlerin mantıksal bir sentezini içermektedir.



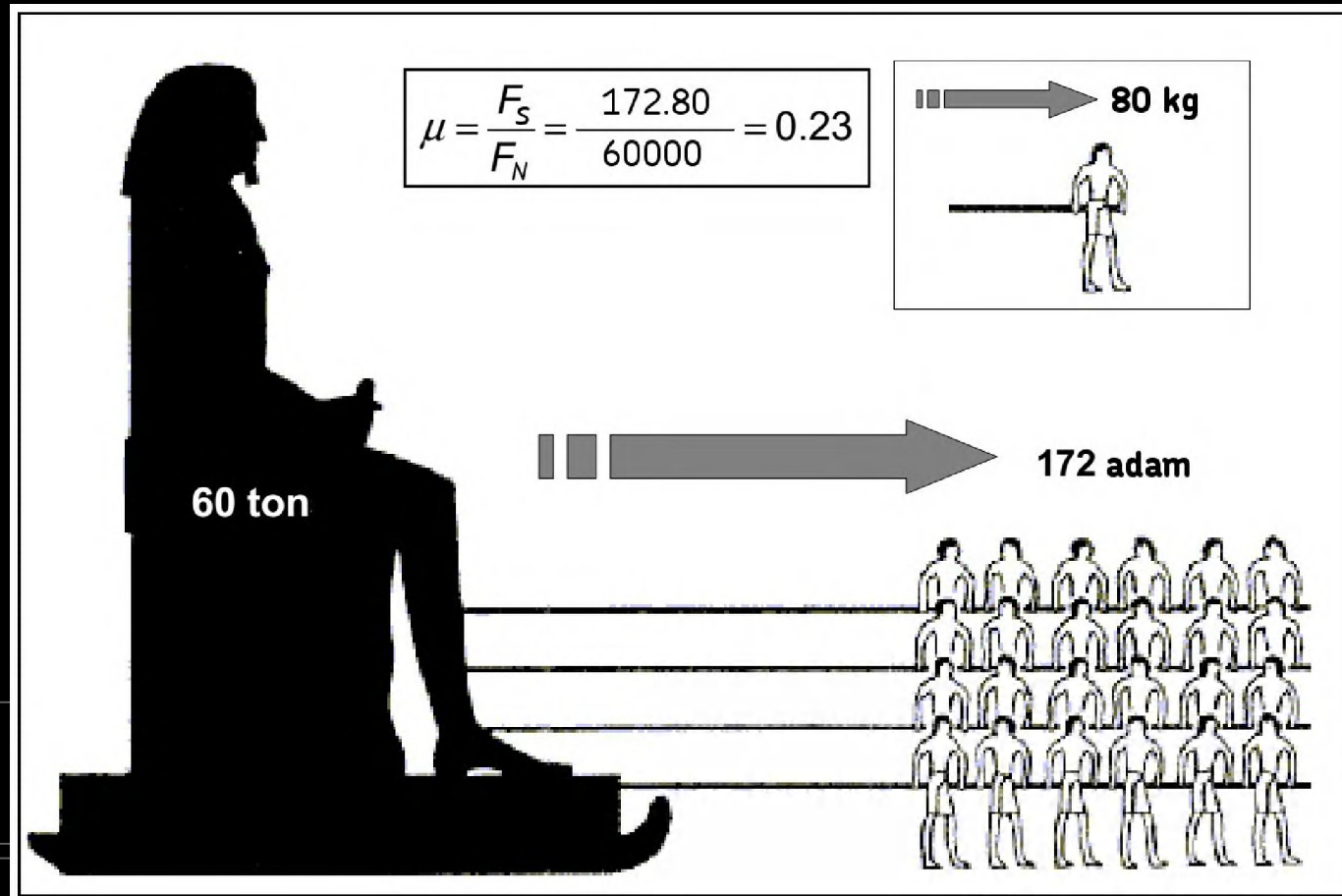


Sürtünmeyi etkileyen faktörler

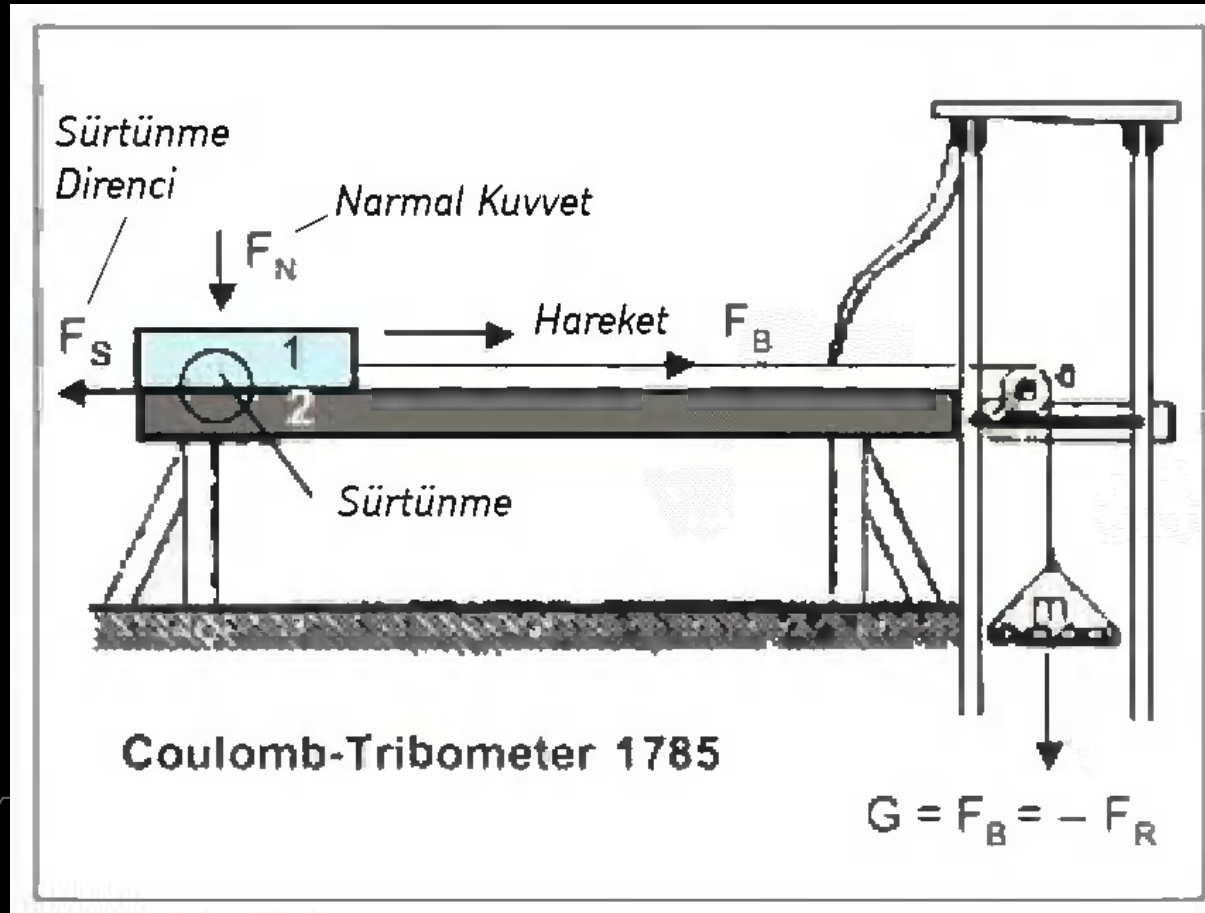
- Toplam sürtünme direnci en genel halde aşağıdaki faktörlerden etkilenir:
- Kayma yüzeyinde aşınma mahsulleri veya sistem dışından gelen partiküllerin varlığı,
- Temasta bulunan malzemelerin bir birlerine göre izafi sertliği
- Uygulanan dış yük ve/veya yer değiştirme
- Sıcaklık veya yağlayıcı gibi harici koşullar
- Yüzey topografyası
- Malzemelerin mikro yapısı veya morfolojisi
- Görünür temas alanı
- Temasta bulunan yüzeylerin kinematığı (hareketin yönü, hızı, büyüklüğü vb.)

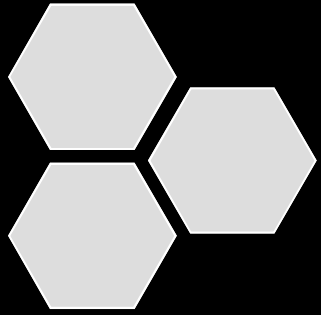


Eski Mısır da sürtünme katsayısı hesabı



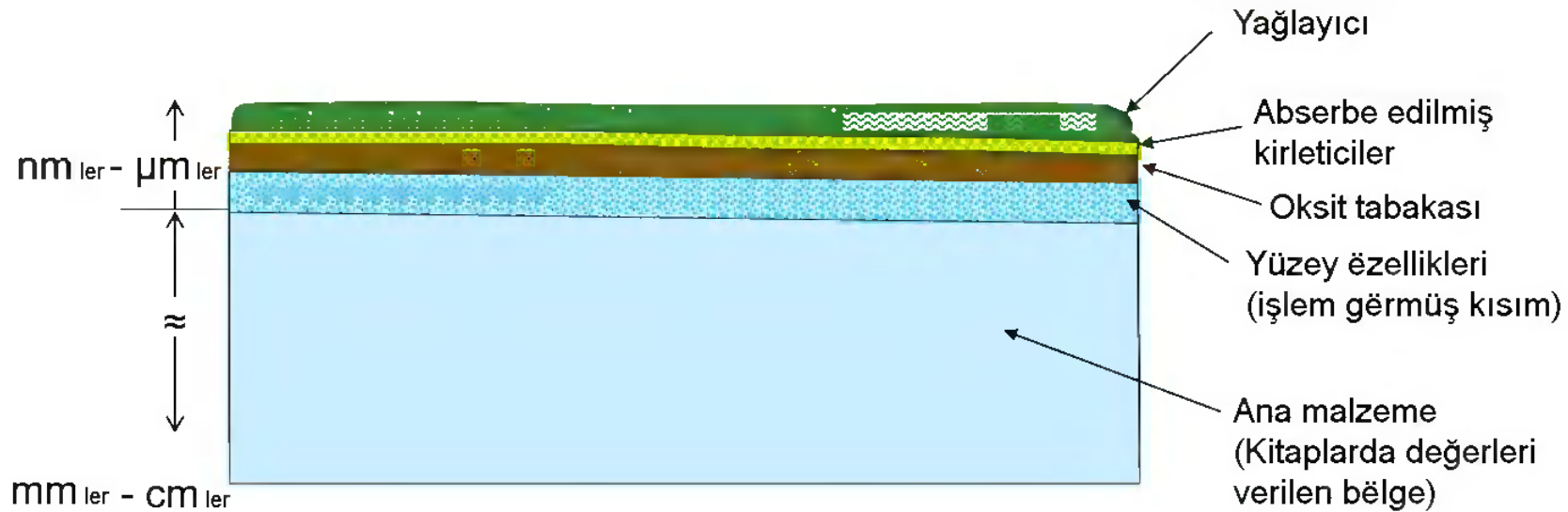
Coulomb Tribometresi





Yüzeylerin durumu

- Malzemelerle ilgili literatürlerde verilen değerler ana malzeme ile ilgilidir. Yüzeyde ise çok daha farklı tabakalar mevcut olabilir.

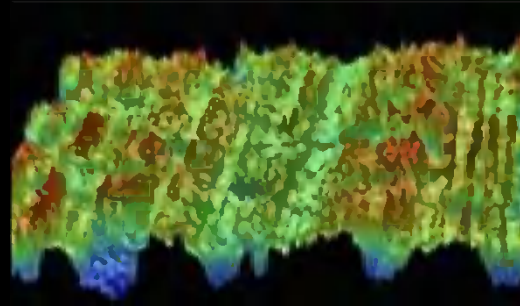




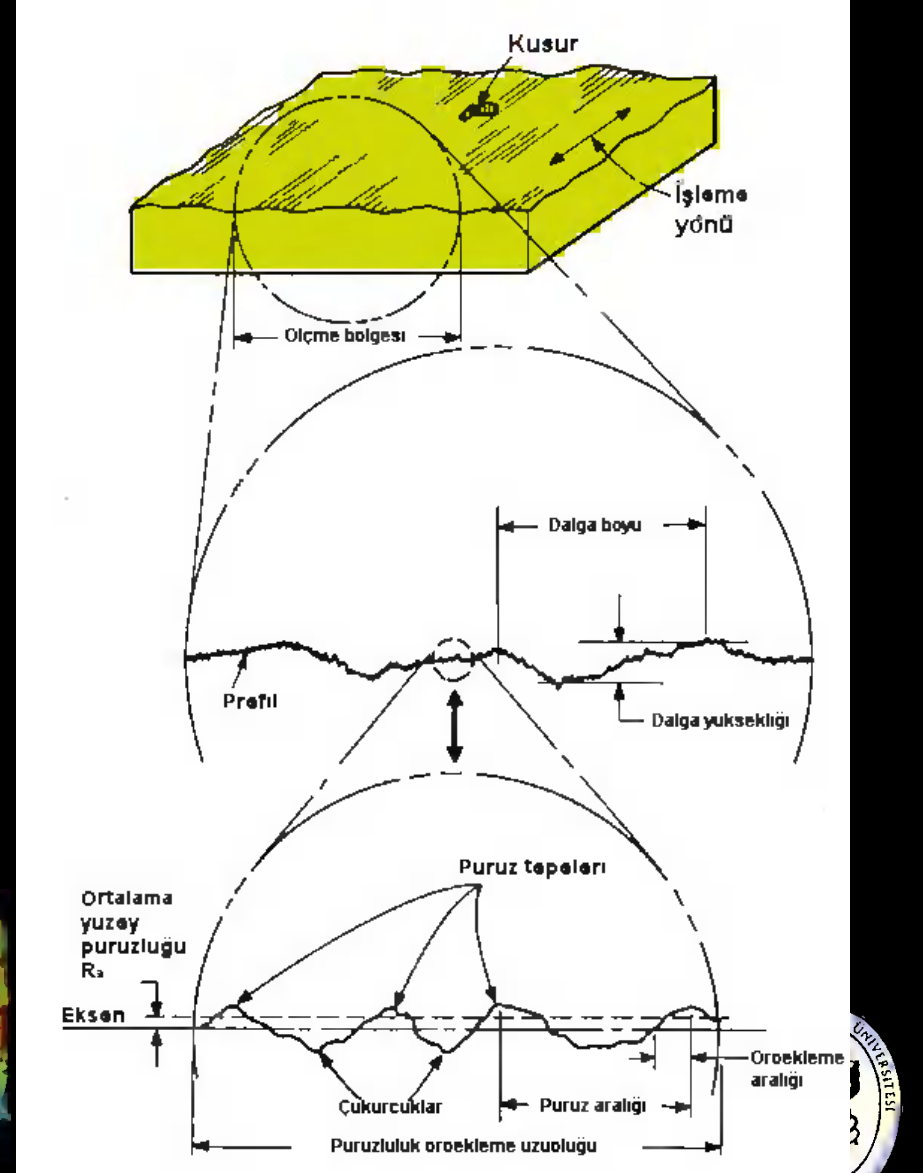
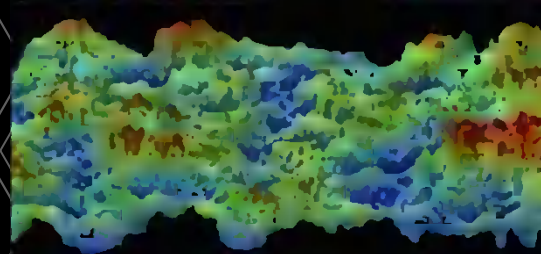
Yüzeylerin durumu

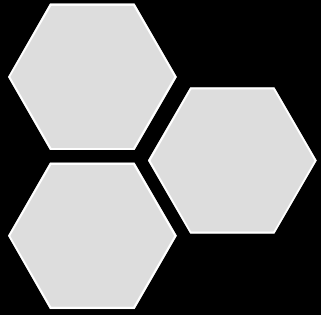
- Yüzeyde mevcut tabakaların yanında, yüzeyler makro ölçekte gözleendiği gibi ideal düzgünlükte de değildir.

Taşlanmış yüzey



Kum püskürtülmüş yüzey





Yüzeylerin etkisi

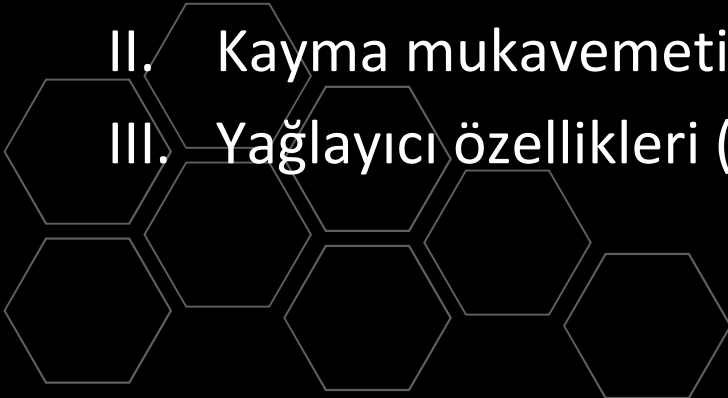
- Yüzeyler sürtünmeyi 2 temel açıdan etkiler:

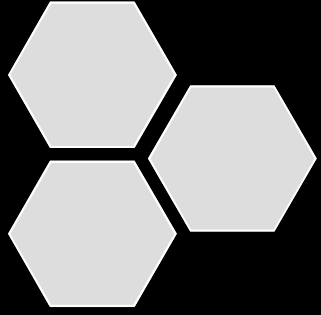
1. Fiziksel – Yüzey pürüzlülüğü

- i. Gerçek temas alanını etkiler
- ii. Yüzey zorlanmalarını etkiler
- iii. Yağlayıcı akımı ve yağ ceplerini belirler

2. Kimyasal – Tabakalar arası etkileşim

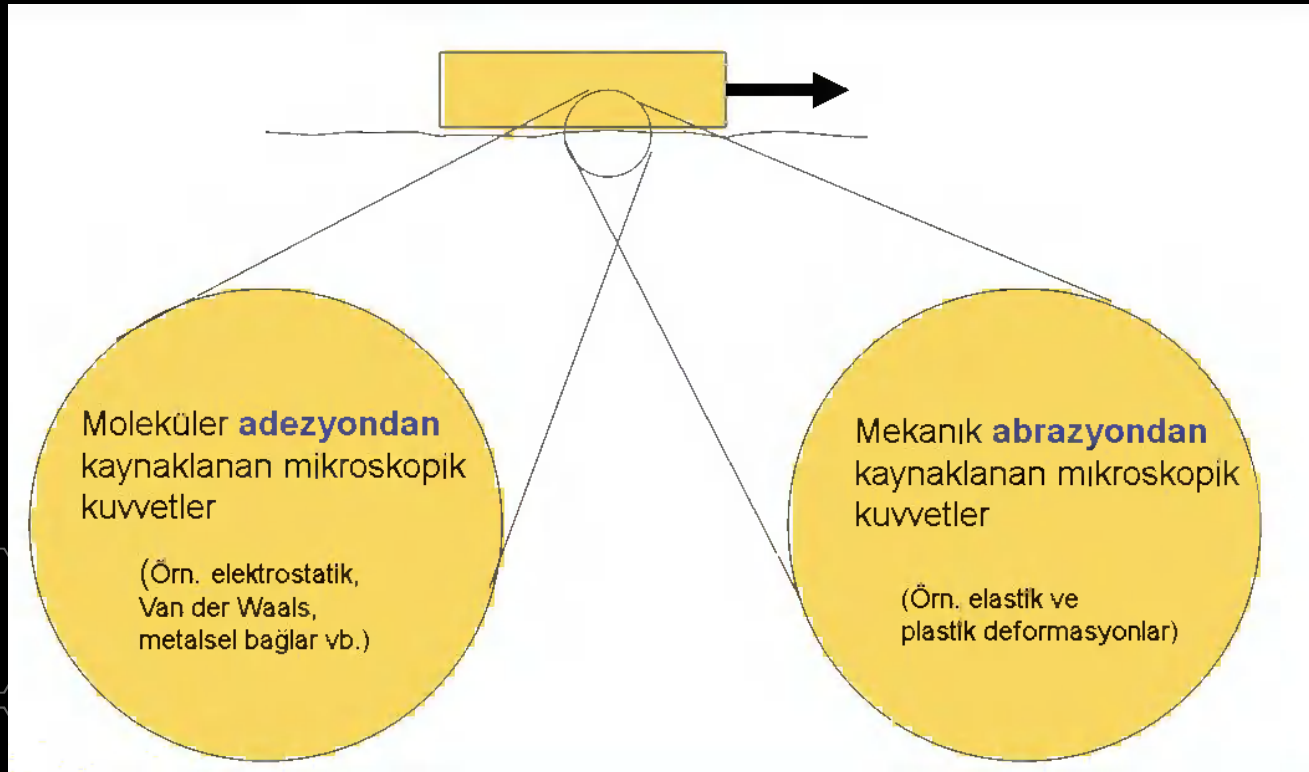
- I. Kimyasal uygunluk
- II. Kayma mukavemeti
- III. Yağlayıcı özellikleri (viskozite, EP veya ıslatılabilirlik vb)





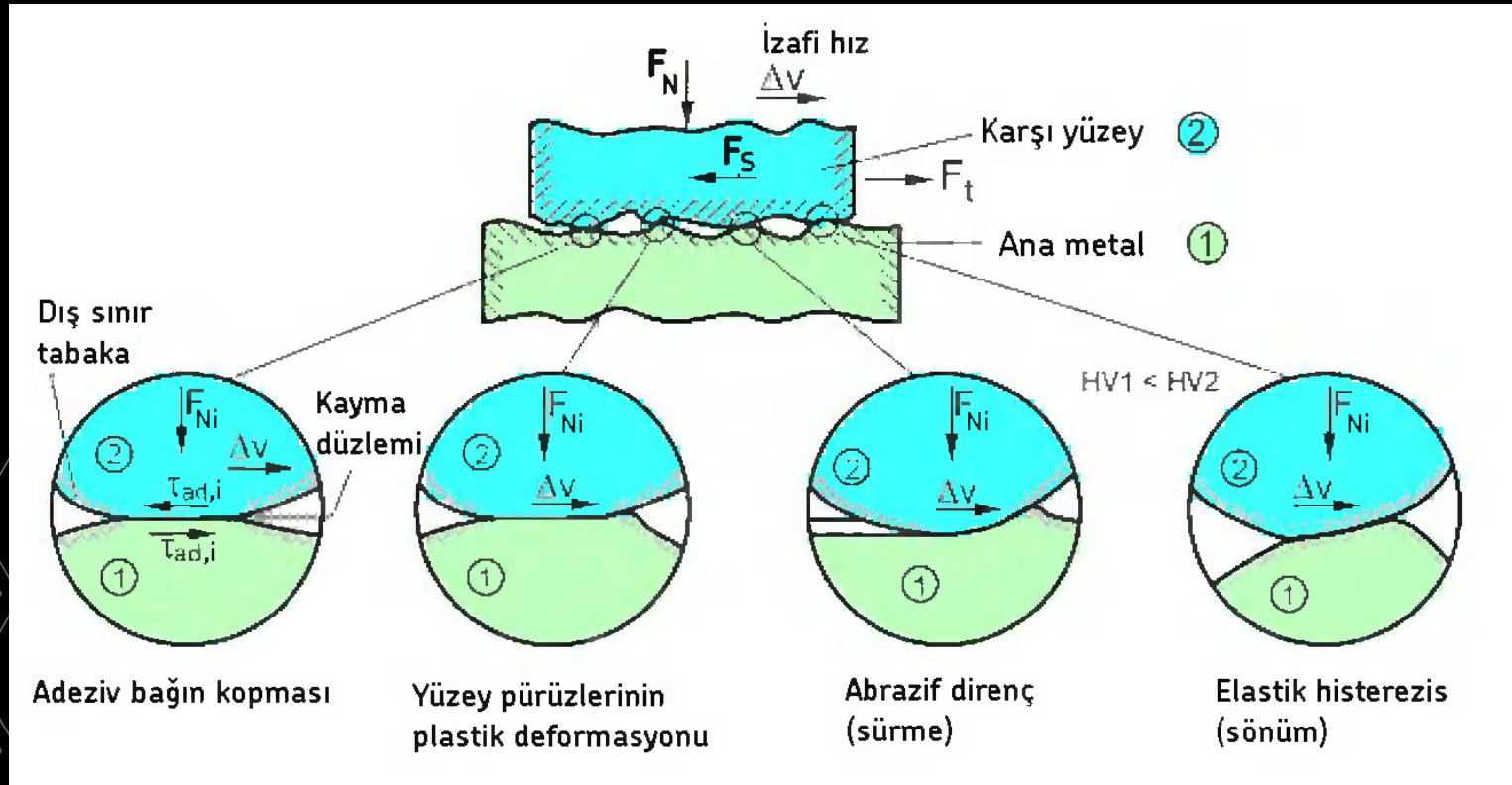
Harekete karşı dirençlerin kaynağı

- İki cisim bir biri ile temas halinde ise, temas yüzeylerinde bazı kuvvetler oluşur.

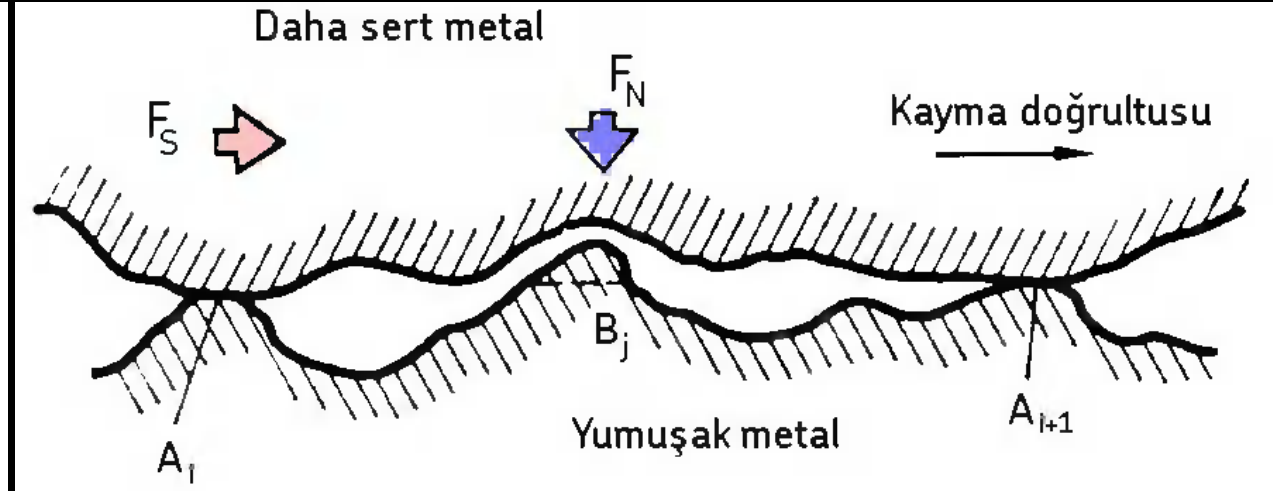
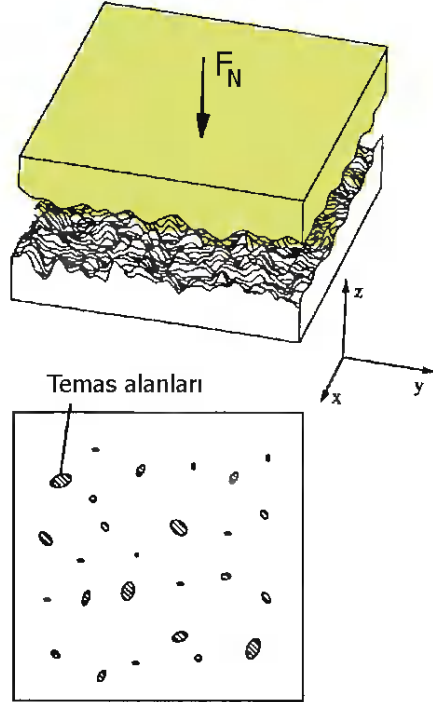


İzafi harekete karşı dirençler

- İki yüzeyin temasında, izafi harekete karşı koyan dirençler değişik şekillerde olabilir. Bunlar esas olarak geometriye, malzemeye ve ara yüzeyin durumuna bağlı olarak ortaya çıkarlar.



Kaynama, kesme, sürme teorisi



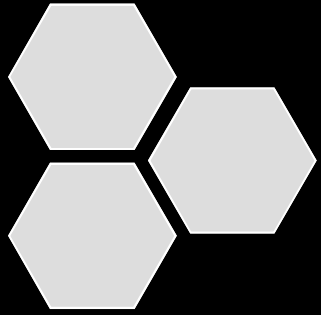
Elasto-plastik temas halinde kaynak ($A_1...A_i$) ve deformasyon ($B_1...B_j$) noktaları

Sürtünme kuvveti olarak adlandırdığımız bu kuvvetin iki bileşenden oluştuğu kabul edilebilir.

$$F_S = F_{Ad} + F_{Def}$$

Her iki taraf normal kuvvete bölünürse

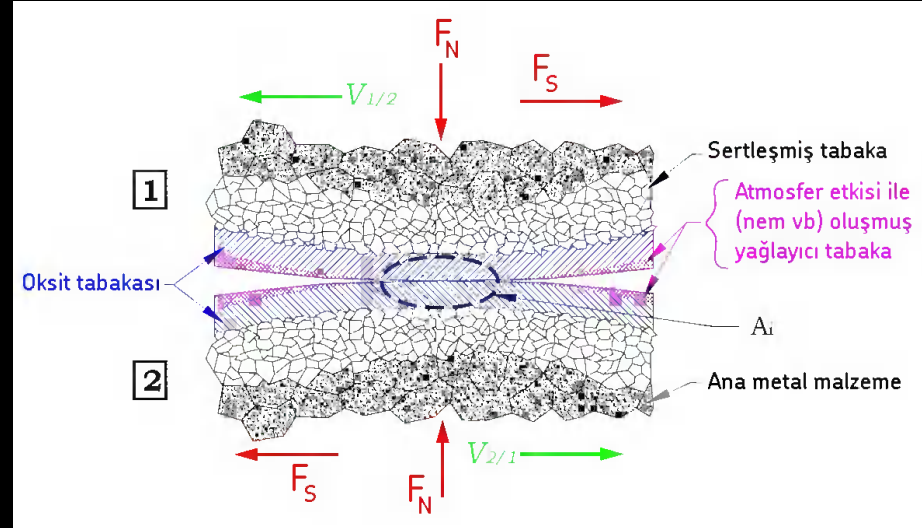
$$\mu = \mu_{Ad} + \mu_{Def}$$



Kaynama, kesme, sürme teorisi

İyi işlenmiş yüzeylerde deformasyon teriminin etkisi ihmal edilebilir. Bu durumda

$$F_S \approx F_{Ad}$$



$$F_{Ad} = \sum \tau_i \cdot A_i$$

τ_i : her bir noktadaki kesme direnci
 A_i : temas noktasının alanı

Her bir noktanın kesme direnci aynı ise

$$F_{Ad} = \tau_k \cdot A_{Dpl}$$

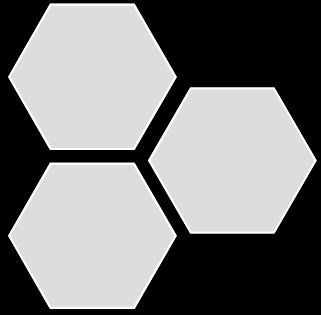
$$A_{Dpl} = \sum A_i$$

Kesme direnci, en fazla malzemenin kaymadaki akma mukavemeti kadar olabilir.

$$F_{Ad} = \tau_{Ak} \cdot A_{Dpl}$$

Plastik değme alanı





Kaynama, kesme, sürme teorisi

Bütün değme noktalarının plastik deformasyona uğradığı kabul edilirse;

$$F_N = p_{pl}^* \cdot A_{Dpl}$$

Malzemenin
plastik akma
basıncı

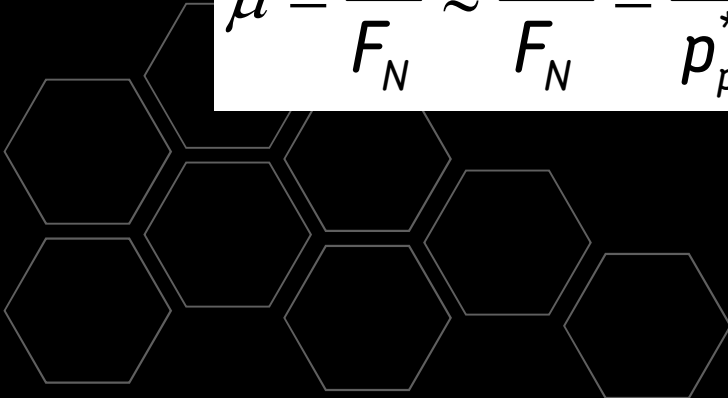
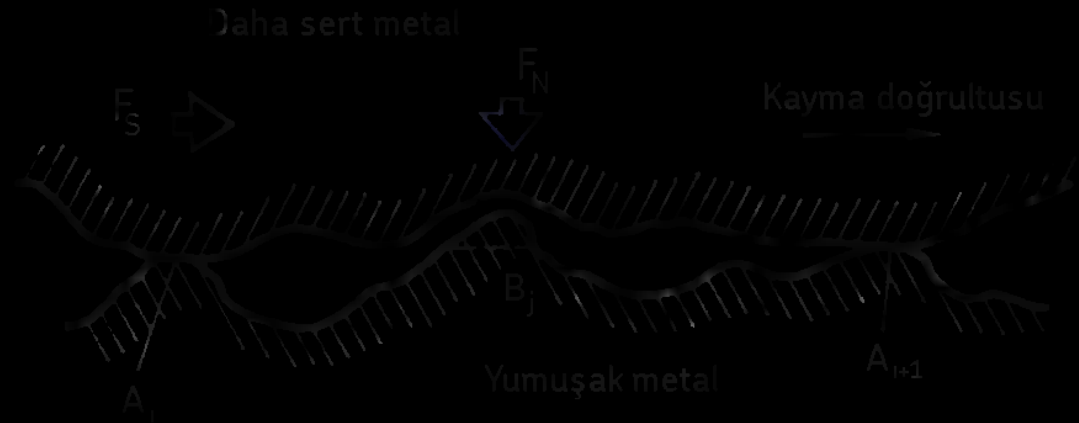
Plastik değme
alanı

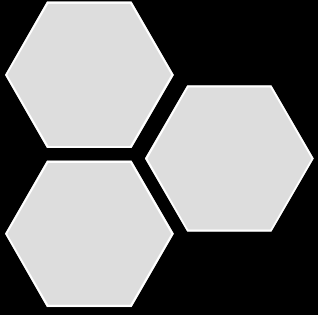
$$\mu = \frac{F_S}{F_N} \approx \frac{F_{Ad}}{F_N} = \frac{\tau_{Ak} \cdot A_{Dpl}}{p_{pl}^* \cdot A_{Dpl}} = \frac{\tau_{Ak}}{p_{pl}^*}$$

Metalsel malzemelerde
bu oran 1/5 civarındadır.

???

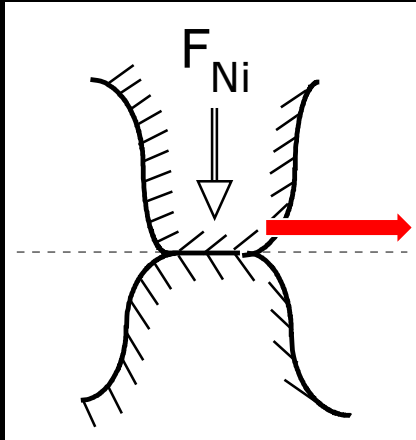
1. Değme alanı büyümesi
2. Pekleşme





Değme alanı büyümesi

- Normal kuvvet altındaki tek bir pürüzün deformasyonu incelensin



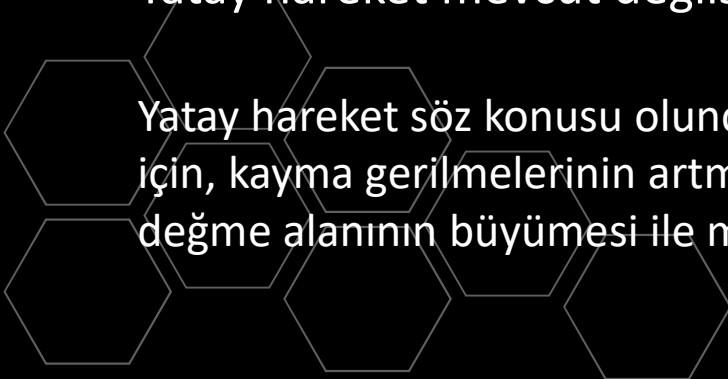
Basma ve kayma gerilmelerinin aynı anda etkimesi halinde Von Mises kriteri uyarınca

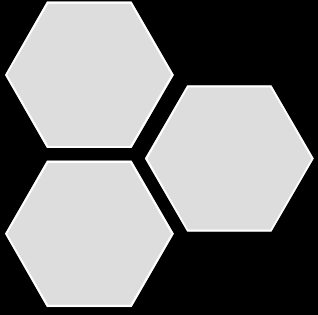


$$p^2 + (\alpha \cdot \tau)^2 = p_{pl}^{*2}$$

Yatay hareket mevcut değilse, $p^2 = p_{pl}^{*2}$ olur ve denklem sağlanır.

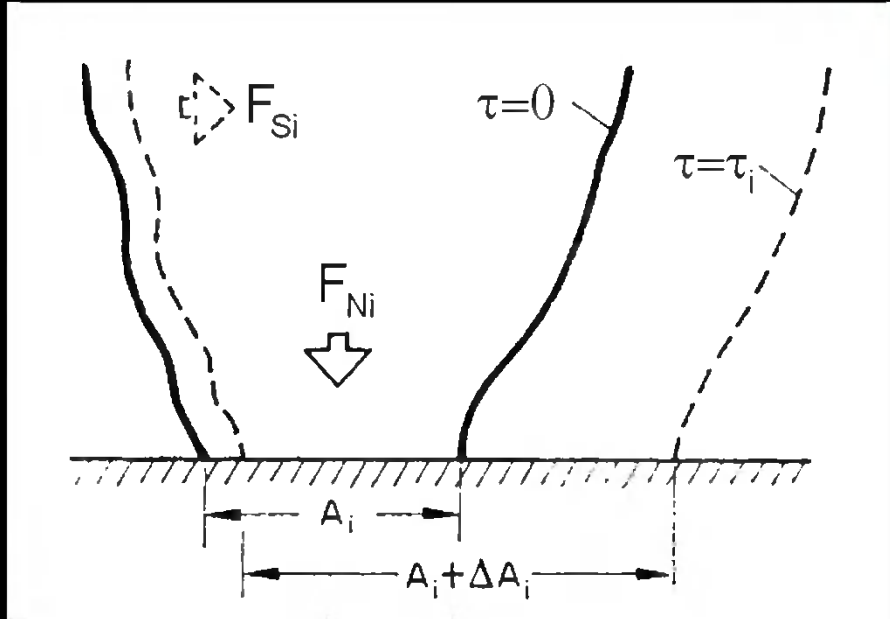
Yatay hareket söz konusu olunca $\tau \neq 0$ olur. Denklemin sağ tarafı sabit olduğu için, kayma gerilmelerinin artması için basıncın azalması gerekir. Bu da ancak değme alanının büyümesi ile mümkün olur.





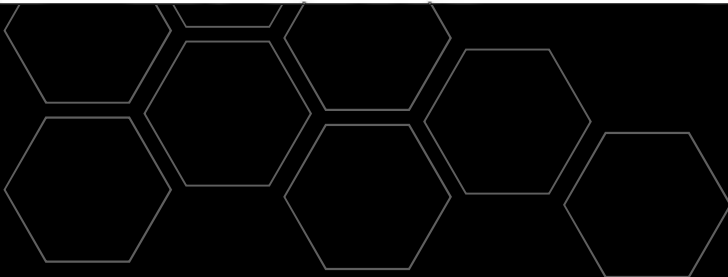
Değme alanı büyümesi

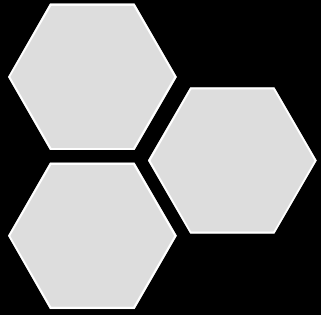
- Sınır durumda teorik olarak $\tau = \tau_{Ak}$ halinde, $p \Rightarrow 0$ olup, alanın sonsuz büyüklüğe çıkması gerekir.



Ancak, bu limit duruma erişmeden yüzeyler birbirinden ayrılacağı için, mikro değme alanlarının büyümesi sınırlı kalmaktadır.

Temiz metalsel yüzeylerde şekilde ΔA_i ile gösterilen değme alanı büyüme miktarının, ilk değme alanından 10 kat daha büyük olabileceği görülmüştür.



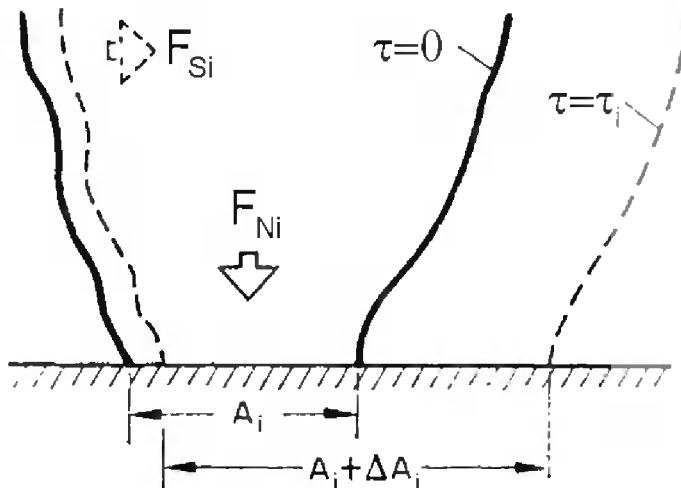


Değme alanı büyümesi

- Bu durumda adezyondan kaynaklanan sürtünme kuvveti tekrar yazılırsa,

$$F_{Ad} = \sum \tau_i \cdot (A_i + \Delta A_i) = \tau \cdot \sum (A_i + \Delta A_i) \approx \tau_{Ak} \cdot A_{Dpl} \cdot (1 + \bar{k})$$

Buna göre sürtünme katsayısı yeniden düzenlenirse,



$$\mu_{Ad} = \frac{\tau_{Ak} \cdot A_{Dpl} \cdot (1 + \bar{k})}{p_{pl}^* \cdot A_{Dpl}}$$

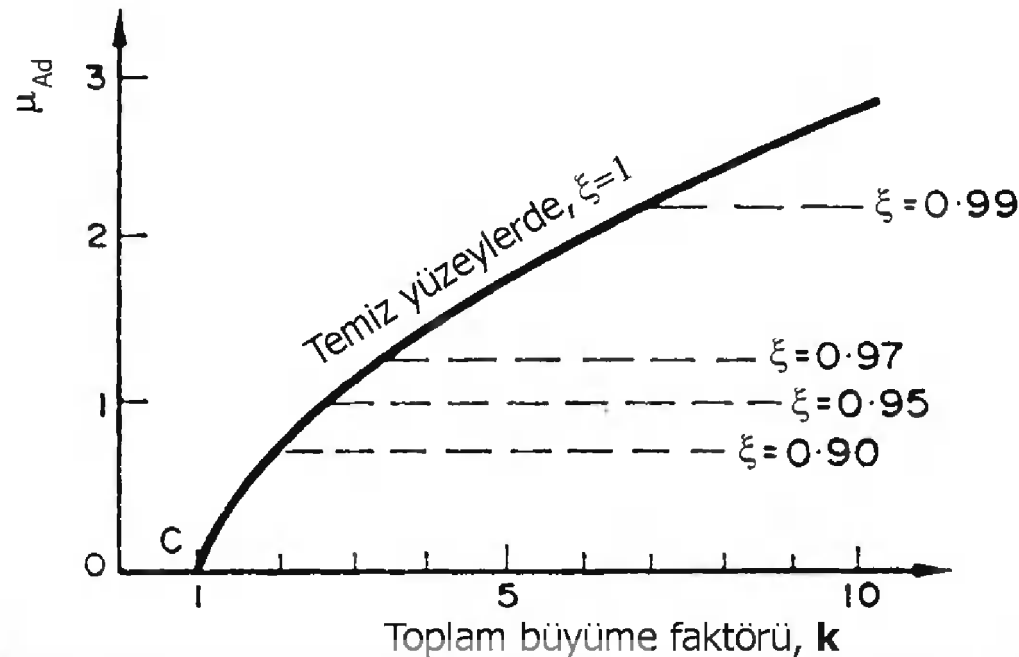
Burada $\bar{k}$ alan büyüme faktörüdür.



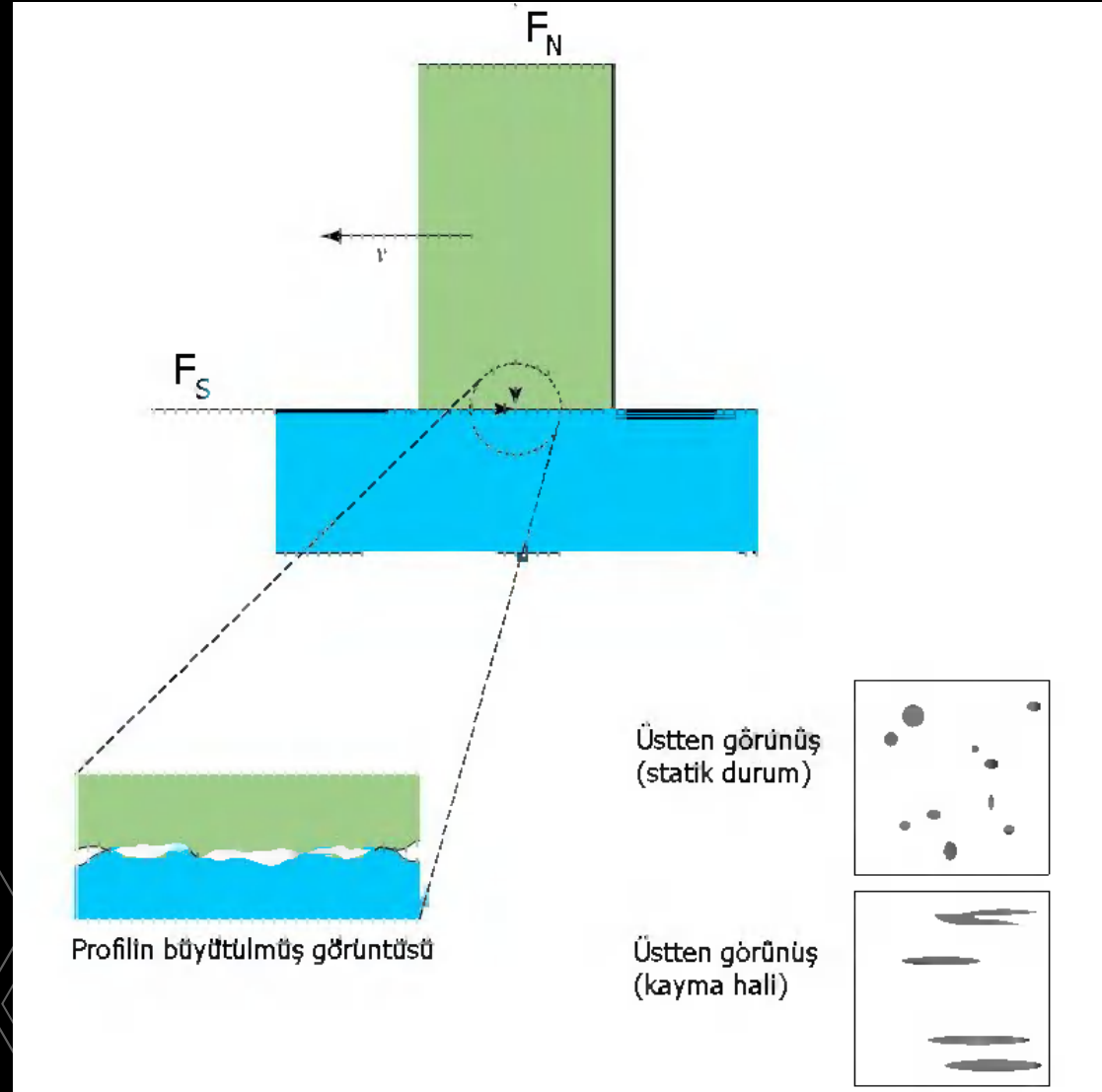


Değme alanı büyümesi

- Alan büyüme faktörü veya $k = (1 + \bar{k})$ olarak tarif edilen toplam büyüme faktörü, esas olarak yüzey temizlik faktörüne bağlıdır. Yüzey temizlik faktörü aşağıdaki gibi tanımlanır:
- $\xi = \frac{\tau}{\tau_{Ak}}$; $\xi = 1$ ise yüzeyler metalsel olarak temizdir.



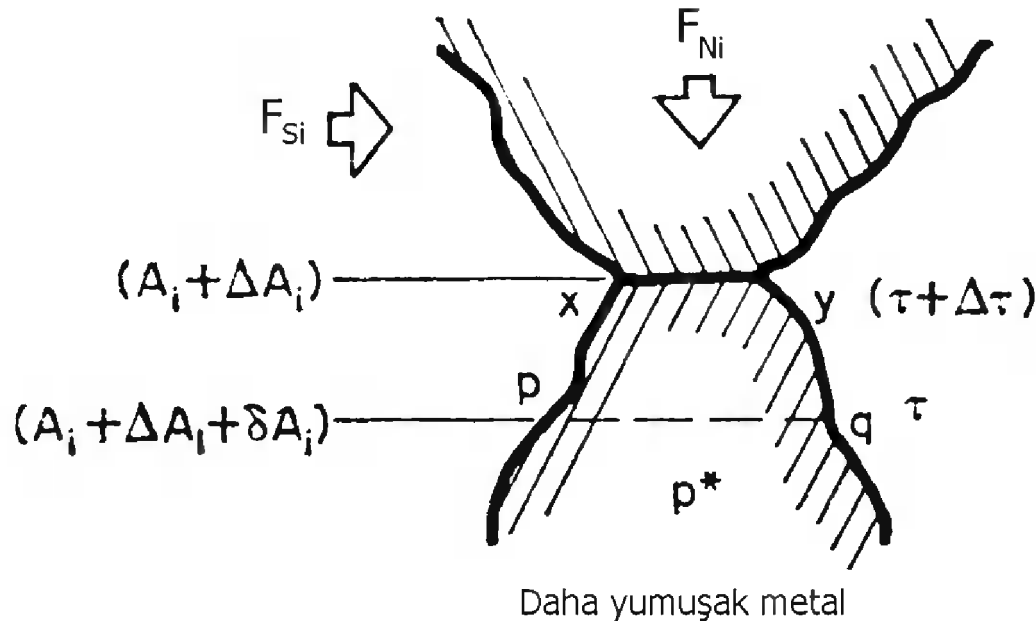
Değme alanı büyümesi





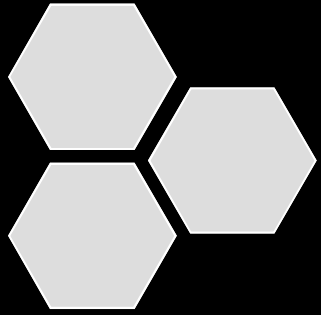
Plastik sertleşme (pekleşme)

Pek çok metalsel malzemede plastik akmaya bağlı olarak bir sertleşme meydana gelir. Özellikle, yüzeyin en üstünde bulunan **0,1** μm lik bir tabaka, ana malzemeden çok değişik bir yapıdadır ve burada çok fazla dislokasyon meydana gelir (Beilby tabakası).



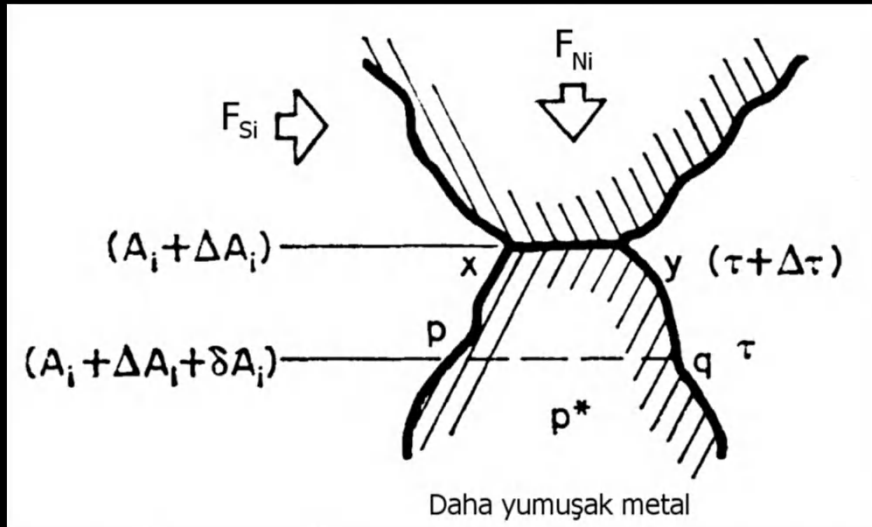
Pekleşme ile x-y düzleminde mukavemet arttığı için, ayrılma daha farklı bir düzlemden (p-q gibi) gerçekleşecektir.





Plastik sertleşme (pekleşme)

- Pekleşme durumu için aşağıdaki eşitsizlik yazılabilir:
- $(\tau_{AK} + \Delta\tau_{AK}) \cdot (A_i + \Delta A_i) \geq \tau_{AK} \cdot (A_i + \Delta A_i + \delta A_i)$
- Kesme direnci $F_{Si} = (A_i + \Delta A_i + \delta A_i) \cdot \tau$
- Normal kuvvet $F_{Ni} = A_i \cdot (p_{pl}^* + \Delta p_{pl}^*)$



Sürtünme katsayısı

$$\mu_i = \frac{(A_i + \Delta A_i + \delta A_i)}{A_i} \cdot \frac{\tau_{AK}}{p_{pl}^* + \Delta p_{pl}^*}$$

Plastik sertleşmenin sürtünme katsayısını arttırma oranı **%10...20** arasındadır.





Sürtünmede sürme direnci

- Basit bir pürüz modeli üzerinde deformasyon etkisi incelensin. Burada kullanılabilecek en basit model küre formundaki pürüzdür.

Genellikle sürme hareketi sırasında pürüz önünde yumuşak malzeme birikmesi olur. Bu nedenle A_2 ile gösterilen alan daha büyüktür. Ancak, bunun etkisi ihmal edilecektir.

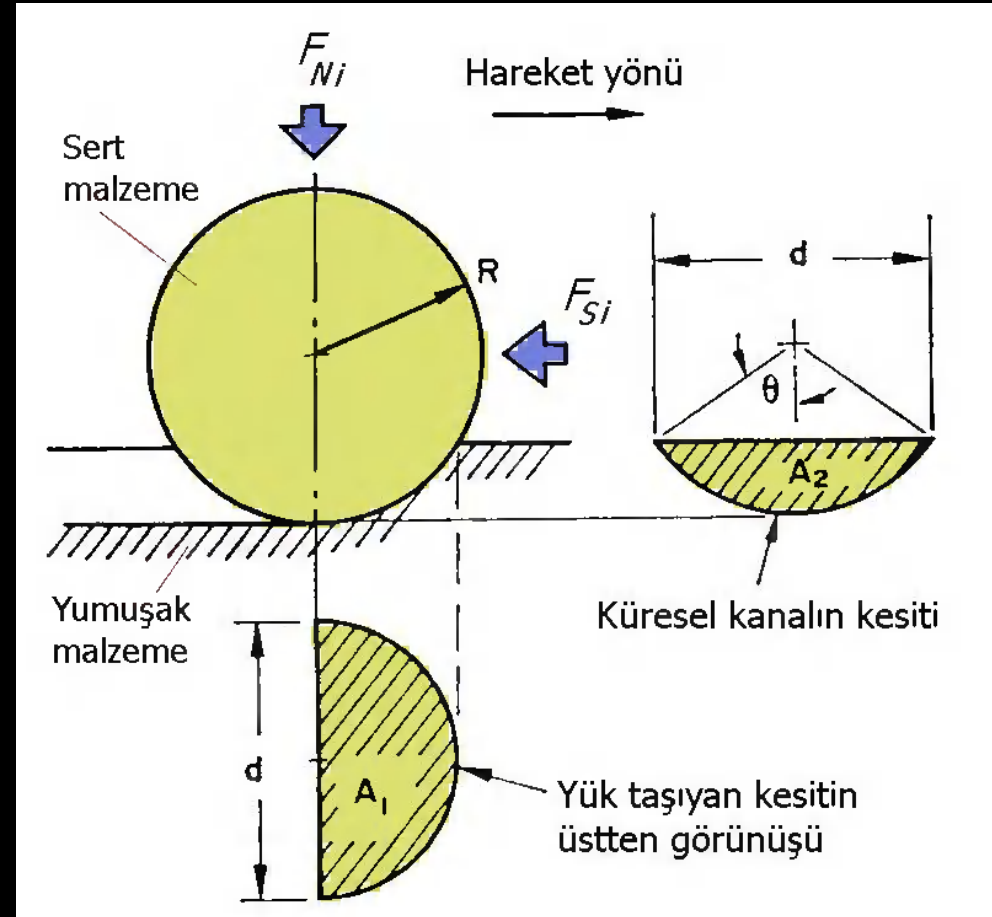
Alanlar:

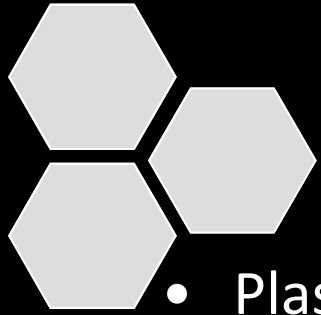
Basmaya dik projeksiyon alanı

$$A_1 = \frac{\pi}{2} \cdot r^2$$

Sürme hareketi doğrultusuna dik projeksiyon alanı

$$A_2 = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (2\theta - \sin 2\theta)$$





Sürtünmede sürme direnci

- Plastik şekil değişimi halinde,

$$F_{Ni} = A_1 \cdot p_{pl}^* = \frac{\pi}{2} \cdot r^2 \cdot p_{pl}^*$$

$$F_{Si} = A_2 \cdot p_{pl}^* = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (2\theta - \sin 2\theta) \cdot p_{pl}^*$$

Sürtünme katsayısı:

$$\mu_{Def} = \frac{F_{Si}}{F_{Ni}} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{R^2}{\pi \cdot r^2} \cdot (2\theta - \sin 2\theta)$$

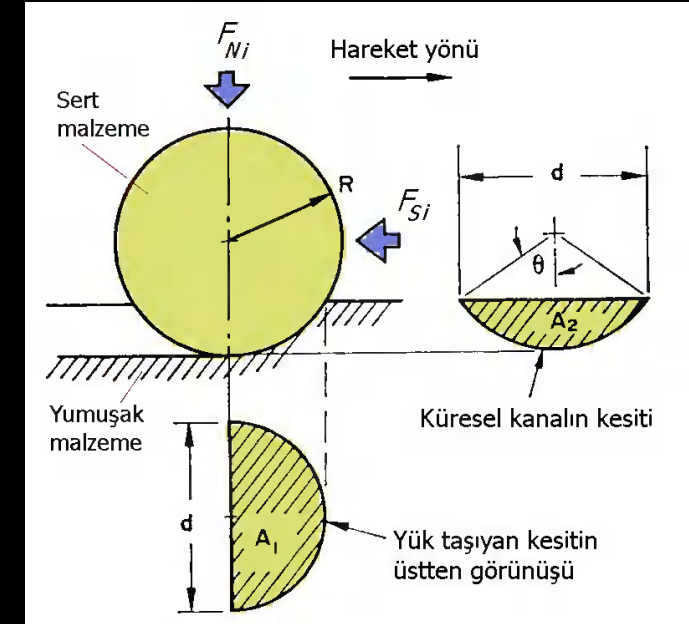
$r = R \cdot \sin \theta$ değeri yerine konursa

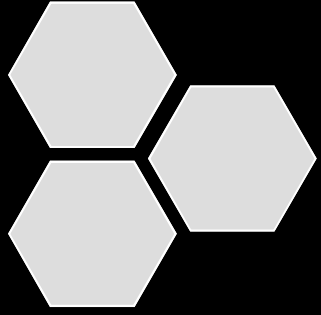
$$\mu_{Def} = \frac{(2\theta - \sin 2\theta)}{\pi \cdot \sin^2 \theta} \text{ olur.}$$

$$\text{Küçük açılarda; } \mu_{Def} = \frac{4\theta}{3\pi}$$

$\theta = 30^\circ$ konursa $\mu_{Def} = 0,23$ olur. Bu açı değeri çok büyüktür. Gerçekte karşılaşılması mümkün değildir.

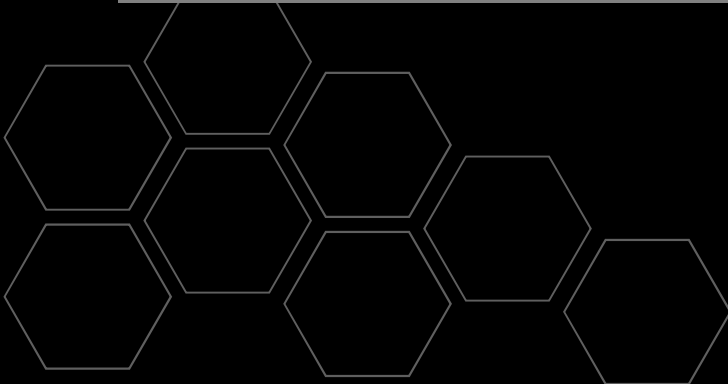
Biraz daha makul bir değer olan $\theta = 10^\circ$ için $\mu_{Def} = 0,074$ olmaktadır.





Sürtünme Katsayıları

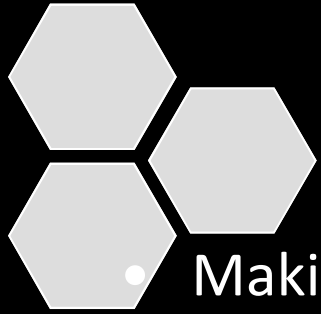
Malzeme çifti	Vakumda (10^{-9} ile 10^{-10} Torr) kuru sürtünme	Havada kuru sürtünme	Mineral yağ içinde (Sınır sürtünme)
Bakır/bakır	>100	1,0	0,08
NaCl/NaCl	1,3	0,7	0,22
Elmas/Elmas	0,9	0,1	0,05
Safir/Safir	0,8	0,2	0,2
Kuartz/Kuartz	0,7	0,35	0,2
Cam/Cam	0,5	1,0	0,28



Sürtünme katsayıları (pratik değerler)

Makro sürtünme türü	Sürtünme durumu	Ortam	Sürtünme katsayısı
Kayma sürtünmesi	I	Kuru sürtünme	Vakum
	II	Teknik kuru sürtünme	Gaz, buhar
	III	Sınır sürtünme	Düşük yağlayıcı miktarı
	IV	Karışık film	Yağlayıcı mevcut
	V	Hidrodinamik film	Yağ
	Aerodinamik film sürtünmesi		Gaz
Yuvarlanma sürtünmesi	Elastodinamik sürtünme, Karışık film		Yağ, gres





Sürtünme açısı (ρ)

- Makina elemanları hesabında bağıntıları kolaylaştırdığı için sürtünme katsayısının trigonometrik eşdeğeri sıklıkla kullanılır. Sürtünme açısı olarak adlandırılan bu açı basit bir eğik düzlem üzerindeki dengenin yazılmasından elde edilir.

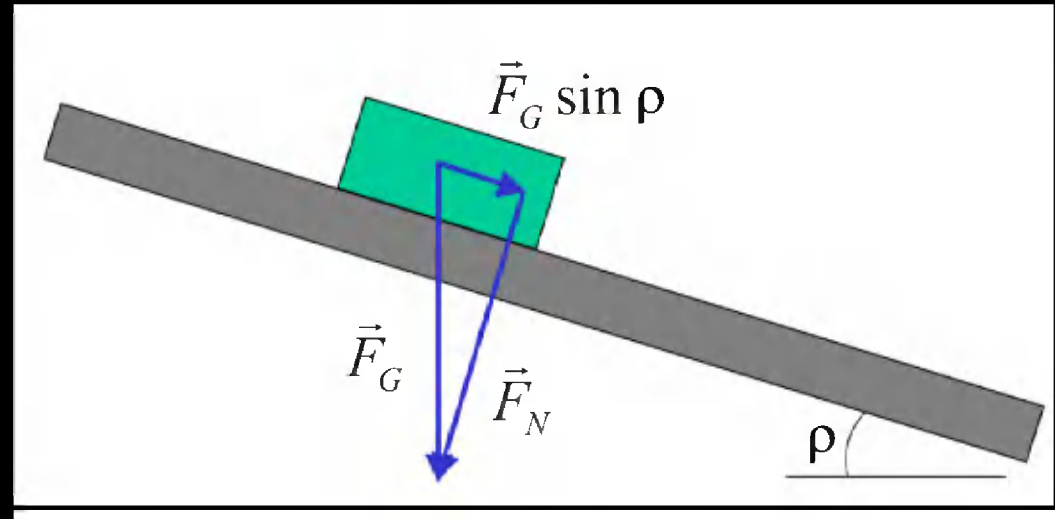
Yandaki eğik düzlem
üzerindeki cismin kaymaya
başlama şartı

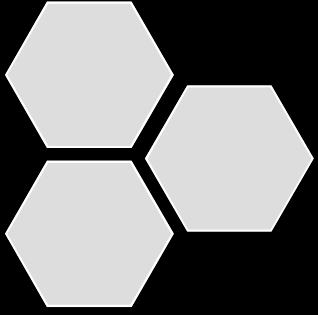
$$F_G \cdot \sin \rho \geq \mu \cdot F_G \cdot \cos \rho$$

F_N

Buradan, aşağıdaki tanım yapılabilir:

$$\mu = \tan \rho, \rho = \arctan \mu$$





Elastomerlerin sürtünmesi

- Genellikle elastomer, rijit malzemenin kaba pürüz tepecikleri üzerinde şekil değiştirerek bunları çevresel olarak kaplar ve bu temas bölgelerinde bir basınç alanı meydana gelir.

Bu temas bölgelerinin toplamının karşıladığı normal kuvvet:

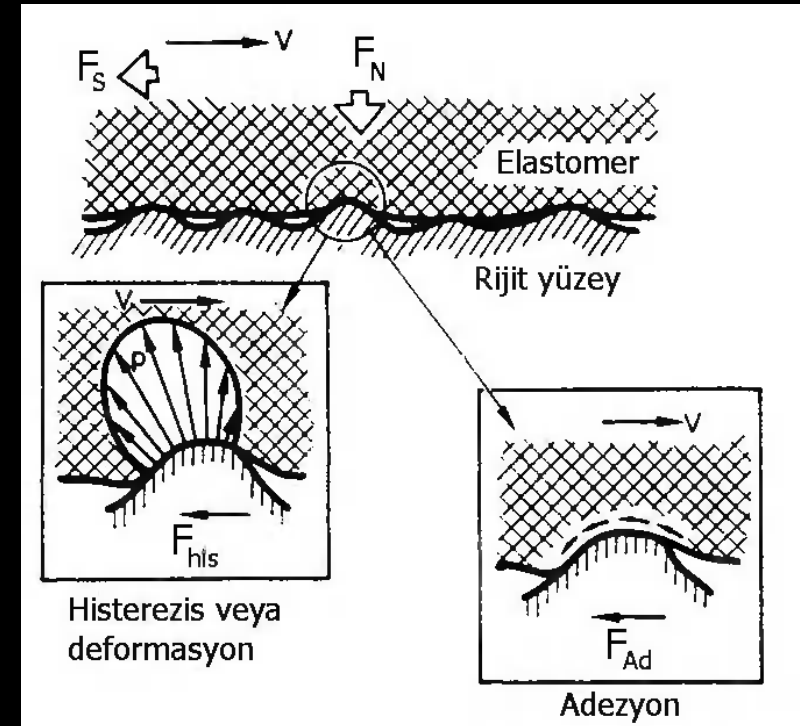
$$F_N = \sum_{i=1}^M p_i \cdot A_i = \bar{p} \cdot A$$

Burada $\bar{p}$ pürüz tepeciği başına ortalama basınç ve A ise

$$A = K \cdot M \cdot \left(\bar{p} / E \right)^n$$

şeklinde hesaplanan gerçek temas alanıdır.

Denklemdaki **K** bir sabit, **E** elastomerin elastiklik modülü, **M** ise temas halinde bulunan pürüz tepeciği sayısıdır. **n** üssü ise bir çok halde 1 değerini alır.





Elastomerlerin sürtünmesi

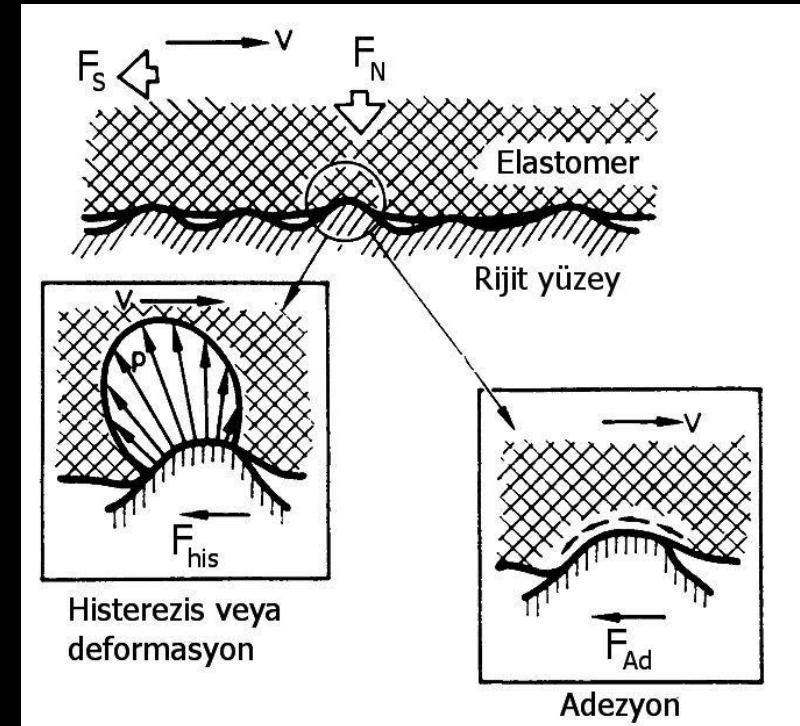
Eğer üst yüzeye bir teğetsel F_s kuvveti uygulanırsa temas noktalarında adeziv kuvvetler meydana gelecektir ve yüzeyler arasında izafi bir hareket meydana gelmezse, denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

Uygulanan kuvvet $\leftarrow F_s = \sum_{i=1}^M F_i \rightarrow$ Adeziv direnç kuvvetleri

F_s kuvvetini yüzeyler arasında bir v izafi hızı oluşana kadar arttıralım. Bu durumda direnç kuvveti, adezyon ve deformasyon terimlerinin toplamına eşit olur.

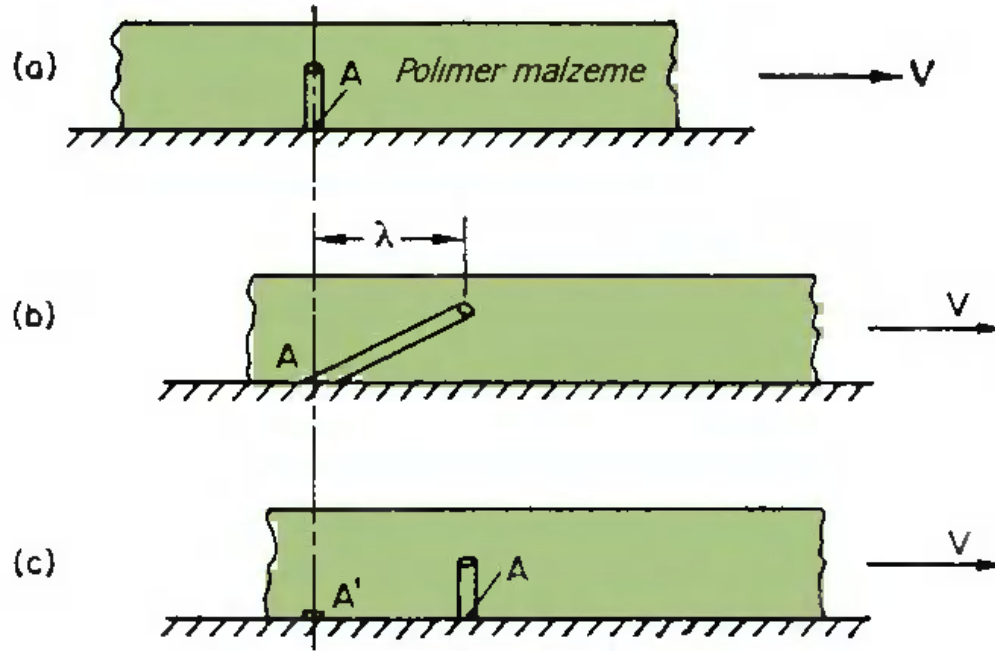
$$F_s = F_{adezyon} + F_{Deformasyon}$$

$$= F_{adezyon} + F_{Histerzis}$$



Adezyon direnci

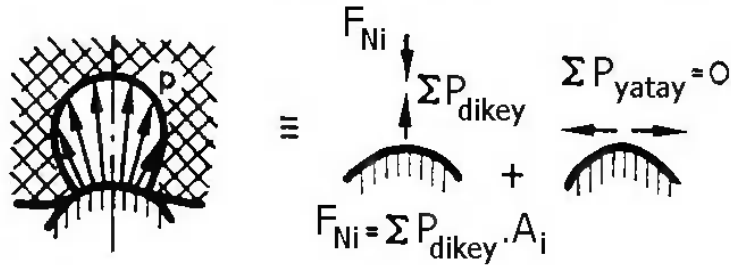
- Elastomer-metal temas durumu için adezyon üzerindeki yeni teoriler, verilmiş bir hız ve sıcaklık aralığında adezyon olayının termik olarak aktive edilmiş moleküler seviyede bir tutma-kayma (stick-slip) sonucu meydana geldiği kabulü üzerine kurulmuştur.



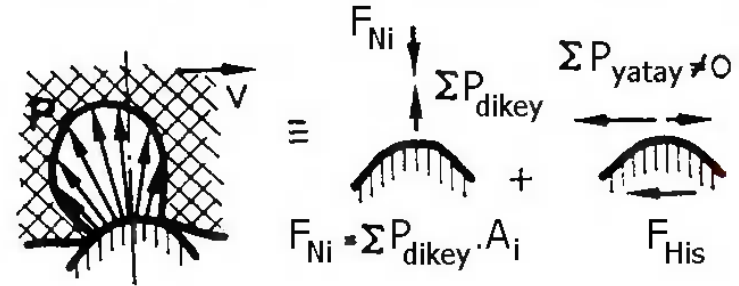
Histerezis direnci

- Küresel bir pürüz tepesi modelinde, pürüz geometrisinden dolayı normal kuvvet etkisi altında elastomer yüzeyinde simetrik bir basınç dağılımı meydana getirecektir. Basınç kuvvetlerinin normal kuvvet doğrultusundaki bileşenlerinin toplamı denge halinde normal kuvvete eşit olacaktır. Buna mukabil olarak, buna dik doğrultudaki bileşenlerin toplamı da sıfır olmak zorundadır.

HAL 1: İzafi hareket yok (Simetrik basınç dağılımı)



HAL 2: İzafi hareket (Asimetrik basınç dağılımı)

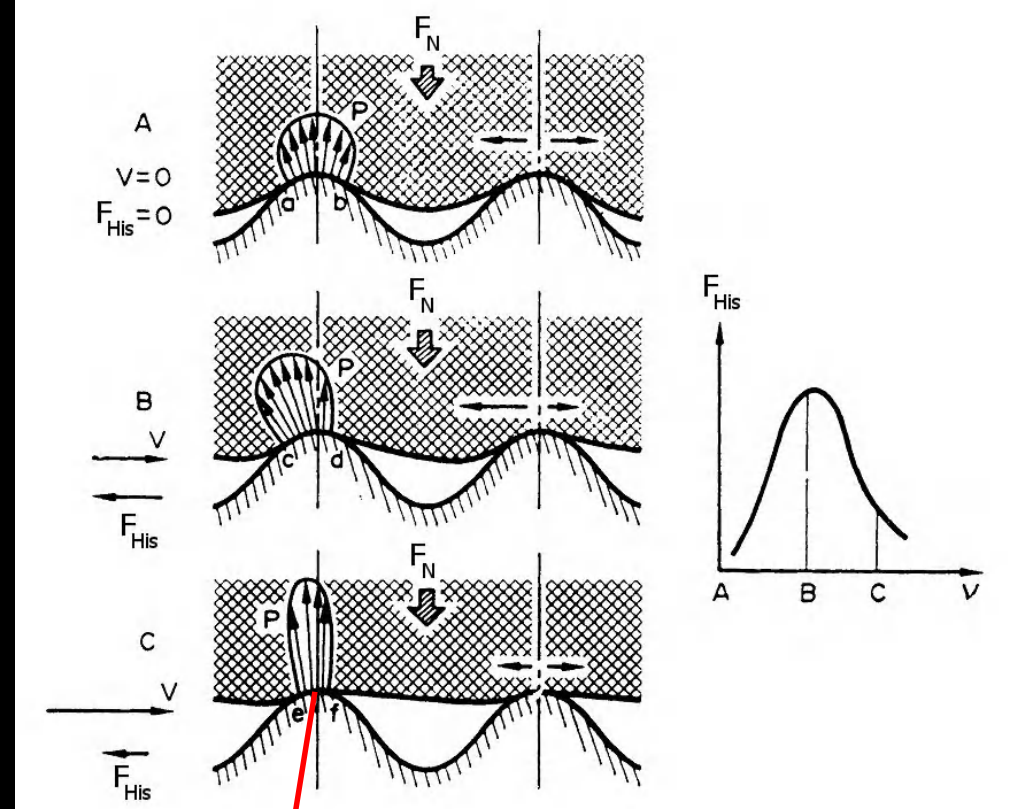


Elastomer, rijit karşı yüzeye göre sonlu bir **v** hızıyla kayma hareketine başlarsa, pürüz tepesinin ön kısmında meydana gelen basınç etkisi ve iki yüzey arasındaki adezyon sebebi ile viskoelastik malzeme bu bölgede toplanacaktır. Bu etki, simetrinin bozulmasına neden olur. Sonuç olarak, basınç kuvvetlerinin normal kuvvet doğrultusuna dik bileşenleri toplamı sıfırdan farklı olup, bu harekete karşı bir direnç kuvveti oluşturacaktır. Genel olarak bu kuvvete **histerezis direnci** denir.



Histerezis direnci

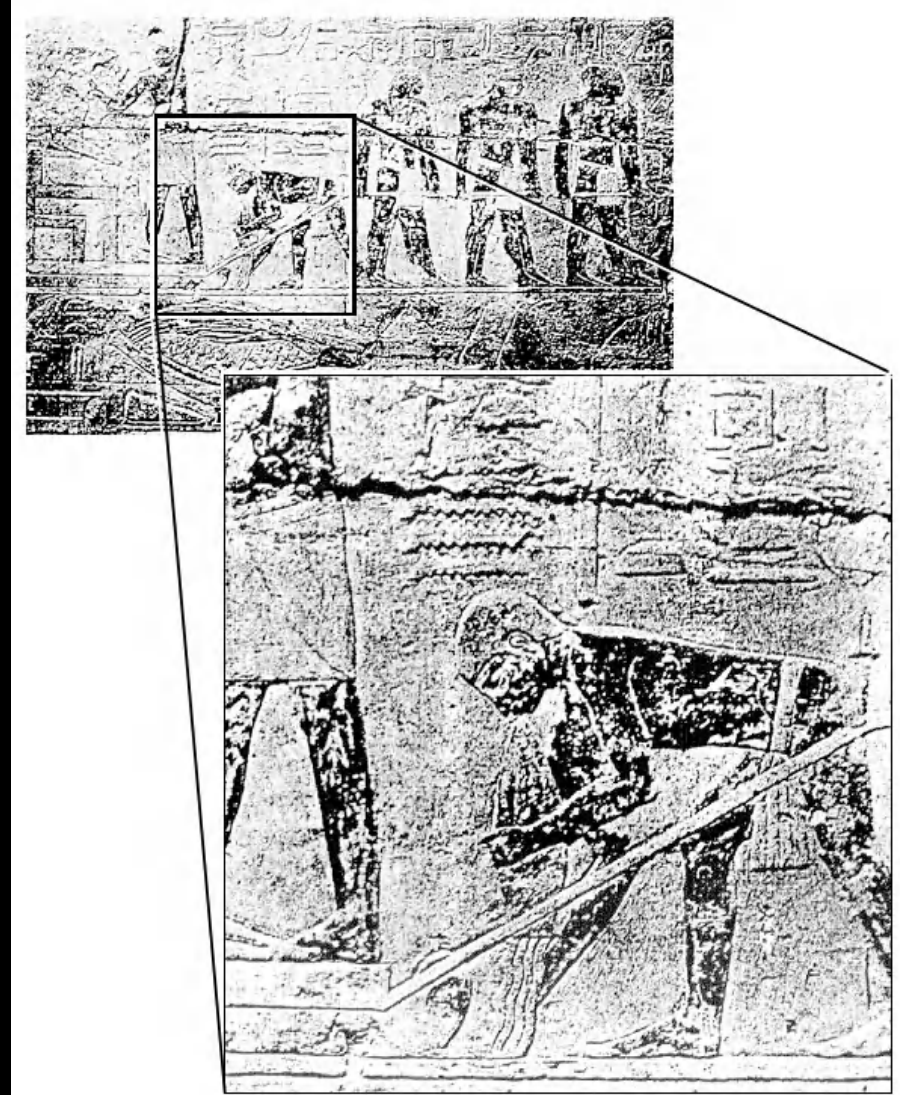
- Kayma hızı belli bir noktaya kadar arttırılırsa, basınç dağılımındaki asimetrinin derecesi ve histerezis kuvvetinin büyüklüğü artar. Hareket esnasında pürüz önünde yığılma (toplanma) meydana getiren elastomer, pürüzü aşarken ve aştıktan sonra bünyesinde bir geriye çekilme (toparlanma) hareketi de yapar.
- Genellikle malzemenin sıkışma-gevşeme hareketleri, malzeme eylemsizliği nedeni ile artan hız veya titreşim frekansına bağlı olarak, kayma hareketine göre gecikmeli olarak devam edecektir.

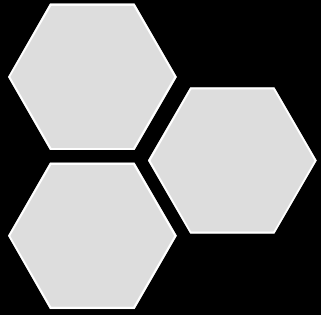


Kayma hızı yükseldikçe ön yığılma durumuna vakit kalmayacağından pürüz tepeciklerindeki değme alanı küçülür ve buna bağlı olarak histerezis kuvveti azalır

Sınır sürtünme hali

- Firavun Ti nin heykelinin taşınmasını gösteren bir Mısır duvar resmi. M.Ö. 2400 lü yıllara tarihlenmektedir. Kayda geçen ilk tribolojist heykel platformunun altına yağ döken işçidir.



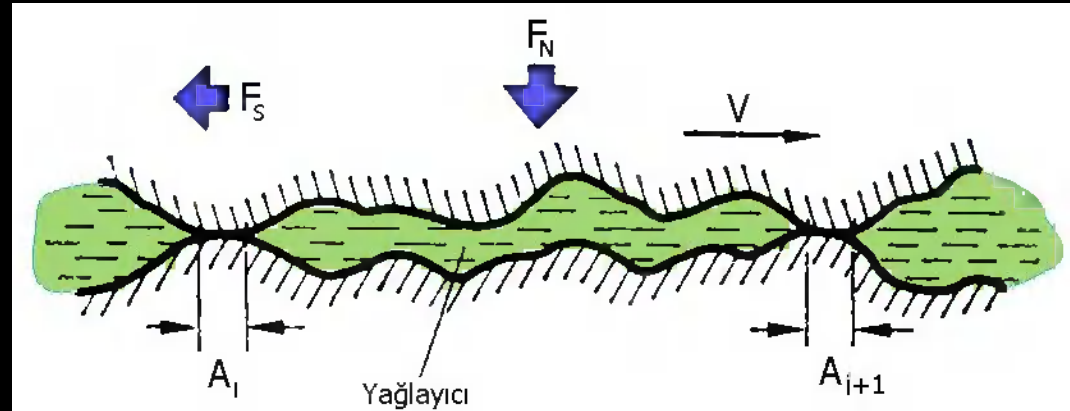


Sınır sürtünme hali

- Teorik kuru sürtünme ile film sürtünmesi arasındaki bölge «sınır sürtünme» olarak adlandırılır. Bu durumda bir biri ile temas halinde bulunan yüzeyler arasında belirli fiziksel özelliklere sahip üçüncü bir madde (yağlayıcı) bulunur. Bunun yanında, yüzeyler arasında mevcut yük ve hız koşullarında kesintisiz bir yağ filmi mevcut değildir. ↓

Bu durumda sürtünme direnci 3 ana bileşenden oluşur:

$$F_S = F_{Ad} + F_{Def} + F_{yağ}$$

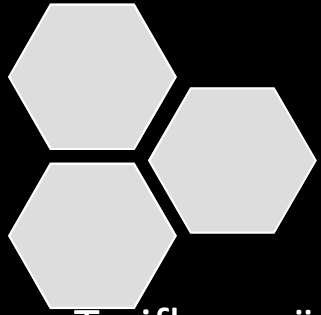


Tanımlar:

α_w : Toplam değme yüzeylerinin adeziv temas olan kısmı

$1 - \alpha_w$: Toplam değme yüzeylerinin film sürtünmesi olan kısmı





Sınır sürtünme hali

Tariflere göre:

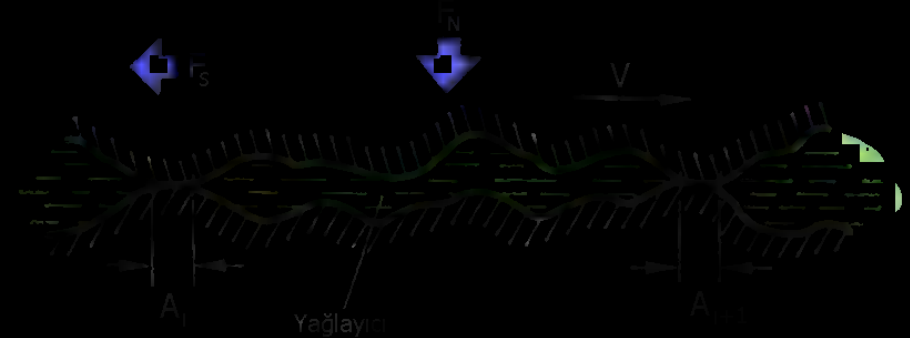
$$F_{Ad} = \alpha_w \cdot A \cdot \tau_{Ad}$$

$$F_{yağ} = (1 - \alpha_w) \cdot A \cdot \tau_{yağ}$$

Burada:

τ_{Ad} : Birim alana etkiyen adeziv kesme direnci

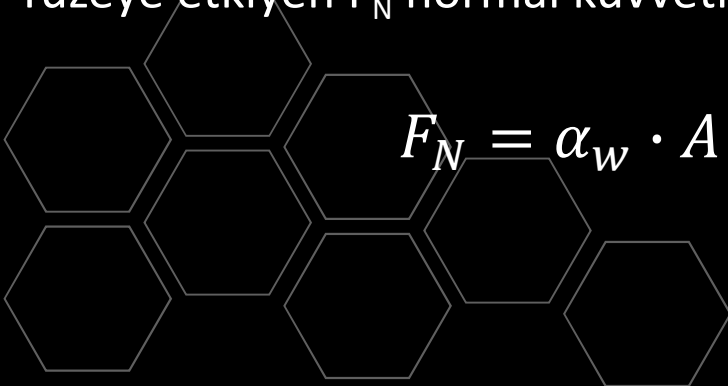
$\tau_{yağ}$: Birim alana etkiyen yağ filmi kayma direnci

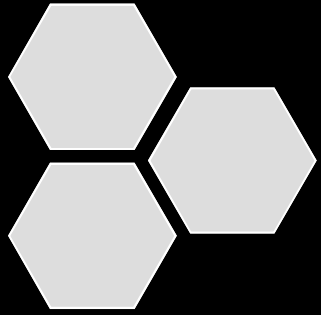


$$F_S = F_{Def} + \alpha_w \cdot A \cdot \tau_{Ad} + (1 - \alpha_w) \cdot A \cdot \tau_{yağ}$$

Yüzeye etkiyen F_N normal kuvvetinin yağ filminde de basınç oluşturduğu düşünülürse

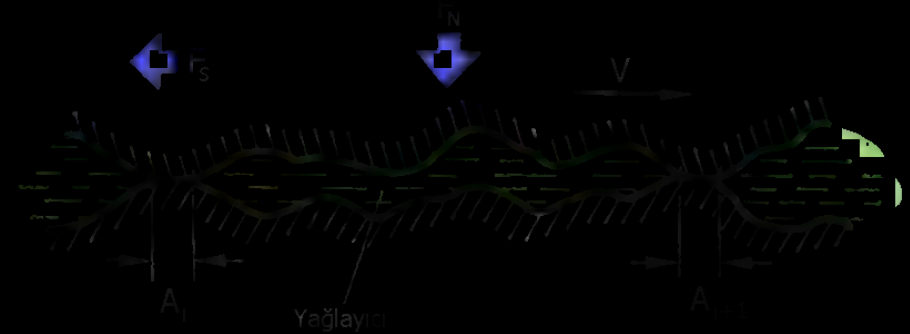
$$F_N = \alpha_w \cdot A \cdot p_{pl}^* + (1 - \alpha_w) \cdot A \cdot p_{yağ}$$





Sınır sürtünme hali

Tariflere göre sürtünme katsayısı:



$$\mu_{sınır} = \frac{F_S}{F_N} = \frac{\alpha_w \cdot A \cdot \tau_{Ad} + (1 - \alpha_w) \cdot A \cdot \tau_{yağ}}{\alpha_w \cdot A \cdot p_{pl}^* + (1 - \alpha_w) \cdot A \cdot p_{yağ}} + \mu_{Def}$$

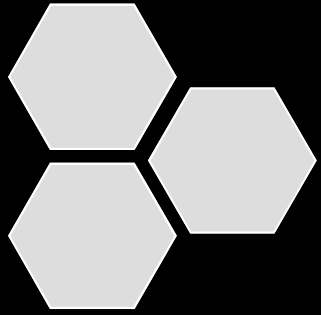
Genellikle

$\tau_{yağ} \ll \tau_{Ad}$ ve $p_{pl}^* \approx p_{yağ} = p_m$ alınabilir.



İyi işlenmiş yüzeylerde ihmal edilebilir.





Sınır sürtünme hali

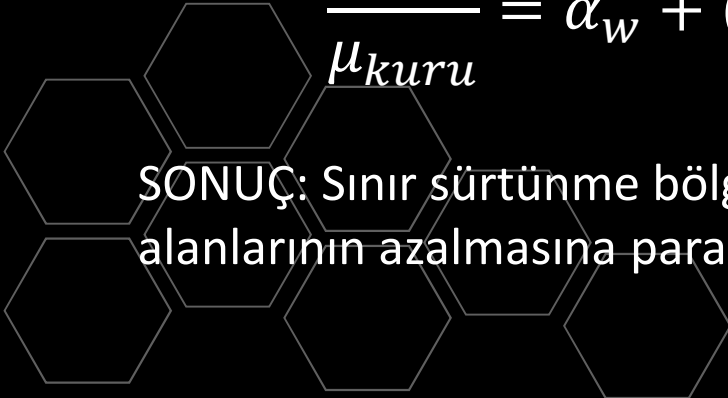
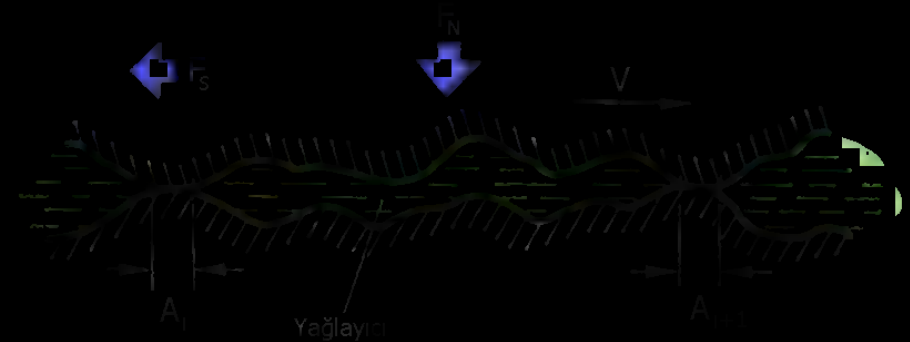
Denklemler yeniden düzenlenirse
sürtünme katsayısı:

$$\mu_{sınır} = \alpha_w \cdot \frac{\tau_{Ad}}{p_m} + (1 - \alpha_w) \cdot \frac{\tau_{yağ}}{p_m}$$

Diğer taraftan $\mu_{kuru} = \frac{\tau_{Ad}}{p_m}$ olarak tariflenmişti.

$$\frac{\mu_{sınır}}{\mu_{kuru}} = \alpha_w + (1 - \alpha_w) \cdot \frac{\tau_{yağ}}{\tau_{Ad}} \approx \alpha_w$$

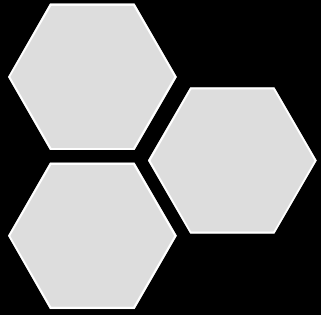
SONUÇ: Sınır sürtünme bölgesindeki sürtünme katsayısı adeziv değme alanlarının azalmasına paralel olarak azalır. **BKZ: Stribeck Eğrisi**



Aşınma

- Makinalardaki arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının fonksiyon dışı kalmalarının en büyük nedenini aşınma teşkil etmektedir.
- Sürtünme nasıl bir enerji kaybı nedeni ise, aşınma da tekrar geriye kazanılamayan bir madde kaybı nedenidir.
- Bu, dolaylı olarak yeni malzemenin temini için gerekli olan ek bir enerji gereksinimini de beraberinde getirir.
- Sürtünme ve aşınma arasında doğrudan bir ilişki kurmak da mümkün değildir. Farklı malzeme çiftleri arasında sürtünme direnci aynı olabilir, ancak bunlar arasındaki aşınma miktarı farklılığı 100 veya daha fazla kata çıkabilir.
- Genel olarak aşınma problemi, sürtünme probleminden daha karmaşık bir yapıdadır. Eş çalışan fonksiyon yüzeyleri arasında çok değişik türde aşınma şekillerine rastlanır ve çok kez de aynı bir koşulda bu değişik şekillerin bir kaç aynı zamanda kendini gösterir.
- Bu nedenlerle bütün aşınma hallerini veya bir kısmını kapsayan ve genel geçerliliği olan bir aşınma kanununu tanımlamak mümkün olamamıştır.





Aşınma Türleri

- Bu konudaki sınıflandırmada ilgili literatüre bağlı olarak küçük farklılıklar olabilmektedir. Ancak, makina elemanları açısından aşağıdaki sınıflandırma uygun görünmektedir:

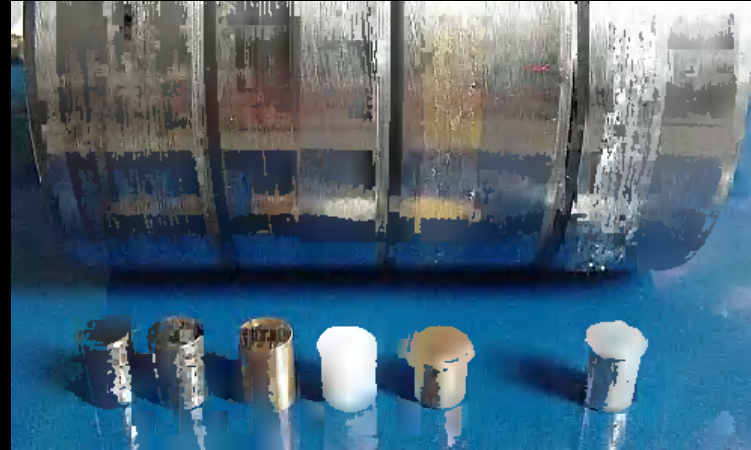
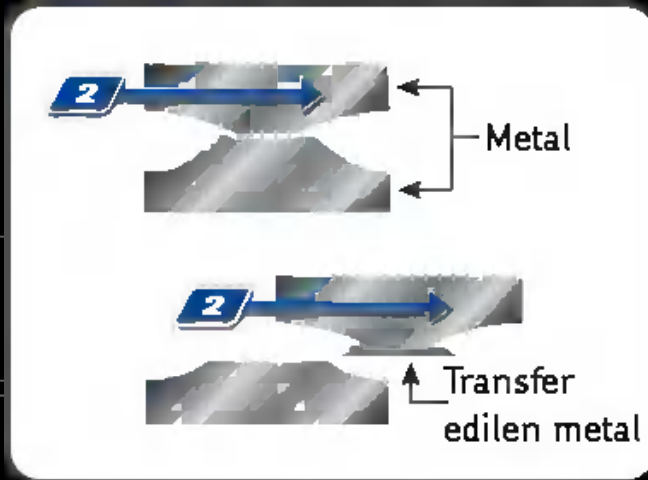
1. Adeziv aşınma (sürekli sınırlı aşınma, yenme vb)
2. Abrasiv aşınma
3. Sürtünme oksidasyonu (mekanik korozyon)
4. Yorulma aşınması (pitting vb.)
5. Eroziv aşınma





Adeziv aşınma

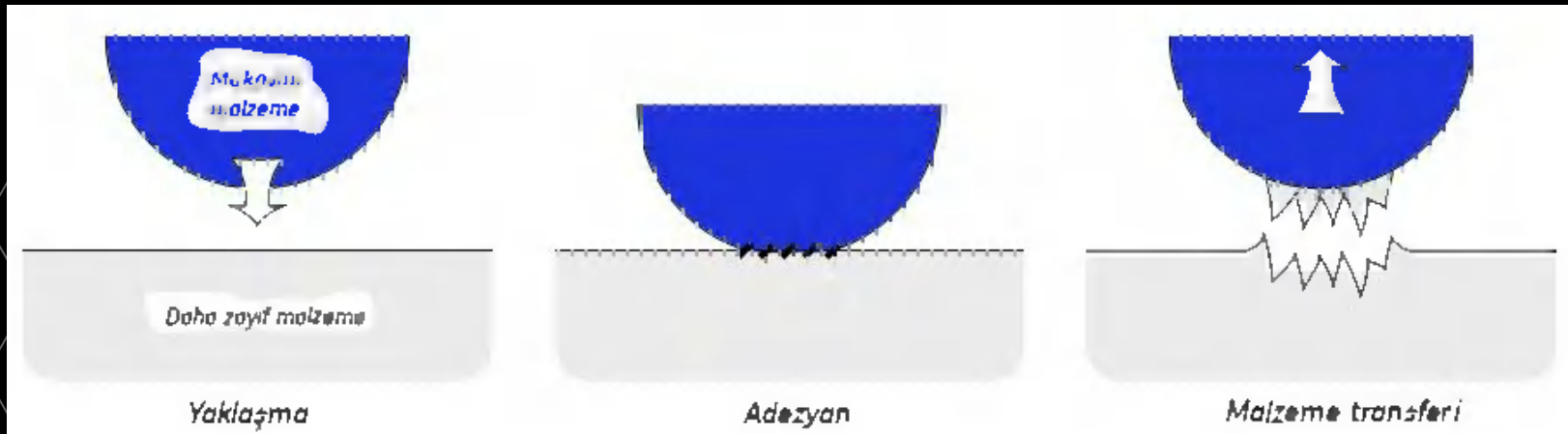
- Adeziv aşınma pürüz tepelerindeki lokal kaynak bağları sonucunda başlar.
- Bir birine göre izafi hareket yapan malzemelerin türleri, bu kaynak bağının mukavemetini çok etkiler.
- Tabakalar arası hata enerjisi, kristal yapı, doğal oksit filmi oluşumu gibi bütün parametreler adeziv aşınmayı etkiler.

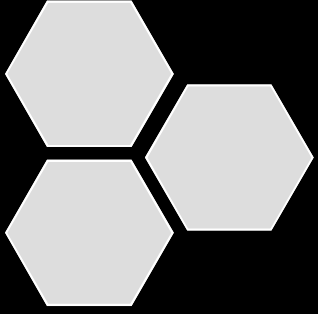




Adeziv aşınma

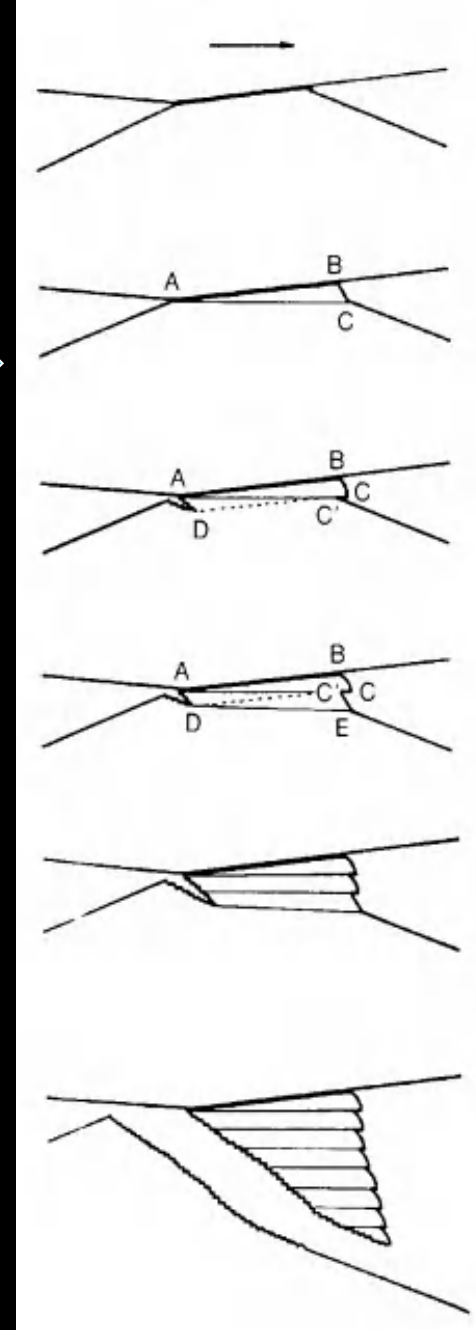
- Altın, platin gibi asal metaller dışında bir oksit tabakası her zaman mevcuttur. Çok ince olduğu için gözle görülmeyen bu film gerçek metalsel teması engeller.
- Bu nedenle vakum altında yapılan testlerde metalsel adezyonun çok büyük olduğu bulunmuştur. Yani, yüzeyler arasındaki adeziv kuvvet, temas kuvvetinden epey büyüktür.
- Bu şekilde zayıf olan malzemedan, mukavim olana doğru bir transfer gerçekleşir.



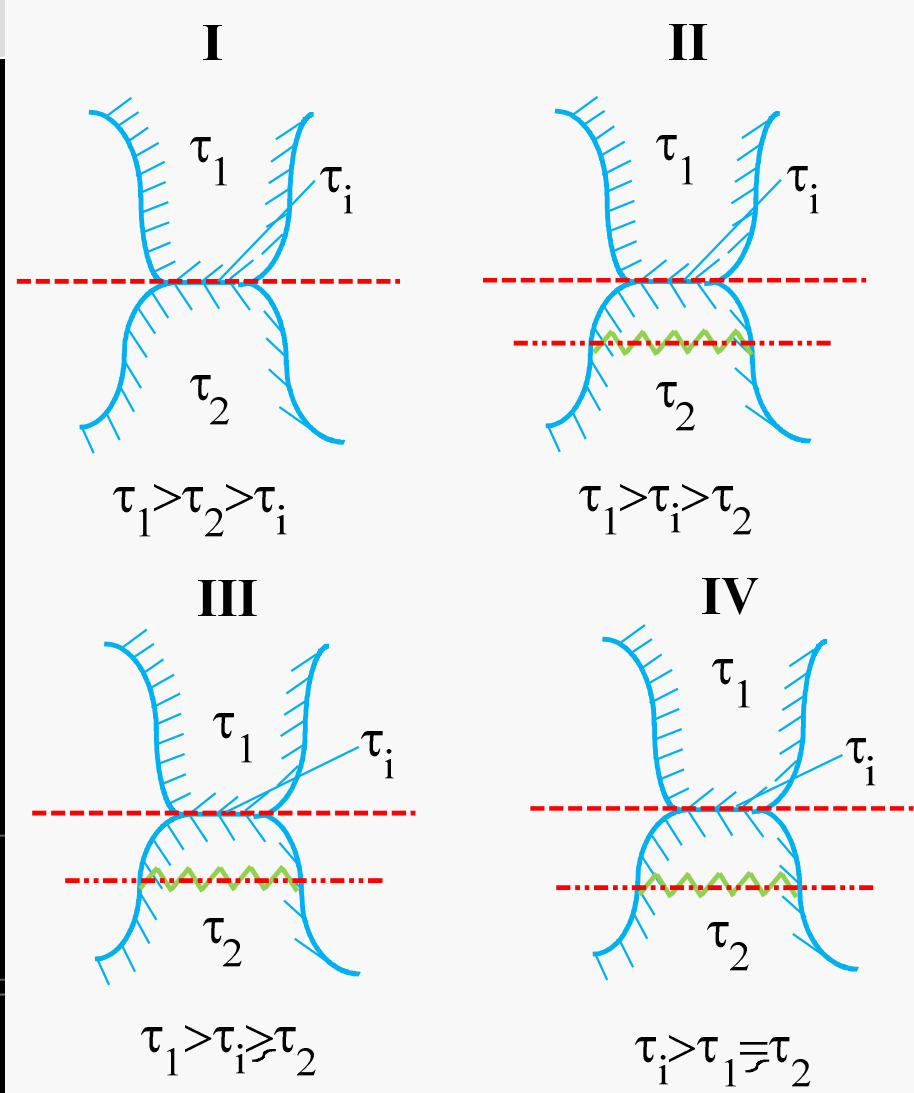


Adeziv aşınma

- Bir başka açıklamaya göre, temasta bulunan bir pürüz çiftinde bir birini takip eden tabakaların plastik kayması sonucu aşınma mahsulleri oluşur.
- Bu mekanizmada oluşan aşınma mahsulleri, ince ve eğimlidir.
- Daha fazla izafi hareket her iki mekanizmaya da uygun şekilde daha çok aşınma mahsulü üretilmesine neden olur.



Adeziv Aşınma

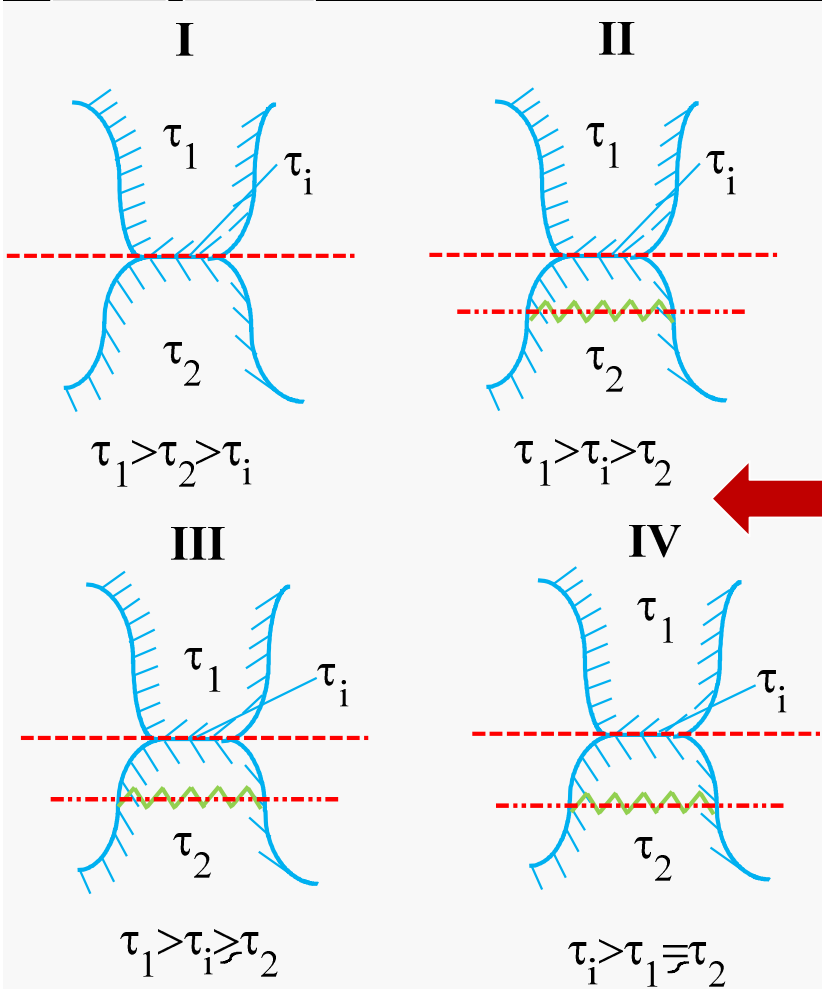


Kuru ve sınır sürtünme halindeki fonksiyon yüzeylerinin birbiri ile temas halinde olan pürüz tepelerinde, özellikle akma sınırı aşıldığında kuvvetli bir adeziv veya sıcaklık etkisi ile teşvik edilen koheziv bir bağ meydana gelmektedir.

Bu bağ, metal değme yüzeyleri ne kadar temiz ise o oranda kuvvetlidir. Pürüz tepecikleri arasında bu tür bağlar oluşmuş olan iki yüzey birbirine göre hareket ettirildiğinde, bağlanmış tepeciklerin birbirinden ayrılması dört şekilde olabilir.



Adeziv Aşınma



I- Ara yüzeyin kesme direnci, malzemelerin kesme dirençlerinden (τ_1 , τ_2) daha küçüktür. Bu takdirde ayrılma ara yüzeyden (veya oluşan kaynak bağından) olur. Bu tür adeziv aşınmada aşınma miktarı en azdır. Çelik/kalay çifti bu hal için örnek gösterilebilir.

II- Ara yüzeyin kesme direnci, 1 numaralı malzemeden küçük, 2 numaralı malzemeden büyüktür. Örnek olarak çelik/kurşun çiftine bu tür aşınmaya rastlanır. Benzer aşınma hali kurşun bronz/çelik arasında da gözlenir.

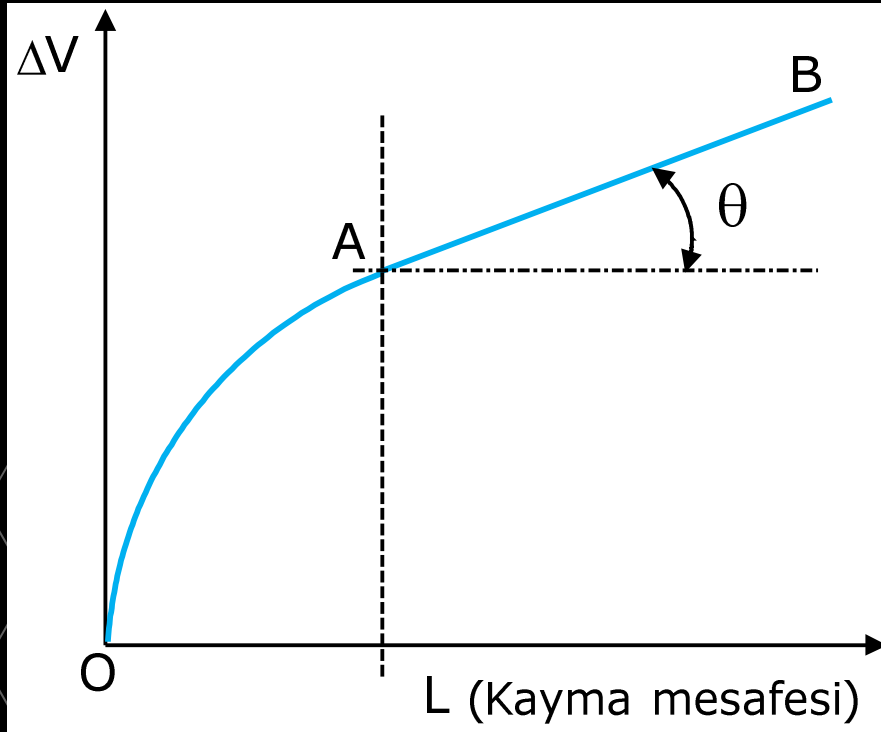
III- Ara yüzeyin kesme direnci, yüzey malzemelerinden birinden küçük, diğerinden ise çok az farklı, heterojen yapıda olan ikinci malzemeye ise yer yer eşit olabilir. Bu takdirde gene yumuşak malzemeden sert malzemeye bir madde geçişi vardır. Ancak bazı noktalarda parçacık kopmaları kendini gösterecektir. Madde geçişi yanında madde ayrılmaları suretiyle daha büyük bir madde kaybı ortaya çıkacaktır. Bu tip adeziv aşınmaya çelik/bakır çifti örnek gösterilebilir.

IV- Ara yüzeyin kesme direnci her iki yüzey malzemesinin kesme direncinden büyüktür. Ayrıca kuvvetli bir plastik şekil değişimi sonucu pekleşmiş ve kırılgan hale gelmiştir. Belirli bir kayma mesafesinde yüzeyden kopup ayrılacak, kuvvetli bir aşındırıcı olarak yüzeyler arasında adeziv aşınmaya ek olarak bir abraziv aşınmaya sebep olacaktır. Bunun sonucu her iki yüzeyde de kuvvetli bir aşınma meydana gelecektir. Mukavemet özellikleri birbirine yakın malzemeler arasında (örnek olarak çelik/çelik) bu tip adeziv kökenli aşınma hallerine sıklıkla rastlanır.



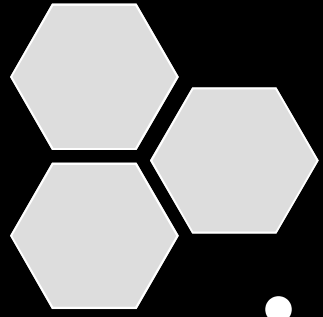
Sürekli sınırlı aşınma (Continuous Wear)

- Sınır sürtünmesi bölgesinde çalışan veya zaman zaman sınır sürtünmesi haline maruz fonksiyon yüzeyleri arasında, bir bakıma kontrollü olan bu adeziv aşınma şekline rastlanır.
- Yüzeylerde önemli bir hasar meydana gelmez. Yüzeyler çalışma süresince düzgünleşir. İçten yanmalı motorlarda, piston ve silindir arasındaki aşınma şekli bunun karakteristik bir örneğidir.



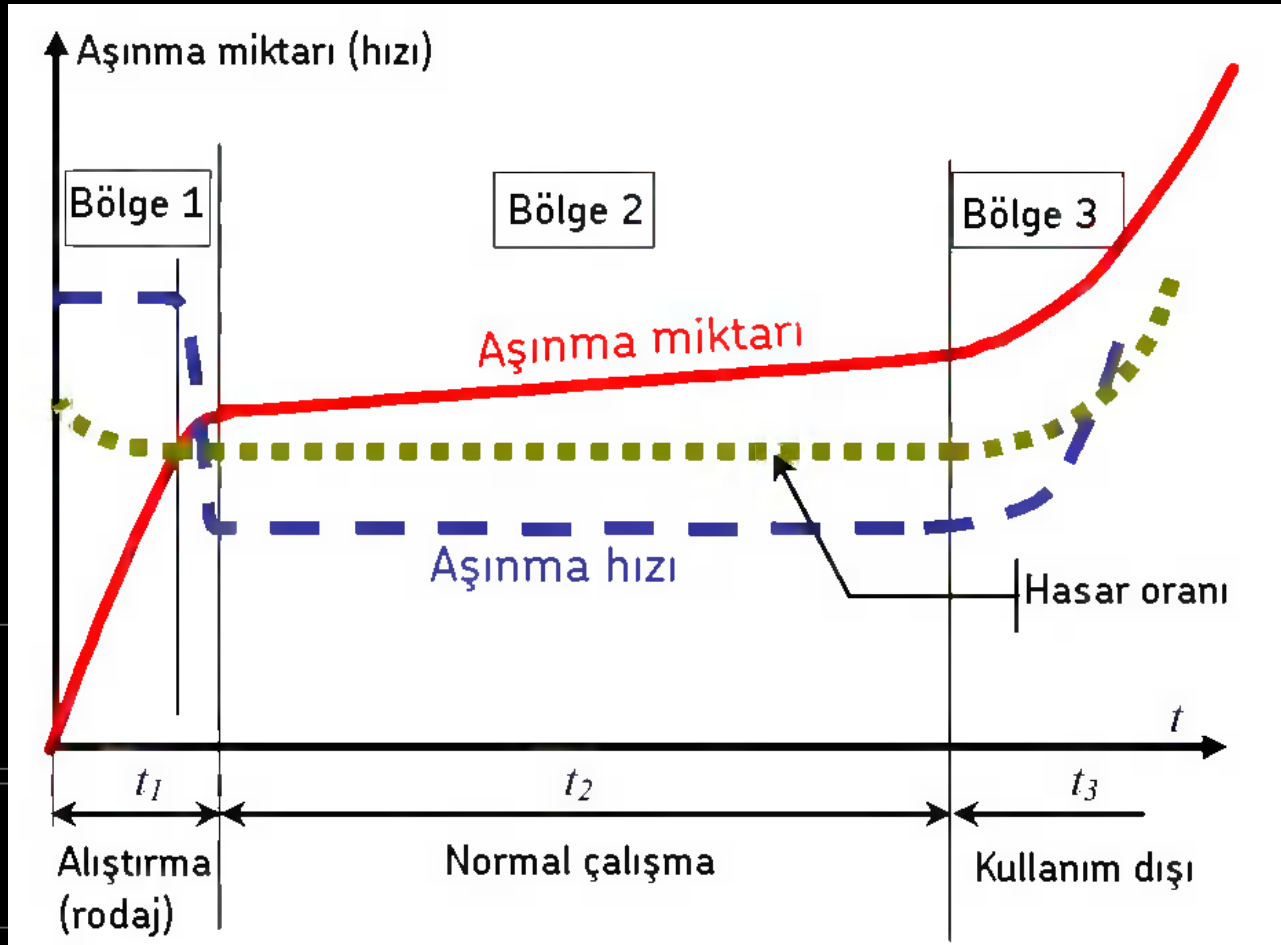
L_0 ile L_A arasında pürüzlerin kısmen düzelmesine bağlı olarak evvela hızlı bir aşınma gözlenir. Buna alışma aşınması (Running Wear), bundan sonraki kısma ise sürekli aşınma (Continuous Wear) denir.





Sürekli sınırlı aşınma (Continuous Wear)

- Genel karakteristik



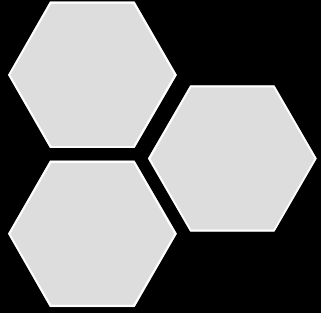
Yenme (Scuffing)

- Birbirine göre kayma hareketi yapan yüzeyler arasındaki kayma hızı ve yüzey basıncı belirli bir kritik değeri aşınca ani olarak ortaya çıkmaktadır. Bazı hallerde daha küçük hız ve yüklerde, ancak yüksek ortam sıcaklıklarında yenme olayı ile karşılaşılabilir.
- Yenme esas itibarı ile çok şiddetli bir bölgesel kaynama veya adezyon olayıdır.
- Olayın tam niceliksel değerlendirilmesi yapılamamıştır.
- Literatürde Almen, Davis ve özellikle Blok kriterleri diye adlandırılan bazı sınır değer kombinasyonlarından boyutlandırmada yararlanılmaktadır.
- Almen kriterinde, yenme olmaması için $p_{maks} \cdot V_k \leq C_0$ şartı sağlanmalıdır. Otomobil diferansiyelindeki hiperboloid dişlilerde $C_0 \approx 320000$ (N.m/cm².sn) dir. Bu denklemde p_{maks} maksimum Hertz basıncını, V_k ise bu noktadaki kayma hızını göstermektedir.



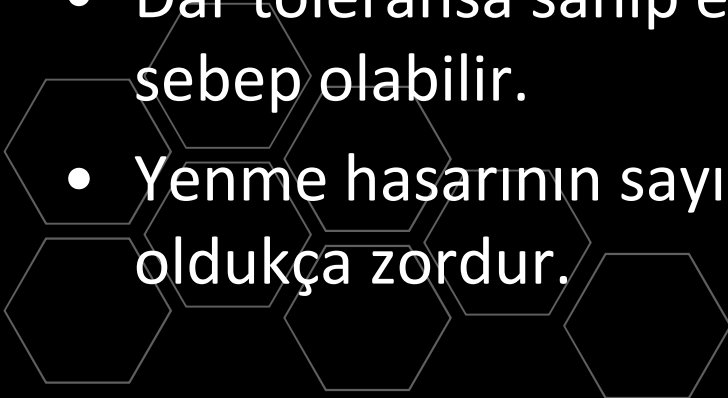
Makina Elemanları I

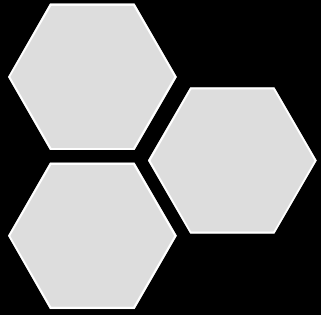




Yenmeye ait bazı özellikler

- Yenme, net malzeme kaybı olmaksızın bir yüzeyi bozabilir.
- İlk etapta kaba pürüzlü olan yüzey, yenme sonucu daha düzgün hale gelebilir.
- Progresif olması gerekmez (bir çevrimde de oluşabilir)
- Genel makina konstrüksiyonunda yenme çoğunlukla yetersiz yağlama veya yağ devresinde arıza sonucu ortaya çıkar.
- Dar toleransa sahip elemanlarda kaynama sonucu blokaja sebep olabilir.
- Yenme hasarının sayısal olarak ölçülüp, değerlendirilmesi oldukça zordur.

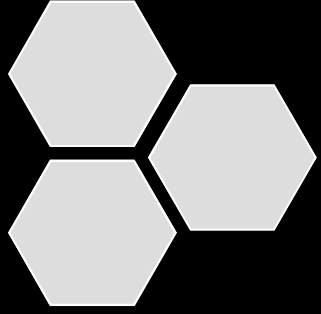




Adeziv Aşınmanın Teorisi

- Aşınma konusunu teorik bir temele dayandırmaya ait ilk çalışmaları Holm ve Archard gerçekleştirmiştir.
- Bu araştırmacılar yaygın olarak kullanılan (k) aşınma faktörünün de tarifini yapmışlardır.
- Archard modeli esas olarak metaller için geliştirilmiş olmasına karşın, sınırlı olarak başka malzemelerde de kullanılabilir.
- Archard, J. F., J. Appl. Phys., 24, 981, 1953.





Adeziv Aşınmanın Teorisi

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

VOLUME 24, NUMBER 8

AUGUST, 1953

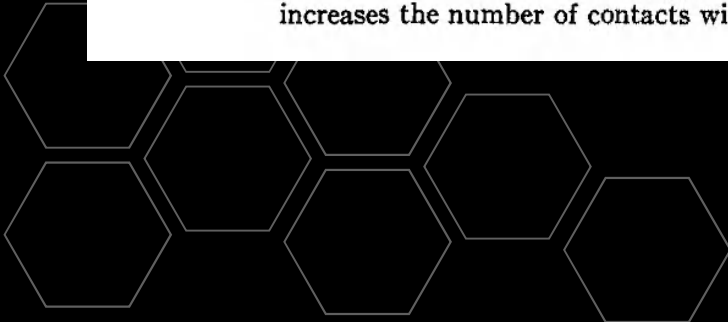
Contact and Rubbing of Flat Surfaces

J. F. ARCHARD

Research Laboratory, Associated Electrical Industries Limited, Aldermaston, Berkshire, England

(Received January 8, 1953)

The interpretation of certain phenomena occurring at nominally flat surfaces in stationary or sliding contact is dependent on the assumed distribution of the real area of contact between the surfaces. Since there is little direct evidence on which to base an estimate of this distribution, the approach used is to set up a simple model and compare the deduced theory (e.g., the deduced dependence of the experimental observables on the load) with the experimental evidence. The main conclusions are as follows. (a) The electrical contact resistance depends on the model used to represent the surfaces; the most realistic model is one in which increasing the load increases both the number and size of the contact areas. (b) In general, mechanical wear should also depend on the model. However, in wear experiments showing the simplest behavior, the wear rate is proportional to the load, and these results can be explained by assuming removal of lumps at contact areas formed by plastic deformation; moreover, this particular deduction is independent of the assumed model. This suggests that a basic assumption of previous theories, that increasing the load increases the number of contacts without affecting their average size, is redundant.

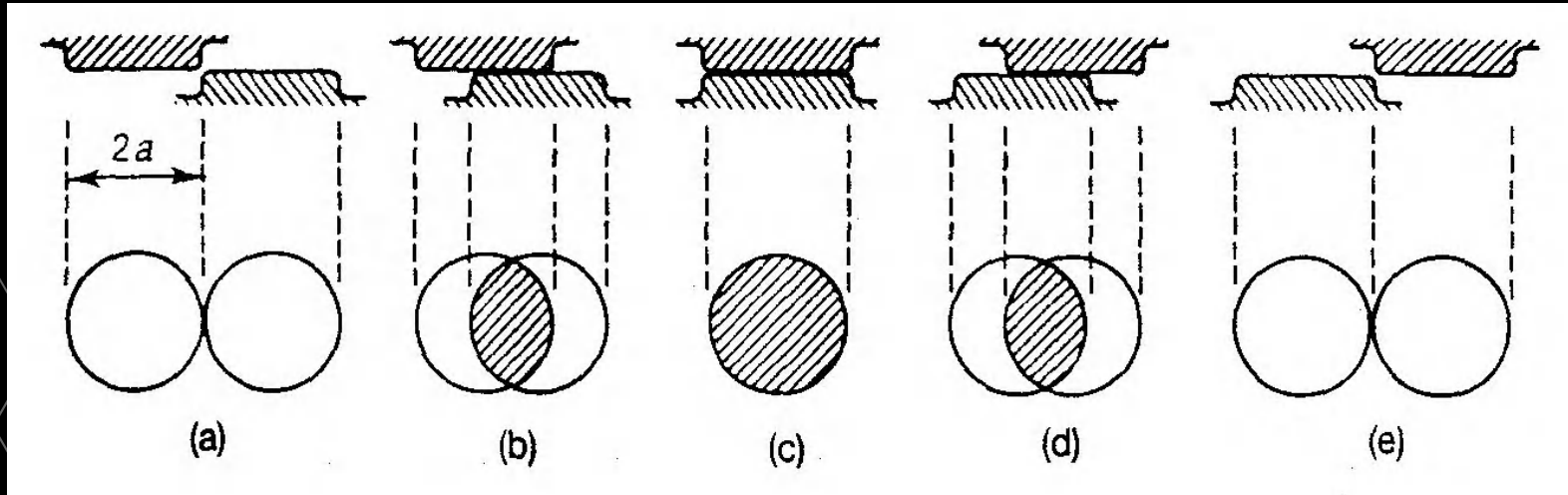


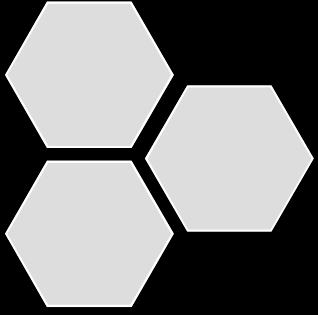


Adeziv aşınmanın teorisi

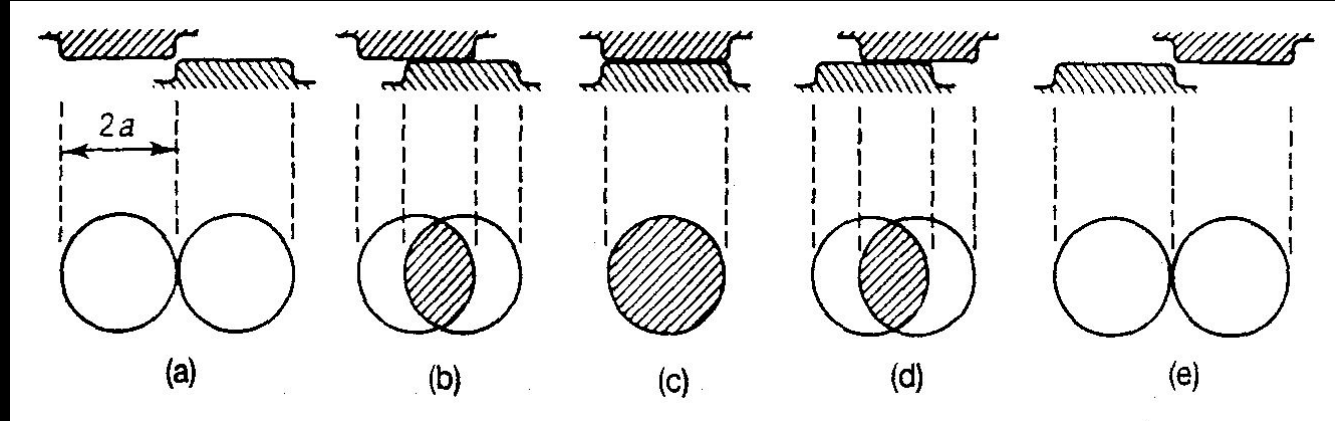
Gerçek temas alanı yüzeye etki eden normal kuvvetle orantılıdır. Metalsel malzemelerde birçok halde pürüz tepeciklerindeki lokal deformasyonun plastik olduğu söylenebilir.

Şekilde gösterildiği gibi tek bir pürüz teması dikkate alınsın. Basitlik açısından pürüz geometrisi dairesel kabul edilsin. (yapıçap **a**)





Adeziv aşınmanın teorisi



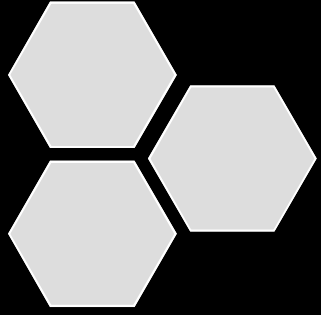
Temas (c) de maksimum boyuta ulaşmıştır. Bu durumda taşıyan normal kuvvet:

$$\delta F_N = p_{pl} \cdot \pi \cdot a^2$$

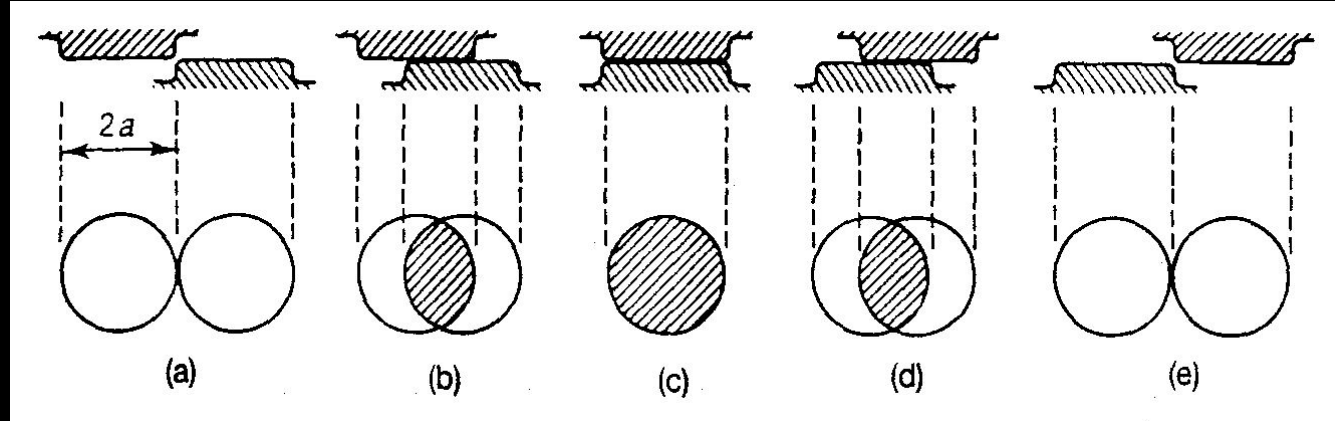
p_{pl} : plastik akma basıncı, batma sertliğine (HV) çok yakın bir değerdir.

Yukarıda tek bir pürüz için gösterilen durum, yüzey genelinde pek çok pürüzde söz konusu olacaktır. Yani aynı anda pek çok pürüz teması ve kopması olacaktır.

Aşınma ise bu temas eden pürüzlerden malzemenin ayrılması sonucunda meydana gelir. Aşınan malzeme hacmi doğal olarak temas halindeki pürüzlerin boyutuna bağlı olacaktır.



Adeziv aşınmanın teorisi

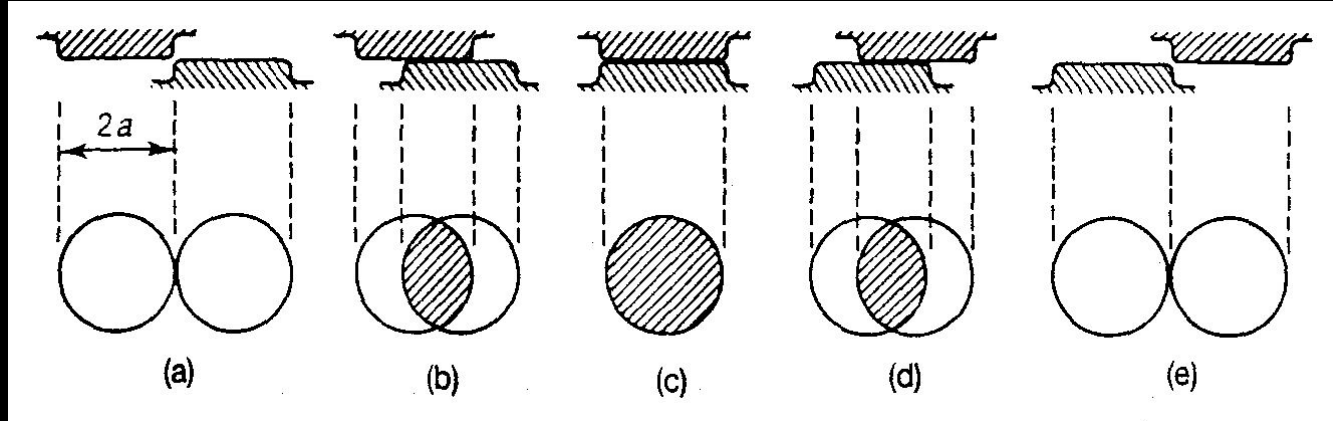


Aşınma sonucu pürüz tepelerinden ayrılan malzeme hacminin (δV) pürüz yarıçapı **a**'nın küpü ile orantılı olduğu gösterilmiştir. Basitlik açısından aşınan hacim, yarıçapı **a** olan bir yarı küre olsun. Bu durumda

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

Burada bütün pürüz temas yüzeylerinden bir aşınma mahsulü meydana gelmesinin mümkün olmadığını ifade etmek doğru olacaktır. Aşınma olan temas yüzeyi sayısının, tüm temas yüzeyine oranı **K** olsun.

Adeziv aşınmanın teorisi

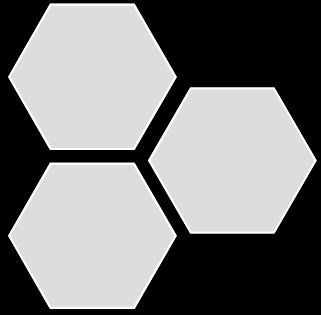


Sadece bir pürüz çifti temasında **2.a** kadarlık bir kayma mesafesinde, birim kayma mesafesi için ortalama olarak aşınan malzeme hacmi δQ ile gösterilirse;

$$\delta Q = \frac{\kappa \cdot \delta V}{2 \cdot a} = \frac{\kappa \cdot \pi \cdot a^2}{3}$$

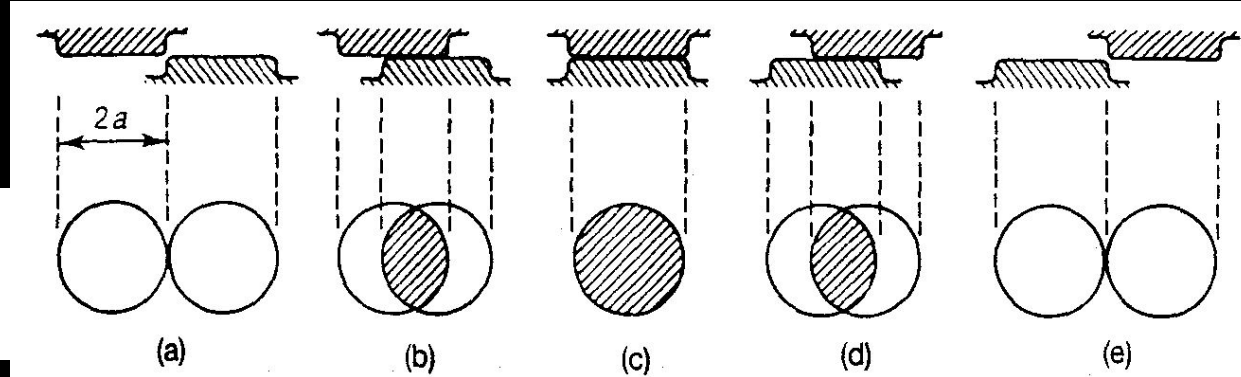
Toplam aşınma hızı, bütün pürüz tepeleri teması dikkate alınırsa

$$Q = \sum \delta Q = \frac{\kappa}{3} \cdot \sum \pi \cdot a^2$$



Adeziv aşınmanın teorisi

$$Q = \sum \delta Q = \frac{\kappa}{3} \cdot \sum \pi \cdot a^2$$



Toplam normal kuvvet

$$F_N = \sum \delta F_N = p_{pl} \cdot \sum \pi \cdot a^2$$

Her iki denklemdeki alanların eşitliği yazılırsa

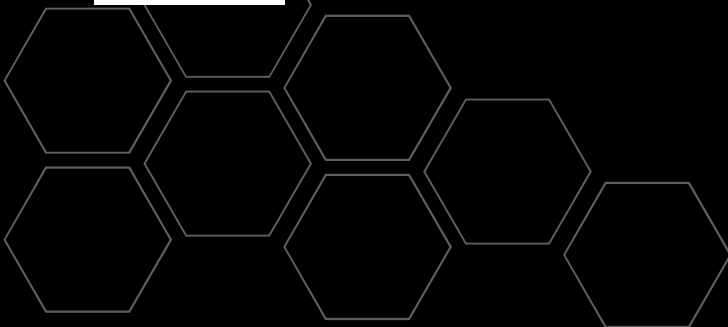


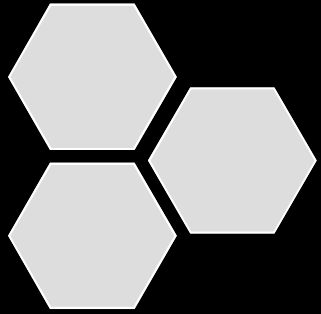
$$Q = \frac{\kappa \cdot F_N}{3 \cdot p_{pl}}$$

$$K = \frac{\kappa}{3}$$

Şeklinde bir tanımlama yapılır ve $p_{pl}=H$ (sertlik) yazılırsa

$$Q = K \cdot \frac{F_N}{H}$$





Adeziv aşınmanın teorisi

$$Q = K \cdot \frac{F_N}{H}$$

- Bu bağıntı, birim kayma mesafesi için aşınan malzeme hacminin (Q), normal kuvvet (F_N) ve yumuşak malzemenin sertliğine bağlı olduğunu ifade eder ve **Archard Aşınma Denklemi** olarak bilinir.
- Buradaki **K** sabiti ise, aşınma katsayısı olarak adlandırılır.
- **K** boyutsuzdur ve 1 den küçüktür.
- Mühendislik uygulamalarında **K/H** daha yaygın kullanılır.

Boyutlu aşınma
katsayısı

$$k = \frac{K}{H} = \frac{Q}{F_N} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$$





Abraziv Aşınma

- Bu aşınma türü bir biri üzerinde kayan yüzeylerin arasında aşındırıcı sert partiküllerin bulunması sonucu meydana gelmektedir. Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girer veya adeziv aşınma mahsulleri olarak sistem içinde meydana gelir.
- Ayrıca yağlayıcı içinde bulunabilecek sert partiküller, türbin kanatlarından geçen akışkan içindeki partiküller de bu tip aşınma meydana getirir. Bununla birlikte pürüzlü çok sert bir karşı yüzeyin daha yumuşak yüzey üzerinde meydana getirdiği aşındırma şekli (eğre ile metalsel yüzey arasındaki durum) abraziv aşınma olarak tanımlanabilir. Türleri;
- **Kaba (makro) abrazyon (gauging abrasion):** Çekiçli değirmenler, skrayper dişleri, cevher öğütme değirmenleri....
- **İnce abrazyon (grinding abrasion):** Yağ öğütmeli çimento değirmenleri, kum taşı değirmenleri....



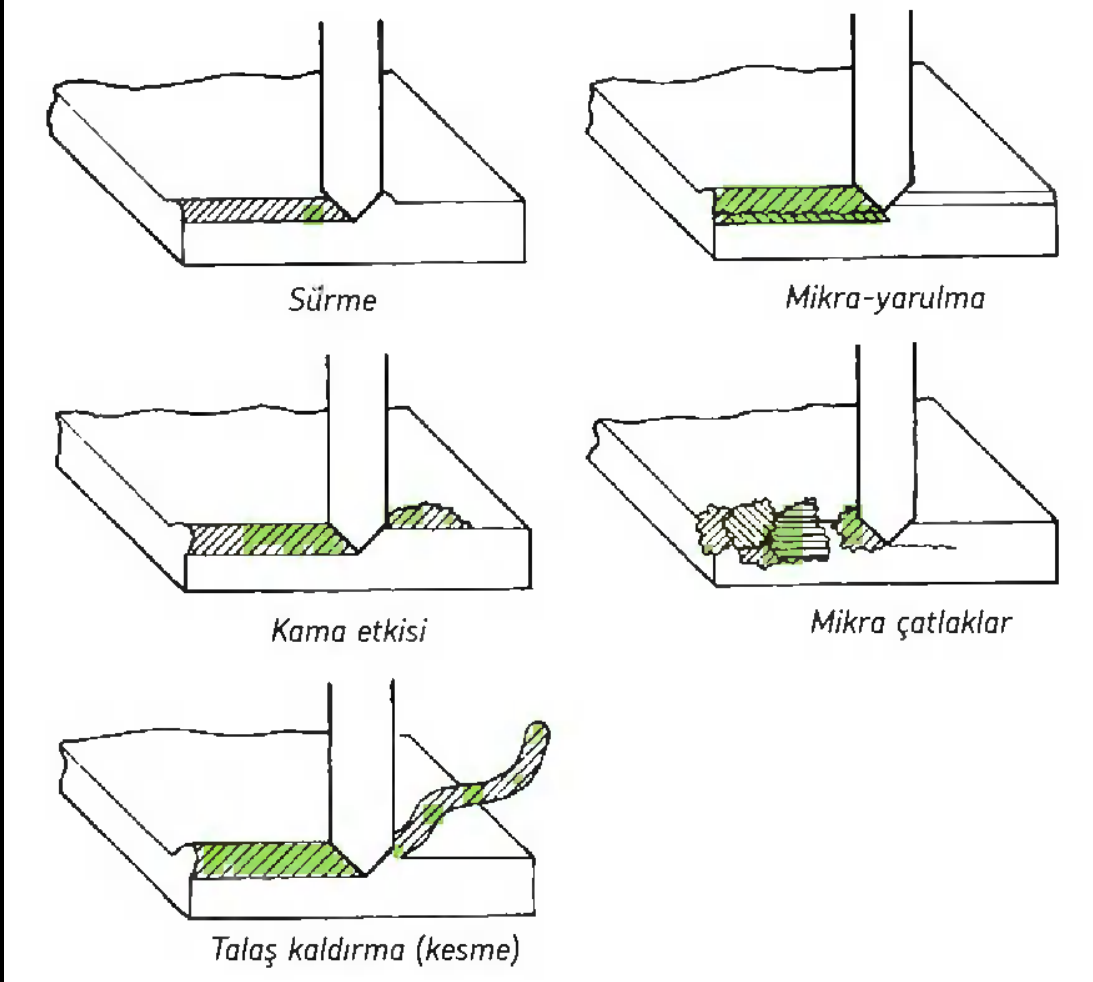
Genel kural: Sert olan,
yumuşak olanı keser



Makina Elemanları I

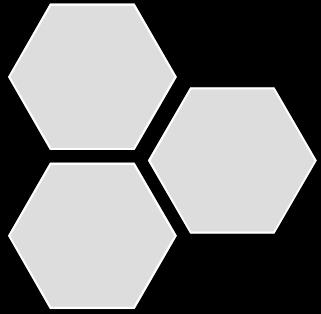


Abraziv Aşınma Modları



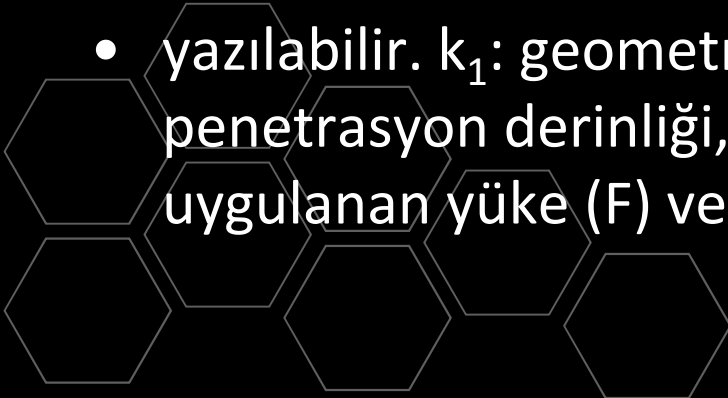
- Yapılan incelemelerde, sünek malzeme halinde abrasiv malzemenin diğerine batma derinliğinin (penetrasyon miktarının) çok kritik olduğu bulunmuştur.
- Batma derinliğinin temas alanına oranı, penetrasyon derecesi olarak tarif edilirse, bu değerin **0,2** den daha büyük olması halinde etkili mekanizmanın «**kesme**» olduğu bulunmuştur.

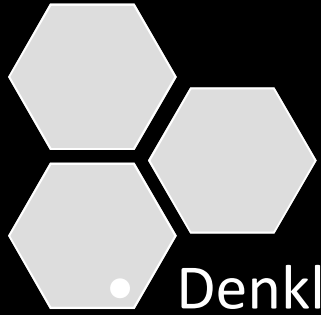




Abraziv aşınma hesabı

- Abraziv aşınma kesme modunda gelişsin.
- Bu durumda aşınan maksimum hacim
 - $V = A \cdot l$
- şeklinde yazılabilir. Burada, V ; ayrılan malzeme hacmi, A ; temas yüzeyi ve l ; kayma mesafesidir.
- Buradaki temas alanı abraziv parçacıkların şekline ve penetrasyon derinliğine (h) bağlıdır. Bu halde
- $A = k_1 \cdot h$
- yazılabilir. k_1 : geometriye bağlı bir sabit. Benzer şekilde penetrasyon derinliği, abraziv parçacıkların geometrisine, uygulanan yüke (F) ve malzemenin sertliğine bağlıdır.





Abraziv aşınma hesabı

- Denklem yeniden düzenlenirse

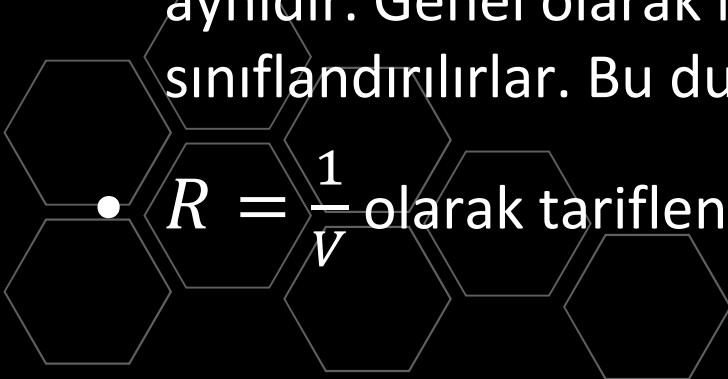
- $$h = k_2 \cdot \frac{F}{H}$$

- şeklinde yazılabilir. k sabitini pek çok faktör etkiler.
- Buraya kadar yazılan eşitlikler aşağıdaki formda yeniden düzenlenebilir:

- $$V = k_3 \cdot \frac{F \cdot l}{H}$$

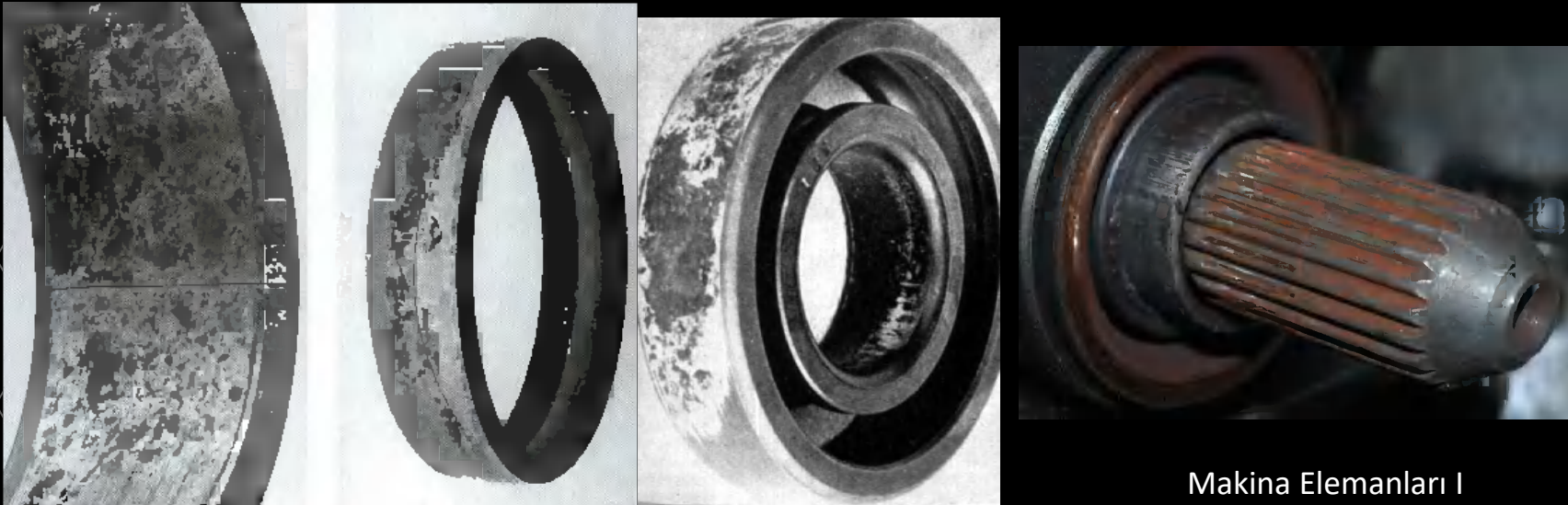
- Bu denklem adeziv aşınma için yazılan Archard denklemi ile aynıdır. Genel olarak malzemeler aşınmaya olan dirençleri ile sınıflandırılırlar. Bu durumda aşınma direnci (R):

- $$R = \frac{1}{V}$$
 olarak tariflenir.



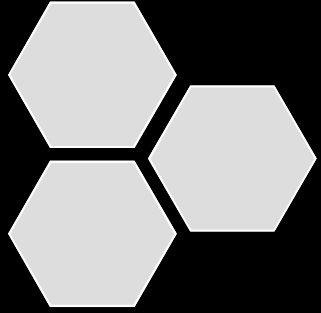
Sürtünme Oksidasyonu

- Genel olarak sürtünme oksidasyonu, yeteri sıkılıkta monte edilmeyen mil-göbek geçme yüzeylerinde, örnek olarak çevre yüküne maruz rulman bileziklerinin yeteri derecede sıkı takılmadığı zaman temas yüzeylerinde meydana gelmektedir.
- Birbirine değen az pürüzlü yüzeyler arasında bir osilasyon (salınım) hareketinin bulunması sürtünme oksidasyonunu teşvik etmektedir. Osilasyon genlikleri 0,2 mm ve daha küçüktür. Bu olay kuru ve az yağlı yüzeylerde gözlenmektedir.
- Yüzeylerin kuru olması halinde yeteri sıkılıkta monte edilmemiş yüzey çiftlerinin küçük genlikli osilasyon hareketleri sonucu, yüzeylerde koyu kırmızımtırak bir tabaka oluşmaktadır. Zamanla bu tabakalar bölge bölge kalınlaşarak yüzeylerde büyük bozulmalar ve bunlara bağlı olarak çatlama ve kırılmalar meydana getirmektedir.



Makina Elemanları I

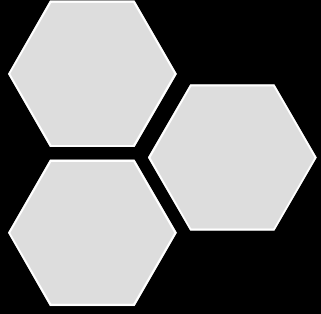




Sürtünme oksidasyonu

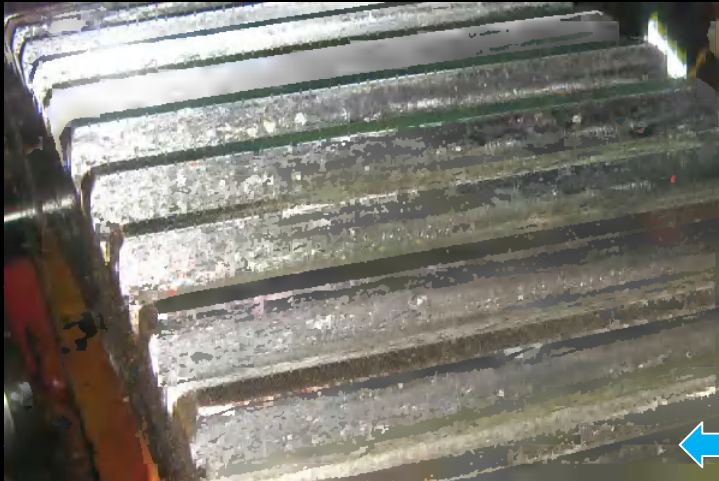
- Bu tip aşınmanın görüldüğü yerlere örnekler:
- Uçaklarda perçin bağlantılarının temas noktalarında
- Otomobillerdeki yaprak yaylar
- Trenle taşınan metalsel mamuller
- Ortopedik sabitleme aparatlarındaki, vidalar ile yuva arasında
- Buhar jeneratörleri ve ısı değiştiricilerinde akış kaynaklı titreşim borular ve bunları tutan destekler arasında sürtünme oksidasyonuna neden olur.
- Halatlar....





Yorulma aşınması Pitting (pulcuk kalkması)

- Noktasal veya çizgisel temas hali olan fonksiyon yüzeyleri arasında meydana gelir. Çok küçük değme noktalarında değişken yük etkisi altında zamanla pul şeklinde malzeme parçacıkları yüzeyden ayrılarak, geriye çukurcuklar bırakırlar.
- Pitting oluşumu ile ilgili değişik görüşler mevcuttur. Bazı araştırmacılar pitting' in mikro değme noktalarındaki değişken zorlanmalar ve bunun sonucunda ortaya çıkan yorulma neticesinde meydana geldiğini ileri sürmektedirler



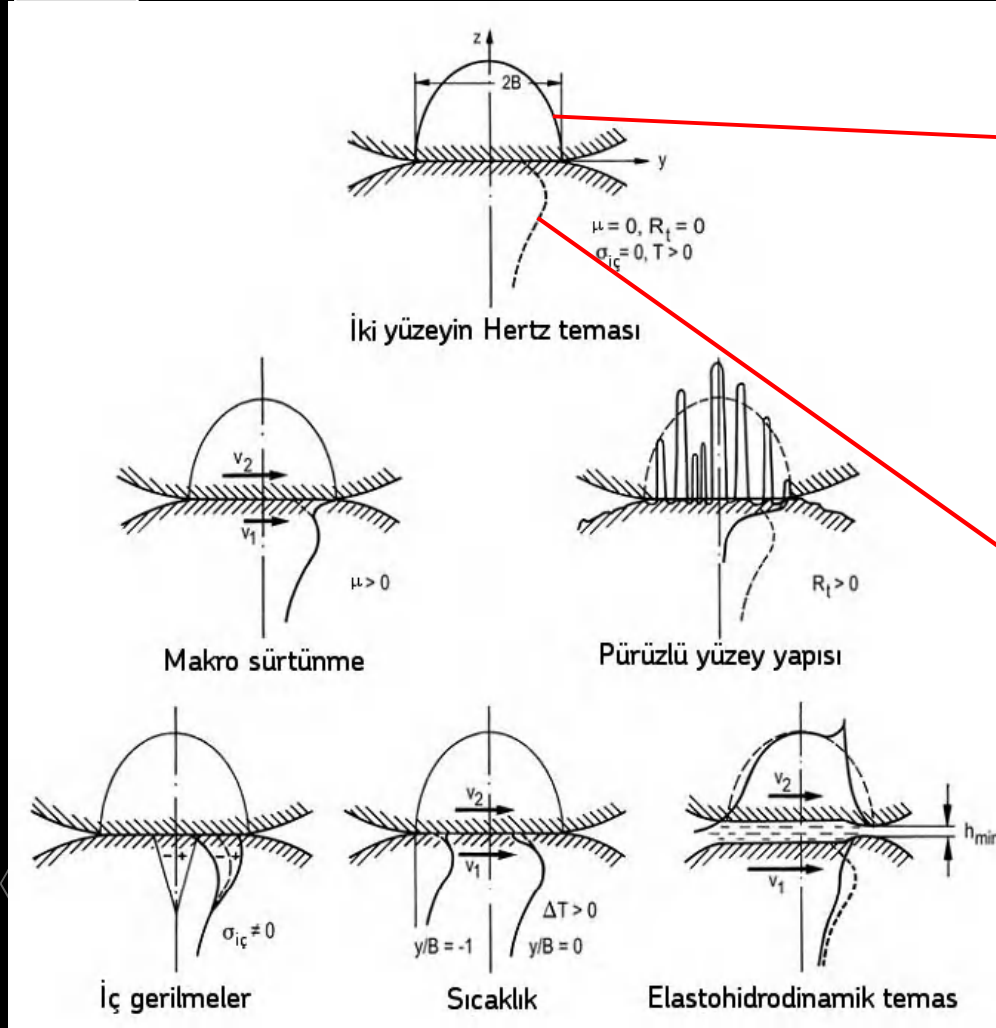
Bir rulmanlı
yataktaki pitting
hasarı



Bir dişlideki pitting
hasarı



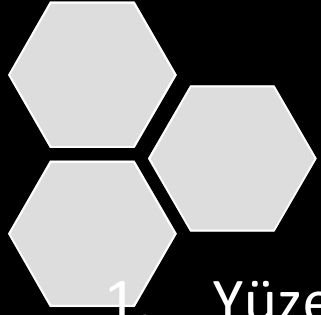
Noktasal veya çizgisel temas durumu



Normal yöndeki
Hertz basıncı

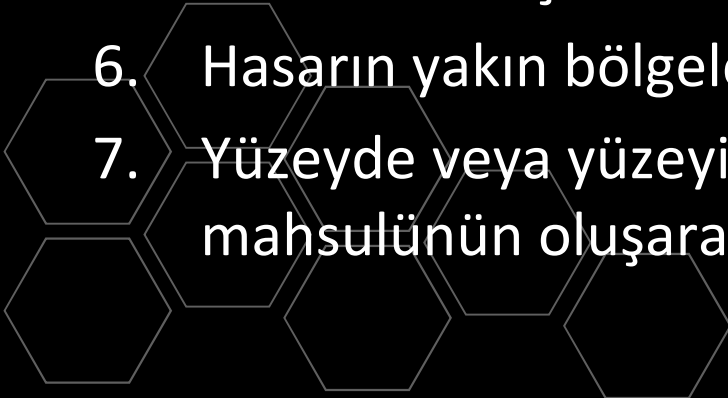
Kayma gerilmesi





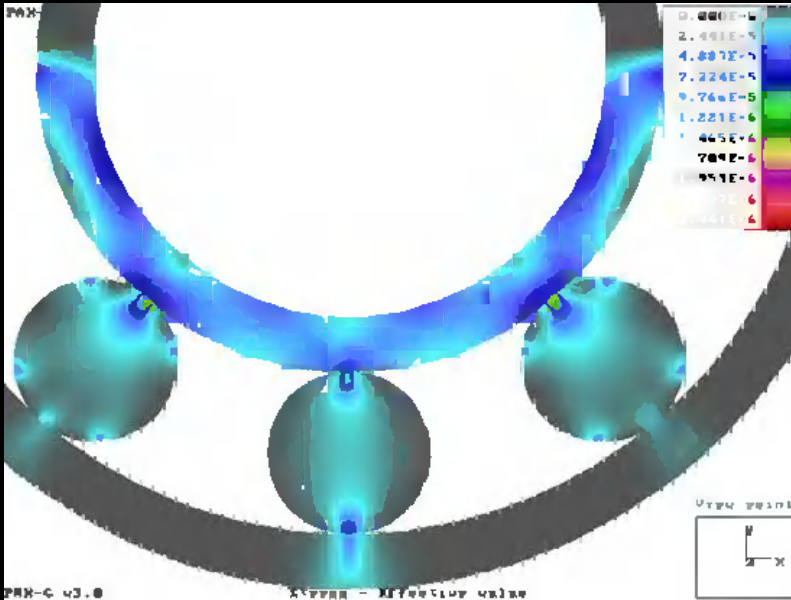
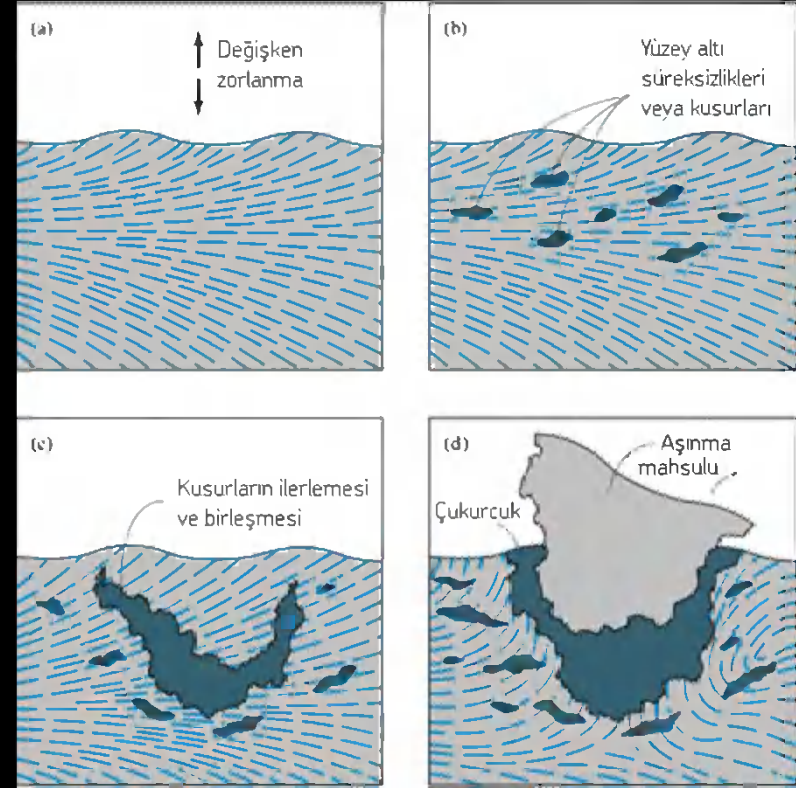
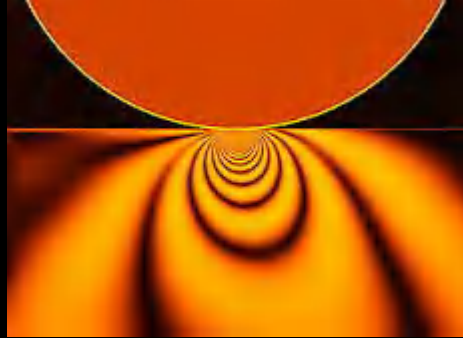
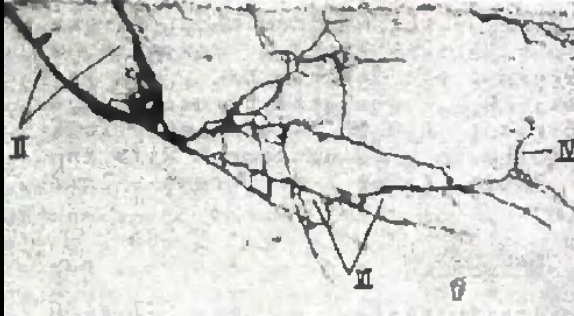
Pitting aşınmasının aşamaları

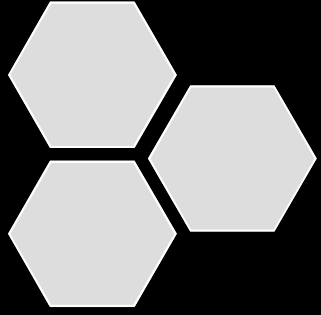
1. Yüzey altındaki tabakalarda değişken zorlanma sonucu dislokasyonların birikmesi (dislokasyonlu hücre yapısı oluşması da olasıdır)
2. Maksimum Hertz gerilmesi bölgesinde veya civarındaki süreksizliklerde (tane sınırı, önceden mevcut porozite, inklüzyon vb) boşluk veya mikro çatlak oluşumu
3. Yüzey altındaki tabakada mikro çatlakların ilerlemesi
4. Çatlakların birleşerek yüzeye doğru ilerlemesi
5. Pullanma ve çukurcukların oluşumu
6. Hasarın yakın bölgelere doğru yayılması
7. Yüzeyde veya yüzeyin altından önemli miktarda aşınma mahsulünün oluşarak, nihai hasara neden olması



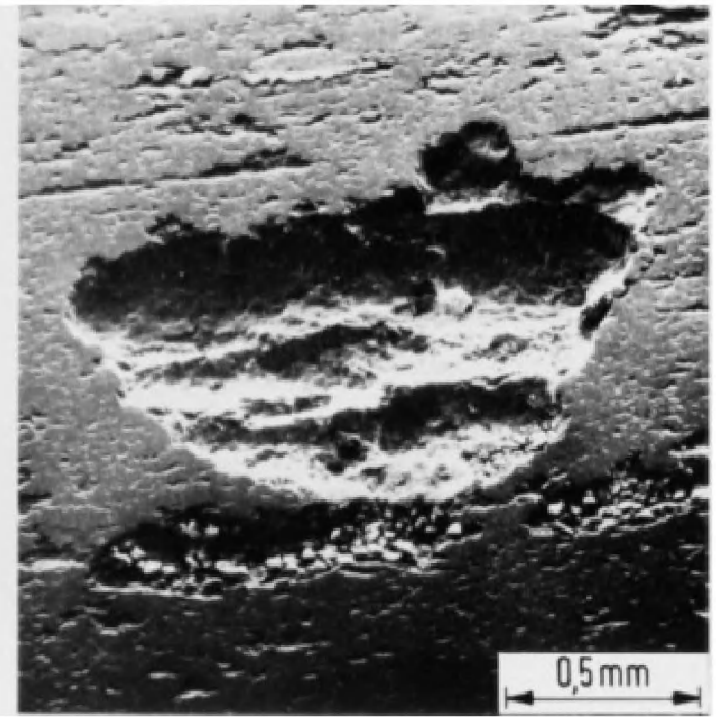
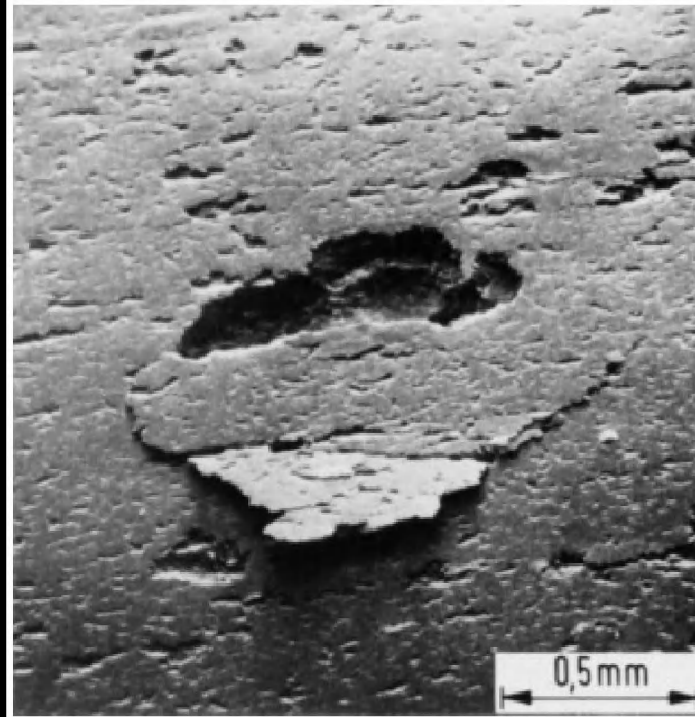


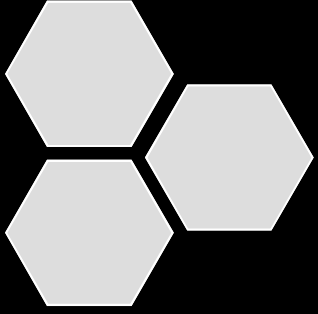
Pitting aşınmasının mekanizması





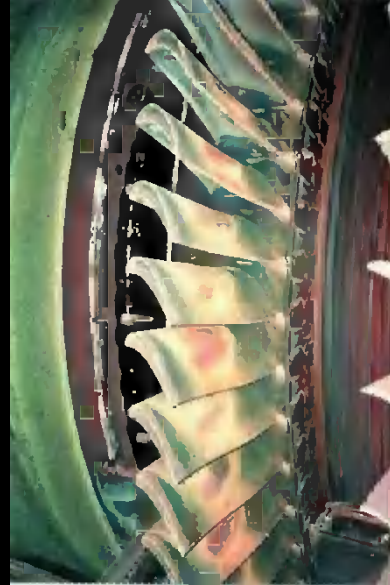
Pitting örneği (Dişli yan yőzeyi)



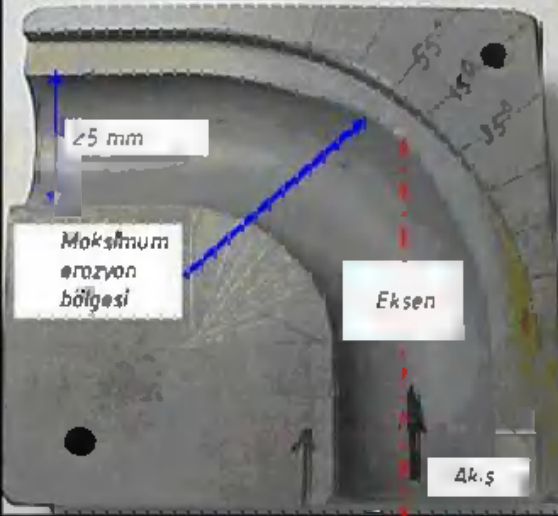


Eroziv aşınma

- Genel yapı olarak abraziv aşınmaya benzer. Bundan farkı eroziv aşınmada ana malzemenin kendinden daha sert, küçük boyutlu parçacıklar tarafından tekrarlanan bir şekilde darbe yüküne maruz bırakılmasıdır. Bunun yanında kapalı hacimde sıkışmış gaz ve sıvılar da, belirli hızlarda benzer etki yaparlar.
- Eroziv aşınmayı etkileyen faktörler:
- Parçacıkların şekli
- Parçacık boyutu
- Parçacıkların sertliği
- Hız
- Sıcaklık



Eroziv aşınma örnekleri



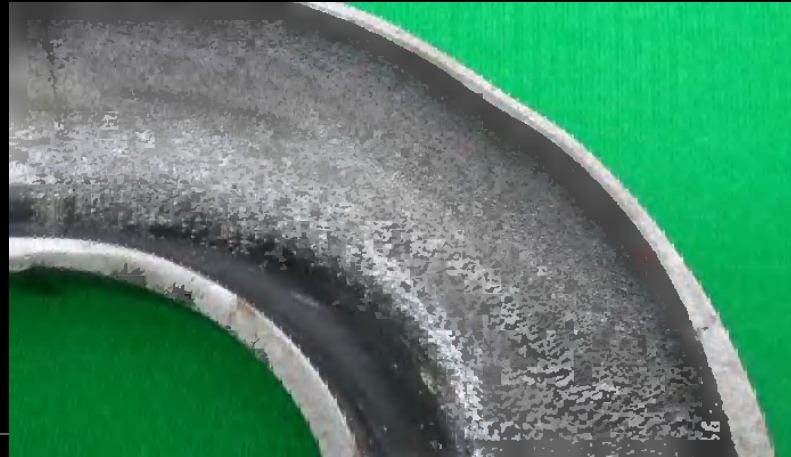
Alüminyum bir dirsekteki aşınma. Quamrul H.M vd.



Bir maden pompasının çarkındaki eroziv aşınma



Bir ısı değiştiricisindeki eroziv aşınma



Petrol boru hattındaki eroziv aşınma



Yağlayıcı Maddeler

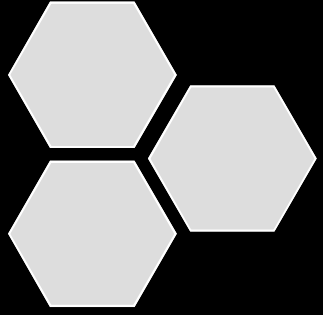
Yağlayıcılar (Lubricants)

Katı yağlayıcılar

Plastik (macun)
yağlayıcılar

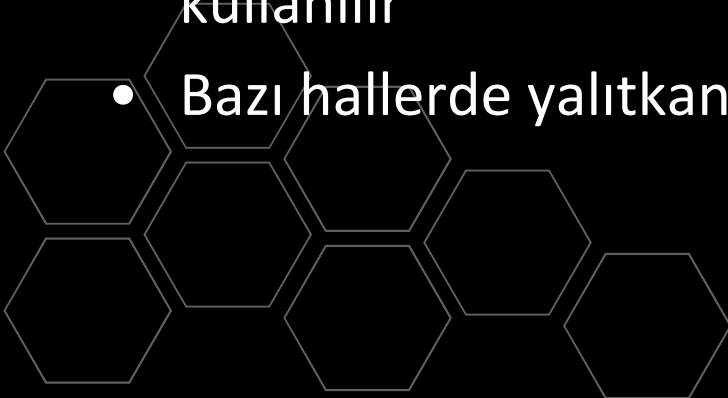
Sıvı yağlayıcılar

Gaz yağlayıcılar



Yağlayıcı Maddelerin Avantajları

- Yatak vb. gibi elemanlardaki sürtünme ve aşınmayı azaltmak
- Yeterli yağlama ile fonksiyon yüzeylerine yabancı madde girişi de önlenabilir
- Yağlayıcı maddeler pek çok halde soğutucu olarak işlev görür ve oluşan ısıyı yatak bölgesinden uzaklaştırır
- Korozyon ve paslanmaya karşı da bir koruyucudur
- Hidrostatik güç aktarımında mekanik enerji aktarmada da kullanılır
- Bazı hallerde yalıtkan olarak da yararlanılabilir

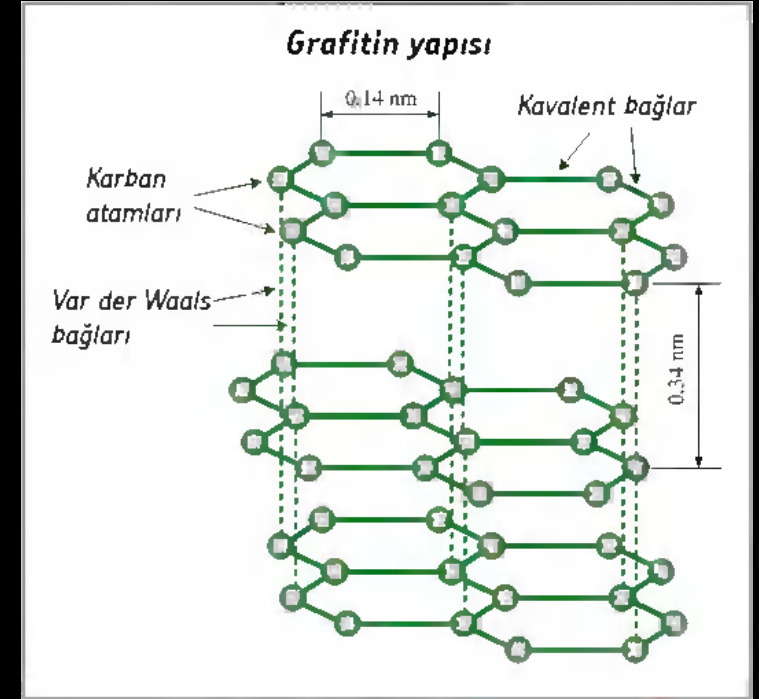


Katı yağlayıcılar

- **Grafit:** Gerek yataklama ve gerekse elektroteknikte en geniş kullanım alanı bulunan bir malzemedir.
- Kayma halinde, grafit lamellerinin kayma yönü ile takriben 5° lik bir açı yapacak şekilde yönlendikleri gözlenir. Nitekim grafit/grafit, çelik/grafit yüzey çiftleri arasındaki sürtünme katsayısı da $\mu = 0.1$ civarındadır. Ancak grafit ısıtılarak içindeki hava alınırsa, sürtünme katsayısının ani olarak yükseldiği gözlenmektedir. Artan sıcaklıkla gazı alınmış grafitin sürtünme katsayısı tekrar azalma gösterir.

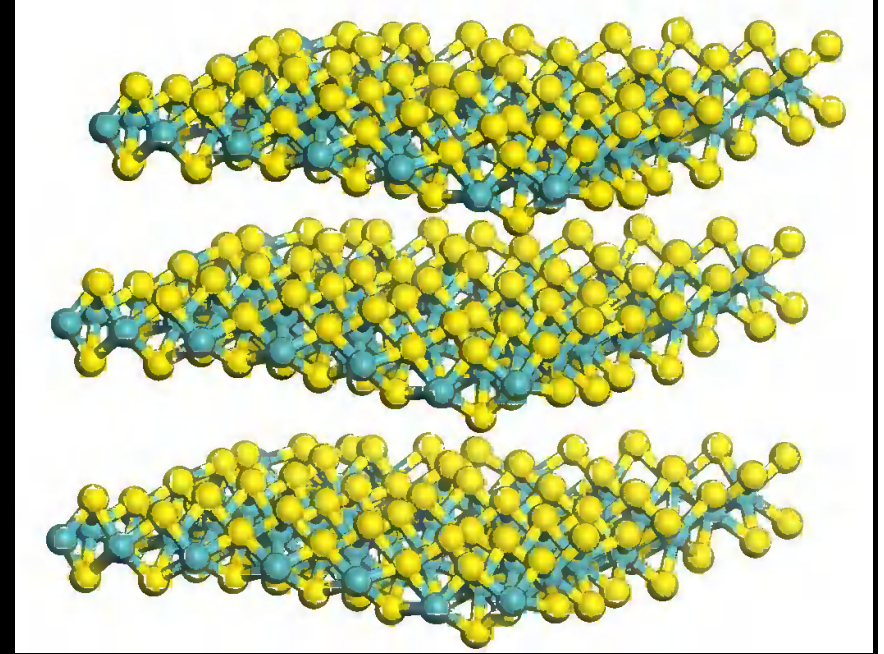
Bu yağlayıcı, roket ve benzeri makinaların yüksek sıcaklık etkisinde olan mafsal yataklarında yatak malzemesi olarak kullanılır.

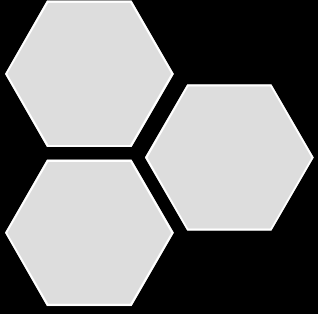
Ayrıca sentetik kolloidal grafit, yağlara katılarak sınır sürtünme halinde yüzeyleri sürtünme ve aşınma durumlarını düzeltir.



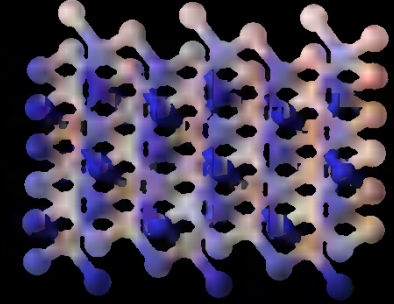
Katı yağlayıcılar

- **Molibden diSülfid:** Bazal düzlemler arasındaki kayma direnci çok küçüktür. Molibdenin kristal içi sürtünme katsayısı havada 0.1 civarındadır. Vakumda da 800°C kadar büyük değişme göstermez. Ancak çelik sürtünme yüzeyleri arasında, MoS_2 kristallerinin oryantasyon açıları nedeni ile sürtünme katsayısı 0.2 - 0.26 değerlerine çıkar.
- MoS_2 , kolloidal toz halinde gözenekli malzemeye iştirilmiş olarak yağ veya greslere katkı maddesi olarak aerosol ile püskürtülen laklar içinde kullanılır.
 - Aya iniş yapan ilk araçta bulunan taş toplama manipölatörünün mafsal yatakları fenol reçinesine emdirilmiş MoS_2 burçlarına sahipti ve bunlar -157°C da her hangi bir arıza göstermeden fonksiyonlarını yerine getirdiler.

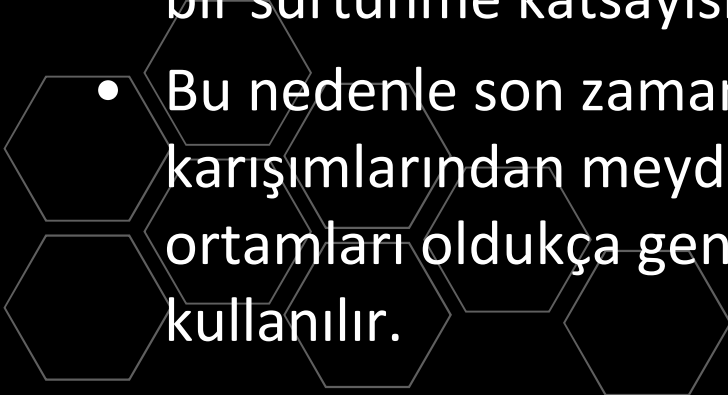


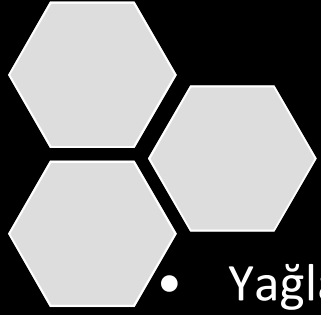


Katı yağlayıcılar



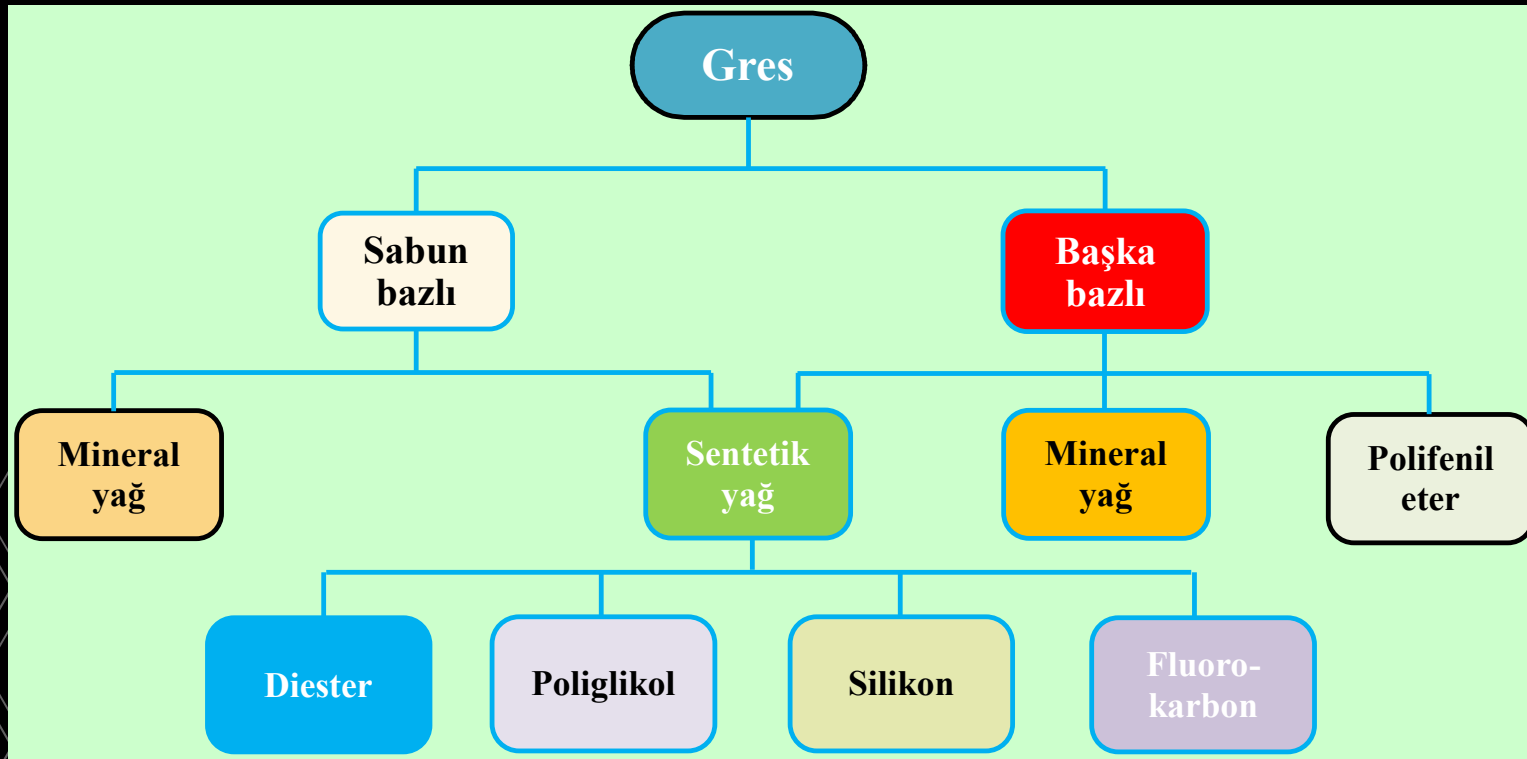
- **Boron Nitrit:** Bu malzeme de lamelli bir strüktürdedir. Bazal düzlemler Bor -Azot – Bor..... atom kümelerinden oluşmuştur. Atmosfer koşullarında sürtünme katsayısı 0.2 ile 0.4 arasında değişir.
- Havada 500°C sıcaklıklara kadar grafit çok iyi bir sürtünme durumuna sahiptir.
- 500°C ile 900°C arasında da boron nitrit düşük bir sürtünme katsayısı gösterir.
- Bu nedenle son zamanlarda Grafit + Boron nitrit karışımlarından meydana gelen sürtünme ortamları oldukça geniş bir sıcaklık aralığında kullanılır.





Plastik yağlayıcılar

- Yağlama pratiğinde gres olarak adlandırılan plastik yağlayıcılar, madensel sabun veya başka bir strüktür yapıcıya emdirilmiş mineral veya sentetik yağdan meydana gelir.
- Alttaki şekilde greslerin sınıflandırılması şematik olarak gösterilmiştir.



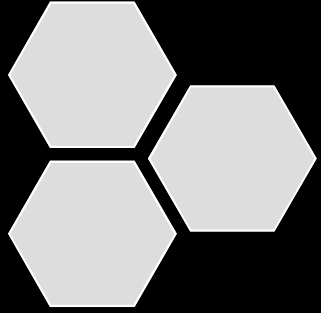


Plastik yağlayıcılar

(Gres türleri – Sabun bazlı)

- **Kalsiyum sabunlu gres** : Günümüzde de kullanım yüzdesi en çok olan ve nispeten ucuz bir gres türüdür. Ekseriyetle orta viskozitede mineral yağ içirilmiştir. Suya dayanıklılığı yüksektir. Diğer bir deyişle sabun kafes suda erimez. Fazla su etkisine maruz yataklarda gres akıp gitmez. Ancak rutubetli ortamlarda gres içine giren su emülsiyon oluşturmadığından demir bazlı yüzeylerde korozyon yapar.
- Sıcaklığa dayanıklı değildir. Damlama noktası 100...150°C arasında olup, çalışma sıcaklığı 60°C civarındadır. Genel maksatlı makinaların ve açıkta çalışan düşük hızlı mekanizmaların yağlanmasında kullanılır.

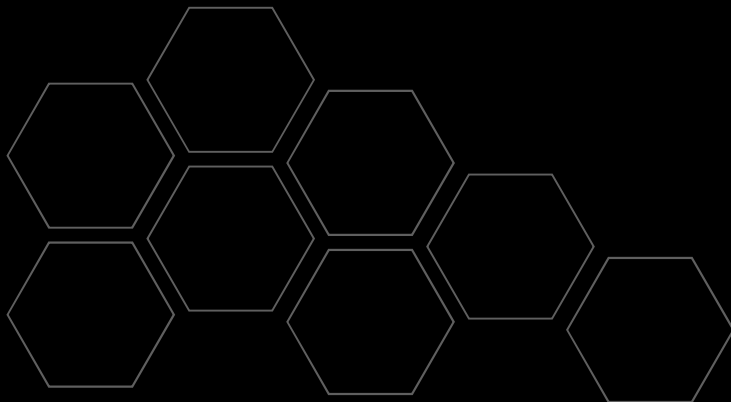




Plastik yağlayıcılar

(Gres türleri – Sabun bazlı)

- **Sodyum sabunlu gres:** Suyu dayanıklı değildir. Ancak çok az su etkisinde, suyun emülsiyon teşkil etmesi sonucunda korozyona karşı koruyucu görevini yapar. Buna karşın fazla miktarda su etkisinde yağlama yerinden yıkanıp gitmesi de mümkündür.
- Bu gresler kalsiyum sabunlu greslerden daha fazla sıcaklığa dayanırlar. Damlama noktası 150...200°C arasında değişir. Yeni geliştirilen sıcaklığa ve suya dayanıklı olan greslerden sonra daha az kullanılmaya başlanmış ve üretimi azalmıştır.



Plastik yağlayıcılar

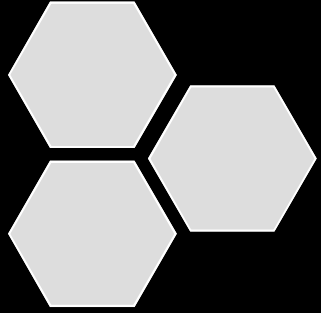
(Gres türleri – Sabun bazlı)

- **Lityum sabunlu gres:** İkinci Dünya Savaşı'nda uçak motorları ve diğer kontrol mekanizmaları için geliştirilmiştir. Kalsiyum ve sodyum sabunlu greslerden daha iyi özellikleri bünyesinde toplar. Yani hem suya hem de sıcaklığa dayanımı fazladır. Özellikle rulmanlı yatakların yağlanması en fazla kullanılan gres tipini oluşturur. Halen kullanılmakta olan gres tiplerinin %50 den fazlası lityum sabunlu greslerdir. Bu greslerin damlama noktaları 185...215°C (silikon yağı) arasındadır ve işletme sıcaklığı 145°C a kadar çıkabilir.



Lityum sabunlu gresler kalsiyum sabunlular kadar olmasa da suya karşı dayanıklıdır. Bünyesi bozulmaksızın koruyucu bir emülsiyon da oluşturur. Böylelikle demir esaslı yüzeyleri korozyondan korur. Sıcaklığa dayanıklılığı fazladır.



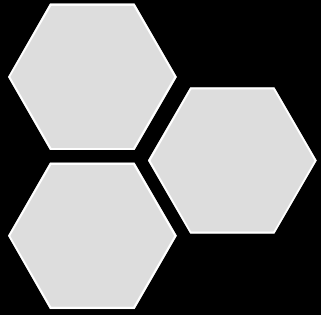


Plastik yağlayıcılar

(Gres türleri – Sabun bazlı)

- **Alüminyum sabunlu gres:** Oldukça kuvvetli bir adeziv özellik göstermelerine karşın, mekanik özelliklerinin iyi olmaması ve yüksek maliyeti nedeniyle çok yaygın bir kullanım alanına sahip değildir.





Plastik yağlayıcılar

(Gres türleri – Sabun bazlı olmayan)

- Uçak ve uzay endüstrisi daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı gres tiplerinin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Madensel sabun yapılarının çözülme sıcaklıklarının sınırlı olması daha dayanıklı strüktür elemanlarının aranmasını gerektirmiştir. Sabun olmayan, ancak onun gibi jel (plastik çatı) meydana getiren bileşikler iki gruba ayrılır:

-

- **İnorganik olanlar:** Karbon siyahı

- Silika

- Organofilik kil

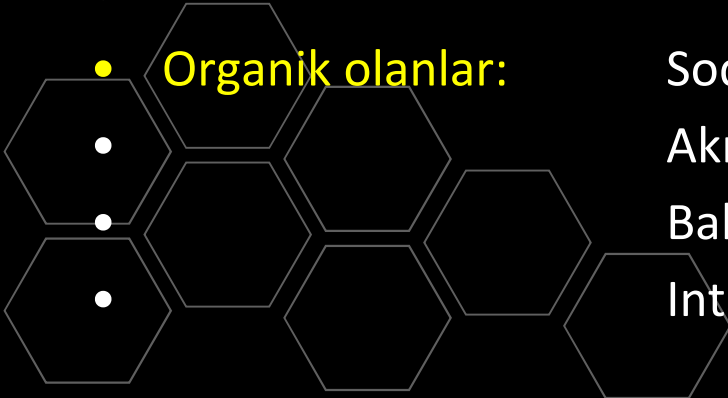
-

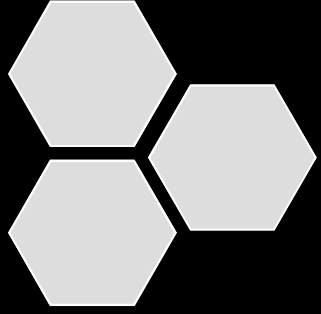
- **Organik olanlar:** Sodyum oktadesil tereftalamat

- Akril katkılı üre

- Bakır fatalosiyanin

- Intantren mavisi

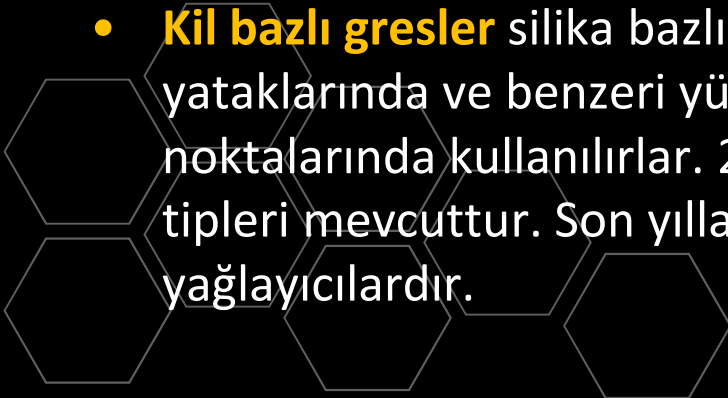




Plastik yağlayıcılar

(Gres türleri – Sabun bazlı olmayan)

- **Karbon siyahı bazlı gresler** çok fazla kullanılmamaktadır. Diğer gres türlerinin kullanılmadığı çok yüksek sıcaklıktaki bazı yağlama hallerinde uygulanır. Silikon yağı ihtiva eden karbon siyahı gresler 200°C a kadar işletme sıcaklıklarında çalışan makaralı yataklar için tavsiye edilmektedir.
-
- **Silika bazlı gresler** çok iyi performans karakteristiklerine sahiptir. Yüksek bir mekanik stabilite, su ve sıcaklığa dayanıklılık gösterirler. Ancak maliyetleri yüksektir. Nükleer reaktörlerde, özellikle nötron akısı yüksek olan yağlama bölgelerinde kullanılırlar.
-
- **Kil bazlı gresler** silika bazlı greslere benzer özelliklere sahiptir. Hadde yataklarında ve benzeri yüksek sıcaklık ve su etkisine maruz yataklama noktalarında kullanılırlar. 250°C işletme sıcaklıklarına kadar dayanabilen tipleri mevcuttur. Son yıllarda kullanım alanı en fazla artan plastik yağlayıcılardır.

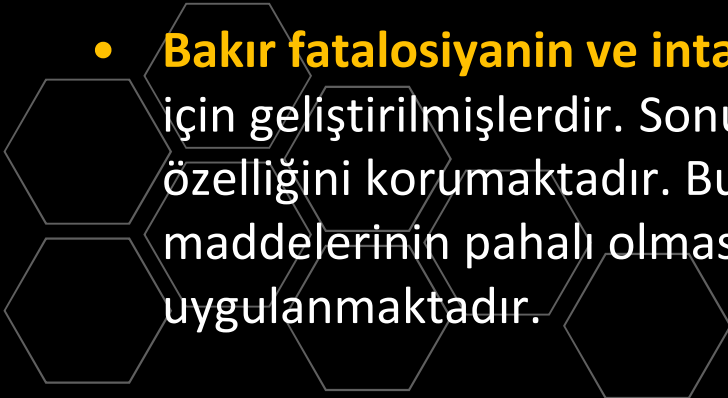




Plastik yağlayıcılar

(Gres türleri – Sabun bazlı olmayan)

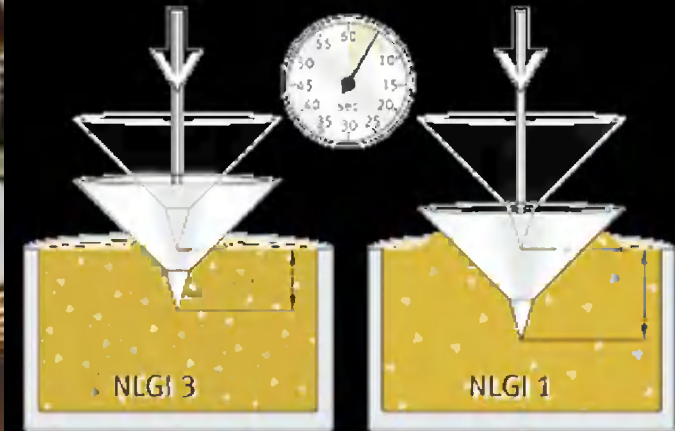
- **Sodyum oktadesil tereftalamat bazlı gresler** yüksek sıcaklığa dayanıklıdır. Damlama noktaları 300°C olup, $150\ldots 200^{\circ}\text{C}$ işletme sıcaklıklarında kullanılabilirler. Bunlara genellikle sentetik esterler iştirilmiştir. Maliyetleri oldukça yüksektir. Ancak ileriki yıllarda kullanım alanlarının çok artması beklenmektedir.
- **Akril katkılı üre bazlı gresler** yeni geliştirilmekte olan bir gres türünü teşkil ederler. Bunların damlama noktaları 315°C civarındadır. Silikon yağı ihtiva eden bir tipi 232°C işletme sıcaklığında stabilitesini muhafaza etmiştir. Ancak bunların da maliyetleri çok yüksektir.
- **Bakır fatalosiyanin ve intandren mavisi gresler** de ekstrem sıcaklık koşulları için geliştirilmişlerdir. Sonuncusu -54°C den $+230^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklara kadar yağlama özelliğini korumaktadır. Bunlar az miktarda üretildikleri, ayrıca baz maddelerinin pahalı olması nedeniyle sadece özel haller için uygulanmaktadır.



Gresin özellikleri

- **Konsistens (katılık):** Gres katılığının bir ölçüsüdür. Konsistens NLGI (National Lubricating Grease Institute) tarafından geliştirilen bir skala sistemine göre sınıflandırılır. Bu ölçümde standart bir koni, 25 °C'deki grese 5 saniye süre ile bastırılarak koninin grese dalma derinliği (penetrasyonu) ölçülür. Dalma derinliği, 1/10 mm'lik bir skalada ölçülür. Yumuşak greslerde doğal olarak koninin dalma derinliği (penetrasyonu) daha fazladır, bu nedenle bu greslerin penetrasyon sayısı büyüktür. Burada uygulanan test yöntemi DIN ISO 2137'ye uygundur.

NLGI Sınıfı	Oda sıcaklığındaki görünüşü	Penetrasyon derecesi (1/10 mm)
000	Çok akıcı	445-475
00	Akıcı	400-430
0	Yarı sıvı	355-385
1	Çok yumuşak	310-340
2	Yumuşak	265-295
3	Orta sert	220-250
4	Sert	175-205
5	Çok sert	130-160
6	Aşırı sert	85-115





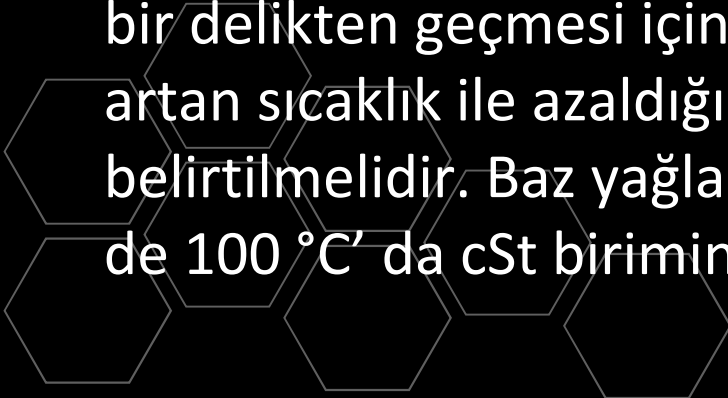
Gresin özellikleri

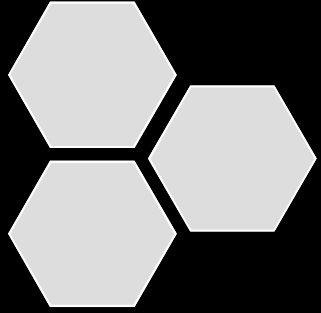
- **Baz yağ**

- Baz yağ, gresin içindeki çalışma sırasında yağlama işlevini yerine getiren yağlayıcı maddedir. Gresler normalde mineral yağ esaslıdır. Sentetik yağlar çok yüksek veya çok düşük sıcaklık gibi bazı özel uygulamalarda kullanılırlar. Gres içeriğinin genelde %70' den fazlası baz yağdan oluşur.

- **Baz yağ viskozitesi**

- Viskozite akışkanın akıcılığının bir ölçüsüdür ve genellikle standart miktardaki bir akışkanın, ön görülen sıcaklıkta boyutları standart bir delikten geçmesi için gerekli zaman olarak ifade edilir. Viskozite artan sıcaklık ile azaldığı için, ölçümün yapıldığı sıcaklık muhakkak belirtilmelidir. Baz yağların viskozitesi, çoğunlukla 40 °C' da, bazen de 100 °C' da cSt biriminde kinematik viskozite olarak ifade edilir.





Gresin özellikleri

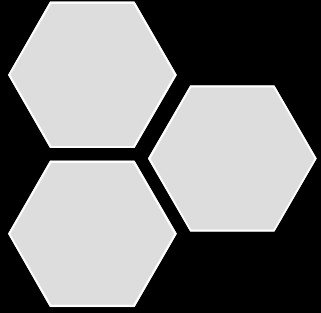
- **Katkılar**

- Katkılar aşınma ve korozyon direncini arttırma, sürtünmeyi azaltma ve sınır sürtünme hallerinde hasarı önleme gibi amaçlarla gres içine katılan özel maddelerdir.

- **Damlama noktası**

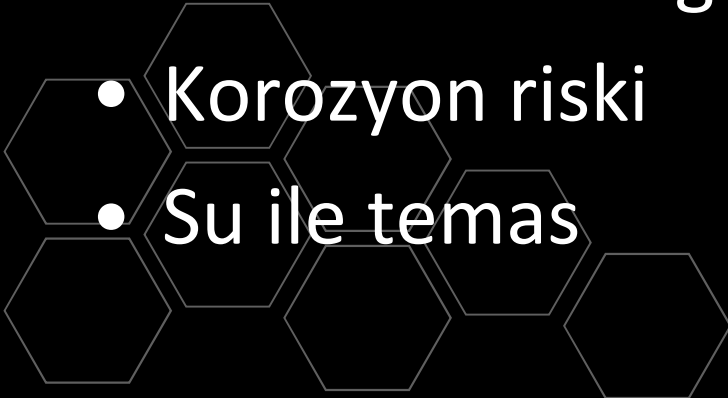
- Damlama noktası, standart bir kap içinde ısıtılan bir gresin, mevcut bir delikten damlamaya başladığı sıcaklık değeridir ve DIN ISO 2176 ya göre ölçülür. Damlama noktasının gresin maksimum işletme sıcaklığı ile doğrudan bir ilişkisi yoktur.





Gres seçim kriterleri

- Çalışma sıcaklık aralığı
- Zorlanmaların büyüklüğü
- Hız
- Düşey veya yatay çalışma
- Titreşimin varlığı
- Gıda ile temas gibi özel haller
- Korozyon riski
- Su ile temas



Gres Seçim Tablosu

SKF rulman greşi seçim tablosu

Rulman çalışma şartları	Sıcaklık	Hız	Yük	Düşey mil	Hızlı dış bilezik	Salınım hareketi	Aşırı titreşim	Darbeyoklu veya sık durma/kalkma	Düşük gürültü	Düşük sürünme
LGMT 2	M	M	L...M	○	—	—	+	—	—	○
LGMT 3	M	M	L...M	+	○	—	+	—	—	○
LGEF 2	M	L...M	H	○	—	○	+	+	—	—
LGFP 2	M	M	L...M	○	—	—	—	—	—	○
LGEM 2	M	VL	H...VH	○	—	+	+	+	—	—
LGEV 2	M	VL	H...VH	○	—	+	+	+	—	—
LGLT 2	L...M	M...EH	L	○	—	—	—	○	+	+
LGGB 2	L...M	L...M	M...H	○	—	+	+	+	—	○
LGWM 1	L...M	L...M	H	—	—	+	—	+	—	—
LGWM 2	L...M	L...M	M...H	○	○	+	+	+	—	—
LGWA 2	M...H	L...M	L...H	○	○	○	○	+	—	○
LHGB 2	M...H	VL...M	H...VH	○	+	+	+	+	—	—
LGHP 2	M...H	M...H	L...M	+	—	—	○	○	+	○
LGET 2	VH	L...M	H...VH	○	+	+	○	○	—	—

(*) LTL = Düşük Sıcaklık Limiti
HTPL = Yüksek Sıcaklık Performans Limiti
(*) 40 °C / 104 °F de mm²/s = cSt.

(*) LGGB 2 120 °C / 250 °F maksimum sıcaklığa dayanabilir.
(*) LGWA 2 220 °C / 428 °F maksimum sıcaklığa dayanabilir.
(*) LGGH 2 200 °C / 392 °F maksimum sıcaklığa dayanabilir.

Pas önleyici özellikler	Tarım	Sıcaklık aralığı (°C)		Kalıpıştırıcı / bez yağ	Baz yağ viskozitesi (cSt)
		LTL	HTPL		
+	Genel amaçlı endüstriyel ve otomotiv	-30 °C -22 °F	120 °C 250 °F	Litium sabun / mineral yağ	110
○	Genel amaçlı endüstriyel ve otomotiv	-30 °C -22 °F	120 °C 250 °F	Litium sabun / mineral yağ	120
+	Yüksek basınç	-20 °C -4 °F	110 °C 230 °F	Litium sabun / mineral yağ	200
+	Gıda uygun	-20 °C -4 °F	110 °C 230 °F	Alüminyum kompleks / tbbi beyaz yağ	180
+	Yüksek viskozite ve kati yağlayıcı	-20 °C -4 °F	120 °C 250 °F	Litium sabun / mineral yağ	500
+	Çok yüksek viskozite ve kati yağlayıcı	-10 °C -14 °F	120 °C 250 °F	Litium-kalsiyum sabun / mineral yağ	1 020
○	Düşük sıcaklık, çok yüksek hız	-50 °C -58 °F	110 °C 230 °F	Litium sabun / PAO yağ	18
○	Yüksek doğada çözünabilir, düşük toksisite (*)	-40 °C -40 °F	90 °C 194 °F	Litium-kalsiyum sabun / senjantik ester yağ	110
+	Çok yüksek basınç, düşük sıcaklık	-30 °C -22 °F	110 °C 230 °F	Litium sabun / mineral yağ	200
+	Azıyuk ortalık sıcaklık aralığı	-40 °C -40 °F	110 °C 230 °F	kompleks kalsiyum sulfonat / senjantik (PAO) - mineral yağ	80
+	Geniş sıcaklık aralığı, yüksek basınç (*)	-30 °C -22 °F	140 °C 284 °F	Litium kompleks sabun / mineral yağ	185
+	EP yüksek viskozite, yüksek sıcaklık (*)	-20 °C -4 °F	150 °C 302 °F	Kompleks kalsiyum sulfonat / mineral yağ	400
+	Yüksek performanslı poliyüree gres	-40 °C -40 °F	150 °C 302 °F	Di-üree / mineral yağ	90
○	Azıyuk yüksek sıcaklık	-40 °C -40 °F	260 °C 500 °F	PTFE / senjantik (florine polimer)	400

+

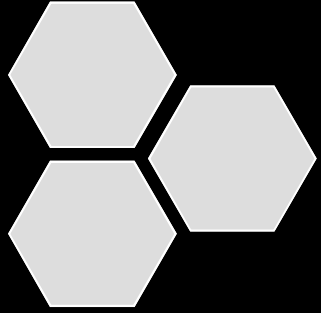
= Onerilir

○

= Uygun

—

= Uygun değil



Sıvı yağlayıcılar

- Yağlama tekniğinde uygulanan yağlayıcı maddelerin büyük çoğunluğunu hidro-karbon bileşikleri oluşturur. Bunlar ham petrolün rafinerizasyonu (fraksiyone distilasyonu) ile veya sentetik olarak elde edilirler.
- Şüphesiz ki hidrokarbon bileşiklerinden farklı sentetik hidrokarbon bileşiklerini üç kategoriye ayırmak mümkündür. Bunlar:

-

-

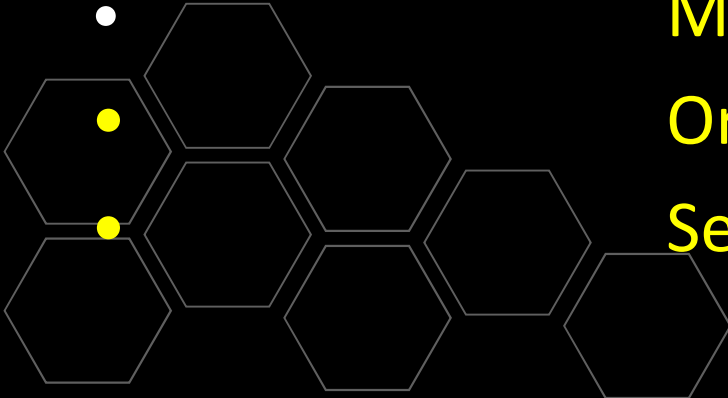
-

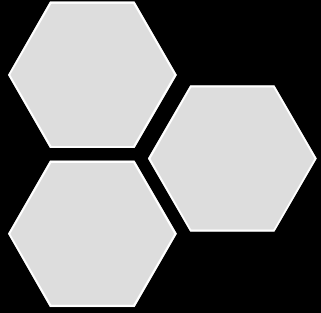
-

Mineral yağlar

Organik yağlar

Sentetik Yağlar





Ham petrol esaslı yağlar (mineral yağlar)

- Ham petrol esas itibarı ile bir karbonlu hidrojenler karışımıdır. İçinde eser miktarda kükürt ve diğer tali maddeler de bulunabilir.
- Ham petrolün rafinerilerde “fraksiyone kondansasyonu” (kısmi yoğunlaştırılması) ile değişik sıcaklık aralıklarında değişik ürünler elde edilir.
- 40...150°C arasında hafif benzin,
- 140...190°C arasında ağır benzin,
- 190...280°C arasında gaz yağı,
- 230...350°C arasında mazot ayrılır.
- Geriye kalan artık, özel işleme tabi tutularak bunun içinden de değişik yağlar elde edilir. Ham yağ olarak adlandırılan bu ürünler değişik rafinasyon işlemleri ile pratikte kullanılan yağlayıcı maddelere dönüştürülür. Uygulama yerlerine göre içlerine çeşitli katkı maddeleri konur.





Ham petrol menşeli yağlar (mineral yağlar)

- Temel yağlar arasında çeşitli harmanlama işlemleri ile çok değişik fiziksel özelliklerde yağlar elde edilir. Genel olarak mineral yağlar elde edildikleri ham petrole bağlı olarak iki gruba ayrılırlar. Bunlar parafin ve naften (asfalt) bazlı yağlardır.

	n-Parafin (düz zincir)	i-Parafin (dallı yapıda)	Naften
Molekül yapısı ○ = H ● = C			
Örnek	n-Hekzan	i-Hekzan	Siklohekzan

Parafinik yağlar uzun moleküler zincir yapısındadır. Naften bazlı olanlar ise bir kapalı zincir ve buna bağlı uzun zincir uzantılarından meydana gelir. Bu moleküler yapıların aktif uçları yoktur. Metallerle bağlantıları zayıf yüzeysel bağlar şeklindedir.





Parafin-Naften?

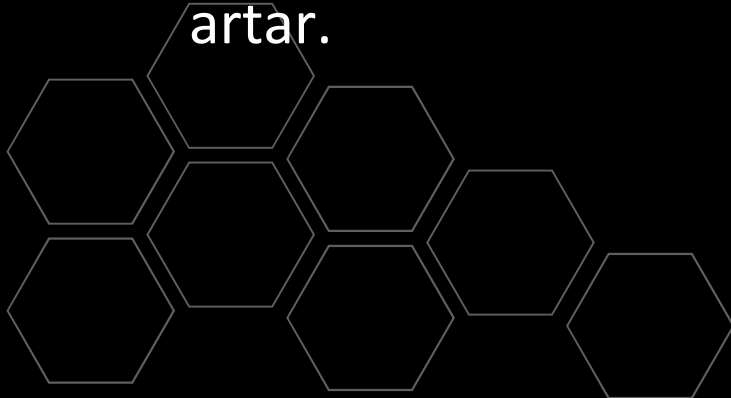
Özellikler	Parafin bazlı	Naften bazlı
Parafin oranı	>%60	<%60
Yoğunluk	Düşük	Orta
Viskozite-sıcaklık bağımlılığı	İyi	Orta
Yaşlanma mukavemeti	İyi	Daha kötü
Alevlenme noktası	Yüksek	Orta
Elastomerlere uygunluk	İyi	İyi
Buharlaşıma eğilimi	Düşük	Orta
Soğuktaki davranışı	Kötü	İyi
Islatma kabiliyeti	Orta	İyi
Oksitleneme direnci	İyi	İyi
Termal stabilite	Orta	İyi
Dağılabilirlik	Orta	İyi
Emülsiyon teşkili	Orta	İyi
Koku	Düşük	Orta

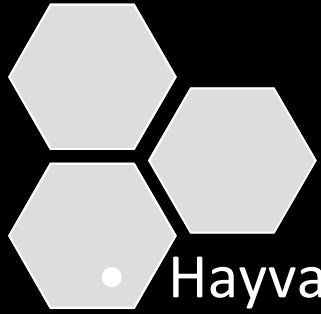




Ham petrol menşeli yağlar (mineral yağlar)

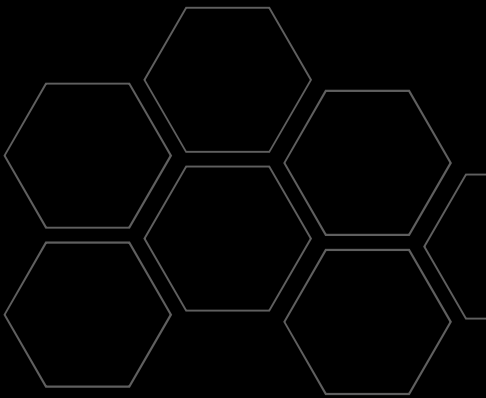
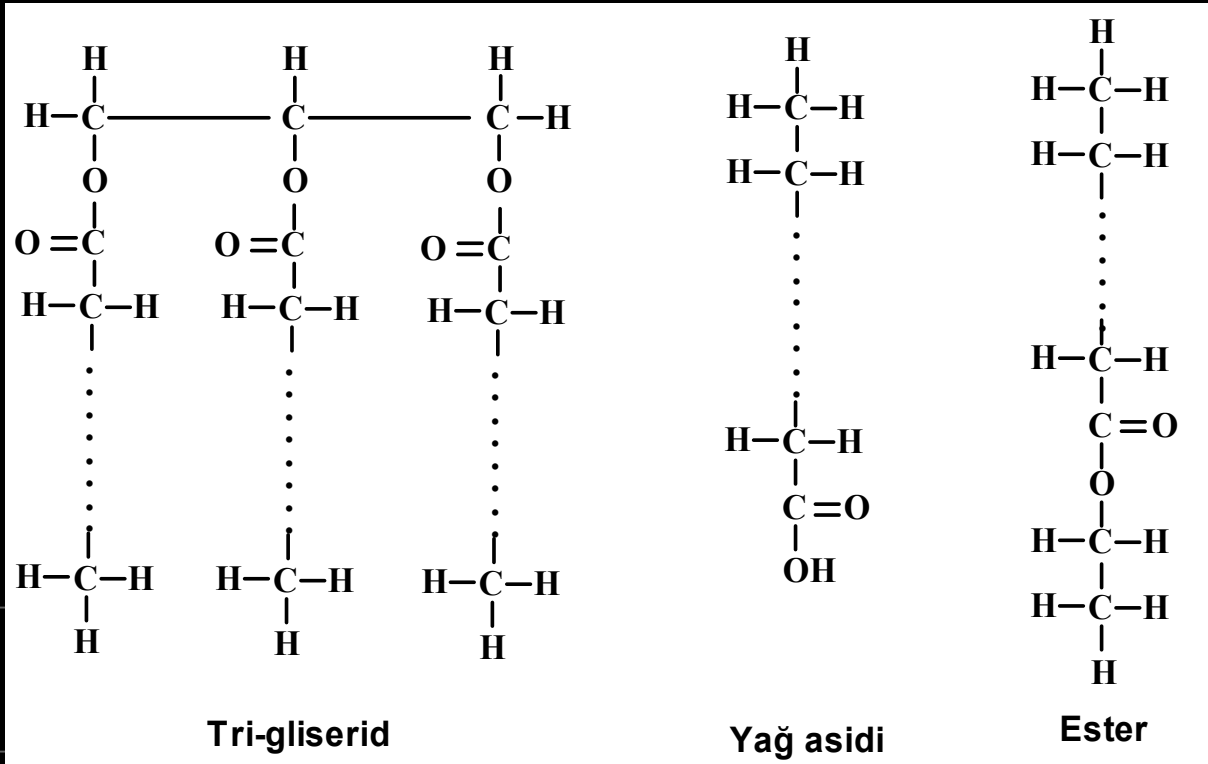
- Ticari olarak mineral yağlar:
- **Mekik yağları** viskozite 2,5 Engler/50°C
- **Hafif makina yağları** viskozite 2,5...4 Engler/50°C
- **Ağır makina yağları** viskozite 25 Engler/50°C
- **Silindir yağları** viskozite 3,5...4 Engler/100°C
- şeklinde gruplara ayrılır.
- Mineral yağ zincirleri ne kadar uzunsa, sınır sürtünme halinde yüzeylerde koruyucu film oluşturma kabiliyetleri o oranda artar.





Organik Yağlar

- Hayvansal ve bitkisel organizmalardan ekstraksiyon suretiyle elde edilen organik yağların moleküler yapıları mineral yağlardan bazı önemli farklılıklar gösterir. En geniş uygulama alanına sahip bitkisel yağlar tri-gliserid, yağ asitleri ve esterlerdir.



Organik Yağlar

- Yağlayıcı maddelerin yüzeyleri tutma veya ıslatma özelliğine “ıslatma kabiliyeti” (oilness) denir. Organik yağların ıslatma kabiliyetleri, mineral yağlardan çok yüksektir. Bu nedenle mineral yağ içine katılan %1-10 oranında organik yağ, yağın ıslatma kabiliyetini geniş ölçüde arttırır, sınır sürtünme durumunu düzeltir.
- Ancak, organik yağların madensel yüzeylerle teşkil ettikleri bağın belirli bir sıcaklık limiti vardır. Bu sıcaklığın aşılması halinde bağ bozulur.
- Bağın bozulma sıcaklığı, organik yağın yatak madeni ile teşkil ettiği bağın cinsine (fiziksel veya kimyasal bağ) göre değişir. Ortalama olarak 100-140°C civarındadır. 200°C veya daha yüksek sıcaklıklarda, sınır sürtünmeyi küçültmek için başka katkı maddelerine ihtiyaç vardır.

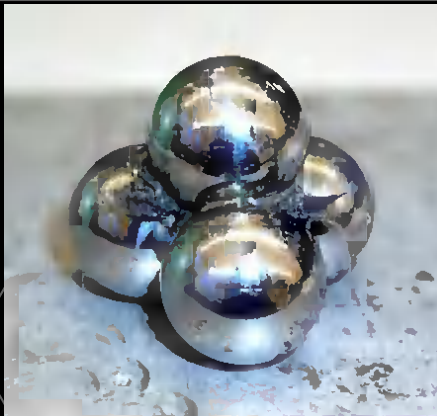
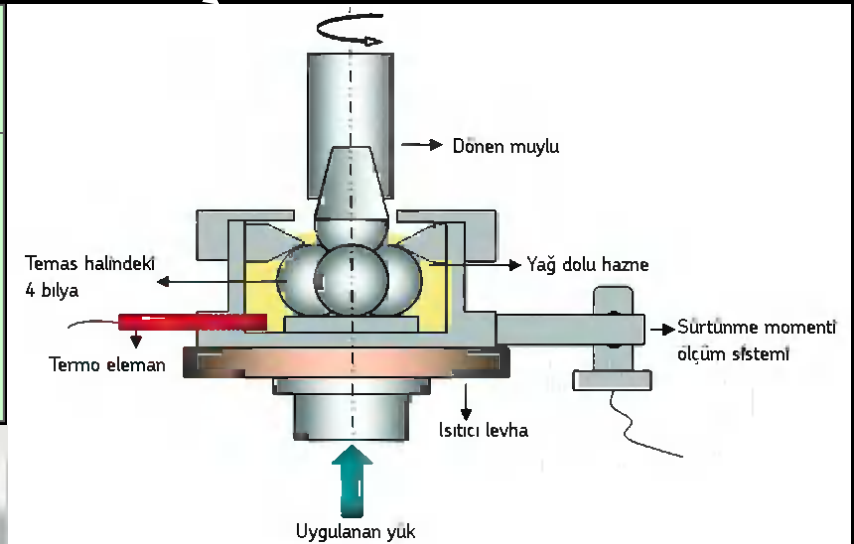


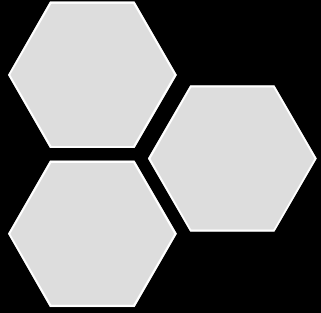


Organik Yağlar

- Organik yağ katkı oranının sınır sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi. Deneyler dört bilya deney cihazında yapılmıştır.

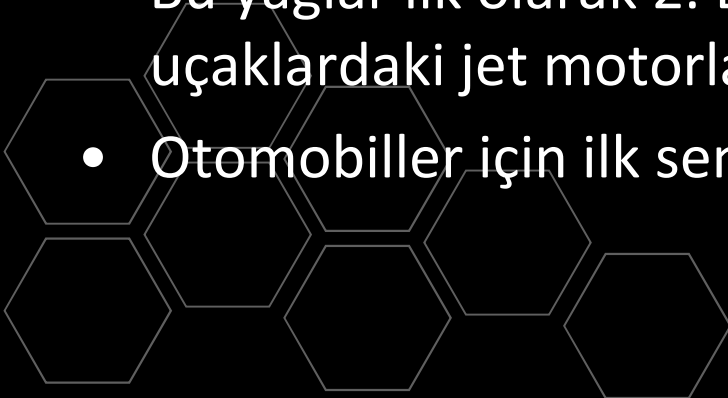
Yağlayıcı madde	Sınır sürtünme katsayısı
Katkısız mineral yağ	0,360
%2 Oleik asit+mineral yağ	0,249
%10 Oleik asit+mineral yağ	0,198
%50 Oleik asit+mineral yağ	0,198
Saf oleik asit	0,195

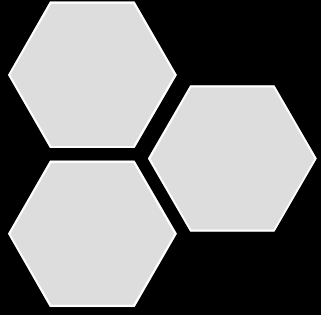




Sentetik Yağlar

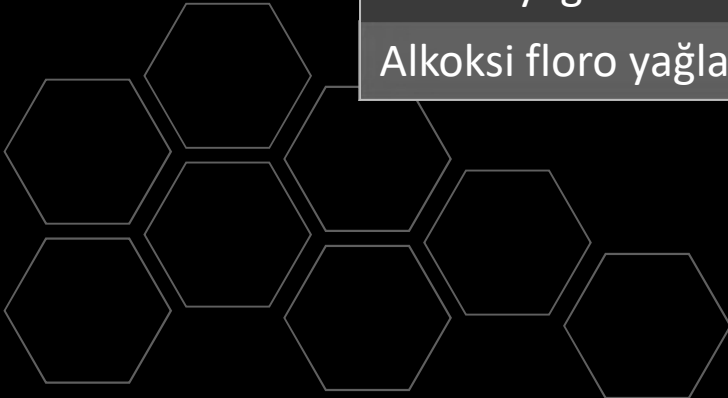
- Sentetik yağlar, ham petrol dışındaki bileşiklerden farklı moleküllerin suni olarak sentezlenmesi ile elde edilen yağlayıcılardır.
- Isı ve basınç altında yapay olarak elde edilen yağlayıcılardır. Yapısı gereği, mineral yağlarda pek çok farklı boyutlarda molekül mevcut iken, sentetik yağlarda moleküllerin boyutları çok tutarlıdır. Bu şekilde, sentetik yağların işletme şartlarındaki davranışları daha tahmin edilebilir hale gelir.
- Bu yağlar ilk olarak 2. Dünya savaşı sırasında geliştirilmiş ve uçaklardaki jet motorlarında kullanılmıştır.
- Otomobiller için ilk sentetik yağ 1972 de ticarileşmiştir.

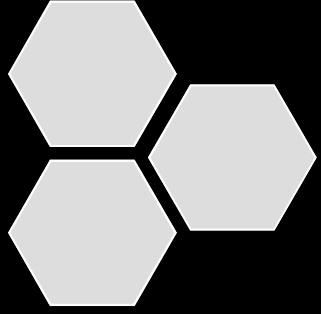




Sentetik Yağlar

Fiyat Oranları	
Mineral yağ	1
Sentetik yağlar	
Polialfa olefin	6
Poliglikol	4...10
Esterler	4...10
Silikon yağı	40...100
Alkoksi floro yağlar	200...800





Mineral yağ-Sentetik yağ karşılaştırması

Yağın özelliği

Mineral yağ

Sentetik yağ

Viskozitenin sıcaklıkla değişimi

Yüksek

Düşük, özel hallerde büyük sıcaklık farkları mümkündür.

Sürtünme katsayısı

Orta

Çok düşük, daha az ısınır, film sürtünmesi daha hızlı elde edilir.

Aşınma mukavemeti

Yeterli

Yeterli

Elastomerlere uygunluk

Yeterli

Yeterliği daha az

Yaşlanma mukavemeti

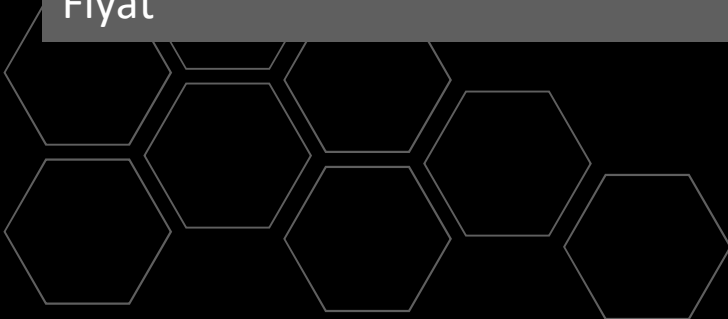
Yeterli

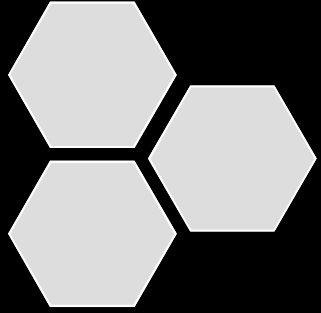
Yeterli

Fiyat

Uygun

Çok pahalı



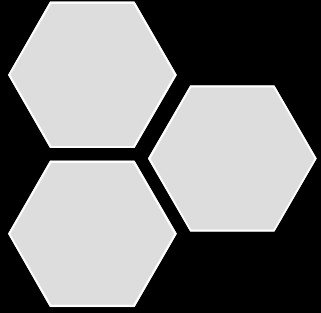


ATF yağları

- Genellikle sentetik yağlardır. Temel olarak 3 işlevi mevcuttur:
 1. Yağlama, temizleme ve soğutma,
 2. Döndürme momentini iletme
 3. Basınç iletme

En önemli özellik viskozitenin tüm çalışma sıcaklığı aralığında sabit kalmasıdır.





ATF yağları

- ATF yağlarının performansını belirleyen parametreler:
 1. Yağlama özellikleri
 2. Viskozite/sıcaklık karakteristiği
 3. Soğutma karakteristiği
 4. Malzemelere uygunluk
 5. Hidrolik kavrama sürtünme karakteristiği



ATF yağları örnek

● Typical Properties of ATF II (N)

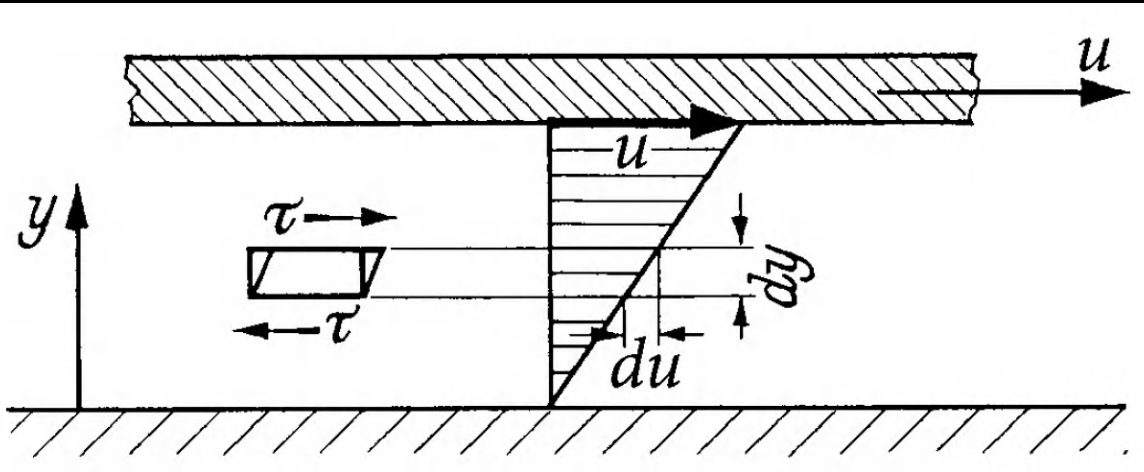
Color			Red
Density	(15°C)	g/cm ³	0.863
Flash point	(COC)	°C	194
Pour point		°C	−45 max.
Kinematic viscosity	(40°C)	mm ² /s	33.03
	(100°C)	mm ² /s	7.013
Viscosity index			181
Viscosity, Brookfield(−40°C)		mPa·s	12,000
Acid number		mgKOH/g	1.31
Base number(HCl method)		mgKOH/g	1.27
Foaming	ml/ml	Seq. I	0
		Seq. II	20/0
		Seq. III	0



Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

1. Viskozite

Tecrübelerimizden biliriz ki sıvı veya gaz halindeki akışkanlar kayma hareketine karşı bir direnç gösterirler. Bu dirence akışkanın iç sürtünmesi de denir. Bu direncin büyüklüğü söz konusu tabaka alanının büyümesi ile büyür.



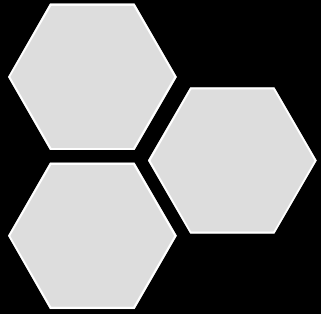
$$\tau \propto \frac{du}{dy}$$

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

Dinamik viskozite

Bu denkleme uyan akışkanlara Newtoniyen akışkanlar denir.





Viskozite

- Kinematik viskozite

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Yağlayıcının yoğunluğu

Birimler

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

SI sistemi: Pa.s [N.s/m²]

CGS sistemi: dyn.s/cm² [Poise]

1/100 Poise = 1 cP

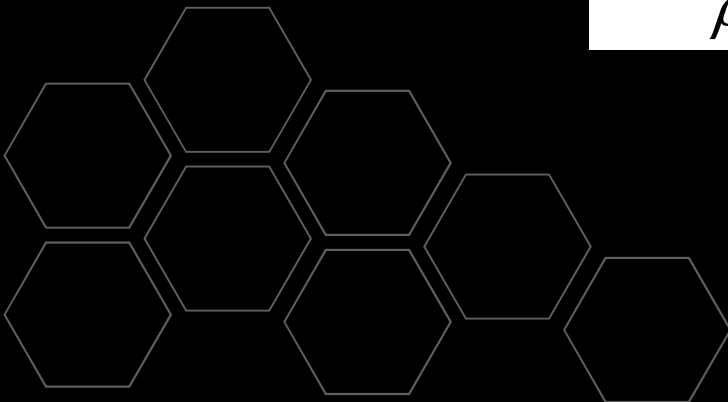
Imperial sistem: lbf.s/in² [reyn]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

SI sistemi: m²/s

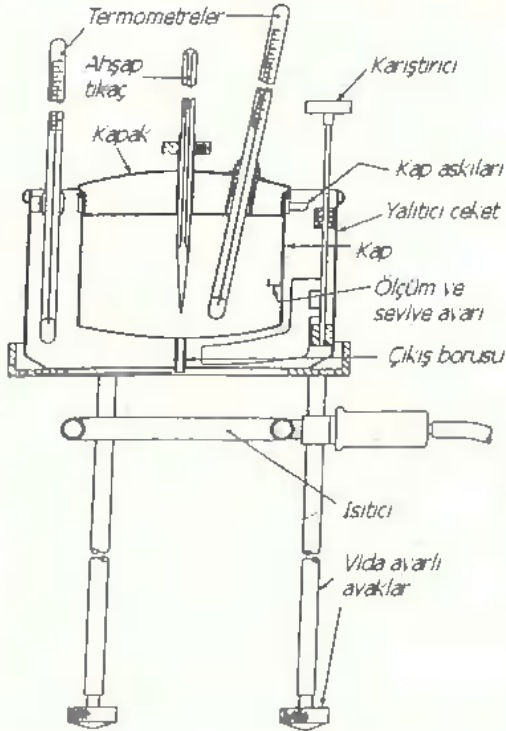
CGS sistemi: cm² /s [Stoke]

1/100 Stoke = 1 cSt = mm²/s



Viskozite ölçümü

- Çok çeşitli yöntemler söz konusu olabilir. En popülerleri Engler derecesidir (E°): Ölçüleri tespit edilmiş ve altında bir delik bulunan bir kap içindeki yağdan 200 cm^3 miktarının akış zamanı ölçülür. Aynı kap içine aynı ölçüde konulan 20°C sıcaklıktaki suyun 200 cm^3 miktarının akış zamanı da tespit edilir. Birincinin ikinciye oranı yağın E° cinsinden viskozitesini verir.



Engler derecesinin tarifinden de anlaşılacağı üzere, 20°C saf suyun Engler derecesi 1 olmaktadır. Engler derecesi ile SI birim sistemi arasında küçük viskozitelerde lineer bir bağıntı bulunmamaktadır. Pek çok formül arasında pratikte en uygun olanı aşağıda verilmiştir:

$$\nu = 7,60 \cdot 10^{-6} E^\circ \left(1 - \frac{1}{E^\circ}\right) \quad \left[\text{m}^2 / \text{s}\right]$$



Viskozite ölçümü

- Engler derecesi benzeri bir diğer viskozite ölçüm yöntemi de Saybolt viskozimetresidir.

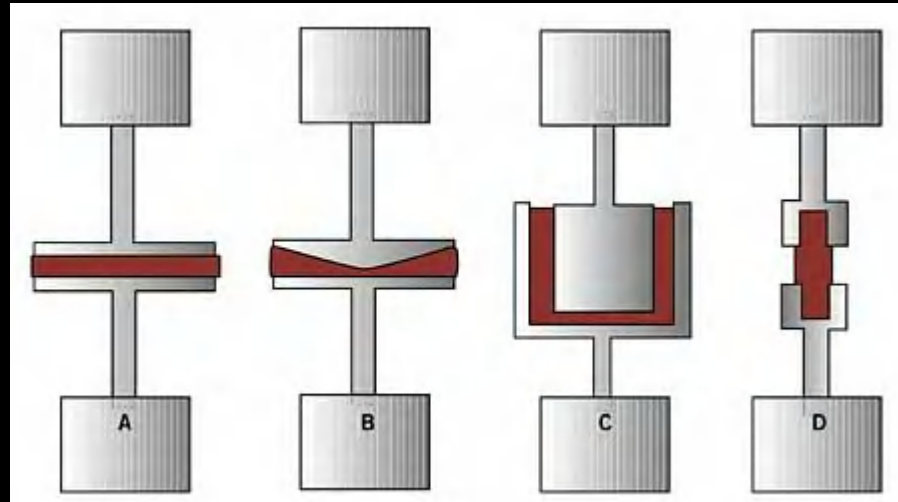


Bu viskozimetrede
hacim olarak 60
ml kullanılır.



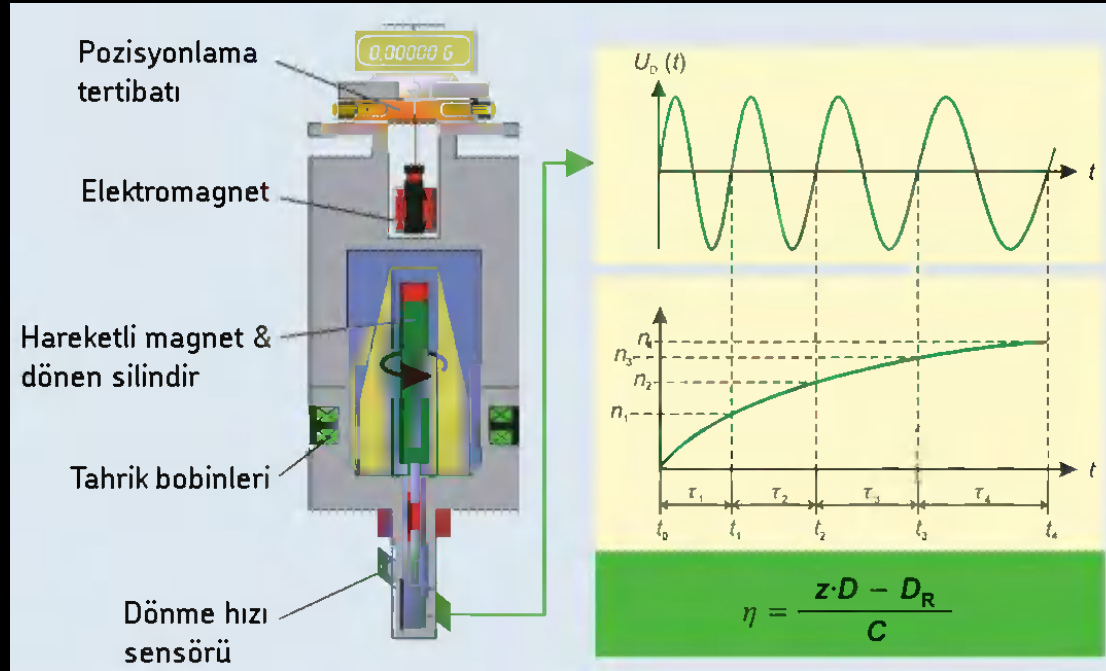
Viskozite ölçümü

- Bir diğer viskozimetre türü döner tipte olanlardır. Döner viskozimetre tasarımında değişik geometrilerden yararlanılabilir. Burada akışkanın viskoz sürtünmesinden kaynaklanan direnç momentinin ölçülmesi gereklidir.

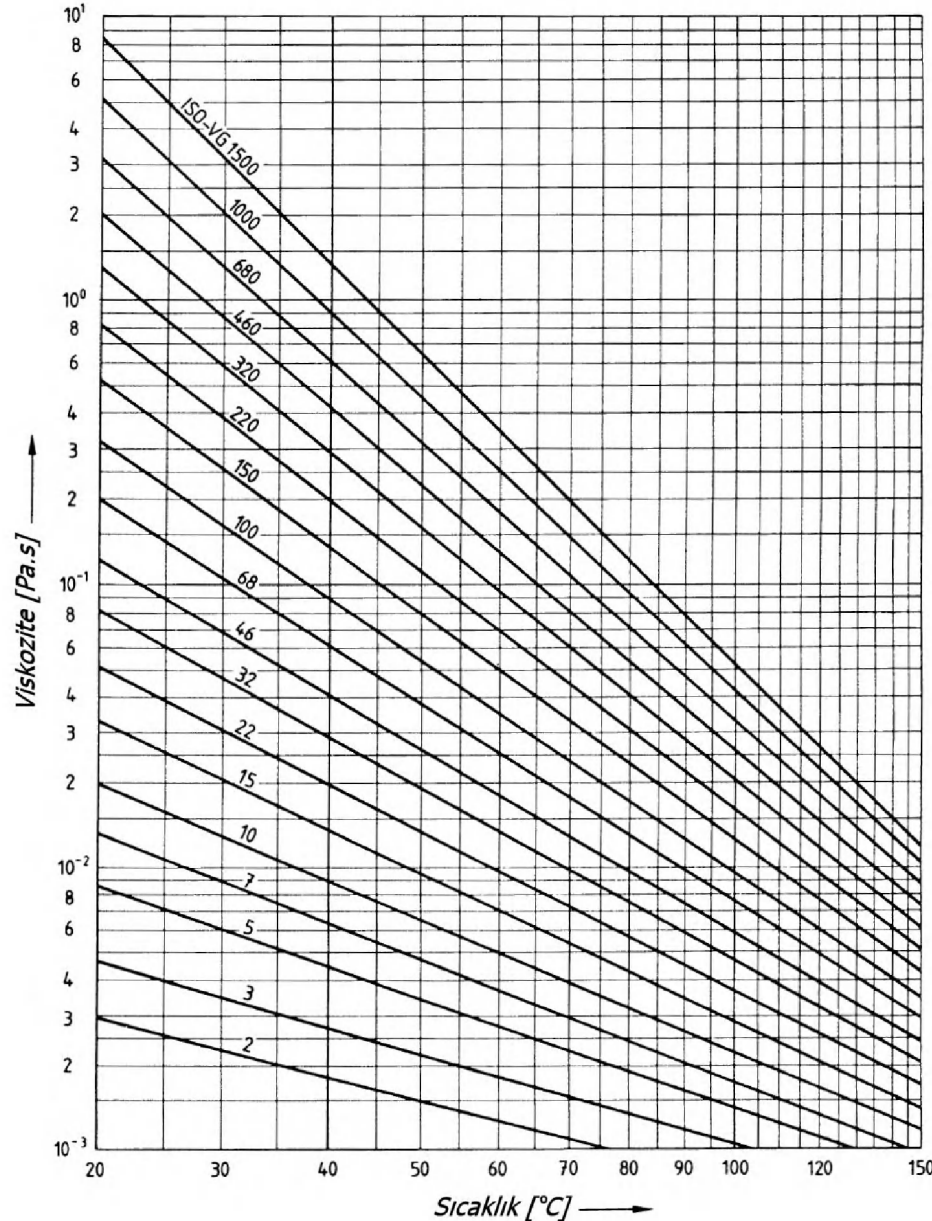


Viskozite ölçümü

- Buradaki viskozite ölçümü dönme hızının yavaşlaması esas alınarak yapılır.



Viskozite-Sıcaklık ilişkisi



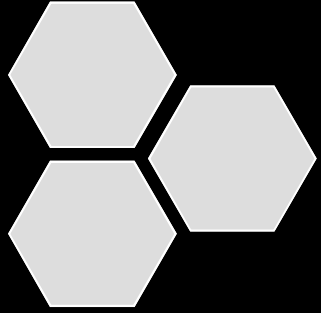
Yağlayıcı maddelerin büyük bir kısmının viskoziteleri sıcaklıkla kuvvetli bir değişme göstermektedir. Sıvı yağlarda sıcaklıkla viskozite azalmakta, gazlarda ise artmaktadır.

Vogel ifadesi

$$\eta = k.e^{\frac{b}{c+t}} \quad t : (C^{\circ})$$

Burada k , b , c malzemeye bağlı sabit değerlerdir. Bunların bir kısmı sıcaklıklarla değişmekler beraber, pratikle yağların kullanıldığı sıcaklık aralıklarında bu değişimler ihmal edilebilir.





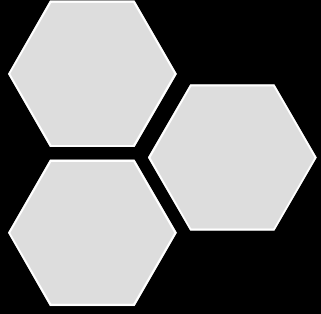
Viskozite-Basınç ilişkisi

- Genel olarak sıvıların ve gazların viskoziteleri basınçla artmaktadır. Yalnız 0 °C civarındaki suyun viskozitesi bir farklılık göstererek, basınçla azalmaktadır.
- Madensel yağlarda bu değişime iyi bir yakınsaklıkla

$$\eta = \eta_0 \cdot a^p$$

Burada η_0 yağın 1 Atm deki viskozitesi, p at. olarak basınç, a bir malzeme sabitidir. Organik yağlarda $a=1.101$, madensel yağlarda ise $a=1.0015$ ile 1.003 arasında değişmektedir.





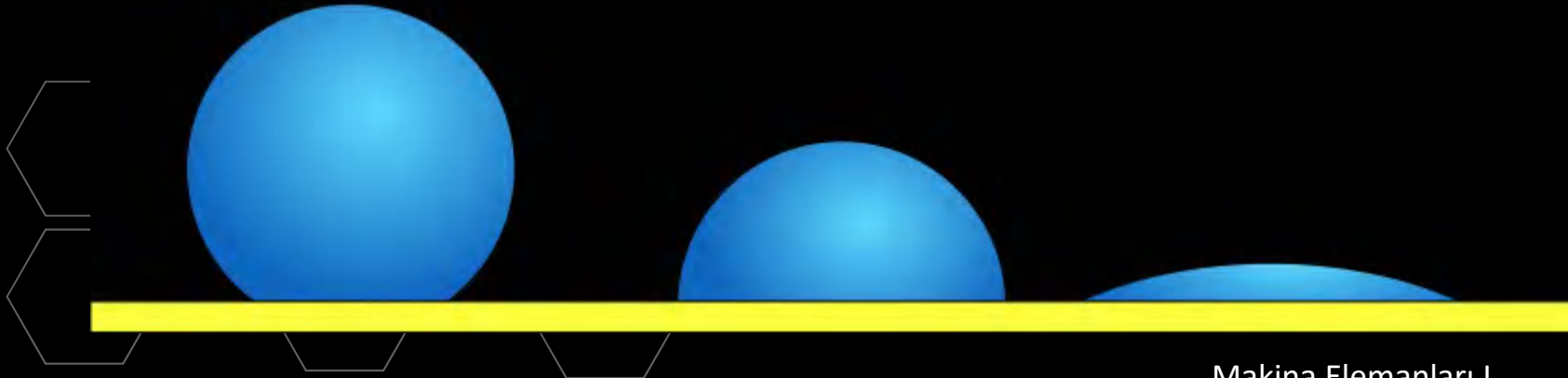
Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

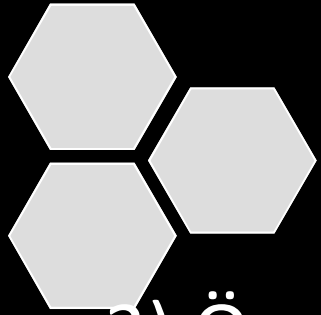
2) Islatma kabiliyeti (Oilness):

Bu kabiliyet içinde, yağların yüzeyler üzerinde yayılma ve yüzeylere yapışma özellikleri anlaşılır.

Bu kabiliyeti tespit için çeşitli kalitatif deneyler mevcut olmakla beraber, kesin bir kantitatif değer, sayı veya tarif mevcut değildir.

Sıvı ile madensel yüzey arasındaki bağ, bunlar arasındaki sınır yüzey gerilimine ve bunun bir sonucu olan kenar açısına bağlıdır . Kenar açısı ne kadar küçükse sıvının yüzeyi ıslatma kabiliyeti o kadar büyür.





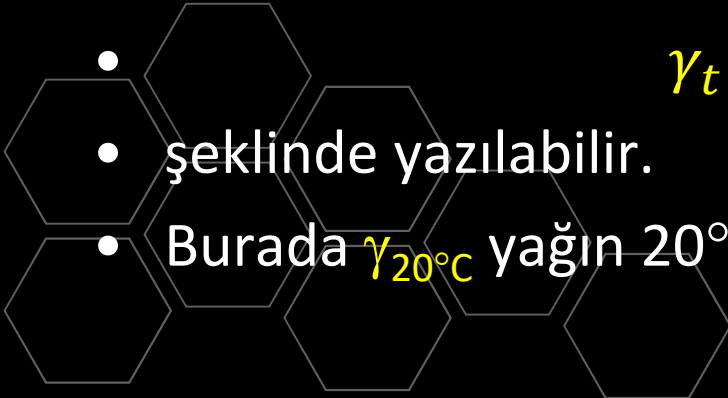
Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

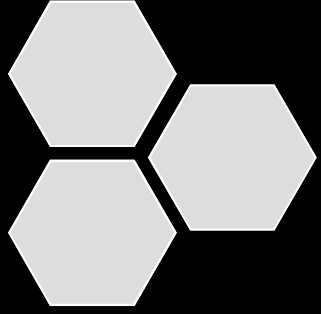
3) Özgül ağırlık:

- Madensel yağların özgül ağırlıkları da sıcaklıkla (çok az miktarda basınçla) değişir.
- Kullanılmakta olan yağların özgül ağırlıkları 20°C'da
- $\gamma_{20^{\circ}\text{C}} = 800 \dots 960 \quad \text{kg/m}^3$
- ($\gamma_{20^{\circ}\text{C}} = 0,8 \dots 0,9 \quad \text{g/cm}^3$)
- arasındadır.
- Sıcaklıkla değişme iyi bir yakınsaklıkla

$$\gamma_t = \gamma_{20^{\circ}\text{C}} - 0,0007 \cdot (t - 20)$$

- şeklinde yazılabilir.
- Burada $\gamma_{20^{\circ}\text{C}}$ yağın 20°C özgül ağırlığı, t ise °C olarak sıcaklıktır.





Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

4) Katılma ve bulanma noktaları :

- Özellikle soğuk iklimlerde kullanılacak yağlar için önem taşır. Standart bir kaptaki homojen olarak soğutulan yağın, kabın altındaki delikten artık akmadığı sıcaklık tespit edilir. Bu katılma noktasıdır.
- Madensel yağlarda bu sıcaklık -20°C , özel katkı yağlarda ve sentetik yağlarda daha düşük de olabilir.
- Bulanma noktası ise kontrollü olarak soğutulan yağın bulutsu bir görünüme sahip olduğu sıcaklıktır.
- Düşük sıcaklıklarda çalışan makinalarda kullanılacak yağların düşük katılma sıcaklıklarına sahip olması gerekir. Aksi halde hareketli elemanlarda sıkışma gibi istenmeyen durumlarla karşılaşılabilir.





Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

5) Alevlenme noktası:

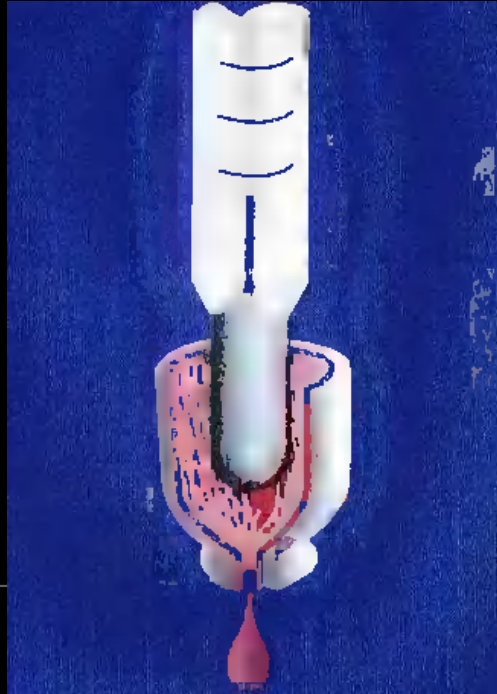
- İçten yanmalı motorlarda, kompresörlerde ve benzeri yüksek sıcaklıklarda veya yüksek sıcaklıklardaki madensel yüzeylere sahip makinalarda kullanılan yağlarda önemlidir.
- Standart bir kap dahilinde ısıtılan yağın üzerinde teşekkül eden yağ buharı + hava karışımına, kızgın bir kontak ucunun yaklaştırılmasıyla parlamalar göstermeye başladığı sıcaklık tespit edilir.
- Buna yağın alevlenme noktası denir. Genellikle bu sıcaklığın **30-60°C** üstünde devamlı yanma başlar. Bu durumda yanma noktasına erişilmiş olur.



Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

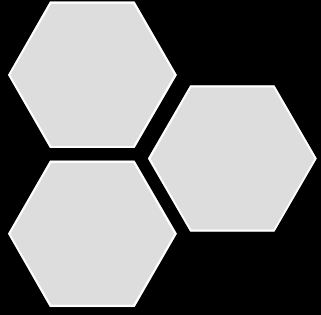
6) Damlama noktası:

- Greslerde öneme sahip bir büyüklük olup gresin sıcaklığa dayanıklılığını tespit eden bir ölçüdür. Standart bir kap dahilinde ısıtılan gresin kap altındaki delikten damlamaya başladığı sıcaklıktır.



Makina Elemanları I

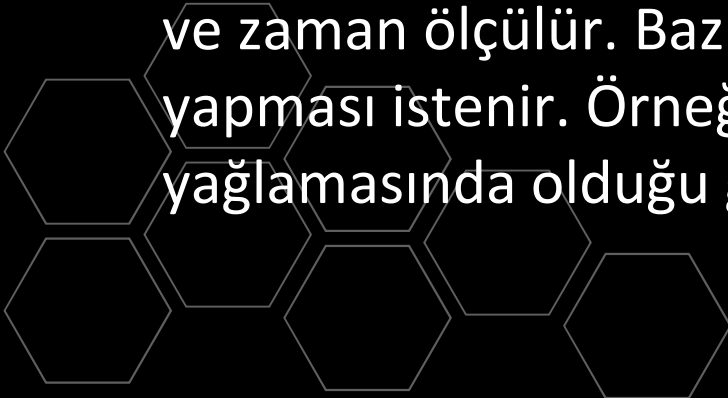




Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

7) Emülsiyon teşkili:

- Özellikle buhar ve su makinalarında kullanılan yağlarda öneme sahiptir. Yağa karışan suyun santrifüjlerde yağdan kolayca ayrılabilmesi arzu edilir.
- Bu özelliğin denenmesi şöyle yapılır:
- 100 cm^3 su içine, 50 cm^3 yağ konur ve beraberce kaynatılır. Sonra bunun içinden buhar geçirilir. Tekrar kaynatılır. Soğumaya bırakılıp, yağ ve suyun birbirinden ayrılan miktarları ve zaman ölçülür. Bazı özel hallerde ise yağın emülsiyon yapması istenir. Örneğin Bor yağlarında ve bazı buhar silindiri yağlamasında olduğu gibi.



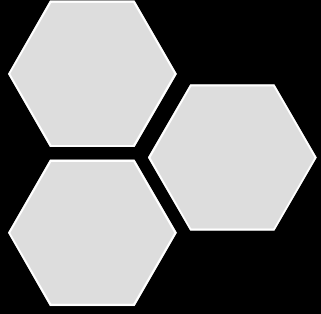


Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

8) Nötralizasyon (Baz) sayısı:

- Yağın içinde zamanla ve çalışma sonu oluşan yorulma partiküllerini ve buna bağlı olarak yağ değiştirme zamanını tespit eder.
- **Nötralizasyon sayısı , oda sıcaklığında 1 gr. yağ içinde bulunan serbest asitleri nötralize etmek için gerekli potasyum hidroksit'in mgr olarak miktarıdır.** Mesela kullanılmış buhar türbinleri yağında bu sayı 3' ü geçmemelidir. Geçmiş ise yağ değiştirme zamanı gelmiş demektir.
- Ayrıca bir sabunlaşma sayısı da tarif edilmiştir. Bu sayı ise 1 gr. yağ içinde bulunan serbest asitlerden başka mevcut ester ve laktonları parçalamak için gerekli potasyum hidroksit miktarıdır. Sabunlaşma sayısı özellikle içinde organik yağ ihtiva eden madensel bileşikli yağlar için önemlidir.

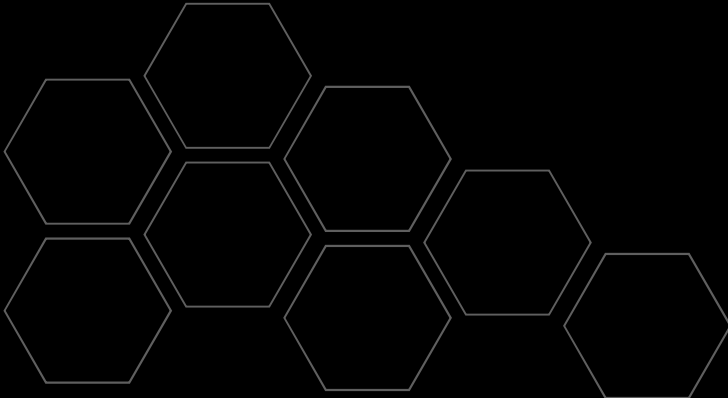


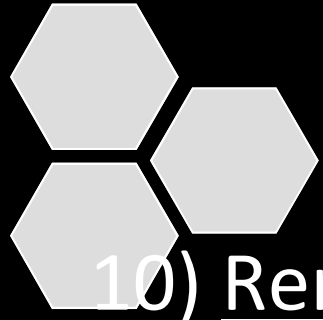


Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

9) Kül Miktarı:

- Bir kap dahilinde yakılan belirli bir miktardaki yağdan arta kalan yanma bakiyesi kül miktarını gösterir. İçten yanmalı motorlarda kullanılacak yağlar için önemlidir. İyi bir motor yağında kül miktarı sıfır olmalıdır.

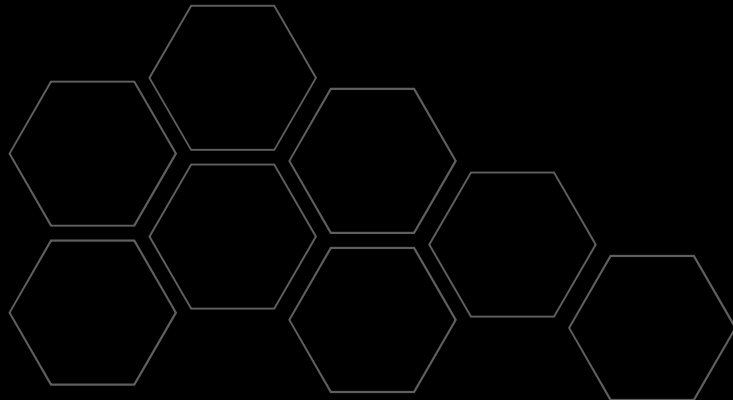


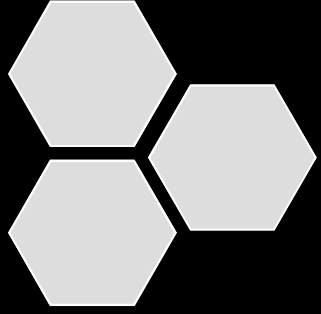


Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

10) Renk:

- Yağların birinin diğerine tercihinde önemli bir özellik değildir. Ancak başlangıçtaki rengi bilinen bir yağda bu rengin zamanla değişmesi yağ içinde meydana gelen yorulma parçacıkları hakkında bir fikir verebilir. Son yıllarda geliştirilen filtre kağıdı kromotografisi yardımıyla özellikle motorlarda kullanılan karter yağlarının eskime durumu oldukça iyi bir yakınsaklıkla anlaşılabilmektedir.

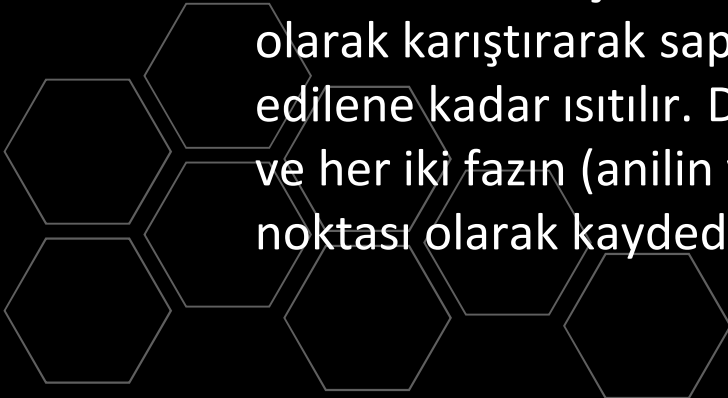




Yağlayıcı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

11) Anilin noktası:

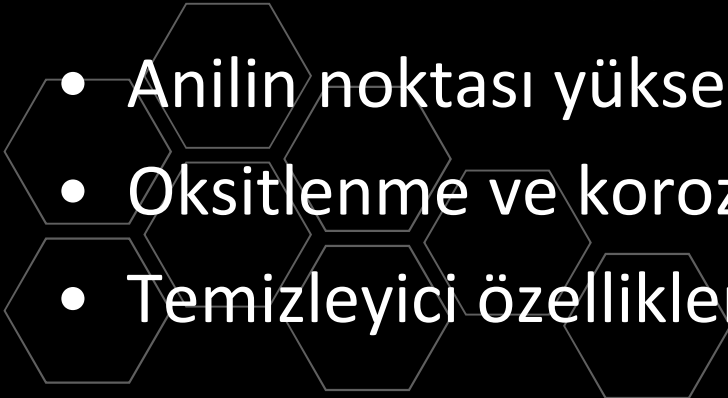
- Bir yağlama yağının anilin noktası eşit hacimdeki anilin ve yağ numunelerinin minimum denge sıcaklık noktası olarak tarif edilir. Bu değer kauçuk keçe, salmastra vb. gibi elemanlarla temas halinde olan yağın bozulmasının bir göstergesi olarak değerlendirilir. Aromatik hidrokarbonlar doğal ve bazı sentetik kauçukların çözülmesine neden olurlar. Yağda bu nedenle düşük aromatik içerik istenir. Yüksek anilin noktası, yüksek oranda parafinik hidrokarbon, yani düşük aromatik oran anlamına gelir.
- Anilin noktası eşit hacimce yağ ve anilini bir test kabında mekanik olarak karıştırarak saptanır. Karışım homojen bir çözelti elde edilene kadar ısıtılır. Daha sonra karışım kontrollü olarak soğutulur ve her iki fazın (anilin ve yağ) birbirinden ayrıştığı sıcaklık anilin noktası olarak kaydedilir.

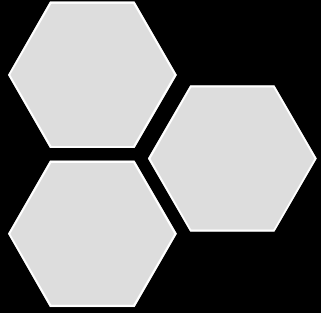




Yağlayıcılardan istenen özellikler

- Yüksek viskozite endeksi
- Yağlayıcının alevlenme noktası, makinadaki çalışma sıcaklığından yüksek olmalı
- Islatma kabiliyeti yüksek olmalı
- İyi bir yağlayıcının bulanma noktası, makinanın çalışma sıcaklığından her zaman daha düşük olmalı
- Yağlama yağlarını uçuculuğu düşük olmalı
- Kullanım sırasında karbon birikmesi minimum olmalı
- Anilin noktası yüksek olmalı
- Oksitlenme ve korozyona mukavim olmalı
- Temizleyici özellikleri iyi olmalı





Yağlama Sistemleri

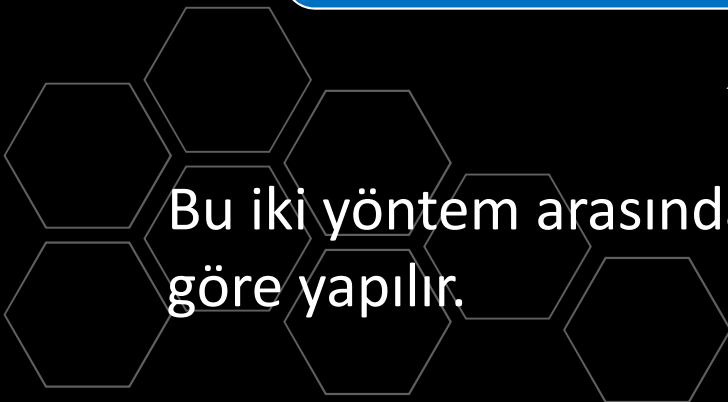
- Yağın, yağlama bölgesine iletilmesi değişik şekillerde yapılabilir. Genelde iki yağlama sistemi mevcuttur.

Açık devre yağlama sistemleri

Kapalı devre yağlama sistemleri

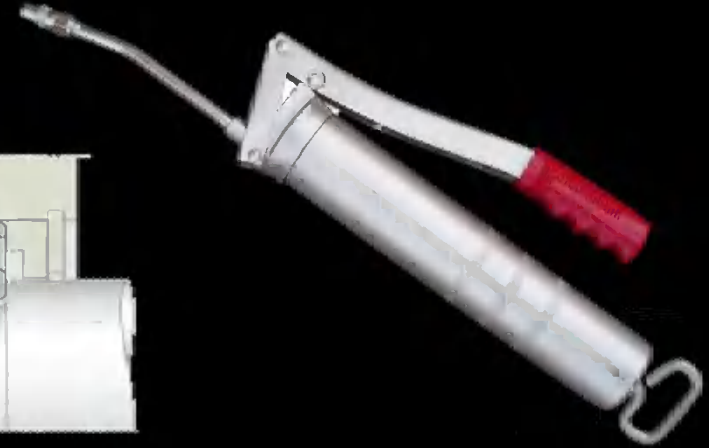
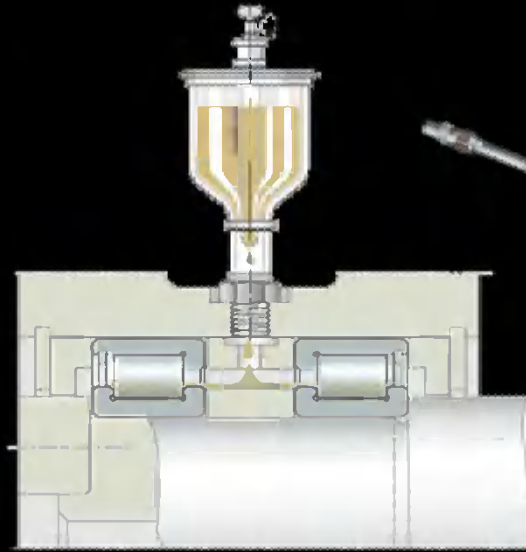
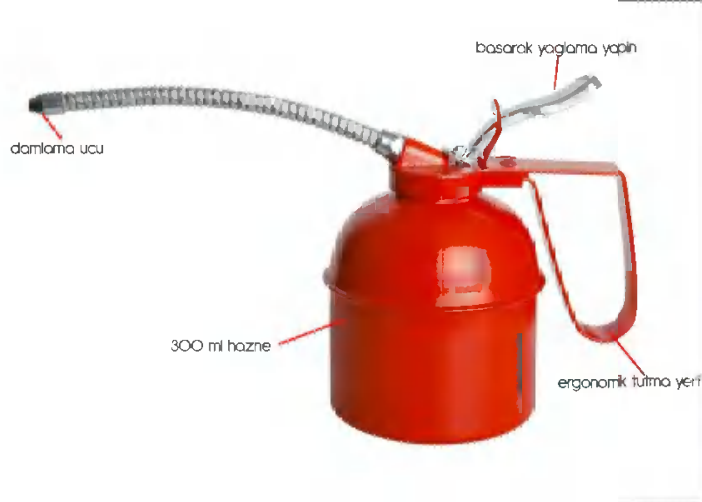


Bu iki yöntem arasındaki tercih, uygulamanın gereksinimlerine göre yapılır.



Açık Devre Yağlama

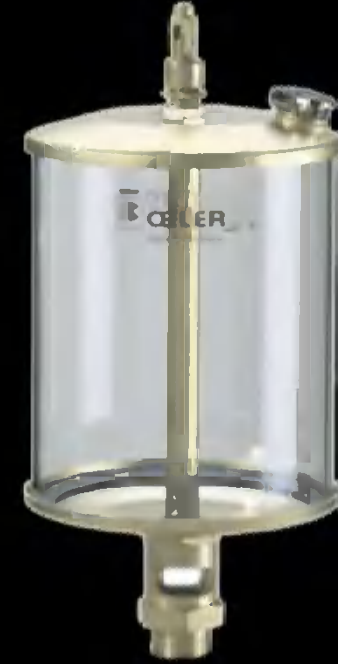
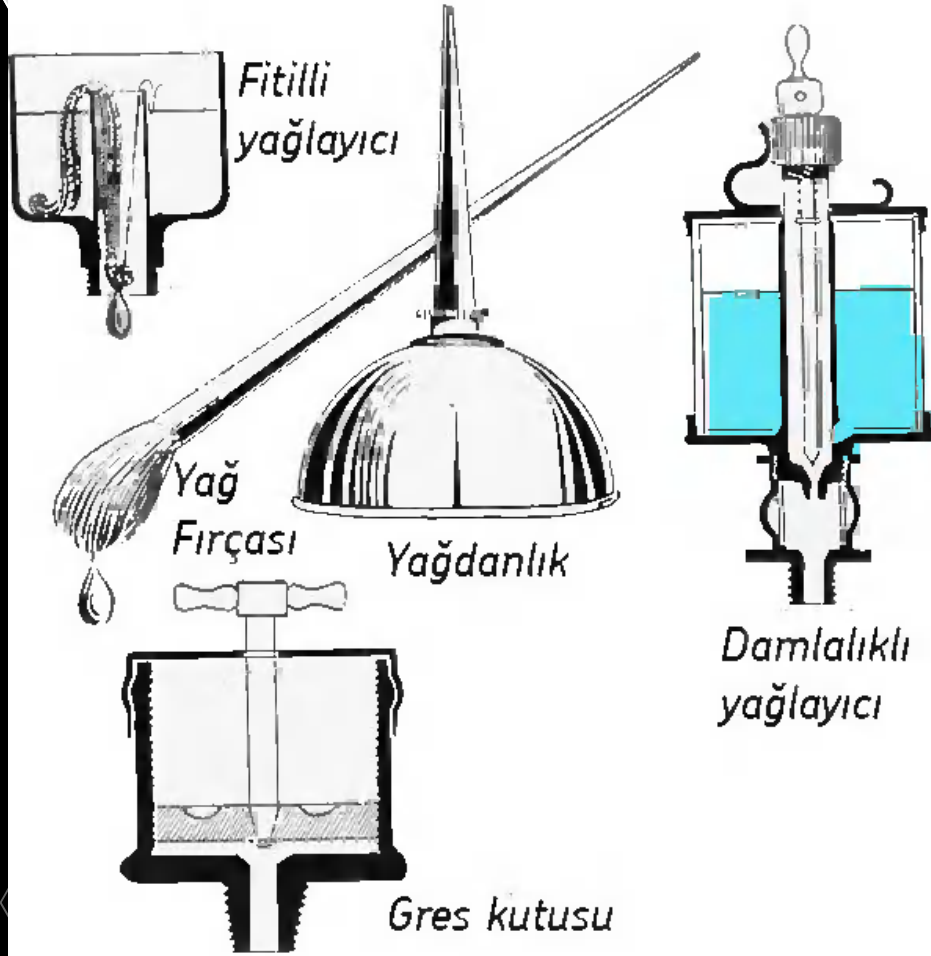
- Açık devre yağlama sisteminde yağlayıcı madde yağlama bölgesine sevk edilir. Yağlama yapıldıktan sonra akıp, gider. Daha sonra tekrar yağlama için kullanılmaz.

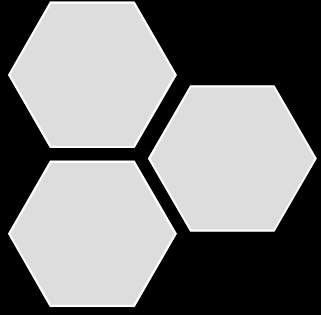


Makina Elemanları I

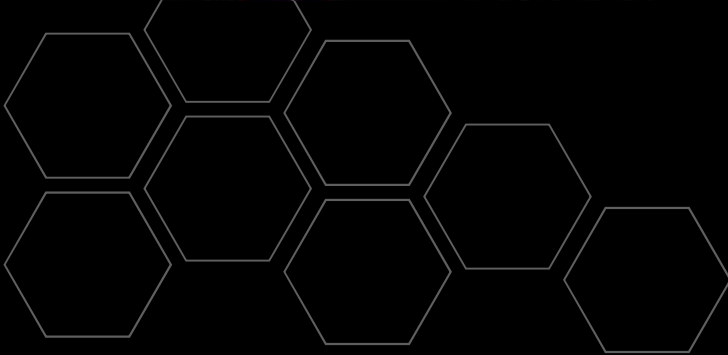
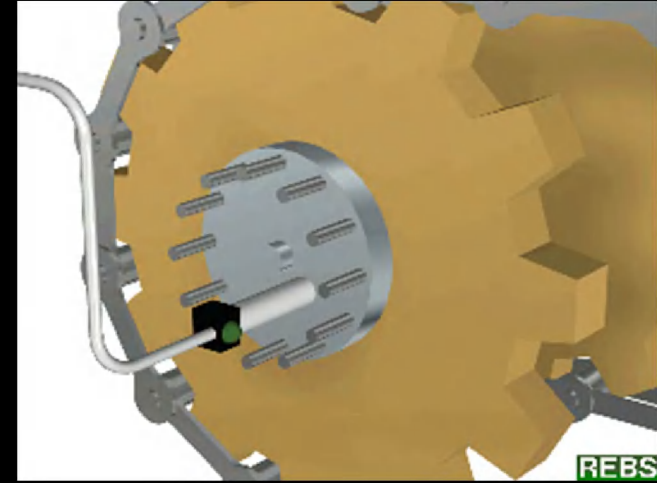
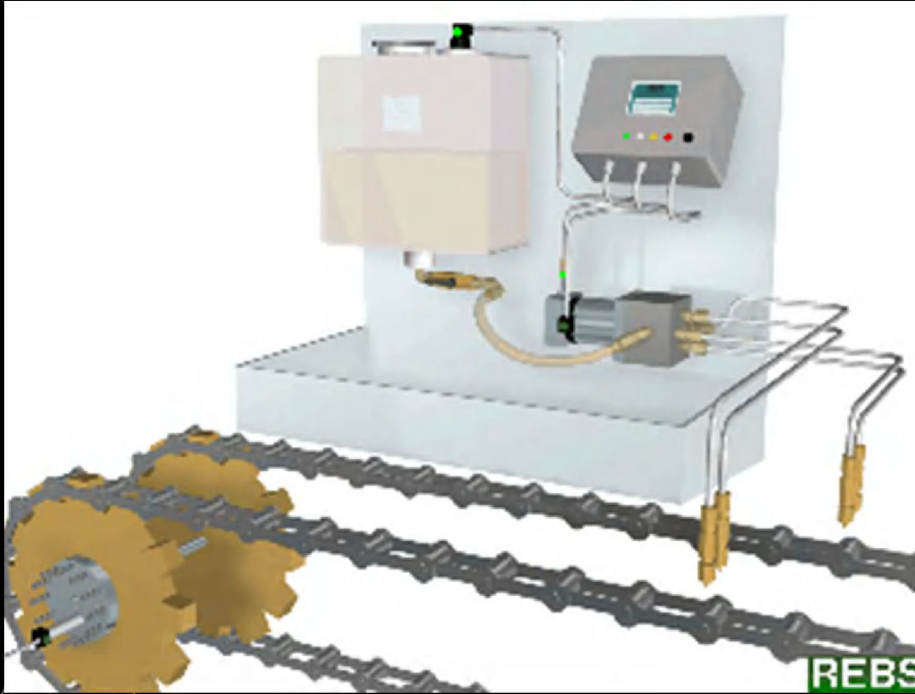


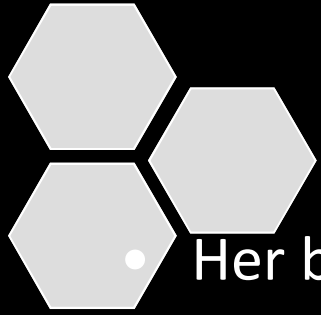
Elle yağlama yöntemleri





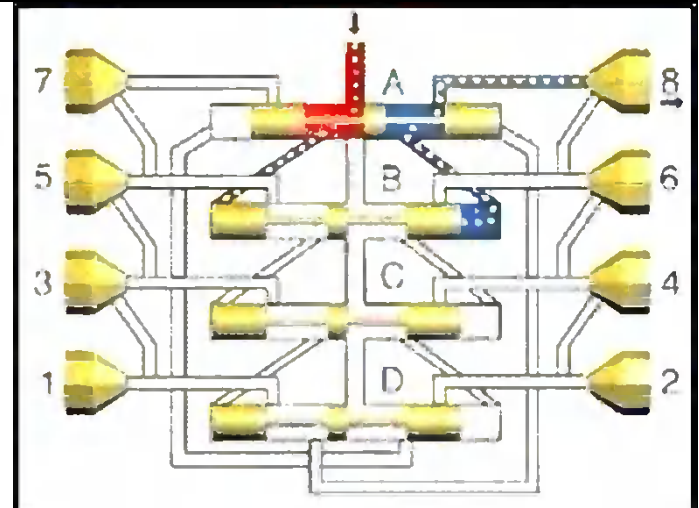
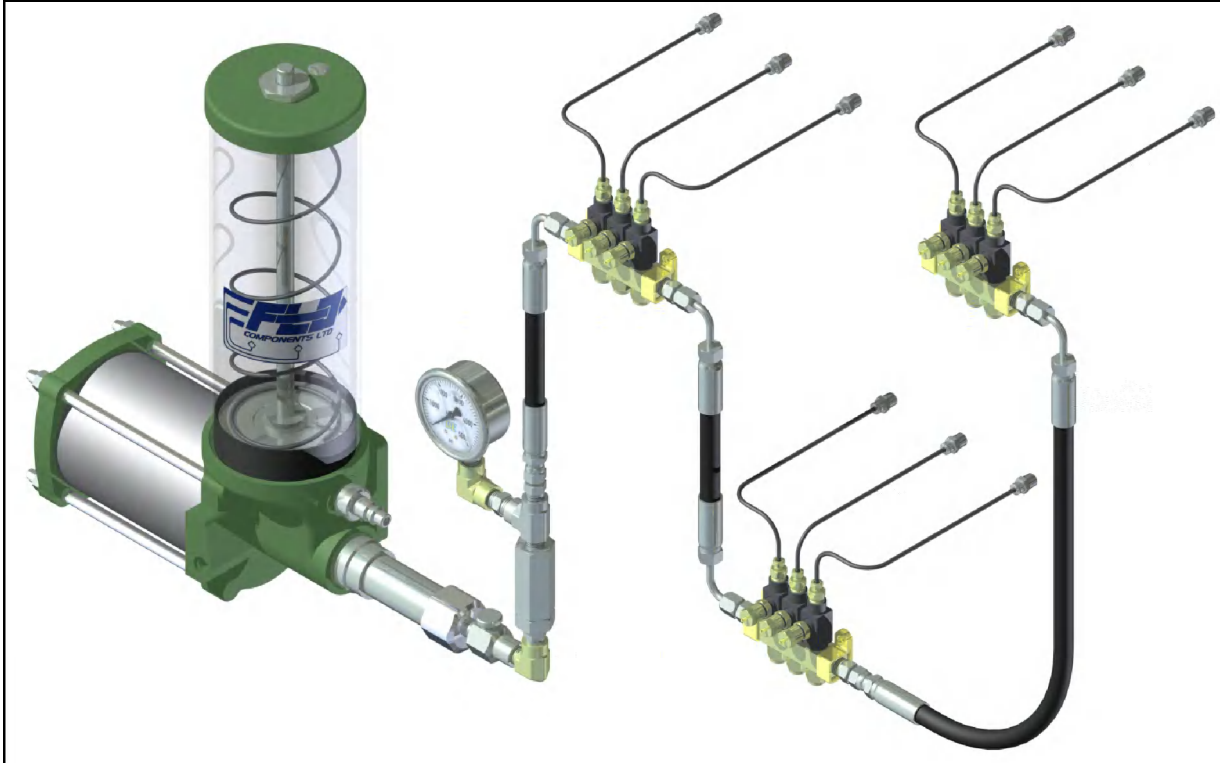
Zincir yağlaması



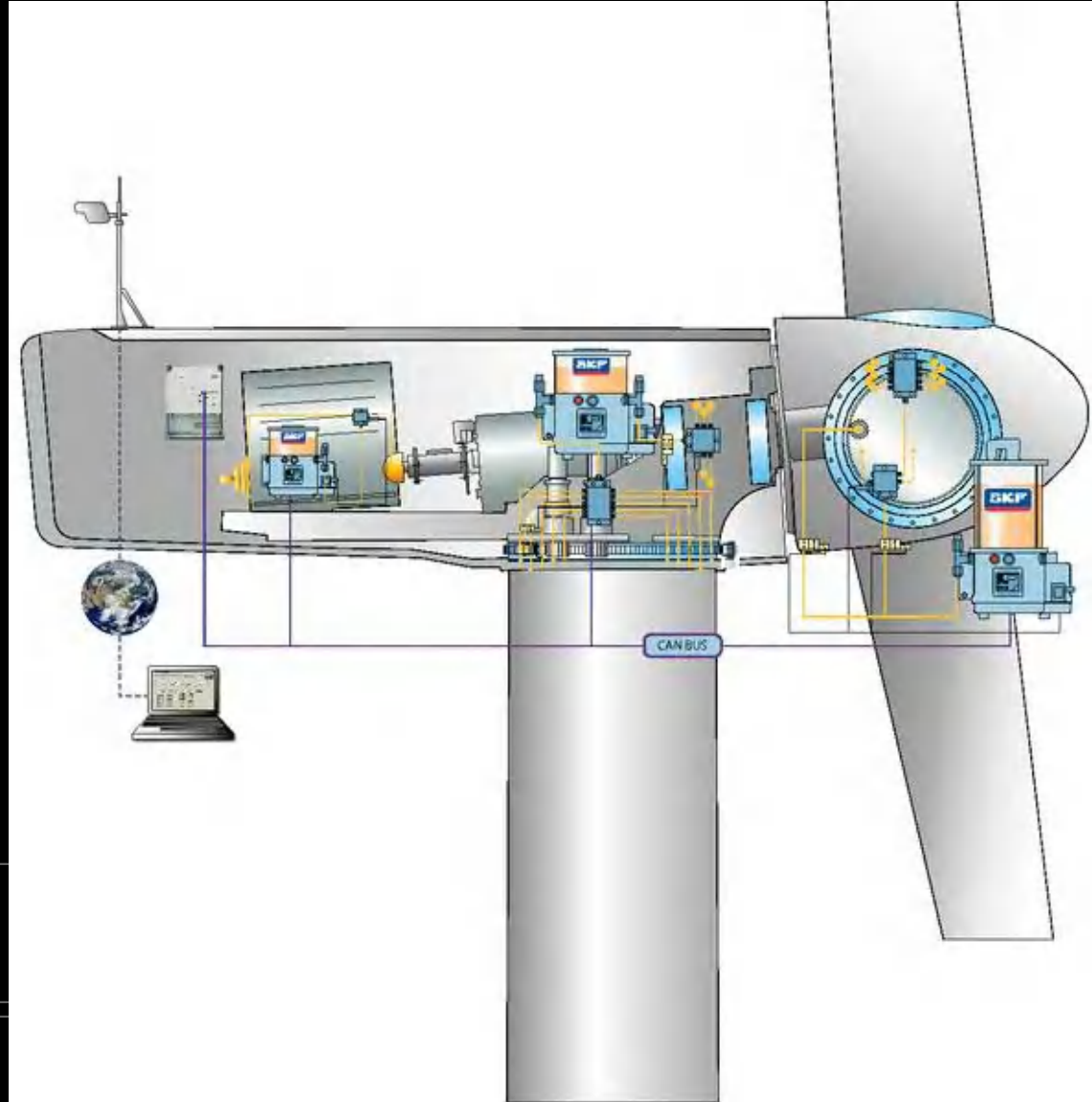


Otomatik yağlama sistemleri

- Her bir yağlama noktasına ön görülen miktarda yağlayıcı, otomatik olarak sevk edilir. Bir otomasyon sistemine entegre edilerek de kullanılır. Günümüzde, çok yaygın olarak kullanılmaktadır.



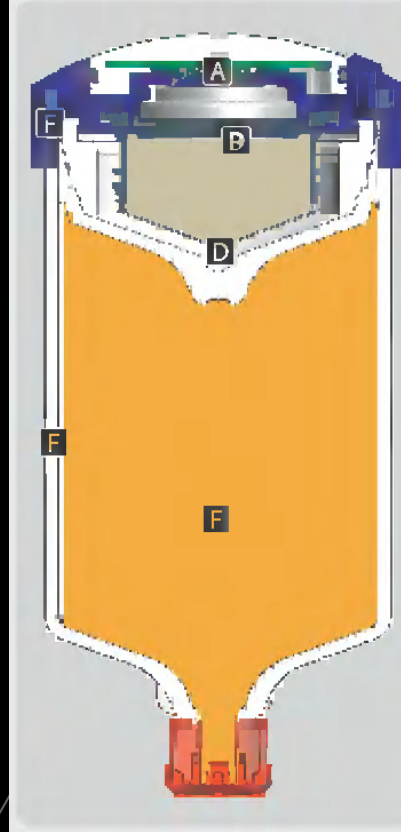
Merkezi yağlama sistemleri



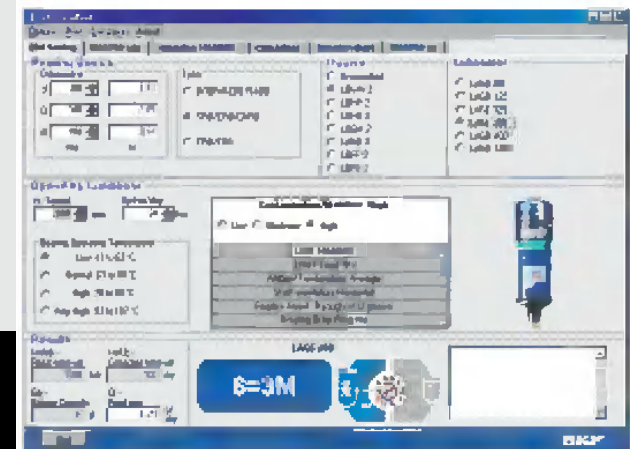


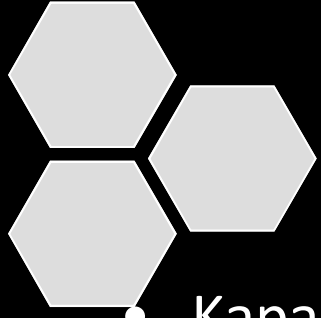
Otomatik gresörlükler

- Yıllık, 6 aylık veya 3 aylık gibi periyotlarda planlama yapılarak gres sevk hızı ayarlanır.



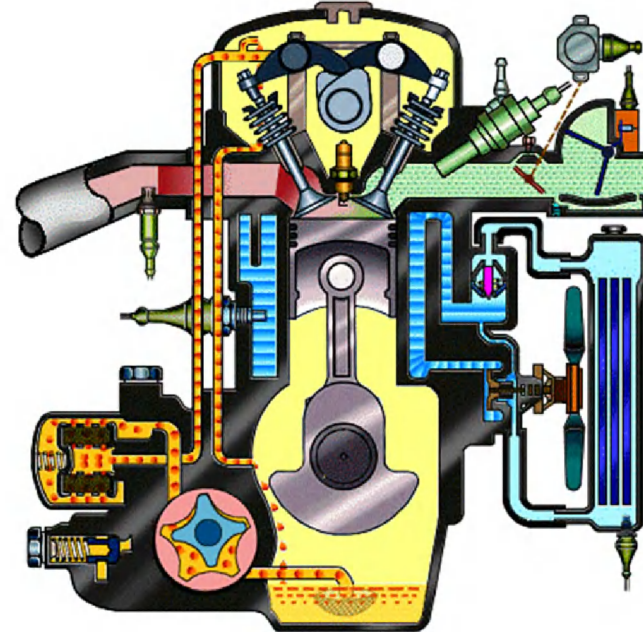
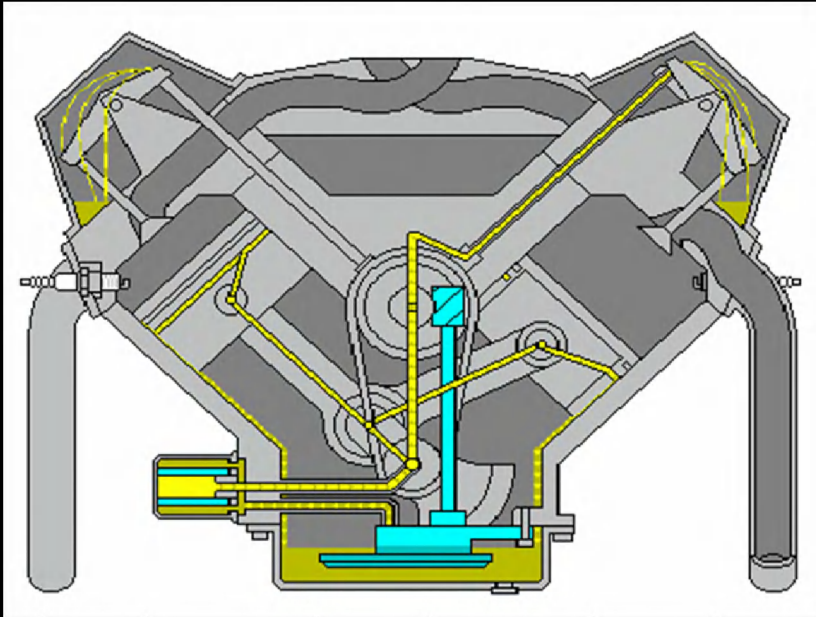
- A** Zaman ayar düğmesi (slotu)
Yağlayıcının sevki kolay ve hassas olarak ayar edilebilir
- B** Gaz hücresi
Yağlayıcı sevki için gerekli basıncı oluşturur
- F** Kolay kavranabilen üst kapak
Hızlı ve kolay montaja imkan verir
- D** Piston
Özel piston formu yağlayıcının tamamen boşalmasını sağlar
- E** Yağlayıcı kutusu
Saydam yağlayıcı kutusu yağ sevihinin gözle de izlenebilmesini sağlar
- F** SKF Yağlayıcı
Yüksek kaliteli SKF yağlayıcıları ile doldurulmuştur





Kapalı Devre Yağlama

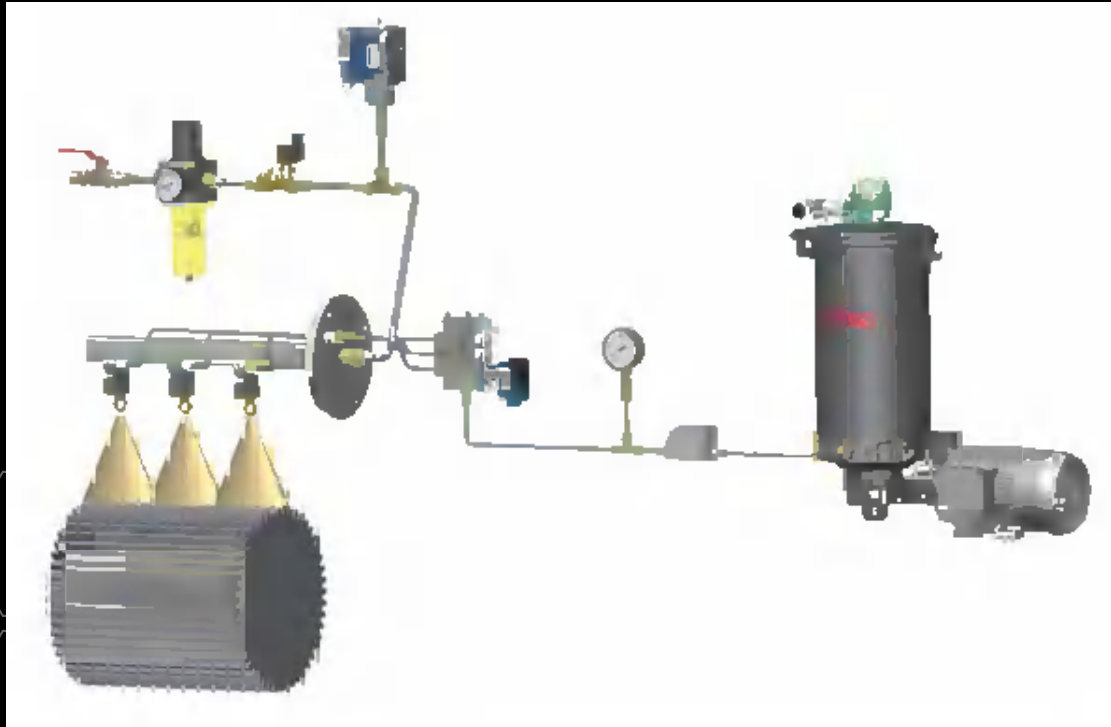
- Kapalı devre yağlamada, yağlama işlevini gören yağ, tekrar toplanarak yeniden yağlama bölgesine sevk edilir. Burada bir devri daim yağlama hali mevcuttur. Dişli kutuları, içten yanmalı motorlar, kaymalı yataklar, rulmanlı yataklar buna örnek olarak verilebilir.

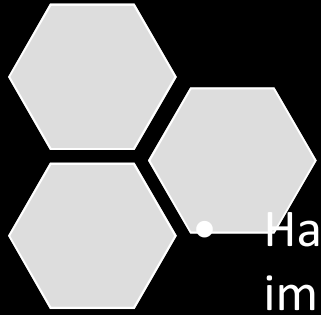




Pompaalı yağlama

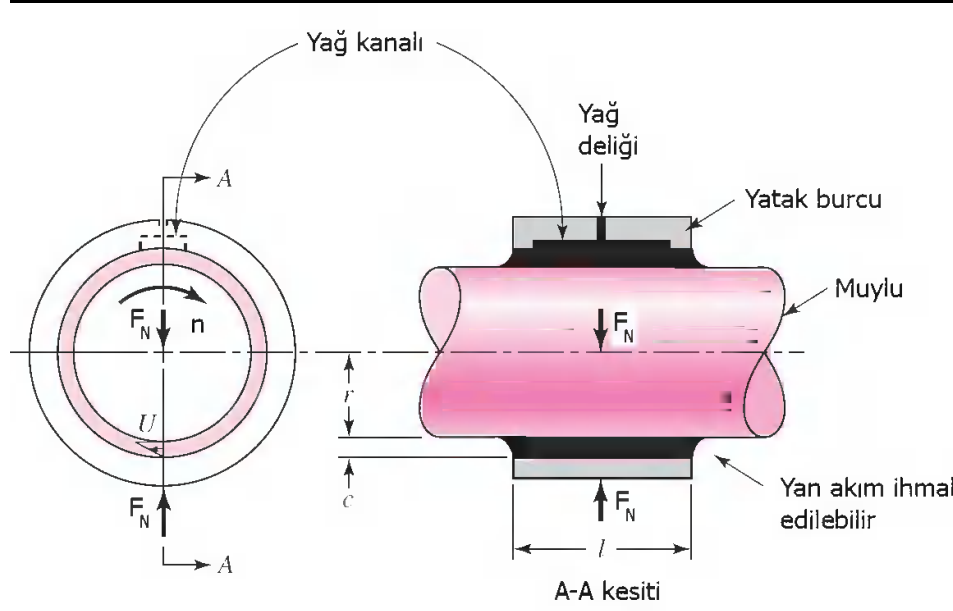
- Büyük güçler aktaran ve nispeten yüksek hızlı dişlilere sahip dişli kutularında dalma yağlama gerek yağlama ve gerekse soğutma açısından yetersiz kalır. Bu durumda dişlilerin temas bölgelerine basınçlı yağ sevk edilmesi gerekir.





Film sürtünmesi (Petroff Denklemi)

- Hafif yüklü yataklarda sürtünme katsayısının çok kolay hesaplanmasına imkan verir.



Hız yayılımı lineer kabul edilirse Newton denklemi

$$\tau = \eta \cdot \frac{U}{h} = \eta \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{60 \cdot c}$$

Yataktaki sürtünme direncini yenmek için uygulanması gereken moment

$$M = (\tau \cdot A) \cdot r = \left(\eta \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{60 \cdot c} \right) \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot l) \cdot r$$

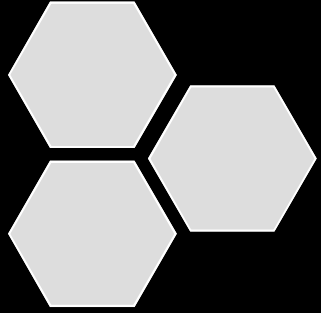
Yatağa çok küçük bir F_N kuvveti etkisin. Bu kuvvet de $p \cdot (2 \cdot r \cdot l)$ ile temsil edilsin. (p : ortalama yatak basıncı)

$$M = \mu \cdot F_N \cdot r = \mu \cdot 2 \cdot r \cdot l \cdot p \cdot r = 2 \cdot r^2 \cdot \mu \cdot l \cdot p$$

Her iki moment eşitlenirse

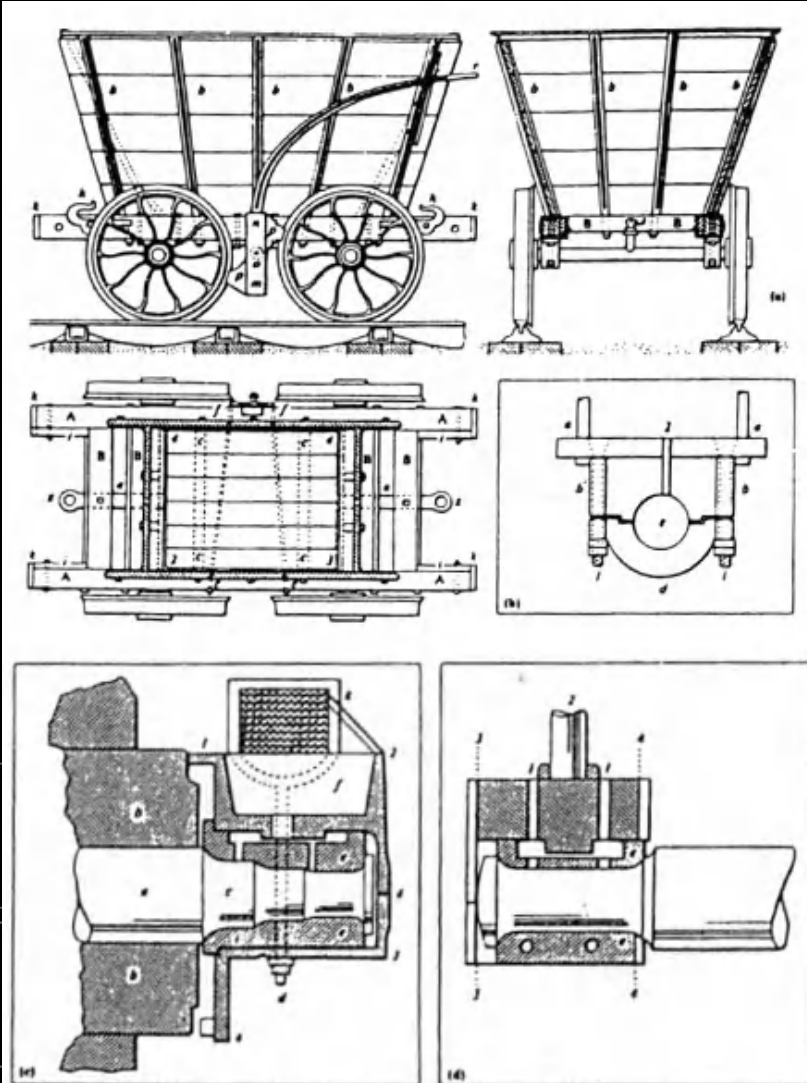
$$\mu = \frac{2 \cdot \pi^2}{60} \cdot \frac{\eta \cdot n}{p} \cdot \frac{r}{c}$$





Hidrodinamik Yatak Teorisi

- Tower deneyleri



1830 larda kullanılan
«modern» demiryolu
yatakları





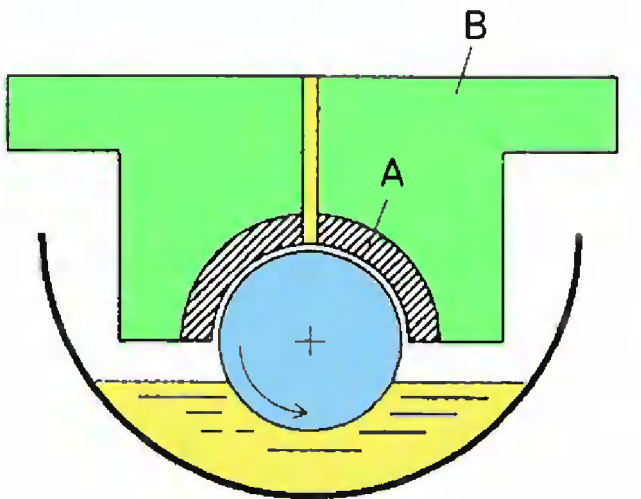
Hidrodinamik Yatak Teorisi

- Hidrodinamik yağlama teorisi Beaucamp Tower'ın yaptığı bir seri deney esas alınarak geliştirilmiştir.

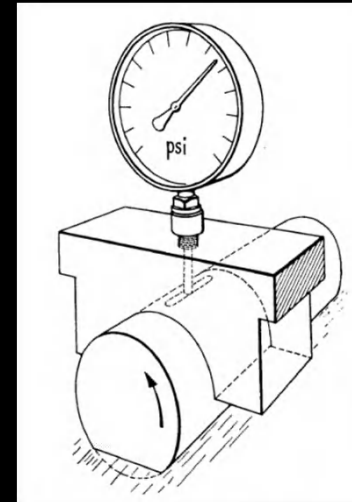
Beauchamp Tower,

- "First Report on Friction Experiments," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, November 1883, pp. 632–666;
- "Second Report," *ibid.*, 1885, pp. 58–70;
- "Third Report," *ibid.*, 1888, pp. 173–205;
- "Fourth Report," *ibid.*, 1891, pp. 111–140

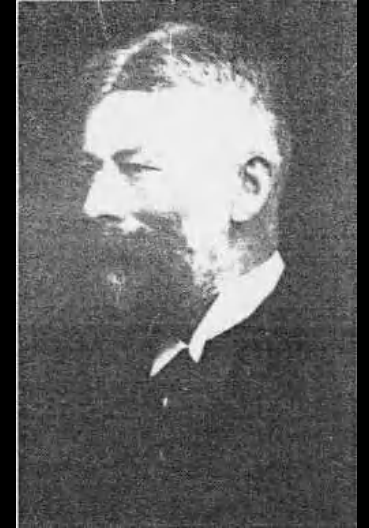
Tower deneylerinde o tarihlerde demiryollarında kullanılan parçalı radyal yatak kullanılmıştır.



A: Kaymalı yatak burcu,
B: Parçalı yatak gövdesi



Makina Elemanları I



Tower makalesi

632

Nov. 1883.

FIRST REPORT ON FRICTION EXPERIMENTS.

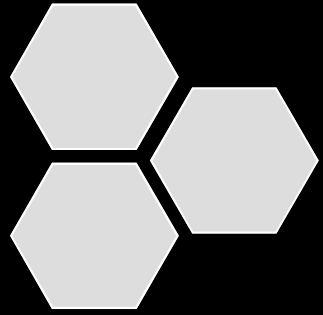
By MR. BEAUCHAMP TOWER, OF LONDON.

(Adopted by the Committee on Friction, and presented to the Council, Sept. 28, 1883.)

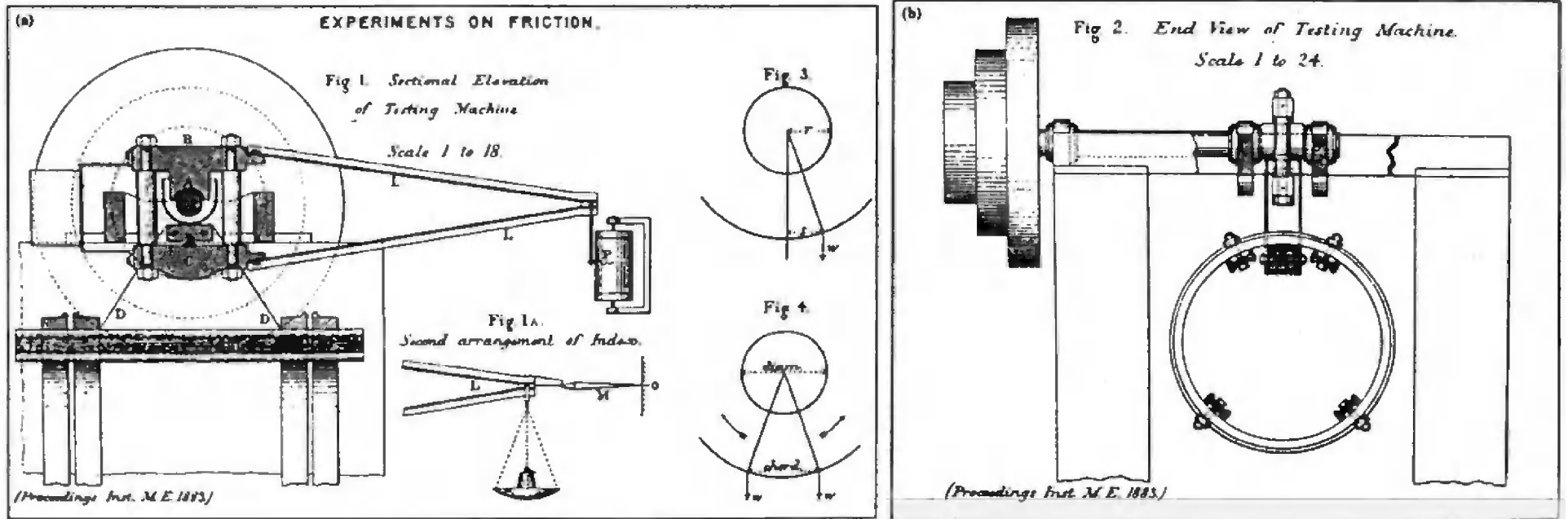
I. DESCRIPTION OF MACHINE.

In experimenting on the friction of lubricated bearings, and on the value of different lubricants, one of the difficulties which is first met with is the want of a method of applying the lubricant, which can be relied upon as sufficiently uniform in its action. All the common methods of lubrication are so irregular in their action that the friction of a bearing often varies considerably. This variation, though small enough to be of no practical importance, and to pass unnoticed, in the working of an ordinary machine, would be large enough utterly to destroy the value of a set of experiments, say, on the relative values of various lubricants; for it would be impossible to know whether an observed variation was due to a difference in the quality of the oil, or in its rate of application. The first problem therefore which presented itself, in the present experiments, was to devise a method of lubrication such as would be perfectly uniform in its action, and would form an easily reproducible standard with which to compare other methods. These conditions were best fulfilled by making the bearing run immersed in a bath of oil. By this method the bearing is always supplied with as much oil as it can possibly take; so that it represents the most perfect lubrication possible, and is a good standard with which to compare other methods. It is at all times perfectly uniform in its action. It is very easily defined and reproduced; and it also has the advantage that the temperature of the bearing can be easily regulated by gas jets under the bath. Experiment showed that the bath need not be full; the results obtained were the same when it was so nearly empty that the bottom of the journal only just touched the oil.





Tower Test Sistemi (1883)

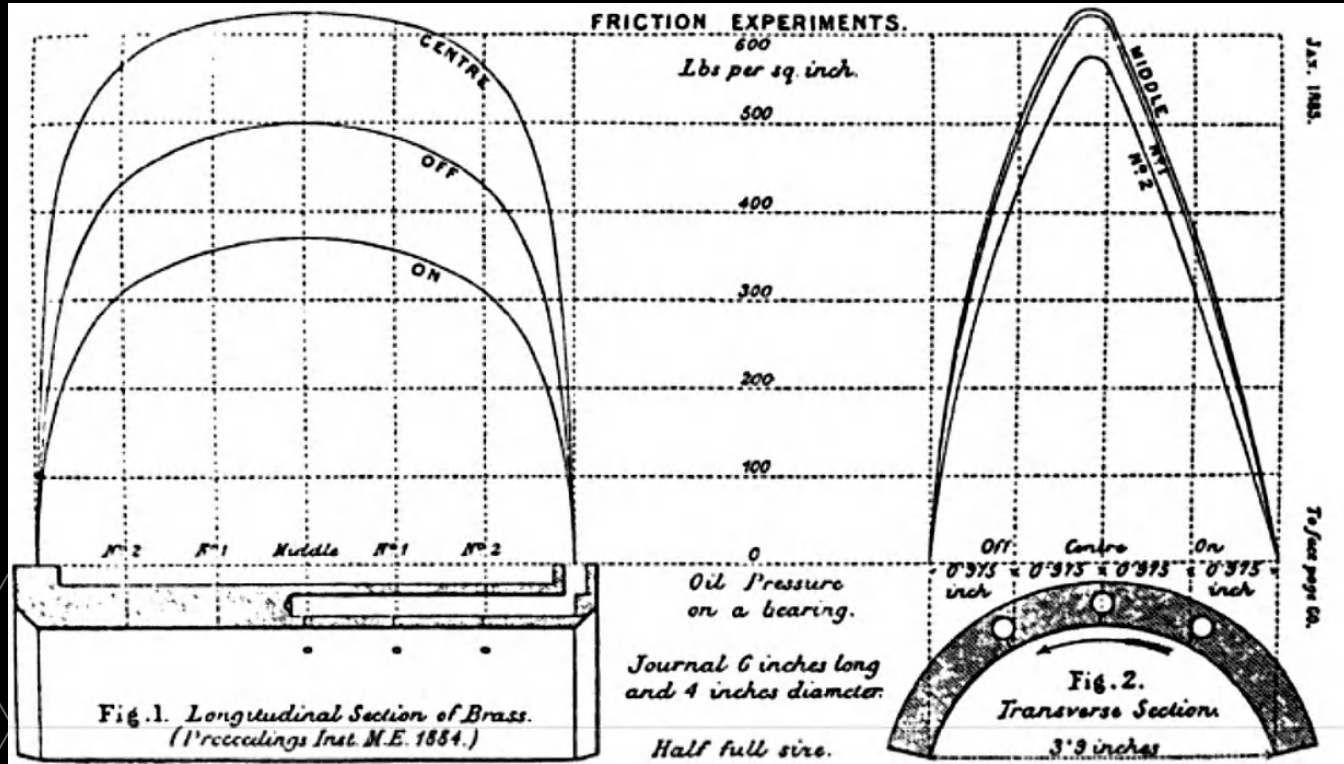


Orijinal makaleden alıntıdır.

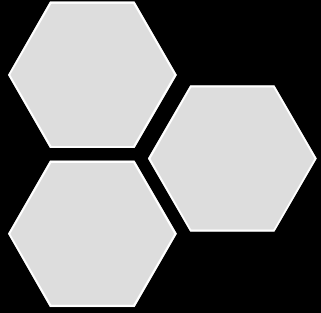


Tower Deneylerinin Sonuçları (1884)

Beaucamp Tower'ın yaptığı deneylerde, esas olarak değişik parametrelere göre (yük, hız vb) kaymalı yatağın çevresi ve genişliği boyunca basınç dağılımları elde edilmiştir. Bunların bir örneği aşağıda verilmiştir.



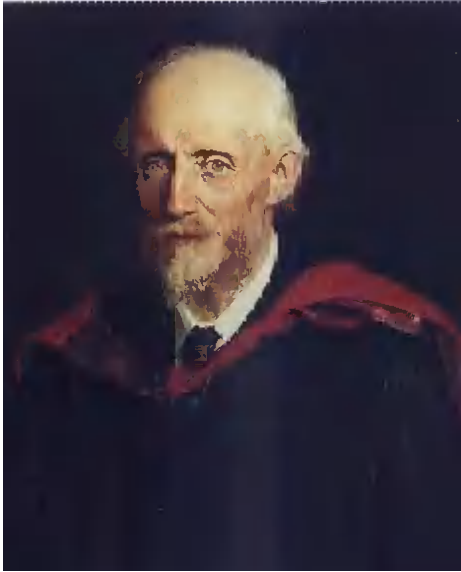
Orijinal
makaleden
alıntıdır.



Tower Sonuçları

1. Yatak yükünden bağımsız olarak, sürtünme direnci hemen hemen aynı kalmaktadır.
2. Sürtünme katsayısı çok düşük değerlerdedir (genelde 1/1000 düzeylerinde)
3. Sürtünme direnci artan hızla birlikte artmaktadır.



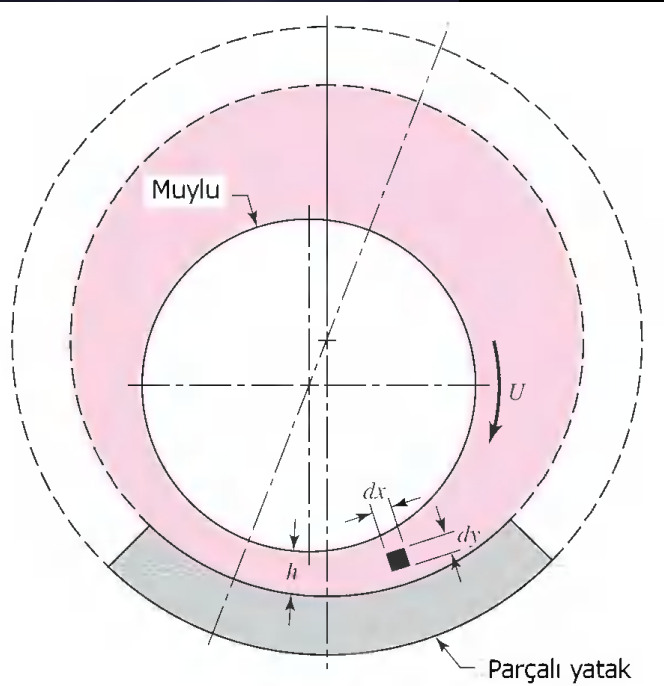


Hidrodinamik Yatak Teorisi

Reynolds Diferansiyel Denklemi

Kabuller:

- 1) Akışkana etkiyen bir dış kuvvet yoktur.
- 2) Film kalınlığı boyunca basınç sabittir.
- 3) Film kalınlığına oranla eğrilik yarıçapı çok büyüktür. Yüzeydeki hızlar uzunluk boyunca değişmez.
- 4) Yüzeye sınır moleküller yüzey ile aynı hıza sahiptir, arada bir kayma yoktur.
- 5) Akışkan Newtoniyendir.
- 6) Akış laminerdir.
- 7) Akışkanın ataleti ihmal edilebilir.
- 8) Film kalınlığı boyunca viskozite sabittir.



Osborne Reynolds, "Theory of Lubrication, Part I," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1886.



Original makale

IV. *On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. BEAUCHAMP TOWER's Experiments, including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil.*

By Professor OSBORNE REYNOLDS, LL.D., F.R.S.

Received December 29, 1885,—Read February 11, 1886.

[PLATE 8.]

CONTENTS.

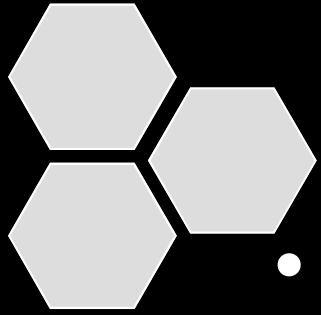
SECTION I.—INTRODUCTORY.

	ARTICLE.
Discordance of experimental results	1
Mr. Tower's discovery of the separating film of oil, &c.	2
The idea of a hydrodynamical theory of lubrication	3
The equation of lubrication mentioned before Section A, Montreal, and subsequently integrated	4
The comparison of the theoretical results with experimental shows a temperature effect	5
Determination of the variation of viscosity of olive oil brings the theory into complete accordance with experiments, and shows how various circumstances affect the results	6
The difference in the radii of brass and journal, and the point of nearest approach of brass to journal, and explanation of increased heating on first reversal.....	7
The limits of complete lubrication, incomplete lubrication, and necking	7A
The general arrangement of the paper	8

SECTION II.—THE PROPERTIES OF LUBRICANTS.

Definition of viscosity	9
The character of viscosity	10
The two viscosities	11
Experimental determination of the value of μ for olive oil, &c., figs. 2 and 3, Table I.	12
The comparative values for μ for different fluids and different units	13





Hidrodinamik Yatak Teorisi

- Reynolds'un orijinal makalesinden alıntılar:

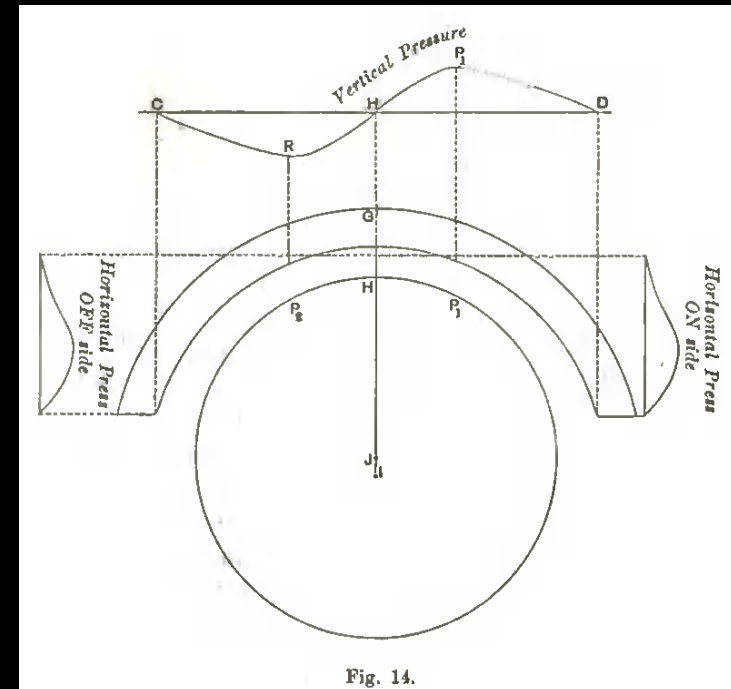
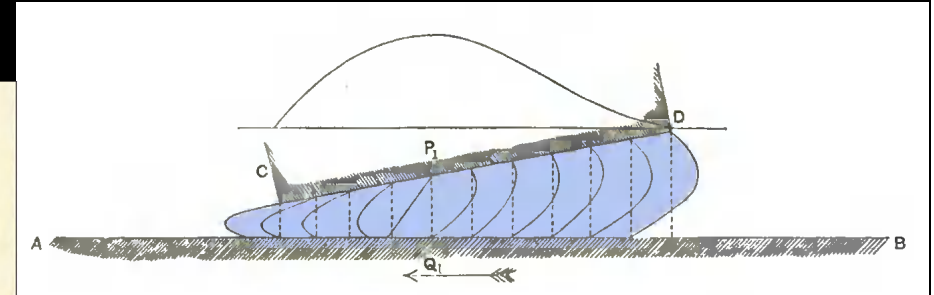
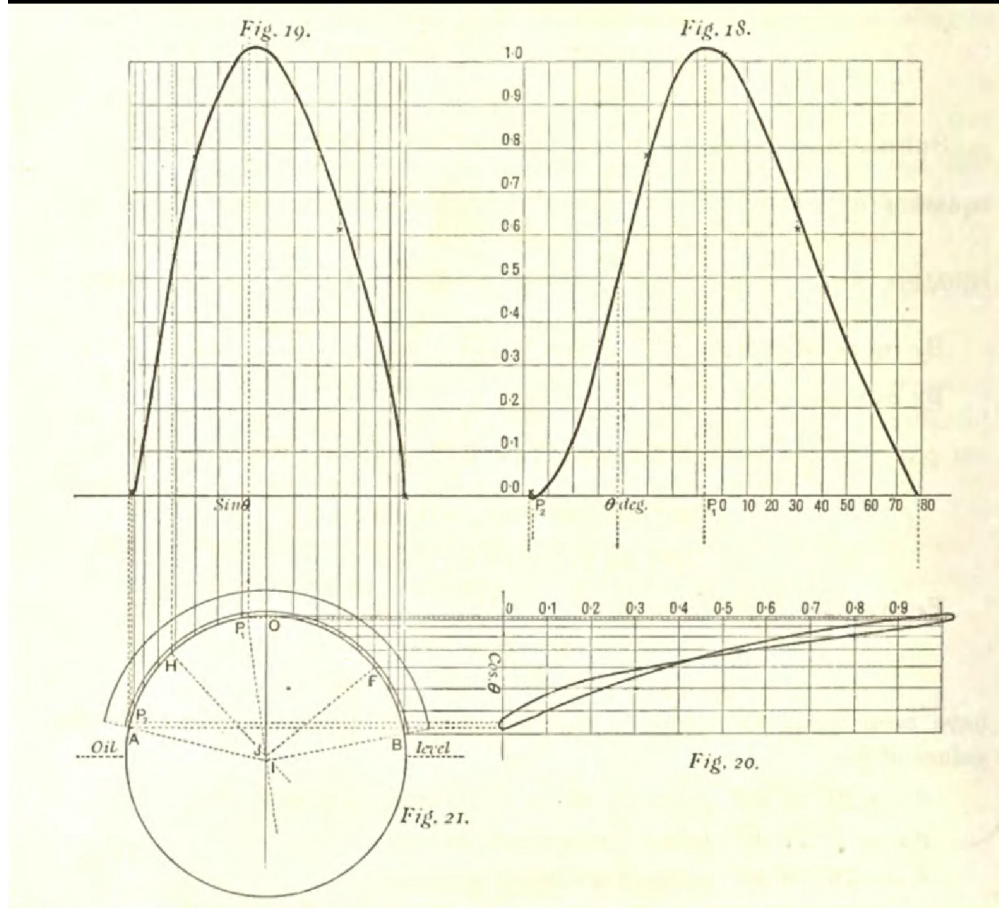
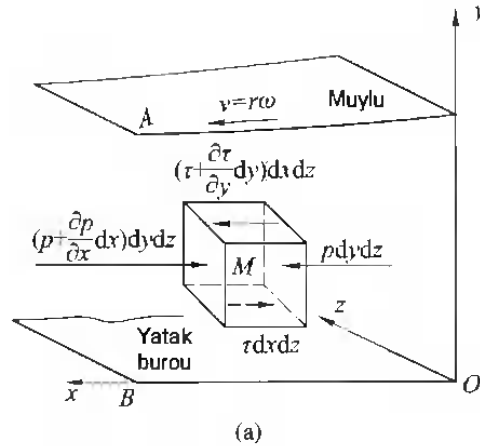


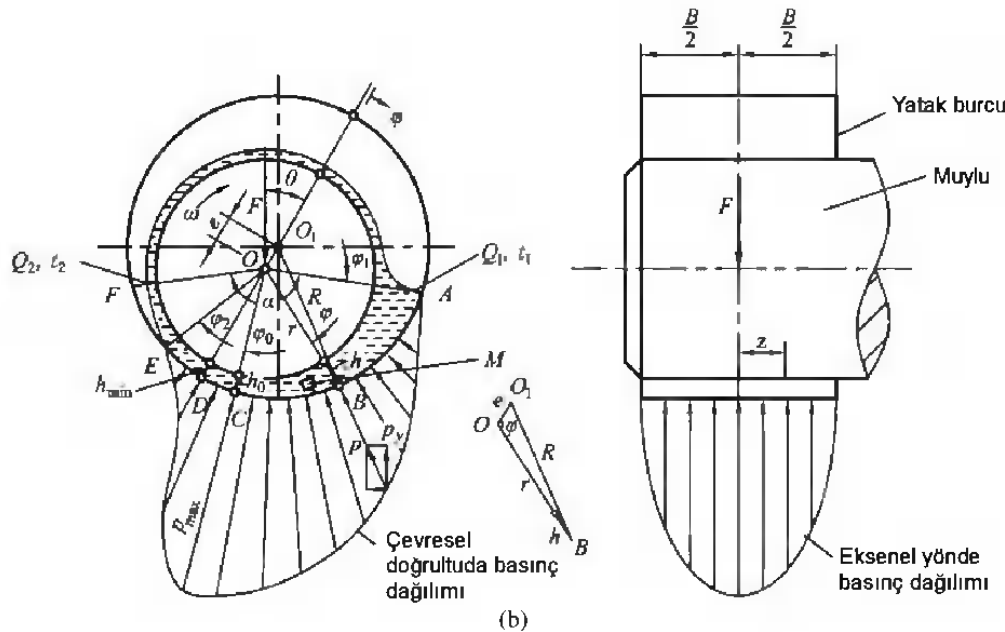
Fig. 14.

Reynolds Diferansiyel Denklemini

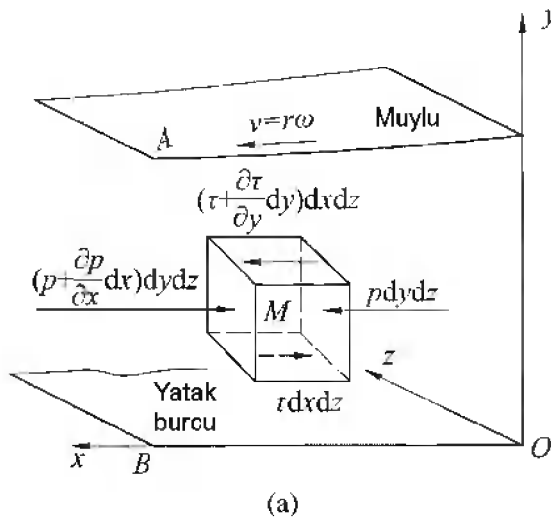


$$\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx\right) dydz + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy\right) dx dz + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz\right) dx dy - \sigma_x dydz - \tau_{yx} dx dz - \tau_{zx} dx dy = 0$$

X- doğrultusunda kuvvetlerin dengesi yazılırsa



Reynolds Diferansiyel Denklemi



Sadeleştirmeler ile

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0$$

Burada p basıncı gösterebiliriz. Yukarıdaki denklemde $p = -\sigma_x$ koyarak düzenleme yapılırsa

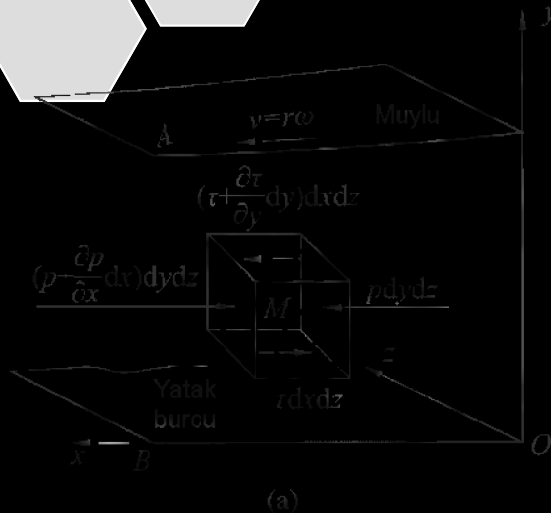
$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$





Reynolds Diferansiyel Denklemi

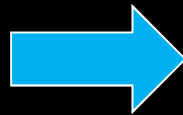
Akışkan Newtoniye ise



$$\tau_{yx} = \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \quad \tau_{zx} = \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial z}$$

Burada p basıncı gösterebiliriz. Yukarıdaki denklemde $p = -\sigma_x$ koyarak düzenleme yapılırsa

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

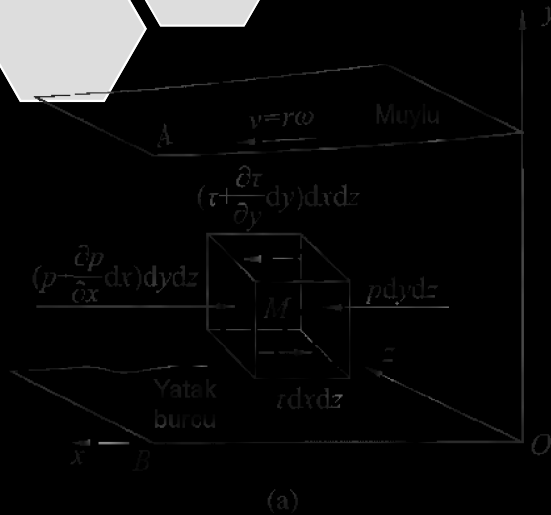


$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$





Reynolds Diferansiyel Denklemi



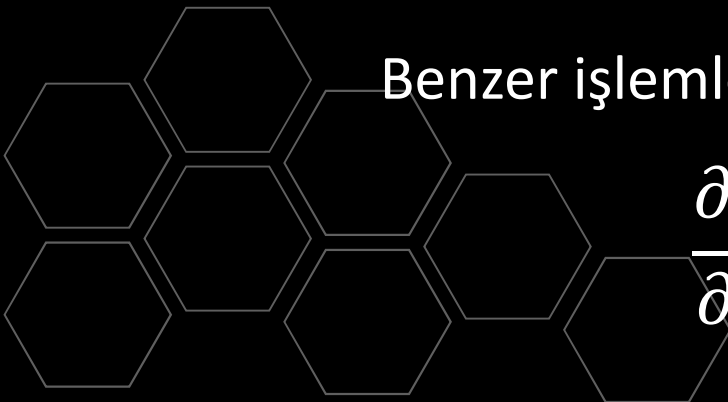
$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

z doğrultusunda akışkan hızı u nun değişimi y doğrultusuna göre çok düşüktür. Buna göre

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) \rightarrow \frac{\partial p}{\partial x} = \eta \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Benzer işlemler z- doğrultusunda yapılırsa;

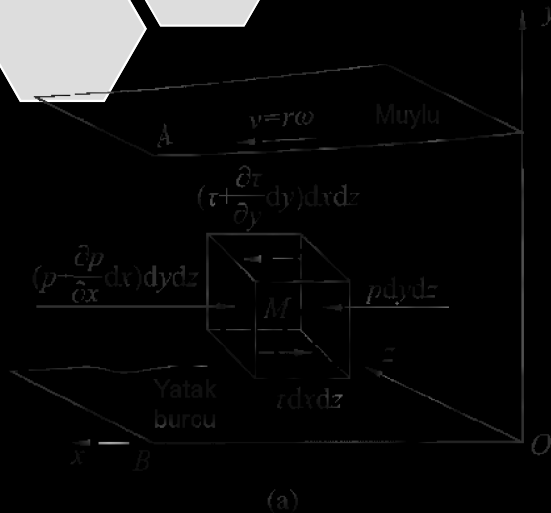
$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$





Reynolds Diferansiyel Denklemini

Hızlar için 2 defa integrasyon gerekir.
Sınır şartları

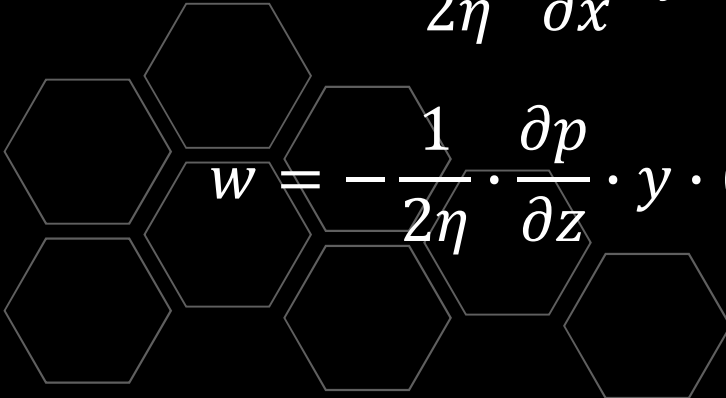


$$\left. \begin{aligned} u &= U_1, & w &= W_1 & \text{at } y &= 0 \\ u &= U_2, & w &= W_2 & \text{at } y &= h \end{aligned} \right\}$$

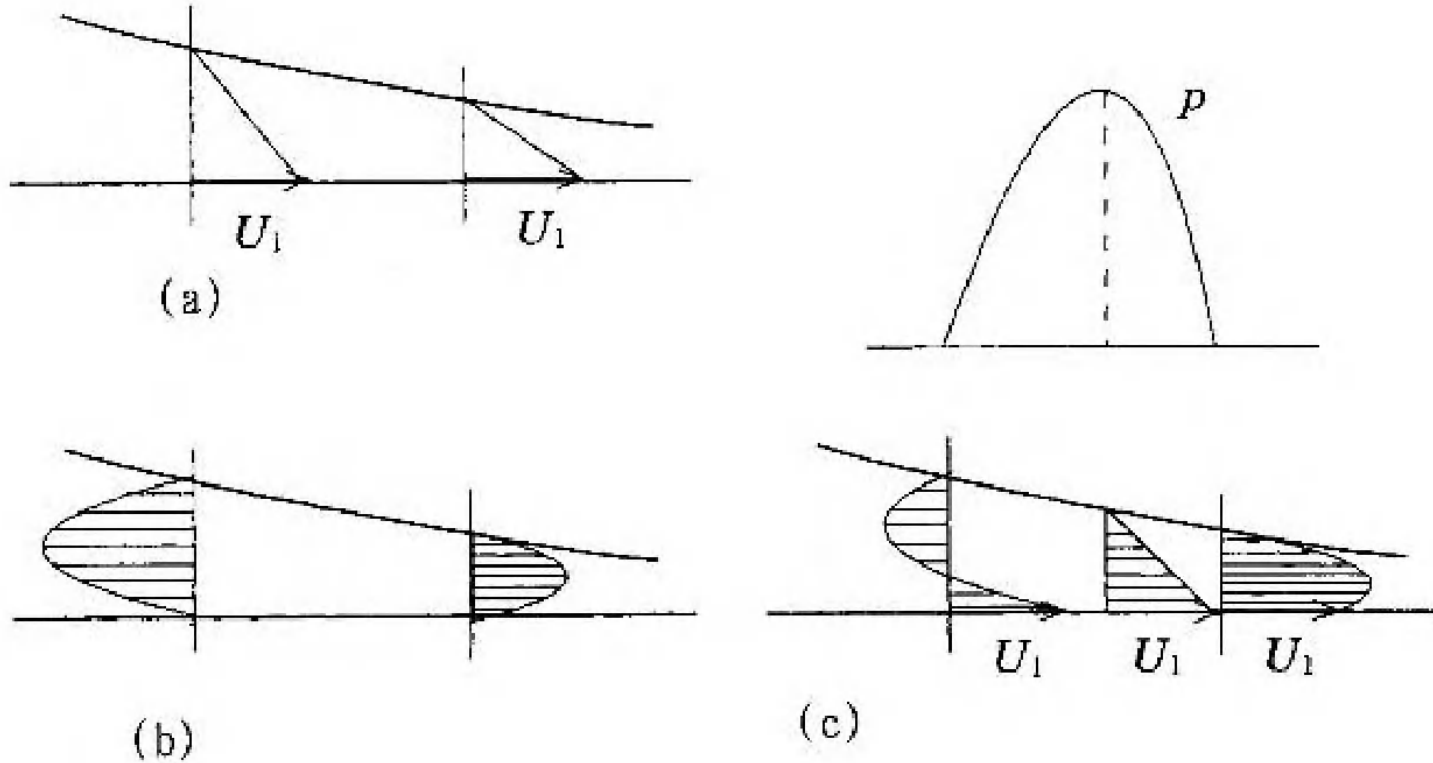


$$u = -\frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot y \cdot (h - y) + \left[\left(1 - \frac{y}{h}\right) \cdot U_1 + \frac{y}{h} \cdot U_2 \right]$$

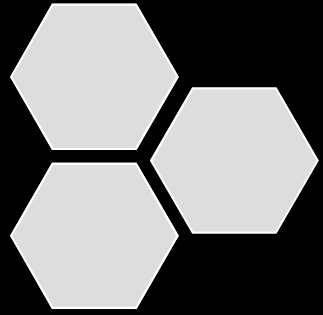
$$w = -\frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \cdot y \cdot (h - y) + \left[\left(1 - \frac{y}{h}\right) \cdot W_1 + \frac{y}{h} \cdot W_2 \right]$$



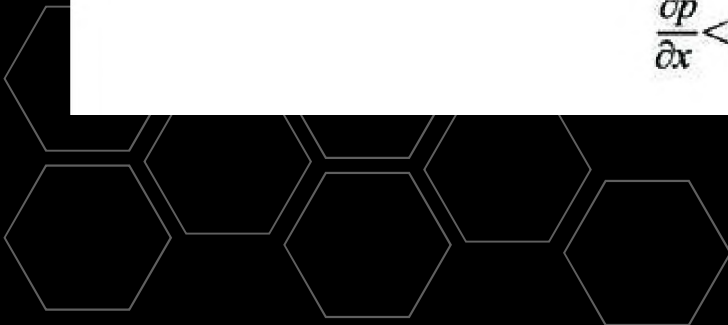
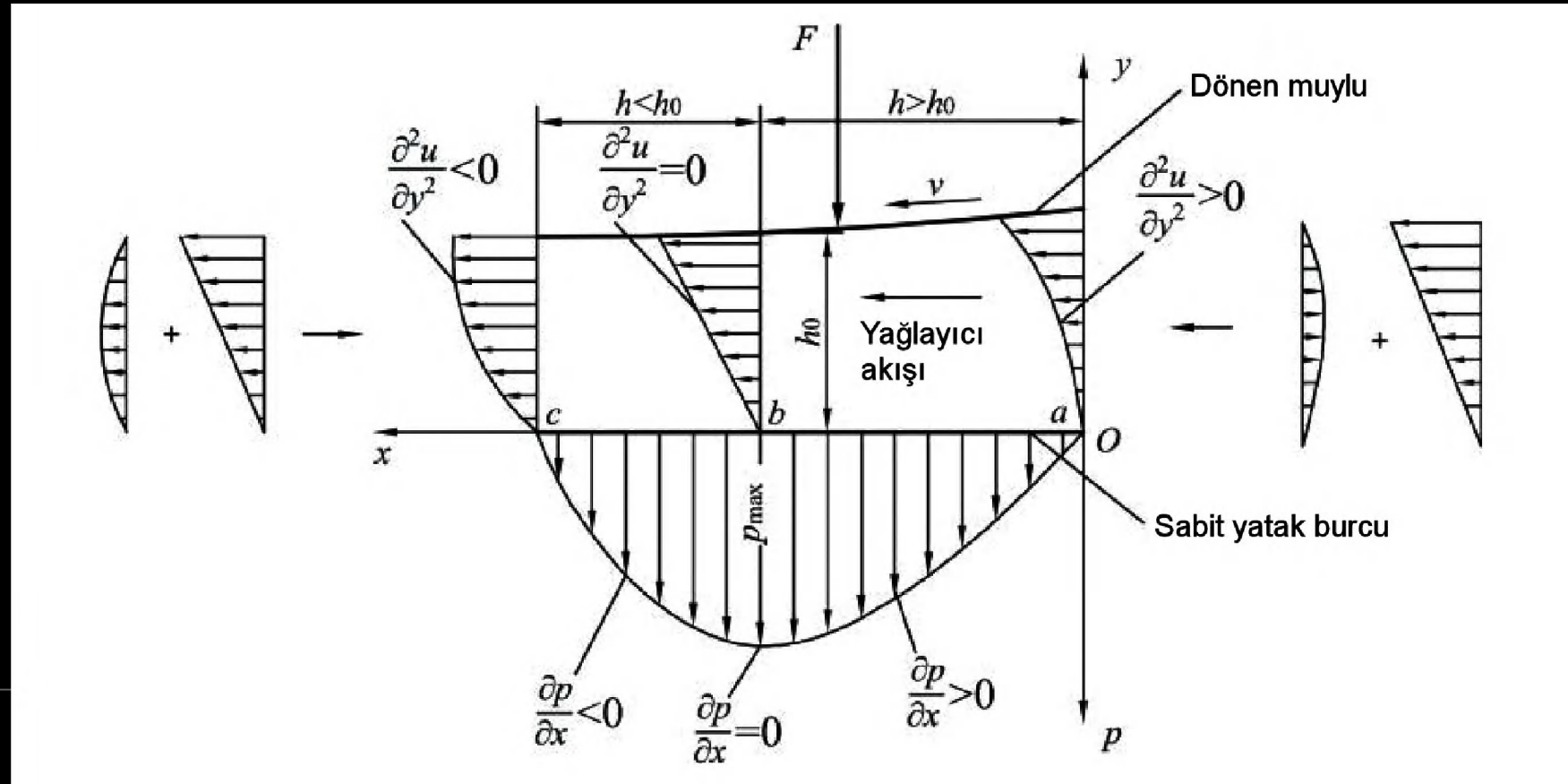
Akış durumları



- a) Yüzey hareketi ile akış (Couette Flow)
- b) Basınç kaynaklı akış (Poiseuille flow)
- c) Toplamları



Reynolds Diferansiyel Denklemi



Akışın sürekliliği

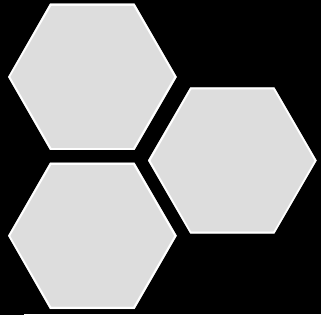
Sıkıştırılamaz akışkan için süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

0 dan yağ filmi kalınlığı (h) boyunca integrasyon yapılırsa

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy + \int_0^h \frac{\partial w}{\partial z} dy + \left[v \right]_0^h = 0$$

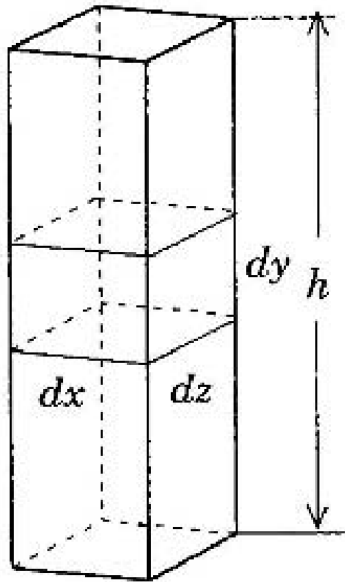




Akışın sürekliliği

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy + \int_0^h \frac{\partial w}{\partial z} dy + \left[v \right]_0^h = 0$$

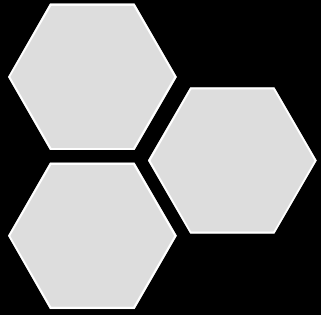
Denklem hızlar cinsinden yeniden yazılırsa



$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dy + \frac{\partial}{\partial z} \int_0^h w dy - U_2 \frac{\partial h}{\partial x} - W_2 \frac{\partial h}{\partial z} + (V_2 - V_1) = 0$$

$$\int_0^h u \cdot dy = -\frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{h}{2} \cdot (U_1 + U_2)$$

$$\int_0^h w \cdot dy = -\frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{h}{2} \cdot (W_1 + W_2)$$



Reynolds Diferansiyel Denklemi

En genel hal

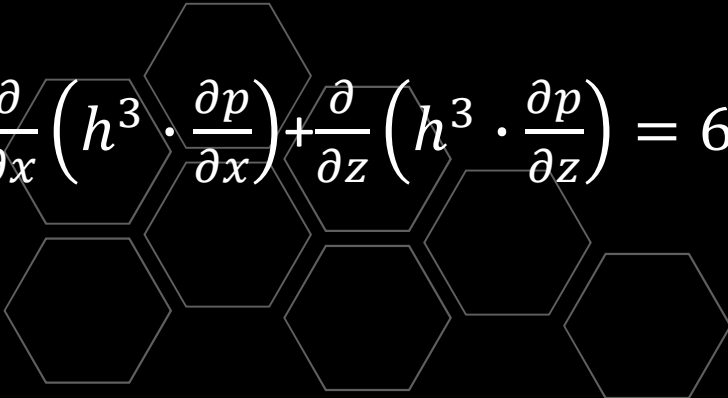


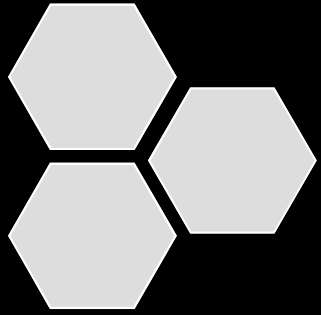
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot [(U_1 - U_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + (W_1 - W_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial z} + h \cdot \frac{\partial}{\partial z} (W_1 + W_2) + 2 \cdot (V_1 + V_2)]$$

$V_1=W_1=W_2=0$ değerleri denklemde yerine konursa



$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot [(U_1 - U_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + 2 \cdot V_2]$$



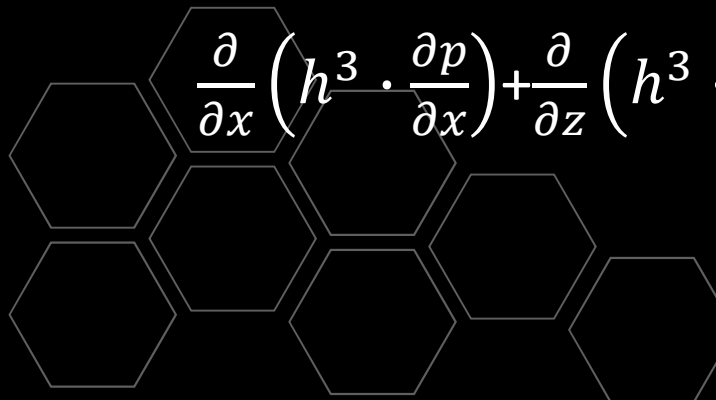


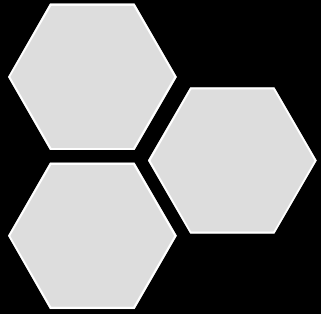
Reynolds Diferansiyel Denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \cdot [(U_1 - U_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + 2 \cdot V_2]$$

Eğer sınır yüzeyler rijit olursa



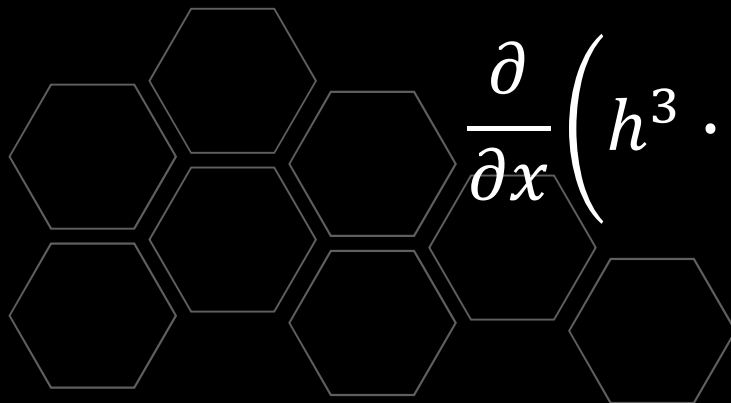

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \cdot [(U_1 - U_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + 2 \cdot V_2]$$



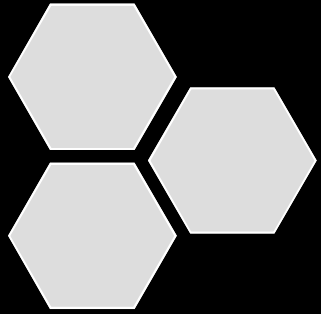
Reynolds Diferansiyel Denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \cdot [(U_1 - U_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + 2 \cdot V_2]$$

Tek boyutlu akış durumu ve düşey hareket yok



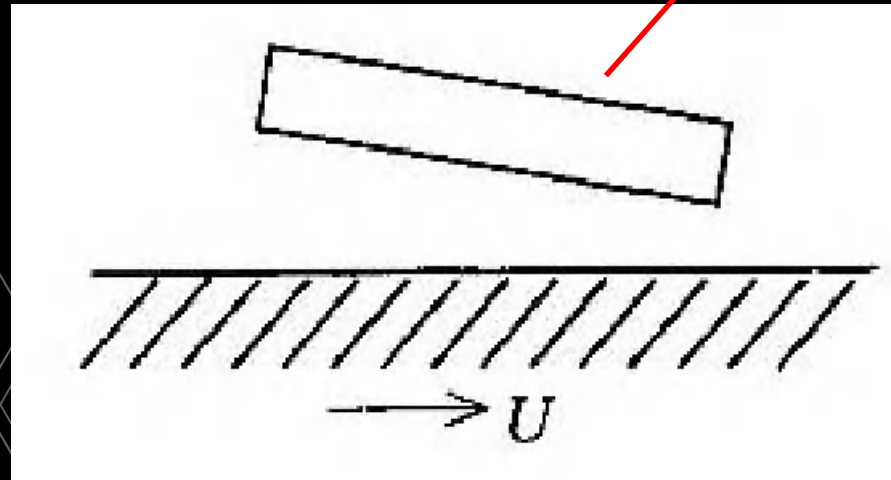
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6 \cdot \eta \cdot U_1 \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$$

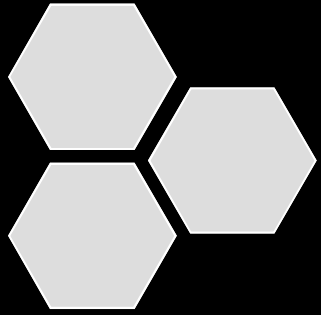


Yağ filmi oluşma mekanizmaları

- Kama etkisi (Yüzeylerden biri sabit olsun)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \cdot \left[U_1 \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial U_1}{\partial x} + 2 \cdot V_2 \right]$$

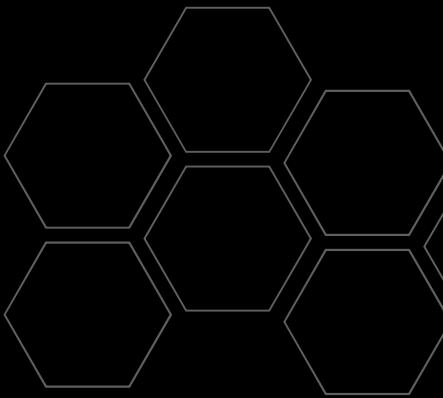
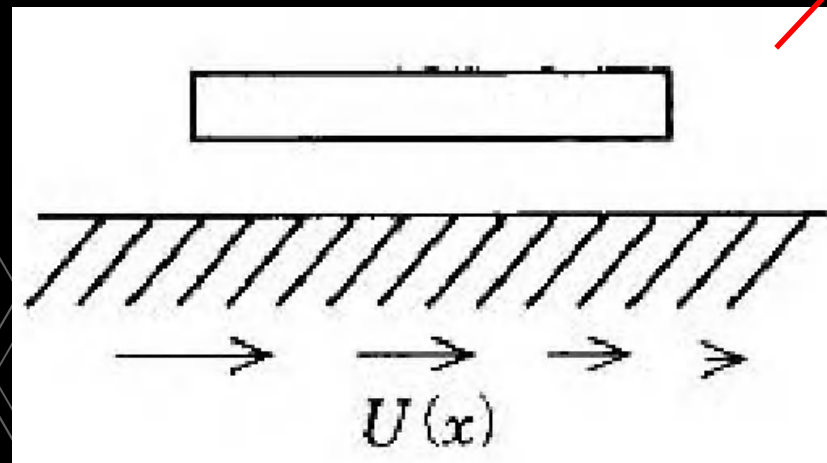


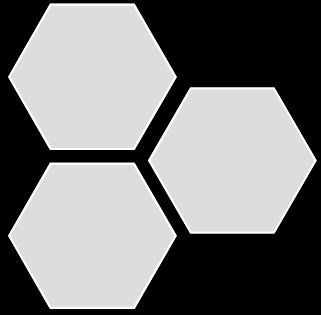


Yağ filmi oluşma mekanizmaları

- Elastik yüzey

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \cdot \left[U_1 \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial U_1}{\partial x} + 2 \cdot V_2 \right]$$

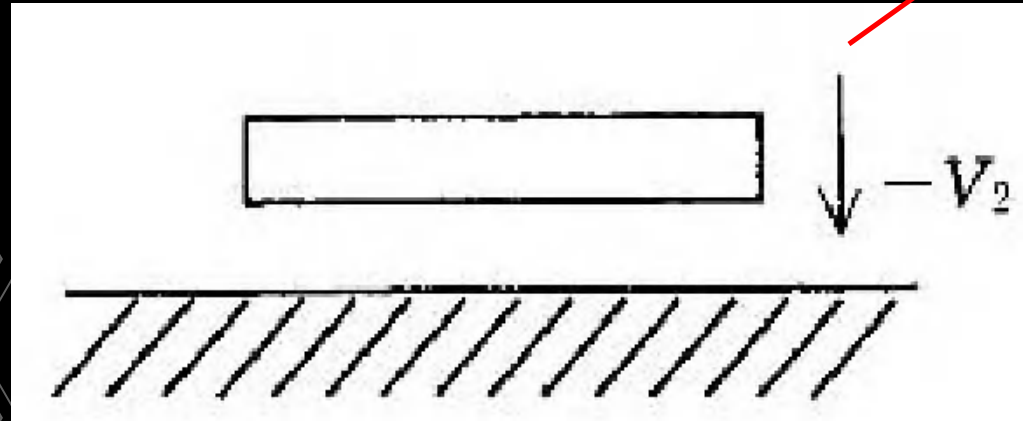


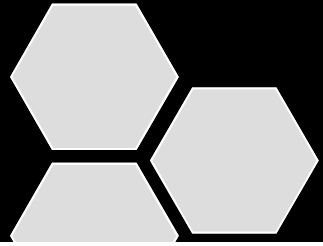


Yağ filmi oluşma mekanizmaları

- Film yastığı

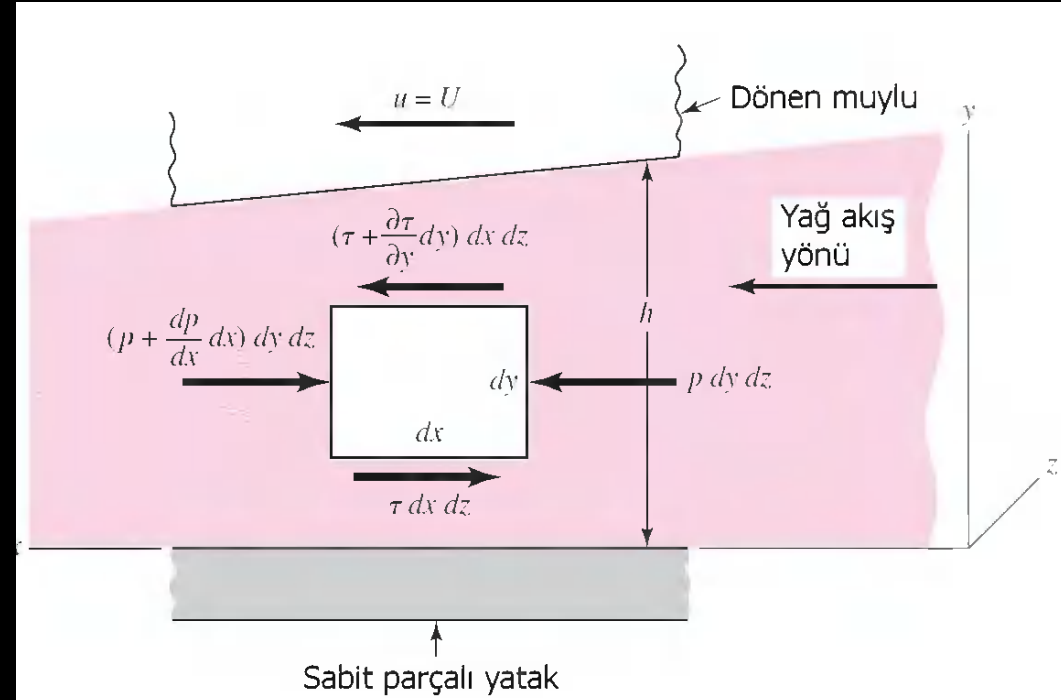
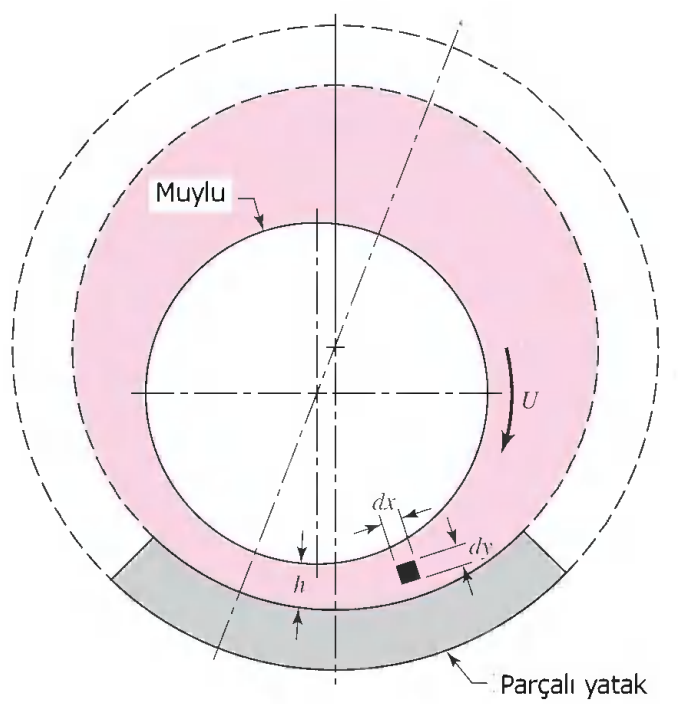
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \cdot \left[U_1 \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial U_1}{\partial x} + 2 \cdot V_2 \right]$$





Hidrodinamik Yatak Teorisi

Reynolds Diferansiyel Denklemini



X- doğrultusunda kuvvetlerin dengesi yazılırsa

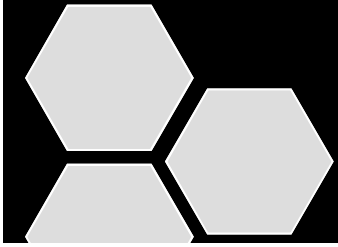
$$\sum F_x = p dy dz - \left(p + \frac{dp}{dx} dx \right) dy dz - \tau dx dz + \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy \right) dx dz = 0$$

Basitleştirmeler yapılırsa



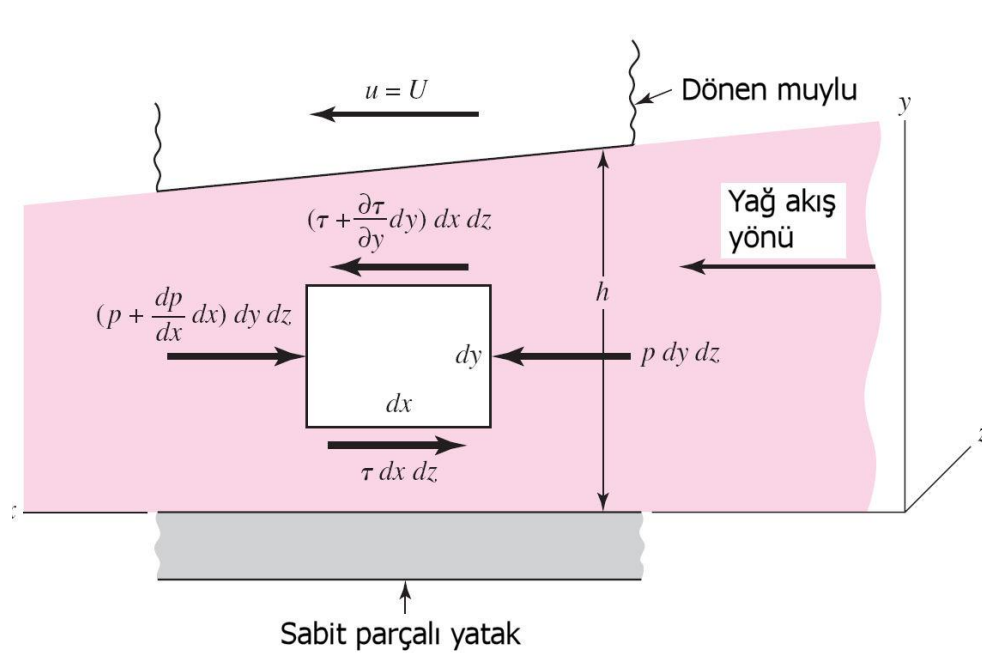
$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau}{\partial y}$$





Hidrodinamik Yatak Teorisi

Reynolds Diferansiyel Denklemi



$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

Akışkan Newtoniyendir. (1)

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

$$\frac{dp}{dx} = \eta \cdot \frac{d^2 u}{dy^2}$$

Basınç y koordinatına göre sabittir.

Hız için gerekli integraller yapılırsa (2 kere)

$$u = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y^2 + C_1 \cdot y + C_2$$

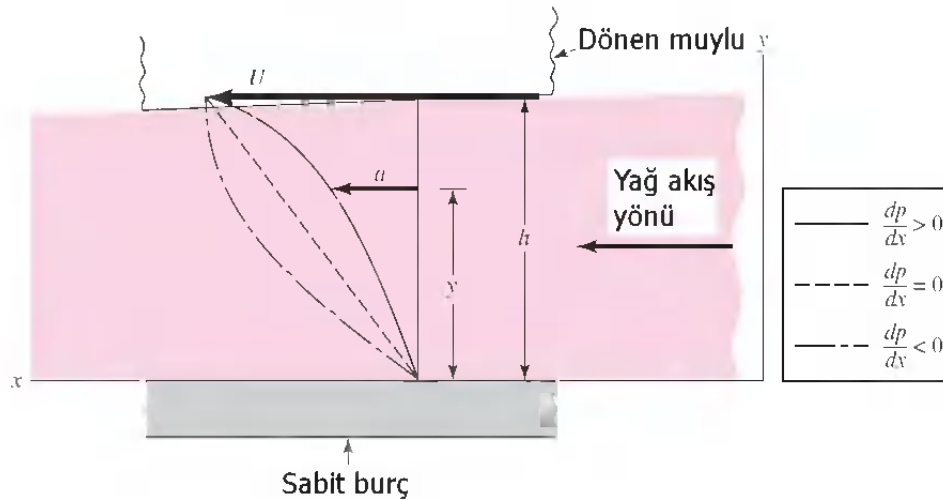
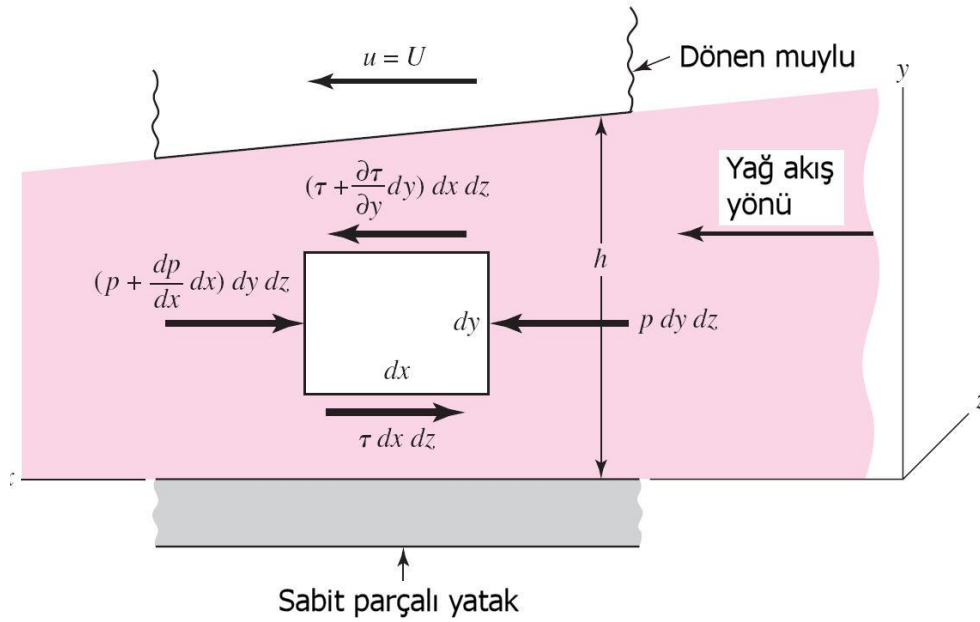
C_1 ve C_2 için sınır şartları

$y=0$ da $u=0$
 $y=h$ da $u=U$



Hidrodinamik Yatak Teorisi

Reynolds Diferansiyel Denklemi



Sabitler:

$$C_1 = \frac{U}{h} - \frac{h}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx}, \quad C_2 = 0$$

Hız denklemi yeniden düzenlenirse

$$u = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot (y^2 - h \cdot y) + \frac{U}{h} \cdot y$$

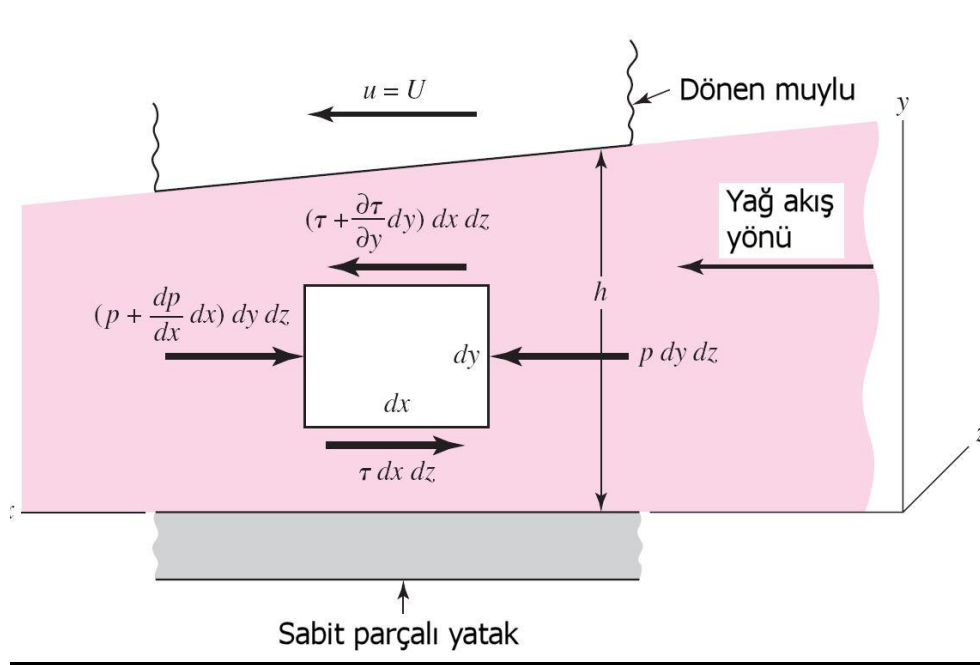
Görüldüğü gibi hız bir lineer ve bir parabolik değişimin süperpozisyonudur.

Maksimum basınç halinde $dp/dx=0$ dir. Bu durumda da hız dağılımı lineerdir.



Hidrodinamik Yatak Teorisi

Reynolds Diferansiyel Denklemi



Maksimum basınçta hız

$$u = \frac{U}{h} \cdot y$$

Akışkan sıkıştırılmaz olduğuna göre her noktada debi aynıdır.

$$Q = \int_0^h u \cdot dy$$

$$u = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot (y^2 - h \cdot y) + \frac{U}{h} \cdot y$$

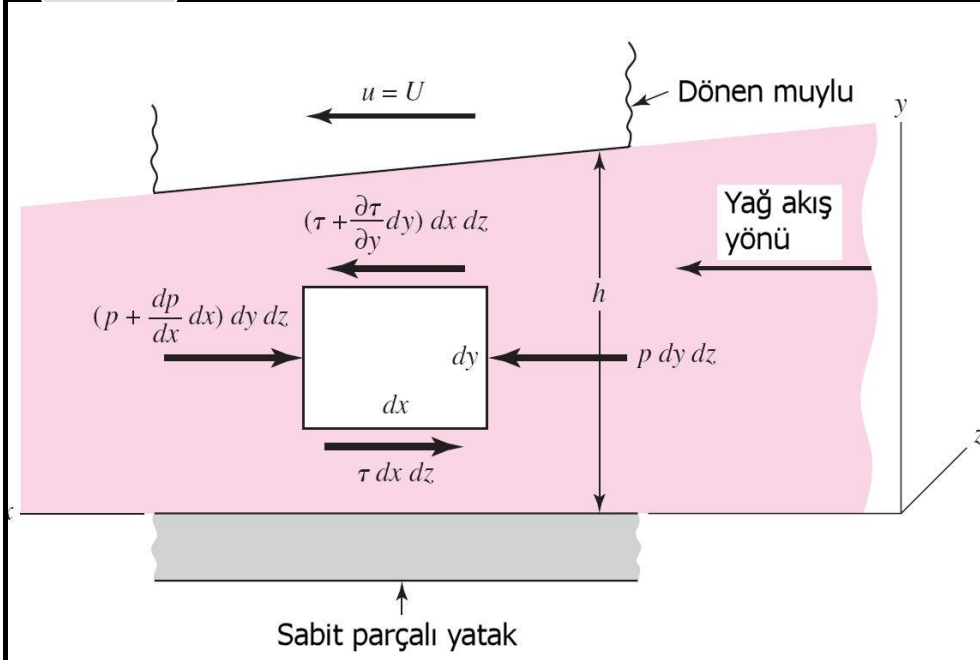
Denklemini debi (Q) denkleminde yerine konursa

$$Q = \frac{U \cdot h}{2} - \frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx}$$

Sıkıştırılmazlık şart $dQ/dx=0$

Hidrodinamik Yatak Teorisi

Reynolds Diferansiyel Denklemini



$$\frac{dQ}{dx} = \frac{U}{2} \cdot \frac{dh}{dx} - \frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} \right) = 0$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \right) = 6 \cdot U \cdot \frac{dh}{dx}$$

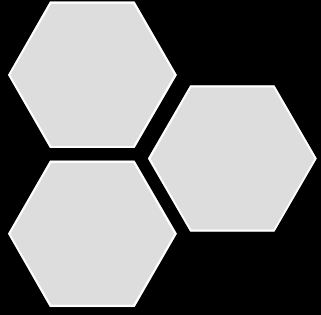
Bir boyutlu akış için Reynolds diferansiyel denklemdir.

Viskozite her zaman sabit kabul edilirse

$$\frac{d}{dx} \left(h^3 \cdot \frac{dp}{dx} \right) = 6 \cdot U \cdot \eta \cdot \frac{dh}{dx}$$

Yan akımlar ve düşey doğrultuda akış ihmal edilmiş haldir. z doğrultusunda akış varsa

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot U \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$$



Uygulama - Aquapanning

