

Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 2nd Edition
Yunus A. Cengel, John M. Cimbala
McGraw-Hill, 2010

BÖLÜM 8

BORULARDA AKIŞ



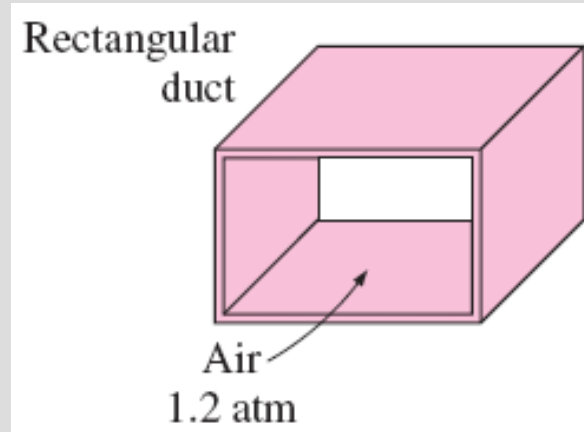
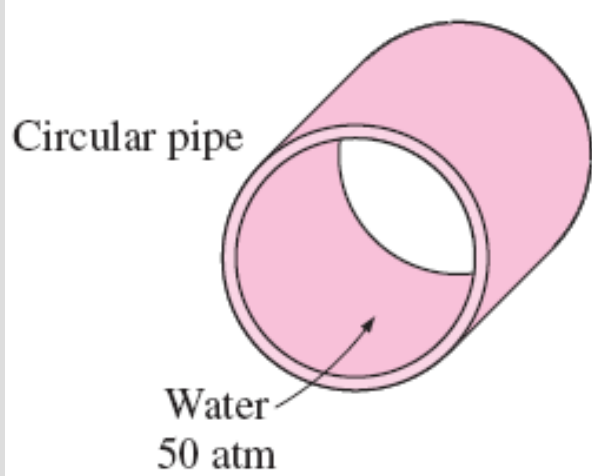
Borularda,
dirseklerde, T
şeklindeki
dirseklerde,
valflerde, vb. akış.

Amaçlar

- Borulardaki laminer ve türbülanslı akış ile tam gelişmiş akış analizleri
- Boru şebekelerindeki akışla ilgili sürekli ve yerel kayıpların hesaplanması ve pompalama gücü gereksinimlerinin belirlenmesi
- Değişik hız ve debi ölçüm tekniklerinin anlaşılması, avantaj ve dezavantajlarının öğrenilmesi

8-1 ■ GİRİŞ

- Boru veya kanatlardaki sıvı veya gaz akışından, yaygın olarak ısıtma ve soğutma uygulamaları ile akışkan dağılım şebekelerinde yararlanır.
- Bu tür uygulamalarda akışkan çoğunlukla fan veya pompa ile bir akış bölümünde akmaya zorlanır.
- Boru akışında basınç düşüşü ve yük kaybı ile doğrudan bağlantılı olan sürtünmeye ayrı bir önem vermek gerekir.
- Bu basınç düşüşü **pompalama gücü ihtiyacını** belirlemek için kullanılır



Dairesel borular, kayda değer oranda bir bozulmaya uğramadan, içi ve dışı arasındaki büyük basınç farklarına dayanabilir, ancak dairesel olmayan borular bunu yapamaz.

Akış teorisi oldukça iyi anlaşılmasına rağmen, teorik çözümler dairesel borudaki tam gelişmiş laminer akış gibi sadece birkaç basit durum için elde edilebilmiştir.

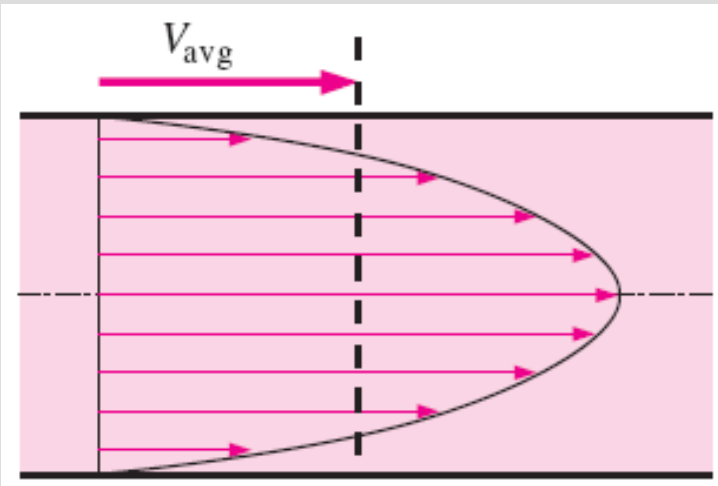
Bundan dolayı, çoğu akış probleminde kapalı-hal analitik çözümlerinden ziyade, deneysel sonuçlara ve ampirik bağıntılara güvenmek zorundayız.

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A_c = \int_{A_c} \rho u(r) dA_c$$

Akım yönündeki bir en-kesitteki ortalama hız V_{avg} , *kütlenin korunumu* ilkesinin sağlanması şartından bulunur.

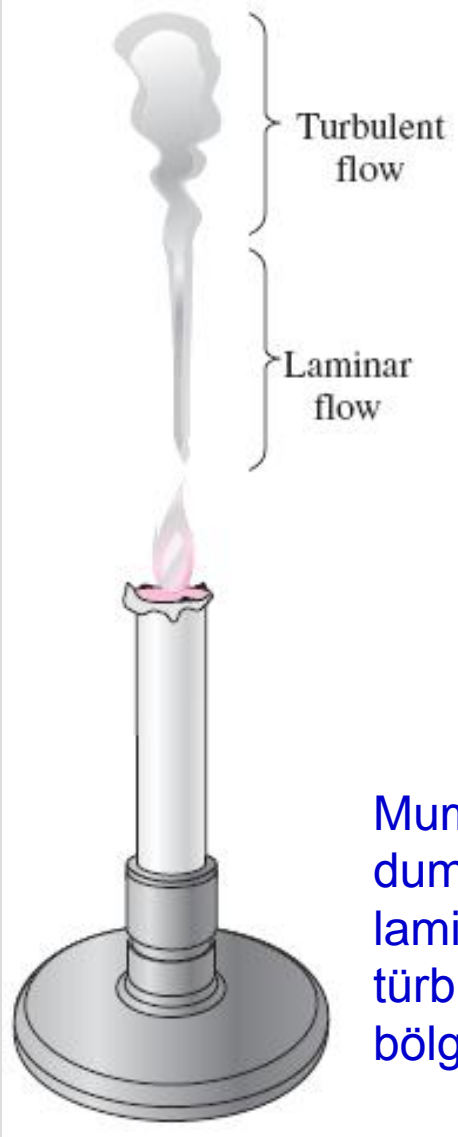
$$V_{avg} = \frac{\int_{A_c} \rho u(r) dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho u(r) 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr$$

R yarıçaplı dairesel bir silindirin içindeki sıkıştırılamaz akım için ortalama hız.



Ortalama hız V_{avg} bir en-kesitteki ortalama hız olarak tanımlanır. Tam gelişmiş laminer boru akışı için V_{avg} maksimum hızın yarısıdır.

8-2 ■ LAMİNAR VE TÜRBÜLANSLI AKIŞLAR



Mum dumanının laminar ve türbülanslı akış bölgeleri.

Laminer: Düzgün akım çizgileri ve çok düzenli hareket

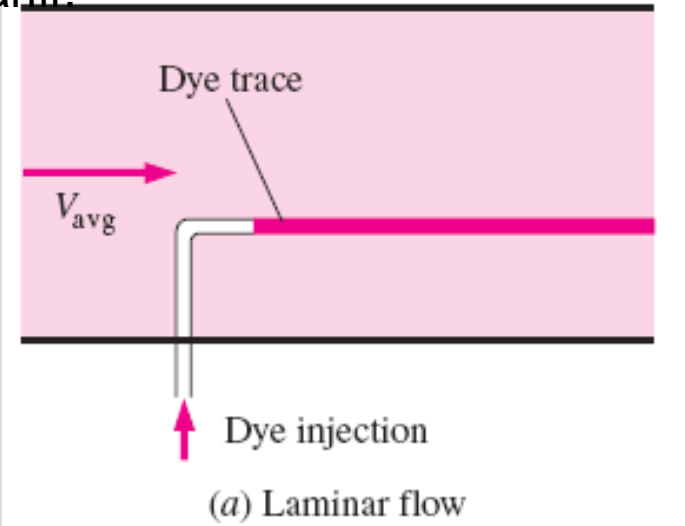
Türbülanslı: Hız çalkantıları ve çok düzensiz hareket.

Geçiş: Akım, laminar ve türbülanslı akış arasında çalkalanır.

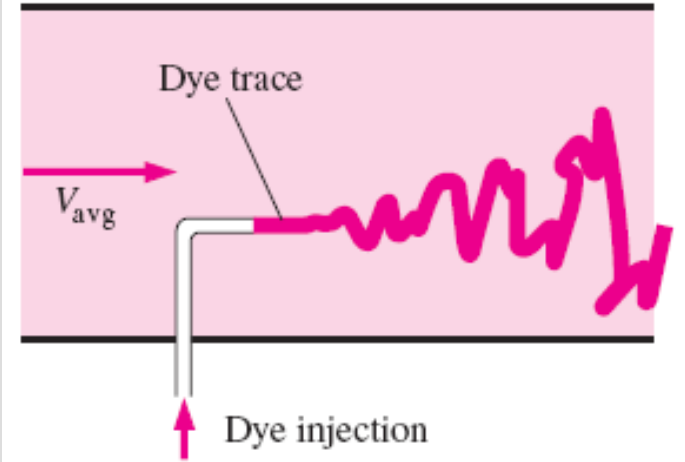
Pratikte birçok akış, türbülanslı olarak değerlendirilir.

Bir boru içerisindeki türbülanslı ve laminar akışa enjekte edilen renkli boyanın davranışı.

Laminer akışa yağ gibi viskozitesi yüksek akışkanların dar bölgelerden ya da küçük borulardan geçişinde rastlanır.



(a) Laminar flow



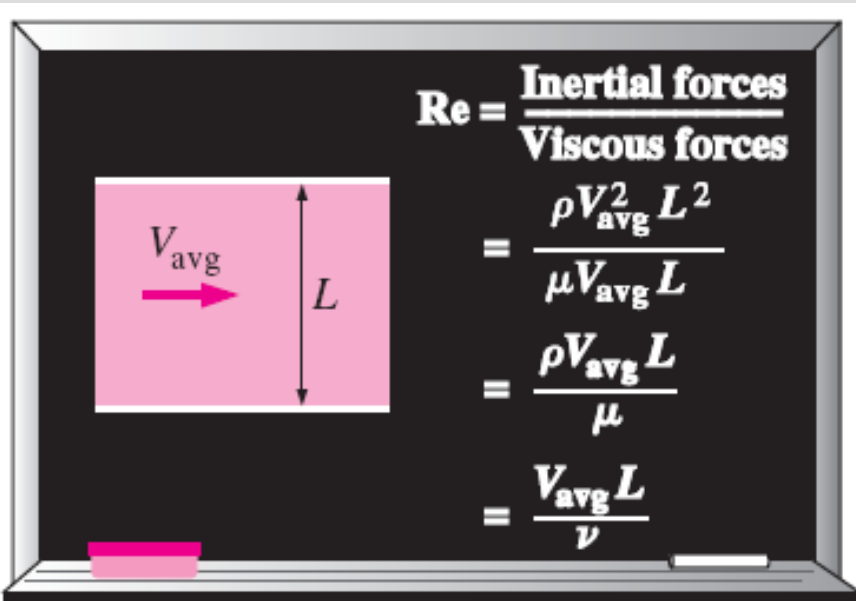
(b) Turbulent flow

Reynolds Sayısı

Laminardan türbülanslı akışa geçiş geometri, yüzey pürüzlülüğü, akış hızı, yüzey sıcaklığı, akışkan türü ve daha birçok şeye bağlıdır.

Akış rejimi temelde akışkandaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranına bağlıdır (**Reynolds sayısı**).

$$Re = \frac{\text{Inertial forces}}{\text{Viscous forces}} = \frac{V_{avg} D}{\nu} = \frac{\rho V_{avg} D}{\mu}$$



Büyük Reynolds sayılarında, akışkan yoğunluğu ve akışkan hızının karesi ile orantılı olan atalet kuvvetleri, viskoz kuvvetlere göre daha büyüktür. Bundan dolayı viskoz kuvvetler akışkanın hızlı ve rasgele değişimlerini engelleyemez (**türbülanslı**).

Küçük veya orta Reynolds sayılarında, viskoz kuvvetler bu değişimleri bastırarak kadar ve akışkanı "çizgi üzerinde" tutacak kadar büyüktür (**laminar**).

Kritik Reynolds sayısı, Re_{cr} :

Akışın türbülanslı olmaya başladığı Reynolds sayısına denir.

Farklı geometriler ve akış şartları için kritik Reynolds sayısının değeri farklıdır.

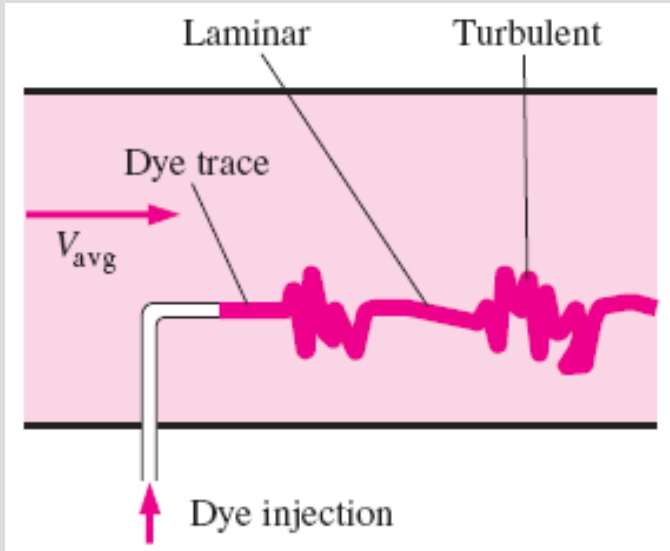
Reynolds sayısı, akışkan elemanı üzerine etki eden atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak düşünülebilir.

Dairesel olmayan borulardaki akışlar için Reynolds sayısı **hidrolik çap** D_h 'ye göre tanımlanır.

$$D_h = \frac{4A_c}{p}$$

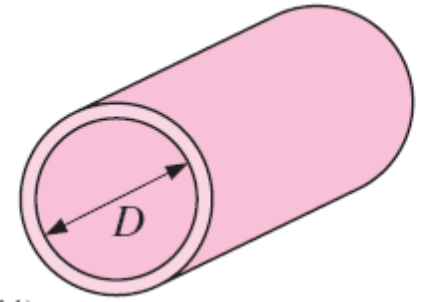
Dairesel borulardaki akış için:

$Re \lesssim 2300$	laminar flow
$2300 \lesssim Re \lesssim 10,000$	transitional flow
$Re \gtrsim 10,000$	turbulent flow



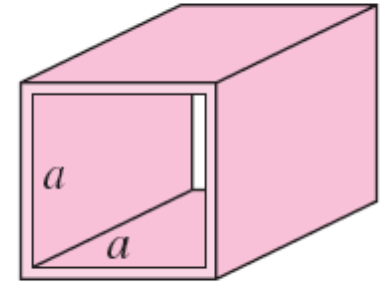
2300 < ile < 4000 arasındaki geçiş akışı bölgesinde akış, laminar ve türbülanslı durumlar arasında rasgele bir şekilde değişir

Circular tube:



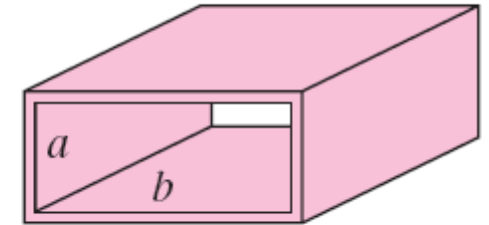
$$D_h = \frac{4(\pi D^2/4)}{\pi D} = D$$

Square duct:



$$D_h = \frac{4a^2}{4a} = a$$

Rectangular duct:



$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$

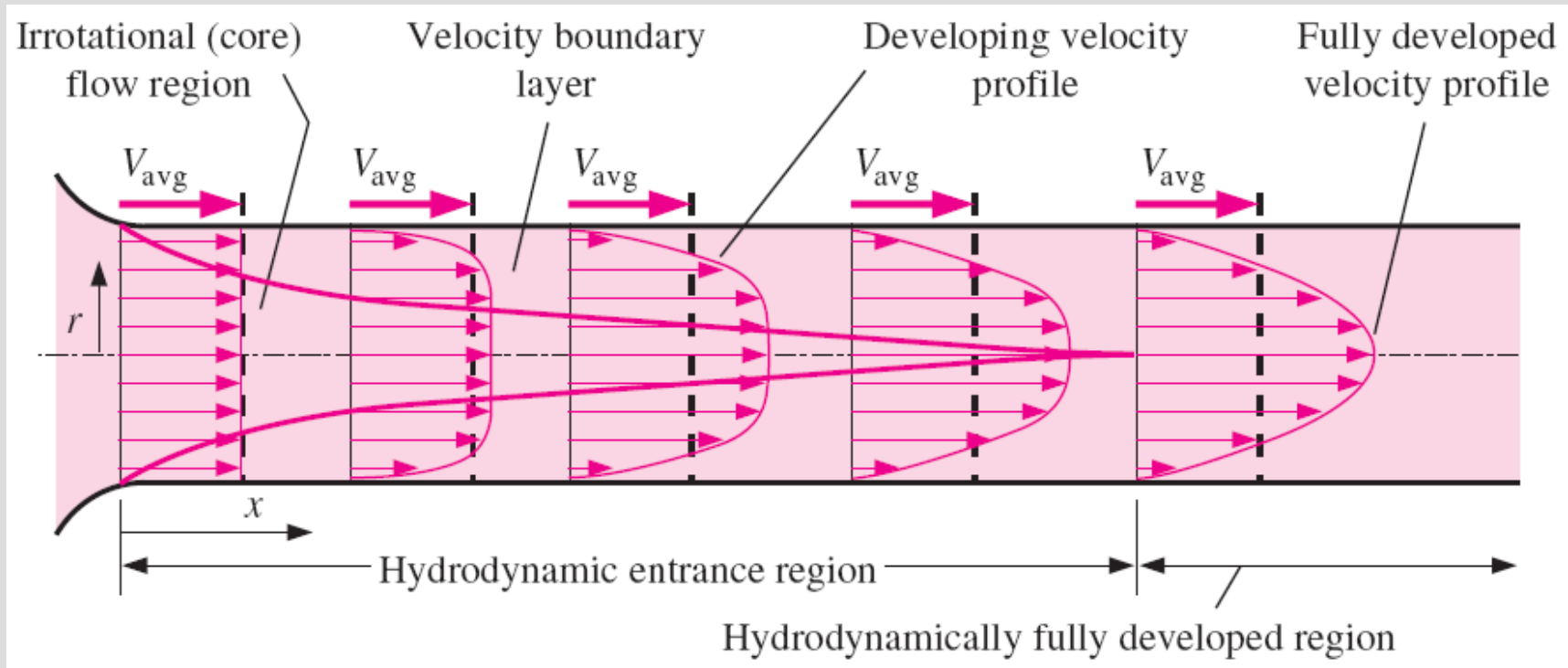
Hidrolik çap $D_h = 4A_c/p$ dairesel borular için çapa dönüşecek şekilde tanımlanır.

8-3 ■ GİRİŞ BÖLGESİ

Hız sınır tabakası: Akışkanın viskozitesinin neden olduğu viskoz kayma kuvvetlerinin etkisinin hissedildiği akış bölgesidir.

Sınır tabaka bölgesi: Viskoz etkiler ve hız değişimleri önemlidir.

Dönümsüz (çekirdek) akış bölgesi: Sürtünme kuvvetlerinin ihmal edilebilir olduğu ve radyal yönde hızın sabit kaldığı bölgedir.



Boruda hız sınır tabakasının gelişimi (Görüldüğü gibi laminar akışta gelişmiş ortalama hız profili paraboliktir, fakat türbülanslı akışta bu biraz daha yassı veya daha doludur).

Hidrokinamik giriş bölgesi: Borunun girişinden sınır tabakanın merkez çizgisi ile birleştiği yere kadar olan bölgeye denir.

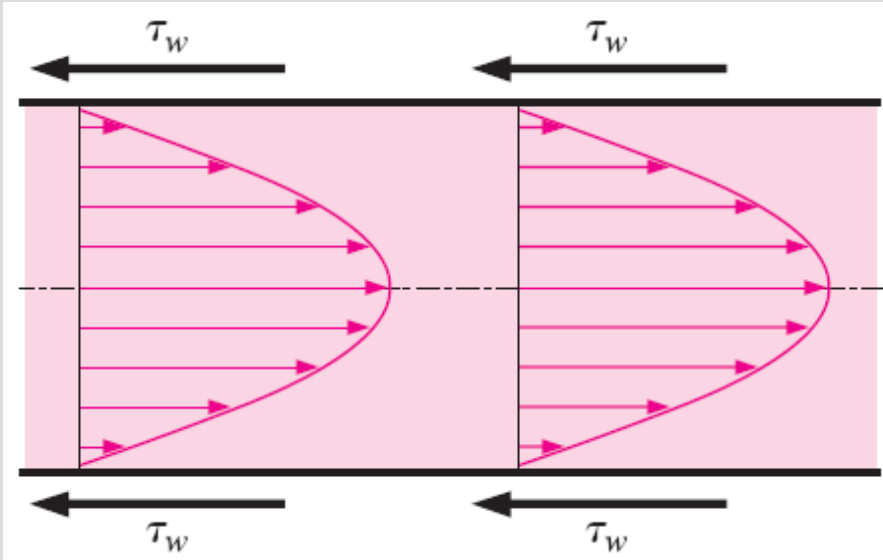
Hidrokinamik giriş uzunluğu L_h : Bu bölgenin uzunluğu.

Hidrokinamik olarak gelişen akış: Giriş bölgesindeki akışa denir. Bu bölge, hız profiline geliştiği yerdir.

Hidrokinamik olarak tam gelişmiş bölge: Giriş bölgesinin uzağında olup hız profiline tam olarak geliştiği ve değişmeden kaldığı bölgedir.

Tam gelişmiş: Boyutsuzlaştırılmış sıcaklık dağılımının profili de değişmeden kalıyorsa, bu durumda akış tam gelişmiş olarak nitelendirilir.

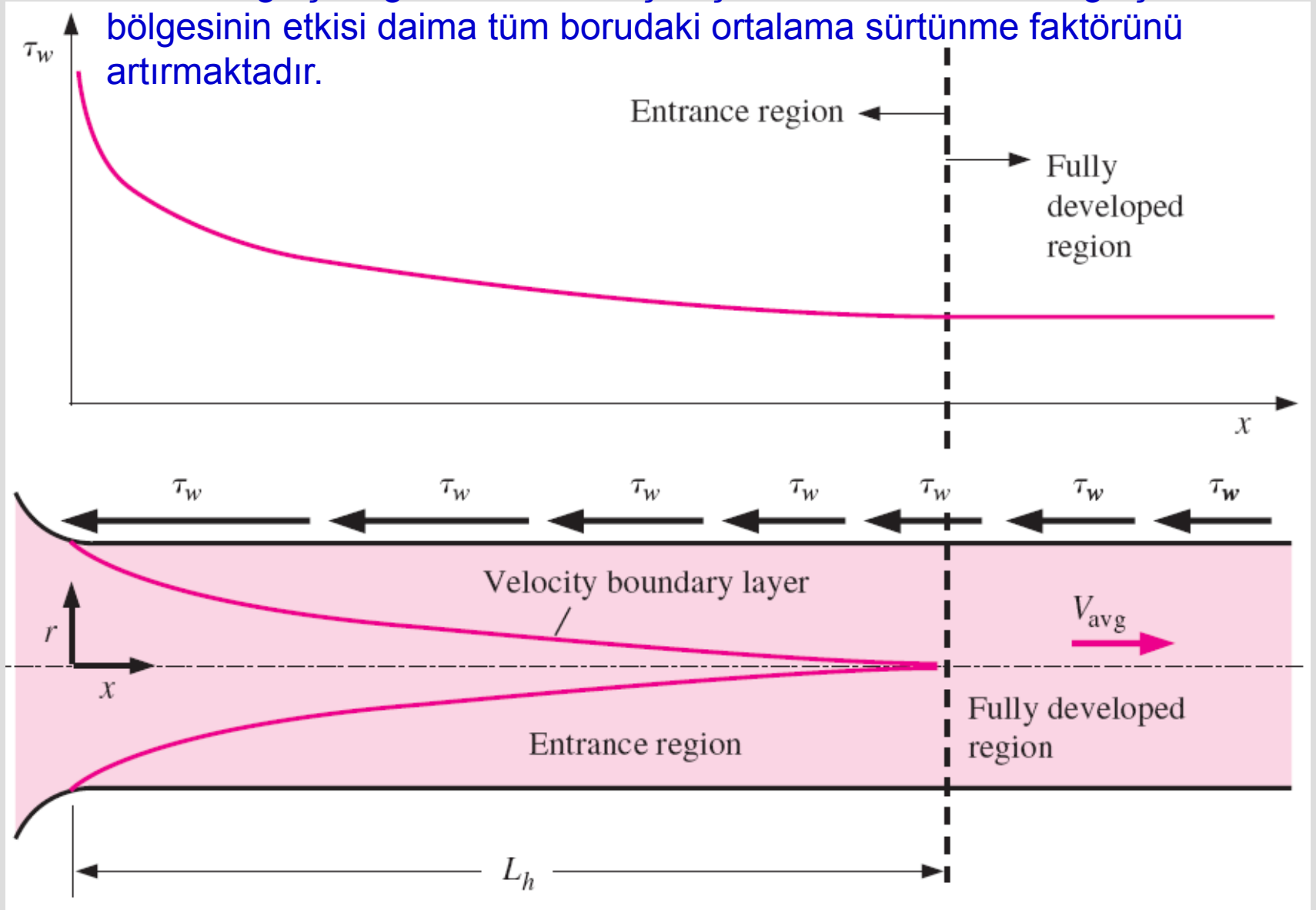
Hidrokinamik olarak tam gelişmiş



$$\frac{\partial u(r, x)}{\partial x} = 0 \quad \rightarrow \quad u = u(r)$$

Boruda hız sınır tabakasının gelişimi (Görüldüğü gibi laminar akışta gelişmiş ortalama hız profili paraboliktir, fakat türbülanslı akışta bu biraz daha yassı veya daha doludur).

Borunun giriş bölgesindeki basınç düşümü daha fazladır ve giriş bölgesinin etkisi daima tüm borudaki ortalama sürtünme faktörünü artırmaktadır.



Boru akışında çeper kayma gerilmesinin akış yönünde giriş bölgesinden tam gelişmiş bölgeye kadar değişimi.

Giriş Uzunlukları

Hidrodinamik giriş uzunluğu, çoğunlukla çeper kayma gerilmesinin (ve dolayısıyla sürtünme faktörünün) tam gelişmiş haldeki kayma gerilmesi değerine yüzde 2 dolaylarında yaklaştığı uzaklık olarak alınır.

$$\frac{L_{h, \text{laminar}}}{D} \cong 0.05Re$$

laminer akış için
hidrodinamik
giriş uzunluğu

$$\frac{L_{h, \text{turbulent}}}{D} = 1.359Re^{1/4}$$

Türbülanslı akış
için hidrodinamik
giriş uzunluğu

$$\frac{L_{h, \text{turbulent}}}{D} \approx 10$$

Türbülanslı akış için
hidrodinamik giriş
uzunluğu yaklaşık
olarak

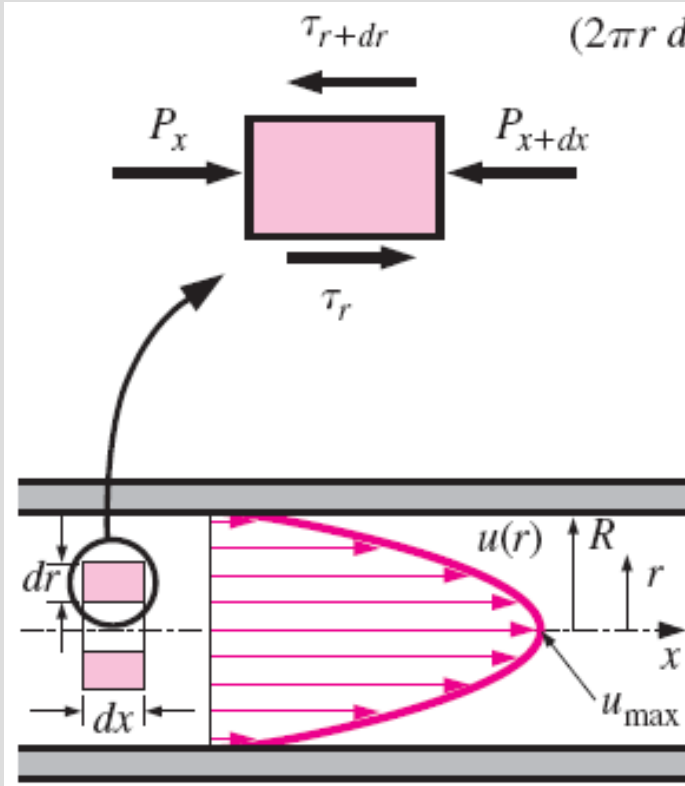
Uygulamada kullanılan borular, çoğunlukla giriş bölgesinden bir kaç kat daha uzundur ve bundan dolayı boru akışları boru boyunca tam gelişmiş olarak kabul edilir.

Bu basitleştirici yaklaşım uzun borular için *uygun* sonuçlar verirken, kısa borular için çeper kayma gerilmesini ve dolayısıyla sürtünme faktörünü olması gerekenin altında verdiğinden sağlıklı değildir.

8-4 ■ BORULARDA LAMİNAR AKIŞ

Bu kısımda, dairesel düz bir borunun tam gelişmiş bölgesindeki, sabit özellikli sıkıştırılamaz akışkanın daimi laminer akışını ele alacağız

Tam gelişmiş laminer akışta her akışkan parçacığı akım çizgisi boyunca sabit aksenal hızla hareket eder ve hız profili $u(r)$ akış yönünde değişmeden kalır. Radyal yönde hareket yoktur, bundan dolayı akışa dik yönde hız bileşeni her yerde sıfırdır. Akış daimi ve tam gelişmiş olduğu için ivmelenme de yoktur.



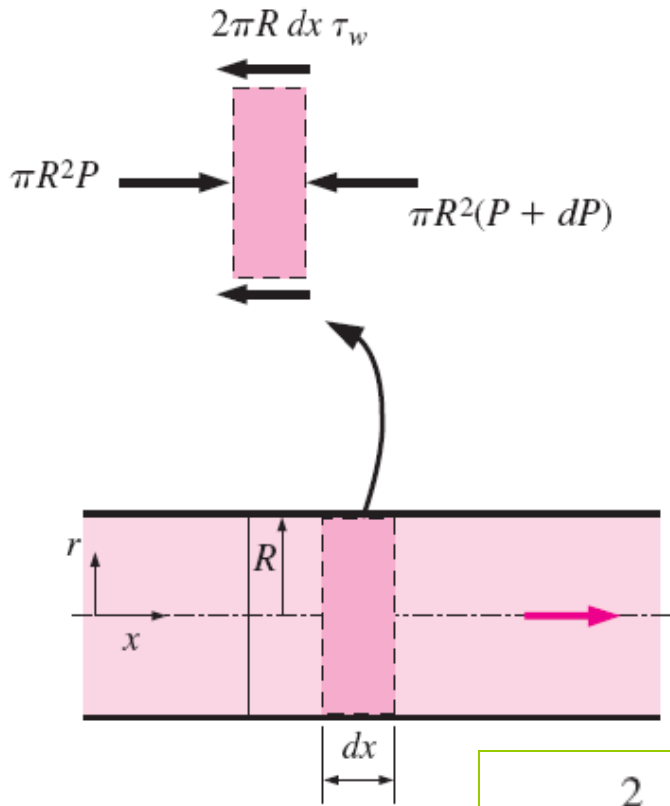
$$(2\pi r dr P)_x - (2\pi r dr P)_{x+dx} + (2\pi r dx \tau)_r - (2\pi r dx \tau)_{r+dr} = 0$$

$$r \frac{P_{x+dx} - P_x}{dx} + \frac{(r\tau)_{r+dr} - (r\tau)_r}{dr} = 0$$

$$r \frac{dP}{dx} + \frac{d(r\tau)}{dr} = 0 \quad \tau = -\mu \left(\frac{du}{dr} \right)$$

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dP}{dx}$$

İçerisinde laminer akış bulunan yatay bir boru ile eş merkezli olarak seçilen halka şeklindeki diferansiyel akışkan eleman. Elemanın yarı çapı r , kalınlığı dr ve uzunluğu dx ile gösterilmiştir.



$$\frac{dP}{dx} = -\frac{2\tau_w}{R}$$

$$u(r) = \frac{r^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) + C_1 \ln r + C_2$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 \text{ at } r = 0 \quad \text{Sınır şartları}$$

$$u = 0 \text{ at } r = R$$

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

Ortalama hız

$$V_{\text{avg}} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r)r \, dr = \frac{-2}{R^2} \int_0^R \frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) r \, dr = -\frac{R^2}{8\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right)$$

Force balance:

$$\pi R^2 P - \pi R^2 (P + dP) - 2\pi R \, dx \, \tau_w = 0$$

Simplifying:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{2\tau_w}{R}$$

$$u(r) = 2V_{\text{avg}} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

Hız profili

$$u_{\text{max}} = 2V_{\text{avg}}$$

Merkez hattındaki maksimum hız

Yatay borudaki tam gelişmiş laminar akışta çapı R , uzunluğu dx olan disk şeklindeki akışkan elemanının serbest cisim diyagramı.

Basınç Düşüşü ve Yük Kaybı

Boru akışı analizinde ilgilendiğimiz bir başka büyüklük de *basınç düşüşü* ΔP 'dir. Çünkü bu ifade akışı sürdürebilmek için gereken fan veya pompa gücü ile doğrudan ilgilidir. $dP/dx = \text{sabit}$, olduğu dikkate alınarak, basıncın P_1 olduğu $x = x_1$ 'den basıncın P_2 olduğu $x = x_1 + L$ 'ye kadar integre edilirse,

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L}$$

$$\text{Laminar flow:} \quad \Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\mu L V_{\text{avg}}}{R^2} = \frac{32\mu L V_{\text{avg}}}{D^2}$$

Viskoz kuvvetlerden kaynaklanan basınç düşüşü tersinmez bir basınç kaybını temsil eder ve **basınç kaybı** ΔP_L olarak adlandırılır.

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{\text{avg}}^2}{2}$$

Tam gelişmiş iç akışların tüm türleri için basınç kaybı

$$f = \frac{64\mu}{\rho D V_{\text{avg}}} = \frac{64}{\text{Re}}$$

Dairesel boru, laminer

$$\rho V_{\text{avg}}^2 / 2$$

Dinamik basınç.

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V_{\text{avg}}^2}$$

Darcy sürtünme faktörü

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{\text{avg}}^2}{2g}$$

Yük kaybı

Laminer akışta sürtünme faktörü sadece Reynolds sayısının fonksiyonudur ve boru yüzeyindeki pürüzlülüğünden bağımsızdır.

Yük kaybı, borudaki sürtünmeden kaynaklanan kayıpları yenmek için akışkanın pompa tarafından çıkarılması gereken ilave yüksekliği temsil eder.

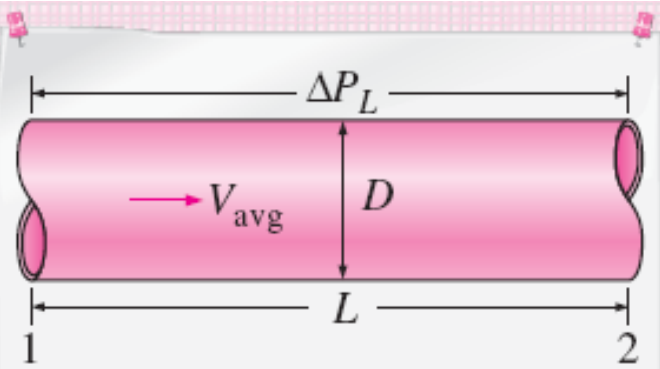
$$\dot{W}_{\text{pump}, L} = \dot{V} \Delta P_L = \dot{V} \rho g h_L = m g h_L$$

$$V_{\text{avg}} = \frac{(P_1 - P_2)R^2}{8\mu L} = \frac{(P_1 - P_2)D^2}{32\mu L} = \frac{\Delta P D^2}{32\mu L}$$

Yatay boru

$$\dot{V} = V_{\text{avg}} A_c = \frac{(P_1 - P_2)R^2}{8\mu L} \pi R^2 = \frac{(P_1 - P_2)\pi D^4}{128\mu L} = \frac{\Delta P \pi D^4}{128\mu L}$$

Poiseuille Yasası

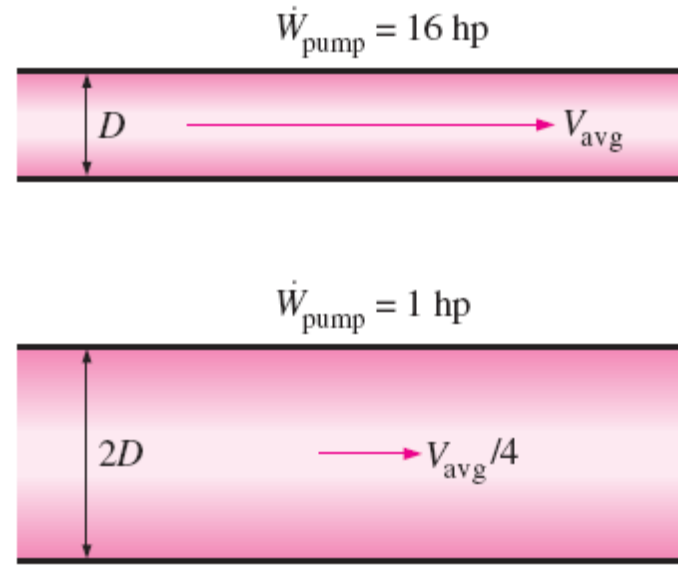


$$\text{Pressure loss: } \Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{\text{avg}}^2}{2}$$

$$\text{Head loss: } h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{\text{avg}}^2}{2g}$$

Basınç kaybı (ve yük kaybı) bağıntısı akışkanlar mekaniğindeki en genel bağıntılardan biridir. Bu bağıntı laminar ve türbülanslı akışlar, dairesel veya dairesel olmayan borular ve pürüzsüz veya pürüzlü yüzeyler için geçerlidir.

Verilen bir debi için basınç düşüşü nedeniyle gerekli olan pompalama gücü, borunun uzunluğu ve viskozitesi ile doğru orantılı, boru yarıçapının (veya çapının) dördüncü kuvveti ile ters orantılıdır.



Laminar akış borulama sisteminde boru çapının iki katına çıkarılması ile gerekli pompalama gücü 1/16 kat oranında azaltılabilir.

Yatay boru durumunda basınç düşüşü ΔP , basınç kaybı ΔP_L 'ya eşittir fakat eğimli borularda veya en-kesit alanı değişken borularda durum böyle değildir

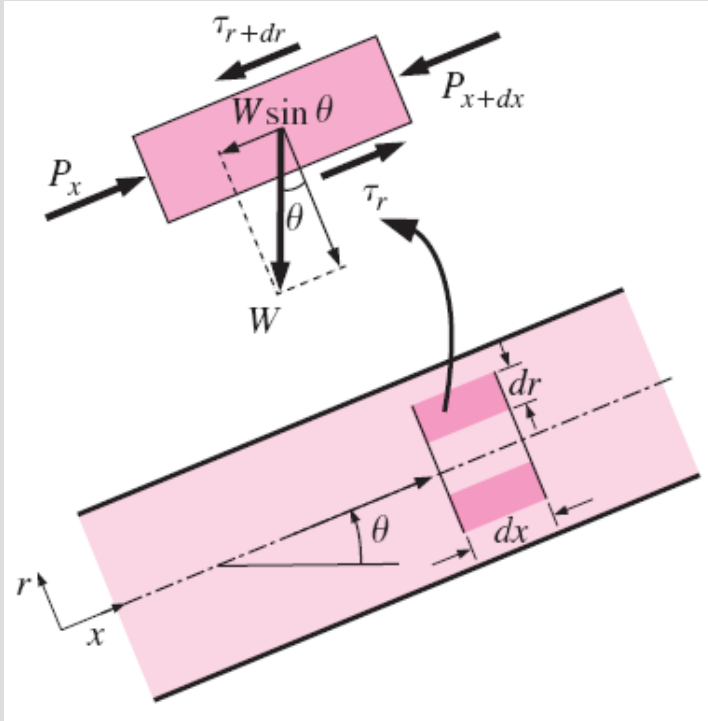
Daimi, sıkıştırılmaz, bir-boyutlu akış için enerji denklemini yazarak bu durum aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump}, u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine}, e} + h_L$$

$$P_1 - P_2 = \rho(\alpha_2 V_2^2 - \alpha_1 V_1^2)/2 + \rho g[(z_2 - z_1) + h_{\text{turbine}, e} - h_{\text{pump}, u} + h_L]$$

Buna göre eğer, (1) akış bölümü yataysa ve bu yüzden hidrostatik veya yerçekimi etkileri ($z_1 = z_2$) yoksa, (2) akış bölümünde akışkan basıncını değiştiren pompa veya türbin gibi iş makineleri yoksa ($h_{\text{pompa}, u} = h_{\text{türbin}, e} = 0$) ve (3) akış bölümünün en-kesit alanı ve dolayısıyla ortalama akış hızı sabitse ($V_1 = V_2$), bu durumda ele alınan akış bölümü için basınç düşüşü $\Delta P = P_1 - P_2$ ve basınç kaybı $\Delta P_K = \rho g h_K$ birbirine eş değildir.

Laminar akışta yer çekiminin hız ve akış debisine olan etkisi



$$W_x = W \sin \theta = \rho g V_{\text{element}} \sin \theta = \rho g (2\pi r dr dx) \sin \theta$$

$$(2\pi r dr P)_x - (2\pi r dr P)_{x+dx} + (2\pi r dx \tau)_r - (2\pi r dx \tau)_{r+dr} - \rho g (2\pi r dr dx) \sin \theta = 0$$

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dP}{dx} + \rho g \sin \theta$$

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} + \rho g \sin \theta \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

$$V_{\text{avg}} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) D^2}{32\mu L}$$

$$\dot{V} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128\mu L}$$

Eğimli borudaki tam gelişmiş laminar akışta, akış ile aynı yönde yarıçapı r , kalınlığı dr , uzunluğu dx olan halka şeklinde diferansiyel akışkan elemanın serbest cisim diyagramı.

Yatay boru: $\dot{V} = \frac{\Delta P \pi D^4}{128 \mu L}$

Eğimli boru: $\dot{V} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L}$

Yukarı yönlü akış $\theta > 0$ ve $\sin \theta > 0$.

Aşağı yönlü akış $\theta < 0$ ve $\sin \theta < 0$.

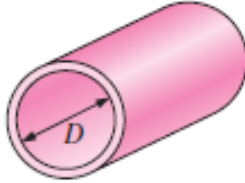
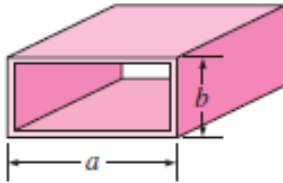
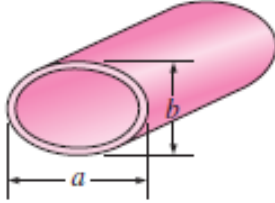
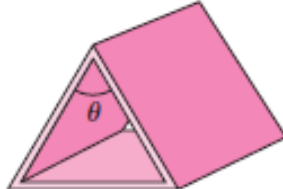
Yatay borularda tam gelişmiş laminar akış için daha önce elde edilen sonuçlarda ΔP yerine $\Delta P - \rho g L \sin \theta$ yazılmak suretiyle bu bağıntılar eğimli borular için de kullanılabilir.

Dairesel Olmayan Borularda Laminer Akış

Çeşitli en-kesitlerdeki borularda *tam gelişmiş laminar akış* için sürtünme faktörü f bağıntıları Tablo 8-1'de verilmiştir. Bu borulardaki akış için Reynolds sayıları hidrolik çapa $D_h = 4A_c/p$ göre tanımlanmıştır. A_c borunun en-kesit alanı, p ise ıslak çevre uzunluğudur.

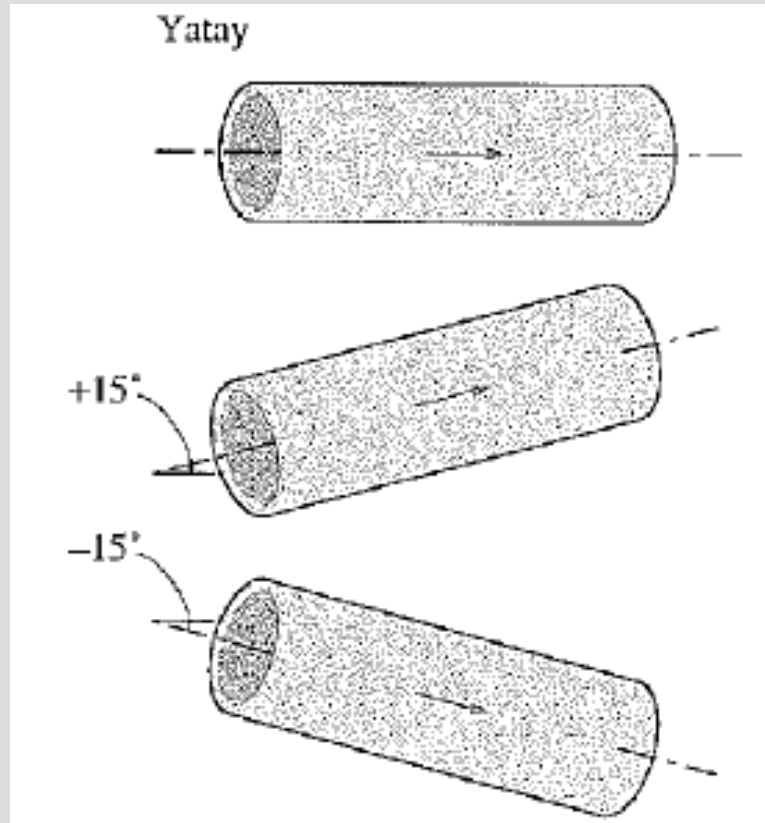
TABLE 8-1

Friction factor for fully developed *laminar flow* in pipes of various cross sections ($D_h = 4A_c/p$ and $Re = V_{avg} D_h/\nu$)

Tube Geometry	a/b or θ°	Friction Factor f
Circle 	—	64.00/Re
Rectangle 	a/b 1 2 3 4 6 8 ∞	56.92/Re 62.20/Re 68.36/Re 72.92/Re 78.80/Re 82.32/Re 96.00/Re
Ellipse 	a/b 1 2 4 8 16	64.00/Re 67.28/Re 72.96/Re 76.60/Re 78.16/Re
Isosceles triangle 	θ 10° 30° 60° 90° 120°	50.80/Re 52.28/Re 53.32/Re 52.60/Re 50.96/Re

ÖRNEK 8-1 Yatay ve Eğimli Borulardaki Debiler

20°C sıcaklığındaki yağ ($\rho = 888 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 0.800 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$) 5 cm çapında, 40 m uzunluğundaki borudan daimi olarak akmaktadır (Şekil 8-17). Borunun girişi ve çıkışındaki basınçlar, sırasıyla 745 ve 97 kPa olarak ölçülmüştür. Borunun (a) yatay, (b) 15° yukarı eğimli, (c) 15° aşağı eğimli olduğunu kabul ederek borudan geçen yağın debisini hesaplayınız. Ayrıca borudaki akışın laminer olduğunu gösteriniz



CÖZÜM Borunun giriş ve çıkışında ölçülen basınç değerleri verilmiştir. Üç farklı konum için debiler hesaplanacak ve akışın laminar olduğu gösterilecektir. *Kabuller* **1** Akış daimi ve sıkıştırılmazdır. **2** Giriş etkileri ihmal edilebilir, dolayısıyla akış tam gelişmiştir. **3** Boruda dönüş, vana ve bağlantı elemanları gibi elemanlar yoktur. **4** Borulama sisteminin bu kısmında pompa veya türbin gibi iş makineleri yoktur.

Özellikler Yağın yoğunluk ve dinamik viskozitesi sırasıyla, $\rho = 888 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 0.800 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ olarak verilmiştir.

Analiz Boru boyunca meydana gelen basınç düşüşü ve borunun en-kesit alanı,

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 745 - 97 = 648 \text{ kPa}$$

$$A_c = \pi D^2/4 = \pi(0.05 \text{ m})^2/4 = 0.001963 \text{ m}^2$$

olarak hesaplanır.

(a) Üç durum için de debiler Denklem 8-34'ten bulunabilir:

$$\dot{V} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L}$$

Burada θ borunun yatay ile yaptığı açıdır. Yatay boru durumunda $\theta = 0$ dolayısıyla $\sin \theta = 0$ olacaktır. Buna göre,

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{yatay}} &= \frac{\Delta P \pi D^4}{128 \mu L} = \frac{(648 \text{ kPa}) \pi (0.05 \text{ m})^4}{128 (0.800 \text{ kg/m} \cdot \text{s}) (40 \text{ m})} \left(\frac{1000 \text{ N/m}^2}{1 \text{ kPa}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ N}} \right) \\ &= 0.00311 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

(b) 15° 'lik açı ile yukarı yönlü akışta, $\theta = +15^\circ$ 'dir ve

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{yukarı}} &= \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L} \\ &= \frac{[648000 \text{ Pa} - (888 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(40 \text{ m}) \sin 15^\circ] \pi (0.05 \text{ m})^4}{128 (0.800 \text{ kg/m} \cdot \text{s})(40 \text{ m})} \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2} \right) \\ &= 0.00267 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

(c) 15° 'lik açı ile aşağı yönlü akışta ise $\theta = -15^\circ$ 'dir ve

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{aşağı}} &= \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L} \\ &= \frac{[648000 \text{ Pa} - (888 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(40 \text{ m}) \sin(-15^\circ)] \pi (0.05 \text{ m})^4}{128 (0.800 \text{ kg/m} \cdot \text{s})(40 \text{ m})} \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2} \right) \\ &= 0.00354 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

elde edilir.

Beklenildiği gibi yokuş aşağı durumda debi en yüksektir. Bu durumdaki ortalama akışkan hızı ve Reynolds sayısı şöyledir:

$$V_{\text{ort}} = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{0.00354 \text{ m}^3/\text{s}}{0.001963 \text{ m}^2} = 1.80 \text{ m/s}$$

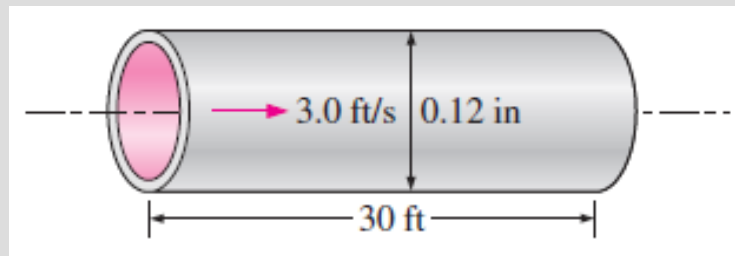
$$\text{Re} = \frac{\rho V_{\text{ort}} D}{\mu} = \frac{(888 \text{ kg/m}^3)(1.80 \text{ m/s})(0.05 \text{ m})}{0.800 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 100$$

Görüldüğü gibi Re sayısı 2300'den çok küçüktür. Bu nedenle her üç durum için de akış laminerdir ve analiz geçerlidir.

İrdeleme Akışın basınç ve yerçekiminin birleşik etkileri ile oluşturulduğuna dikkat ediniz. Hesaplanan debilerden görülebildiği gibi yerçekimi yukarı yönlü akışı zorlaştırırken aşağı yönlü akışı kolaylaştırır. Yatay durumda ise yerçekiminin debi üzerinde etkisi yoktur. Basınç farkı uygulanmasa da aşağı yönlü akış kendiliğinden olabilir. $P_1 = P_2 = 97 \text{ kPa}$ için (yani basınç farkı yok iken), borunun her tarafında basınç 97 kPa'da sabit kalacaktır ve akışkan borudan yerçekiminin etkisi altında $0.00043 \text{ m}^3/\text{s}$ debi ile akacaktır. Eğim açısı yataydan itibaren negatif yönde arttıkça debi artar ve boru düşey hale geldiğinde maksimum değerine ulaşacaktır.

ÖRNEK 8-2 Bir Boruda Basınç Düşüşü ve Yük Kaybı

4 °C'deki su ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 0.001545 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$), 0.305 cm çapında ve 9.14 m uzunluğundaki yatay borudan daimi olarak 0.914 m/s ortalama hızıyla akmaktadır (Şekil 8-18). (a) Yük kaybını, (b) basınç düşüşünü ve (c) basınç düşüşünü yenmek için gerekli pompalama gücünü hesaplayınız.



ÇÖZÜM Borudaki ortalama akış hızı verilmiştir. Yük kaybı, basınç düşüşü ve pompalama gücü hesaplanacaktır.

Kabuller 1 Akış daimi ve sıkıştırılmazdır. 2 Giriş etkileri ihmal edilebilir ve dolayısıyla akış tam gelişmiştir. 3 Boruda dirsek, vana ve bağlantı elemanı gibi elemanlar yoktur.

Özellikler Suyun yoğunluk ve dinamik viskozitesi sırasıyla $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 0.001545 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ olarak verilmiştir.

Analiz (a) İlk önce akış rejimini belirlememiz gerekir. Reynolds sayısı,

$$Re = \frac{\rho V_{\text{ort}} D}{\mu} = \frac{(1000 \text{ kg/m}^3) (0.914 \text{ m/s}) (0.00305 \text{ m})}{0.001545 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 1804$$

olarak hesaplanır ve bu sayı 2300'den küçüktür. Bu nedenle akış laminerdir. Sürtünme faktörü ve yük kaybı ise

$$f = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{1804} = 0.0355$$

$$h_K = f \frac{L}{D} \frac{V_{\text{ort}}^2}{2g} = 0.0355 \frac{9.14 \text{ m} \cdot (0.914 \text{ m/s})^2}{0.00305 \text{ m} \cdot 2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 4.53 \text{ m}$$

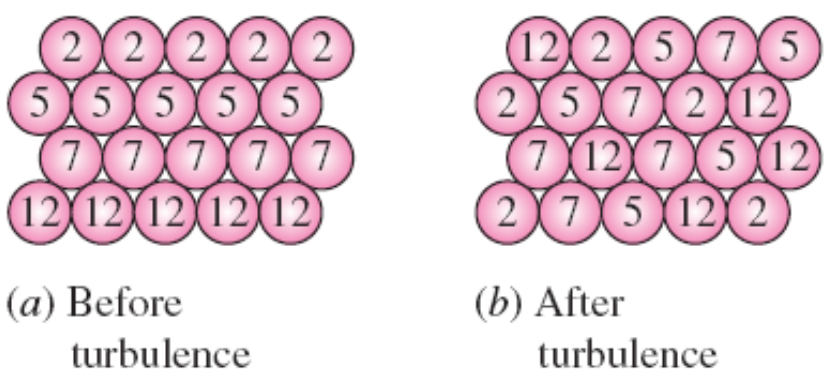
olarak hesaplanır.

(b) Borunun yatay ve çapının sabit olduğunu, ayrıca borudaki basınç düşüşünün tamamen sürtünme kayıplarından kaynaklandığını ve bu değer in basınç kaybına eşit olduğunu dikkate aldığımızda,

8–5 ■ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞ

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan akışların çoğu türbülanslıdır ve bu yüzden türbülansın çeper kayma gerilmesini nasıl etkilediği anlamak önemlidir. Fakat türbülanslı akış, çalkantıların hakim olduğu karmaşık bir mekanizmadır ve türbülanslı akışın teorisi halen büyük ölçüde çözülememiştir.

Deneylere ve çeşitli durumlar için geliştirilmiş ampirik veya yarı-ampirik bağıntılara güvenmek durumundayız.



Türbülanslı akıştaki yoğun karışma, farklı momentumlardaki akışkan parçacıklarını birbirleri ile temas ettirir ve dolayısıyla momentum geçişi artar.

Türbülanslı akış, girdap adı verilen dönen akışkan bölgelerinin akış boyunca rastgele ve hızlı çalkantıları ile karakterize edilir.

Bu değişimler momentum ve enerji geçişi için ilave mekanizma olarak iş görür.

Türbülanslı akışta dönen girdaplar; kütle, momentum ve enerjiyi akışın diğer bölgelerine moleküler difüzyondan daha hızlı bu biçimde taşır. Çünkü türbülanslı akışta kütle, momentum ve ısının transferi büyük ölçüde artar.

Sonuç olarak türbülanslı akış çok daha yüksek sürtünme, ısı ve kütle geçişi katsayıları anlamına gelir.

$$u = \bar{u} + u' \quad \text{average value } \bar{u}$$

fluctuating component u'

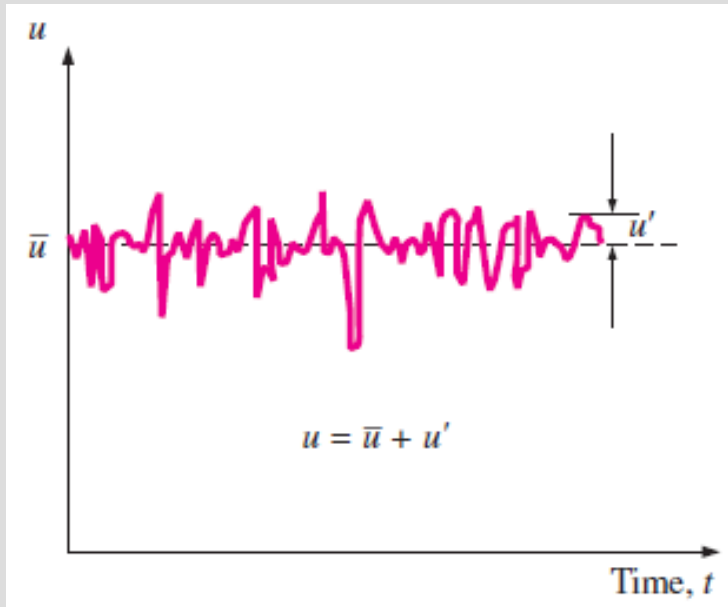
$$v = \bar{v} + v', P = \bar{P} + P'$$

$$T = \bar{T} + T'$$

$$\tau_{\text{total}} = \tau_{\text{lam}} + \tau_{\text{turb}}$$

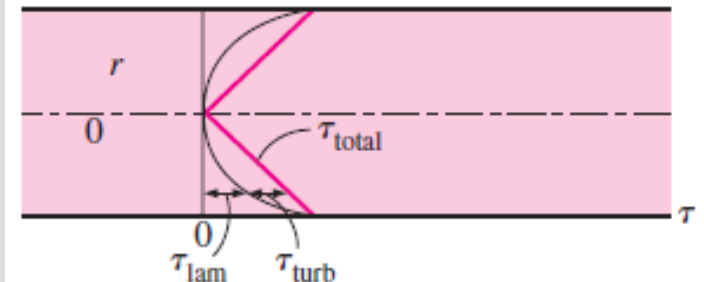
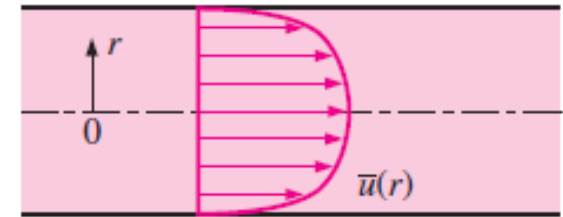
Laminar bileşen: Akış yönünde akışkan tabakaları arasındaki sürtünmeyi hesaba katar.

Türbülans bileşeni: Çalkantı yapan akışkan parçacıkları ile akışkan arasındaki sürtünmeyi hesaba katar (hızın çalkantı bileşeni ile ilgilidir).



Türbülanslı akışta belirli bir konumdaki u hız bileşeninin zamana bağlı çalkantıları.

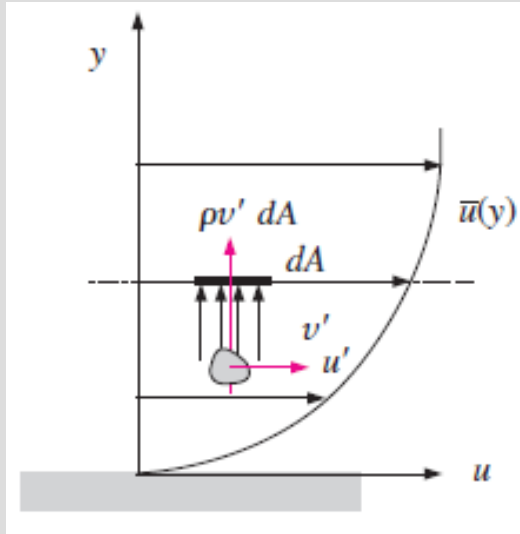
Borudaki türbülanslı akış için hız profili ve kayma gerilmesinin radyal mesafe ile değişimi.



Türbülans Kayma Gerilmesi

$$\tau_{\text{turb}} = -\rho \overline{u'v'}$$
 Türbülans kayma gerilmesi

$-\rho \overline{u'v'}$ veya $\rho \overline{u'^2}$ gibi terimlere Reynolds gerilmeleri veya türbülans gerilmeleri denir.



$$\tau_{\text{turb}} = -\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$
 Türbülans kayma gerilmesi

μ_t **Girdap viskozitesi** veya **türbülans viskozitesi**: türbülans girdapları tarafından taşınan momentumu temsil eder.

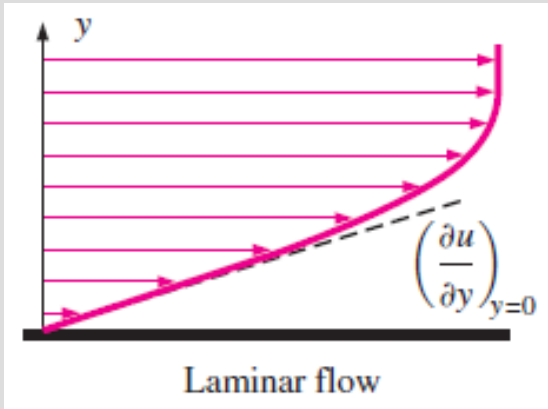
$$\tau_{\text{total}} = (\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \rho(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$
 Toplam kayma gerilmesi

$\nu_t = \mu_t/\rho$ **Kinematik girdap viskozitesi** veya **kinematik türbülans viskozitesi** (ayrıca *momentumun girdap difüzivitesi* de denir).

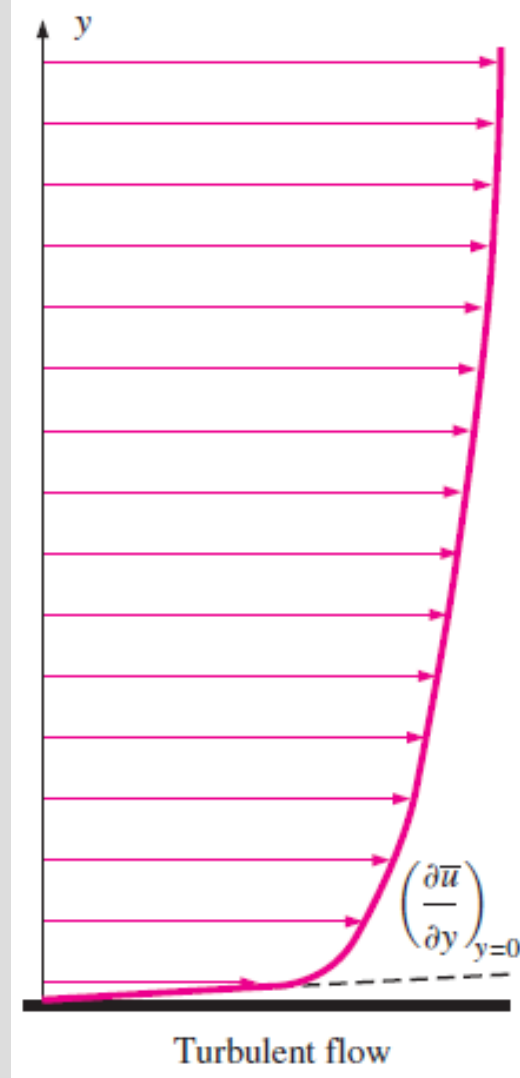
Hız çalkantısı v' nedeniyle dA diferansiyel alanından yukarı doğru hareket eden akışkan parçacığı.

$$\tau_{\text{turb}} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \rho l_m^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2$$

Karışım uzunluğu l_m : karışımdan sorumlu girdapların ortalama büyüklükleri ile ilgili.



Aynı serbest akım hızı değerinde türbülanslı sınır tabaka laminar sınır tabakadan daha kalın olmasına karşın, çeperdeki hız gradyanı ve dolayısıyla çeper kayma gerilmesi türbülanslı akışta laminar akıştakinden daha büyüktür.

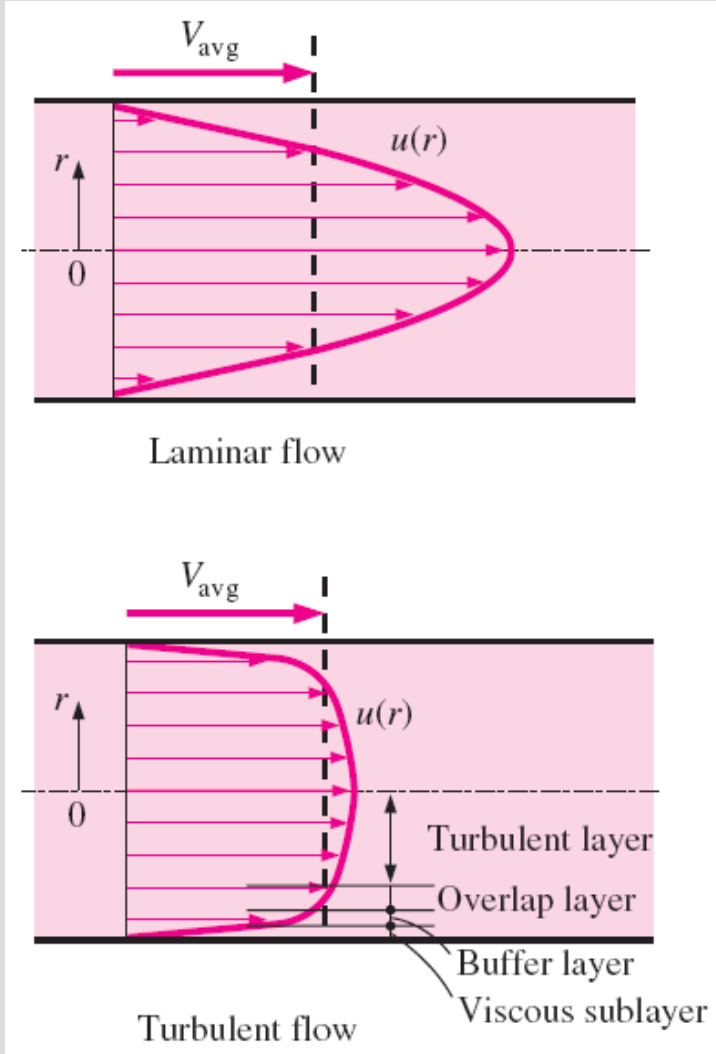


Moleküler momentum difüzyonitesi ν (bunun yanında μ) bir akışkan özelliğidir ve değeri de akışkan el kitaplarında verilmektedir.

Fakat girdap difüzyonitesi ν_t (dolaylı olarak μ_t) bir akışkan özelliği *değildir* ve değeri akış şartlarına bağlıdır.

Girdap difüzyonitesi μ_t çepere doğru azalır ve çeperde sıfır olur. Değeri çeperde sıfırdan, çekirdek bölgesinde moleküler difüzyonitesi birkaç bin katı olacak şekilde değişir.

Türbülans Hız Profili



Viskoz etkilerin baskın olduğu çepere yakın çok ince tabaka **viskoz** (veya laminer veya doğrusal ya da çeper) **alt tabakadır**.

Bu tabakadaki hız profili **doğrusala** çok yakındır ve akış, akım çizgileri halindedir.

Viskoz alt tabakanın yanında türbülans etkilerinin önemli olmaya başladığı fakat akışta viskoz etkilerin hala baskın olduğu bir **tampon tabaka** vardır.

Tampon tabakanın üzerinde ise türbülans etkilerinin daha önem kazandığı fakat hala baskın olmadığı, **atalet alt tabakası** da denilen **örtüşme tabakası** (veya **geçiş tabakası**) vardır.

Bunun da üzerinde türbülans etkilerinin moleküler difüzyon (viskoz) etkilerini bastırdığı ve akışın geri kalanını temsil eden dış tabaka (veya **türbülans tabakası**) vardır.

Tam gelişmiş boru akışında hız profili laminer akışta paraboliktir, fakat türbülanslı akışla çok **daha dolgundur**. **Türbülans durumunda $u(r)$** aksenal yöndeki zaman-ortalamalı hız bileşenidir (u 'nun üzerindeki çizgi sade gösterim amacıyla kaldırılmıştır).

$$\tau_w = \mu \frac{u}{y} = \rho \nu \frac{u}{y} \quad \text{or} \quad \frac{\tau_w}{\rho} = \frac{\nu u}{y}$$

$$u_* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad \text{Sürtünme hızı}$$

Viskoz alt tabaka:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{y u_*}{\nu}$$

Çeper yasası

Viskoz alt tabakanın kalınlığı:

$$y = \delta_{\text{alt tabaka}} = \frac{5\nu}{u_*} = \frac{25\nu}{u_\delta}$$

Viskoz alt tabaka kalınlığı, kinematik viskozite ile doğru orantılı, fakat ortalama akış hızı ile ters orantılıdır.

ν/u_* Viskoz uzunluk; yüzeyden olan y mesafesini boyutsuzlaştırmak için kullanılır.

Boyutsuzlaştırılmış değişkenler: $y^+ = \frac{y u_*}{\nu}$ ve $u^+ = \frac{u}{u_*}$

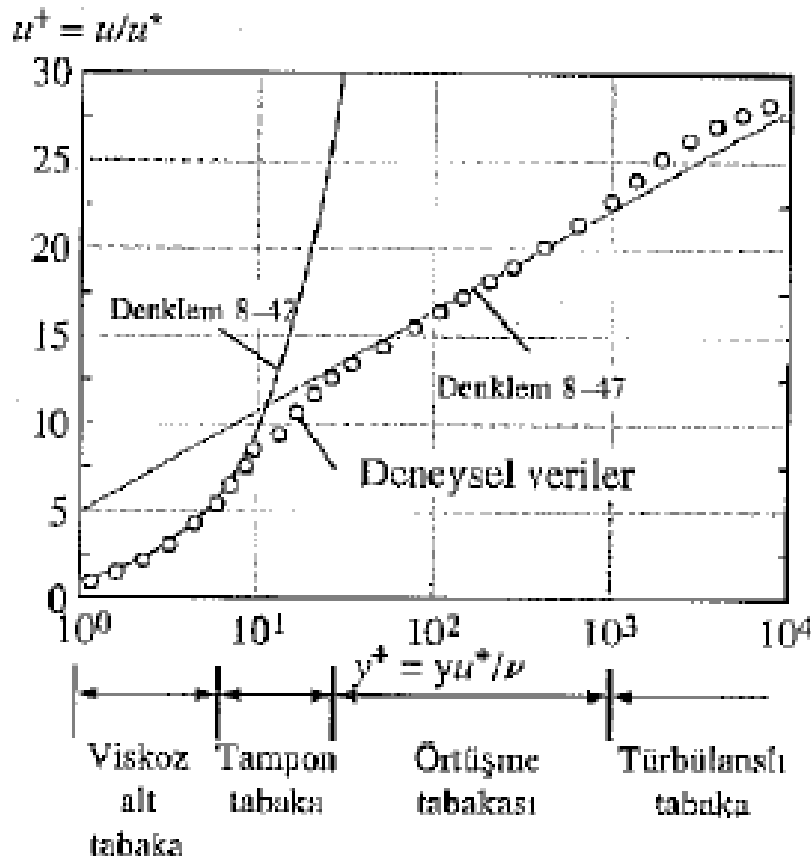
Boyutsuzlaştırılmış çeper yasası: $u^+ = y^+$

Logaritmik yasa:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{yu_*}{\nu} + B$$

Örtüşme tabakası:

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \frac{yu_*}{\nu} + 5.0 \quad \text{veya} \quad u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.0$$



Bir boruda tam gelişmiş türbülanslı akış için çeper yasası ve logaritmik yasa hız profillerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.

Dış türbülans tabakası:

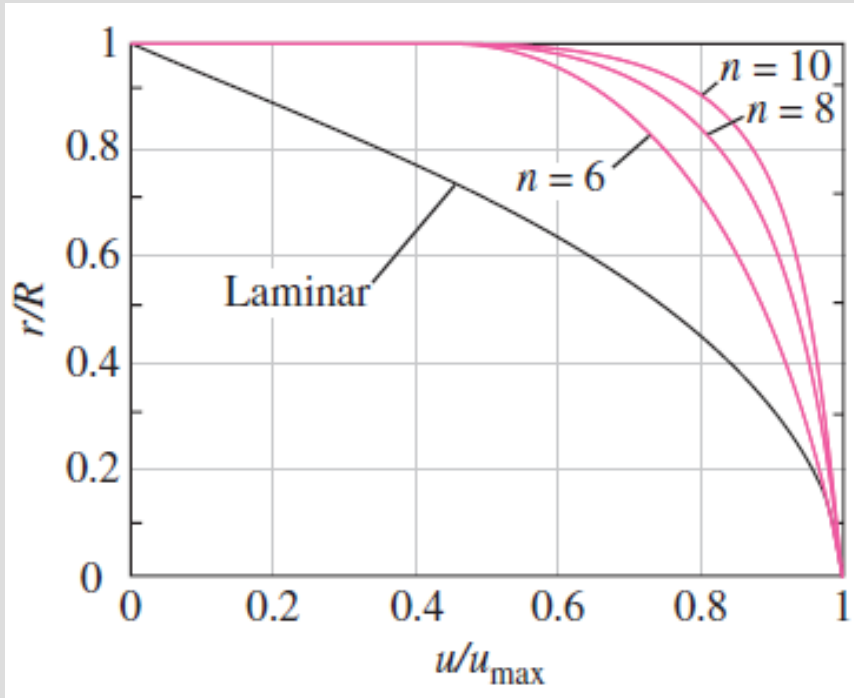
$$\frac{u_{\text{maks}} - u}{u_s} = 2.5 \ln \frac{R}{R-r}$$

Hız azalma
yasası

Hızın eksen çizgisinde değerinden olan sapması $u_{\text{maks}} - u$ 'ya **hız azalması** denir.

Kuvvet yasası hız profili:

$$\frac{u}{u_{\text{maks}}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{1/n} \quad \text{veya} \quad \frac{u}{u_{\text{maks}}} = \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/n}$$



Buradaki n üssü Reynolds sayısına bağlı bir sabittir. Reynolds sayısı arttıkça n 'nin değeri de artar. $n = 7$ değeri genellikle uygulamadaki birçok akışı yaklaşık olarak temsil eder ve bunun sonucunda **1/7 'inci kuvvet yasası hız profili** deyimini ortaya çıkmıştır.

Borudaki tam gelişmiş türbülanslı akışta farklı üsler için kuvvet yasası hız profilleri bunların laminar hız profili ile karşılaştırması.

Moody Diyagramı ve Colebrook denklemini

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (\text{turbulent flow})$$

Colebrook denklemini (pürüzsüz ve pürüzlü borularda)

Tam gelişmiş türbülanslı boru akışındaki sürtünme faktörü Reynolds sayısına ve **bağıl pürüzlülük ε/D** 'ye bağlıdır.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

**Açık Haaland
bağıntısı**

Sürtünme faktörü,
pürüzsüz boru
için minimumdur
ve pürüzlülük
artıkça artar.

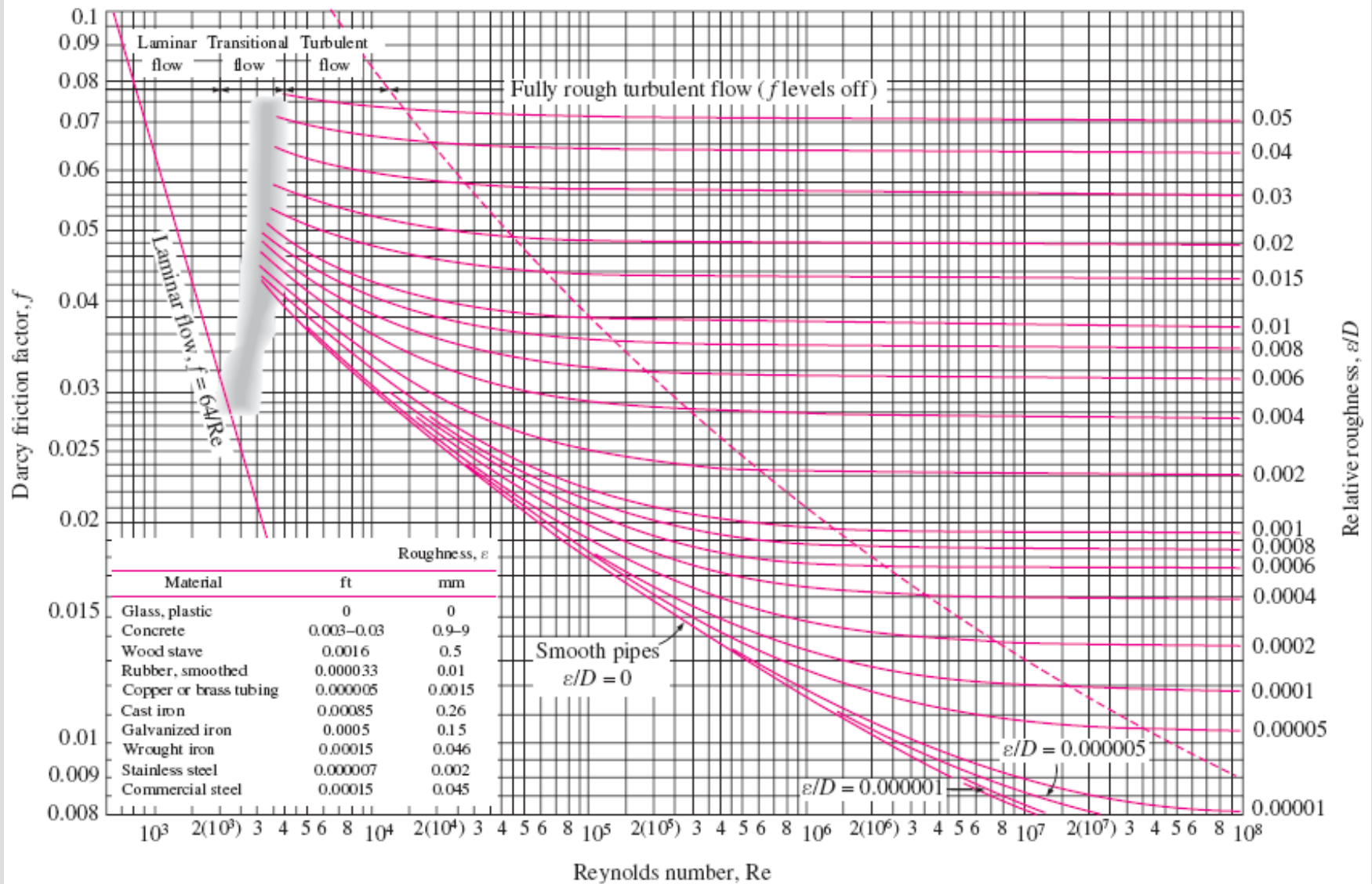
Bağıl Pürüzsüzlük, ε/D	Sürtünme Faktörü, f
0.0*	0.0119
0.00001	0.0119
0.0001	0.0134
0.0005	0.0172
0.001	0.0199
0.005	0.0305
0.01	0.0380
0.05	0.0716

*Pürüzsüz yüzey. Tüm değerler $Re = 10^5$ için ve Colebrook denkleminde hesaplanmıştır.

Yeni ticari borular için eşdeğer pürüzlülük değerleri*

Malzeme	Pürüzlülük, ε (mm)
Cam, plastik	0 (pürüzsüz)
Beton	0.9-9
Tahta fiçi	0.5
Lastik (kauçuk)	
Pürüzsüzleştirilmiş	0.01
Bakır veya pirinç boru	0.0015
Dökme demir	0.26
Galvalisli demir	0.15
İşlenmiş demir	0.046
Paslanmaz çelik	0.002
Ticari çelik	0.045

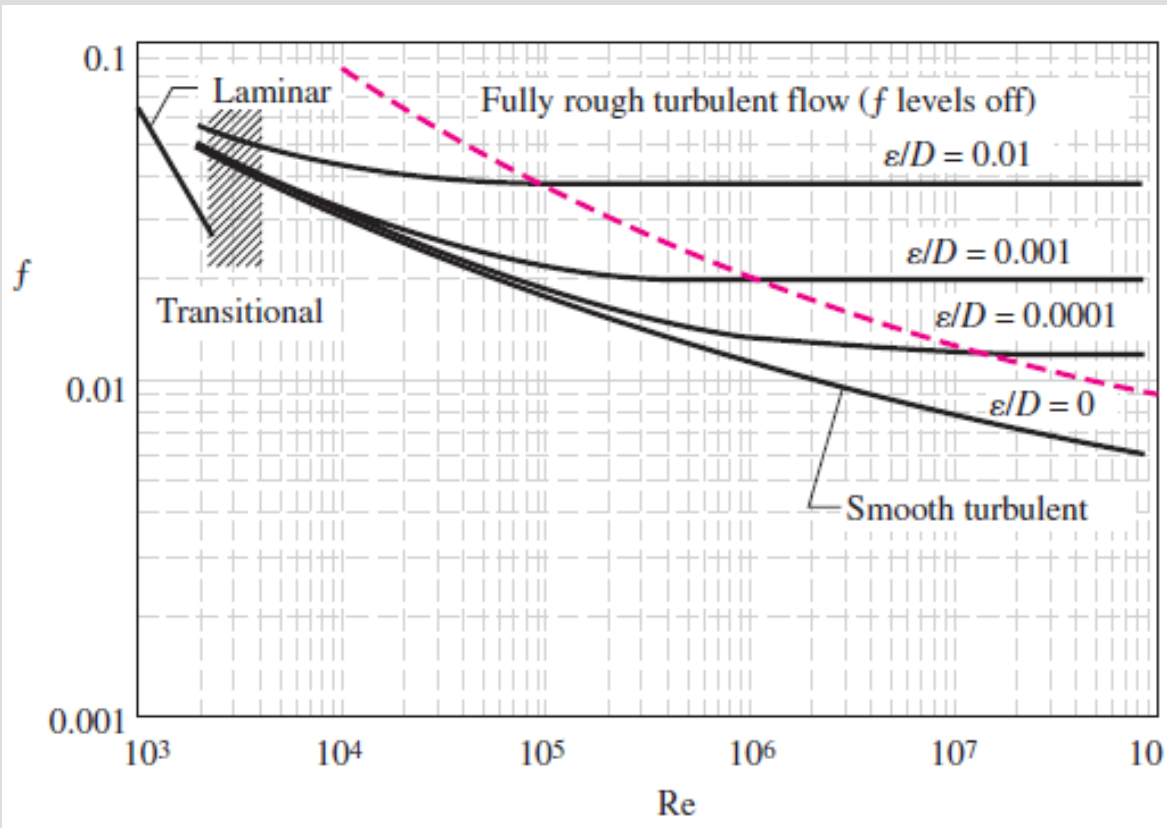
*Bu değerlerdeki belirsizlikler \pm yüzde 60'a kadar çıkabilir.



Moody Diyagramı

Moody Diyagramından Çıkarımlar

- Laminar akışta Reynolds sayısının artması ile sürtünme faktörü azalır ve sürtünme faktörü yüzey pürüzlülüğünden bağımsızdır.
- Pürüzsüz bir boruda sürtünme faktörü minimumdur (fakat kaymama koşulundan ötürü hala sıfır değildir) ve pürüzlülük ile artar. Bu durumda ($\varepsilon = 0$) Colebrook denklemi, $1/\sqrt{f} = 2.0 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8$ olarak ifade edilen **Prandtl denklemine** indirgenir.
- Laminardan türbülanslı rejime geçiş bölgesi Moody diyagramında gölgeli alan ile gösterilmiştir. Bağıl pürüzlülüğün küçük olduğu değerlerde, geçiş bölgesinde sürtünme faktörü artar ve pürüzsüz boruların değerine yaklaşır.
- Çok büyük Reynolds sayılarında (diyagram üzerinde kesik çizginin sağına doğru), belirli bağıl pürüzlülük eğrilerine karşılık gelen sürtünme faktörü eğrileri hemen hemen yataydır ve dolayısıyla sürtünme faktörleri Reynolds sayısından bağımsızdır. Bu bölgedeki akışa **tamamen pürüzlü türbülanslı akış** veya sadece **tamamen pürüzlü akış** denir. Bunun sebebi Reynolds sayısının artması ile viskoz alt tabaka kalınlığının azalmasıdır. *Tamamen pürüzlü bölgede* Colebrook denklemi, **Von Karman** denklemine indirgenir. $1/\sqrt{f} = -2.0 \log[(\varepsilon/D)/3.7]$.



Çok büyük Reynolds sayılarında, Moody diyagramındaki sürtünme faktörü eğrileri hemen hemen yataydır ve dolayısıyla sürtünme faktörleri Reynolds sayısından bağımsızdır. Tam sayfa diyagramı görmek için sayfa 898 'deki ŞekilA-12'ye bakınız.

Hesaplamalarda borunun gerçek iç çapını kullandığımızdan emin olmalıyız. Çünkü bu çap nominal çaptan farklı olabilir.

Standard sizes for Schedule 40 steel pipes

Nominal Size, in	Actual Inside Diameter, in
$\frac{1}{8}$	0.269
$\frac{1}{4}$	0.364
$\frac{3}{8}$	0.493
$\frac{1}{2}$	0.622
$\frac{3}{4}$	0.824
1	1.049
$1\frac{1}{2}$	1.610
2	2.067
$2\frac{1}{2}$	2.469
3	3.068
5	5.047
10	10.02

Akış Problemi Tipleri

1. Belirtilen bir debi (veya hız) için boru uzunluğu ve çapı verildiğinde, basınç düşüşünün (veya yük kaybının) hesaplanması
2. Belirtilen bir basınç düşüşü (veya yük kaybı) için boru uzunluğu ve çapı verildiğinde, debinin hesaplanması
3. Belirtilen bir basınç düşüşü (veya yük kaybı) için boru uzunluğu ve debi verildiğinde, boru çapının hesaplanması

Problem tipi	Verilen	Bulunacak olan
1	L, D, \dot{V}	ΔP (veya h_f)
2	$L, D, \Delta P$	\dot{V}
3	$L, \Delta P, \dot{V}$	D

Boru akışında karşılaşılan üç tip problem.

Yük kaybı, debi ve çap

hesaplamalarındaki sıkıcı iterasyonlardan kurtulmak için yanda verilen açık bağıntılar kullanılır.

Bu bağıntılar Moody diyagramı

değerlerinden ~%2 farklıdır:

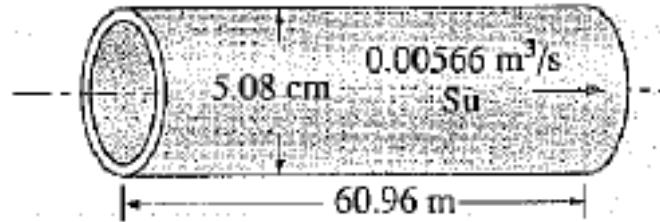
$$h_L = 1.07 \frac{\dot{V}^2 L}{gD^5} \left\{ \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + 4.62 \left(\frac{\nu D}{\dot{V}} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad \begin{array}{l} 10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2} \\ 3000 < Re < 3 \times 10^8 \end{array}$$

$$\dot{V} = -0.965 \left(\frac{gD^5 h_L}{L} \right)^{0.5} \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \left(\frac{3.17 \nu^2 L}{gD^3 h_L} \right)^{0.5} \right] \quad Re > 2000$$

$$D = 0.66 \left[\varepsilon^{1.25} \left(\frac{L \dot{V}^2}{gh_L} \right)^{4.75} + \nu \dot{V}^{9.4} \left(\frac{L}{gh_L} \right)^{5.27} \right]^{0.04} \quad \begin{array}{l} 10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2} \\ 5000 < Re < 3 \times 10^8 \end{array}$$

ÖRNEK 8-3 Bir Su Borusundaki Yük Kaybının Belirlenmesi

Sıcaklığı 15.6°C olan su ($\rho = 999 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 0.00112 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$), 5.08 cm çaplı paslanmaz çelikten yapılmış yatay boruda $0.00566 \text{ m}^3/\text{s}$ debi ile daimi olarak akmaktadır (Şekil 8-30). Borunun 60.96 m 'lik kısmı boyunca akıştaki basınç düşüşünü, yük kaybını ve gerekli pompalama gücünü hesaplayınız.



ÇÖZÜM Özellikleri belirtilen bir su borusundaki debi verilmiştir. Basınç düşüşü, yük kaybı ve pompalama gücü gereksinimi hesaplanacaktır.

Kabuller 1 Akış daimi ve sıkıştırılmazdır. 2 Giriş etkileri ihmal edilebilir ve dolayısıyla akış tam gelişmiştir. 3 Boruda dönüş, vana ve bağlantı elemanı gibi parçalar yoktur. 4 Boru kısmında pompa veya türbin gibi iş makineleri yoktur.

Özellikler Suyun yoğunluğu ve dinamik viskozitesi sırasıyla $\rho = 999 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 0.00112 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ olarak verilmiştir.

Analiz Debi, boru uzunluğu ve boru çapı bilindiğinden, birinci tip bir problemle karşı karşıyayız. İlk önce akış rejimini bulmak için ortalama hız ve Reynolds sayısını hesaplayalım:

$$V = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{\dot{V}}{\pi D^2/4} = \frac{0.00566 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.0508)^2/4} = 2.79 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(999 \text{ kg/m}^3)(2.79 \text{ m/s})(0.0508 \text{ m})}{0.00112 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 126420$$

Re değeri 4000'den büyüktür. Bu nedenle akış türbülanslıdır. Borunun bağıl pürüzlülüğü Tablo 8-2'den hesaplanır.

$$\epsilon/D = \frac{0.02 \times 10^{-6} \text{ m}}{0.0508 \text{ m}} = 39.4 \times 10^{-6}$$

Bu bağıt pürüzlülük ve Reynolds sayısı değerine karşılık gelen sürtünme faktörü Moody diyagramından alınabilir. Bununla birlikte herhangi bir okuma hatasından kaçınmak için f 'yi Colebrook denkleminde hesaplayabiliriz:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{39.4 \times 10^{-6}}{3.7} + \frac{2.51}{126420 \sqrt{f}} \right)$$

Denklem çözücüsü veya iteratif yöntem kullanılarak sürtünme faktörü $f = 0.0174$ olarak hesaplanır. Buna göre basınç düşüşü (bu durumda basınç kaybına eşdeğerdir) yük kaybı ve gerekli güç aşağıdaki gibi olur:

$$\Delta P = \Delta P_K = f \frac{L \rho V^2}{D 2} = 0.0174 \frac{(60.96 \text{ m})(999 \text{ kg/m}^3)(2.79 \text{ m/s})^2}{(0.0508 \text{ m}) 2} = 81185 \text{ Pa}$$

$$h_K = \frac{\Delta P_K}{\rho g} = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.0174 \frac{(60.96 \text{ m})(2.79 \text{ m/s})^2}{(0.0508 \text{ m}) 2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 8.28 \text{ m}$$

$$\dot{W}_{\text{pompa}} = \dot{V} \Delta P = (0.00566 \text{ m}^3/\text{s})(81185 \text{ Pa}) = 460 \text{ W}$$

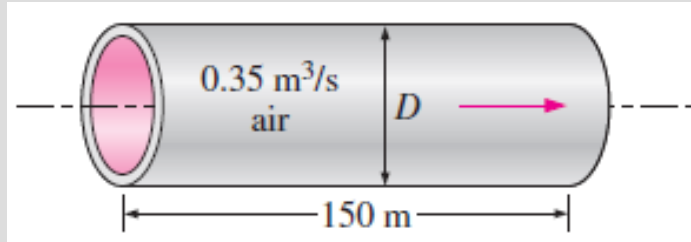
Dolayısıyla, borudaki sürtünmeden kaynaklanan kayıpları yenmek için verilmesi gereken güç 460 W'tir.

İrdeleme - Daha önceden bahsedildiği üzere, Colebrook denkleminin kendine özgü hatalarından ötürü elde edilen sonuçların en fazla iki anlamlı basamağa kadar doğru olduğunu bilmemize rağmen, nihai cevapları üç anlamlı basamağa kadar yazmak yaygın bir uygulamadır. Sürtünme faktörü açık haldeki Haaland bağıntısından da (Denklem 8-51)

kolayca elde edilebilir. Bu durumda sonuç $f = 0.017$ olacaktır. Bu değer 0.0174'e yeteri kadar yakındır. Ayrıca, $\varepsilon = 0$ 'a karşılık gelen sürtünme faktörü 0.0171'dir. Bu ise, paslanmaz çelikten yapılan boruların ihmal edilebilir bir hata ile pürüzsüz olarak kabul edilebileceğini gösterir.

ÖRNEK 8-4 Bir Hava Kanalı'nın Çarpının Belirlenmesi

1 atm ve 35°C'de olan ısıtılmış hava, 150 m uzunluğundaki dairesel plastik kanalda 0.35 m³/s'lik debi ile taşınmaktadır (Şekil 8-31). Borudaki yük kaybının 20 m'yi aşması istenmediğine göre minimum kanal çapını hesaplayınız.



Özellikler 35°C'deki havanın yoğunluğu, dinamik viskozitesi ve kinematik viskozitesi sırasıyla, $\rho = 1.145 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.895 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ ve $\nu = 1.655 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir.

Analiz Debi ve yük kaybı bilindiğinden üçüncü tip bir problemle karşı karşıyayız. Bu problemi üç farklı yaklaşımla çözebiliriz: (1) Boru çapının kabulü ile yük kaybının hesaplanması, sonucun belirtilen yük kaybı ile karşılaştırılması ve hesaplanan yük kaybını belirtilen değerle uyuşturuncaya kadar hesapların tekrarlanması şeklinde bir iteratif yaklaşım uygulamak suretiyle; (2) ilgili bütün denklemlerin yazılması (çap bilinmeyen olarak bırakılacak) ve denklemlerin çözülmesi için bir yazılım kullanılarak hepsinin birden çözülmesiyle; (3) üçüncü Swamee-Jain formülünün kullanılması ile. Burada son iki yaklaşımın nasıl kullanıldığını göstereceğiz. Ortalama hız, Reynolds sayısı, sürtünme faktörü ve yük kaybı bağıntıları aşağıdaki gibi ifade edilebilir (D [m], V [m/s], Re ve f boyutsuzdur):

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{\pi D^2/4} = \frac{0.35 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi D^2/4}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{VD}{1.655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right) = -2.0 \log \left(\frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right)$$

$$h_K = f \frac{L V^2}{D 2g} \rightarrow 20 \text{ m} = f \frac{150 \text{ m}}{D} \frac{V^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$

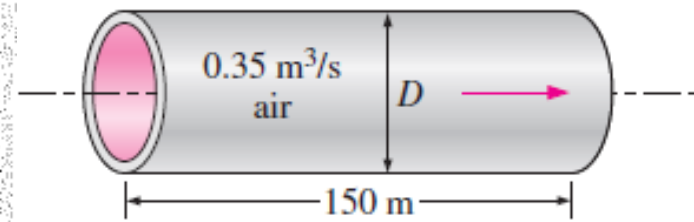
Plastik borunun pürüzlülüğü yaklaşık olarak sıfırdır (Tablo 8-2). Elimizde dört bilinmeyenli dört denklem vardır ve EES gibi bir denklem çözücüsü ile çözdüğümüzde aşağıdaki sonuçları elde ederiz:

$$D = 0.267 \text{ m}, \quad f = 0.0180, \quad V = 6.24 \text{ m/s} \quad \text{ve} \quad \text{Re} = 100800$$

Buna göre, eğer yük kaybının 20 m'yi aşması istenmiyorsa kanal çapı 26.7 cm'den büyük olmalıdır. Re değeri 4000'den büyüktür ve dolayısıyla türbülanslı akış kabulü doğrulanmıştır.

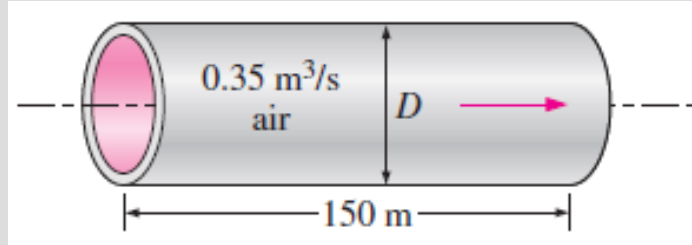
Çap ayrıca üçüncü Swamee-Jain formülünden doğrudan elde edilebilir:

$$\begin{aligned} D &= 0.66 \left[\epsilon^{1.25} \left(\frac{LV^2}{gh_K} \right)^{4.75} + \nu^{9.4} \left(\frac{L}{gh_K} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \\ &= 0.66 \left[0 + (1.655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) (0.35 \text{ m}^3/\text{s})^{9.4} \left(\frac{150 \text{ m}}{(9.81 \text{ m}^2/\text{s})(20 \text{ m})} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \\ &= 0.271 \text{ m} \end{aligned}$$



ÖRNEK 8-5 Bir Kanaldaki Hava Debisinin Belirlenmesi

Örnek 8-4'ü tekrar ele alınız. Şimdiki durumda kanal çapı iki katına çıkarılsın fakat çap sabit kalsın. Toplam yük kaybının sabit kalması istendiğine göre, kanal debisindeki düşüşü hesaplayınız.



ÇÖZÜM Hava kanalındaki çap ve yük kaybı verilmiştir. Debi hesaplanacaktır.

Kabuller Belirtilen boru çapı ve yük kaybı için debinin hesaplanması istendiğinden bu problem ikinci tip bir problemdir. Debi (ve dolayısıyla akış hızı) bilinmediğinden çözüm için iteratif yaklaşım söz konusudur. Ortalama hız, Reynolds sayısı, sürtünme faktörü ve yük kaybı bağıntıları aşağıdaki gibi ifade edilebilir (D [m], V [m/s], Re ve f boyutsuzdur):

$$V = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{\dot{V}}{\pi D^2/4} \rightarrow V = \frac{\dot{V}}{\pi (0.267 \text{ m})^2/4}$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \rightarrow Re = \frac{V(0.267 \text{ m})}{1.655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

$$h_K = f \frac{L V^2}{D 2g} \rightarrow 20 \text{ m} = f \frac{300 \text{ m}}{0.267 \text{ m}} \frac{V^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$

Elimizde dört bilinmeyenli dört denklem vardır ve EES gibi bir denklem çözücüsü ile çözdüğümüzde aşağıdaki sonuçları elde ederiz:

$$\dot{V} = 0.24 \text{ m}^3/\text{s}, \quad f = 0.0195, \quad V = 4.23 \text{ m/s} \quad \text{ve} \quad Re = 68300$$

Buradan debideki düşüş

$$\dot{V}_{\text{düşüş}} = \dot{V}_{\text{eski}} - \dot{V}_{\text{yeni}} = 0.35 - 0.24 = 0.11 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{yüzde } 31 \text{ düşüş})$$

olacaktır. Bundan dolayı, belirtilen yük kaybı (veya kullanılabilir yük veya fan basma gücü) için, kanal uzunluğu iki katına çıktığında, debi 0.35'ten 0.24 m³/s'ye yani yüzde 31 oranında düşer.

Alternatif çözüm Eğer bilgisayar yoksa (sınavda olduğu gibi), diğer seçenek *elle iterasyon yapmaktır*. En iyi yakınsamanın, önce sürtünme faktörü f 'yi tahmin edip ardından yük kaybı bağıntısından V hızını çözmekle sağlanabildiğini biliyoruz. V hızı f 'ye bağlı olarak,

Borudaki ortalama hız:

$$V = \sqrt{\frac{2gh_K}{fL/D}}$$

Şeklinde ifade edilebilir. V hesaplandığında, Moody diyagramı veya Colebrook denkleminde elde edilen düzeltilmiş sürtünme faktörü kullanılarak Reynolds sayısı hesaplanabilir. Yakınsama elde edilinceye kadar düzeltilmiş f değeri ile hesaplamaları tekrar edilir. Örneğin $f = 0.04$ tahmin edelim:

İterasyon	f (tahmin)	V , m/s	Re	Düzeltilmiş f
1	0.04	2.955	4.724×10^4	0.0212
2	0.0212	4.059	6.489×10^4	0.01973
3	0.01973	4.207	6.727×10^4	0.01957
4	0.01957	4.224	6.754×10^4	0.01956
5	0.01956	4.225	6.756×10^4	0.01956

İterasyon sadece üç tekrarda, üç basamakta ve sadece dört tekrarda, dört basamakta yakınsamıştır. Sonuçlar EES ile elde edilenlerle aynıdır ve bilgisayar kullanmak gerekmemiştir.

İrdeleme Yeni debi, doğrudan doğruya ikinci Swamee-Jain formülünden de elde edilebilir:

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= -0.965 \left(\frac{gD^5 h_K}{L} \right)^{0.5} \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \left(\frac{3.17v^2 L}{gD^3 h_K} \right)^{0.5} \right] \\
 &= -0.965 \left(\frac{(9.81 \text{ m/s}^2) (0.267 \text{ m})^5 (20 \text{ m})}{300 \text{ m}} \right)^{0.5} \\
 &\quad \times \ln \left[0 + \left(\frac{3.17 (1.655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2 (300 \text{ m})}{(9.81 \text{ m/s}^2) (0.267 \text{ m})^3 (20 \text{ m})} \right)^{0.5} \right] \\
 &= 0.24 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Swamee-Jain bağıntısından elde edilen sonucun, çözmek için EES veya elle iterasyon tekniğini kullandığımız Colebrook denkleminde elde edilen sonuç ile aynı (iki anlamlı basamağa göre) olduğuna dikkat ediniz. Bu nedenle basit olan Swamee-Jain bağıntısı güvenli bir şekilde kullanılabilir.

8-6 ■ YEREL KAYIPLAR

Yaygın olarak kullanılan bir borulama sisteminde akışkan, borulara ek olarak, birçok bağlantı elemanı, vana, dönüş, dirsek, T, giriş, çıkış, genişleme ve daralmalardan geçer

Bu elemanlar akışkanın düzgün akışını kesintiye uğratır ve akışı ayırdıkları ve akışın karışmasına yol açtıkları için ilave kayıplara neden olurlar.

Uzun borulardan oluşan bir sistemde bu kayıplar, borulardaki toplam yük kaybı (sürekli yük kayıpları) ile karşılaştırıldığında küçük kalır ve bunlara **yerel kayıplar** denir.

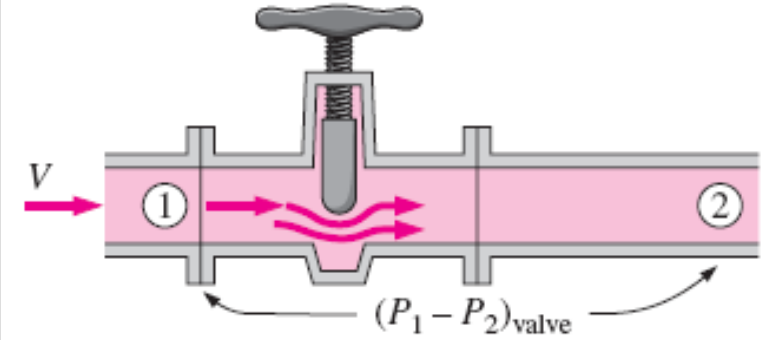
Yerel kayıplar **kayıp katsayısı** K_L cinsinden şöyle ifade edilebilir.

$$K_L = \frac{h_L}{V^2/(2g)}$$

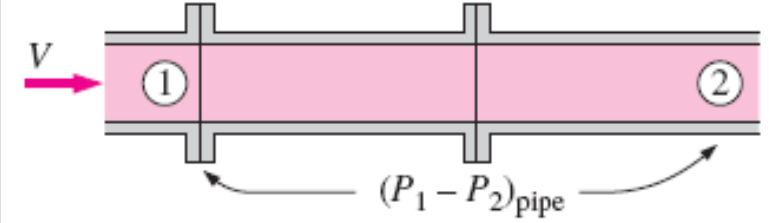
$$h_L = \Delta P_L / \rho g$$

ilave yük kaybı

Pipe section with valve:



Pipe section without valve:



$$\Delta P_L = (P_1 - P_2)_{\text{valve}} - (P_1 - P_2)_{\text{pipe}}$$

Üzerinde yerel kayıp elemanı bulunan sabit çaplı boru bölümünde, elemanın (şekilde gösterilen sürgülü vana gibi) yerel kayıp katsayısı, yol açtığı ilave basınç kaybının ölçülüp borudaki dinamik basınca bölünmesi ile bulunur.

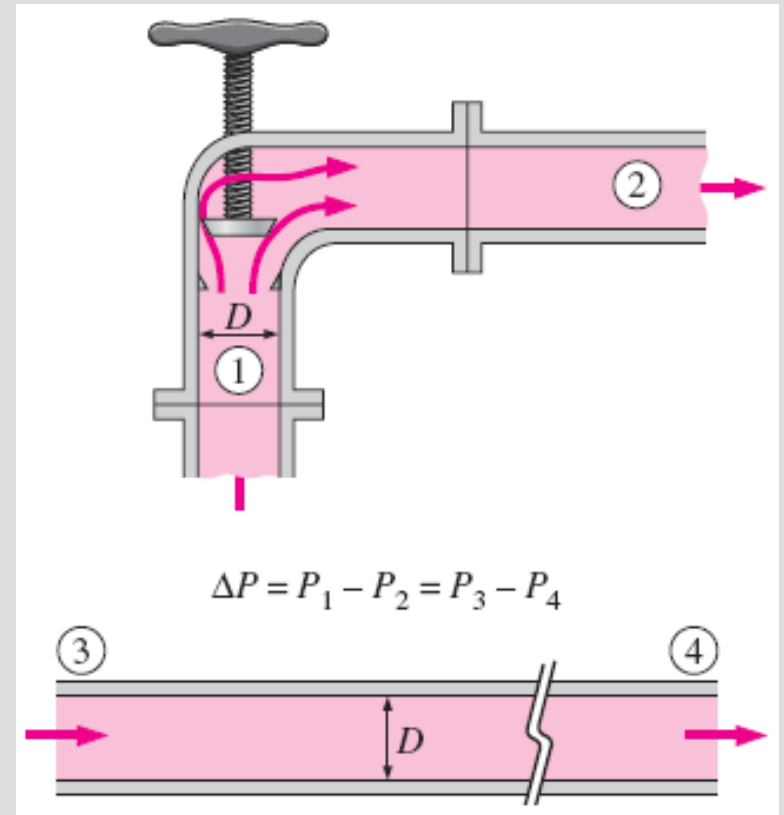
Giriş çapı çıkış çapına eşit olduğunda bir elemanın kayıp katsayısı, o eleman boyunca meydana gelen basınç kaybının ölçülmesi ve dinamik basınca bölünmesi ile bulunur. $K_L = \Delta P_L / (\rho V^2 / 2)$.

Elemanın kayıp katsayısı bilindiğinde yük kaybı aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad \text{Yük kaybı}$$

Yerel kayıplar aşağıda tanımlanan eşdeğer uzunluk L_{equiv} cinsinden de ifade edilebilir:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} = f \frac{L_{\text{equiv}}}{D} \frac{V^2}{2g} \rightarrow L_{\text{equiv}} = \frac{D}{f} K_L$$



Elemanın (şekilde gösterilen açılı vana gibi) neden olduğu yük kaybı, uzunluğu eşdeğer uzunluk olan boru parçasından kaynaklanan yük kaybına eşdeğerdir.

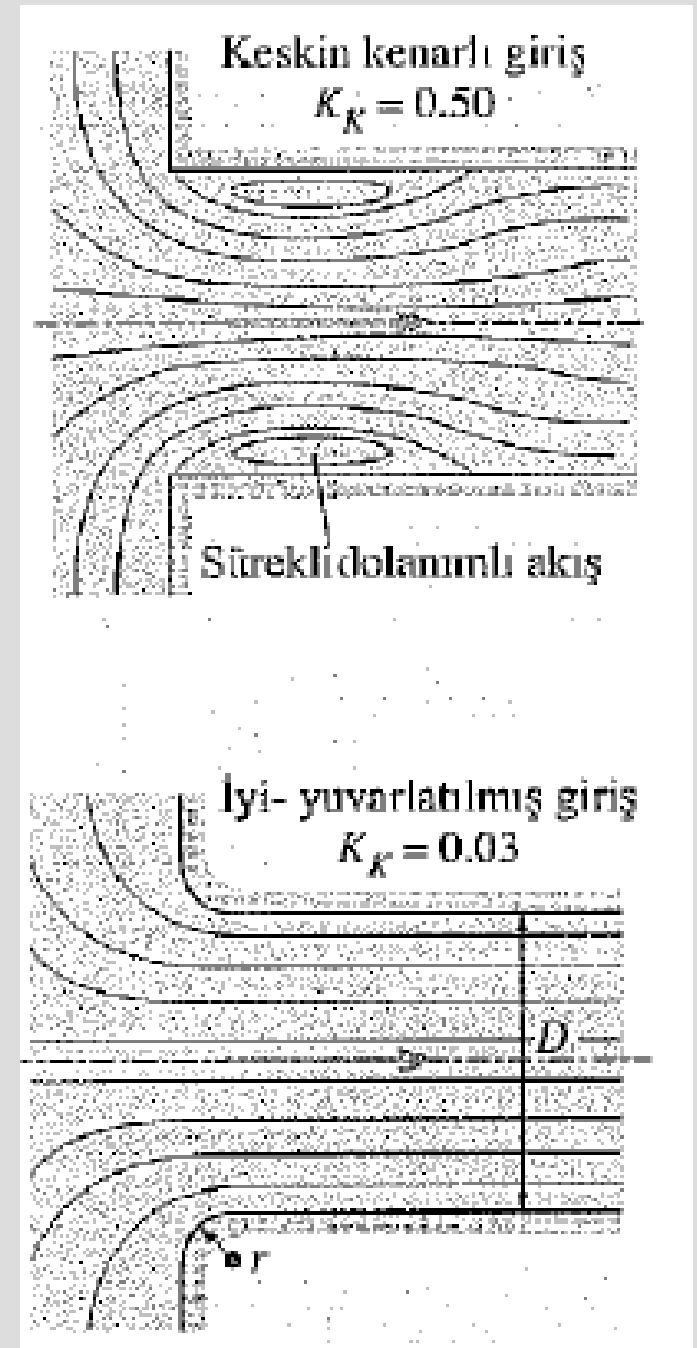
Toplam yük kaybı (genel)

$$h_{L, \text{total}} = h_{L, \text{major}} + h_{L, \text{minor}} \\ = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{V_i^2}{2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g}$$

Toplam yük kaybı ($D = \text{sabit}$)

$$h_{L, \text{total}} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g}$$

Boru girişindeki yük kaybı, tam yuvarlak girişler için hemen hemen ihmal edilebilir ($r/D > 0.2$ için $K_L=0.03$), fakat keskin kenarlı girişler için 0.5 civarına kadar yükselir.

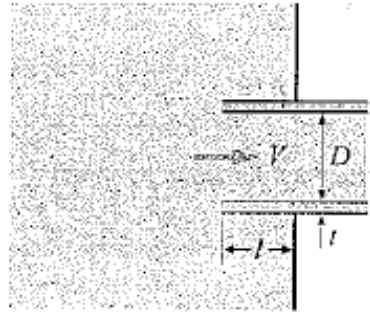


TABLO 8-4

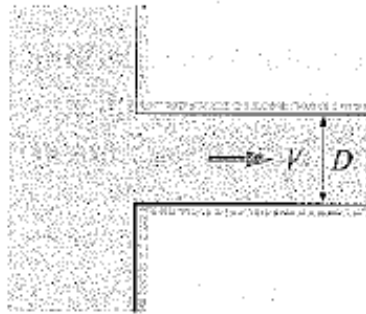
Türbülanslı akışta $h_K = K_K V^2 / (2g)$ bağlantısındaki K_K yerel kayıp katsayılarının çeşitli boru elemanları için verilen değerleri (V , elemanın bulunduğu borudaki ortalama akış hızıdır).*

Boru girişi

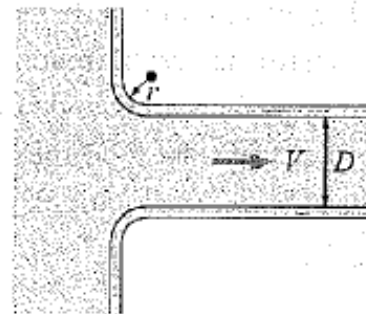
*Çıkıntılı giriş: $K_K = 0.80$
($t \ll D$ ve $l \approx 0.1D$)*



Keskin kenarlı: $K_K = 0.50$



*İyi yuvarlatılmış ($r/D > 0.2$); $K_K = 0.03$
Hafifçe yuvarlatılmış ($r/D = 0.1$); $K_K = 0.12$
(bkz. Şekil 8-36)*

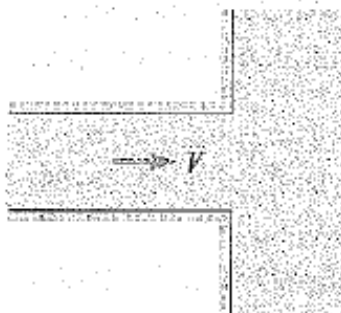


Boru çıkışı

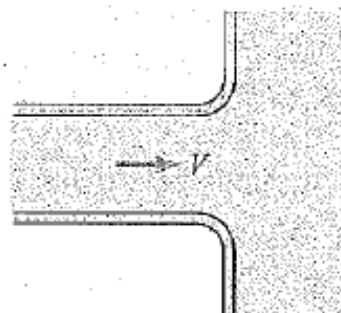
Çıkıntılı çıkış: $K_K = \alpha$



Keskin kenarlı: $K_K = \alpha$



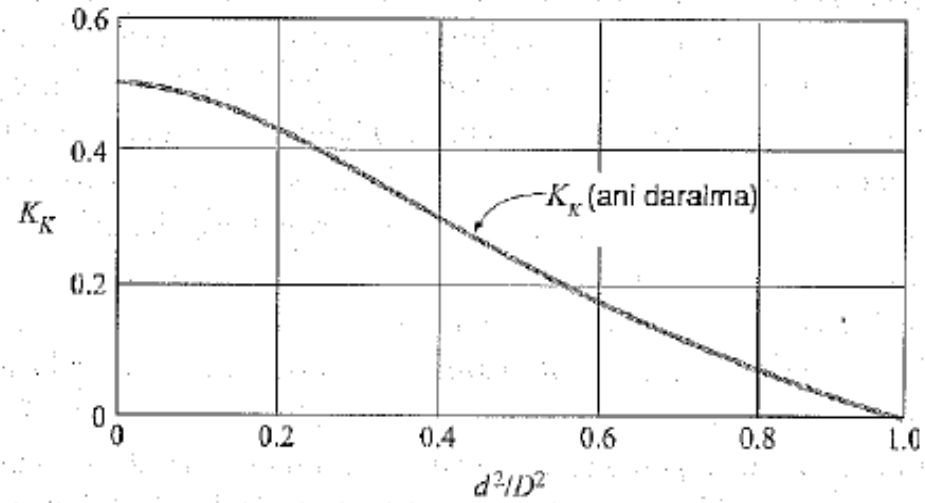
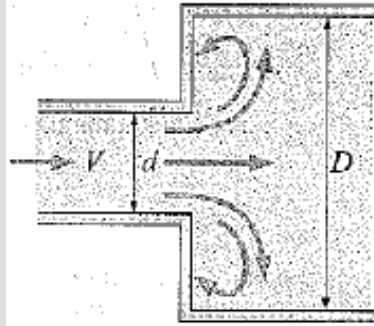
Yuvarlatılmış: $K_K = \alpha$



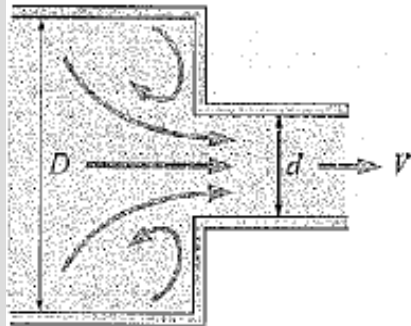
Not: Kinetik enerji düzeltme faktörü tam gelişmiş laminar akış için $\alpha = 2$ ve tam gelişmiş türbülanslı akış için $\alpha = 1.05$ ' dir.

Ani genişleme ve daralma (küçük çaplı borudaki hıza göre)

Ani genişleme: $K_K = \alpha \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$



Ani daralma: Diyagrama bakınız.



Yavaş genişleme ve daralma (küçük çaplı borudaki hıza göre)

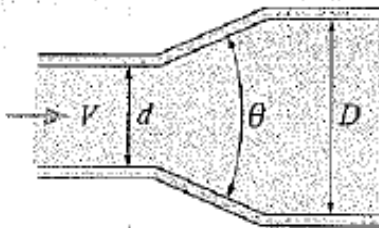
Genişleme ($\theta = 20^\circ$ için):

$d/D = 0.2$ için $K_K = 0.30$

$d/D = 0.4$ için $K_K = 0.25$

$d/D = 0.6$ için $K_K = 0.15$

$d/D = 0.8$ için $K_K = 0.10$

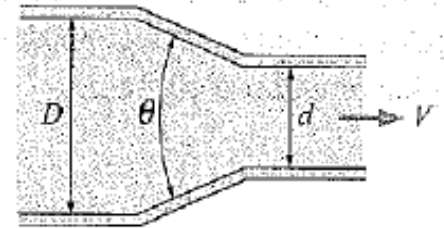


Daralma:

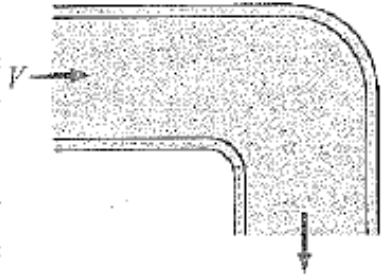
$\theta = 30^\circ$ için $K_K = 0.02$

$\theta = 45^\circ$ için $K_K = 0.04$

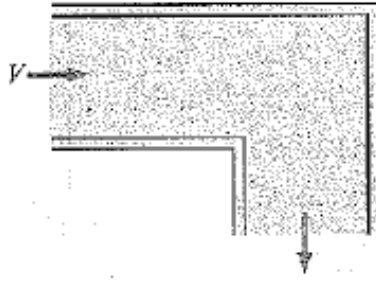
$\theta = 60^\circ$ için $K_K = 0.07$



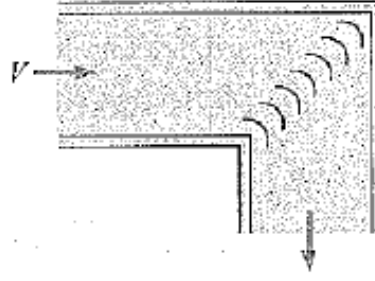
Dönüşler ve Dallanmalar
90° düzgün dönüş
Flanşlı: $K_K = 0.3$
Diş açılmış: $K_K = 0.9$



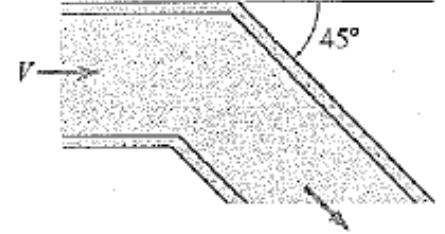
90° köşe dönüş
(kanatsız): $K_K = 1.1$



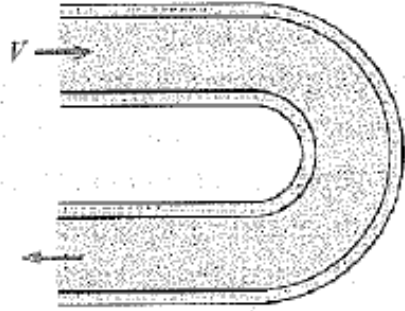
90° köşe dönüş
(kanatlı): $K_K = 0.2$



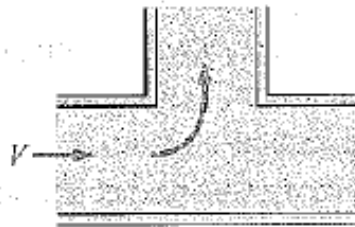
45° diş açılmış dirsek
 $K_K = 0.4$



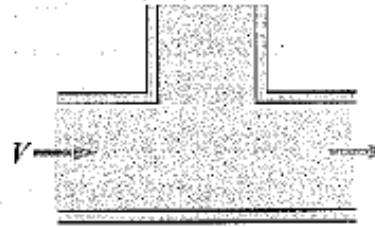
180° tam dönüş
Flanşlı: $K_K = 0.2$
Diş açılmış: $K_K = 1.5$



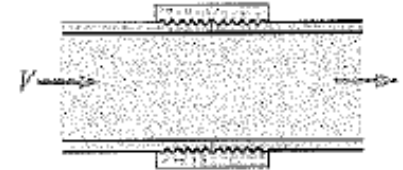
T (dallanan akış):
Flanşlı: $K_K = 1.0$
Diş açılmış: $K_K = 2.0$



T (düz akışlı):
Flanşlı: $K_K = 0.2$
Diş açılmış: $K_K = 0.9$



Diş açılmış rakor
 $K_K = 0.08$



Vanalar

Küresel vana, tam açık: $K_K = 10$

Açılı vana, tam açık: $K_K = 5$

Bilyeli vana, tam açık: $K_K = 0.05$

Salıncak çek valf: $K_K = 2$

Sürgülü vana, tam açık: $K_K = 0.2$

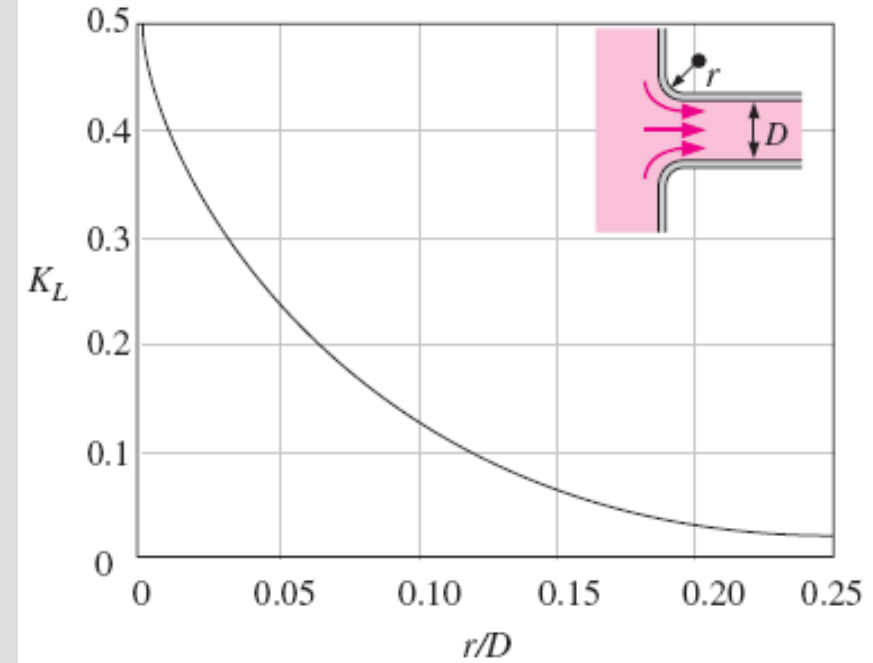
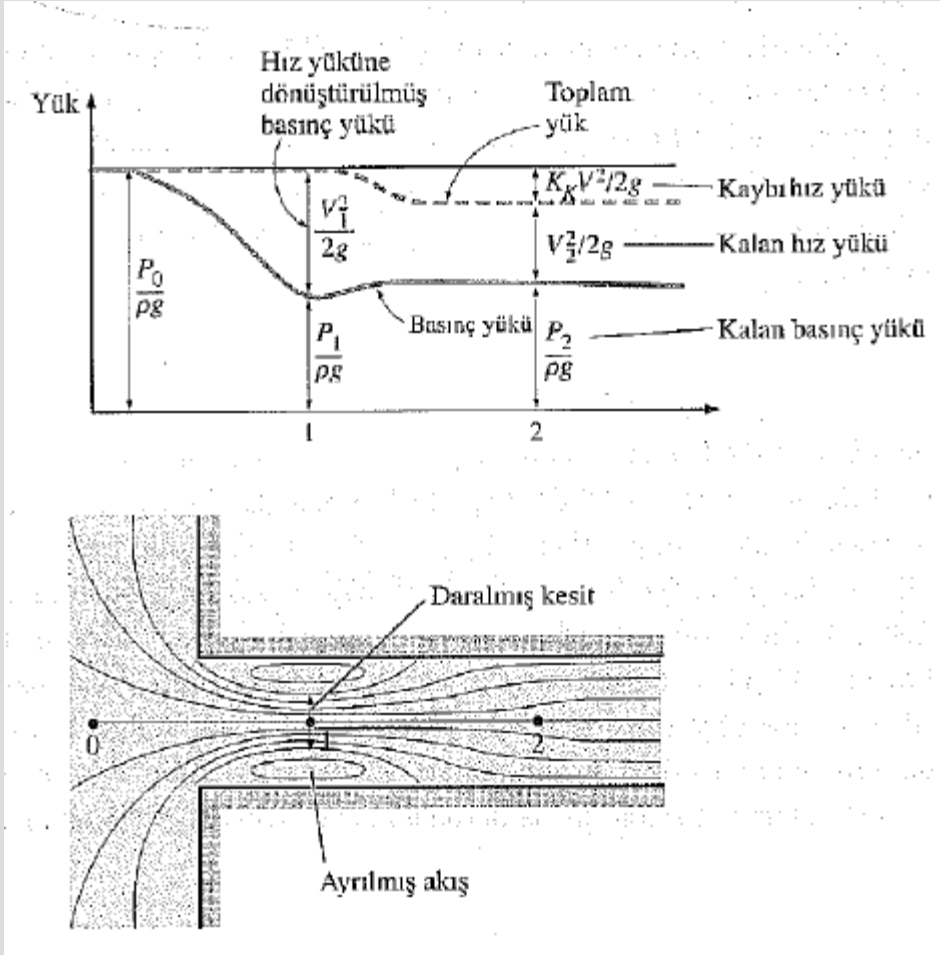
$\frac{1}{4}$ kapalı: $K_K = 0.3$

$\frac{1}{2}$ kapalı: $K_K = 2.1$

$\frac{3}{4}$ kapalı: $K_K = 17$

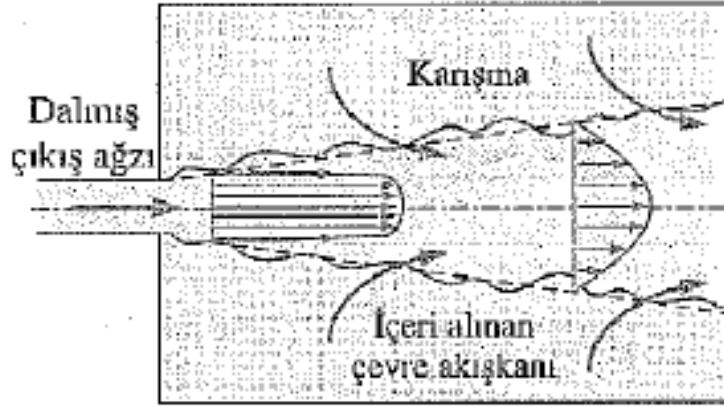
* Bu değerler kayıp katsayılarının temsili değerleridir. Gerçek değerler büyük ölçüde elemanların tasarım ve imalatına bağlıdır ve verilen değerlerden önemli oranda sapma gösterilebilir (özellikle vanalar için). Nihai tasarımda imalatçı tarafından sağlanan veriler kullanılmalıdır.

$$K_L = \alpha \left(1 - \frac{A_{\text{small}}}{A_{\text{large}}} \right)^2 \quad (\text{ani genişleme})$$



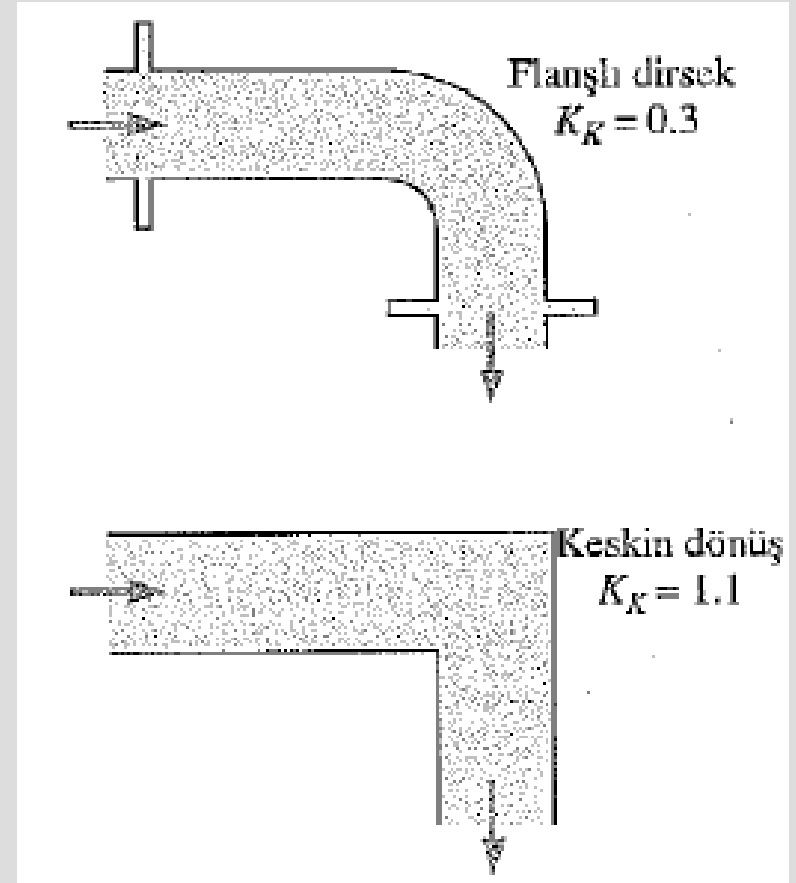
Boru girişini yuvarlatmanın kayıp katsayısı üzerindeki etkisi.

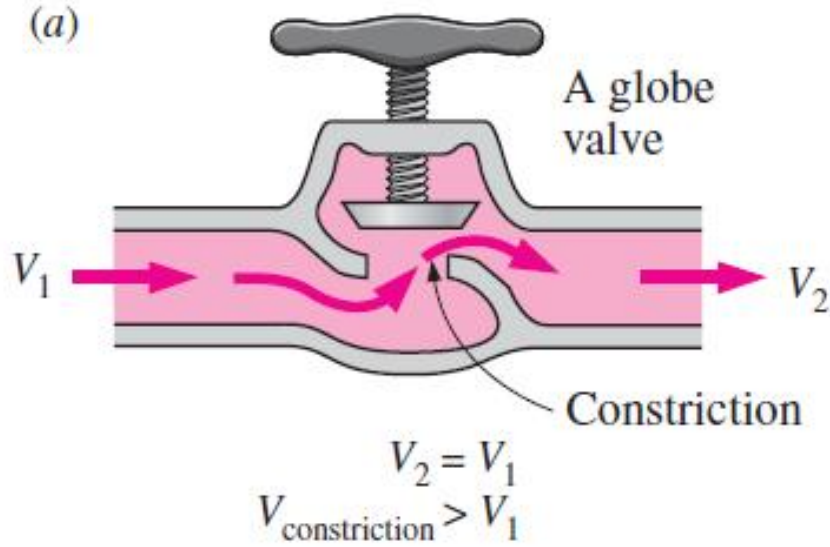
Keskin kenarlı boru girişinin akış daralmasının ve ilgili yük kaybının şematik gösterimi.



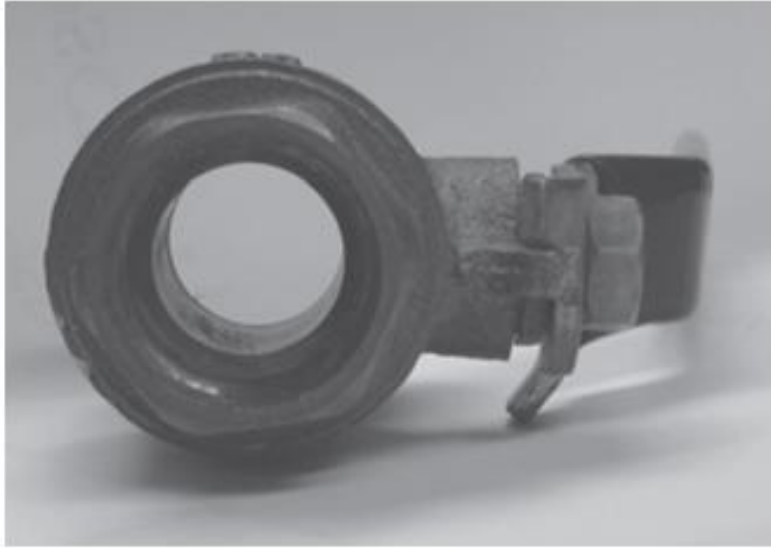
Jet yavaşlayıp dalmış çıkışın aşağı akımındaki çevre akışkanı ile karışırken, akışın tüm kinetik enerjisi sürtünme yoluyla "kaybedilir" (ısı enerjisi dönüşür).

Keskin dönüşler yerine dairesel yayların kullanılması ile akışkanın dönüşünü "kolaylaştırarak" yön değişikliği sırasındaki kayıplar en aza indirgenebilir.





(b)

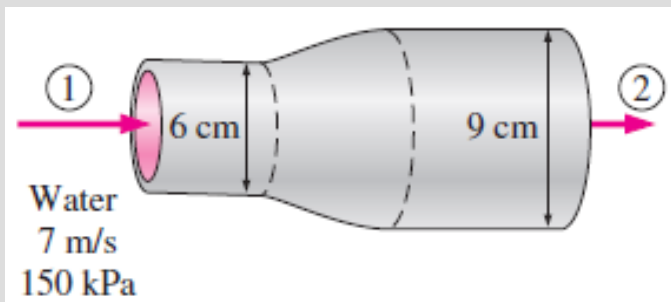


(a) Kısmen kapalı vanadaki büyük yük kaybı, tersinmez yavaşlamadan, akışın ayrılmasından ve dar vana geçidinden gelen yüksek hızlı akışkanın karışmasından kaynaklanır.

(b) Diğer taraftan tam açık yuvarlak valfteki yükü kaybı daha küçüktür.

ÖRNEK 8-6 Yavaş Genişleme Sırasındaki Yük Kaybı ve Basınç Artışı

6 cm çapındaki yatay su borusu 9 cm çapındaki boru ile yavaşça genişleyerek birleşmektedir. (Şekil 8-40). Genişleme kısmının çeperleri eksen ile 10° lik açı yapmaktadır. Suyun genişlemeden önceki ortalama hızı ve basıncı sırasıyla 7 m/s ve 150 kPa'dır. Genişleme kısmındaki yük kaybını ve büyük çaplı borudaki basıncı hesaplayınız.



ÇÖZÜM. Yatay bir su borusu daha büyük çaplı bir boru ile yavaşça genişleyerek birleşmektedir. Yük kaybı ve genişlemeden sonraki basınç hesaplanacaktır.

Kabuller 1 Akış daimi ve sıkıştırılmazdır. 2 1 ve 2 kesitlerindeki akış tam gelişmiş ve türbülanslıdır, $\alpha_1 = \alpha_2 \cong 1.06$.

Özellikler Suyun yoğunluğu $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ tür. $\theta = 20^\circ$ lik toplam açı için yavaş genişlemede $d/D = 6/9$ lük çap oranı için kayıp katsayısı $K_L = 0.133$ tür. (Tablo 8-4'te interpolasyon yapılarak elde edilmiştir.)

Analiz Suyun yoğunluğunun sabit kaldığı dikkate alındığında, aşağıdaki su hızı kütle korunumdan,

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \rightarrow V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 = \frac{D_1^2}{D_2^2} V_1$$

$$V_2 = \frac{(0.06 \text{ m})^2}{(0.09 \text{ m})^2} (7 \text{ m/s}) = 3.11 \text{ m/s}$$

olarak hesaplanır. Genişleme kısmındaki tersinmez yük kaybı ise

$$h_K = K_K \frac{V_1^2}{2g} = (0.133) \frac{(7 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.333 \text{ m}$$

olur. $z_1 = z_2$ olup pompa veya türbin yoktur. Buna göre genişleme kısmındaki enerji denklemleri yükler cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pompa}, f}^0 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{türbin}, f}^0 + h_K$$
$$\rightarrow \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_K$$

Yukarıdaki denklemden P_2 çekilerek değerler yerine yazılıp hesap yapılırsa,

$$\begin{aligned}
 P_2 &= P_1 + \rho \left\{ \frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2} - gh_K \right\} = (150 \text{ kPa}) + (1000 \text{ kg/m}^3) \\
 &\times \left\{ \frac{1.06(7 \text{ m/s})^2 - 1.06(3.11 \text{ m/s})^2}{2} - (9.81 \text{ m/s}^2)(0.333 \text{ m}) \right\} \\
 &\times \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1 \text{ kN/m}^2} \right) \\
 &= 168 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

elde edilir. Sonuç olarak, yük (ve basınç) kaybına rağmen, genişlemeden sonra basınç 150 kPa'dan 168 kPa'a yükselmiştir. Bunun sebebi, büyük borudaki ortalama akış hızı azalırken dinamik basıncın statik basınca dönüşmesidir.

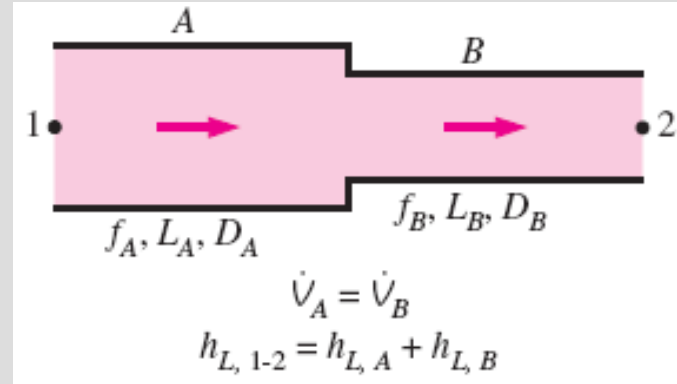
İpotezine Akışın olması için daha yüksek yukarıakım basıncının gerektiği herkes tarafından bilinmektedir. Genişlemeden sonra, kayba rağmen yukarıakım basıncının artması şaşırtıcı gelebilir. Bunun nedeni akışın, toplam yükü oluşturan üç ayrı yük tarafından sağlanmasıdır (basınç yükü, hız yükü ve yükseklik yükü). Daha yüksek olan yukarıakım hız yükü, akışın genişlemesi sırasında aşağıakım basınç yüküne dönüşür ve bu artış geri kazanılamayan yük kaybından daha önemli olur. Ayrıca bu problemi Bernoulli denklemini kullanarak çözmek cazip gelebilir. Ancak bu tür bir çözümde yük (dolayısıyla basınç) kaybı göz ardı edileceğinden, aşağı akımda hatalı daha yüksek bir basınç sonucunu verecektir.

8-7 ■ BORU ŞEBEKELERİ ve POMPA SEÇİMİ

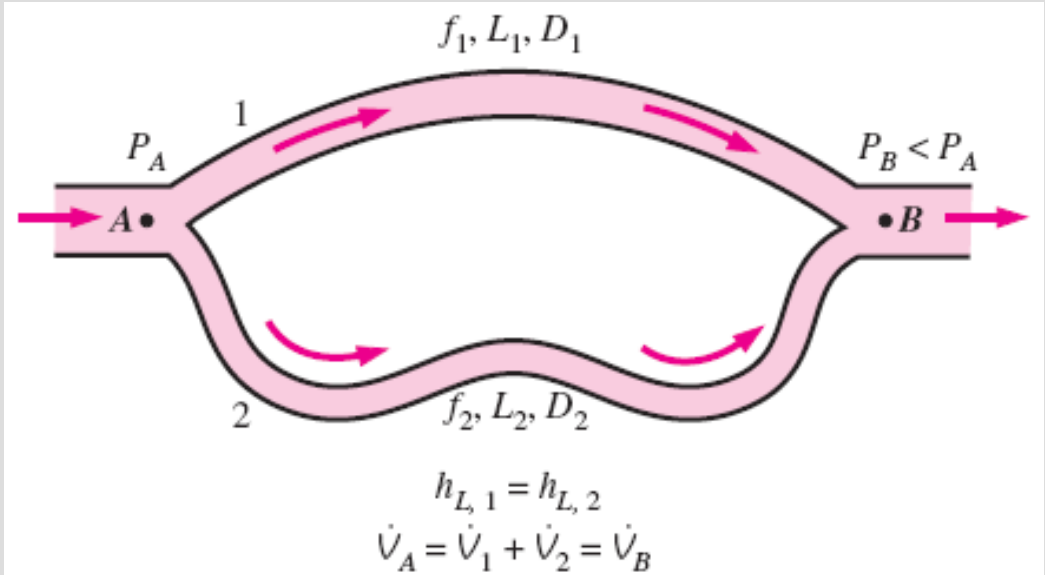


Bir sanayi işletmesindeki boru seçimi.

Paralel bağlı borularda yük kaybı her bir boruda aynıdır ve toplam debi her bir borudaki debilerin toplamıdır.



Seri bağlı borularda debi her boruda aynıdır ve toplam yük kaybı, her bir borudaki yük kayıplarının toplamıdır.



Paralel borulardaki bağıl debiler, her bir borudaki yük kaybının aynı olması şartından hareketle elde edilir.

$$h_{L,1} = h_{L,2} \quad \rightarrow \quad f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} = f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{f_2 L_2 D_1}{f_1 L_1 D_2} \right)^{1/2} \quad \text{and} \quad \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{A_{c,1} V_1}{A_{c,2} V_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \left(\frac{f_2 L_2 D_1}{f_1 L_1 D_2} \right)^{1/2}$$

Paralel kolların her birindeki debinin, o boru çapının 5/2'nci kuvveti ile doğru orantılı, bunun yanı sıra uzunluk ve sürtünme faktörünün karekökü ile ters orantılıdır.

Borulama sistemlerinin analizi iki basit ilkeye dayanır:

- 1. Sistem boyunca kütle korunumu sağlanmalıdır.** Bu işlem sistemdeki bütün düğüm noktalarında, bir düğüme giren toplam debinin bu düğümden çıkan toplam debiye eşit olması gereği ile gerçekleştirilir
- 2. İki düğüm noktası arasındaki basınç düşüşü (ve dolayısıyla yük kaybı) bu düğüm noktaları arasındaki tüm yollarda aynı olmalıdır.** Bunun nedeni basıncın nokta fonksiyonu olması ve belirli bir noktada iki değer alamamasıdır. Uygulamada bu kural, bir gözdeki (bütün gözler için) yük kayıplarının cebirsel toplamının sıfıra eşit olması gerektiği anlamını taşır.

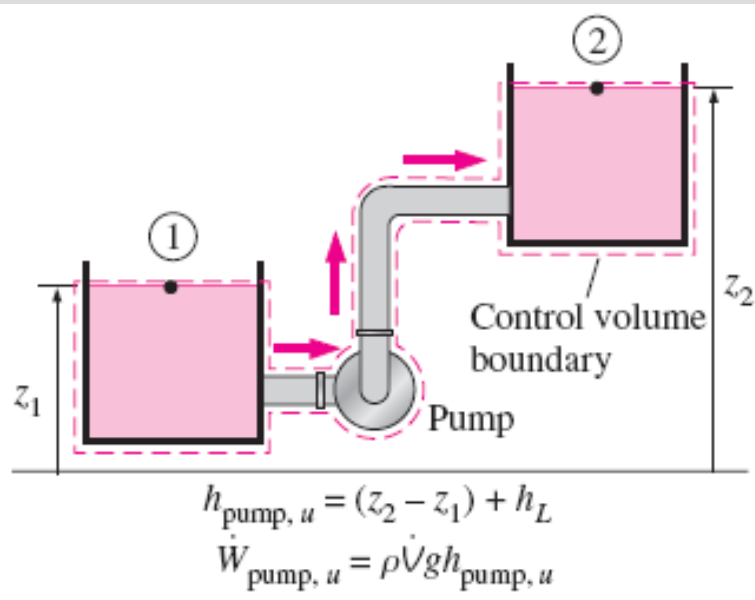
Pompa ve Türbinli Borulama Sistemleri

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump}, u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine}, e} + h_L$$

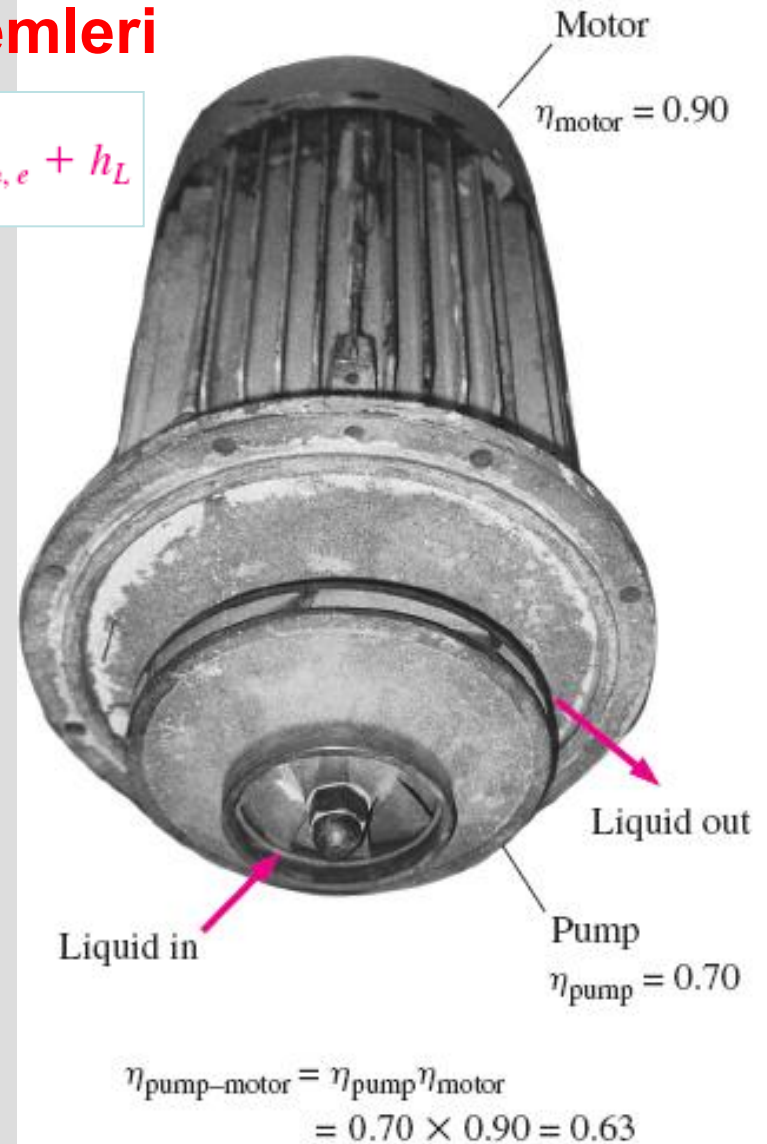
$$h_{\text{pump}, u} = (z_2 - z_1) + h_L$$

$$\dot{W}_{\text{pump, shaft}} = \frac{\rho \dot{V} g h_{\text{pump}, u}}{\eta_{\text{pump}}}$$

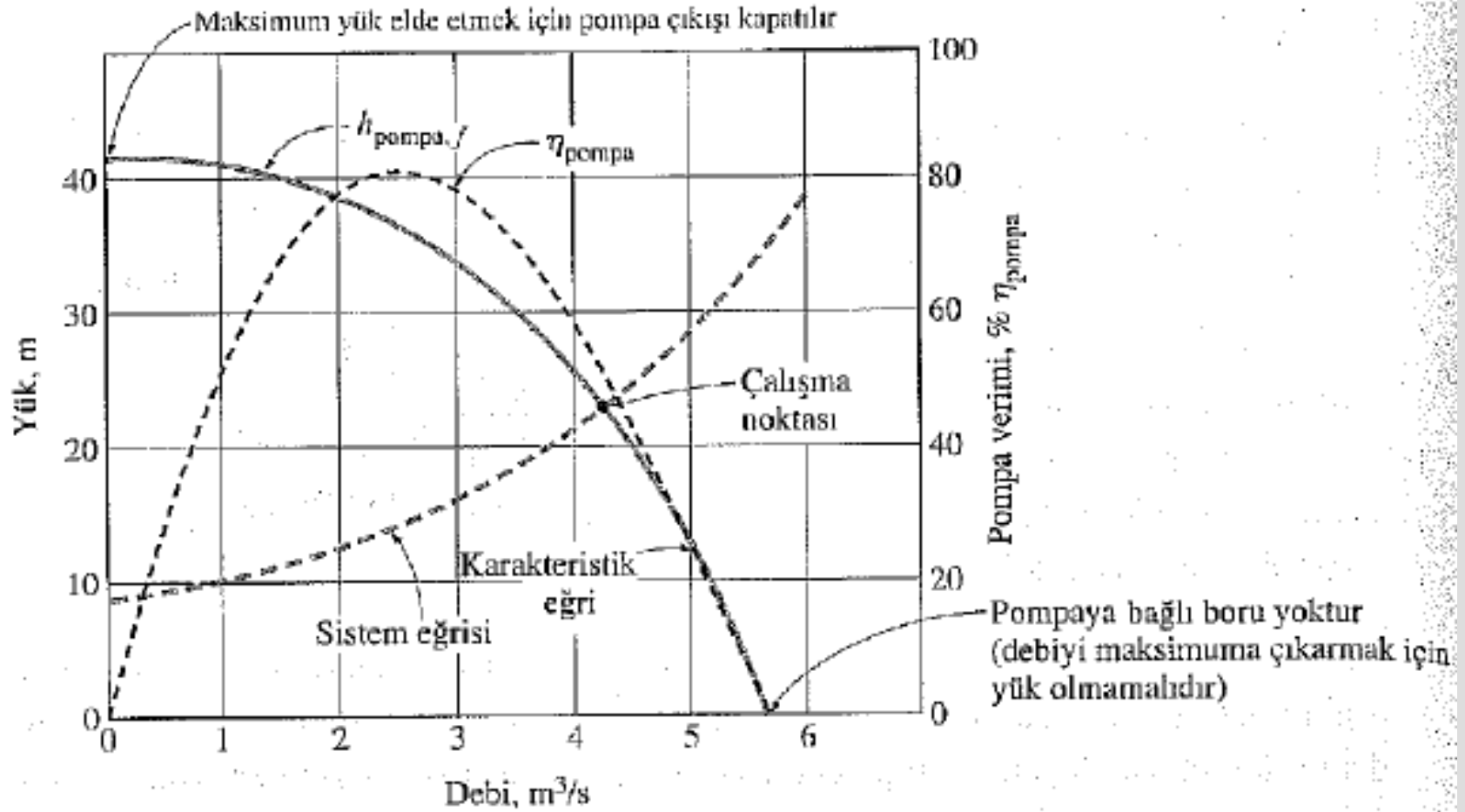
$$\dot{W}_{\text{elect}} = \frac{\rho \dot{V} g h_{\text{pump}, u}}{\eta_{\text{pump-motor}}}$$



Pompanın akışkanı bir depodan diğerine göndermesi için gereken faydalı basma yükü, iki depo arasındaki yükseklik farkı ile yük kaybının toplamına eşittir.



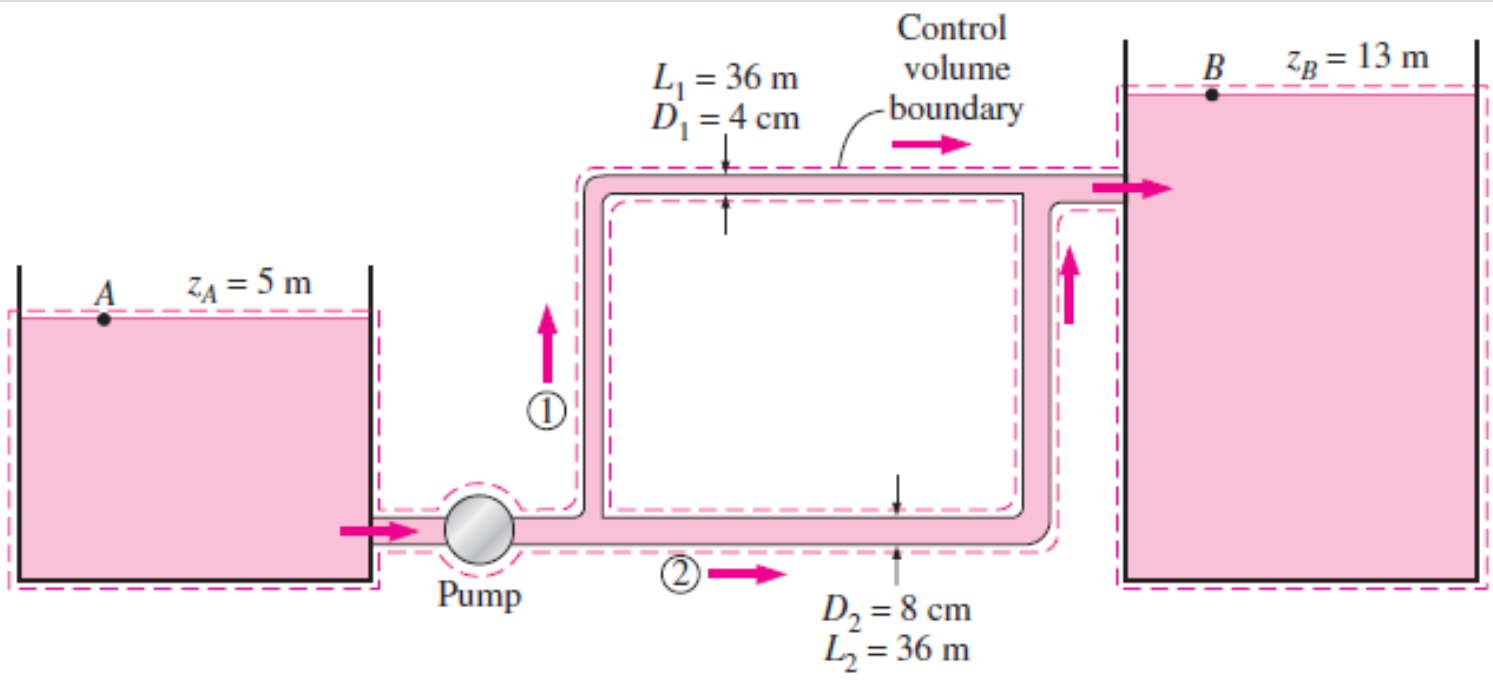
Pompa-motor grubunun verimi, pompa ve motor verimlerinin çarpımıdır.



Merkezkaç pompalar için karakteristik pompa eğrileri, bir borulama sistemi için sistem eğrisi ve çalışma noktası.

ÖRNEK 8-7 Paralel İki Borudan Suyun Pompalanması

Sıcaklığı 20°C olan su, bir depodan ($z_A = 5\text{ m}$) daha yüksekteki diğer bir depoya ($z_B = 13\text{ m}$), paralel bağlı 36 m uzunluğundaki iki adet boru ile pompalanmaktadır (Şekil 8-47). Borular ticari çelikten imal edilmiştir ve boru çapları sırasıyla 4 ve 8 cm'dir. Su, çalışma esnasında 8 kW elektrik gücü çeken yüzde 70 verimli motor-pompa ikilisi ile pompalanacaktır. Paralel boruları depolara bağlayan borulardaki yerel kayıplar ve yük kaybı ihmal edilmektedir. Depolar arasındaki toplam debiyi ve paralel boruların her birindeki debiyi hesaplayınız.



Kabuller: 1 Akış daimi ve sıkıştırılamazdır. 2 Giriş etkileri ihmal edilebilir ve dolayısıyla akış tam gelişmiştir. 3 Depo yükseklikleri sabit kalmaktadır. 4 Paralel boruların haricindeki borularda yerel kayıpların ve yük kaybının ihmal edileceği belirtilmiştir. 5 Her iki borudaki akış da türbülanslıdır (bu kabul doğrulanacaktır).

Özellikler: 20°C'deki suyun yoğunluğu ve dinamik viskozitesi, sırasıyla $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 'dir. Ticari çelik borunun pürüzlülüğü $\epsilon = 0.000045 \text{ m}$ 'dir.

Analiz: Borulardaki hızlar (veya debiler) bilinmediğinden bu problem doğrudan çözülemez. Dolayısıyla burada normal olarak deneme-yanılma yaklaşımını kullanacağız. Ancak EES gibi günümüz denklem çözücülerini yaygın olarak mevcuttur ve dolayısıyla denklemleri sadece denklem çözücüsü ile çözülebilecek şekilde düzenleyeceğiz. Pompanın akışkana verdiği faydalı yük aşağıdaki denklemden bulunur:

$$W_{\text{elektrik}} = \frac{\rho V g h_{\text{pompa},f}}{\eta_{\text{pompa-motor}}} \rightarrow 8000 \text{ W} = \frac{(998 \text{ kg/m}^3) V (9.81 \text{ m/s}^2) h_{\text{pompa},f}}{0.70} \quad (1)$$

A ve B noktalarını depoların serbest yüzeylerinde seçelim. Her iki noktadaki akışkanın atmosfere açık (ve dolayısıyla $P_A = P_B = P_{\text{atm}}$) ve her iki noktadaki akışkan hızının sıfır olduğu ($V_A = V_B = 0$) dikkate alındığında bu iki nokta arasındaki kontrol hacmi için enerji denklemi:

$$\frac{P_A}{\rho g} + \alpha_A \frac{V_A^2}{2g} + z_A + h_{\text{pompa},f} = \frac{P_B}{\rho g} + \alpha_B \frac{V_B^2}{2g} + z_B + h_K$$

$$h_{\text{pompa},f} = (z_B - z_A) + h_K$$

veya

$$h_{\text{pompa},f} = (13 - 5) + h_K \quad (2)$$

haline indirgenir. Burada:

$$h_K = h_{K,1} = h_{K,2} \quad (3)(4)$$

haline indirgenir. Burada

$$h_K = h_{K,1} = h_{K,2} \quad (3) (4)$$

alınmıştır. 4 cm çaplı boruyu 1 ile ve 8 cm çaplı boruyu 2 ile gösterelim. Ortalama hız, Reynolds sayısı, sürtünme faktörü ve her bir borudaki yük kaybı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_{c,1}} = \frac{\dot{V}_1}{\pi D_1^2/4} \rightarrow V_1 = \frac{\dot{V}_1}{\pi(0.04 \text{ m})^2/4} \quad (5)$$

$$V_2 = \frac{\dot{V}_2}{A_{c,2}} = \frac{\dot{V}_2}{\pi D_2^2/4} \rightarrow V_2 = \frac{\dot{V}_2}{\pi(0.08 \text{ m})^2/4} \quad (6)$$

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho V_1 D_1}{\mu} \rightarrow \text{Re}_1 = \frac{(998 \text{ kg/m}^3) V_1 (0.04 \text{ m})}{1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} \quad (7)$$

$$\text{Re}_2 = \frac{\rho V_2 D_2}{\mu} \rightarrow \text{Re}_2 = \frac{(998 \text{ kg/m}^3) V_2 (0.08 \text{ m})}{1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D_1}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}_1 \sqrt{f_1}} \right)$$

$$\rightarrow \frac{1}{\sqrt{f_1}} = -2.0 \log \left(\frac{0.000045}{3.7 \times 0.04} + \frac{2.51}{\text{Re}_1 \sqrt{f_1}} \right) \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_2}} = -2.0 \log \left(\frac{e/D_2}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}_2 \sqrt{f_2}} \right)$$

$$\rightarrow \frac{1}{\sqrt{f_2}} = -2.0 \log \left(\frac{0.000045}{3.7 \times 0.08} + \frac{2.51}{\text{Re}_2 \sqrt{f_2}} \right) \quad (10)$$

$$h_{K,1} = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} \rightarrow h_{K,1} = f_1 \frac{36 \text{ m}}{0.04 \text{ m}} \frac{V_1^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} \quad (11)$$

$$h_{K,2} = f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} \rightarrow h_{K,2} = f_2 \frac{36 \text{ m}}{0.08 \text{ m}} \frac{V_2^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} \quad (12)$$

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (13)$$

Burada 13 denklem ve 13 bilinmeyen vardır ve denklem çözücü ile birlikte çözdürüldüklerinde aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$\dot{V} = 0.0300 \text{ m}^3/\text{s}, \dot{V}_1 = 0.00415 \text{ m}^3/\text{s}, \dot{V}_2 = 0.0259 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$V_1 = 3.30 \text{ m/s}, V_2 = 5.15 \text{ m/s}, h_K = h_{K,1} = h_{K,2} = 11.1 \text{ m}, h_{\text{pompa}} = 19.1 \text{ m}$$

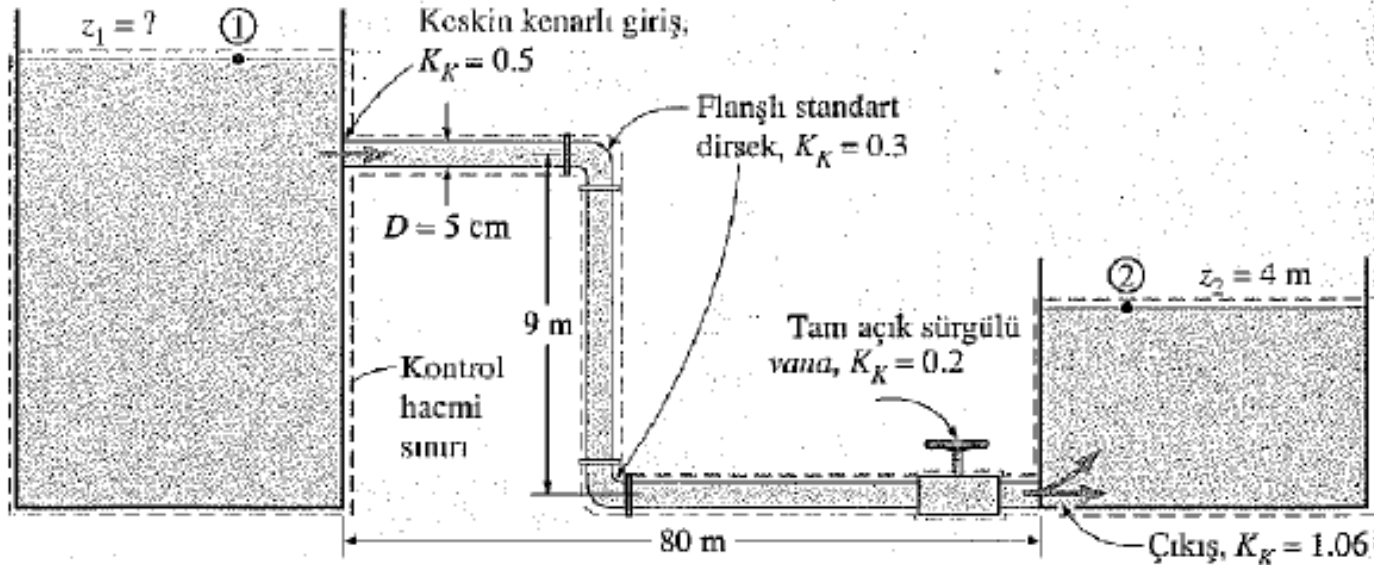
$$Re_1 = 131600, Re_2 = 410000, f_1 = 0.0221, f_2 = 0.0182$$

Her iki boru için de $Re > 4000$ 'dir ve dolayısıyla türbülanslı akış kabulü doğrulanmıştır.

İrdeleme Paralel borular birbirinin aynısıdır; sadece birinci borunun çapı ikinci borunun çapının yarısıdır. Buna karşın suyun sadece yüzde 14'ü birinci borudan akmaktadır. Bu ise debinin (ve yük kaybının) büyük ölçüde çapa bağımlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca depoların serbest yüzeyleri aynı yükseklikte olsaydı (yani $z_a = z_b$), debi 0.0300'dan 0.0361 m^3/s 'ye yüzde oranında 20 artardı. Diğer bir durum olarak, eğer depolar verildiği gibi olsaydı, fakat tersinmez yük kayıpları ihmal edilseydi, debi 0.0715 m^3/s olurdu (yüzde 138'lik bir artış).

ÖRNEK 8-8 Yer Çekimi ile Borudan Su Akışı

10°C'deki su, dökme demirden yapılmış 5 cm çaplı borulama sistemi ile büyük bir depodan daha küçük bir depoya akmaktadır (Şekil 8-48). Debinin 6 L/s olması için gerekli olan z_1 yüksekliğini bulunuz.



Özellikler 10°C'deki suyun yoğunluğu ve dinamik viskozitesi sırasıyla $\rho = 999.7$ kg/m³ ve $\mu = 1.307 \times 10^{-3}$ kg/m · s'dir. Dökme demir borunun pürüzlülüğü $\epsilon = 0.00026$ m'dir.

Analiz: Borulama sisteminde 89 m boru, keskin kenarlı giriş ($K_K = 0.5$), iki tane standart flanşlı dirsek (her birisinde $K_K = 0.3$), bir tane tam açık sürgülü vana ($K_K = 0.2$) ve bir tane de depo çıkışı ($K_K = 1.06$) vardır. 1 ve 2 noktalarını depoların serbest yüzeylerinde seçelim. Her iki noktadaki akışkanın atmosfere açık (ve dolayısıyla $P_1 = P_2 = P_{atm}$) ve her iki noktada da akışkan hızlarının sıfır olduğu ($V_1 = V_2 = 0$) dikkate alındığında, bu iki nokta arasındaki kontrol hacmi için enerji denklemi, borulama sisteminin çapı sabit olduğundan:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_K \rightarrow z_1 = z_2 + h_K$$

elde edilir. Burada

$$h_K = h_{K, \text{toplam}} = h_{K, \text{sürekli}} + h_{K, \text{yerel}} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_K \right) \frac{V^2}{2g}$$

Borudaki ortalama hız ve Reynolds sayısı ise,

$$V = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{\dot{V}_1}{\pi D^2/4} = \frac{0.006 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.05 \text{ m})^2/4} = 3.06 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(999.7 \text{ kg/m}^3)(3.06 \text{ m/s})(0.05 \text{ m})}{1.307 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 117000$$

olacaktır. $Re > 4000$ olduğundan akış türbülanslıdır. $\epsilon/D = 0.00026/0.05 = 0.0052$ olduğunu dikkate alarak sürtünme faktörü Colebrook denkleminden (veya Moody diyagramı) elde edilebilir:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{0.0052}{3.7} + \frac{2.51}{117000 \sqrt{f}} \right)$$

Bunun sonucunda $f = 0.0315$ elde edilir. Öte yandan kayıp katsayılarının toplamı ise

$$\begin{aligned} \sum K_K &= K_{K,\text{giris}} + 2K_{K,\text{dirsek}} + K_{K,\text{vana}} + K_{K,\text{çıkis}} \\ &= 0.5 + 2 \times 0.3 + 0.2 + 1.06 = 2.36 \end{aligned}$$

olarak hesaplanır. Toplam yük kaybı ve kaynak deponun yüksekliği,

$$h_K = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_K \right) \frac{V^2}{2g} = \left(0.0315 \frac{89 \text{ m}}{0.05 \text{ m}} + 2.36 \right) \frac{(3.06 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 27.9 \text{ m}$$

$$z_1 = z_2 + h_K = 4 + 27.9 = 31.9 \text{ m}$$

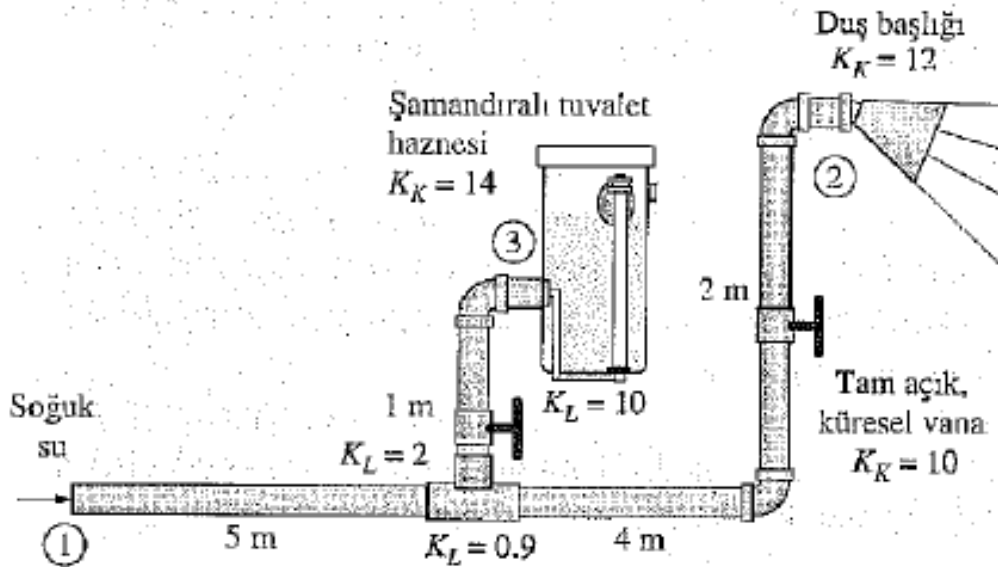
olarak elde edilir. Dolayısıyla iki depo arasında belirtilen debide su akışını sağlamak için birinci deponun serbest yüzeyi zemin seviyesinden 31.9 m yüksekte olmalıdır.

İrdeleme Verilen durumda $fL/D = 56.1$ 'dir ve bu değer toplam yerel kayıp katsayısının 24 katı civarındadır. Dolayısıyla söz konusu durumda yerel kayıp kaynaklarını göz ardı etmek yüzde 4 civarında hataya yol açacaktır.

Eğer vana 3/4 oranında kapalı olsaydı bu durumda toplam yük kaybının (27.9 m yerine) 35.9m olacağı ve eğer iki depo arasındaki boru zemin seviyesinde ve düz olsaydı (dolayısıyla dirsekler ve borunun düşey kısmı atılmış olsaydı) toplam yük kaybının 24.8 m'ye düşeceği gösterilebilir. Girişin yuvarlatılması ile yük kaybı daha da aşağı çekilebilir (24.8'den 24.6 m'ye). Dökme demir boruyu plastik gibi pürüzsüz borularla değiştirerek yük kaybı önemli ölçüde azaltılabilir (27.9'dan 16.0 m'ye).

ÖRNEK 8-9 Sifonu Çekmenin Duştaki Su Debisine Etkisi

Bir binanın banyo tesisatı şekilde görüldüğü gibi dişli bağlantı elemanları olan 1.5 cm çaplı bakır borulardan oluşmaktadır. (a) Duş sırasında sistemin girişindeki etkin basınç 200 kPa ve tuvaletin rezervuarı dolu olduğuna göre (bu kolda akış yok), duş başlığındaki su debisini hesaplayınız. (b) Tuvalet sifonunun çekilmesi halinde bunun duş başlığındaki debiye etkisini hesaplayınız. Duş başlığının ve rezervuarın kayıp katsayılarını sırasıyla 12 ve 14 alınız.



Özellikler 20°C'deki suyun özellikleri $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ ve $\nu = \mu/\rho = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Bakır boruların pürüzlülüğü $\varepsilon = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ 'dir.

Analiz: Belirtilen bir boru çapı ve basınç düşüşü için debi hesaplanacağından ikinci tip bir problem ile karşı karşıyayız. Debi (ve dolayısıyla akış hızı) bilinmediğinden iteratif yaklaşım gerekmektedir.

(a) Düşün borulama sistemi tek basına 11 m boru, düz akışlı T ($K_K = 0.9$), iki tane standart dirsek (her biri için $K_K = 0.9$), bir tane tam açık küresel vana ($K_K = 10$) ve bir tane düş başlığı ($K_K = 12$) içermektedir. Buna göre, $\Sigma K_K = 0.9 + 2 \times 0.9 + 10 + 12 = 24.7$. Düş başlığının atmosfere açık ve hız yüklerinin ihmal edilebilir olduğu dikkate alındığında, 1 ve 2 noktaları arasındaki kontrol hacmi için enerji denklemi, borulama sisteminin çapı sabit olduğundan,

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pompa},f} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{türbin},f} + h_K$$

$$\rightarrow \frac{P_{1,\text{elkin}}}{\rho g} = (z_2 - z_1) + h_K$$

haline indirgenir. Böylece yük kaybı

$$h_K = \frac{200000 \text{ N/m}^2}{(998 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)} - 2 \text{ m} = 18.4 \text{ m}$$

olarak elde edilir. Ayrıca,

$$h_K = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_K \right) \frac{V^2}{2g} \rightarrow 18.4 = \left(f \frac{11 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} + 24.7 \right) \frac{V^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$

yazılabilir. Öte yandan borudaki ortalama hız, Reynolds sayısı ve sürtünme faktörü,

$$V = \frac{\dot{V}}{A_e} = \frac{\dot{V}}{\pi D^2/4} \rightarrow V = \frac{\dot{V}}{\pi(0.015 \text{ m})^2/4}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \rightarrow \text{Re} = \frac{V(0.015 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}}\right)$$

$$\rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log\left(\frac{1.5 \times 10^{-6} \text{ m}}{3.7(0.015 \text{ m})} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}}\right)$$

olarak ifade edilebilir. Buna göre 4 denklem ve 4 bilinmeyen vardır. EES gibi bir denklem çözücüsü ile bu denklem sistemi çözüldüğünde aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$\dot{V} = 0.00053 \text{ m}^3/\text{s}, \quad f = 0.0218, \quad V = 2.98 \text{ m/s}, \quad \text{ve} \quad \text{Re} = 44550$$

Dolayısıyla düş başlığındaki su debisi 0.53 L/s'dir.

(b) Sifon çekildiğinde şamandıra hareket eder ve vanayı açar. Boşalan su rezervuarın tekrar dolmaya başlamasına yol açar ve sonuçta T bağlantıdan sonra paralel akış meydana gelir. Düş kolu için yük kaybı ve yerel kayıp katsayıları (a)'da sırasıyla $h_{K2} = 18.4 \text{ m}$ ve $\Sigma K_{K2} = 24.7$ olarak hesaplanmıştı. Rezervuar kolu için yük kaybı da benzer şekilde,

$$h_{K3} = \frac{200,000 \text{ N/m}^2}{(998 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)} - 1 \text{ m} = 19.4 \text{ m}$$

$$\Sigma K_{K3} = 2 + 10 + 0.9 + 14 = 26.9$$

olarak hesaplanır. Bu durumda ilgili denklemler şöyledir:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 + \dot{V}_3$$

$$h_{K,2} = f_1 \frac{5 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} \frac{V_1^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} + \left(f_2 \frac{6 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} + 24.7 \right) \frac{V_2^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 18.4$$

$$h_{K,3} = f_1 \frac{5 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} \frac{V_1^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} + \left(f_3 \frac{1 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} + 26.9 \right) \frac{V_3^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 19.4$$

$$V_1 = \frac{V_1}{\pi(0.015 \text{ m})^2/4}, \quad V_2 = \frac{V_2}{\pi(0.015 \text{ m})^2/4}, \quad V_3 = \frac{V_3}{\pi(0.015 \text{ m})^2/4}$$

$$\text{Re}_1 = \frac{V_1(0.015 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}, \quad \text{Re}_2 = \frac{V_2(0.015 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}, \quad \text{Re}_3 = \frac{V_3(0.015 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = -2.0 \log \left(\frac{1.5 \times 10^{-6} \text{ m}}{3.7(0.015 \text{ m})} + \frac{2.51}{\text{Re}_1 \sqrt{f_1}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_2}} = -2.0 \log \left(\frac{1.5 \times 10^{-6} \text{ m}}{3.7(0.015 \text{ m})} + \frac{2.51}{\text{Re}_2 \sqrt{f_2}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_3}} = -2.0 \log \left(\frac{1.5 \times 10^{-6} \text{ m}}{3.7(0.015 \text{ m})} + \frac{2.51}{\text{Re}_3 \sqrt{f_3}} \right)$$

Bu 12 bilinmeyenli 12 denklemleri bir denklem çözücüsü ile çözdüğümüzde, debiler aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{V}_1 = 0.00090 \text{ m}^3/\text{s}, \quad \dot{V}_2 = 0.00042 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{ve} \quad \dot{V}_3 = 0.00048 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dolayısıyla sifonun çekilmesi duşa giden soğuk suyun debisini 0.53'ten 0.42 L/s'ye yani yüzde 21 oranında azaltır (Şekil 8-50).

Eğer hız yükleri hesaba katılmış olsaydı, duşa giden debi 0.42 L/s yerine 0.43 L/s olurdu. Bu ise suyun aniden çok ısınmasına yol açar. Bu nedenle burada yapılan hız yüklerinin ihmal edilebilirliği kabulü mantıklıdır.

Borulama sistemindeki bir kaçak da aynı etkiye yol açacaktır ve dolayısıyla son noktalarda debide açıklanamayan bir düşüş olması sistemdeki kaçağın işareti olabilir.



Duşa giden bir soğuk suyun debisi yanındaki tuvaletin sifonunun çekilmesinden önemli miktarda etkilenebilir.

8-8 ■ DEBİ VE HIZ ÖLÇÜMÜ

Akışkanlar mekaniğinin ana uygulama alanlarından biri de akışkanların debilerin belirlenmesidir ve akış ölçmek amacı ile yıllar boyunca sayısız cihaz geliştirilmiştir.

Akış ölçerler karmaşıklık, büyüklük, fiyat, doğruluk, çok yönlülük, kapasite, basınç düşüşü ve çalışma ilkeleri seviyelerine göre geniş bir aralıkta farklılık gösterir.

Borulardan veya kanallardan akan sıvı veya gazların debilerini ölçmek için yaygın olarak kullanılan ölçüm cihazları hakkında buradan genel bir tanıtım yapacağız. Ancak dikkatimizi sadece sıkıştırılmaz akış üzerinde yoğunlaştıracacağız.

$$\dot{V} = VA_c$$

Debinin ölçülmesi çoğunlukla akış hızı ölçülerek yapılır ve çoğu akış ölçerler bu amaç için kullanılan basit hız ölçerlerdir.

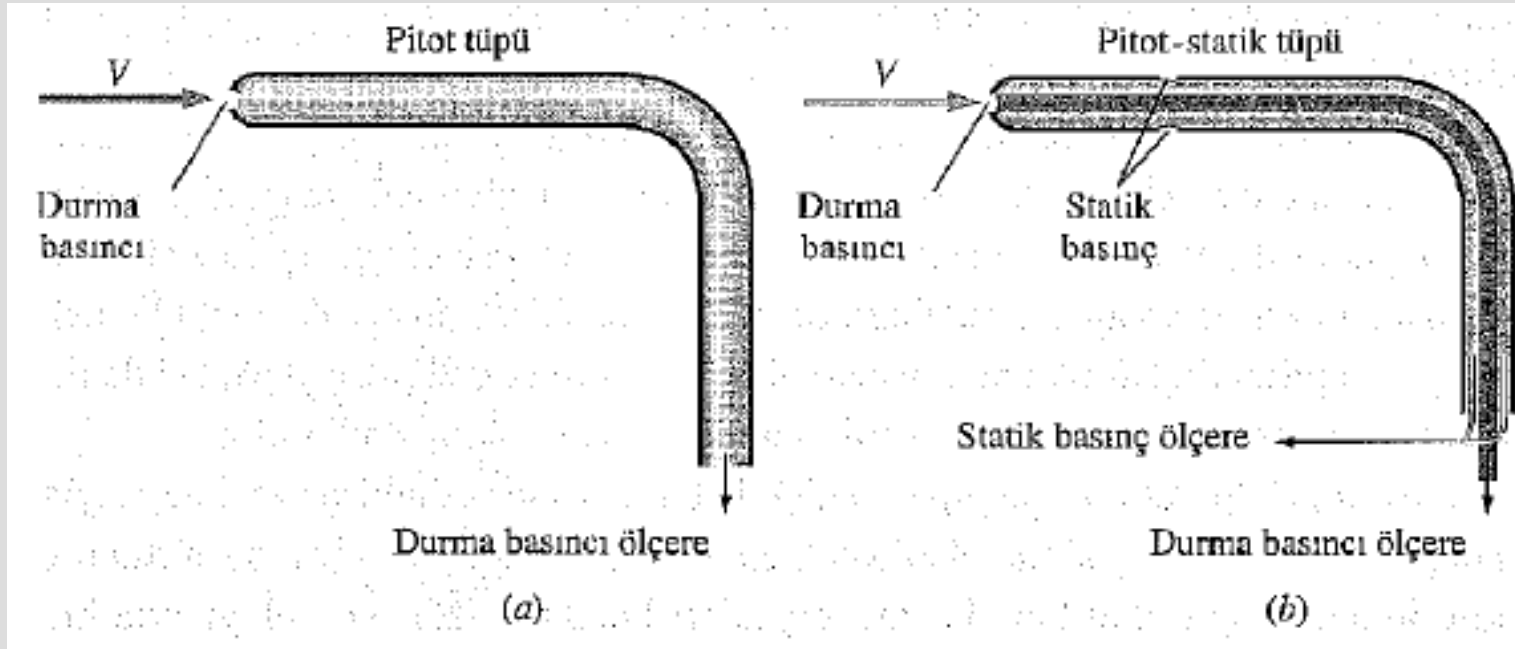
Bahçe hortumundan akan suyun debisini hesaplamak için ilkel (fakat bir hayli doğru) bir yol, suyu kovaya doldurmak ve dolun zamanını kaydetmektir.



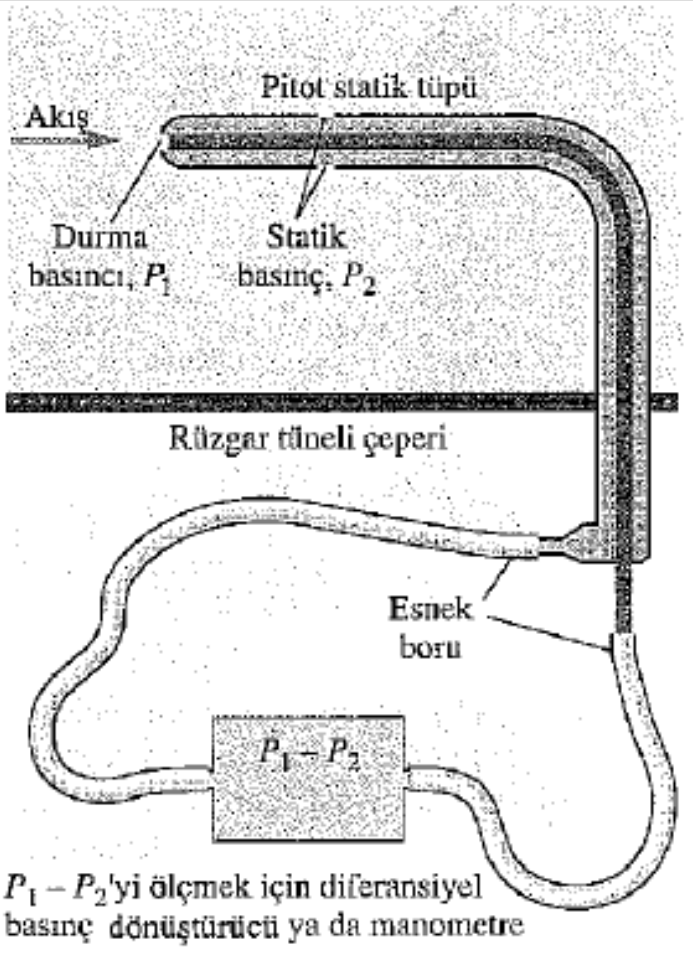
Pitot ve Pitot-Statik Tüpleri

Pitot tüpleri ve Pitot-statik tüpler debi ölçümleri için yaygın olarak kullanılır.

Pitot tüpü, durma noktasında basınç deliği olan ve durma basıncını ölçen bir tüpten ibarettir. Pitot-statik tüpte ise hem durma basıncı deliği hem de birçok çevresel statik basınç delikleri vardır ve hem statik hem de durma basınçlarını ölçer.



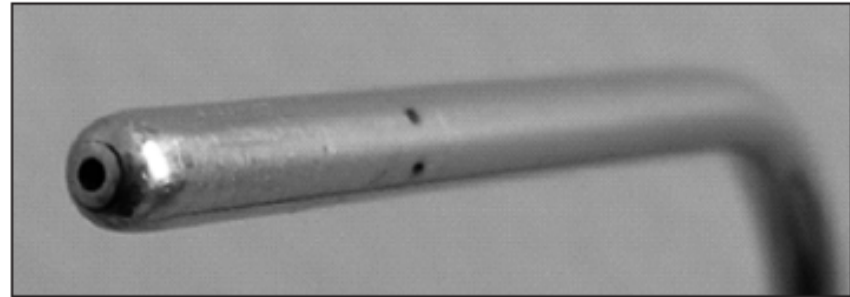
(a) Pitot tüpü, tüpün burnundaki durma basıncını ölçer, (b) Pitot-statik tüpü ise hem durma basıncını hem de statik basıncı ölçer ve bu değerlerden akış hızı hesaplanabilir.



$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Pitot formula:

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

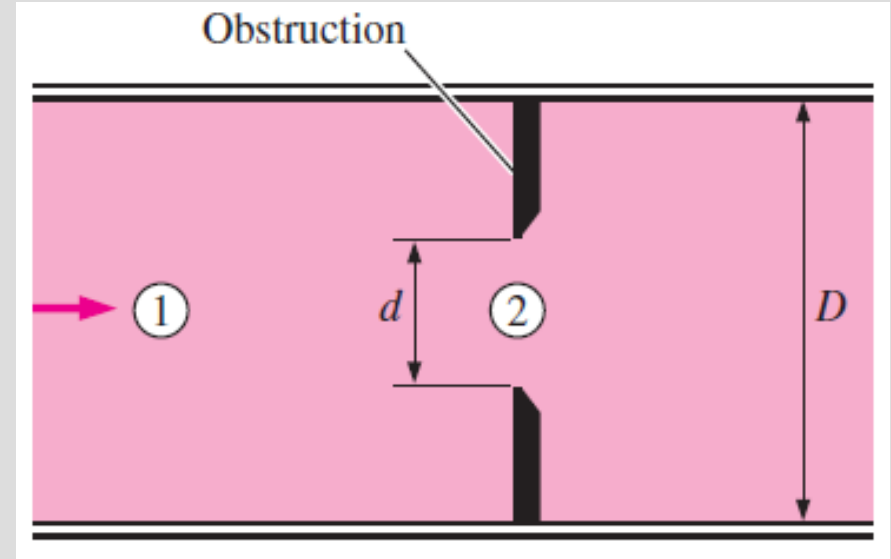


Pitot-statik tüpü ile akışkan hızının ölçülmesi (Diferansiyel basınç dönüştürücü yerine manometre de kullanılabilir).

Pitot-statik tüpünün yalandan çekilmiş fotoğrafı
Durma basıncı deliği ve 5 adet çevresel basınç deliklerinden iki tanesi görülmektedir.

Engelli Akış Ölçerler: Orifis, Venturimetre ve Akış Lülesi

Basit bir debi ölçüm cihazı, akışı engellemek suretiyle yapılabilir. Bu ilkeye dayanan akış ölçerlere **engelli akış ölçerler** denir. Bu cihazlar gaz ve sıvıların debilerini ölçmede yaygın olarak kullanılır.



Borudaki bir engelin içerisinde geçen akış.

Mass balance: $\dot{V} = A_1 V_1 = A_2 V_2 \rightarrow V_1 = (A_2/A_1) V_2 = (d/D)^2 V_2$

Bernoulli equation ($z_1 = z_2$): $\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}$

Engel (kayıpsız): $V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad \beta = d/D$

$\dot{V} = A_2 V_2 = (\pi d^2/4) V_2$

Debi katsayısı C_d denilen bir **düzeltilme faktörü** göz önüne alınarak her iki kayıp hesaba katılabilir. Düzeltme faktörünün değeri (1 'den küçük) deneysel olarak bulunur.

$$\text{Engelli akış ölçerler:} \quad V = A_0 C_d \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}}$$

$$A_0 = A_2 = \pi d^2/4 \quad \beta = d/D$$

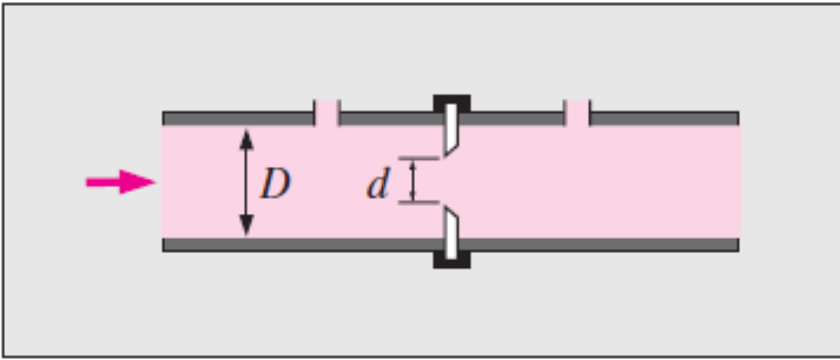
C_d değeri hem β hem de Reynolds sayısına bağlı olup, farklı tipteki engelli ölçerlere ait C_d 'ler için diyagramlar ve eğri uydurma bağıntıları mevcuttur.

$$\text{Orifisler:} \quad C_d = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{91.71\beta^{2.5}}{Re^{0.75}}$$

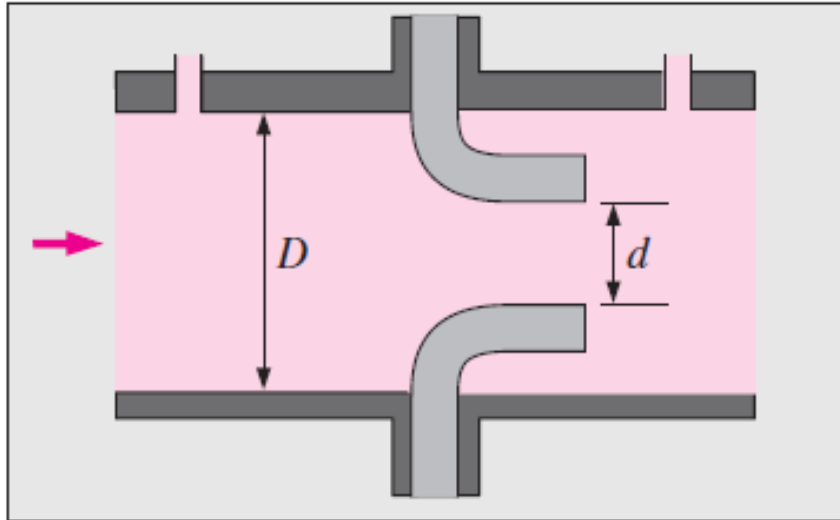
$$\text{Akış lüleri:} \quad C_d = 0.9975 - \frac{6.53\beta^{0.5}}{Re^{0.5}}$$

$$0.25 < \beta < 0.75 \text{ and } 10^4 < Re < 10^7$$

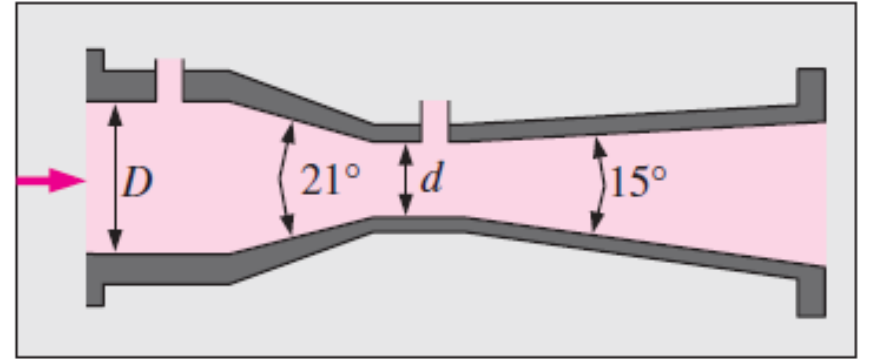
Yüksek Reynolds sayılı ($Re > 30000$) akışlar için C_d 'nin değeri, akış lülelerinde 0.96 ve orifislerde 0.61 alınabilir.



(a) Orifis

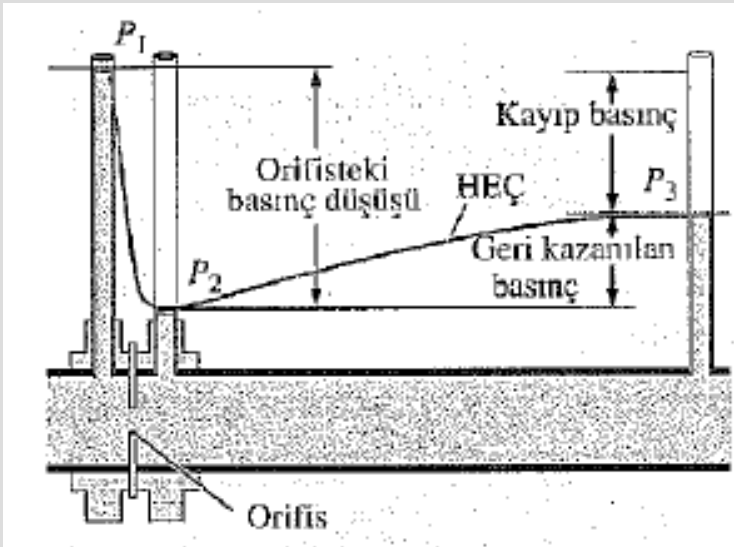
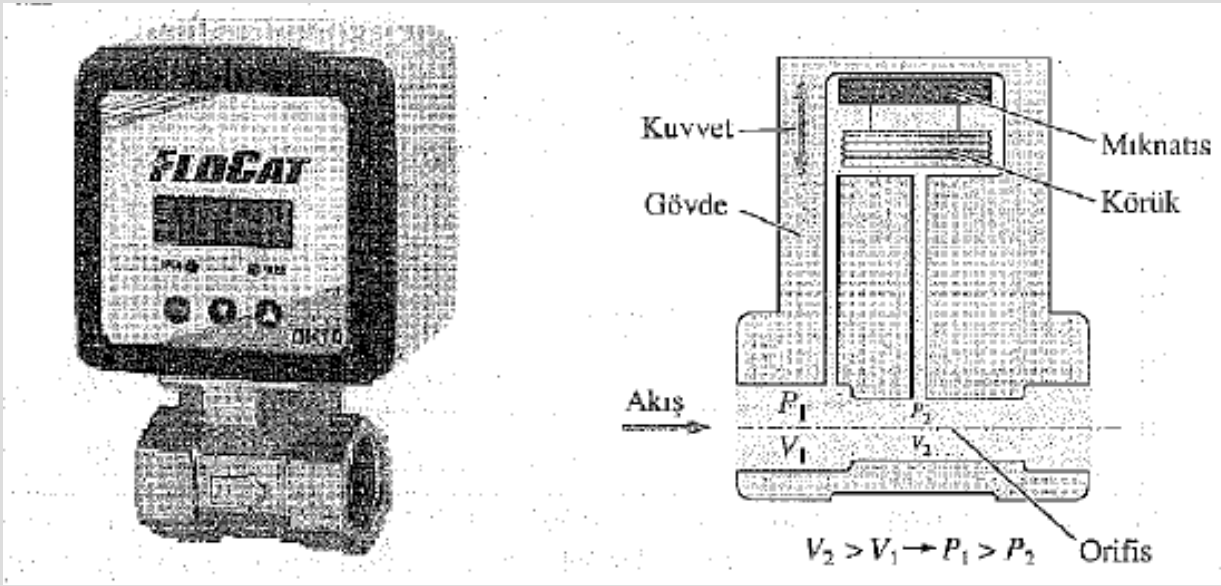


(b) Akış lülesi



(c) Venturimetre

Yaygın kullanılan engelli akış ölçer tipleri.

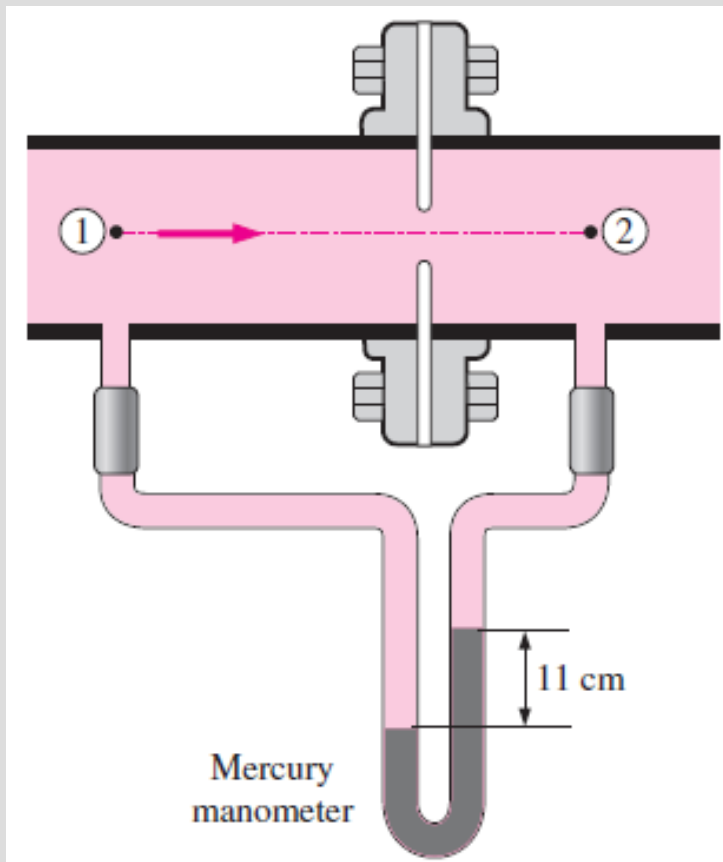


Ofisi tipi bir akış ölçer ile üzerindeki basınç dönüştürücü'nün ve dijital göstergenin şematik çizimi.

Orifis yerleştirilen bir akış bölümü boyunca piyezometre tüpleriyle ölçülen basınç değişimi; kayıp basınç ve basınç toparlanması gösterilmektedir.

ÖRNEK 8-10 Orifis ile Debi Ölçümü

4 cm çaplı borudan akan 20°C'deki metanolün ($\rho = 788.4 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 5.857 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$) debisi, bir civalı manometre ile donatılmış 3 cm çaplı orifis ile ölçülecektir (Şekil 8-60). Manometre üzerindeki diferansiyel yükseklik farkı 11 cm olarak okunduğuna göre, borudan akan metanolün debisini ve ortalama hızını bulunuz.



ÇÖZÜM Orifis ile metanolün debisi ölçülecektir. Orifis boyunca verilen basınç düşüşü için debi ve ortalama hız bulunacaktır.

Kabuller 1 Akış daimi ve sıkıştırılmazdır. 2 Orifisin debi katsayısı $C_d = 0.61$ 'dir.

Özellikler Metanolün yoğunluğu ve dinamik viskozitesi sırasıyla $\rho = 778.4 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 5.857 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 'dir cıvanın yoğunluğunu $\rho = 13600 \text{ kg/m}^3$ olarak alalım.

Analiz Orifisin çap oranını ve boğaz alanını bulalım.

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{3}{4} = 0.75$$

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(0.03 \text{ m})^2}{4} = 7.069 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Orifis plaka boyunca basınç düşüşü,

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{met}})gh$$

olarak ifade edilebilir. Buradan engelli ölçerler için debi bağıntısı,

$$\dot{V} = A_0 C_d \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} = A_0 C_d \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{met}})gh}{\rho_{\text{met}}(1 - \beta^4)}} = A_0 C_d \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{Hg}}/\rho_{\text{met}} - 1)gh}{1 - \beta^4}}$$

elde edilir. Buna göre debi,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (7.069 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(0.61) \sqrt{\frac{2(13600/778.4 - 1)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.11 \text{ m})}{1 - 0.75^4}} \\ &= 3.09 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

olarak bulunur. Bu değer 3.09 L/s'ye denktir. Borudaki ortalama akış hızı, debinin, borunun en-kesit alanına bölünmesi ile bulunur:

$$V = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{\dot{V}}{\pi D^2/4} = \frac{3.09 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.04 \text{ m})^2/4} = 2.46 \text{ m/s}$$

İrdeme Borudaki akışın Reynolds sayısı,

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(788.4 \text{ kg/m}^3)(2.46 \text{ m/s})(0.04 \text{ m})}{5.857 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 1.32 \times 10^5$$

olarak hesaplanır. $\beta = 0.75$ ve $\text{Re} = 1.32 \times 10^5$ değerleri orifise ait debi katsayısı bağıntısında yerine yazılırsa,

$$C_d = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{91.71\beta^{2.5}}{\text{Re}^{0.75}}$$

$C_d = 0.601$ elde edilir. Bu değer kabul edilen 0.61 değerine çok yakındır. C_d 'nin bu değeri kullanılırsa; debi 3.04 L/s olarak elde edilir. Bu değer asıl sonucumuzdan sadece yüzde 1.6 farklıdır. Bu nedenle debi katsayısı için tavsiye edilen $C_d = 0.61$ değerini kullanarak orifisi analiz etmek ve sonrasında kabul edilen değeri doğrulamak uygun olacaktır. Eğer problem EES gibi bir denklem çözücüsü kullanılarak çözülmek istenirse, bu durumda problem Reynolds sayısına bağlı olan C_d için eğri üydürme denklemi ile formüle edilebilir ve denklem çözücüsüne yeteri kadar iterasyon yaptırılarak bütün denklemler birlikte çözülebilir.

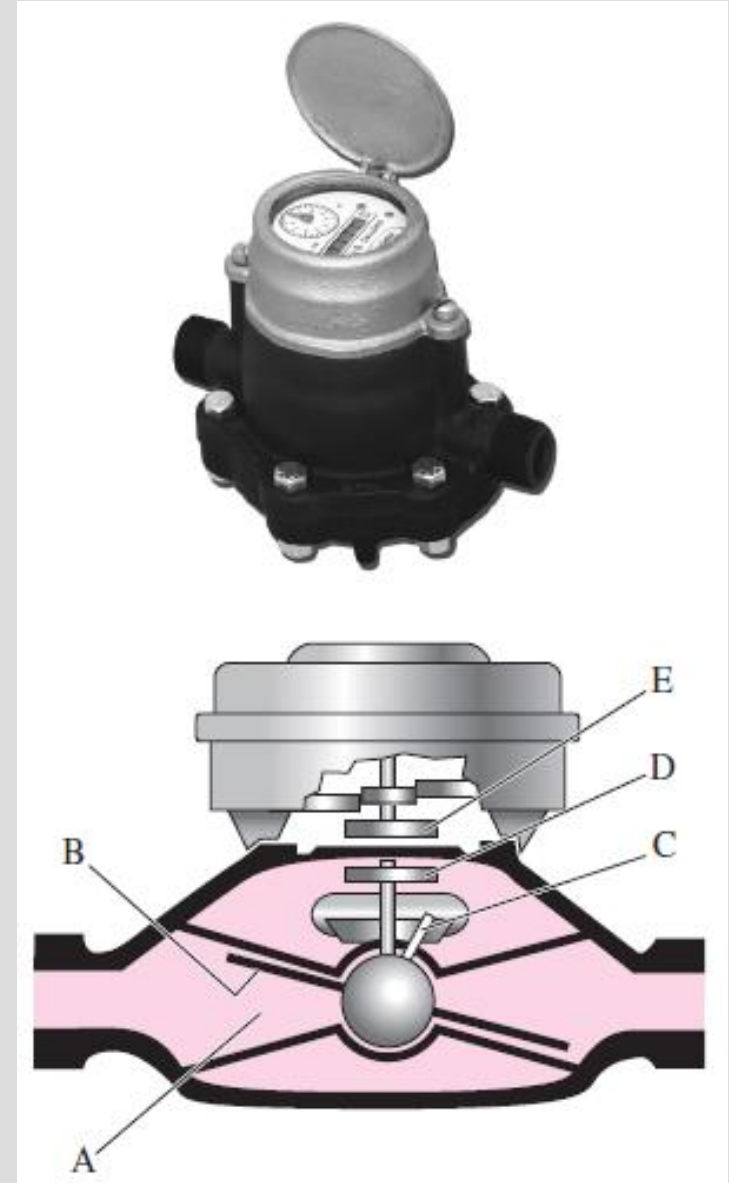
Hacimsel Akış Ölçerler

Belirli bir sürede borunun en-kesitinden geçen toplam akışkan kütlesi veya hacmi **hacimsel akış ölçerler** ile ölçülür.

Hacimsel ölçerlerin çok farklı tipleri vardır ve çalışmaları ölçüm odacığının devamlı dolması ve boşaltılması esasına dayanır. Bu cihazlar giren akışkanın belirli bir miktarını hapsedip ölçerin çıkış tarafına doğru göndererek ve yeri değiştirilen akışkanın toplam miktarını belirlemek için dolma-boşalma çevrimlerini sayarak çalışırlar.



Çift helisel üç-
loplu çark olarak
tasarlanmış
hacimsel bir akış
ölçer.



Yalpa diskli akış ölçer.

Türbinli Akış Ölçerler



(a)



(b)



(c)

(a) Soldan sağa doğru akan bir sıvı ölçmek için kullanılan hat üzeri (in-line) türbinli akış ölçer.

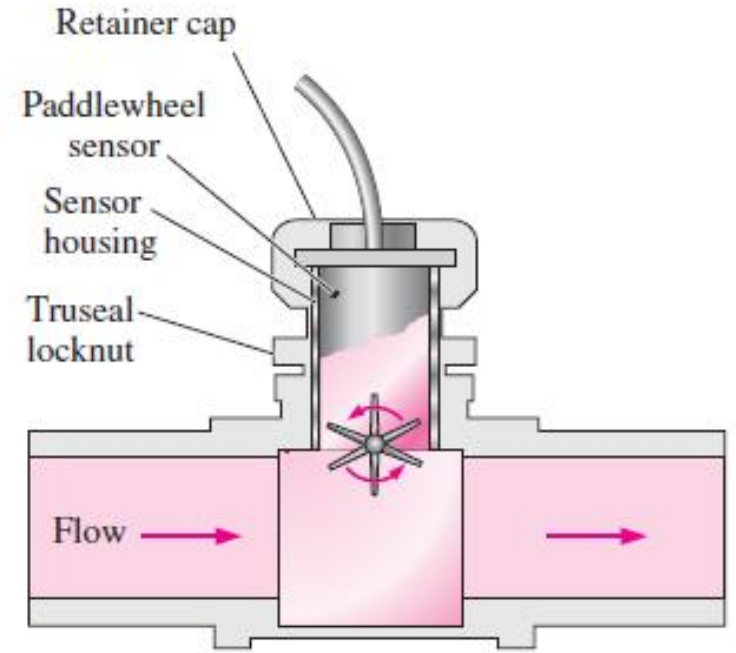
(b) Türbin kanatları ile birlikte akış ölçerinin kesit görünüşü ve (c) Rüzgar hızını ölçmek için kullanılan türbinli el akış ölçeri. Akış olmadığından türbin kanatları görülebilmektedir. (c)'deki akış ölçer, kullanıcıya kolaylık olması bakımından aynı zamanda hava sıcaklığını da ölçmektedir.

Çarklı Akış Ölçerler

Çarklı akış ölçerler çok yüksek doğruluğun aranmadığı durumlarda türbinli akış ölçerlerin düşük fiyatlı alternatifidir.

Çarklı akış ölçerlerde çark (rotor ve kanatlar), türbinli akış ölçerlerdeki gibi akışa paralel değil diktir.

Solda sağa doğru akan bir sıvı akışını ölçmek için kullanılan çarklı akış ölçer ve çalışma ilkesini gösteren şematik çizim.



Değişken-Alanlı Akış Ölçerler (Rotametreler)

Değişken alanlı akış ölçerler, diğer adıyla rotametreler veya mantarlı ölçerler; basit, güvenilir, ucuz, kurulumu kolay, basınç kaybı düşük, sıvılar ve gazlar için geniş bir aralıkta debiyi elektrik bağlantıları olmadan doğrudan doğruya veren akış ölçerler olarak bilinir.

Değişken alanlı akış ölçer cam veya plastikten yapılan konik, şeffaf bir tüpten oluşmaktadır. Bunların içerisinde serbestçe yüzebilen bir mantar vardır

Akışkan konik tüpün içinden akarken, tüp içerisindeki mantar belirli bir seviyeye kadar yükselir. Bu seviye, mantar ağırlığına ona etkiyen direnç ve kaldırma kuvvetleri tarafından dengelendiği ve dolayısıyla mantar üzerine etkiyen toplam kuvvetin sıfır olduğu bir seviyedir.

Konik şeffaf tüpün dışındaki taksimatlı akış ölçeğine karşılık gelen mantarın konumuna bakılarak debi kolayca okunur.



Değişken alanlı akış ölçerinin iki türü: (a) Sıradan yerçekimine dayalı akış ölçer ve (b) yayla çalışan akış ölçer.

Ultrasonik Akış Ölçerler

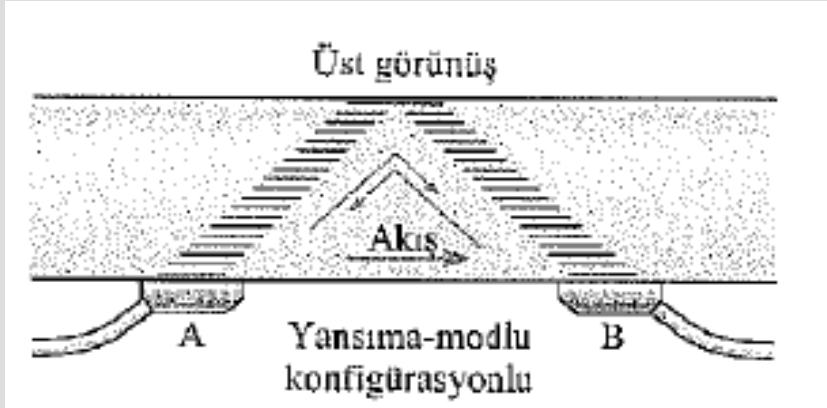
Ultrasonik akış ölçerler, ultrasonik aralıktaki ses dalgalarını kullanarak (genellikle 1 MHz'lik frekansı) çalışır.

Ultrasonik (veya akustik) akış ölçerler, bir dönüştürücü ile ses dalgaları oluşturarak ve akış içerisinde bu dalgaların yayılmasını ölçerek çalışır

Ultrasonik akış ölçerlerin iki temel çeşidi vardır: *Geçiş zamanlı* ve *Doppler etkili (veya frekans kaymalı)* akış ölçerler.

$$V = KL \Delta t$$

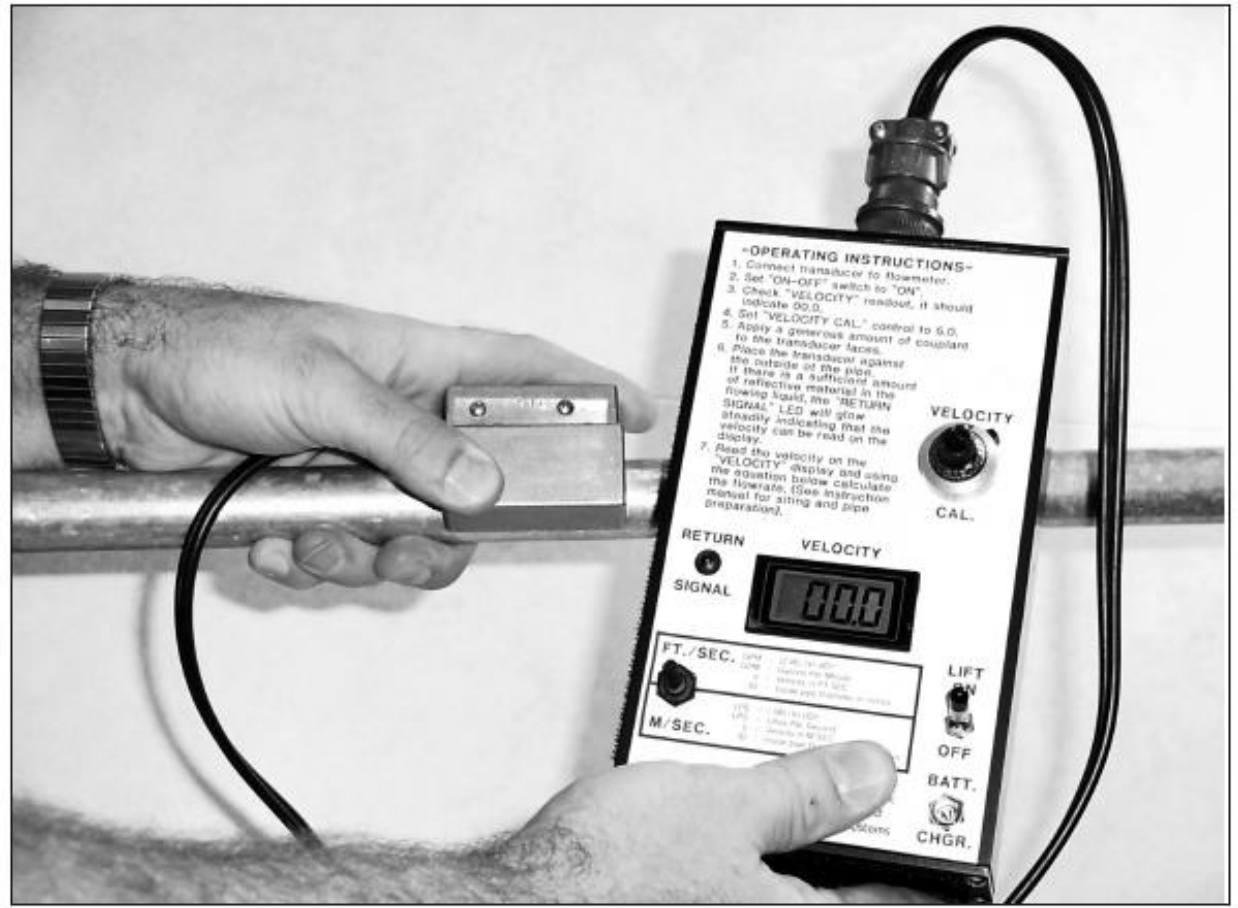
L dönüştürücüler arasındaki uzaklık ve K ise bir sabittir.



İki dönüştürücüsü bulunan geçiş zamanlı ultrasonik akış ölçerinin çalışması.

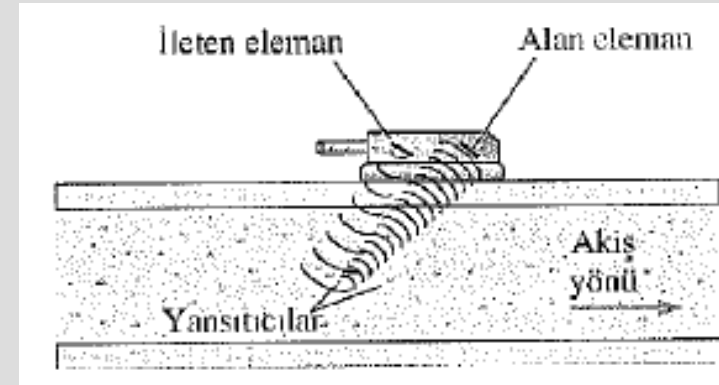
Doppler Etkili Ultrasonik Akış Ölçerler

Doppler etkili
ultrasonik akış
ölçerler ses yolu
boyunca ortalama akış
hızını ölçer.



Ultrasonik akış ölçerler, sadece borunun dış
yüzeyine dönüştürücünün bastırılması ile
akışkana temas etmeksizin akış hızını ölçmeye
imkan verir.

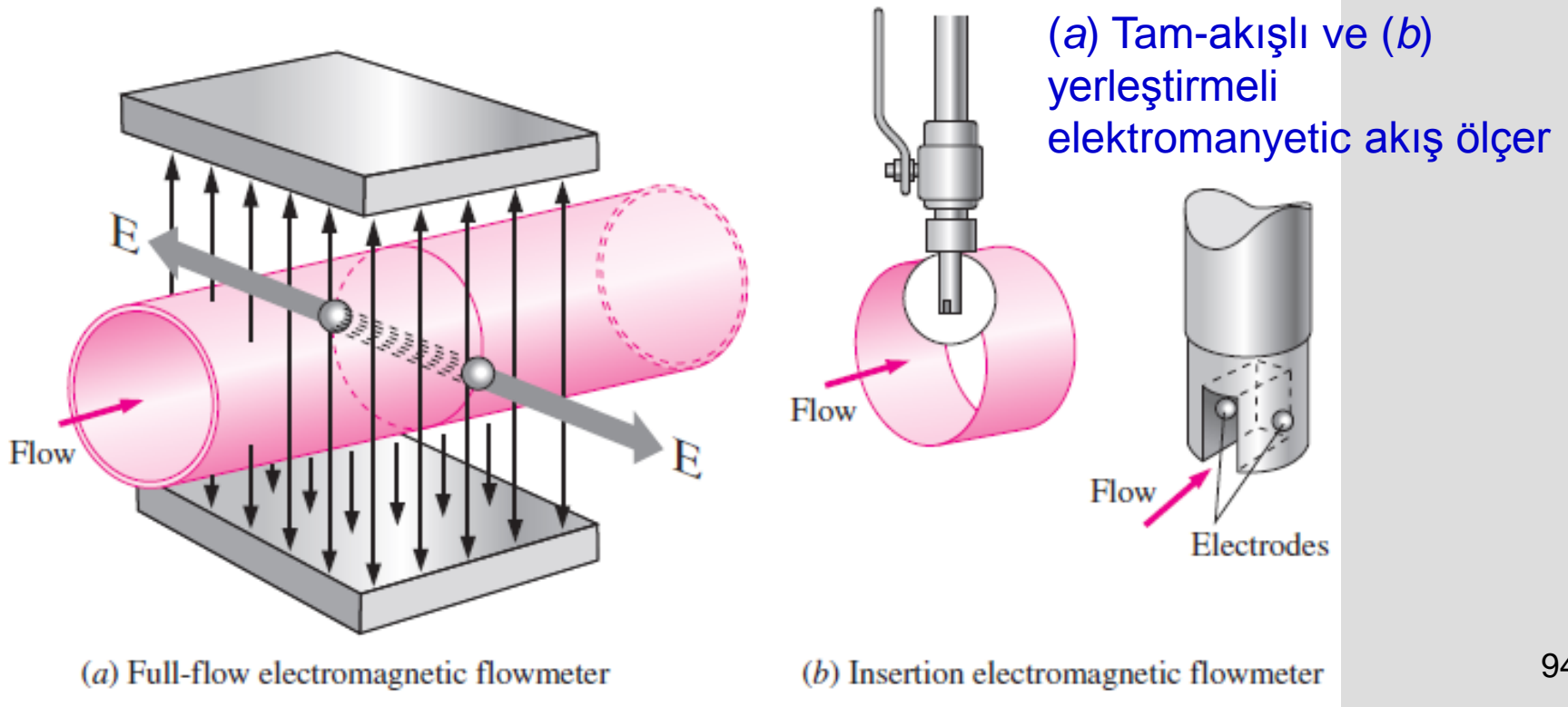
Borunun dış yüzeyine bastırılan dönüştürücü
ile tertibatlandırılmış Doppler etkili ultrasonik
akış ölçerinin çalışması.



Elektromanyetik Akış Ölçerler

Tam akışlı elektromanyetik akış ölçer harici bir cihazdır. Bu cihaz, boruyu çevreleyen manyetik sarımdan ve borunun iç yüzeyi ile aynı hizada çap boyunca boruyu delerek geçirilmiş iki elektrottan oluşur. Bu elektrotlar akışkanla temas halindedir ancak akışa müdahale etmezler ve dolayısıyla hiçbir yük kaybına yol açmazlar

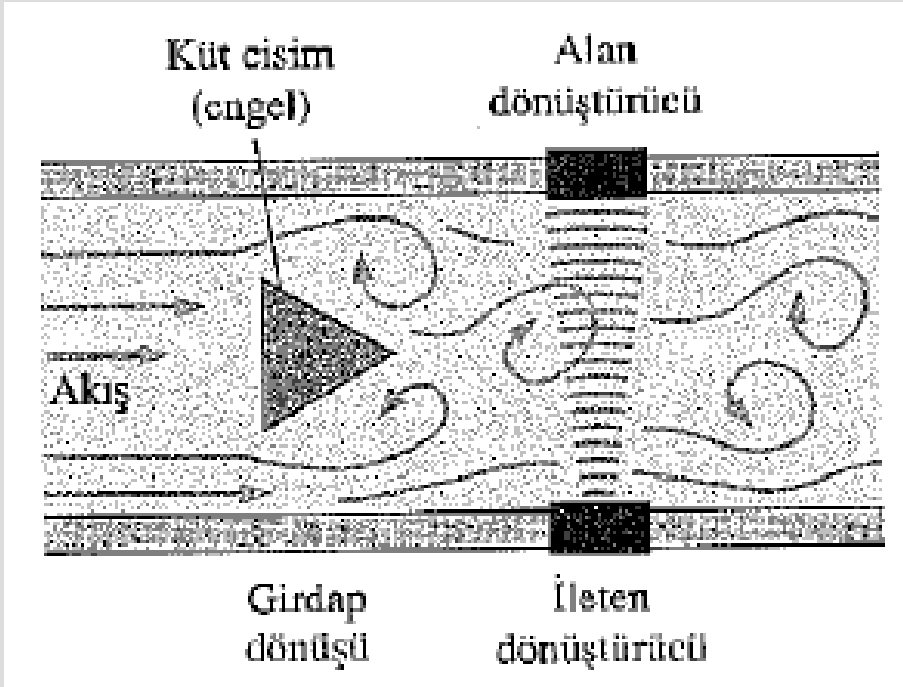
Yerleştirmeli elektromanyetik akış ölçerler de buna benzer şekilde çalışır, ancak manyetik alan, akışa yerleştirilen bir çubuğun ucundaki bir akış kanalı ile sınırlandırılmıştır.



Çevri Oluşturan Akış Ölçer

Akış boyunca bir engelin yerleştirilmesi ile çevri oluşturmak ve dökülme frekansını ölçmek suretiyle debinin ölçülebileceği fikrini verir. Bu ilkeye göre çalışan akış ölçüm cihazlarına **çevri oluşturan akış ölçerler** denir.

Strouhal sayısı $St = fd/V$ olarak tanımlanır. Burada f çevri dökülme frekansı, d engelin karakteristik çapı veya genişliği, V ise engel üzerine çarpan akışın hızıdır ve akış hızı yeteri kadar yüksekse sabit kalır.



Çevri oluşturan akış ölçerin üstünlüğü hareketli parçalarının olmamasıdır ve dolayısıyla doğası gereği güvenilir, çok yönlü ve yüksek doğruluğa sahiptir (çok geniş bir debi aralığında çoğunlukla yüzde ± 1), fakat akışı engeller ve dolayısıyla önemli miktarda yük kaybına neden olur.

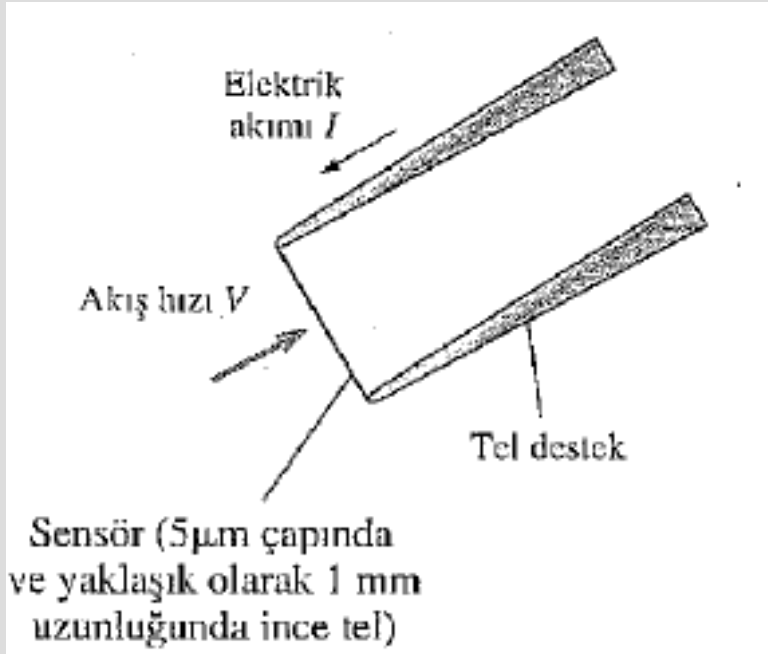
Girdap oluşturan akış ölçerin çalışması.

Termal (Sıcak-Tel ve Sıcak-Film) Anemometreler

Termal anemometreler elektrikle ısıtılan sensöre sahiptir ve akış hızını ölçmek için termal etkiyi kullanır.

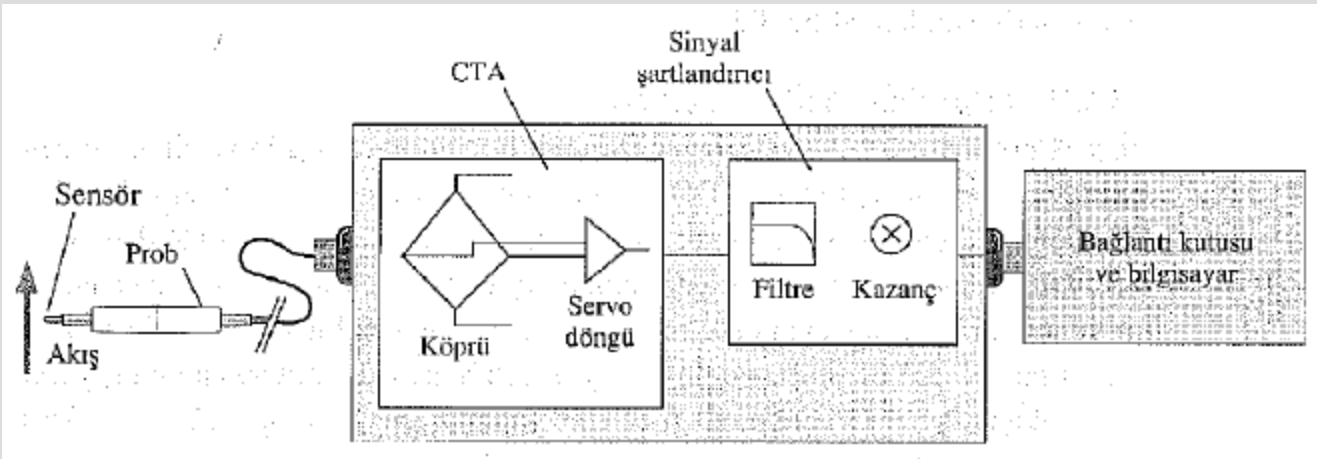
Termal anemometrelerin aşırı derecede küçük sensörleri vardır ve dolayısıyla akışa kayda değer bir rahatsızlık vermeksizin akışın herhangi bir noktasındaki anlık hızı ölçmek için kullanılabilir.

Saniyede bir kaç santimetreden, yüzlerce metreye kadar geniş bir aralıkta sıvı ve gazlardaki hızları ölçebilir.



Termal anemometreye eğer sensörü tel ise sıcak-tel anemometresi denir. Eğer sensörü, çoğunlukla çapı $50\mu\text{m}$ civarında nispeten kalın bir seramik desteğe monte edilmiş ince metal film ise (kalınlığı $0.1\mu\text{m}$ 'den az) sıcak-film anemometresi adını alır.

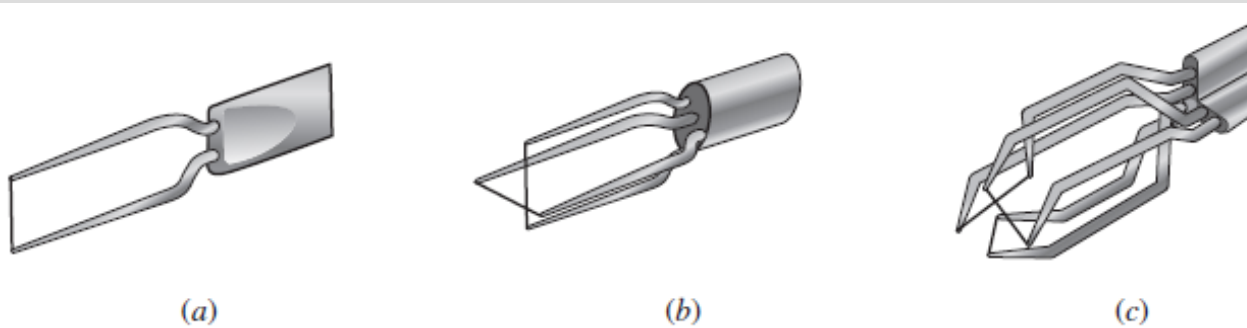
Elektrikle ısıtılan sensör ve sıcak tel probunun desteği.



Termal anemometre sisteminin şematik çizimi.

$$E^2 = a + bV^n \quad \text{King's yasası}$$

Burada E gerilimdir ve belirli bir prob için sabit olan a , b ve n değerler kalibre edilmelidir. Gerilim ölçüldükten sonra bu bağıntı doğrudan doğruya akış hızı V 'yi verir.



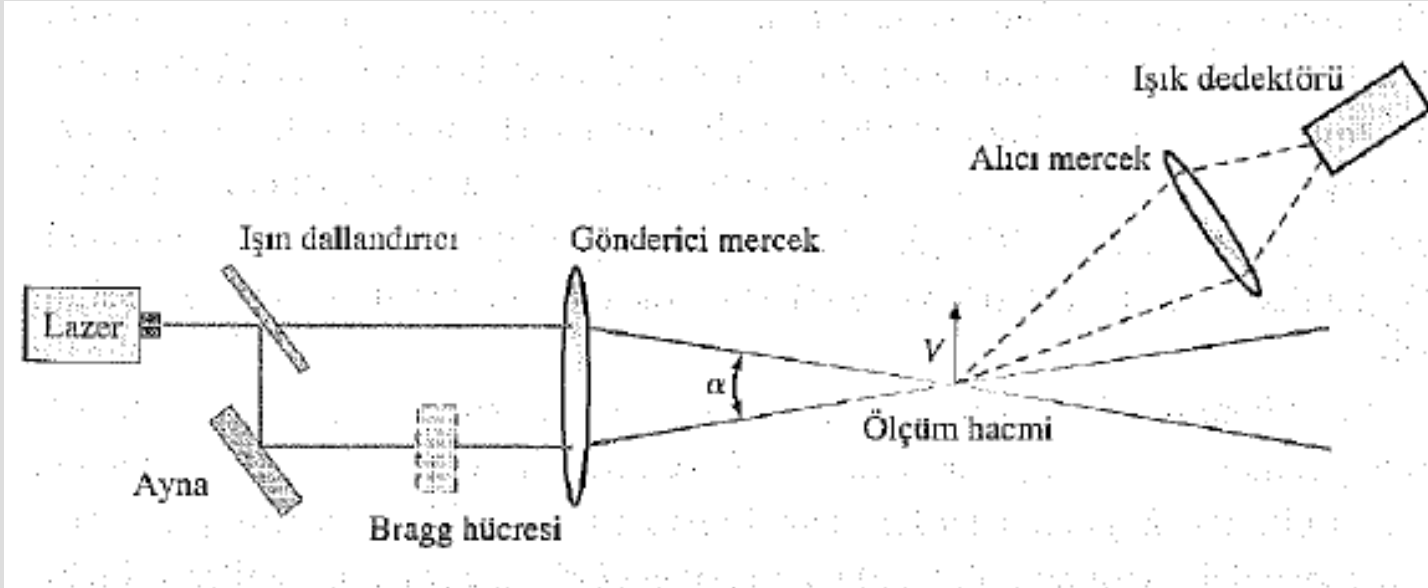
(a) Bir-, (b) iki-, (c) üç-boyutlu hız bileşenlerini aynı anda ölçmede kullanılan tekli, ikili ve üçlü sensörü olan termal anemometre problemleri.

Lazer Doppler Hız Ölçümü

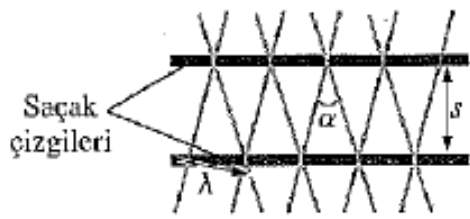
Lazerli hız ölçümü (LV) veya lazer Doppler anemometrisi (LDA) adı da verilen lazer Doppler hız ölçümü (LDV), istenen noktada akışı rahatsız bozmadan akış hızını ölçmek için kullanılan optik bir yöntemdir.

Termal anemometrelerden farklı olarak, LDV'nin akışa yerleştirilen probları veya telleri yoktur ve dolayısıyla harici bir yöntemdir.

Termal anemometrelere benzer olarak çok küçük bir hacimde hızı hassas bir şekilde ölçülebilir ve dolayısıyla türbülans çalkantıları da dahil, yerel olarak akışın ayrıntıları hakkında inceleme yapmak için de kullanılabilir ve akışa müdahale etmeden bütün akış alanı boyunca hareket ettirilebilir.



İleri saçılım modunda olan çift ışınlı bir LDV bir sistemi.



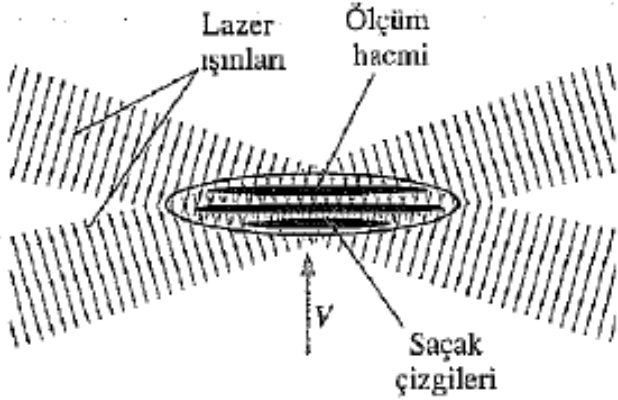
$$f = \frac{V}{s} = \frac{2V \sin(\alpha/2)}{\lambda}$$

LDV denklemi

$$s = \lambda / [2 \sin(\alpha/2)]$$

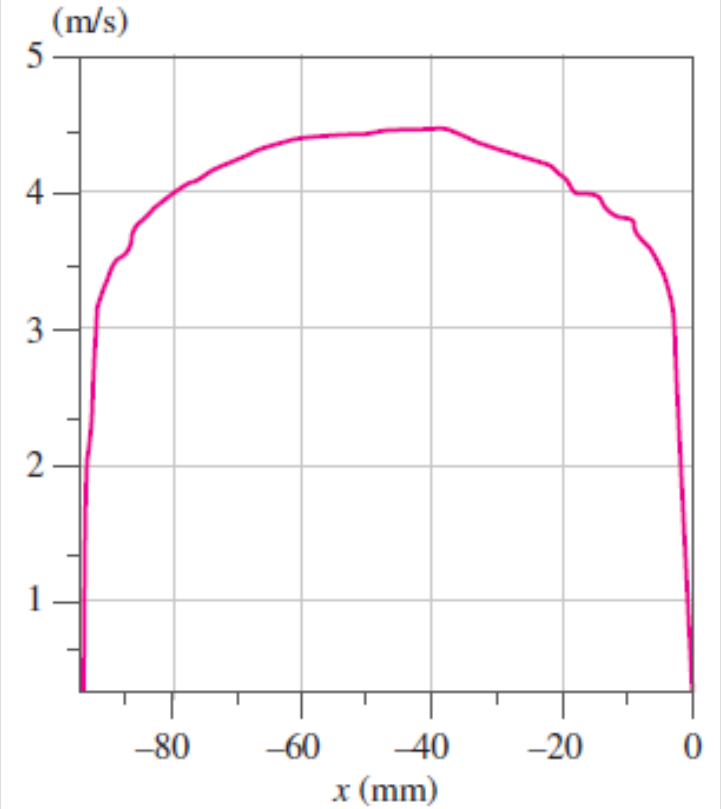
λ lazer ışınının dalga boyu ve α iki lazer ışını arasındaki açıdır.

Bu temel bağıntı, akış hızının frekansla doğru orantılı olduğunu göstermektedir.



Bir LDV sistemine ait iki lazer ışınının kesişimindeki etkileşimin sonucu olarak ortaya çıkan saçaklar (çizgiler dalgaların tepelerini temsil etmektedir). Üstteki gösterim iki saçığın yakından görünüşüdür.

Bir LDV sistemiyle elde edilen türbülanslı boru akışına ait zaman-ortalama hız profili



Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü

Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü (PIV) çok kısa bir zaman aralığında, akış düzlemindeki parçacıkların yer değiştirmesini fotoğraflık olarak belirlemek suretiyle, aynı düzlemdeki anlık hız dağılımını bulmak için kullanılan çift-darbeli (parslı) lazer tekniğidir.

Bir noktadaki hızı ölçen sıcak-tel anemometresi ve LDV yöntemlerinden farklı olarak, PIV aynı anda tüm en-kesit boyunca hız değerlerini verir ve dolayısıyla bir bütün-alan yöntemidir.

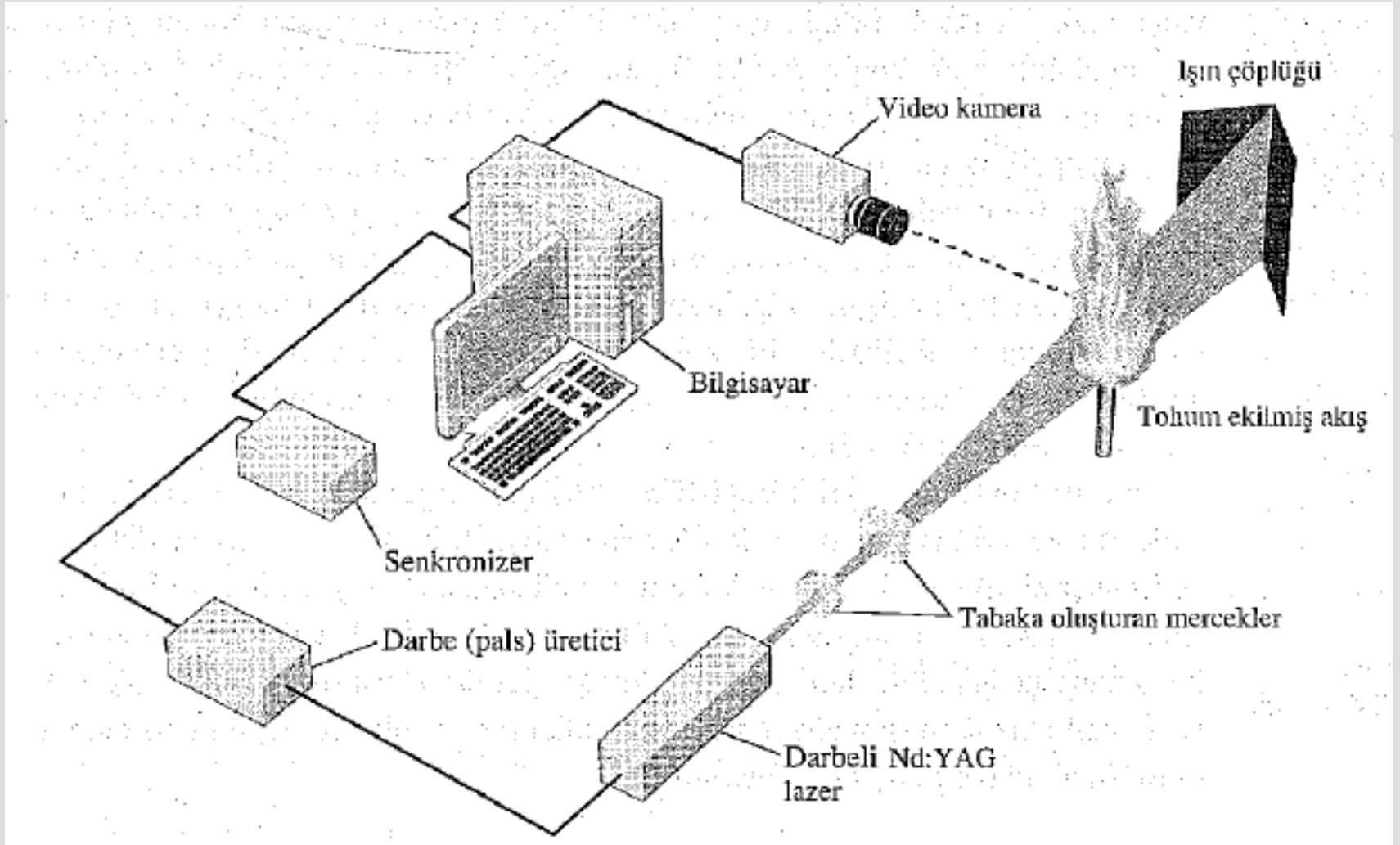
PIV, akış görselleştirme kabiliyeti ile LDV'nin doğruluğunu bir araya getirerek anlık akış alanının haritasının çıkarılmasına olanak tanır

Boru en-kesitindeki anlık hız profilinin tamamı bir tek PIV ölçümü ile elde edilebilir

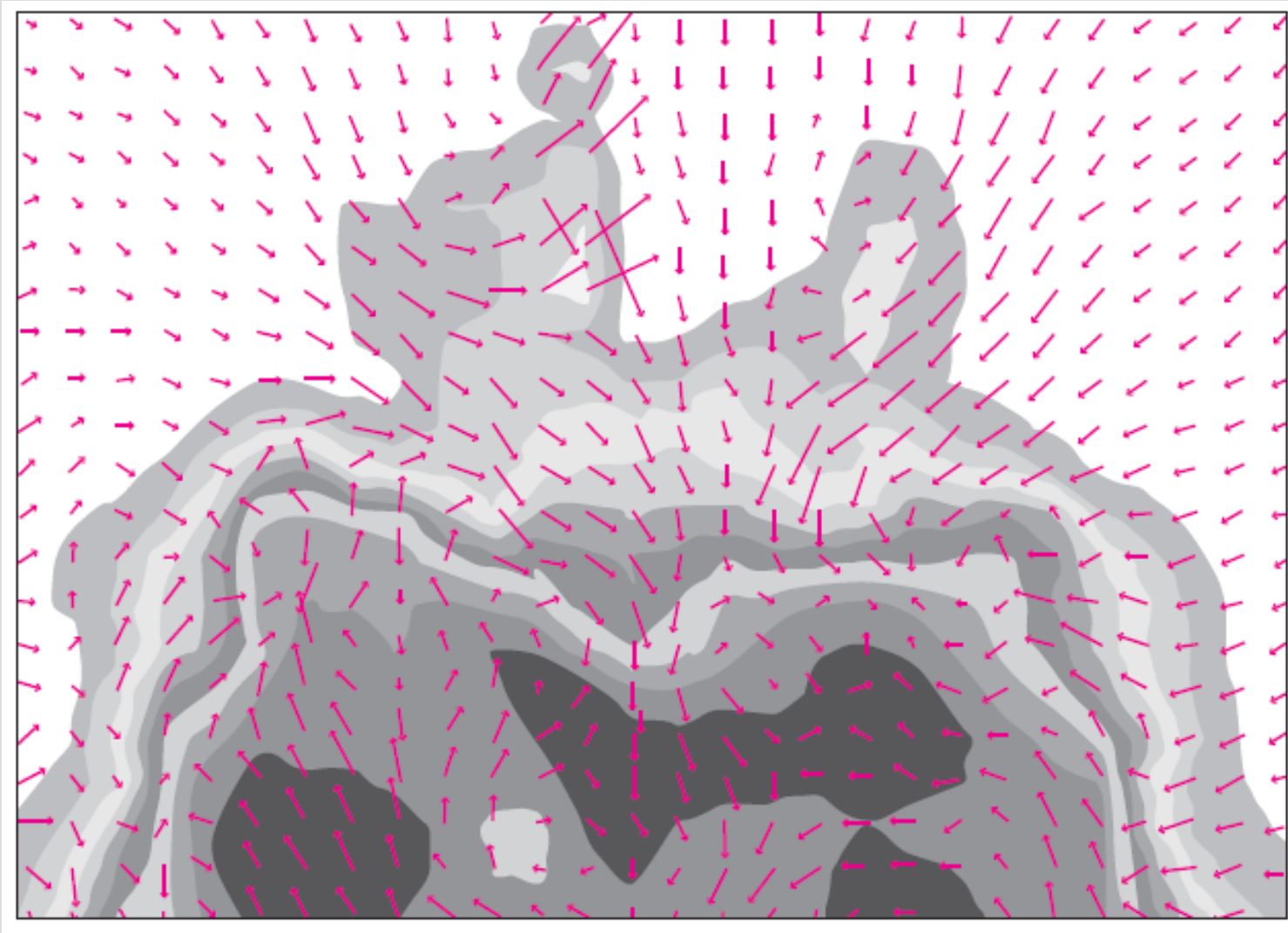
PIV sistemi, istenen herhangi bir akış düzlemindeki hız profilinin anlık resmini alabilen bir kamera olarak düşünülebilir.

Sıradan akış görselleştirme, akış ayrıntılarının niteliksel resmini verir.

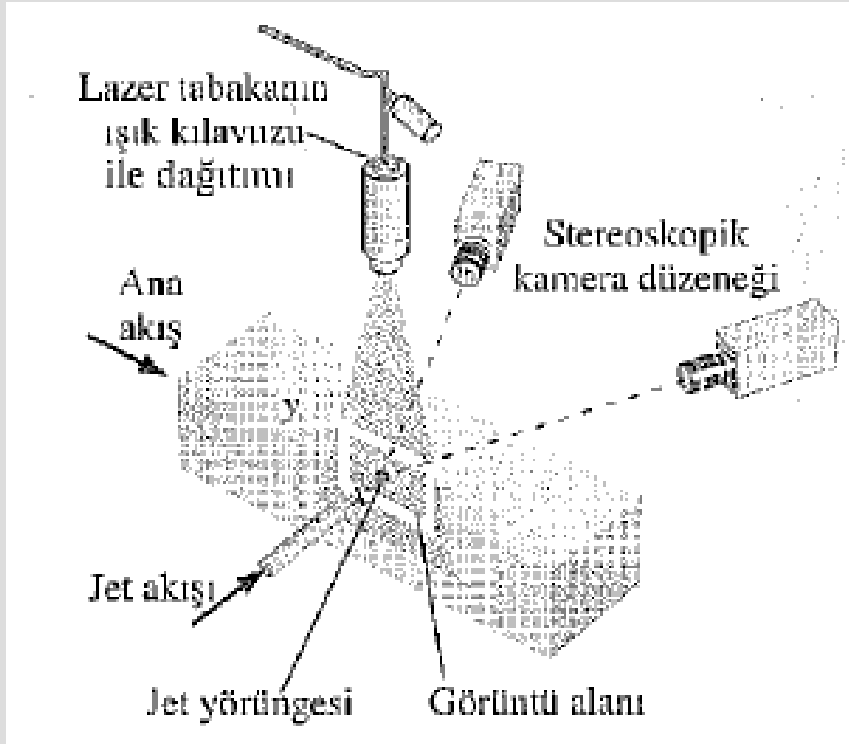
PIV ayrıca, hız alanı gibi akış büyüklüklerinin kesin bir niceliksel (kantitatif) tarifini de verir ve böylece elde edilen hız verilerinin kullanılması ile akışı sayısal olarak analiz etmeye olanak tanır.



Alev kararlılığını incelemede kullanılan bir PIV sistemi.



Rüzgar tüneline PIV sistemi ile bir arabanın art izi bölgesinde ölçülmüş anlık hız alanı. Hız vektörleri, basınç konturu çizimi ile üst üste bindirilmiştir. Gri ölçekli komşu iki seviye arasındaki arayüz bir eş basınç hattıdır.



Kanaldaki akış ile hava jetinin karışmasını incelemek için kurulan üç-boyutlu PIV sistemi.

Argon, balar buharı ve Nd:YAG gibi lazer ışığı kaynağı türleri, gereken darbe süresine ve darbeler arasındaki zamana bağlı olarak PIV sistemleri ile kullanılabilir.

Nd:YAG lazerleri geniş bir uygulama aralığında PIV sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Belirtilen bir kalınlıkta yüksek-enerji darbeli lazer perdesi oluşturmak ve göndermek için, ışık kolu veya fiber-optik sistem gibi ışık dağıtım sistemleri kullanılmaktadır.

PIV ile çevrinti ve şekil değiştirme hızı gibi diğer akış özellikleri de elde edilebilir ve türbülansın ayrıntıları üzerine çalışılabilir.

Özet

- Giriş
- Laminer and Türbülanslı Akışlar
 - ✓ Reynolds Sayısı
- Giriş Bölgesi
 - ✓ Giriş uzunluğu
- Borulardaki laminer akış
 - ✓ Basınç düşüşü ve yük kaybı
 - ✓ Laminer akımda yer çekiminin hız ve debi üzerine etkisi
 - ✓ Dairesel olmaya borularda laminer akım
- Borulardaki türbülanslı akış
 - ✓ Türbülans kayma gerilmesi
 - ✓ Türbülans hız profili
 - ✓ Moody Diyagramı ve Colebrook Denklemi
 - ✓ Akış problemi tipleri

- Yerel Kayıplar
- Boru Şebekeleri ve Pompa Seçimi
 - ✓ Seri ve paralel bağlı borular
 - ✓ Pompa ve türbinli borulama sistemleri
- Debi ve Hız Ölçümü
 - ✓ Pitot ve Pitot-Statik Tüpleri
 - ✓ Engelli Akış Ölçerler: Orifis, Venturimetre ve Akış Lülesi
 - ✓ Hacimsel Akış Ölçerler
 - ✓ Türbinli Akış Ölçerler
 - ✓ Değişken-Alanlı Akış Ölçerler (Rotametreler)
 - ✓ Ultrasonik Akış Ölçerler
 - ✓ Elektromanyetik Akış Ölçerler
 - ✓ Çevri Oluşturan Akış Ölçer
 - ✓ Termal (Sıcak-Tel ve Sıcak-Film) Anemometreler
 - ✓ Lazer Doppler Hız Ölçümü
 - ✓ Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü