

2. AKMA OLAYI

(Ref. e makaleleri)

Akan bir akışkanın davranışı, katı-sınırlamaların etkisinde olup olmamasına göre değişir. Sabit duvarların etkisinde olmayan bir akışkanda kayma ve kayma gerilimleri bulunmaz.

Sıkıştırılmayan ve kayma etkisi olmayan bu tip akışkanlara "potansiyel akışkan" denir; bunlar Newtonian mekaniğine ve kütle korunumu ilkesine uyarlar.

Potansiyel akışın iki önemli özelliği vardır:

- (1) Akım içinde sirkülasyon ve karışma yoktur,
- (2) Sürtünme doğmaz, dolayısıyla mekanik enerji ısıya dönüşmez.

Düşük hızlarla akan veya yüksek viskoziteli akışkanlar hariç, katı sınırın akış üzerindeki etkisi, tüp duvarına bitişik bir sıvı tabakasında kalır. Bu tabakaya "sınır tabakası" denir ve sınır tabakasının dışında potansiyel akış varlığını sürdürür. Akma işlemi iki kısımda ele alınır:

- (1) Sınır tabakası,
- (2) Kalan kısım.

Bazı hallerde sınır tabakası ihmal edilir ve akışın sadece potansiyel olduğu kabul edilebilir. Oysa, borulardan olan akışlarda sınır tabakası tüm kanalı kaplar; böyle durumlarda potansiyel akış bulunmaz.

Duvarların akışkan akımını etkilemesiyle hız-dalgalanması ve kayma-gerilimi alanlarında birleşme, türbülens başlaması, sınır tabakaları oluşması ve büyümesi, sınır tabakalarının katı sınırlardan ayrılması gibi önemli olaylar meydana gelir.

Laminer Akış

Akışkanlar düşük hızlarda karışma olayı göstermezler, tabakalar oyun kartları gibi birbiri üzerinde kayarak hareket eder. Bu tip akış mekanizmasına "laminer akış" denir. Yüksek hızlarda türbülens oluşur, tabakalar arasında hareketler (eddy=girdap) başlar ve akışkanda bir karışma olayı meydana gelir.

Newtonian ve Non-Newtonian Akışkanlar

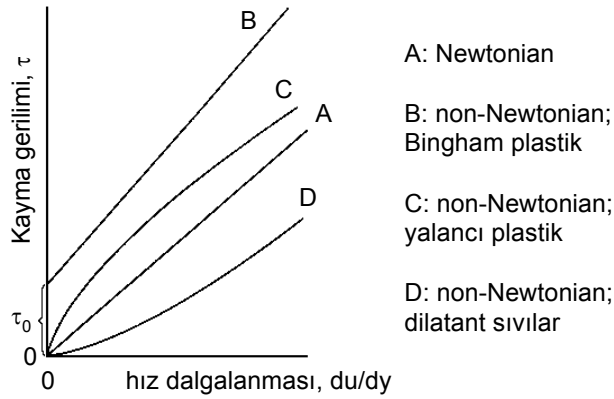
Bir akışkanın her noktasında bir kayma hızı ve bir kayma gerilimi bulunur; bu değerler birbiriyle bağıntılıdır ve akışkanın reolojik davranışlarını tanımlar. Kayma hızı, kayma gerilimine karşı grafiğe alındığında (sıcaklık ve basınç sabit), Şekil-.3 deki gibi eğriler elde edilir.

En basit hal, orijinden geçen A doğrusuyla gösterilen reolojik davranıştır; bu tip akışkanlara "Newtonian akışkanlar" denir. Gazlar, gerçek çözeltiler, koloidal olmayan sıvılar Newtonian özellik gösterirler.

Şekildeki B, C, D eğrileriyle tanımlanan akışkanlar "non-Newtonian" akışkanlardır. B eğrisini veren sıvılara "Bingham plastikleri" denir; örneğin, aktif çamur sistemi gibi. Bunlar τ_0 gibi bir kayma gerilimine kadar akmaz, sonra doğrusal bir gerilim-hız eğrisi verirler.

C eğrisi bir yalancı-plastiğin davranışını gösterir; orijinden geçer, düşük kaymalarda aşağı konkav bir yol izler ve yüksek kaymalarda doğrusallaşır. Lastik lateksi örnek olarak verilebilir.

Şişen (dilatant) akışkanlar D eğrisini verirler; düşük kaymalarda yukarı konkavdır ve kayma hızı yükseldiğinde doğrusal bir yol izlerler. Bazı kum-dolgulu emülsiyonlar bu tip davranışlar gösterir. Yalancı plastiklere "kayma-hızıyla incelen", dilatant akışkanlara "kayma-hızıyla kalınlaşan" akışkanlar denir.



Şekil-3: Newtonian ve non-Newtonian akışkanlar için Kayma gerilimi-hız dalgalanması.

Zaman Bağımlı Akış

Şekil-3'deki eğriler, akışkana uygulanan kayma geriliminin süresine bağlı değildir. Oysa bazı non-Newtonian sıvılar kayma geriliminin süresine göre değişik davranışlara girerler. Sabit bir kayma hızında sürekli karıştırılan akışkanda kırılma olur ve kayma gerilimi düşer; bu tip sıvılar "tikotropik sıvılar"dır. "Rheopektik" bışikler bunun tersi bir davranış gösterirler; sabit bir kayma hızında, kayma gerilimi zamanla artar. Akışkan durgun halde bekletildiğinde tekrar orijinal yapısına döner.

Viskozite

Newtonian bir akışkanda kayma hızı, kayma gerilimiyle orantılıdır; Orantı sabitine "viskozite" denir ve aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\tau_v = \frac{\mu du}{g_c dy} \quad (6)$$

μ mutlak viskozitedir (lb/ft.sn). g_c nin fps sisteminde sayısal değeri 32.174 ft.lb_m / lb_f.sn² dir (Newton Kanunu düzeltme faktörü). cgs veya kms sistemleri uygulandığında $1 / g_c = 1$ olup birimsizdir. τ_v , kayma gerilimini (lb_f / ft²), du / dy hız dalgalanmasını (1/sn) gösterir.

$$\frac{du}{dy} = \frac{d(dx/dt)}{dy} = \frac{d(dx/dy)}{dt}$$

dx/dy = kaymadır (birimsiz). Akışkanın viskozitesi,

$$\mu F = \frac{\mu}{g_c}, \text{ lb}_f \cdot \text{sn} / \text{ft}^2$$

ifadesiyle de verilebilir.

Mutlak viskozitenin birimi Poise = 1 g/cm.sn olarak bilinir (santipoise, cP = 0.01 poise). İngiliz birimleri uygulandığında,

$$1 \text{ poise} = 0.0672 \text{ lb} / \text{ft} \cdot \text{sn} = 242 \text{ lb} / \text{ft} \cdot \text{sa} \text{ tir.}$$

Kinematik viskozite, ν , ft² / sn (cm² / sn),

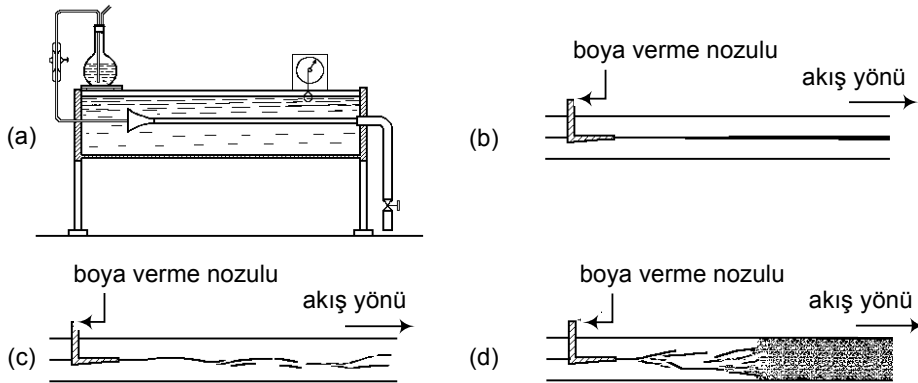
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\text{mutlak viskozite}}{\text{yoğunluk}}$$

Kinematik viskozitenin birimi Stokes = $1 \text{ cm}^2/\text{sn}$ dir. (santistokes, cS = 0.01 Stokes)

Türbülens

Laminer ve türbülent akışlar arasındaki fark, Osborne Reynolds tarafından klasik bir deneyle açıklanmıştır (1883). Şekil-4(a) daki düzende, yatay bir cam tüp yine yatay duran ve suyla doldurulmuş cam-duvarlı bir tanka daldırılmıştır. Cam tüpten, bir valf ile kontrol edilerek su akıtılır; tüpün girişi çan şeklindedir.

Tüp girişinden, ince renkli su filamentini oluşturacak bir nozul yoluyla renkli su verilir. Tüpteki su akımı düşük hızlarda olduğunda renkli su ile akımın birbiriyle karışmadığı, renkli suyun akıma paralel hatlar şeklinde ilerlediği görülür (Şekil-4b). Normal su akımının hızı artırıldığında, önce renkli su çizgileri dalgalanmaya başlar (Şekil-4c) ve "kritik hız" a ulaşıldığında çizgiler kaybolarak renkli su, su akımının kesiti boyunca düzenli bir şekilde dağılır (difüzenir) (Şekil-4c). Renkli suyun bu davranışı, kritik hızdan sonra akımının laminer harekette olmadığını, çapraz akımların ve eddy hareketlerinin etkisine girdiğini gösterir; bu tip harekete türbülent akış denir.



Şekil-4: Reynolds deneyi.

(a) Deney düzeneği, (b) düşük hızda (laminer akım), (c) hızın artırılması sırasında, (d) yüksek hızda (türbülent akım), akım özellikleri.

Türbülensin Doğası

Türbülens, Şekil-4' de görüldüğü gibi bir borudan akışla oluşabileceği gibi başka yollarla da meydana gelebilir.

Bir akımın katı duvarlarla (sınırlarla) temas etmesi veya farklı hızlarda hareket eden iki sıvı tabakası arasındaki temastan da türbülens doğar. Akışkan kapalı veya açık kanallardan akarken veya akım içine daldırılmış katı malzemelere çarparak geçerken duvar türbülensi meydana gelir. Serbest türbülens, bir jet akımın durgun bir mayi içine akması veya katı bir duvardan bir sınır tabakasının ayrılarak mayi içine akmasıyla oluşur. Serbest türbülens, özellikle karıştırma olaylarında önemlidir.

Türbülent akış çeşitli büyüklüklerdeki eddy (girdap) kütlelerinden meydana gelir. Sürekli olarak büyük girdaplar oluşur ve bunlar küçük girdaplara parçalanır; sonuçta en küçük olanlar yok olur. Akımda geniş bir eddy spektrumu bulunur. En büyük girdap en küçük boyutta türbülent akımı tanımlar; en küçük girdap 1 mm dolayındadır. Bundan daha küçük olanlar viskoz kaymayla yok edilir. Bir girdap içindeki akış laminerdir. En küçük olanı bile 10^4 kadar molekül içerdiğinden, tüm girdaplar makroskopik büyüklüktedir ve türbülent akış moleküler bir olay değildir.

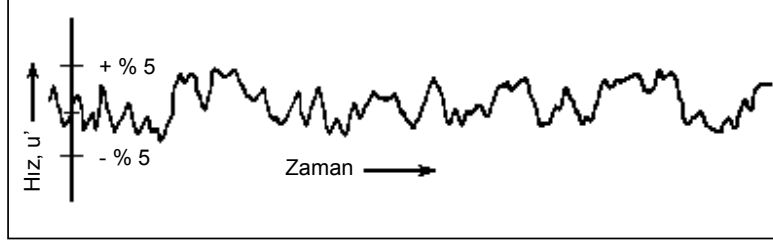
Bir girdap, bir miktar mekanik enerjiye sahiptir. Büyük girdapların enerjisi, akışkanın potansiyel enerjisinden sağlanır. Enerji yönünden bakıldığında türbülens, akışkanın oluşmuş büyük girdapların bir seri küçük girdaplara dönüşmesi, dolayısıyla mekanik enerjinin dönme enerjisine transferidir. Büyük girdapların küçüklere, onların da daha küçüklere bölünmesi sırasında mekanik enerji ısıya dönüşmez, fakat başlangıçtaki basıncı da koruyamaz. Bu mekanik enerji, ancak viskoz harekette en küçük girdapların yok olması sırasında ısıya dönüşür.

Bir türbülent akış alanında, bir noktadaki hız dalgalanması Şekil-5'de verilmiştir. Şekildeki grafik, gerçek hız vektörünün tek bileşenidir; üç bileşen de böyle hızlı büyüklük ve yön değişikliği gösterir. Keza, aynı noktadaki basınç ta (hız ile) süratli bir dalgalanma içindedir.

x, y, z yönlerindeki toplam hız bileşenleri u_i, v_i, w_i ; akımının x yönündeki sabit net hızı u ; x, y, z yönlerindeki hız sapmaları u', v', w' ile gösterildiğinde aşağıdaki hız bağıntıları yazılabilir.

$$u_i = u + u' \quad v_i = v' \quad w_i = w' \quad (7)$$

Bir-boyutlu akışta y ve z eksenleri boyunca akış bulunmadığından v ve w terimleri ihmal edilir, $v = 0$, $w = 0$ dir.



Şekil-5: Türbülent akışta hız dalgalanmaları; % değerleri, sabit net hıza göre verilmiştir.

Sapan hızlar u' , v' , w' , sıfır dolayında dalgalanır. Şekil-5, u' yü göstermektedir. Basınç için,

$$p_i = p + p' \quad (8)$$

yazılır. p_i değişken yerel basınç, p herhangi bir basınç göstergesiyle ölçülen sabit ortalama basınç, p' ise girdaplar nedeniyle oluşan basınç dalgalanmasıdır.

Türbülent hızların ve basınçların tekrarlanabilir dalgalanmalar göstermeleri nedeniyle, t_0 zaman periyodu (birkaç saniye) için aşağıdaki bağıntılar yazılır.

$$\begin{aligned} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} u' dt &= 0 & \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} w' dt &= 0 \\ \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} v' dt &= 0 & \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} p' dt &= 0 \end{aligned}$$

Bir dalgalanmanın her pozitif değeri için eşit miktarda bir negatif değeri vardır ve cebirsel toplam sıfırdır. Hız bileşenlerinin ortalama değerlerinin karesi ise sıfır olmaz. Çünkü pozitif ve negatif değerlerin kareleri daima pozitif olduğundan, örneğin $(u')^2$ sıfır olmaz; u' bileşeni için,

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} u'^2 dt = (\mathbf{u})^2 \quad (\text{ortalama})$$

Laminer akışta girdap olayı yoktur; hız sapmaları ve basınç dalgalanmaları bulunmaz. u_x akış yönündeki toplam hız sabittir ve u ya eşittir; v_x ve w_x ise sıfırdır.

Sınır Tabakalarda Akış

Sınır tabakası oluşumuna örnek olarak Şekil-6(a)'daki gibi ince bir levhaya paralel yönde akan bir akışkanı inceleyelim. Levha ile sıvının temas ettiği yüzeyde akışkanın hızı sıfırdır; levhadan uzaklaştıkça hız artar ve bir mesafeden sonra kararlı ve sabit bir değere ulaşır. Şekildeki üç eğri, levhadan farklı uzaklıklardaki x değerlerine göre çizilmiştir. Eğrilerin eğimi levhaya yakınlaştığında hızla değişir; keza, levhadan belirli bir uzaklıkta yerel hız, tüm akışkan akımının hızına yaklaşır.

Şekil-6(a) daki noktalı eğri (OL) hız değişikliği sınırını gösterir; eğrinin altındaki bölge hızın sıfırdan (duvarda) başlayarak kararlı hale kadarki değer değişimini gösterir. Eğrinin üstündeki bölgede hız değişimi yoktur ve hız sabittir. OL nin akışkan akımını iki bölgeye ayırdığı hayal edilebilir.

Bu hayali bölgelerden OL ile levha arasında kalan kısma sınır tabakası denir.

Sınır Tabakalarda Laminer ve Türbülent Akış

Akışkanın hızı, katı-akışkan arasındaki yüzeyde sıfırdır ve katı yüzeye yakın kısımlardaki hızlar oldukça küçüktür. Bu nedenle katı yüzey yakınındaki akış laminer karakterdedir. Yüzeyden uzaklaştıkça hız artar; sabit hızın altında olduğu halde katı yüzeyden uzakta akım türbülent özelliğe döner.

Türbülensin tam olarak oluştuğu yer ile laminer akış arasındaki bölge bir geçiş bölgesidir ve her iki akımın karakterlerini gösterir; buraya tampon (buffer) bölge denir. Bu tanımlamaya göre, türbülent sınır tabakasının üç bölgeden oluştuğu söylenebilir: viskoz-alt tabaka, tampon tabaka ve türbülens sınır.

Kararlı bir hızla akan bir akışkana düz bir levha daldırıldığında oluşan sınır tabakası incedir ve bu tabaka içindeki tüm akışkan düşük bir hızla akar. Bu koşullarda sınır tabakası içindeki akış tümüyle laminerdir. Sınır tabakasının kalınlığı arttıkça türbülensin oluştuğu bir noktaya gelinir; bu anda sınır tabakası kalınlaşmasında ani bir artış (sıçrama) görülür (Şekil-.6b)

Sınır tabakasındaki akış tümüyle laminer olduğunda tabakanın kalınlığı Z_x , $x^{1/2}$ ile orantılı olarak artar (x = levhadan olan uzaklık). Türbülensin oluşmasından kısa bir süre sonra Z_x deki artış $x^{1.5}$ olur; türbülens tam oluştuğunda bu artış $x_{0.8}$ 'e düşer.

Laminer - Türbülent Akış Geçişi: Reynolds Sayısı

Bir laminer sınır tabakasının türbülense geçiş noktasını saptayan faktörler, Reynolds sayısı (boyutsuz) ile tanımlanır.

$$N_{Re} = \frac{L u \rho}{\mu} \quad (9)$$

N_{Re} = Reynolds sayısı, L = akış sisteminin en önemli boyutunun uzunluğudur; borularda çap, bir levhaya paralel akışta (Şekil-6a ve 3.6b deki gibi) x tir. ρ = yoğunluğu, μ =viskoziteyi, u = yerel hızı gösterir. Reynolds sayısı tüm akım için hesaplanır.

Bir levha boyunca ilerleyen paralel akımda türbülent akışın ilk gözlemlendiği Reynolds sayısı $10^5 - 3 \times 10^6$ arasındadır. Levha pürüzlü ve türbülensin şiddeti yüksek olduğunda geçiş daha düşük Reynolds sayılarında gerçekleşir. Keza, levha pürüzsüz ve türbülensin şiddeti düşükse Reynolds sayısı yükselir.

Şekil-4 teki gibi çan biçiminde girişi olan bir tüpte, keskin köşelerde sınır tabakası ayrılması olmaz; çan biçimli giriş bunu engeller. Düz tüpe girişte bir sınır tabakası oluşumu başlar (Şekil-6c) ve gittikçe kalınlaşır. Bu kademede sınır tabakası, tüp kesitinin sadece bir kısmını kaplar; toplam akım, orta kısımda (göbek) sabit hızda akan (çubuk şeklinde) akışkan ile duvar-orta kısım arasındaki halka şeklinde sınır tabakasından oluşur.

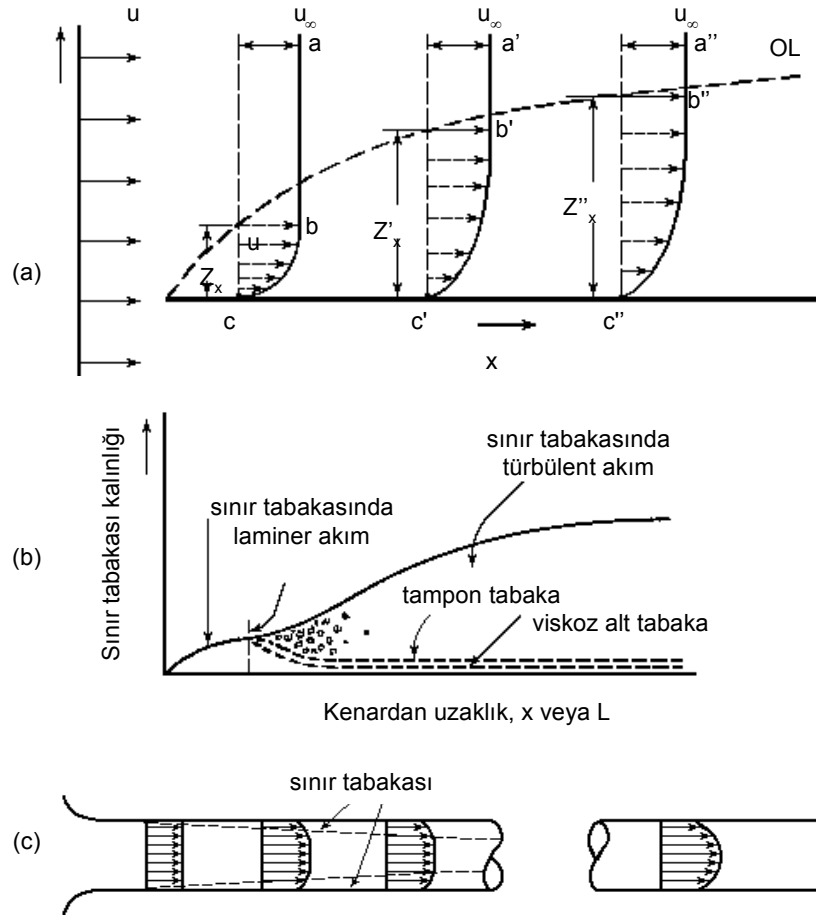
Sınır tabakasında hız, 0'dan (duvarda) sabit hıza (orta kısımda) kadar yükselir. Akım tüpte daha da ilerlediğinde, sınır tabakasının tüp kesitinde kapladığı kısım artar ve nihayet tüpün merkezine ulaşır, çubuk-şeklindeki orta kısım (göbek) kaybolur ve sınır tabakası akımın tüm kesitini kaplar. Bu noktada tüpteki hız dağılımı son şeklini almıştır ve tüpün kalan kısmında değişmez. Son hız dağılımı, Şekil-6c deki son eğriyle gösterilmiştir. Bu duruma "tümüyle yaratılmış akım" denir. Böyle bir akımda hız dağılımı tüm kesitlerde aynıdır ve V (ortalama), ρ , μ değerleri boru boyuyla değişmez.

Reynolds, dairesel bir boru boyunca tümüyle yaratılmış akım için, laminer akımın, türbülente dönüştüğü kritik hızın dört parametreye bağlı olduğunu belirtmiştir; bunlar borunun çapı (D , ft); akışkanın viskozitesi (μ , lb/ft.sn), yoğunluğu (ρ , lb/ft³) ve ortalama doğrusal hızıdır (V , ft/sn).

$$N_{Re} = \frac{D V \rho}{\mu} = \frac{D V}{\nu} = \frac{D G}{\mu}$$

ν = akışkanın kinematik viskozitesi (ft/sn),

G = akışkanın kütle hızıdır (lb/ft².sn).



Şekil-6: (a) Prandtl sınır tabakası; x = levhadan uzaklık, u_{∞} = kararlı akımın hızı, $Z_x = x$ mesafesindeki sınır tabakasının kalınlığı, u = yerel hız, $abc-a'b'c'-a''b''c''$ noktalarında "hız duvarından mesafe" eğrileri, OL = sınır tabakası hattı. (b) Düz bir levhada türbülent sınır tabakasının doğuşu. (c) Bir borudaki akışta sınır tabakasının doğuşu

Reynolds sayısı 2100 den küçük olduğunda daima laminer akım vardır. Normal koşullardaki akışta $N_{Re} > 4000$ in üzerinde türbülent karakter görülür. 2100 – 4000 arasındaki bölge, tüp girişi ve çıkışının şekline göre, akımın laminer veya türbülent olabildiği geçiş bölgesidir

Sürtünme Faktörü

Özellikle türbülent akışta diğer önemli bir parametre, "sürtünme faktörü, (f)" dır. Sürtünme faktörü, kayma geriliminin, hız yüksekliği ($V^2 / 2g_c$) ve yoğunluk çarpımına oranı olarak tarif edilir.

$$f = \frac{\tau_w}{\rho V^2 / 2 g_c} = \frac{2 g_c \tau_w}{\rho V^2}$$

Borulardaki kabuk sürtünmesini ölçmek için kullanılan dört özellik, h_{fs} , Δp_s , τ_w , f aşağıdaki eşitlikle birbirine bağlıdır (r_w = borunun yarıçapı, L = borunun uzunluğudur).

$$h_{fs} = \frac{2 \tau_w}{\rho r_w} \Delta L = - \frac{\Delta p_s}{\rho} = 4 f \frac{\Delta L V^2}{D 2 g_c} \quad (10)$$

s alt indis, sürtünme kaybının (h_f) sadece kabuk (skin) sürtünmesinden olduğunu gösterir.

Pürüzlülüğün Etkisi

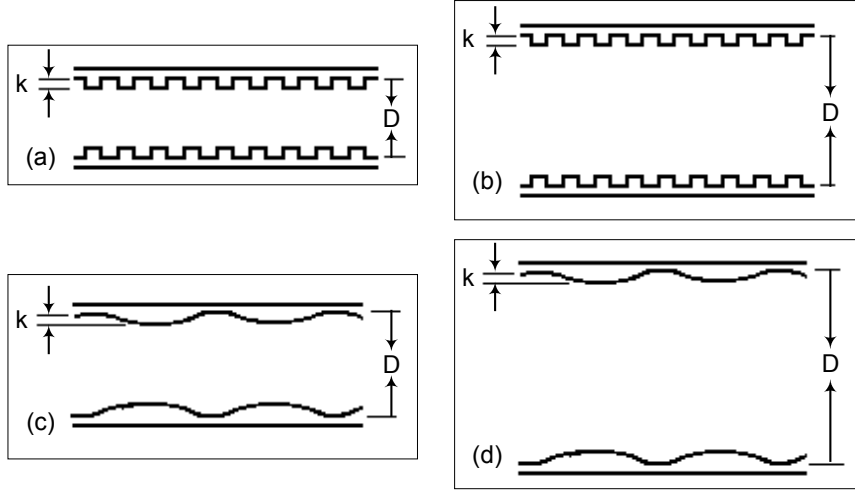
Türbülent akışta pürüzlü (kaba) bir boru, aynı Reynolds sayısı için, düz bir boruya göre daha büyük bir sürtünme faktörü verir. Pürüzlü boru düzgün hale getirildiğinde, sürtünme faktörü düşer.

Borunun daha da pürüzsüzleştirilmesiyle sürtünme faktöründe daha fazla azalma olmayan bir tüpe "hidrolik düzgünlükte tüp" denir ve aşağıdaki eşitlik geçerlidir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.06 \log (N_{Re} \sqrt{f}) - 0.40$$

Şekil-.7'de çeşitli pürüzlülükler görülmektedir. Tek bir pürüz yüksekliği k ile gösterilmiştir; buna pürüzlülük parametresi denir. f değeri, N_{Re} ve k / D (relatif pürüzlülük) nin fonksiyonudur (D = borunun çapı).

Laminer akışta k çok büyük olmadıkça, pürüzlülüğün sürtünme faktörüne önemli bir etkisi yoktur.



Şekil-7: Pürüzlülük çeşitleri; her bir relatif pürüzlülük değeri için, (a) ve (b) deki tip için farklı bir $f - N_{Re}$, (c) ve (d) için farklı bir $f - N_{Re}$ eğri ailesi elde edilir.

Sürtünme Faktörü Grafikleri

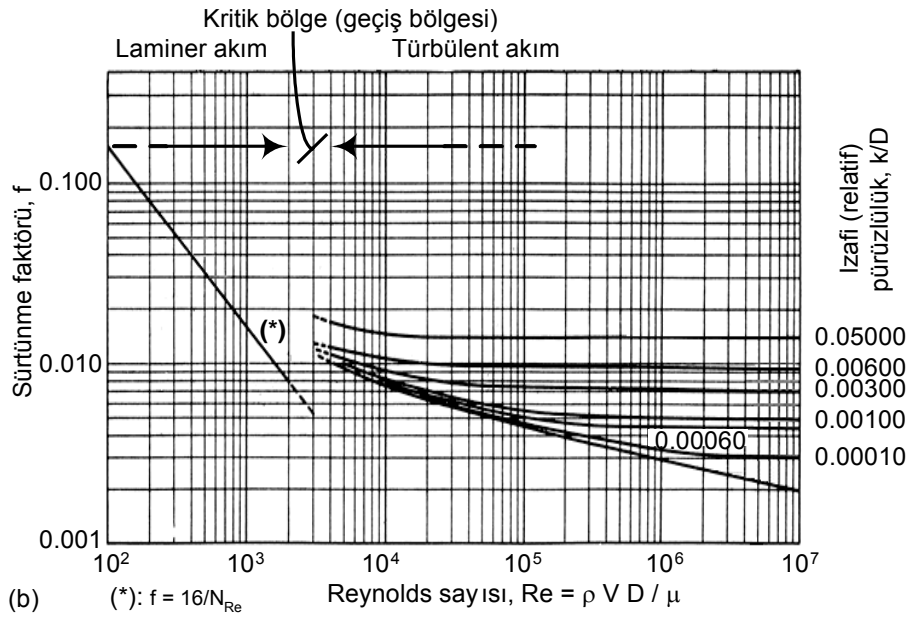
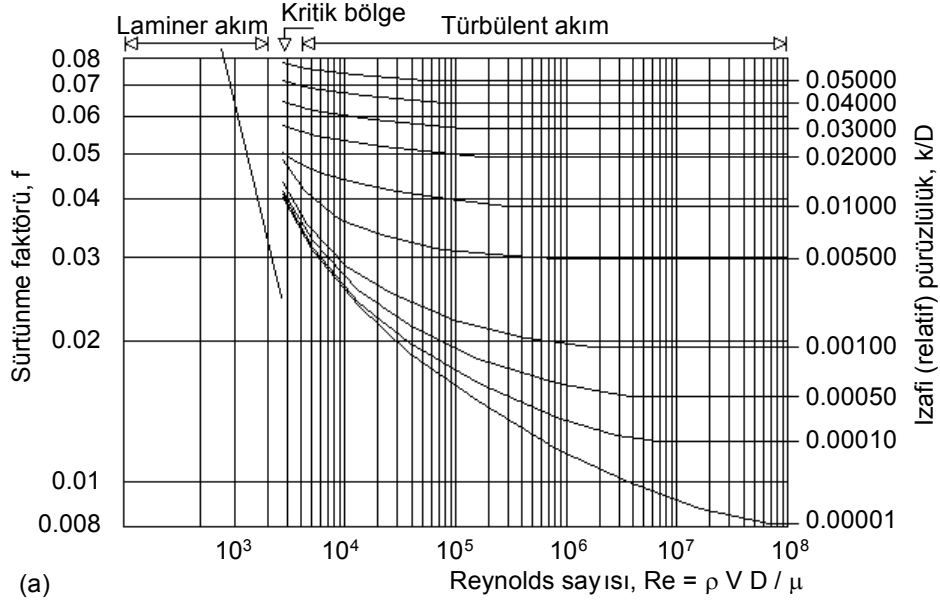
Pürüzsüz veya pürüzlü boruların sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı (log) grafiklerle verilir (Şekil-8a, Moody diyagram). Sürtünme faktörü f ve sürtünme kaybı h_f arasındaki bağıntıyı gösteren Denklem(10)dan yararlanılarak, laminar akışta sürtünme faktörü ile Reynolds sayısı arasındaki aşağıdaki bağıntı çıkarılır;

$$f = 16 / N_{Re}$$

Bu eşitliğin log-log grafiği, eğimi -1 olan düz bir hattır. $N_{Re} < 2100$ olan akışkanlar için sürtünme faktörü doğrusu Şekil-8(b)'de görülmektedir.

Türbülent akışta pürüzlü bir borudaki sürtünme faktörü daha büyüktür. Borunun pürüzleri giderildiğinde f değeri düşer. $k =$ pürüzlülüğü (ft) $D =$ boru çapını (ft) gösterdiğinde, $k / D =$ izafi pürüzlülüktür. k / D değerleri, boru standartlarına göre tablolardan bulunur.

Türbülent akışta (Şekil-8b) en alttaki hat düz tüpteki sürtünmeyi gösterir. Grafiklerin kullanımı basittir. Akışkanın akış hızı, yoğunluğu, viskozitesi ile borunun çapı bilinirse Reynolds sayısı hesaplanır. Bu değer apsiste bulunur, karşılığı olan sürtünme faktörü ordinattan okunur ve Denklem(10)dan sürtünme kaybı hesaplanır.



Şekil-8: Sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı eğrileri.

Sürtünme Kaybından Akış Hızının Bulunması

Boru çapı ve akış özellikleri bilindiğinde, Denklem(10)dan h_f bulunur. Ancak h_f değerinden akış hızı hesaplanamaz. Çünkü V hem N_{Re} de ve hem de f de vardır, dolayısıyla Denklem(10)dan, ancak deneme-yanılma yöntemiyle hesap yapılabilir. Daha uygun bir yöntem,

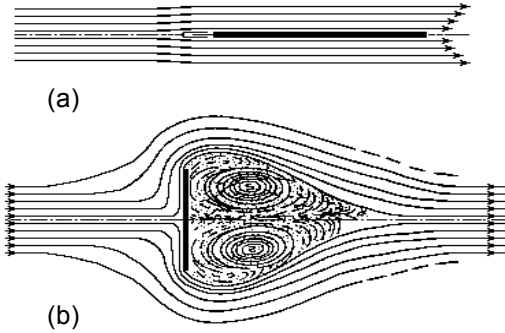
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.0 \log (N_{Re} \sqrt{f}) - 0.40$$

eşitliğinin grafiğe alınmasıdır; absis $N_{Re} \sqrt{f}$, ordinat f olan bu tip grafiklerden, bilinen sürtünme kaybından absis değeri hesaplanır, ordinattan f okunur ve Denklem(10)dan V hesaplanır.

Sınır Tabakası Ayrılması ve İz Oluşumu

Akım yönüne paralel duran düz bir levhanın iki tarafındaki sınır tabakası (Şekil-9a) maksimum bir kalınlığa erişir. Tabakalar ve hız dalgalanmaları, akışkan levhayı terk ettikten sonra bile bir süre devam eder; sonra hız dalgalanması durur, sınır tabakaları kaybolur ve akışkan kararlı bir hızla akmayı sürdürür. Bu durum Şekil-9(a)'da görülmektedir.

Levha akım yönüne dik bir konumda bulunduğunda, akım levhanın üstünden akmadan önce sınır tabakası oluşur. Levhanın arka tarafında, büyük girdapların bulunduğu bir bölge meydana gelir. Bu gölgeye "iz (wake)" bölgesi denir (Şekil-9b).



Şekil-9: Düz levhadan geçen akım; (a) akım levhaya paraleldir, (b) akım levhaya diktir.