

Ege Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Tekstil Mühendisliği Bölümü

Akışkanlar Mekaniği Ders Notu

Ders08-Konu: **Enerji Denklemi ve Borularda İç Akış**

Prof.Dr.Hüseyin GÜNERHAN

<https://www.huseyingunerhan.com/>

Bu ders notu Dr.Hüseyin GÜNERHAN tarafından hazırlanmış ve her sayfası izinsiz kopyalamaya ve çoğaltmaya karşı notere tasdik ettirilmiştir. Ders notunun tüm hakları saklıdır. Ders notunun fotokopi ile çoğaltılıp-ciltletilmesi için yazarından yazılı olarak izin alınması zorunludur.

Bu ders notu, kitap değildir ve yazarın özgün fikirlerini içermektedir. Kaynaklardan alınan bilgiler için kaynak isimleri her bölümün "özet bilgiler" kısmında verilmiştir.

ENERJİ DENKLEMLERİ

Sürekli, sıkıştırılamaz akış için **enerji denklemi** aşağıda verildiği gibi yazılabilir:

$\dot{m} \left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_{1,ort}^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{W}_{pompa} = \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_{2,ort}^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{W}_{türbin} + \dot{E}_{mek.kayıp} \quad [W]$
$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_{1,ort}^2}{2g} + z_1 + h_{pompa,f} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_{2,ort}^2}{2g} + z_2 + h_{türbin,\zeta} + h_K \quad [m]$

α_1 ve α_2 kinetik enerji düzeltme katsayılarıdır. Yukarıda verilen denklemde yer alan yükler aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$h_{pompa,f} = \frac{w_{pompa,f}}{g} = \frac{\dot{W}_{pompa,f}}{\dot{m}g} = \frac{\eta_{pompa} \dot{W}_{pompa}}{\dot{m}g}$	
$h_{türbin,\zeta} = \frac{w_{türbin,\zeta}}{g} = \frac{\dot{W}_{türbin,\zeta}}{\dot{m}g} = \frac{\dot{W}_{türbin}}{\eta_{türbin} \dot{m}g}$	$h_K = \frac{e_{mek.kayıp,boru}}{g} = \frac{\dot{E}_{mek.kayıp,boru}}{\dot{m}g}$
$e_{mek.kayıp} = u_2 - u_1 - q_{net\ giren} \quad [J/kg]$	

Önemli Konular:

-Genel enerji denklemi ve sürekli akışların enerji analizi

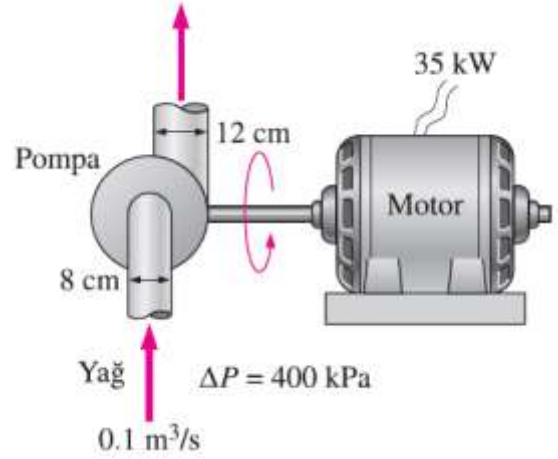
Çalışma Soruları:

1.Enerji denklemini yük cinsinden yazınız ve yük kaybı, faydalı pompa yükü, türbin çıkış gücü ve kinetik enerji düzeltme katsayısı nedir? Açıklayınız.

Kaynaklar:

- 1.Cengel YA, Cimbala JM, "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", Second Edition (SI), McGraw-Hill, 2010.
- 2.Fox RW, Pritchard PJ, McDonald AT, "Introduction to Fluid Mechanics", 7th Edition (SI), Wiley, 2010.
- 3.Crowe CT, Elger DF, Williams BC, Roberson JA, Engineering Fluid Mechanics, 9th Edition, Wiley, 2010.

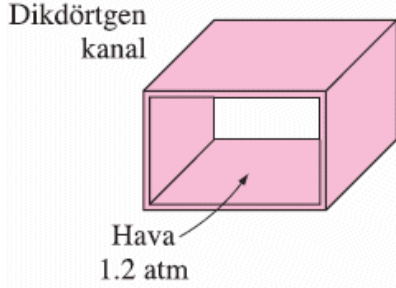
Soru: Bir yağ pompası 860 kg/m^3 yoğunluğundaki yağı $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ debi ile basarken, 35 kW elektrik gücü çekmektedir. Pompanın giriş ve çıkış borularının çapları sırasıyla 8 cm ve 12 cm değerindedir. Pompada meydana gelen basınç artışı 400 kPa ve motor verimi $\%90$ olduğuna göre, pompanın mekanik verimini [%] olarak belirleyiniz. (Kinetik enerji düzeltme faktörünü 1.05 alınız).



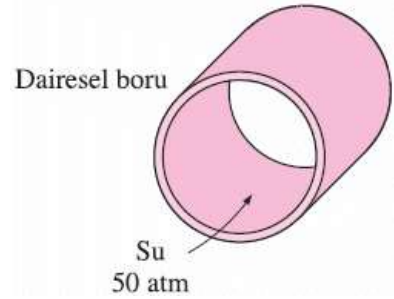
Açıklama: Sorunun çözümünde pompa girişi ile çıkışı arasında yük biriminde enerji denklemi yazılabilir. Pompadaki yükseklik (kot) farkı değeri yaklaşık sıfır alınabilir. Pompa girişi ve çıkışındaki yağ hızları hesaplanıp enerji denkleminde pompa yararlı yüküne ait bir eşitlik elde edilebilir. Çözümde yük kaybının etkisi göz önüne alınmayacaktır. Pompanın yararlı gücü ise, ρ yağın yoğunluğu, \dot{V} hacimsel debi, g yerçekimi ivmesi ve $h_{\text{pompa,y}}$ pompa yükü olmak üzere, $\dot{W}_{\text{pompa,y}} = \rho \dot{V} g h_{\text{pompa,y}}$ (W) eşitliğinden bulunabilir. (Dikkat: Bu eşitlik, Soru 10'a ait açıklamada verilen eşitlik ile karıştırılmamalıdır. Burada pompanın girişi ve çıkışı dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır). Elektrik gücü ve motor verimi değerlerinden pompa miline ait güç değeri bulunup, pompa verimi; yararlı pompa gücünün pompa mili gücüne bölünmesi ile hesaplanabilir.

BORULARDA İÇ AKIŞ

Bu bölümde boru ve kanal içi akışkan akımları ile boru sistemleri ele alınacaktır. İç akışta boru içinin tamamen akışkan ile dolu olduğu kabul edilecektir.

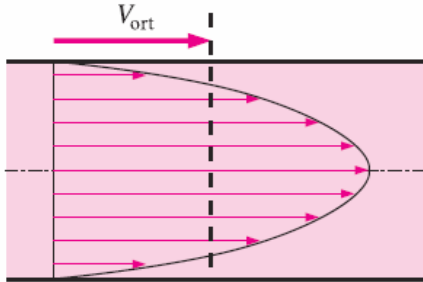


Dairesel borular belli bir basınca kadar bozulmaya uğramadan iç ortam ile dış ortam arasındaki büyük basınç farklarına dayanabilir. Kanallarda ise basınç dayanımı düşüktür.



Boru içi akımlarda **kütleli debi**; ρ yoğunluk, $V_{ortalama}$ (V_{ort}) boru içi akışın ortalama hızı, A_k boru kesit alanı, $u(r)$, r değerine göre değişen hızı göstermek üzere aşağıda verilen eşitlikten belirlenir.

$$\dot{m} = \rho V_{ortalama} A_k = \int_{A_k} \rho u(r) dA_k \quad (\text{kg/s}) \rightarrow V_{ortalama} = \frac{\int_{A_k} \rho u(r) dA_k}{\rho A_k} \quad (\text{m/s})$$

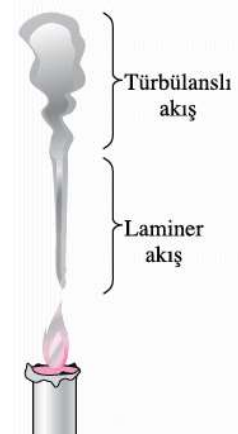


Ortalama hız (V_{ort}) bir kesitteki hız olarak tanımlanır. Tam gelişmiş laminer boru içi akımda en fazla hızın (maksimum hızın) yarısına eşittir.

Laminer akış düzgün akım çizgileri ve çok düzenli hareketi ile, türbülanslı akış ise hızdaki çalkantılarla ve çok düzensiz hareketi ile karakterize edilir.

Akımın türü olan laminer veya türbülanslı akış, **Reynolds sayısı** (Re) ile belirlenir. D boru çapı, ν kinematik viskozite, μ dinamik viskozite, \dot{V} hacimsel debi ve \dot{m} kütleli debi olmak üzere Re boyutsuz sayısı aşağıda verildiği gibi yazılır.

$$Re = Re_D = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{V_{ortalama} D}{\nu} = \frac{\rho V_{ortalama} D}{\mu} = \frac{4\dot{V}}{\pi D \nu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}$$



Çoğu uygulama şartlarında $Re < 2300$ (ya da $Re < 2000$) ise boru akımı laminar ve $Re > 4000$ (ya da $Re > 3000$) ise boru akımı türbülanslı ve bu iki değer arasında ise geçiş akımı olarak nitelendirilir. Akımın türbülanslı olmaya başladığı Reynolds sayısına kritik Reynolds sayısı denir. Akımın türünün belirlenmesi sürtünme faktörü hesabında önem kazanmaktadır.

Viskoz kayma kuvvetlerinin etkisinin hissedildiği akış bölgesine **hız sınır tabakası** veya hidrodinamik sınır tabaka denir. Sınır tabakanın boru girişinden eksen çizgisi ile birleştiği noktaya kadar olan bölgeye hidrodinamik giriş bölgesi ve bu bölgenin uzunluğuna hidrodinamik giriş uzunluğu L_h denir. Hidrodinamik giriş uzunluğu laminar ve türbülanslı akış için aşağıda verildiği gibi belirlenir.

$$L_{h,laminar} \cong 0.05DRe_D \text{ (m)}$$

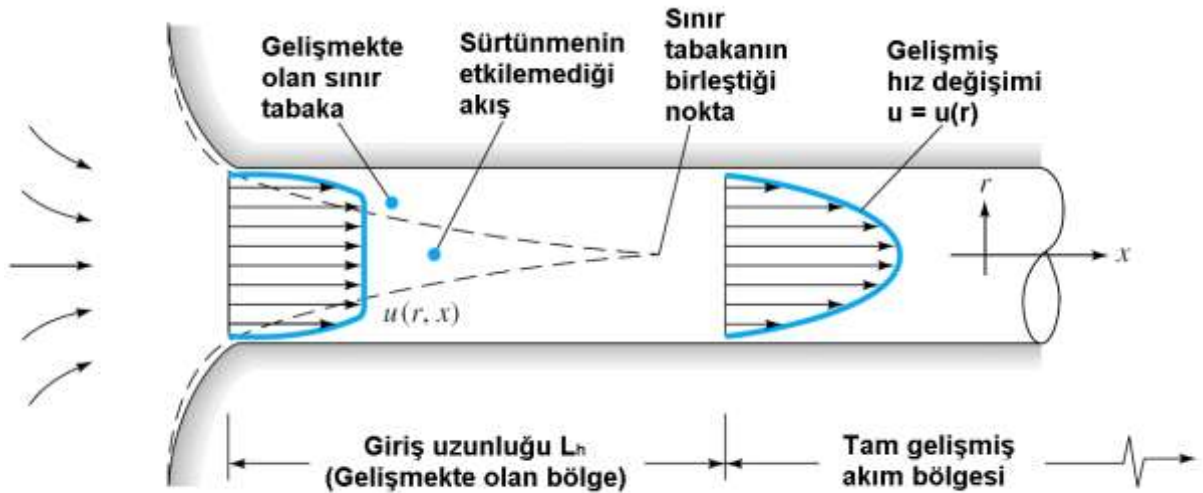
$$L_{h,türbilans} \cong 1.359DRe_D^{1/4} \text{ (m)} \text{ veya } L_{h,türbilans} \cong 10D \text{ (m)}$$

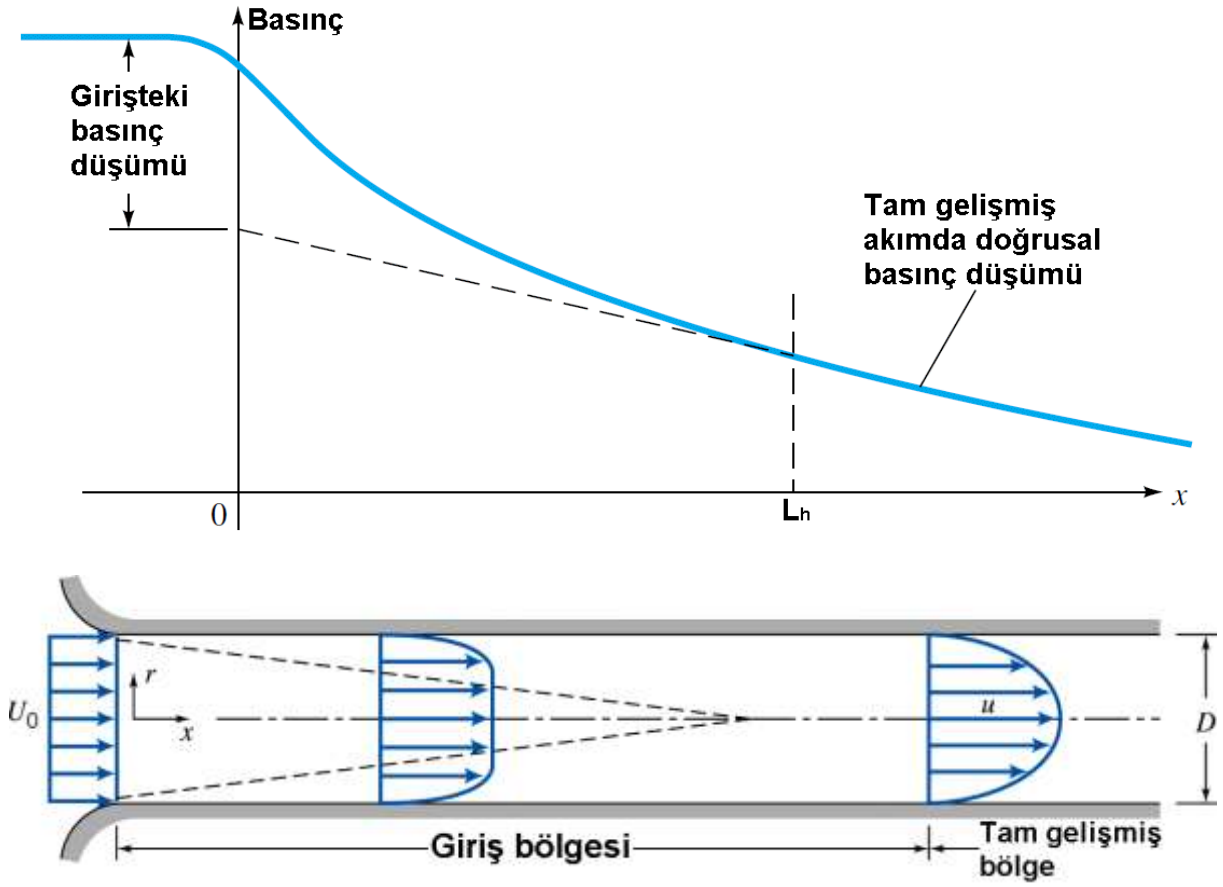
Hidrodinamik giriş uzunluğundan sonraki bölgeye tam gelişmiş akım bölgesi denir. Tam gelişmiş akışta sürtünme faktörü sabit kalır.

ΔP basınç düşüşü ve L boru boyu olmak üzere, dairesel borudaki tam gelişmiş laminar akışa ait en fazla hız ve ortalama hız aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$u_{en\ fazla} = 2V_{ortalama} \text{ (m/s)} \quad \text{ve} \quad V_{ortalama} = \frac{(\Delta P)D^2}{32\mu L} \text{ (m/s)}$$

Bir boru içindeki bölgeler ve basınç değişimleri aşağıda verilen şekildeki gibi olabilir.





Hidrodinamik giriş bölgesi de denilen giriş bölgesinde hız dağılımı iki boyutludur: $u = u(x,r)$. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş bölgede ise hız dağılımı bir boyutlu olur: $u = u(r)$. $u = u(r)$ olduğu an tam gelişmiş bölge başlar.

Yatay borudaki laminer akım için hacimsel debi ve **basınç düşüşü** aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\dot{V} = V_{\text{ortalama}} A_k = \frac{(\Delta P) \pi D^4}{128 \mu L} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad \text{ve} \quad \Delta P = \frac{32 \mu L V_{\text{ortalama}}}{D^2} \text{ (Pa)}$$

Yatay borular için olan bu sonuçlar eğer ΔP yerine, θ boru ekseninin yatayla yaptığı açı olmak üzere, $\Delta P - \rho g L \sin \theta$ yazılırsa eğimli borular için de kullanılabilir.

$$V_{\text{ortalama}} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) D^2}{32 \mu L} \text{ (m/s)} \quad \text{ve} \quad \dot{V} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L} \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Bütün iç akış türleri için (laminer veya türbülanslı, dairesel ve dairesel olmayan borularda, pürüzsüz veya pürüzlü yüzeylerde) basınç kaybı ve (sürekli) yük kaybı (yerel kayıpların olmadığı göz önüne alınarak) aşağıda verildiği gibi ifade edilir:

$$\Delta P_K = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \text{ (Pa)} \quad \text{ve} \quad h_K = \frac{\Delta P_K}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \text{ (m)}$$

Eşitlikler içinde yer alan L boru boyunu (m), $\frac{\rho V^2}{2}$ dinamik basıncı (Pa) ve f **sürtünme faktörünü** göstermektedir.

Sürtünme faktörü boyutsuz bir sayıdır ve dairesel boruda tam gelişmiş laminer akış için aşağıda verilen eşitlikten veya Moody diagramından hesaplanabilir.

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad \text{veya} \quad f = \frac{64}{Re_{D_h}} \quad \left(Re_{D_h} = \frac{V_{ortalama} D_h}{\nu} = \frac{\rho V_{ortalama} D_h}{\mu} \right)$$

Dairesel olmayan borular için yukarıdaki bağıntıda verilen çap yerine **hidrolik çap** (D_h) kullanılır. Burada A_k borunun kesit alanı (m^2), P (m) ise ıslak çevrenin uzunluğudur. Dairesel olmayan borular için ilgili tablodan sürtünme faktörü değeri hesaplanır. Hidrolik yarıçap ise aşağıda verildiği gibidir.

$$R_h = \frac{A_k}{P} \text{ (m)} \quad \rightarrow \quad D_h = \frac{4A_k}{P} \text{ (m)} \quad \rightarrow \quad D_h = 4R_h \text{ (m)}$$

Tam gelişmiş türbülanslı akışta sürtünme faktörü, Reynolds sayısına ve **bağıl pürüzlülük değerine** [(ε/D) veya (ε/D_h)] bağlıdır.

Türbülanslı akışta sürtünme faktörü Moody diagramından veya aşağıda verilen eşitliklerden hesaplanır.

$\frac{1}{\sqrt{f}} = (-2.0) \log \left(\frac{\varepsilon/D_h}{3.7} + \frac{2.51}{Re_{D_h} \sqrt{f}} \right)$
$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong (-1.8) \log \left[\frac{6.9}{Re_{D_h}} + \left(\frac{\varepsilon/D_h}{3.7} \right)^{1.11} \right]$
$f \cong 8 \left[\left(\frac{8}{Re_{D_h}} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{(1/12)}$
$A = \left\{ -2.457 \ln \left[\left(\frac{7}{Re_{D_h}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D_h} \right] \right\}^{16} \quad \text{ve} \quad B = \left(\frac{37530}{Re_{D_h}} \right)^{16}$

Borulama sistemlerinin tasarımı ve analizi, yük kaybı, debi veya boru çapının hesaplanmasını kapsar.

Bağlantı elemanları, vana, dönüş, dirsek, T, giriş, çıkış, genişleme ve daralmalar gibi boru elemanlarından oluşan kayıplara **yerel kayıplar** denir. Yerel kayıplar, çoğunlukla kayıp katsayısı K veya K_K cinsinden ifade edilir. Bir eleman için yerel yük kaybı aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır.

$$h_K = K_K \frac{V^2}{2g} \text{ (m)}$$

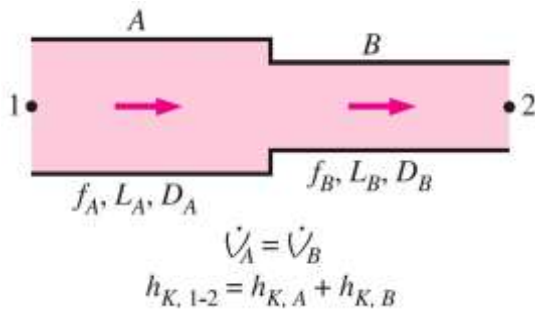
Tüm kayıp katsayıları biliniyorsa, borulama sistemindeki toplam yük kaybı için aşağıda verilen eşitlik yazılır.

$$h_{K, \text{toplam}} = h_{K, \text{sürekli}} + h_{K, \text{yerel}} = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_{h_i}} \frac{V_i^2}{2g} + \sum_j K_{K,j} \frac{V_j^2}{2g} \text{ (m)}$$

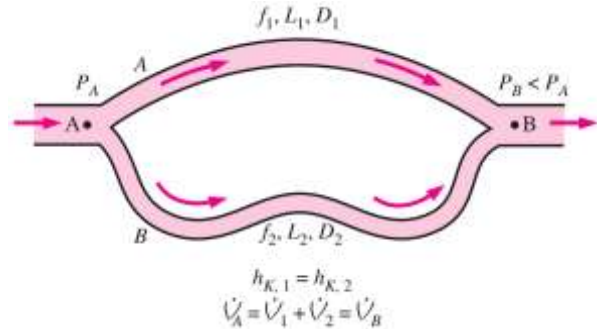
Eğer tüm borulama sisteminin çapı sabitse, toplam yük kaybı aşağıda verilen denkleme dönüşür:

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

Borulama sisteminin analizi iki basit ilkeye dayanır: (1) Sistemin tamamında kütle korunumu sağlanmalıdır ve (2) iki nokta arasındaki basınç düşüşü, noktalar arasındaki tüm yollar için aynı olmalıdır. Borular seri olarak bağlandığı zaman bütün sistemden geçen debi herhangi bir borunun çapına bakılmaksızın sabit kalır. İki (veya daha fazla) paralel boru halinde dallara ayrılan ve daha sonra aşağı akımda birleşen bir boruda toplam debi bütün borulardaki debilerin toplamıdır fakat her bir daldaki yük kaybı aynıdır.



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



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

Borulama sisteminde pompa ve/veya türbin varsa sürekli akışa ait enerji denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

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

$$w_{\text{pompa, f}} = (h_{\text{pompa, f}})(g) \text{ (J/kg)} \text{ ve } w_{\text{türbin, f}} = (h_{\text{türbin, f}})(g) \text{ (J/kg)}$$

Faydalı pompa yükü $h_{\text{pompa, f}}$ bilindiği zaman belirli bir debi için pompanın akışkana vermesi gereken mekanik güç ve pompa motorunun harcadığı elektriksel güç aşağıda verilen eşitliklerden hesaplanır.

$$\dot{W}_{\text{pompa,mil}} = \frac{\rho \dot{V} g h_{\text{pompa,f}}}{\eta_{\text{pompa}}} \quad \text{ve} \quad \dot{W}_{\text{elektrik}} = \frac{\rho \dot{V} g h_{\text{pompa,f}}}{\eta_{\text{pompa-motor}}}$$

Burada $\eta_{\text{pompa-motor}}$, pompa-motor grubunun verimi olup pompa ve motor verimlerinin çarpımıdır.

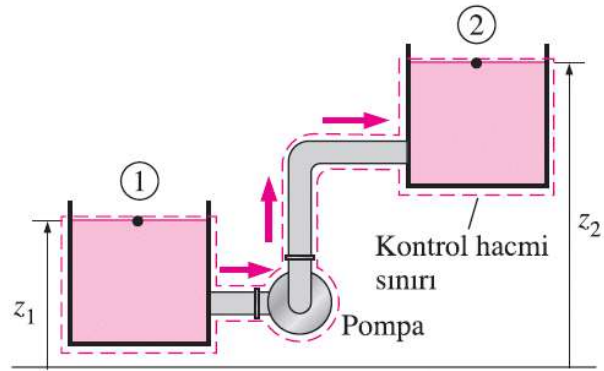
Borulama sistemlerinin çoğunda akışkanı bir depodan diğer depoya gönderen bir pompa vardır. 1 ve 2 numaralı noktalar depoların serbest akışkan yüzeyleri olarak alınır, serbest akışkan yüzeylerindeki hızlar ihmal edilirse ve depoların üzerindeki basınçlar da atmosfer basıncı olarak alınırsa faydalı pompa yükü için enerji denklemi aşağıdaki hale indirgenir.

$$h_{\text{pompa,f}} = (z_2 - z_1) + h_K$$

$z_1 > z_2$ (birinci depo ikincisinden daha yüksekte) ve pompanın olmadığı durumda akış, yerçekiminin etkisi ile oluşur. Buradaki debi, yükseklik farkına eşit olan bir yük kaybına yol açar. $z_1 > z_2$ olduğu durumda sisteme bir türbin eklenebilir. Bu durumda faydalı türbin yükü için enerji denklemi aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

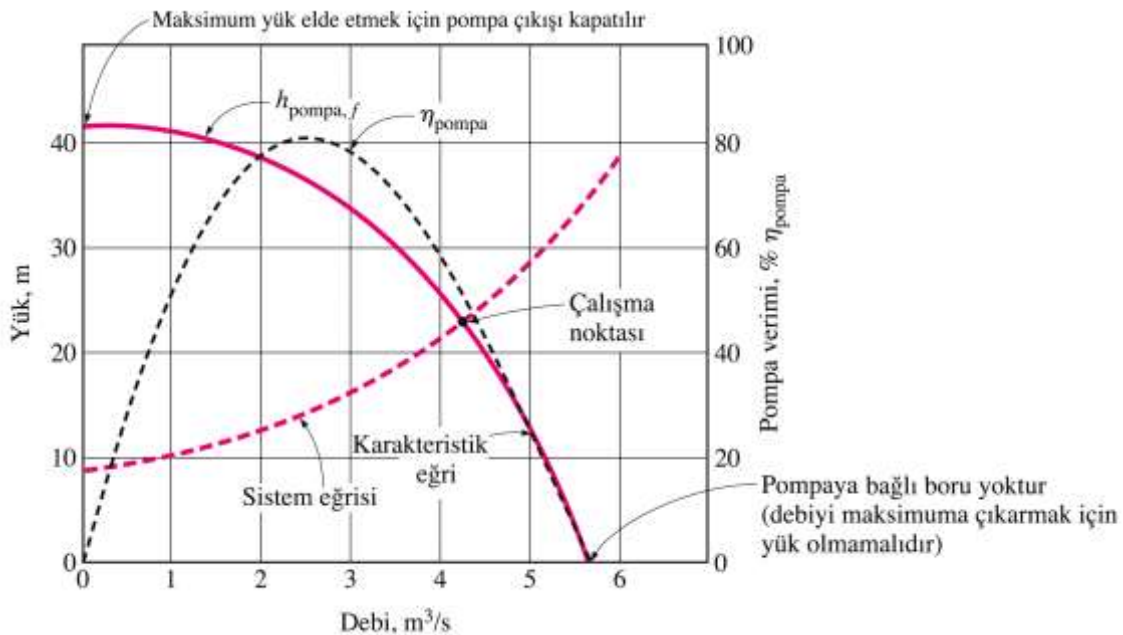
$$h_{\text{türbin,f}} = (z_1 - z_2) - h_K$$

Yük kaybının debi ile değişimini gösteren eğriye **sistem eğrisi** denir. Pompanın ürettiği yük sabit değildir. $h_{\text{pompa,f}}$ ve η_{pompa} değerlerinin hacimsel debiye (\dot{V}) göre değişimini gösteren eğrilere karakteristik eğri denir. Borulama sisteminde kurulu olan pompa, sistem eğrisi ile karakteristik eğrinin kesiştiği nokta olan çalışma noktasında çalışır.



$$h_{\text{pompa,f}} = (z_2 - z_1) + h_K$$

$$\dot{W}_{\text{pompa,f}} = \rho \dot{V} g h_{\text{pompa,f}}$$



Akış ölçüm yöntemleri ve cihazları üç ana sınıfta ele alınabilir: (1) Engelli akış ölçerler, türbinli ölçerler, hacimsel akış ölçerler, rotametreler ve ultrasonik akış ölçerler gibi hacimsel (veya kütleli) debi ölçüm yöntemleri veya cihazları; (2) Pitotstatik tüpü, sıcak-teller ve LDV gibi noktasal hız ölçüm yöntemleri ve (3) PIV gibi bütün-alan hız ölçüm yöntemleri.

Önemli Konular:

- Laminer ve türbülanslı akışlar
 - Borularda ve kanallarda laminer akış (Basınç düşümü ve yük kaybı)
 - Borularda ve kanallarda türbülanslı akış (Moody diagramı)
 - Yerel kayıplar
 - Boru şebekelerinde pompa seçimi
-

Çalışma Soruları:

1.Sıvılar neden çoğunlukla dairesel borularda taşınır? Açıklayınız.

[**Yanıt:** Sıvılar çoğunlukla dairesel borularda taşınır çünkü sıvılarda genellikle boru içi basınç yüksektir ve dairesel kesitli borular şekillerinde bir bozulma olmadan iç ve dış ortam arasındaki büyük basınç farklarına dayanabilirler. Düşük basınca sahip gazlarda ise boru yerine genellikle kanallar kullanılır. (Klima kanalları gibi)].

2.Reynolds sayısının fiziksel anlamı nedir? Açıklayınız. Re sayısı iç çapı D olan dairesel borudaki akış ve kesiti a x b olan dikdörtgen kanaldaki akış için nasıl tanımlanır? Gösteriniz.

3.Çapı D olan dairesel borudaki akış için Reynolds sayısının $Re = 4m/(\pi D\mu)$ olarak ifade edilebileceğini gösteriniz.

4.Boru akışında hidrodinamik giriş uzunluğu nasıl tanımlanır? Giriş uzunluğu laminer akışta mı yoksa türbülanslı akışta mı daha uzundur? Açıklayınız.

5.Laminer ve türbülanslı akışta çeper kayma gerilmesi tam gelişmiş bölgede akış yönü boyunca nasıl değişir? Açıklayınız.

6.Tam gelişmiş laminer akış sırasında dairesel borunun merkezindeki kayma gerilmesinin sayısal değeri ne olur? Açıklayınız.

7.R yarıçap olmak üzere, dairesel borudaki tam gelişmiş laminer akışta sadece R/2 noktasındaki hızın ölçülmesi ile ortalama hız bulunabilir mi? Açıklayınız.

8.Dairesel bir borudaki tam gelişmiş laminer akışı ele alınız. Eğer boru çapı yarıya indirilir ve debi ile boru uzunluğu sabit tutulursa yük kaybı nasıl değişir? Açıklayınız.

9.Boru akışında yerel kayıp için eşdeğer uzunluğu tanımlayınız. Bu ifade ile yerel kayıp katsayısı arasında nasıl bir ilişki olabilir? Açıklayınız.

10.Bir borulama sistemine ait yük-debi grafiğinde sistem eğrisini, karakteristik eğriyi ve çalışma noktasını tanımlayınız.

11.İç çapı 2 cm olan dairesel borudaki tam gelişmiş laminer akışta hız değişimi $u(r) = 4(1 - r^2/R^2)$ eşitliği ile verilmiştir. Borudaki ortalama hızı, maksimum hızı ve hacimsel debiyi hesaplayınız.

Kaynaklar:

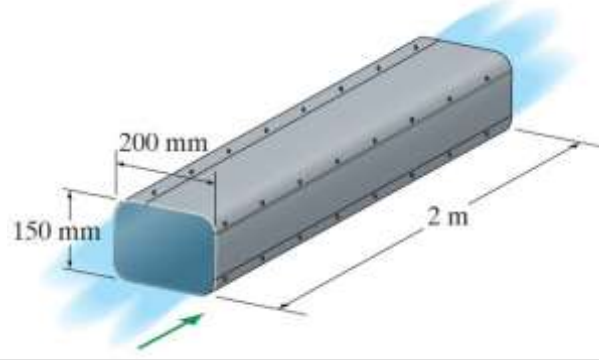
1.Cengel YA, Cimbala JM, "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", Second Edition (SI), McGraw-Hill, 2010.

2.Fox RW, Pritchard PJ, McDonald AT, "Introduction to Fluid Mechanics", 7th Edition (SI), Wiley, 2010.

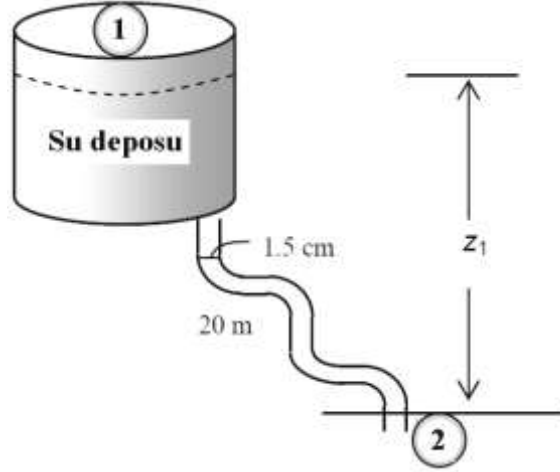
3.Crowe CT, Elger DF, Williams BC, Roberson JA, Engineering Fluid Mechanics, 9th Edition, Wiley, 2010.

ÖRNEK SORU ÇÖZÜMLERİ

Soru 1: Şekil ile verildiği gibi hava, galvanizli demirden yapılmış bir kanal içinde **4 m/s** hız ile akmaktadır. Diğer bilgiler şekil üzerinde verilmiştir. Kanalın girişi ile çıkışı arasındaki basınç düşüşünü [**Pa**] olarak hesaplayınız. [Havanın özelliklerini 1 atm basınç ve 20°C sıcaklık için tablodan alınız].



Soru 2: Şekil ile verildiği gibi bir depo güneşle ısıtılan **40°C** sıcaklıktaki su ile doldurulmuştur. Depodaki su, yer çekimi etkisiyle akış oluşturarak bir tarladaki duşlar için kullanılacaktır. Sistem **20 m** uzunluğunda **1.5 cm** çapında galvanizli demir boru ve kanatsız **4 adet** 90° köşe dönüş ve **1 adet** tam açık küresel vanadan oluşmaktadır. Suyun **0.7 litre/s** değerinde debi ile duş başlığından akması istendiğine göre, depodaki su seviyesinin duştan çıkış seviyesinden ne kadar yüksekte olması gerektiğini [m] olarak hesaplayınız. (Giriş ve duş başlığı kayıplarını göz ardı ediniz).



Cözüm 2:

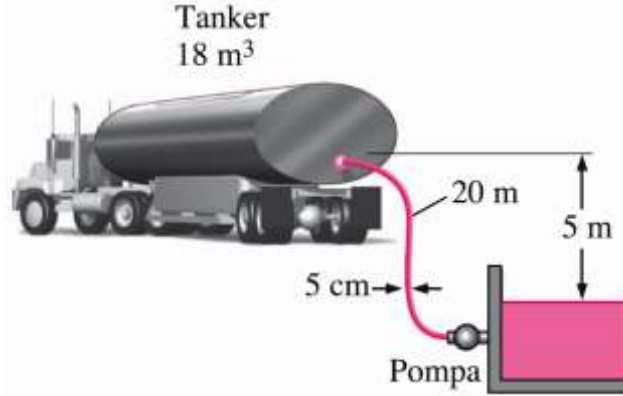
Verilenler: Su, 0.7 litre/s debide ve 40°C sıcaklıktadır. Galvanizli demirden yapılmış boru, 1.5 cm çapında ve 20 m uzunluğundadır. Boru sistemi kanatsız 4 adet 90° köşe dönüş ve bir adet tam açık küresel vanadan oluşmaktadır. Giriş ve duş başlığı kayıplarını göz ardı edilecektir.

Re sayısı eşitliği $Re = \frac{\rho V_{ort} D}{\mu}$; Sürtünme faktörü eşitliği $\frac{1}{\sqrt{f}} \cong (-1.8) \log \left[\frac{6.9}{Re_{D_h}} + \left(\frac{\varepsilon / D_h}{3.7} \right)^{1.11} \right]$

Toplam yük kaybı eşitliği $h_k = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_k \right) \frac{V_{ort}^2}{2g}$ (m)

Hesaplama Adımları	Hesaplama Sonuçları
Adım 1: 40°C sıcaklıktaki suyun yoğunluğu ve dinamik viskozitesini ilgili tablodan bulunuz ve birimleri ile birlikte yan tarafa yazınız.	
Adım 2: Boru sistemi için enerji denklemini yan tarafa yazınız ve denklem üzerinde gerekli kabulleri ve düzenlemeleri yapınız.	
Adım 3: Enerji denklemini, z_1 yükseklik yükünü sol tarafta bırakarak yeniden düzenleyiniz ve eşitliği yan tarafa yazınız.	
Adım 4: Boru içi ortalama hızı [m/s] olarak hesaplayıp yan tarafa yazınız.	
Adım 5: Boru çapını dikkate alarak Re sayısını hesaplayıp yan tarafa yazınız.	
Adım 6: Re sayısını dikkate alarak akımın türünü yan tarafa yazınız.	
Adım 7: Galvanizli demirden yapılmış boruya ait pürüzlülük değerini ilgili tablodan bulunuz ve [m] olarak yan tarafa yazınız.	
Adım 8: Boru sistemine ait bağıl pürüzlülük değerini hesaplayıp boyutsuz olarak yan tarafa yazınız.	
Adım 9: Sürtünme faktörü değerini hesaplayıp boyutsuz olarak yan tarafa yazınız.	
Adım 10: Kanatsız 4 adet 90° köşe dönüşü için kayıp katsayısını ilgili tablodan okuyup boyutsuz olarak yan tarafa yazınız.	
Adım 11: Bir adet tam açık küresel vanaya ait kayıp katsayısını ilgili tablodan okuyup boyutsuz olarak yan tarafa yazınız.	
Adım 12: Toplam kayıp katsayısını hesaplayıp boyutsuz olarak yan tarafa yazınız.	
Adım 13: Boru sistemine ait yük kaybını [m] olarak hesaplayıp yan tarafa yazınız.	
Adım 14: Akımın türünü göz önüne alarak kinetik enerji düzeltme katsayısı değerini ilgili tablodan okuyup boyutsuz olarak yan tarafa yazınız.	
Adım 15: z_1 yükseklik yükünü [m] olarak hesaplayıp yan tarafa yazınız.	

Soru 3: Şekil ile verildiği gibi bir tanker, yoğunluğu 920 kg/m^3 ve dinamik viskozitesi 0.045 kg/ms olan akaryakıt ile doldurulacaktır. Dolum işlemi yeraltında bulunan bir depodan 20 m uzunluğunda 5 cm çapında hafifçe yuvarlatılmış ($r/D = 0.1$) giriş ve iki adet flanşlı 90° düzgün dönüşlü elemanlardan oluşan plastik hortum kullanılarak yapılmaktadır. Depodaki akaryakıt seviyesi ile hortumun bağlandığı tankerdeki akaryakıt seviyesi arasındaki yükseklik farkı 5 m değerindedir. Tankerin toplam kapasitesi 18 m^3 hacmindedir ve **30 dakikada** tankerin doldurulması gerekmektedir. Tanker çıkışında kinetik enerji düzeltme faktörünü 1.05 alarak ve toplam pompa verimini **%82** kabul ederek pompaya verilmesi gereken gücü [kW] olarak hesaplayınız.



Cözüm 3:

Kabuller 1 Akım sürekli ve sıkıştırılmazdır. **2** Boru giriş etkileri göz ardı edilmiştir ve akım tam gelişmiş olarak alınmıştır. **3** Akaryakıt seviyesi sabit kalmaktadır. **4** Akaryakıtın bulunduğu deponun üst tarafı atmosfere açıktır.

Özellikler Akaryakıtta ait yoğunluk ve dinamik viskozite değerleri 920 kg/m^3 ve 0.045 kg/ms olarak verilmiştir. İlgili tablodan hafifçe yuvarlatılmış ($r/D = 0.1$) giriş için kayıp katsayısı 0.12 ve flanşlı 90° düzgün dönüş için kayıp katsayısı 0.3 olarak okunabilir. Plastik boru için pürüzlülük değeri ilgili tablodan 0 (sıfır) olarak alınabilir. Kinetik enerji düzeltme katsayısı 1.05 olarak verilmiştir.

Analiz Akaryakıt yeraltındaki depodan tankere doğru bir pompa aracılığı ile gönderilmektedir. Deponun atmosfere açık serbest akışkan yüzeyi 1 noktası olarak ve boş tankere giren boru çıkışı ise 2 noktası olarak alınabilir. 1 ve 2 noktası atmosfere açık olduğu için $P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$ olarak yazılabilir. Depoda azalan akaryakıtta ait hız değeri (V_1) 0 olarak alınabilir. Serbest akışkan yüzeyi yükseklik yükü (z_1) 0 olarak alınabilir.

Enerji denklemi ve toplam yük kaybı aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

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

$$h_K = h_{K, \text{toplam}} = h_{K, \text{sürekli}} + h_{K, \text{yerel}} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V_2^2}{2g}$$

Boru sistemindeki boru çapı sabittir ve tanker 30 dakikada doldurulacağından dolayı hacimsel debi aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\dot{V} = \frac{V_{\text{tanker}}}{\Delta t} = \frac{18 \text{ m}^3}{(30 \times 60) \text{ s}} = 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$$

Boru içi ortalama akışkan hızı ve Re sayısı aşağıda verildiği gibi bulunabilir.

$$V_2 = \frac{\dot{V}}{A_k} = \frac{\dot{V}}{\pi D^2 / 4} = \frac{0.01 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi (0.05 \text{ m})^2 / 4} = 5.093 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho V_2 D}{\mu} = \frac{(920 \text{ kg/m}^3)(5.093 \text{ m/s})(0.05 \text{ m})}{0.045 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 5206$$

$Re = 5206 > 4000$ olduğu için akımın türü türbülanslıdır. Sürtünme faktörü Moody diyagramından veya Colebrook eşitliğinden hesaplanabilir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(0 + \frac{2.51}{5206 \sqrt{f}} \right)$$

Colebrook eşitliğinden $f = 0.0370$ olarak bulunur. Toplam kayıp katsayıları aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\sum K_k = K_{K,\text{giriş}} + 2K_{K,\text{dönüş}} = 0.12 + 2 \times 0.3 = 0.72$$

Toplam yük kaybı, yararlı pompa yükü ve pompa gücü (mil gücü) aşağıda verildiği gibi bulunur.

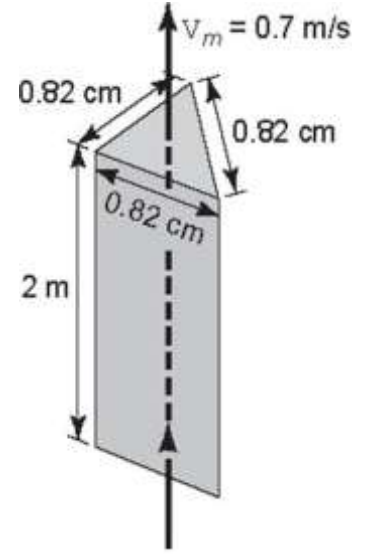
$$h_k = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_k \right) \frac{V_2^2}{2g} = \left((0.0370) \frac{20 \text{ m}}{0.05 \text{ m}} + 0.72 \right) \frac{(5.093 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 20.5 \text{ m}$$

$$h_{\text{pompa, f}} = \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L = 1.05 \frac{(5.093 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} + 5 \text{ m} + 20.5 \text{ m} = 26.9 \text{ m}$$

$$\dot{W}_{\text{pompa}} = \frac{\dot{V} \rho g h_{\text{pompa, f}}}{\eta_{\text{pompa}}} = \frac{(0.01 \text{ m}^3/\text{s})(920 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(26.9 \text{ m})}{0.82} = 2.96 \text{ kW}$$

Soru 4: Şekil ile verildiği gibi, kesiti eşkenar üçgen olan bir kanalda 0°C sıcaklıktaki etilen glikol 0.7 m/s hız ile yukarı doğru tam gelişmiş olarak akmaktadır. Diğer bilgiler şekil üzerinde verilmiştir. Kanalın girişi ile çıkışı arasında oluşan basınç değişimini [**kPa**] olarak hesaplayınız.

[V_m kanal içi ortalama hızdır ve kanal kesit alanı $2.91 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, 0°C sıcaklıktaki etilen glikolün dinamik viskozitesi $65.1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(ms)}$ ve kinematik viskozitesi $5.756 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak alınabilir].

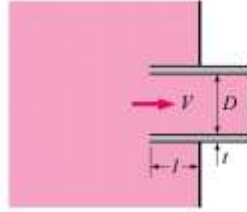


TABLO 04

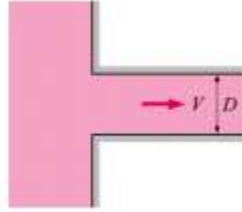
Türbülanslı akışta $h_K = K_K V^2 / (2g)$ bağlantısındaki K_K yerel kayıp katsayılarının çeşitli boru elemanları için verilen değerleri (V , elemanın bulunduğu borudaki ortalama akış hızıdır).*

Boru girişi

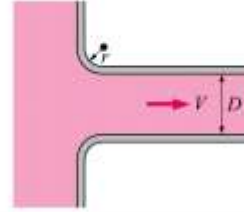
Çıkıntılı giriş: $K_K = 0.80$
($t \ll D$ ve $l = 0.1D$)



Keskin kenarlı: $K_K = 0.50$

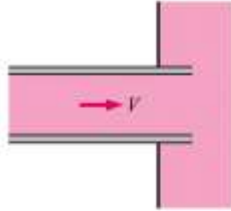


İyi yuvarlatılmış ($r/D > 0.2$): $K_K = 0.03$
Hafifçe yuvarlatılmış ($r/D = 0.1$): $K_K = 0.12$
(bkz. Şekil B-36)

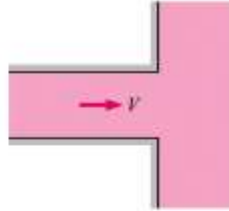


Boru çıkışı

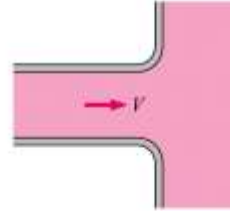
Çıkıntılı çıkış: $K_K = \alpha$



Keskin kenarlı: $K_K = \alpha$



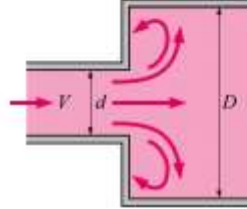
Yuvarlatılmış: $K_K = \alpha$



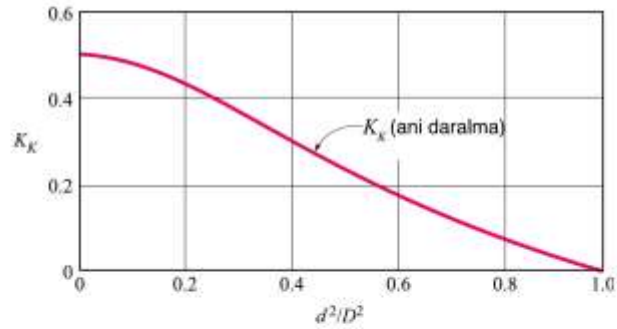
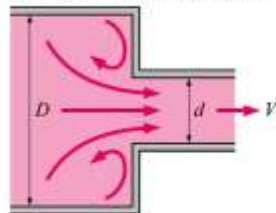
Not: Kinetik enerji düzeltme faktörü tam gelişmiş laminar akış için $\alpha = 2$ ve tam gelişmiş türbülanslı akış için $\alpha = 1.05$ ' dir.

Ani genişleme ve daralma (küçük çaplı borudaki hıza göre)

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

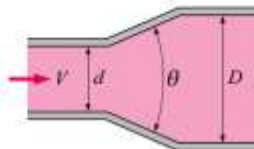


Ani daralma: Diyagrama bakınız.

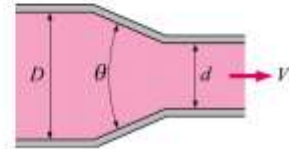


Yavaş genişleme ve daralma (küçük çaplı borudaki hıza göre)

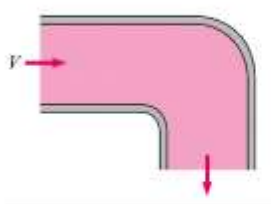
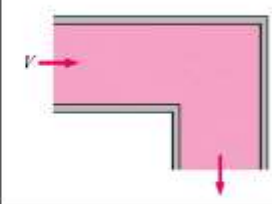
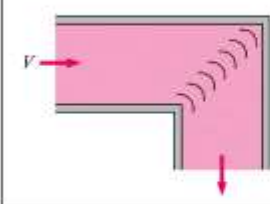
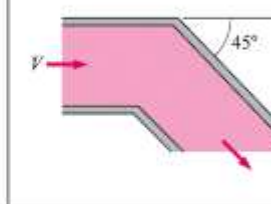
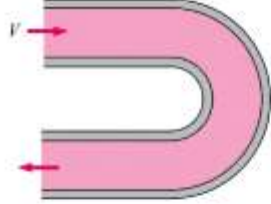
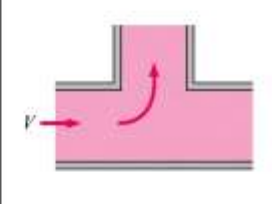
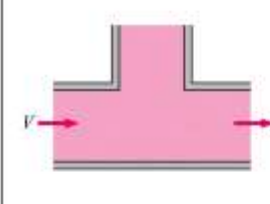
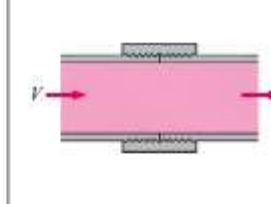
Genişleme ($\theta = 20^\circ$ için):
 $d/D = 0.2$ için $K_K = 0.30$
 $d/D = 0.4$ için $K_K = 0.25$
 $d/D = 0.6$ için $K_K = 0.15$
 $d/D = 0.8$ için $K_K = 0.10$



Daralma:
 $\theta = 30^\circ$ için $K_K = 0.02$
 $\theta = 45^\circ$ için $K_K = 0.04$
 $\theta = 60^\circ$ için $K_K = 0.07$



TABLO 04 (Devam)

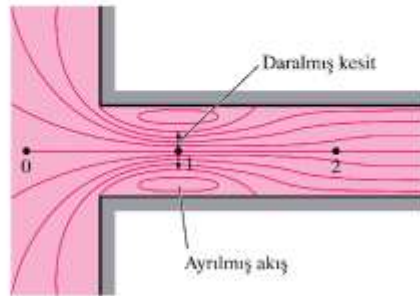
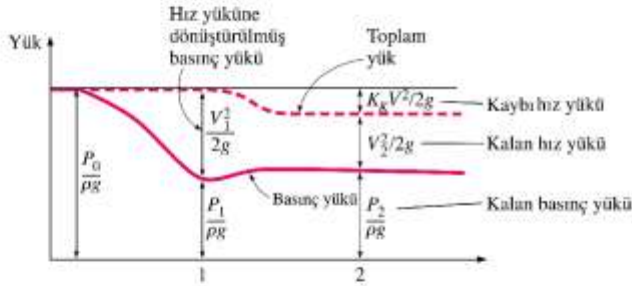
<p><i>Dönüşler ve Dallanmalar</i> 90° düzgün dönüş Flanşlı: $K_K = 0.3$ Diş açılmış: $K_K = 0.9$</p> 	<p>90° köşe dönüş (kanatsız): $K_K = 1.1$</p> 	<p>90° köşe dönüş (kanatlı): $K_K = 0.2$</p> 	<p>45° diş açılmış dirsek $K_K = 0.4$</p> 
<p>180° tam dönüş Flanşlı: $K_K = 0.2$ Diş açılmış: $K_K = 1.5$</p> 	<p>T (dallanan akış): Flanşlı: $K_K = 1.0$ Diş açılmış: $K_K = 2.0$</p> 	<p>T (düz akışlı): Flanşlı: $K_K = 0.2$ Diş açılmış: $K_K = 0.9$</p> 	<p>Diş açılmış rakor $K_K = 0.08$</p> 

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 : $K_K = 2$

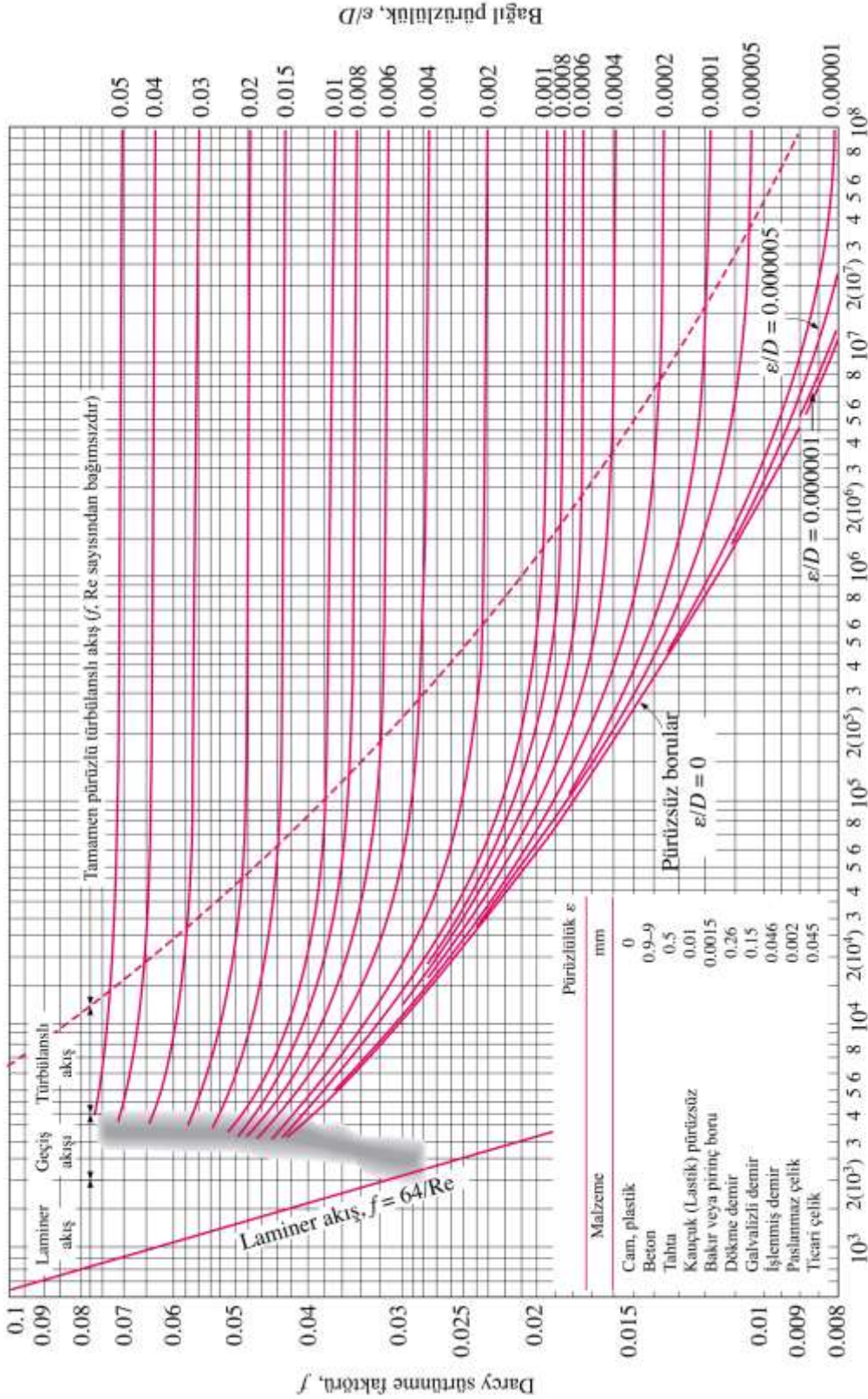
Sürgülü vana, tam açık: $K_K = 0.2$
 $\frac{1}{4}$ kapalı: $K_K = 0.3$
 $\frac{1}{2}$ kapalı: $K_K = 2.1$
 $\frac{3}{4}$ kapalı: $K_K = 17$

¹ 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.



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

Kaynak: Çengel YA, Cimbala JM, "Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları", Çeviri Editörü: T. Engin, Güven Bilimsel, 2008.



ŞEKİL 02

Yük kaybı bağıntısı $h_k = f \frac{L V^2}{D 2g}$ 'de kullanılmak üzere dairesel borulardaki tam gelişmiş akışa ait sürtünme faktörü için Moody diyagramı. Türbülanslı akıştaki sürtünme faktörleri, Colebrook denklemi $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$ 'nden elde edilmiştir.

Kaynak: Çengel YA, Cimbala JM, "Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları", Çeviri Editörü: T. Engin, Güven Bilimsel, 2008.