

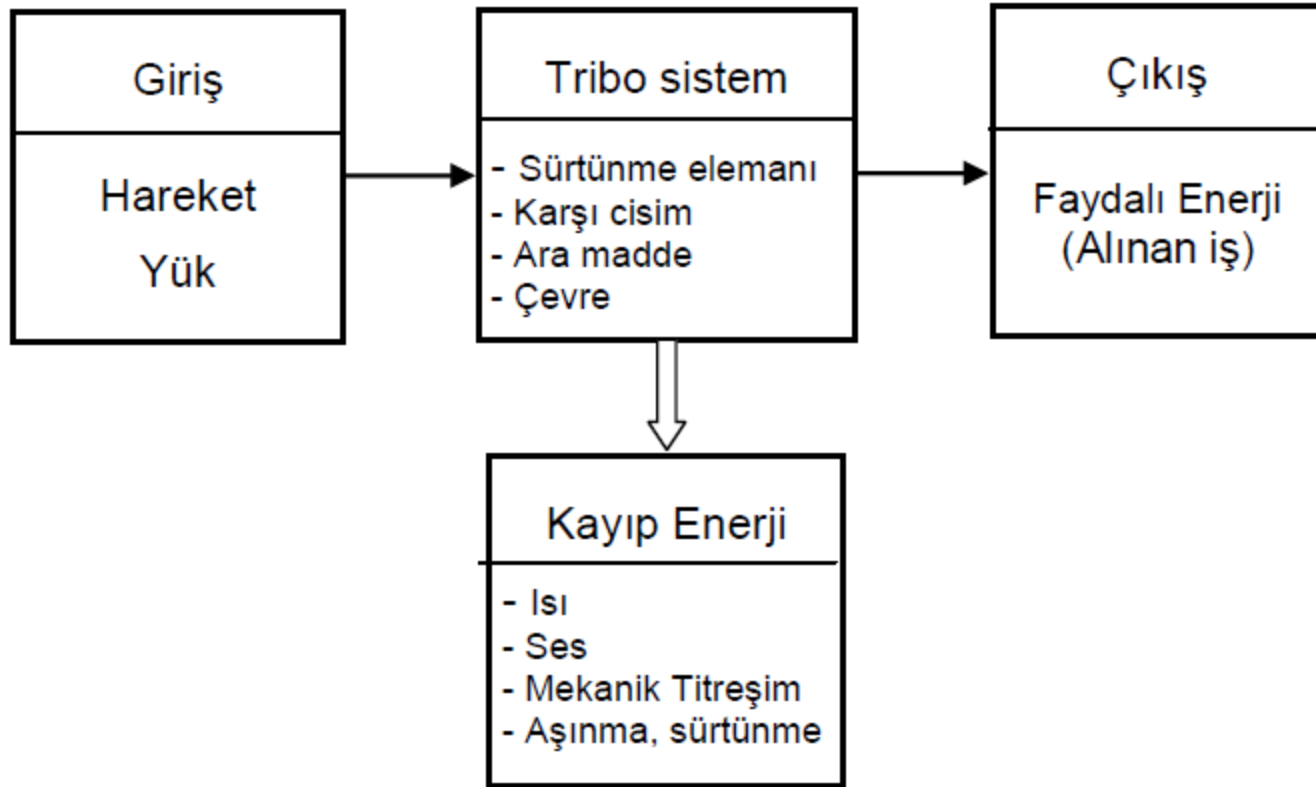
BÖLÜM

13

TRİBOLOJİ

Temas eden ve birbirine göre izafi harekette bulunan iki makina elemanının temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak sıcaklık yükselişi ve ısınma, aşınma ve enerji kaybı oluşur. Sürtünmenin ve doğurduğu etkilerin azaltılması için düşünülen en yaygın tedbir izafi hareket eden yüzeyler arasına bir yağlayıcı konulmasıdır. Sürtünme, aşınma ve yağlama konularını ve bunlarla ilgili fiziksel olayları inceleyen bilim dalı **Triboloji** olup makina tasarımında en önemli konulardan biridir.

Tribolojik sistem esas olarak, karşılıklı etkileşen esas sürtünme elemanı, karşı cisim ve ara madde (yağ) gibi elemanlarda çalışma şartları (hız, kuvvet, ısı etkileri ve çevre şartları vb.) etkisiyle ortaya çıkan aşınma olayını incelemektedir. Şekil-13.1 tipik bir tribo sistemde enerji dengesini göstermektedir.



Şekil-13.1 Tribolojik sistemde enerji durumu

Triboloji bilim dalının ilgi alanından olan yatak, bir eleman veya parçanın diğerine göre izafi (bağıl) hareketine yardımcı olan ve parçaları bu harekete uygun biçimde konumlandıran düzeneğe veya makina elemanıdır. Bu bölümde yatakların analizi için Triboloji konusu ele alınacak, sürtünme başta olmak üzere aşınma mekanizması ve yağlama teorisi ve kullanılabilecek yağlayıcıların temel özellikleri incelenecektir. Sürtünme ve aşınma mekanizmaları ve oluşum şekilleri karşılaşılabilen şekilleriyle kısaca değerlendirilip yağlar ve yağlama özellikleri üzerinde durulacaktır. Yağlama tipi ve sürtünme çeşitlerine göre yatakların tasarım esasları ayrı bölümlerde geniş bir şekilde incelenecektir.

13.1 SÜRTÜNME

13.1.1 Genel Bilgiler

Genel olarak temasta olan ve izafi hareket eden iki cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri direnç **sürtünme** olarak tarif edilir. Bir cisim diğer bir cisim üzerinde kayarken birbirlerine kayma yüzeyine paralel bir kuvvet uygularlar. Bu kuvvet **sürtünme kuvveti** olarak tanımlanır ve cisimlerin izafi hareketine ters yöndedir. Birbiriyle temasta olan cisimler arasındaki izafi hareket kayma yanında yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma şeklinde de olabilir. Bu üç hareket şekline göre de sürtünme kayma, yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma sürtünmesi olarak tanımlanır.

İzafi hareket yapan yüzeyler arasına bir ara eleman olarak yağlayıcı madde konulması veya konulmaması durumuna göre sürtünme kuru, sınır ve sıvı sürtünme olmak üzere üç şekilde de incelenebilmektedir. Temas eden yüzeylerin ayrılma veya ayrılmama durumunu izah eden bu tür sürtünme durumları ayrı ayrı incelenecektir. Aşağıda kısaca teknikte karşılaşılan sürtünme mekanizmaları kısaca analiz edilmiştir.

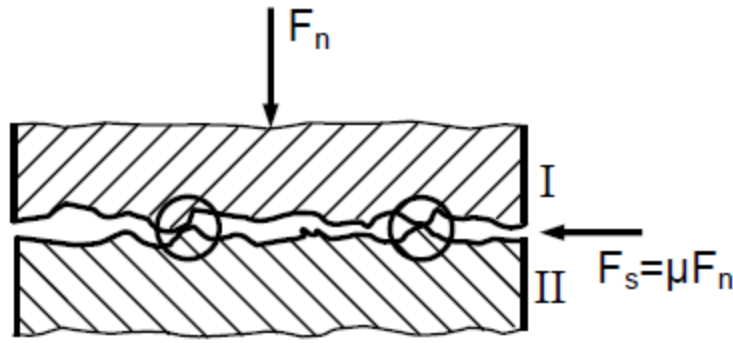
13.1.2 Kuru Sürtünme

İzafi hareket halinde olan iki kuru (yağlanmamış) parça temas yüzeylerindeki sürtünme durumu olup yüzeyler birbiri üzerinde pürüzleri temas ederek kayar. Yüzeyler arasında üçüncü bir malzeme yoktur (13.2a). Teorik olarak kuru sürtünme modeli Şekil-13.2b'de gösterilmiş olup Coulomb kanunu esas alınırsa izafi hareket yapan ve F_n normal kuvveti etkisinde bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete ters

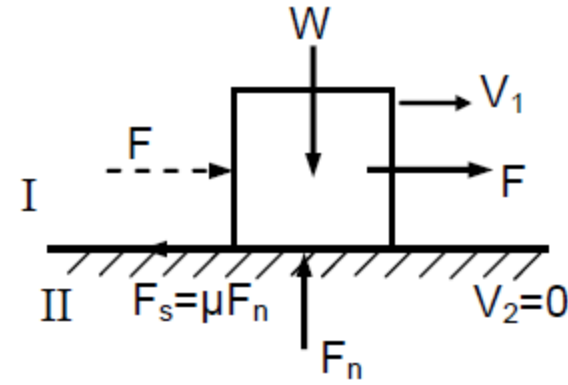
$$F_s = \mu F_n \quad (13.1)$$

şeklinde tanımlanan bir sürtünme kuvvetinin oluştuğu görülür. Burada μ sürtünme katsayısıdır.

Şekil-13.2b'den görüldüğü gibi katı cisimlerin birine (W ağırlığındaki bloğa) bir F kuvveti uygulanırsa (çekme veya itme şeklinde) iki durum incelenebilir. Birinci durum, kuvvete rağmen cisimlerin birbirleri üzerinde kayma hali (sabit kalmaları) olup bu durumda yüzeyler arasında statik veya durgun sürtünme şeklinde tanımlanan bir direnç oluşmaktadır. Bu hal için kuvvetlerin dengesinden $F_s=F$ yazılır. Önceki bölümlerde incelenen kavrama ve frenler gibi sürtünme esaslı elemanlarda bu tür sürtünme söz konusudur. İkinci durumda F etkisinde yüzeyler birbiri üzerinden kaymaktadır. Kinetik sürtünme denilen bu durumda F_s sürtünme kuvveti F kuvvetinden daha küçük ve harekete ters yöndedir. Pratikte bu tür sürtünme söz konusu olup aşınma, sıcaklık yükselişi ve enerji kaybı gibi olaylar bu sürtünme sonucu ortaya çıkar.



(a)



(b)

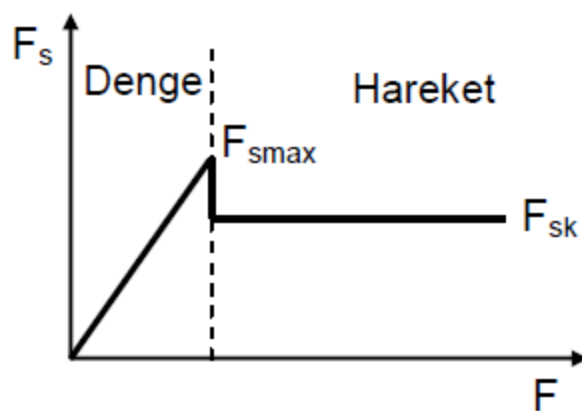
Şekil-13.2 Kuru sürtünme modeli

Bu genel değerlendirmeden anlaşıldığı gibi uygulamada sürtünme hem istenilen hem de istenilmeyen bir durum olarak ortaya çıkmaktadır. Kavrama, fren ve sürtme çarkları gibi makina elemanlarında sürtünme faydalı bir parametre olduğundan artırılması arzu edilir. Bu elemanların dışındaki bütün izafi hareket eden yüzeylerde oluşan sürtünme durumu arzu edilmez ve azaltılması istenir.

Coulomb-Amontons kanunu olarak bilinen eşitlik (13.1) yeniden düzenlenirse, sürtünme kuvvetinin normal kuvvetle orantılı olduğu ve

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (13.2)$$

şeklinde sürtünme katsayısı hesaplandığı görülür. Bu analize göre F arttıkça F_s kuvvetinin arttığı ve bir F_{smax} değerine erişebildiği görülür. Eğer $F > F_{smax}$ olursa blok kaymaya başlar ve blok hareket eder etmez F_s , F_{smax} değerinden daha küçük bir F_{sk} değerine düşer. O andan sonra blok artan bir hızla harekete devam eder ancak kinetik sürtünme kuvveti olarak tanımlanan F_{sk} yaklaşık sabit kalır. Şekil-13.3 bu davranışı göstermektedir.



Şekil-13.3 Sürtünme kuvveti-hareket ettiren kuvvet ilişkisi

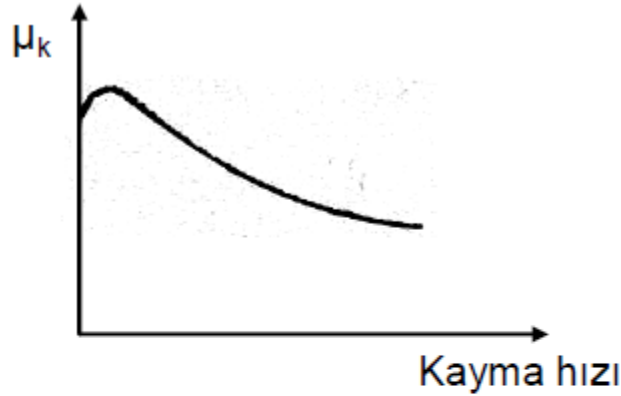
Statik sürtünme katsayısı μ 'ye benzer şekilde kinetik (dinamik) sürtünme katsayısı da

$$\mu_k = \frac{F_{sk}}{F_n} \quad (13.3)$$

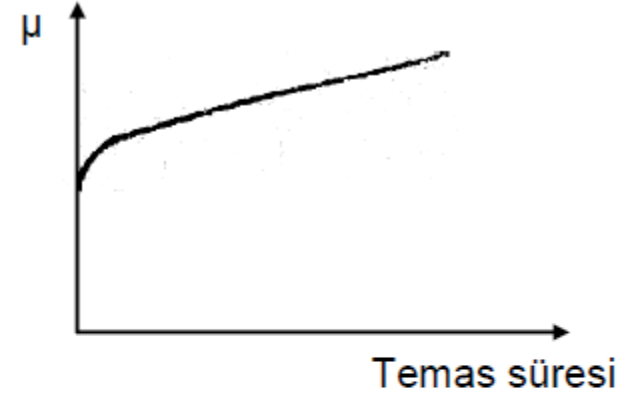
olarak tanımlanmaktadır. Bu analizden aşağıdaki sonuçlar elde edilebilmektedir.

- Sürtünme kuvveti dolayısıyla sürtünme katsayısı nominal temas alanına bağlı değildir.
- Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır.
- Kinetik sürtünme katsayısı statik sürtünme katsayısından daha küçüktür.
- Yüksek hızlarda sürtünmede bir azalma tespit edilmektedir.

Bu sonuçlardan sürtünme kuvvetinin kayma hızından bağımsız olma durumunun istisnası yüzeyleri çok temiz ve yumuşak malzemelerde ortaya çıkar. Kayma hızı arttıkça kinetik (dinamik) sürtünme katsayısı az da olsa azalmaktadır. Normal kayma hızlarında sürtünme katsayısı sabit sayılabilmektedir. Şekil-13.4a'dan da görüldüğü gibi kinetik sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Statik sürtünme katsayısı ise temas süresinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir (Şekil-13.4b).



a) Kinetik sürtünme katsayısı



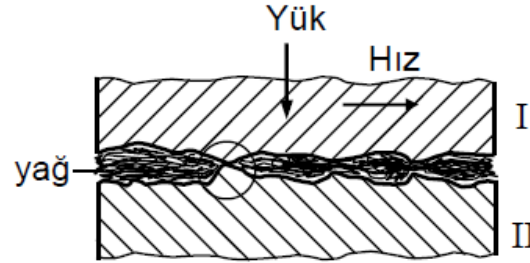
b) Statik sürtünme katsayısı

Şekil-13.4 Sürtünme katsayılarının kayma hızı ve temas süresi ile değişimi

Kuru sürtünme analizinde yüzeylerin pürüzlü oldukları dikkate alınmaktadır. Yüzeylerin en hassas işlenmesinde bile yüzey pürüzleri kaçınılmaz olacağından, cisimlerin izafi hareketinde temas yüzeylerinin gerçek temas alanı, temas yüzeylerinin

13.1.3 Sınır Sürtünmesi (Yarı Sıvı Sürtünme)

Yüzeyler arasında parçaları tamamen ayıracak bir yağlayıcı film bulunmaması halinde sıvı sürtünmesinin oluşturulamadığı durum söz konusudur. Bu şekildeki sürtünme **yarı sıvı sürtünme** veya **sınır sürtünmesi** olarak tanımlanır. Yüzeyler arasındaki sıvı yağ yüzeylere ait pürüzlerin sürtünmesini önleyemez (Şekil-13.5). Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı 0.03-0.1 arasında değişir.



Şekil-13.5 Yarı sıvı (sınır) sürtünme

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması halinde yağlayıcı molekülleri madensel yüzeylere düzgün bir şekilde yapışırlar. Böylece yüzeyler üzerinde belirli kalınlıkta adsorpsiyon tabakaları oluşur ve yağın bu özelliği **ıslatma kabiliyeti** olarak bilinir. Islatma özelliği yağ ve madensel yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır. Çelik yüzeyleri iyi bir şekilde ıslatamayan yağ, kalay yüzeylerde çok iyi sonuçlar verebilmektedir. Yağ tabakasının tabi tabakaya göre kopma mukavemeti çok daha büyüktür ve bunun sonucu madensel temasta olan yüzeyler daha azdır. Yapışmış yağ tabakasının kopma mukavemeti σ_{kf} ve kayma mukavemeti τ_{kf} ile ifade edilerek sürtünme katsayısı

$$\mu = \alpha \frac{\tau_{kf}}{\sigma_{kf}} + (1 - \alpha) \frac{\tau_{kf}}{\sigma_{kf}} \quad (13.9)$$

şeklinde elde edilir [14]. İyi bir yağlama sisteminde α çok küçük olduğundan sürtünme katsayısı

$$\mu \approx \frac{\tau_{kf}}{\sigma_{kf}} \quad (13.10)$$

Yüzeylerin pürüzlülükleri R_{t1} ve R_{t2} olmak üzere geometrik bakımdan sıvı sürtünmesi için film kalınlığı

$$h_0 > R_{t1} + R_{t2} \quad (13.11)$$

olmalıdır. Yüzeyler arasına konmuş olan yağ tabakaları absorpsiyon dolayısıyla her iki yüzeye yapışmış olduğundan sıvı sürtünmesi, birbiri üzerinden kayan yağ tabakaları arasında oluşmakta ve bu tabakalar arasındaki kayma gerilmelerine bağlı olmaktadır. Şekil-13.6b'de görüldüğü gibi F kuvveti etkisinde U hızıyla hareket eden yüzeye yapışmış olan yağ tabakasının hızı da U , sabit yüzey üzerindeki yağ tabakası hızı ise sıfır olmaktadır. Ara tabakanın hızı y mesafesine bağlı olarak U ile sıfır arasında değişmektedir.

Viskoz bir akışkanda kayma gerilmesi Newton kanununa göre

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (13.12)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Burada du/dy y mesafesine göre hız değişimi (gradyanı) veya kayma oranı, η ise yağın viskozitesidir (Yağların özellikleri bölümünde viskozite daha ayrıntılı incelenecektir). Sürtünme kuvveti için

$$F_s = \eta \frac{du}{dy} A \quad (13.13)$$

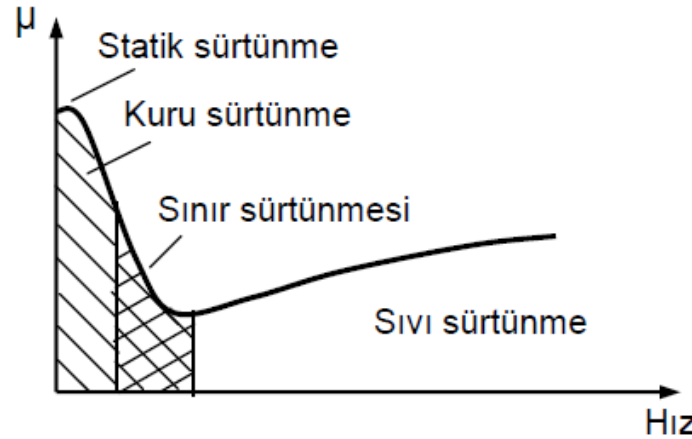
eşitliği yazılabilir. Burada A hareketli yüzeyin yağ ile temasta olan ıslanan yüzey temas alanıdır. Sıvı sürtünmesinde sürtünme katsayısı diğer sürtünmeli hallerde olduğu gibi

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

şeklinde ifade edilebilmektedir. Buna göre sıvı sürtünmesinde sürtünmeyi oluşturan ana faktör kullanılan yağın viskozitesidir.

Sıvı sürtünmesinde yağ filminin oluşum şekli önemli olduğundan hidrodinamik ve hidrostatik sıvı sürtünmeleri söz konusudur. Yağ filmi; elemanların hareketinden oluşuyorsa (basınçlı yağ filmi yüzeylerin belirli bir izafi hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralması) **hidrodinamik** sürtünme veya yağlamadan, dışarıdan bir pompa vasıtasıyla sağlanıyorsa (yüzeylerin birbirinden ayrılması için gerekli basınç pompa ile veriliyor) **hidrostatik** yağlamadan bahsedilir.

Şekil-13.7, iki yüzey arasındaki izafi hareket göre sürtünme halleri, geçiş bölgeleri ve sürtünme katsayısının hız ile değişimini vermektedir (Stribeck eğrisi).



Şekil-13.7 Stribeck sürtünme eğrisi

Sıvı sürtünmeli sistemlerde yağlayıcı maddeler sıvı, gaz veya gres olabilmektedir. Buna göre de sıvı sürtünmesi halleri Hidrodinamik, Gazodinamik veya Reodinamik olarak adlandırılır. Benzer şekilde hidrostatik sıvı sürtünmesinde yağlayıcı maddeler sıvı, gaz veya gres olma durumuna göre Hidrostatik, Gazostatik veya Reostatik sistemler söz konusu olabilmektedir.

yüzey enerji kayıpları, geometrik düzgünsüzlükler gibi değişik parametrelere bağlıdır. Tam geometrik şekle yakın bir eleman için $\mu_r=0.5 \times 10^{-2} - 0.1 \times 10^{-4}$ arasında değişir. Deneylerle tespit edilen yuvarlanma sürtünme katsayıları Çizelge-13.1'den alınabilir.

Yüzey çiftleri birbiri üzerinde dönme hareketi yanında küçük de olsa kayma hareketi de yapıyorsa yüzeyler arasında kayma-yuvarlanma sürtünmesi söz konusudur. Rulmanlı yataklarda bilezik ve yuvarlanma elemanları arasındaki sürtünme bu türdendir. Sürtünme katsayısı genellikle yuvarlanma halinde kayma halindekiinden daha küçük olmaktadır.

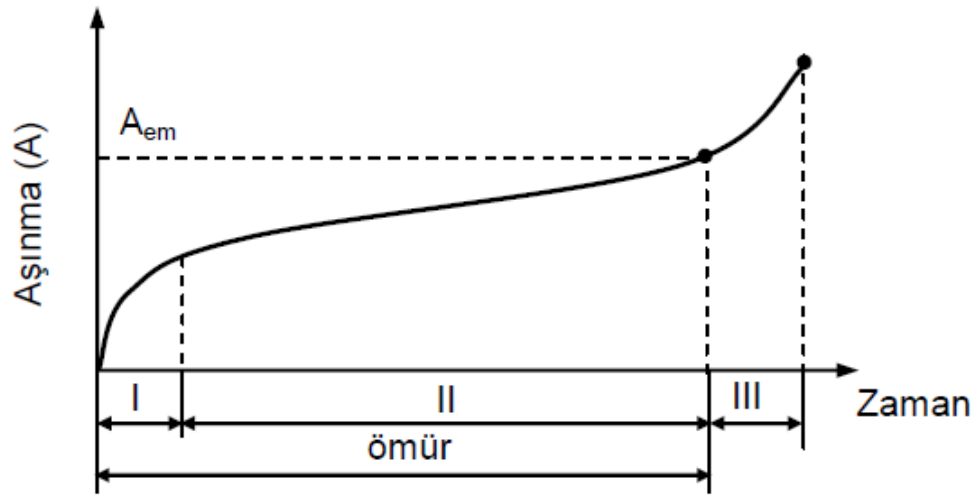
Birinci cildin ilgili bölümünde belirtildiği gibi yuvarlanma hareketi yapan eğri yüzeylerin temasında elastik deformasyonlara neden olan Hertz yüzey basınçları oluşmaktadır. Yüzeyler arasında yağ bulunursa sıvı sürtünmesi de oluşabilmektedir. Bu olaya deformasyon ve hidrodinamik etkilerden dolayı elastohidrodinamik sıvı sürtünmesi denmektedir.

13.2 AŞINMA

13.2.1 Genel Bilgiler ve Tanımlar

Aşınma, sürtünen yüzeylerde malzemenin, mekanik etkilerle istenmeyen bir şekilde kopması ve ana parçalardan ayrılması şeklinde tanımlanabilmektedir. Böylece yüzeyler ilk şekillerini bozarlar, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve istenilen fonksiyonu yerine getiremez. Aşınma zamanla gelişen ve aniden olan aşınma şeklinde iki gruba ayrılabilir.

Zamanla oluşan aşınma için Şekil-13.9 incelenebilir. Burada aşınma miktarı zamana göre değişmekte olup üç bölge söz konusudur.



Şekil-13.9 Zamanla oluşan aşınma [14]

Birinci bölgede (I), parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli aşınma meydana gelmektedir. Rodaj denilen bu bölge parçaların birbirine alıştırılmasını karakterize etmektedir. Genellikle rodaj yüksüz ve normal hızdan daha küçük hızlarda yapılır. Bunun için özel yağlar kullanılır. İkinci kısımda (II) esas çalışma sırasındaki aşınma söz konusudur. Aşınma hızının fazla olduğu bölge (III) şiddetli aşınma bölgesi olarak tanımlanır.

Elemana ait çalışma şartlarına bağlı olarak bir emniyetli aşınma veya emniyet sınırı (A_{em}) belirlenirse, bu diyagramdan elemanın normal çalışma zamanı veya ömrü tayin edilebilir. Bu çalışma süresinden sonra parça tamir edilmeli veya değiştirilmelidir.

Ani oluşan aşınmada parça yüzeyleri aniden bozular, bazı hallerde kilitlenir ve çalışmaz duruma gelir. Bu aşınma, statik zorlanma etkisindeki kopmaya benzemektedir.

Aşınma temas yüzeylerinde dış etkiler altında oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin sonucunda ortaya çıktığına göre çok çeşitli aşınma şekilleri tarif edilmektedir. Genel olarak aşınma için yapılan tanımlar aşağıdaki gibi çeşitlilik arz etmektedir.

- Teknik anlamda aşınma, cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin kopup ayrılması nedeniyle istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesidir.
- Mekanik etkenlerle cisimlerin yüzeyinde artan bir şekilde meydana gelen malzeme kaybıdır.
- Sürtünen yüzeyler arasında tekrarlanan etkilerle meydana gelen malzeme tahribatıdır.
- Katı cisimlerin yüzeylerinden küçük parçacıkların veya ince tabakaların ayrılması ile meydana gelen malzeme kaybıdır veya sürtünen yüzeylerde malzemenin mekanik etkenlerle ve istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır.
- Aşınma, katı cismin yüzey bölgesinden tribolojik zorlanma sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybıdır.
- Aşınma, tribolojik sistemi oluşturan eleman ve faktörlerin karşılıklı etkileşmelerinin ortak bir ürünüdür.

Yukarda geçen tribolojik sistem, karşılıklı etkileşen elemanlarda (esas cisim, karşı cisim ve ara madde) hız, termal şartlar ve yükün kombine etkisiyle sonuçlanan aşınma olayını inceler. Mühendislik malzemelerinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki şartların sağlanması zorunludur.

- Mekanik bir etkinin olması
- Aşınma olayının başlaması ve devamı için sürtünme olmalıdır (izafi hareket).
- Yavaş fakat devamlı olması
- Malzeme üzerinde değişiklik meydana gelmesi
- İsteğimiz dışında meydana gelmesi
- Korozyon ve yıpranma mekanik hareket olmadan meydana geldiğinden aşınma sayılmamaktadır. Mekanik etki ile birlikte kimyasal veya elektrokimyasal etki ile de malzeme yüzeyinden mikro tanecikler kopar veya yüzey bölgesi değişikliğe uğrar.

13.2.2 Aşınma Mekanizmaları ve Çeşitleri

a) Adezyon (adesiv) veya kaynama aşınması

Karışabilen ve birbirlerine yakın olan malzemeler arasında kuvvetli kaynama olur. Yüzey pürüzleri dış kuvvet etkisiyle akma sınırının aşılmasıyla plastik deformasyona uğrar, yüzeyde absorbe edilmiş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanır. Temas noktalarında mikro kaynak bağları oluşur. Temas yüzeyleri birbirine göre bağlı hareket ederlerse bu bağlar kırılarak malzeme kaybı oluşur. Yüzeylere yapışan yağ tabakası adezyon aşınmasını önler.

Yüzeylerdeki izafi hareketle zayıf olan malzeme pürüzleri kopar ve serbest parçacıklar meydana gelir. Adezyon aşınması benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu nedenle malzeme çiftlerinin birisi sert (çelik gibi) diğeri yumuşak (bronz gibi) seçilmelidir.

b) Abrazyon (abrasiv) aşınma mekanizması

Uygulanan yük ve hareketin etkisiyle sürtünen iki cisimden daha sert olanının pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğeri çizerek üzerinden mikro talaş kaldırılması olayıdır. Dışardan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında oluşur. Bu aşınmanın önlenmesi için yüzeyler sertleştirilmelidir. Dışardan sert maddelerin yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır. Makina ve sistemler talaş ve diğeri pisliklerden sık sık temizlenmelidir.

c) Mekanik korozyon aşınması

Kimyasal bir aşınma türüdür. Birbiri üzerinde kayan veya yuvarlanan yüzeyler arasında küçük temas alanlarında daima plastik deformasyonlar olmaktadır. Plastik deformasyon sonucu kristal kafesi bozulmakta buna bağlı olarak yüzey kimyasal

bakımdan aktifleşmekte, ortamda bulunan oksijen ile okside olmaktadır. Oksit tabakası hareketin devamında kırılmakta ve oksit parçacıkları düşerek aşınmayı meydana getirmektedir. Kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan elemanların yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince ve sert tabakalar oluşur. Benzer durum yağlarda bulunan maddelerden dolayı da oluşur. Değişken yük altında bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınmayı oluşturan parçacıkları meydana getirirler. Korozyonla meydana gelen demiroksit tanecikleri abrasiv aşınmayı hızlandırır. Korozif aşınmanın faydası, çok yüksek basınç altında çalışan yüzeyleri, meydana gelen oksit veya diğer ara tabakalarla yapışmasını önleyerek adhesiv aşınmayı azaltmaktır.

Oksidasyon veya mekanik korozyon aşınmasını önlemek için yüzeyler fosfat veya sülfid ile kaplanır veya oksidasyonu önleyen özel yağlayıcı maddeler kullanılır.

d) Yüzey yorulması aşınması

Yorulma olayı yüzeyden başlamakta olup titreşimli yüklemede veya sürtünen elemanların tekrarlı gerilmelere maruz kaldıklarında yüzeylerde mikro çatlaklar veya küçük çukurcuklar oluşur. Bu olay daha çok dişli çarklar, kam mekanizmaları, rulmanlı yataklar gibi yuvarlanma hareketi yapan parçacıkların yüzeylerinde oluşur. Temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde Hertz basınçları meydana gelir. Bu basınç etkisinde yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur. Değişken zorlanma durumunda malzeme yüzeyinde yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru hareket eder ve büyüyerek yüzeyde küçük çukurcuklar meydana getirmektedir.

Yüzeyler arasındaki yağın yüksek basınç altında çatlaklara girmesi boşlukların/çukurların büyümesine neden olmaktadır. Pitting aşınması da denen yüzey yorulması aşınması, çukurcukların plastik deformasyonlar nedeniyle temas yüzeyinde oluşması ve buradan malzemenin iç kısımlarına yayılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Malzeme yüzeyi sertleştirilerek bu tür aşınma önlenabilir. Bu aşınma türü yumuşak malzemelerde meydana gelmemektedir.

e) Erozyon ve kavitasyon

Malzeme yüzeyi ile ortam arasındaki izafi hızın yüksek değerlere ulaştığı sistemlerde görülen bozulma şekli erozyon olarak tanımlanır. Erozyon, içinde katı tanecikler ihtiva eden bir sıvının katı cismin yüzeyine hızla çarpması sonucu oluşur. Ayrıca çok küçük sıvı damlalarının çok yüksek bir hızda (1000 m/s) bir katı yüzeye düşmesi halinde, damlaların cisme çarpma anındaki basıncı, cismin basma mukavemet değerini aşar, böylece bir tek damlanın yüzeye çarpmasıyla plastik deformasyon veya kırılma oluşur. Bu şekilde çarpışmaların tekrarlanmasıyla cisimde yorulma veya erozyon aşınması meydana gelir.

Kavitasyon erozyonu; bir katı cisimle sıvının izafi hareket yapması durumunda sıvı içinde oluşan kabarcıkların basıncının düşmesiyle büyümesi ve patlaması sonucu meydana gelen şok dalgalarının katı cisim yüzeyine çarpmasıyla meydana gelir. Bir kabarcığın kararlı olması iç ve dış yüzeyi arasındaki basınca ve yüzey enerjisine bağlıdır. Kabarcık yüzeyindeki gerilmenin düşük olması daha az tahribat yapar. Bu tür erozyon daha çok su türbinleri ve pompalarda oluşur.

Yukardaki aşınma mekanizmaları bir sistemin sürtünerek çalışan elemanlarında tek başına meydana gelmez. Elemanların hasara uğramasına bir çoğunun kombine etkisi neden olur. Aşınma olayı karışık olup çeşitli faktörlerin değişik etkileri olayı karmaşık hale getirmektedir. Bu faktörler kendi aralarında ve tribosistemin diğer elemanlarıyla karşılıklı etkileşim içinde aşınmanın cinsi ve miktarını tayin ederler.

13.3 YAĞLAMA VE YAĞLAYICILAR

13.3.1 Genel Bilgiler

Tribolojide üçüncü aşama yağlama olup eş çalışan yüzeyler arasında oluşan sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı kısmen veya tamamen önlemek için yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Yağlayıcı maddeler ayrıca sıcaklık yükselişini de önleyebilmektedirler. Yağlayıcılar temas yüzeylerine iyice yapışır, yüzeylerin pürüzlerini birbirinden ayırır, yüzeyleri korozyona karşı korur, sistemde oluşan ısıyı dışarı atar.

Önceki bölümlerde izah edildiği gibi çeşitli sürtünme halleri için yağlayıcı ara malzemenin değişik fonksiyonları yerine getirdiği görülür. Sıvı sürtünmesinde yüzeyler arasında bulunan yağ tabakası yüzeyleri birbirinden tamamen ayırdığından burada yağın iç sürtünmesi veya viskozitesi çok önemli olmaktadır. Bundan dolayı tam sıvı sürtünmesinde genellikle sıvı (yağlama yağı), bazı hallerde de gaz yağlayıcı madde olarak kullanılmaktadır. Sınır veya yarı sıvı sürtünmesinde yağlayıcı maddenin yüzeylere yapışma kabiliyeti ve kimyasal yapısı önemlidir. Bu sürtünme halinde katı ve katıklılı sıvı yağlayıcılar kullanılmaktadır.

Yağlayıcılar özelliklerine ve kullanım yerlerine göre katı, yarı katı, gaz ve sıvı yağlayıcılar olarak bu bölümde kısaca incelenmiştir.

13.3.2 Katı Yağlayıcılar

Bu yağlayıcılar yalnız başlarına veya sıvı yağlar veya gresler karıştırılarak kullanılmaktadırlar. Uygulamada en çok kullanılan katı yağlayıcılar grafit, molibden disülfid, talk gibi toz şeklindeki yağlayıcılardır. Poliamid (PA), Poliasetal (POM) Politetrafloretilen (PTFE) gibi plastik malzemeler de kaygan özelliklerinden dolayı değişik makina elemanlarının (kılavuz, yatak ve dişliler gibi) yağlanmasında kullanılırlar.

Toz veya ince levhalar şeklinde kullanılan grafit yüksek sıcaklıklarda (500°C'nin üzerinde) yalnız başına, diğer hallerde yağ veya gres ile bir süspansiyon oluşturacak şekilde karıştırılarak kullanılmaktadır. Molibden disülfid madensel yüzeylerin üzerinde grafit benzer bir tabaka oluşturur. Vakumda veya oda sıcaklığında Molibden disülfid çok iyi yağlama özelliğine sahiptir. MoS_2 ile yağlanmış yüzeylerin sürtünme katsayısı 0.02 ile 0.12 arasındadır. Alüminyum, kurşun, bakır gibi kolay deforme olabilecek malzemeler (metaller) de yarı sıvı (sınır) sürtünmesinde yüzeyleri aşınmadan korumak için kullanılmaktadır.

13.3.3 Gaz Yağlayıcılar

Yüksek hız ve düşük yüklü sıvı sürtünmeli sistemlerde gaz yağlayıcılar kullanılmaktadır. Ayrıca gıda ve ilaç sanayinde sıvı yağ veya gres kullanımı istenmediğinden bu sektördeki sistemlerde de gaz yağlayıcılar tercih edilmektedir.

Gaz yağlayıcıların viskoziteleri sıvı yağlayıcılara göre çok küçük olduğundan kullanıldıkları sistemlerde sürtünme ve ısı oluşumu çok az olmaktadır. Ancak gaz yağlayıcıların kullanıldığı sistemlerin yük taşıma kabiliyetleri çok düşüktür. Hava, hidrojen ve azot yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda kükürt heksafloridler, sıvı nitrojen, buhar ve organik buharlar ve karbondioksit (özellikle reaktörlerde aynı zamanda soğutma amaçlı) kullanılmaktadır.

13.3.4 Yarı Katı (Gresler) Yağlayıcılar

Gresler içinde katılaştırıcı madde bulunan, sıvı yağlardan oluşan, krem kıvamında madeni sabun yapılı organik kökenli veya sentetik yollarla (gliserinin bir yağ asidi ile esterleştirilmesiyle) elde edilen yarı katı yağlayıcı maddelerdir. Madeni sabunlarla katılaştırılmış yağlardan olan greslerde katılaştırıcı madde olarak genellikle alüminyum, baryum, kalsiyum, lityum, sodyum gibi madensel sabunlar ve bentonit, mika veya organik esaslı sabun olmayan maddeler de kullanılmaktadır.

Greslerin ağırlığının %65-95'ini yağ, %3-30'unu katılaştırıcı ve bazılarında %10'a kadar da katkı maddeleri oluşturur. Kullanılan katılaştırıcı maddeye göre (kalsiyum, alüminyum, sodyum, lityum, kurşun sabunu gibi) de gresler kalsiyum gresi, lityum gresi, sodyum gresi gibi isimlendirilir. Gresler genellikle açıkta çalışan ve uzun yağlama süreli, düşük ve orta hız ve yük altında çalışan sistemlerde kullanılır.

Lityum sabunlu gresler $-30...100^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında kullanılabilir. Suyu karşı koruma istenirse korozyonu önleyici ve suda ayrılmaya mani olucu özel katıklar katılır. Büyük yüke maruz rulmanlı yatakların yağlanmasında çok defa kurşun sabunu katılmış kireç veya lityum sabunlu gresler kullanılır. Bunlara EP (extreme pressure) gresleri denir. Kireç+kurşun sabunlu greslerin büyük bir yapışma (adezyon) kabiliyeti ve su karşısında korozyona (pasa) karşı koruyuculuk özelliği vardır. Darbeli ve sarsıntılı yataklarda koyulukları değişmediği için sodyum sabunlu gresler iyi sonuç verir ve yaklaşık 100°C 'ye kadar kullanılabilir.

13.3.5 Sıvı Yağlayıcılar (Yağlar)

Sıvı yağlayıcı maddeler organik (hayvansal ve bitkisel), madensel (mineral) ve sentetik yağlar olmak üzere üç grupta incelenebilir. İzafi hareket eden yüzeyler plastik, lastik gibi metal dışı malzemelerden yapılmışsa su da sıvı yağlayıcı madde olarak kullanılabilir.

a) Organik yağlayıcılar

Bu yağlayıcılar iyi yağlama özelliğine sahip olmalarına rağmen ömürleri çok kısadır. Ayrıca belirli bir oranda asit ihtiva ettiklerinden yüzeylerde korozyona sebep olmaktadır. Hayvansal yağlar; mafsalsal yağı, kemik yağı, bitkisel yağlar ise Hint yağı, şalgam yağı, zeytin yağı gibi organik yağlayıcıların çoğunluğu gıda maddesi olarak tercih edilmekte ve fiyatları da çok yüksek olduğundan endüstride çok az kullanılmaktadır.

b) Sentetik Yağlar

Bu yağlar genellikle kimyasal maddelerden elde edilen yapay yağlar olup ham petrol esaslı yağların yağlayıcı özelliklerine sahiptirler. Ancak çok kaliteli ve çok pahalı yağlardır. Bu yağlar tek başlarına veya madensel yağların özelliklerini iyileştirmek için katık (aditif) olarak kullanılırlar.

Sentetik yağlar; kimyasal sentezlerinde kullanılan kimyasal maddelere göre sınıflandırılırlar (fosfat esteri, silikon, silikat esteri yağları vb.). Kimyasal açıdan hidrokarbonlar (sadece H ve C içeren) ve sentetik sıvılar olmak üzere iki grupta incelenebilir. Bu yağların termik mukavemet, zor oksitleme, viskozite-sıcaklık değişiminin büyük olması, zor tutuşma ve çok geniş sıcaklık aralıklarında kullanılabilme gibi avantajları vardır. Korozyon, her malzemeyle uyum sağlayamama, her katkıyı içinde çözümleyememe, yüksek fiyat ve zehirleyebilme gibi sakıncalı yönleri de değerlendirilmelidir. Ancak bu yağlayıcıların gelecekte önemli kullanım alanlarına sahip olacakları söylenebilmektedir.

c) Madensel sıvı yağlar

En çok kullanılan yağlayıcılardan olan sıvı yağlayıcılar madensel (mineral) esaslı yağlardır. Ham petrolün işlenmesinden (damıtılmasından) elde edilen bu yağlar esas olarak hidrokarbonların bileşimlerinden oluşur. Ham petrolün yapısına göre parafin, naften ve karışık esaslı mineral yağlar söz konusudur.

Sıvı mineral yağların geniş bir uygulama alanı bulmasının nedenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Sürtünme halinde bulunan yüzeyler arasına kolayca yayılabilirler.
- Akış olması şartıyla yüzeylerde oluşan ısıyı dışarı taşıyabilirler.
- Kolay depo edilebilirler, bazı tertibatlarla bir yerden diğer bir yere kolayca iletilebilirler.
- Metalleri oksitlemezler, oksitlenmeye karşı koruyucu etki yaparlar.
- Viskoz yapıları dolayısıyla yük taşıyıcı yağ filmi oluştururlar (iç basınç oluşturarak)
- Büyük miktarda üretilebilirler ve diğer yağlayıcılara göre nispeten ucuzdurlar.
- Yüzeylere iyi yapışarak yağlayıcı özellik kazandırırılar.

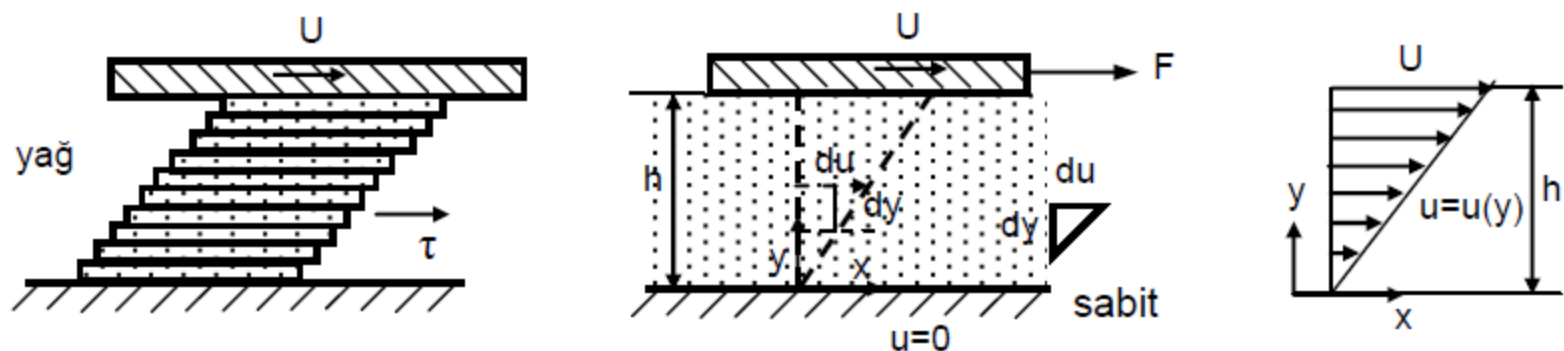
13.3.6 Sıvı Yağların ve Greslerin Özellikleri

Yağlayıcı maddelerin temel özellikleri yağlama kabiliyetine ve fiziksel davranışlarına bağlıdır. Yağlayıcının yağlama özelliğini belirleyen en önemli özellik viskozite ve ıslatma kabiliyetidir. Fiziksel özellikler ise katılma noktası, ısıl özellikleri, oksidasyon, alevlenme noktası, yanma noktası, damlama noktası vb. şeklinde özetlenebilir.

13.3.6.1 Viskozite

a) Dinamik viskozite

Sıvıların farklı akış karakteristiği göstermesinin en önemli nedeni iç sürtünmelerinden dolayı harekete karşı farklı dirençli olmalarıdır. Akmayı zorlaştıran bu direnç **viskozite** olarak tanımlanır. Bu şekilde oluşan direnç akım sırasında sıvı tabakaları arasındaki iç sürtünme olup yük taşıyan basınçlı bir yağ filminin gerçekleşmesinde en önemli parametre olarak değerlendirilmektedir. Bu tür akışkanlar **viskoz akışkan** olarak tanımlanır. Şekil-13.10 viskozite ile ilgili Newton kanunu için esas alınmaktadır.



Şekil-13.10 Viskozite ile ilgili Newton Kanunu

Aralarında viskoz bir yağ filmi (sıkıştırılamayan bir akışkan) bulunan birbirine paralel biri sabit diğeri F kuvveti etkisinde U hızıyla hareket eden iki plaka arasındaki akışkan tabakalarının farklı hızlarda birbiri üzerinden kaydığı görülmektedir. Yağ tabakaları arasındaki sürtünmenin oluşturduğu kayma gerilmesi kayma oranı olarak tanımlanan du/dy 'ye bağlıdır. Newton kanunu olarak bilinen (eşitlik 13.12)

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

ifadesinin elde edilmesinde aşağıdaki temel kabuller yapılmaktadır.

- Üstteki hareketli düzlem veya plakanın ağırlığı ihmal edilmektedir. Plakaya herhangi bir düşey kuvvet etki etmemektedir (yağ filmi içinde bir basınç alanının bulunmadığı kabulü).
- Akışkan molekülleri yüzeylere çok iyi yapışmaktadır.

Şekilden de görüldüğü gibi yağ tabakalarının hızı hareketli plaka altındaki temas bölgesinde (sınır tabakası) plaka hızını almakta ara bölgede ise lineer olarak değişmektedir. A hareketli düzlemin ıslanan yüzeyi olmak üzere $\tau=F/A$ yazılarak η mutlak viskozite (dinamik viskozite)

$$\eta = \frac{\tau}{du/dy} \quad (13.18)$$

$$\text{veya } \eta = \frac{F/A}{U/h} = \frac{Fh}{UA} \quad (13.19)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadeye göre viskozite genel olarak, birim alandaki bir düzlem yüzeyi kendisine paralel ve birim mesafedeki ikinci bir düzlem yüzeye göre birim hızla hareket ettirmek için gerekli kuvvet şeklinde de tarif edilebilmektedir. Metrik sistemde 1 cm^2 yüzey alanlı bir plakaya 1 cm mesafeli sabit bir plakaya göre 1 cm/sn hız vermek için gerekli kuvvetin 1 dyn olması halinde aralığın viskozitesi 1 dyn s/cm^2 (Poise) olan viskoz bir akışkanla dolu olduğu söylenir. Viskozite birimi için eşitlik (13.19) esas alınır

$$[\eta] = \frac{FL}{L/T \ L^2} = \frac{FT}{L^2} \quad (13.20)$$

boyutları cinsinden değerlendirme yapılmalıdır. Seçilmiş dinamik viskozite birimleri aşağıda verilmiştir.

$$1 \text{ dyns/cm}^2 = 1 \text{ Poise (1 P)}$$

$$1 \text{ Ns/m}^2 = 1 \text{ Pas}$$

$$1 \text{ lbs/in}^2 = 1 \text{ reyn (İngiliz sisteminde)}$$

$$1 \text{ reyn} = 10^6 \text{ } \mu\text{reyn}$$

$$1 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ P}$$

$$1 \text{ P} = 14.5 \text{ } \mu\text{reyn}$$

$$1 \text{ reyn} = 68965 \text{ P}$$

Çizelge-13.2 dinamik viskoziteler için dönüşüm tablosu olarak kullanılabilir. Bazı maddelerin ortam sıcaklığındaki dinamik viskoziteleri Çizelge-13.3'de verilmiştir.

Çizelge-13.2 Seçilmiş dinamik viskozite birimleri

Verilen boyutlar	İstenilen boyutu elde edebilmek için çarpanlar				
	Ns/m ²	kgfs/m ²	Poise=dyns/cm ²	centipoise	reyn=lbs/in ²
1 Pas= 1 N s/m ²	1	0.102	10	1000	0.000145
1 kgfs/m ²	9.81	1	98.1	98.1x10 ²	0.001422
1 poise= 1 dyns/cm ²	0.1	0.0102	1	10 ²	14.50x10 ⁻⁶
1 centipoise	0.001	0.000102	10 ⁻²	1	0.1450x10 ⁻⁶
1 reyn= 1 lbs/in ²	6895	703.01	6.895x10 ⁴	6.895x10 ⁶	1

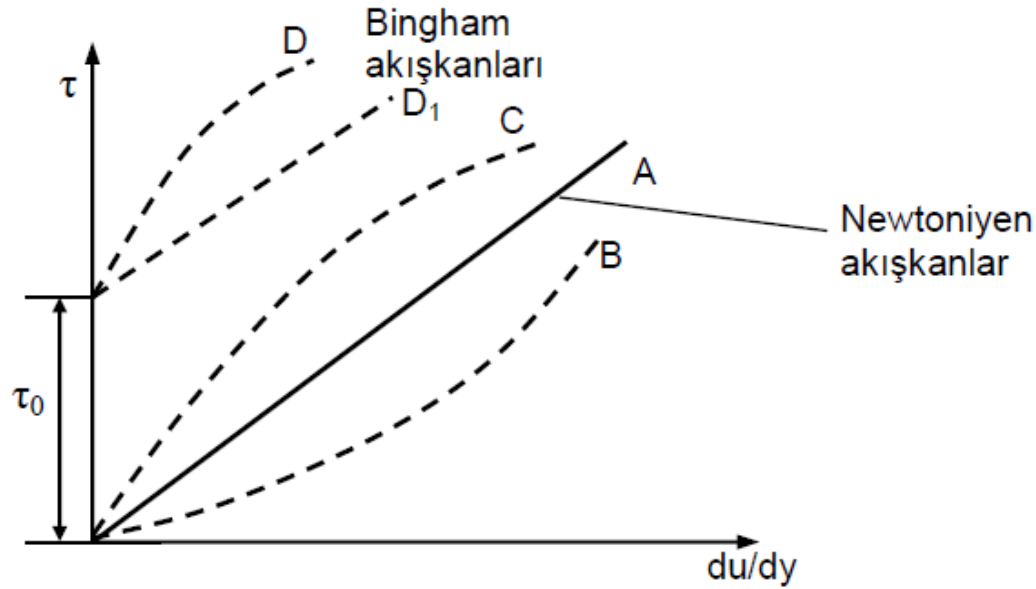
Çizelge 13.3 Bazı maddelerin ortam sıcaklığındaki viskoziteleri

Madde	Viskozite (cp)
Hava	$1,8 \times 10^{-2}$
Eter	2×10^{-1}
CO ₂	1.47×10^{-2}
H ₂	0.89×10^{-2}
O ₂	2.03×10^{-2}
Metan	1.1×10^{-2}
Benzin	0.6
Su	1
Cıva	1.6
Gaz yağı	2
Yağlama yağı	10-1200

Kayma gerilmesinin kayma oranına (du/dy 'ye) göre lineer değişim gösterdiği akışkanlar Newtoniye (Newtonumsu) akışkan olarak bilinir. Ancak gres gibi bazı yarı sıvı akışkanlar bu kurala uymaz. Bu tür akışkanlar Bingham akışkanları olarak bilinir. Şekil-13.11 $\tau - du/dy$ ilişkisini vermektedir. Şekilde D akışkanı için kayma gerilmesi

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{du}{dy} \quad (13.21)$$

şeklinde değişmektedir. Burada η_p plastik viskozite olarak bilinir. Bu eşitliğe uyan akışkanlar Newtonumsu olmayan (Non-Newtoniye) akışkanlar olarak ta tanımlanır. Bu akışkanlarda kayma gerilmeleri belirli bir τ_0 değerini aştıktan sonra kayma başlar.



Şekil-13.11 Değişik akışkanlar için kayma gerilmesi değişimi [14]

b) Kinematik viskozite

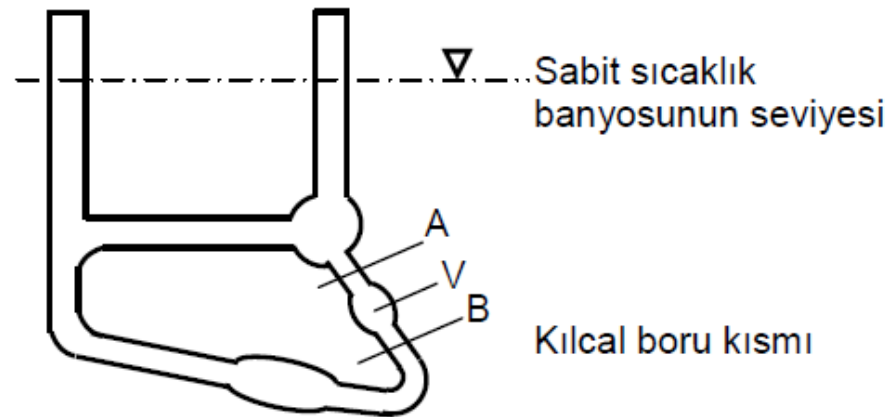
Dinamik viskozite η yağı karakterize eden akışkana ait temel parametrelerden (özelliklerden) biridir. Dinamik viskozitenin yağ yoğunluğuna oranı kinematik viskozite olarak tanımlanır ve yağı karakterize etmeyen, sadece hesapla

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (13.22)$$

şeklinde bulunan bir büyüklüktür. Birimi $\text{cm}^2/\text{sn}=1 \text{ stokes}=1 \text{ st}$ olup bu birim de büyük olduğundan $1/100 \text{ st}=1 \text{ cst}$ yaygınca kullanılmaktadır ($1 \text{ mm}^2/\text{s}=1 \text{ cst}=9 \times 10^{-4} \text{ Pas}$ dönüştürmesi de yapılabilir).

Viskozitenin ölçülmesi: Kinematik viskozite izafi bir şekilde ticari viskometrelerden yararlanılarak ölçülüp izafi bir şekilde ifade edilebilmektedir. Bunun için belirli hacimdeki sıvının standart kılcal bir borudan/delikten akma zamanı veya belirli hacimdeki kabı doldurma süresi esas alınmaktadır. Bu amaçla geliştirilen viskometreler ve izafi viskoziteler aşağıda özetlenmiştir.

Oswald Viskometresi: Bu viskometre ile kinematik viskozite ölçülmesi Hagen-Poiseuille kanununa göre yapılır. Şekil-13.12 laboratuvar tipi Oswald viskometresini göstermektedir. Camdan yapılmış basit şekilli alette A noktasından B noktasına kadar sıvı seviyesi düşmesi için geçen zaman tespit edilir. Alet (viskometre) genellikle sabit bir sıcaklık banyosuna daldırılır. Böylece viskozitenin sabit sıcaklık için ölçülmesi sağlanır.



Şekil-13.12 Oswald Viskometresi

Genellikle ölçmeler bilinen bir sıvının viskozitesine göre yapılır ve bilenen sıvı olarak genellikle su alınır (damıtık su). Çünkü damıtık suyun viskozitesi bilinmektedir. Kinematik viskoziteler için

$$\nu_{su} = K t_{su} \quad (13.23)$$

$$\text{ve } \nu_{yağ} = K t_{yağ} \quad (13.24)$$

yazılarak $\nu_{yağ}/\nu_{su}$ oranından

$$\nu_{yağ} = \frac{t_{yağ}}{t_{su}} \nu_{su} \quad (13.25)$$

bulunur.

Suyun dinamik viskozitesi 1 cp ve kinematik viskozitesi 1 cst dir. Ölçmenin doğru olabilmesi için Oswald viskozitesinin kılcal boru kısmının tam kılcal boru şartlarında olması gerekir (Boyu çapının 50 katı veya daha fazla olmalıdır).

Oswald viskometresi standart laboratuvar aleti olmasına rağmen teknikte geniş şekilde kullanılmaz. Teknikte genellikle kullanılması çok basit olan üç ticari viskometreden biri kullanılır. Bunlarda prensip aynıdır. Belirli hacimdeki sıvının ince bir delikten akma zamanı saniye olarak tespit edilir.

Saybolt Universal Viskometresi: Amerika'da kullanılan bu viskometrede 60 cm³ yağın standart bir delikten (kılcal boru çapı 0.176 cm ve uzunluğu 1.225 cm) akma zamanı Saybolt Universal Saniyesi (SUS) olarak isimlendirilir. Kinematik viskozite ile Saybolt Universal Saniyesi (SUS) arasında

$$\nu = \left(0.22S - \frac{180}{S} \right) \quad (13.26)$$

ilişkisi yazılabilir [13]. Burada S, SUS cinsinden izafi viskozite, ν cst cinsinden kinematik viskozitedir.

Redwood Universal Viskometresi: İngiltere'de kullanılan bu viskometrede 50 cm³ yağın belli sıcaklıkta standart delikten akış süresi Redwood Saniyesi (Rs) olarak tanımlanır.

Engler Viskometresi: Almanya ve Avrupa'da kullanılan bu viskometrede standart bir kabın altındaki delikten 20°C'de 200 cm³ yağın akış süresi $t_{\text{yağ}}$, 200 cm³ suyun akış süresi t_{su} ise

$$^{\circ}E = \frac{t_{yağ}}{t_{su}} \quad (13.27)$$

olarak ifade edilir.

İzafi viskozite Engler derecesi ile kinematik viskozite ν arasında

$$\nu = 7.6^{\circ}E \left(1 - 1/({}^{\circ}E)^3\right) \quad (13.28)$$

$$\text{veya } \nu = (7.32^{\circ}E - 6.31/{}^{\circ}E) \times 10^{-2} \quad (13.29)$$

ilişkileri yazılabilmektedir [2,14]. Burada ν , cst cinsinden elde edilmektedir. Çizelge-13.4 değişik viskozite ölçüleri arasındaki ilişkileri vermektedir.

Çizelge-13.4 Viskoziteler arasında yaklaşık ilişkiler [29]

ν (cst)	SUS	Redwood No 1 Saniyesi	Engler Derecesi ($^{\circ}E$)
2	33	31	1.1
4	39	36	1.3
6	46	41	1.5
8	52	46	1.7
10	59	52	1.8
15	77	68	2.3
20	98	86	2.9
30	141	125	4.1
50	232	205	6.6
>50	cstx4.6	cstx4.1	cstx0.132

c) Viskozitenin sıcaklıkla değişimi

Yağların viskozite-sıcaklık ilişkisi deneylerle belirlenmektedir. Viskozitenin sıcaklıkla büyük ölçüde değişmekte olduğu görülmüştür. Yağın cinsine bağlı olarak değişik oranlarda sıcaklık artışıyla viskozite düşmektedir. Yağlama bakımından viskozitenin mümkün mertebe sıcaklıkla az değişmesi arzu edilir. Viskozite-sıcaklık değişimini veren değişik yaklaşımlar söz konusu olup aşağıda en yaygın kullanılan eşitlikler verilmiştir.

ASTM (American Society for Testing Materials) tarafından kabul edilen ve ülkemiz dahil pek çok ülkede tercih edilen eşitlik

$$\log \log(\nu + 0.6) = A - B \log(T + 460) \quad (13.30)$$

şeklinde verilmektedir [3]. Burada A ve B yağın cinsine bağlı sabitler, T mutlak sıcaklık (°F) olmak üzere ν cst cinsinden kinematik viskoziteyi verir. Amerikan Otomobil Mühendisleri Birliği (S.A.E) yağların viskozitesinin sıcaklıkla

$$\eta = 9.8 a e^{b/Tc} \quad (13.31)$$

şeklinde değiştiğini belirlemiştir [3]. Burada a, b ve c her yağ türüne göre sabitler, T ise °C cinsinden sıcaklıktır. Çizelge-13.5'te SAE motor yağlarının viskozite değişimlerinde kullanılabilecek katsayılar verilmiştir. SAE, yağlama yağlarını viskozitelerine göre sınıflandırmış ve her yağ birer SAE numarası ile belirlenmiştir. Ancak bu numaralar viskozite değildir. SUS viskozite değerleri 0°F (-18°C) ve 210°F (99°C)'de belirlenmiştir. SAE numarası büyük olan yağın viskozitesi de büyük olmaktadır. Viskozitesi 0°F'da tespit edilen yağların numaralarının yanında ayrıca W işareti vardır (SAE 5 W, SAE 10 W gibi). Bazı yağlar özel tipte olup çok dereceli olarak kodlanmıştır. SAE 10 W/30 şeklindeki yağ 0°F'da SAE 10 W özelliği gösterirken 210°F'da SAE 30 özelliğinde bir yağ anlamına gelmektedir. Ayrıca SAE yağları iki ana grupta incelemiştir. SAE 5 W'den SAE 50 W'ye kadar motor yağları, SAE 75'den sonraki yağlar da transmisyon (dişli)

$$V = V_0 \left(1 - \frac{\Delta p}{B}\right) \quad (13.39)$$

eşitliği de yazılabilmektedir. Burada V_0 atmosferik basınçta hacim, Δp basınç farkı, B ise Bulk Modülüdür.

13.3.6.2 Madensel Sıvı Yağların Diğer Özellikleri

1. Renk: Yağlama yağının rengi siyah renkten kahverengi, kırmızı ve sarının çeşitli tonlarına kadar değişir. Renk daha çok yağın menşesine bağlıdır. Renk ile kalite veya viskozite arasında bağıntı kurmak yanıltıcıdır. Fakat bazen yağ çalışarak bozulur, içine pislik dolar. Bu halde yağın rengi kullanılmamış aynı cins yağın rengi ile karşılaştırılarak gerekirse yağ değiştirilir.

2. Oksidasyon: havanın oksijeninin yağ içindeki hidrokarbonlarla birleşmesidir. Madeni yağlar oda sıcaklığında dahi oksidasyona uğrar ve sıcaklığın artması ile hızlanır. Yağın okside olması istenmez. Çünkü oksidasyon ürünleri eğer yağ içinde çözülmezse yağ deliklerini, yağ boru hatlarını ve yağ filtrelerini tıkayabilir. Yağ içinde çözülen oksidasyon ürünleri ise yağlama sistemi içinde devrederek asit etkisi dolayısıyla yatak yüzeylerini, silindir ve piston yüzeylerini korozyona maruz bırakır. Bu nedenden yağlara oksitlenmeyi önleyici katıklar katılır.

3. Asidite ve Nötralizasyon sayısı: Büyük hassasiyetle rafine edilmiş yağlarda bile hafif bir asidite mevcuttur. Bu miktar zararsız olabilir. Fakat yağın çalışmasıyla okside olması ve pislikleri asit miktarını artırır. Yağ içindeki asit miktarının ölçüsü nötralizasyon sayısı ile verilir.

Nötralizasyon sayısı: 1 gram yağın içindeki asit miktarını nötralize etmek için sarf olunan miligram (KOH) potasyum hidroksit miktarıdır.

4. Emilsiyon teşkil etme: Saf madeni yağ saf su ile karıştırılırsa oluşan sıvı süratle ayrılır. Fakat eğer yağ kirlenmişse bu ayrılma oranı azalır ve emilsiyon devam eder. Bilhassa buhar türbini yağları çalışma sırasında sık sık buhar veya yoğunlaşmış buhar ile karışır. Böyle bir yağ süratle temizlenebilmelidir. Aksi halde oluşan çamurlaşma yağlama devresi borularında ve pompalarda tıkanma yapar. Bu yüzden yağlara emilsiyon teşkil etmeyi önleyecek katıklar ilave edilir.

Standart deney olarak belirli hacimde yağı eşit hacimdeki yoğunlaşmış buhardan ayırmak için gerekli olan zaman ölçülür. Saniye olarak bu ayırma zamanı emilsiyon teşkil etmeme sayısını verir. Bu sayı küçük olursa yağ kalitelidir.

5. Islatma (yapışma) kabiliyeti: Yağın temas yüzeylerini iyi bir şekilde ıslatması, yüzeye iyi yapışması ve yüzeyden kayıp gitmemesi demektir. Yağ moleküllerinin iyi yapışması istenir (İyi bir yağ temas ettiği yüzeyi iyi bir şekilde ıslatmalıdır).

6. Katılaşma (Donma) noktası: Sıvı yağın katı hale geldiği sıcaklıktır. Bilhassa soğutma makinalarında ve içten yanmalı makinaların ilk hareketinde önemlidir. Yağın çalışma yerine göre uygun katılaşma noktasına sahip olması gerekir.

7. Alevlenme noktası: Bir kap içinde ısıtılan yağın bir alev temasında parlayacak kadar yanıcı buhar vermeye başladığı sıcaklıktır. Alevlenme noktasının çok düşük olması istenmez.

8. Yanma noktası: Kap içinde ısıtılan yağın bir alev teması halinde devamlı olarak yanmaya başladığı sıcaklıktır.

9. Kendi kendine alevlenme noktası: Oluşan yanıcı buharların bir alev temasına ihtiyaç göstermeden kendi kendine alev alıp yanmaya başlama sıcaklığıdır. Çoğu yağlarda kendi kendine alevlenme noktası 750 °F civarındadır.

10. Damlama noktası: Damlama noktası daha çok gresler için önemli olup, standart bir kap içinde homojen olarak ısıtılan gresin kap altındaki bir delikten damlamaya başladığı sıcaklık olarak tanımlanır.

11. Yoğunluk: Genellikle yoğunluk sıcaklığa bağlı olan bir faktördür. Bu sebepten yağın yoğunluğu belirli bir sıcaklığa göre verilir. 20°C sıcaklıkta madensel yağların

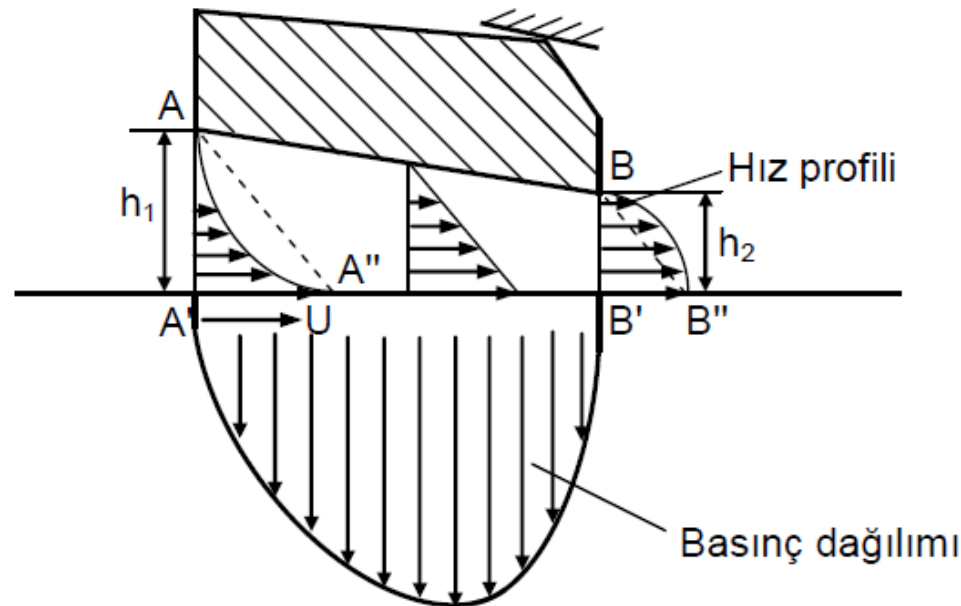
yoğunluğu ortalama olarak $\rho_{20} \approx (0.85 \dots 0.95) \text{ Kg/dm}^3$ olup bir çok durumda $\rho \approx 0.9 \text{ Kg/dm}^3$ olarak alınır.

12. Köpürme direnci: Yağ, kullanım yerine göre şiddetli bir şekilde çalkalanır veya çırpılırsa (dişli kutularında olduğu gibi) hava ile karışır ve bir köpük tabakası oluşur. Köpüklü yağ yük taşıma kabiliyetini kaybeder veya azaltır. Bu tür yağlara ilave edilecek özel bir katık, köpük baloncuklarının birbiri ile birleşip büyüyerek patlamalarını temin etmektedir.

13.3.7 Newton Kanununun Uygulama Örnekleri

13.3.7.1 Daralan Yağ Kaması ve Yük Taşıma

Yağlama teorisi ile ilgili fiziksel açıklama Reynolds'un elde ettiği sonuçlara göre bir yatağın içinde yatakla mil arasında madensel teması kesen yük taşıyan, basınçlı bir yağ filminin (kamasının) bulunmasıdır.



Şekil-13.17 Daralan yağ kaması

Şekil-13.17’de biri hareketli diğeri sabit iki düzlem arasındaki akışkan davranışı gösterilmektedir. Akışkan, yapışkanlığından dolayı hareketli olan yüzey hızında hıza sahiptir. Şekildeki düzlemlere dik istikamette her iki eleman sonsuz uzunlukta olup genişlik boyunca akışın olmadığı kabul edilmektedir. Ortalama akışkan hızının $U/2$ olması halinde iki düzlem arasına giren çıkan akışkan miktarı birim genişlik için sırasıyla

$$Q_{giren} = \frac{U}{2}(h_1 l) \quad (13.40)$$

$$Q_{çıkan} = \frac{U}{2}(h_2 l) \quad (13.41)$$

yazılabilir. $h_1 > h_2$ olduğu için $Q_{giren} > Q_{çıkan}$ ’dır. Bu ise akışkanda süreklilik prensibine aykırıdır. Burada süreklilik prensibi sisteme giren akışkan, sistemden çıkan akışkan miktarına eşit olmalıdır şeklinde değerlendirilmektedir.

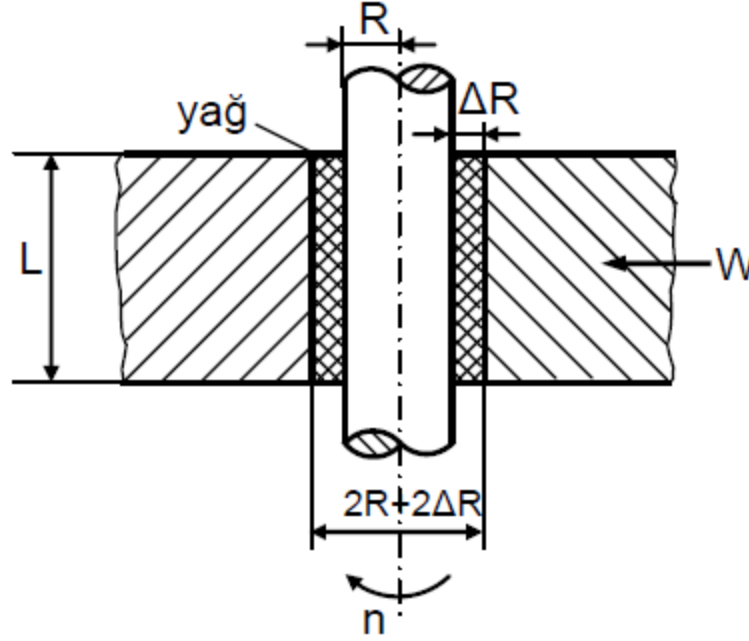
Süreklilik prensibine aykırı olan bu durumu yatak süreklilik şartı sağlanacak şekilde kendi kendisine düzeltir ve iki düzlem arasında bir hidrodinamik basınç ortaya çıkararak giren yağ miktarını azaltır ve çıkan yağ miktarını ise artırır (giren ve çıkan yağ miktarları eşit olur). Başka bir ifadeyle girişteki hız profili konkav, çıkıştaki hız profili ise konveks şekle gelir ve girişle çıkış arasında bulunan bütün kesitlerdeki hız profilleri uygun biçim alır. Böylece girişten çıkışa kadar bütün profillerin alanları eşit olur. Akışkan, viskoz yapısı ve sıkıştırılmaz özelliği dolayısıyla böyle bir performans gösterir.

İçerde bir basınç alanının olması bu basınç alanına karşılık olarak eksenel bir yükün (kuvvetin) madensel temas olmadan sıvı film tarafından taşınması demektir. Bunun için de yağ filmi hareket yönünde daralmalıdır. Ortaya çıkan yağın bu şekline

daralan yağ kaması denir. İki düzlem birbirine paralelse veya yağ kaması hareket yönünde genişliyorsa yukarıdakine benzer olarak bir basınçlı yağ filmi teşekkül etmez.

13.3.7.2 Newton Kanunu ve Petroff Denklemi

Şekil-13.18'de ΔR radyal açıklığında η dinamik viskozitesine sahip viskoz akışkan bulunan, W radyal yükü taşıyan basit bir yatak modeli gösterilmiştir. Bu şekil esas olmak üzere, yağ filmindeki sürtünme momenti ve sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi belirlenebilir.



Şekil-13.18 Newton Kanununun Uygulaması

Newton Kanunu; $\tau = \eta \frac{du}{dy} = \eta \frac{U}{h}$ kullanılarak h film kalınlığı ($h = \Delta R$) olmak üzere,

η sabit alınarak dönen milin çevresel hızı

$$U = \frac{2\pi n}{60} R \quad \text{tanımıyla kayma gerilmesi}$$

$$\tau = \eta \left[\frac{2\pi n}{60} R \right] \frac{1}{\Delta R} \quad (13.42)$$

şeklinde elde edilir.

Sürtünme kuvveti $F_s = \tau A$ olduğundan, akışkanla ıslanan silindirik yüzey alanı $A = 2\pi R L$ eşitlik (13.42) ile birlikte değerlendirilerek

$$F_s = \eta \left[\frac{2\pi n}{60} R \right] \frac{1}{\Delta R} (2\pi R L)$$

ve

$$F_s = \frac{\pi^2}{15} (\eta n R L) \left[\frac{R}{\Delta R} \right] \quad (13.43)$$

şeklinde bulunur.

Viskoz sürtünme momenti ise

$$M_s = F_s R = \frac{\pi^2}{15} (\eta n R^2 L) \left[\frac{R}{\Delta R} \right] \quad (13.44)$$

olarak tarif edilmektedir.

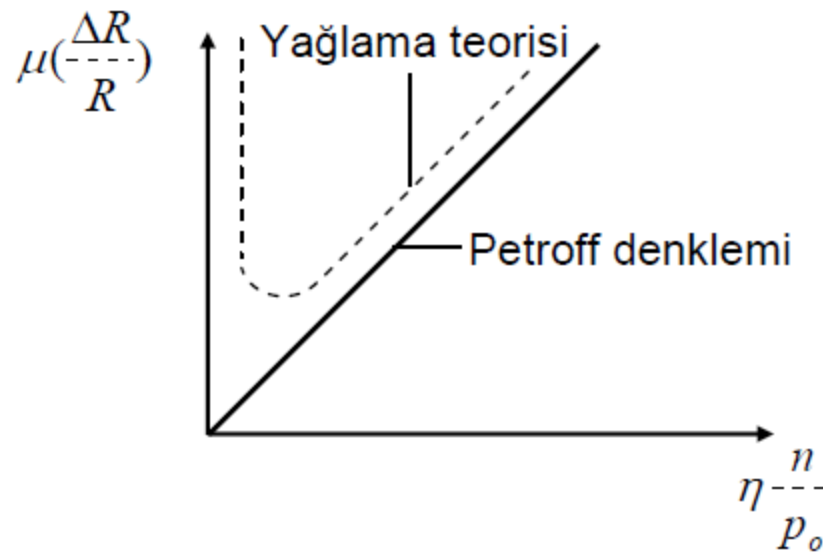
Sürtünme katsayısı, viskoz kuru sürtünme tarifinden

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

olarak belirlenir. Burada W yatağa etkiyen radyal kuvvettir (izdüşüm alanına etkidiği kabul edilerek, $W = 2R L p_o$, p_o : ortalama yatak basıncı). Eşitlik (13.43) de kullanılarak sürtünme katsayısı

$$\mu = \frac{\pi^2}{30} (\eta n / p_o) (R / \Delta R) \quad (13.45)$$

olarak bulunmuş olur. Bu denklem Petroff denklemi olarak bilinir. Şekil-13.19 sürtünme katsayısı μ ile yatak çalışma parametresi $\eta n / p_o$ değişimini göstermektedir.



Şekil-13.19 Sürtünme katsayısı ile viskozite arasındaki değişim

Petroff eşitliği ile verilen μ sürtünme katsayısı ($\eta n / p_o$) çalışma parametresiyle lineer olarak değişmektedir. Şekilden görüleceği üzere düşük hızlarda Petroff denklemi sürtünme katsayısını sıfıra çok yakın bir değer olarak vermektedir. Bu ise normal yağlama teorisi ile çelişki arz etmektedir. Başka bir ifadeyle düşük hızlarda (özellikle sıfıra yakın hallerde) sürtünme katsayısı sonsuza gitmesi gerekirken sıfıra gitmektedir. Bu durum Şekil-13.19'da yine açıkça görülmektedir. Bu nedenle Petroff denklemi düşük hızlar için geçerli olmamaktadır.

Sürtünme momenti sürtünme ile kaybedilen güç için bir ölçü olup $\omega = \pi n / 30$ açısal hızla dönen bir milde viskoz güç kaybı

$$N_s = M_s \omega$$

veya

$$N_s = \frac{\pi^3}{450} \frac{\eta n^2 R^3 L}{\Delta R} \quad (13.46)$$

bulunur. Tasarımcılar Petroff denklemini sürtünme kayıplarına ilk yaklaşımda bulunmak için kullanabilmektedir.

13.3.7.3 Hagen-Poiseuille Denklemi

Bu denklem kılcal borulardaki akışla ilgilidir. Kılcal (çok küçük çaplı) bir boru içinden akışkanın akışı, akışkanın viskozitesinin etkisi altındadır. Bu nedenle kılcal borudan akış incelenerek bir akışkanın viskozitesi ölçülebilir.

Kılcal borudan akış problemi ilk defa 1839'da Alman mühendisi Hagen tarafından pirinç tüpler içerisinde su akışı ile ilgili araştırma yapılarak incelendi. Bir Fransız fizikçisi Poiseuille ise Hagen'den bağımsız olarak benzeri deneyleri yaptı. Poiseuille insan vücudundaki damarlar içinden kanın akışını, kılcal tüpler içinden su akışını deneysel olarak inceleyerek araştırdı ve çalışma sonuçlarını 1840-1842 ve 1846'da yayınladı.

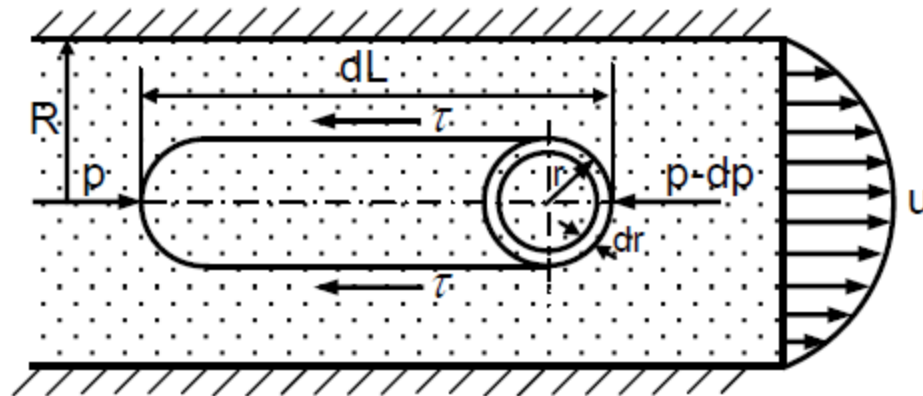
Kılcal bir tüp içinden akış miktarı Newton kanunundan hareketle de bulunabilir. Yapılan kabuller

1. Akışkan, tüpe girişinde ivmelendirilmemelidir.
2. İç sürtünme yüzünden akışkanın ısınması ihmal edilmektedir.
3. Akışkanın akışı laminardır.

4. Akışkan sıkıştırılmaz

5. Kılcal tüpün çapı o kadar küçük ki, tüpün bütün kesitinde basınç sabittir.

Akışkan ivmelendirilmediğine göre Şekil-13.20'deki kılcal tüpün eksenini üzerinde alınan silindirik bir akışkan elemanına etkiyen basınç ve kayma kuvvetleri, statik denge şartını sağlamalıdır.



Şekil-13.20 Kılcal bir tüp içerisinde akış

Şekilde denge ifadesi yazılırsa

$$p\pi r^2 - (p - dp)\pi r^2 - \tau 2\pi r dL = 0$$

ve buradan

$$dp = \frac{2\tau}{r} dL$$

bulunur. Burada τ kayma gerilmesi yerine $\tau = -\eta du / dr$ (r hareketli kısımdan itibaren ölçüldüğünden (-) işareti kullanılmaktadır) yazılarak hıza göre düzenlenirse

$$du = -\frac{r}{2\eta} \frac{dp}{dL} dr \quad (13.47)$$

bulunur. Bu ifade r'ye göre integre edilirse

$$U = -\frac{r^2 dp}{4\eta dL} + C_1 \quad (13.48)$$

hız ifadesi bulunur. Sınır şartı (r=R için U=0) değerlendirilerek C_1 bulunup yerine konursa hız dağılımını veren ifade

$$U = \frac{R^2 - r^2}{4\eta dL} dp \quad (13.49)$$

olarak bulunur.

dr halkasından geçen debi miktarı ise

$$dQ = (2\pi r dr) U$$

ve

$$dQ = 2\pi r dr \left[\frac{R^2 - r^2}{4\eta dL} \right] dp$$

bulunur. Yine r 'ye göre integre edilirse toplam debi miktarı

$$Q = \frac{2\pi}{4\eta} \frac{dp}{dL} \int_0^R (R^2 - r^2) r \, dr$$

ifadesinden

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{dp}{dL} \quad (13.50)$$

olarak elde edilir. Burada η dinamik viskozite, R ise yarıçapıdır. Bu eşitlik yardımıyla bir boru içinden akan akışkanın viskozitesi belirlenebilir. Şekil-13.21 dikkate alınırsa

$$dp = \rho g h \quad \text{ve} \quad dL = L \quad \text{ile}$$

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\rho g h}{L}$$

ifadesi (13.44) eşitliğinde kullanılarak kılcal borudan birim zamanda akan akışkan miktarı (Q)

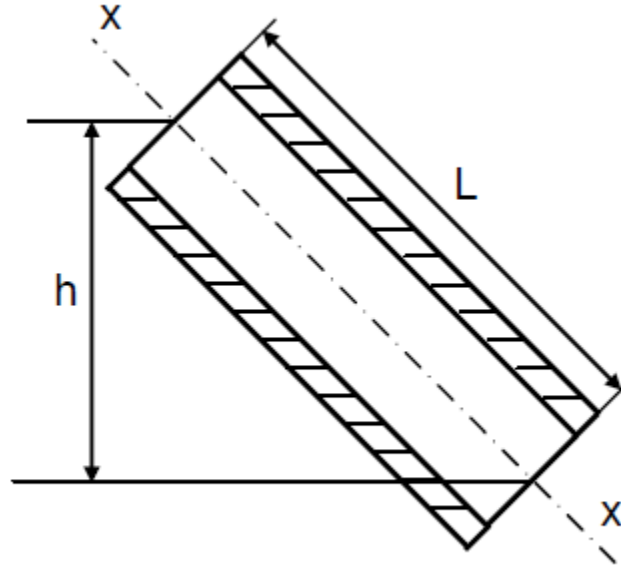
$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\rho g h}{L} = \frac{V}{t}$$

olur. Burada V borudan geçen akışkanın hacmi, t ise zamandır.

Kinematik viskozite

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\pi g h R^4}{8L} \frac{t}{V} \quad (13.51)$$

formülü yardımıyla bulunabilir ve t zamanında akan akışkan miktarından (V hacimli) faydalanarak ν kinematik viskozitesi ölçülebilir. Bu metod, ticari viskozimetrelerin tasarım esasını oluşturmakta olup kinematik viskozitenin ölçülmesi bölümünde daha ayrıntılı incelenmiştir.



Şekil-13.21 Viskozite ölçümü için kılcal boru modeli