

5. BORULARDAKİ VİSKOZ (SÜRTÜNMELİ) AKIM

5.6. Moody Diyagramı

Akışkanlar boru içerisinde iletilirken gerek viskoziteden ve gerekse sürtünmeden kaynaklanan bir basınç düşümü ya da yük kaybı meydana gelir. laminar akımda basınç düşümü tamamen viskozitenin etkisindeyken türbülans akımda basınç düşümünü akışkan hızı (V), boru çapı (D), boru uzunluğu (L), boru iç yüzey pürüzlülüğü (k), viskozite (μ) ve özgül kütle (ρ) etkilemektedir (Munson 1994).

$$\Delta P = \phi(V, D, L, k, \mu, \rho)$$

Türbülans akımda boru iç yüzeyine bitişik olan çok ince tabakaya viskoz alt tabaka (bölge) dendiğini biliyoruz. Bu tabaka kalınlaştıkça boru iç yüzeyindeki yüksekliği k olan pürüzlerin basınç düşümüne etkisi azalır. Viskoz alt tabaka kalınlığı (δ_s), Re sayısı arttıkça azalmaktadır. Viskoz alt tabakanın kalınlığının azalmasıyla iç yüzeydeki pürüzler bu tabakanın dışına çıkmakta ve basınç düşümünü etkilemektedir. Viskoz alt tabakanın kalınlığına göre 3 durum vardır.

a) Birinci durumda sınır tabakası pürüzleri tamamen örtmekte ve pürüzler akımı etkilememektedir. Bu akıma hidrolikçe düzgün akım, böyle boru duvarına hidrolik cilalı cidar adı verilmektedir. Borularda basınç düşümünün hesaplanmasında kullanılan sürtünme katsayısı (f) şu bağıntıyla hesaplanabilmektedir (Sığiner ve Sümer 1995, Çengel ve Cimbala 2008).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2. \log \left(\frac{Re \sqrt{f}}{2,51} \right) = 2. \log(Re \sqrt{f}) - 0,8$$

Bu durumda borunun iç yüzey mutlak pürüzlülüğü sıfır ($k=0$) kabul edilmektedir. Eğer viskoz alt tabakanın kalınlığını $\delta_s = 5. \frac{\nu}{u_*}$ alırsak burada $k < 5. \frac{\nu}{u_*}$ ya da daha genel ifadeyle $k < \delta_s$ 'dir. Sürtünme katsayısı doğrudan Re ile orantılıdır.

b) İkinci durumda akımın Re sayısı arttıkça viskoz alt tabakanın kalınlığı azalır ve boru iç yüzeyindeki pürüzlerin akıma olan etkisi artar. Bu tip akıma hidrolikçe pürüzlü akım denir. Hidrolikçe pürüzlü akımda sürtünme katsayısı (f), bağıl pürüzlülük adını alan (D/k) ile orantılıdır. f katsayısının hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılabilir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2. \log(3,71D/k) = 2. \log(D/k) + 1,14$$

Bu koşulda mutlak pürüzlülüğün $k > 70 \frac{\nu}{u_*}$ olduğu söylenmektedir (Karahan 1986).

c) Üçüncü durumda yukarıda açıklanan iki sınır arasında bir geçiş bölgesi bulunmaktadır. Geçiş bölgesinde sürtünme katsayısı (f); (Re) sayısı ve (k/D) bağıl pürüzlülük değerlerine bağlı olarak hesaplanır (Çengel ve Cimbala 2008, White 2012).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{f}} + \frac{k}{3,71D} \right)$$

Bu bölgede mutlak pürüzlülük $5 \frac{g}{u_*} < k < 70 \frac{g}{u_*}$ ilişkisi vardır (Karahan 1986).

Geçiş bölgesini tam pürüzlü bölgeden ayıran ve Moody diyagramında kesik çizgilerle gösterilen eğrinin denklemi ise şu şekilde yazılır.

$$Re\sqrt{f} \cdot \frac{k}{D} = 200$$

Yatay borularda basınç düşümünün hesaplanmasında hem laminar ve hem de türbülans akımda aşağıdaki bağıntı kullanılabilir.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

- ΔP : İki nokta arasındaki basınç düşümü (Pa),
 f : Sürtünme katsayısı (-),
 L : İlgili boru uzunluğu (m),
 D : Boru çapı (m),
 ρ : Akışkanın özgül kütlesi (kg/m³),
 V : Akışkanın hızıdır (m/s).

Eğer basınç düşümünü $\Delta P = P_1 - P_2 = \gamma \cdot h_L$ ile gösterirsek hem yatay ve hem de düşey borular için laminar ve türbülans akımda yük kaybı aşağıdaki biçimi alır ve *Darcy-Weisbach* denklemi olarak bilinir (Hicks ve Hicks 1985, Karahan 1986, Özcan 2006, McDonough 2009, White 2012).

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

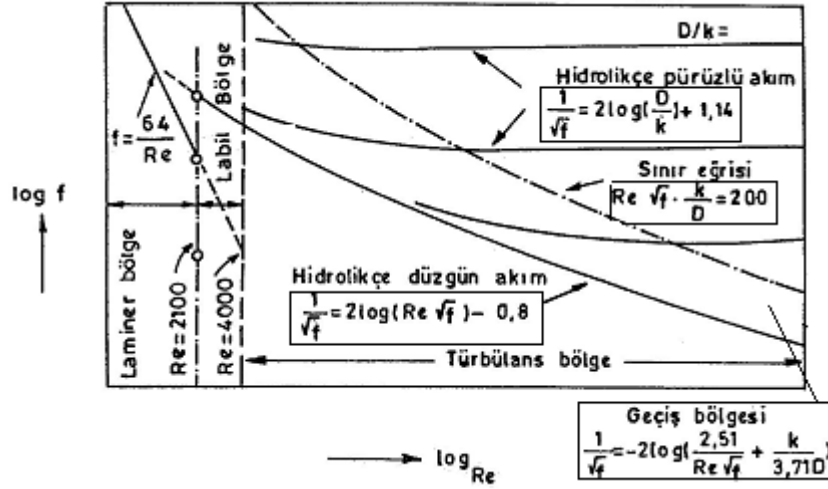
h_L : Yük kaybı (m)'dir.

Non-Newtoniyen akışkanlarda da yük kaybı Darcy-Weisbach denklemi ile bulunabilir. Ancak Reynolds Sayısını bulurken daha önce verilen

$$Re = \frac{8(V^{2-n})(D/2)^n \rho}{K \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$
 eşitliğinin kullanılması gerekir (Toledo 1991).

Türbülans akımda f 'nin hesaplanması oldukça zordur. Re ve bağıl pürüzlülüğe k/D göre f 'yi veren Moody diyagramı; daha önce Prandtl, Von Karman, Nikuradse, White ve Colbrook tarafından geliştirilen çalışmaları kapsayan çok faydalı bir yöntemi içermektedir. Moody diyagramının şematik resmi Şekil 5.10'da, genişletilmiş şekli ise Şekil 5.11'de verilmiştir. Moody diyagramında Re sayısına bağlı olarak 4 bölge vardır.

Laminar Akış Bölgesi: Bu bölgede Re sayısı 2100'den küçüktür. Bağıl pürüzlülük (k/D) ne olursa olsun sürtünme katsayısını (f) veren eğri düzdür. Bu bölgede f değeri $f = 64/Re$ ile hesaplanır.



Şekil 5.10. Moody diyagramının şematik resmi (Tezer 1978)

Kritik Bölge: Bu bölgede Re sayısı 2100 ila 4000 arasındadır. Sürtünme katsayısının elde edilmesinde belirli bir formül yoktur.

Geçiş Bölgesi: Bu bölgede $Re > 4000$ 'dir ve f değeri hem (Re)'nin ve hem de (k/D)'nin fonksiyonudur. Bu bölgede her bağıl pürüzlülük değeri için bir eğri vardır. Bağıl pürüzlülük arttıkça sürtünme katsayısı ve dolayısıyla sürtünme miktarı da artmaktadır. Bu bölgede her bir bağıl pürüzlülük değerine ait eğriler önce alçalarak gitmekte ve (Re)'nin belirli bir değerinden sonra yatay bir durum aldığı görülmektedir. İşte eğrilerin yataylaşmaya başladıkları noktaları birleştiren kesikli çizgi ile bu bölge tam türbülanslı akım bölgesinden ayrılmıştır. Bu iki bölge arasında belirgin bir ayırım çizgisi bulunmamaktadır. Hidrolikçe cilalı borular ya da düz borular için;

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2. \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0,8$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2. \log\left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} + \frac{k}{3,71.D}\right) \text{ düz boru eğrisi ile kesikli çizgi arası için;}$$

$\text{Re} \cdot \sqrt{f} \cdot (k/D) = 200$ kesikli sınır eğrisi için eşitlikleri kullanılabilir. Yine bu bölgede $\text{Re} < 10^5$ ve düz boru ise (hidrolikce cilalı boru) şu formül kullanılabilir (Giles 1980, Streeter ve Wylie 1983, Ilgaz vd. 1993, Soğukoğlu 1995, Sümer vd. 1995, Krause 2005).

$$f = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}$$

Tam Türbülanslı Akım Bölgesi: Dördüncü bölgedir. Bu bölgede $\text{Re} > 4000$ dir. Her bir bağıl pürüzlülük değerine ait eğrilerin yataylaştıktan sonraki kısımlarını içerisine alan bir bölgedir ve bundan önceki bölgeden kesikli çizgi ile ayrılmıştır. Eğriler yatay olduğundan sürtünme katsayısı (f) Re'ye bağlı olmamakta yalnızca bağıl pürüzlülüğe (D/k) bağlı olmaktadır. Tam türbülanslı akım bölgesinde aşağıdaki bağıntı kullanılabilir

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2. \log\left(\frac{D}{k}\right) + 1,14$$

Yine Moody diyagramında $10^{-6} < \frac{k}{D} < 10^{-2}$ ve $5000 < \text{Re} < 10^8$ ise

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left[\left(\frac{k}{3,7.D} \right) + \left(\frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right] \right]^2}$$

formülü kullanılabilir (Streeter ve Wylie 1983). Swamee ve Jain 1976 yılında %2 yanılma payıyla aşağıdaki formülleri önermişlerdir (Çengel ve Cimbala 2008).

$(10^{-6} < \frac{k}{D} < 10^{-2})$ ve $(3000 < \text{Re} < 3 \times 10^8)$ koşulu için;

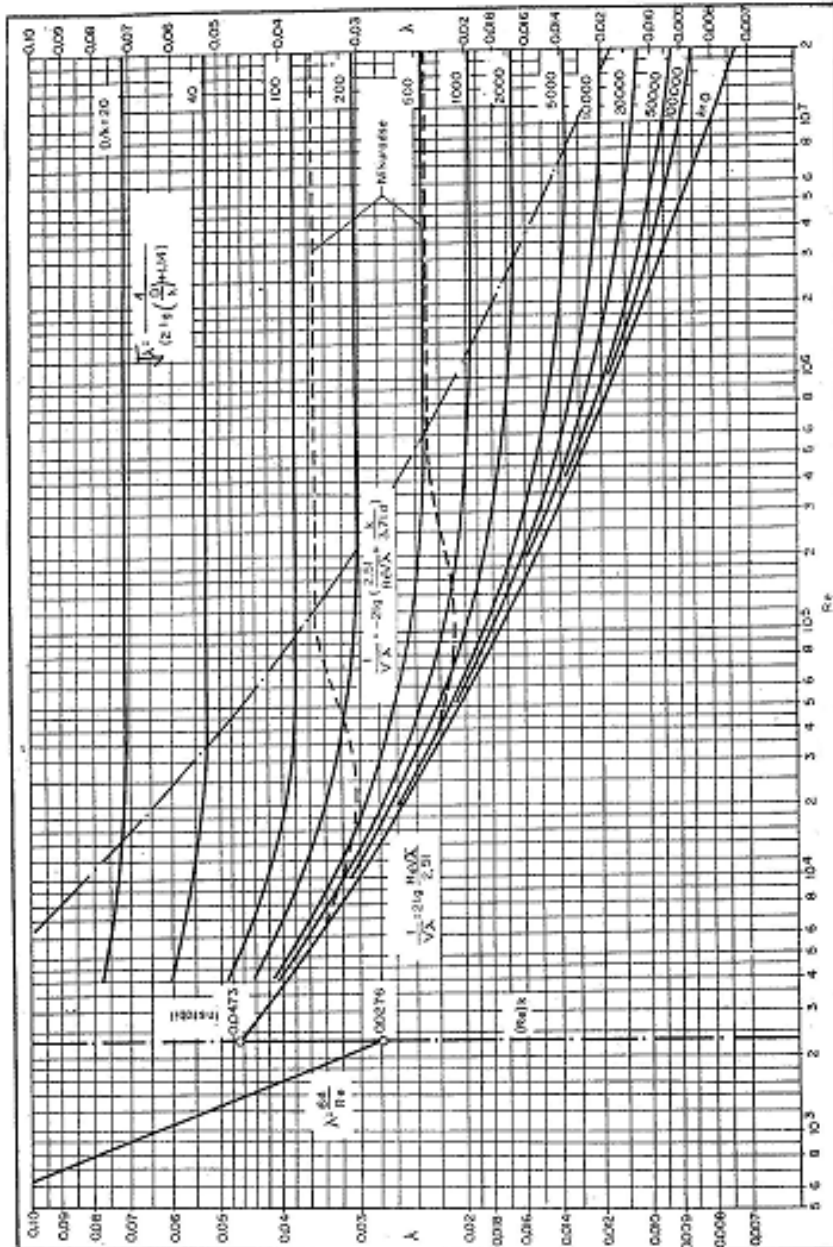
$$h_L = 1.07 \frac{Q^2 L}{g D^5} \left[\ln \left(\frac{k}{3.7D} + 4.62 \left(\frac{\nu D}{Q} \right)^{0.9} \right) \right]^{-2}$$

$$\text{Re} > 2000 \text{ koşulu için } Q = -0.965 \left(\frac{g D^5 h_L}{L} \right)^{0.5} \ln \left[\frac{k}{3.7D} + \left(\frac{3.17 \nu^2 L}{g D^3 h_L} \right)^{0.5} \right]$$

$(10^{-6} < \frac{k}{D} < 10^{-2})$ ve $(5000 < Re < 3 \times 10^8)$ koşulu için

$$D = 0.66 \left[k^{1.25} \left(\frac{LQ^2}{gh_L} \right)^{4.75} + \nu Q^{9.4} \left(\frac{L}{gh_L} \right)^{5.2} \right]^{0.04}$$

formülleri yazılabilir.



Şekil 5.11. Moody diyagramı (Tezer 1978) (Moody diyagramı kararlı, tam gelişmiş ve sıkıştırılmaz akışkanlar için geçerlidir. Ancak $Ma = \frac{V}{C} \leq 0.3$ koşulunda ya da yaklaşık hava hızının $V \leq 100 \text{ m/s}$ olduğu durumda hava için de kullanılabilir.) Moody diyagramı ile kullanmak üzere değişik boruların mutlak pürüzlülük değerleri (k) Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Boruların mutlak pürüzlülük değerleri (McDonough 2009)

Boru tipi	Mutlak pürüzlülük (k, mm)
Çeşitli perçinli çelik	0.9-9.0
Beton	0.3-3.0
Ahşap (oyma ağaç)	0.18-0,9
Dökme demir	0,26
Galvanizli demir	0,15
Çelik ve dövme demir	0,045
Çekme çelik, pirinç, kurşun	0,0015
Cam, plastik	0-0.0015

5.7. Şekil (yersel) Kayıpları

Uzun düz borularda sürtünme katsayısını Moody diyagramından bularak sürtünme kaybı kolayca hesaplanabilir. Bir de borularda, akımın yön ve hız değiştirdiği yardımcı boru parçaları vardır. Bu boru parçalarındaki yük kayıplarının hesabı bazen çok önemli olabilir. Dirsek, vana, T-parçası, süzgeç, dip ve geri tepme klapesi gibi yardımcı boru parçalarında meydana gelen kayıplara şekil ya da ikincil ya da yersel yük kayıpları denir ve aşağıdaki genel bağıntıdan hesaplanabilir (Karahana 1986, Özcan 2006, Ilgaz vd. 1993).

$$h_f = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

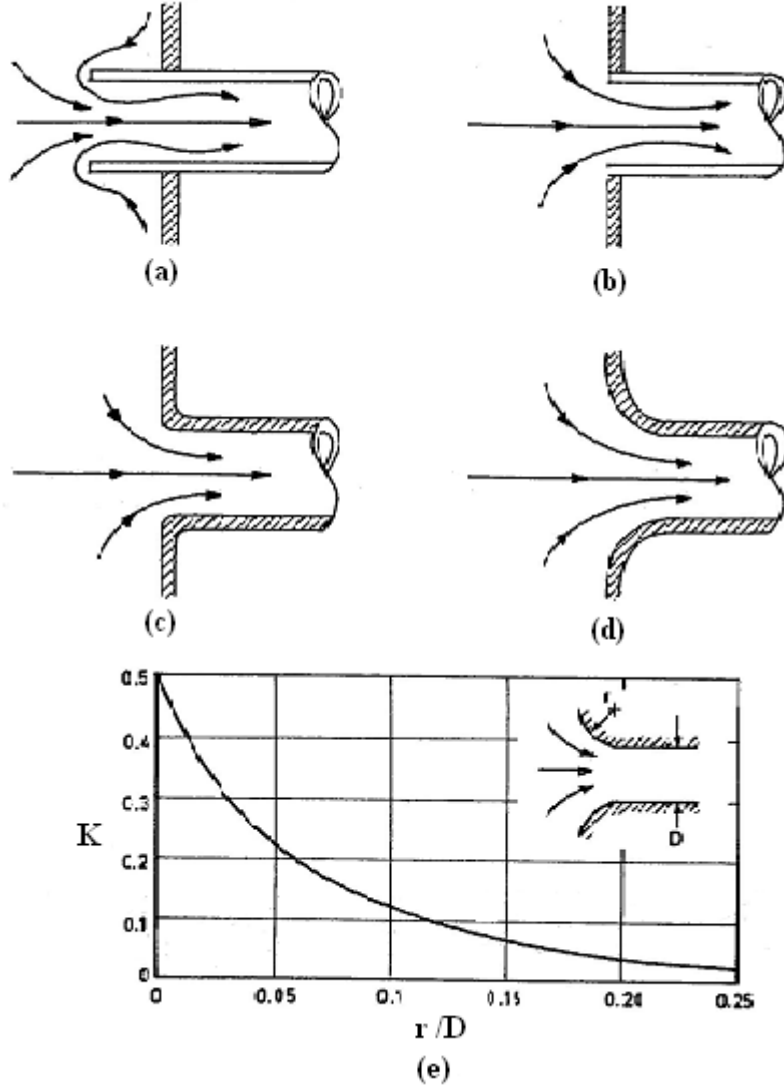
h_f : Şekil kaybı (m),
 K : Şekil katsayısı (-),
 V : Akışkan hızı (m/s)
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ dir.

Şekil katsayısı yardımcı boru parçasının geometrisine ve akımın özelliklerine (Re) bağlıdır ($K = \Phi(\text{geometri}, Re)$). Şekil kayıpları bazen eşdeğer boru boyu ($L_{eş}$) olarak verilir. Eşdeğer boru boyu, boru parçası ile aynı ölçü ve malzemede ve boru parçasının belli bir verdi değeri için meydana getireceği yük kaybına eşit değerde yük kaybı meydana getiren düz boru uzunluğudur (McDonough 2009).

$$L_{es} = \frac{K.D}{f}$$

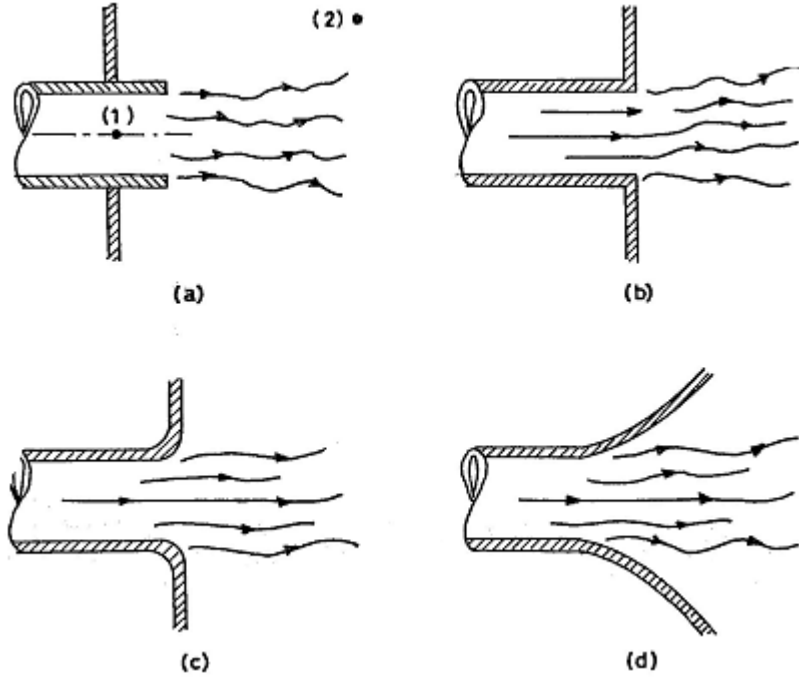
L_{es} : Eşdeğer boru boyu (m),
K : Şekil katsayısı,
D : Boru çapı (m),
f : Sürtünme katsayısıdır.

Eğer şekil kayıpları eşdeğer boru boyu olarak verilirse bu eşdeğer boru boyu toplam düz boru boyuna eklenerek Darcy-Weisbach formülünden yük kaybı bulunur. Şekil katsayısı, bir depodan su almak amacıyla borunun depoya bağlandığı Şekil 5.12'de verilen girişler için borunun depoya girdiği durum da (içerlek) $K= 0,8$, keskin kenarlı girişte (köşeli) $K= 0,5$, hafif yuvarlatılmışta $K= 0,2$ ve tam yuvarlatılmışta $K= 0,04$ alınabilir. Ayrıca şekil katsayısı r/D oranına bağlı olarak da bulunabilir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Girişler ve r/D oranına bağlı şekil katsayıları (a: iççerlek $K= 0.8$, b: köşeli $K= 0.5$, c: hafif yuvarlak $K= 0.2$, d: tam yuvarlak $K= 0.04$, e: r/D oranına bağlı şekil katsayıları) (Munson vd. 1994, Çengel ve Cimbala 2008)

Çıkış yük kaybı, akışkan borudan bir depoya geçiyorsa meydana gelir (Şekil 5.13). Bu gibi durumlarda borudan depoya geçen akışkanın son hızı ($V_2= 0$) sıfır olur. Şekil 5.13'deki çıkışlarda $K=1$ alınabilir.

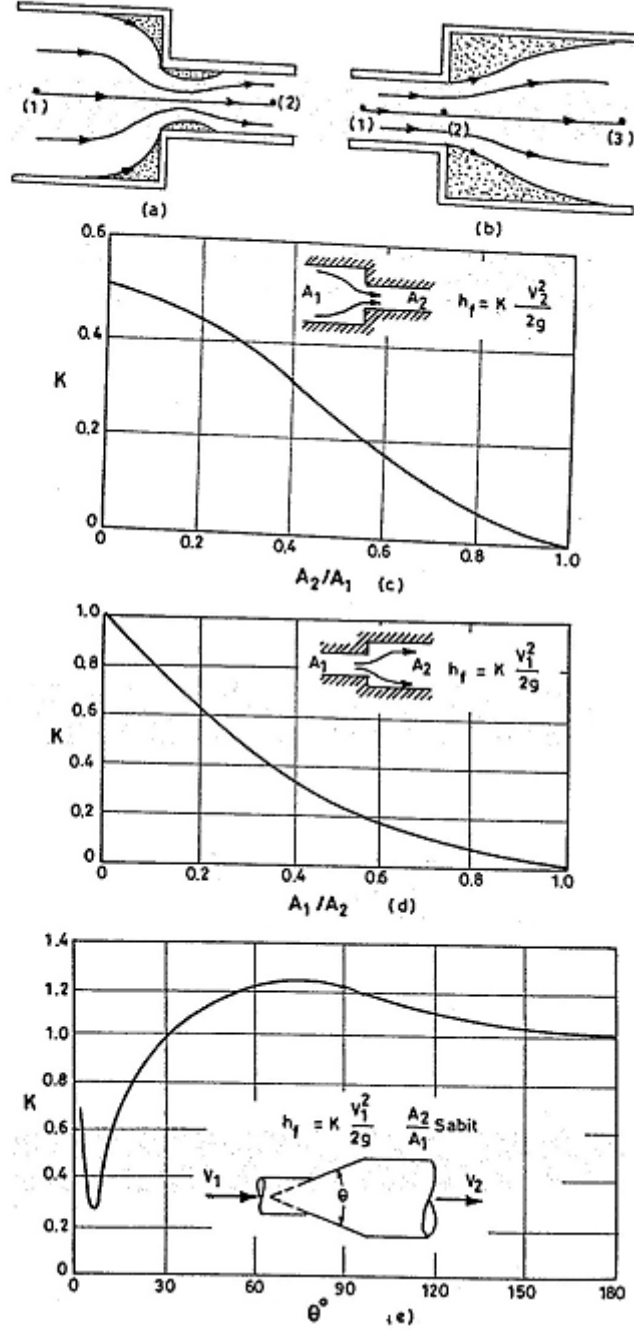


Şekil 5.13. Çıkışlar (Tüm koşulda $K= 1$ alınacaktır, a: iççerlek, b: köşeli, c: hafif yuvarlak, d: tam yuvarlak) (Munson vd. 1994)

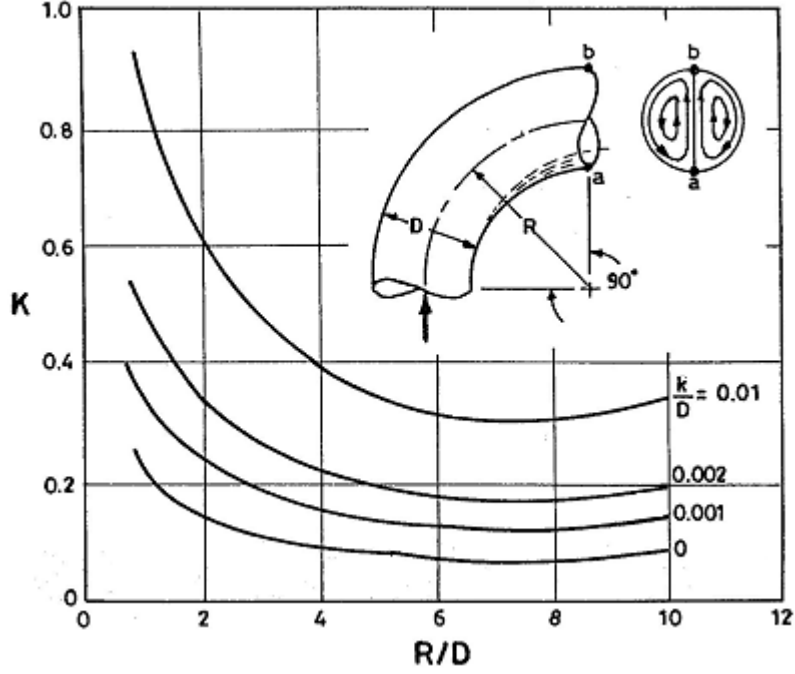
Borunun çapında meydana gelen değişiklikler de şekil kayıplarına neden olurlar. Borudaki daralma ve genişlemeler (Şekil 5.14) akışın hızını değiştirirler ve türbülans oluştururlar. Borularda daralma ve genişleme şekil kayıpları Şekil 5.14'den yararlanarak bulunabilir.

Düz borularda dirsekler büyük yük kayıplarına neden olurlar. Şekil 5.15'de görülen 90°'lik dirsekteki şekil katsayıları R/D (eğrilik yarıçapı/boru çapı)'ye bağlı olarak verilmiştir. Prigott 90°'lik dirsekler için

$$K= 0,106(R/D)^{-2.5} + 2000 \cdot f^{2.5} \text{ bağıntısını vermiştir}$$



Şekil 5.14. Boruda çap değişikliği nedeniyle oluşan kayıplar (a: ani daralma, b: ani genişleme, c: ani daralma şekil katsayıları, d: ani genişleme şekil katsayıları, e: düzgün genişleme şekil katsayıları) (Munson vd. 1994)



Şekil 5.15. 90°'lik dirsek ve şekil katsayıları (R: eğrilik yarıçapı, k: borunun mutlak pürüzlülüğü, D: boru çapıdır) (Munson vd. 1994)

Dirsek, T-parçası ve vanalardaki şekil katsayıları çizelge 5.2'deki gibi özetlenebilir.

5.8. Dairesel Olmayan Borulardaki Kayıplar

Uygulamada karşılaştığımız borular çoğunlukla dairesel kesit alanlıdır. Ancak daireden başka dikdörtgen, elips, üçgen, halka kesiti v.b borulara da sık sık rastlanmaktadır. Kayıp yönünden borulardan aynı kesit alanının en küçük çevreyle sağlanması istenir. Böylece sürtünme kayıplarına neden olan çeper yüzeyi azaltılmış olur. Yüzey alanları aynı olan geometrik şekillerden çevresi en küçük olan dairedir. Dolayısıyla daire kesitli boruların en az kayba sebep olmaları gerekir. Herhangi bir borudaki kayıpları Darcy-Weisbach eşitliğinden bulabilmek için hidrolik yarıçap tanımlanır. Hidrolik yarıçap ve hidrolik çap boru kesit alanının ıslak çevreye oranı olarak tarif edilir ve aşağıdaki şekilde formülize edilebilir (İlgaz vd.1993, Özcan 2006).

$$R = \frac{\text{Kesit alanı}}{\text{Islak çevre}} = \frac{A}{\zeta} \quad \text{Hidrolik çap: } 4R = D_h = \frac{4A}{\zeta}$$

Çizelge 5.2. Yardımcı boru parçalarında şekil katsayıları (K) (Munson vd. 1994)

Boru parçası	Şekil katsayısı	Boru parçasının şekli
a) Dirsekler		
Flanşlı normal (90°)	0,3	
Vidalı normal (90°)	1,5	
Flanşlı deve boynu (90°)	0,2	
Vidalı deve boynu (90°)	0,7	
Flanşlı deve boynu (45°)	0,2	
Vidalı normal ((45°)	0,4	
b) Bükülmeler		
Flanşlı 180° geriye bükülmeli	0,2	
Vidalı 180° geriye bükülmeli	1,5	
c) T-parçaları		
Flanşlı ana hat akımı	0,2	
Vidalı ana hat akımı	0,9	
Flanşlı kol akımı	1,0	
Vidalı kol akımı	2,0	
d) Vidalı birleşik	0,08	
e) Vanalar		
Tam açık tablalı (küresel) vana	10	
Tam açık açılı vana	2	
Tam açık sürgülü vana	0,15	
¼ Kapalı sürgülü vana	0,26	
½ Kapalı sürgülü vana	2,1	
¾ Kapalı sürgülü vana	17	
İleri akışlı mafsalı vana	2	
Seri akışlı mafsalı vana	∞	
Tam açık bilyeli vana	0,05	
1/3 Kapalı bilyeli vana	5,5	
2/3 Kapalı bilyeli vana	210	

Hidrolik yarıçap daire için $R = (\pi D^2 / 4) / (\pi D) = D / 4$ ve hidrolik çap $D = 4R$ bulunur (Edis 1972b, Krause 2005, Çengel ve Cimbala 2008, McDonough 2009). Dolayısıyla Darcy-Weisbach eşitliğinde D yerine 4R konularak herhangi bir boru için (dairesel boru dahil) sürtünme kaybı eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$h_L = f \cdot \frac{L}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Öte yandan Re sayısı ve bağıl pürüzlülük de hidrolik yarıçapa bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilebilirler (Edis 1972b, Sümer vd. 1995, McDonough 2009).

$$Re = \frac{4R \cdot V}{\nu}$$

$$\epsilon = \frac{k}{4R}$$

Eşitliklerde;

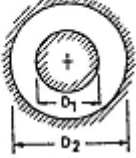
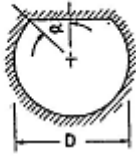
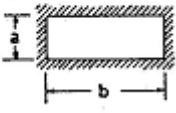
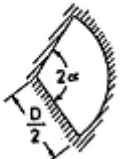
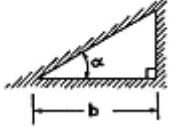
- A : Alan (m²),
- Ç : Islak çevre (m),
- R : Hidrolik yarıçap (m),
- L : Boru boyu (m),
- D : Boru çapı (m),
- V : Hız (m/s)
- ν : Kinematik viskozite (m²/s),
- k : Mutlak pürüzlülük (m),
- ϵ : Bağıl pürüzlülük (-),
- h_L : Sürtünme kayıpları (m)'dir.

Laminer akımda sürtünme kayıplarının hesaplanmasında kullanılan sürtünme katsayısı değeri;

$$f = \frac{C}{Re}$$

eşitliğiyle bulunur (Munson vd. 1994). Formüldeki C katsayısı değeri borunun şekline ve Re sayısına bağlıdır. Değişik geometrik şekiller için C değerleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Laminer akımda dairesel olmayan borulardaki sürtünme katsayıları (Munson vd. 1994, Çengel ve Cimbala 2008)

Sekiller	Parametre	C= f.Re
<p>I. Dairesel halka</p> $4R = D_2 - D_1$ 	D_1/D_2 0,0001 0,01 0,1 0,6 1,00	71,8 80,1 89,4 95,6 96,0
<p>II. Daire parçası</p> $4R = D \left[1 + \frac{\sin(2\alpha)}{2(\pi - \alpha)} \right]$ 	α (derece) 0 60 90 120 180	64 63,3 63,1 62,8 62,2
<p>III. Dikdörtgen</p> $4R = \frac{2ab}{a + b}$ 	a/b 0 0.05 0.01 0.25 0.50 0.75 1.00	96,0 89,9 84,7 72,9 62,2 57,9 56,9
<p>IV. Daire parçası</p> $4R = \frac{\alpha}{1 + \alpha} D$ 	α (derece) 0 30 60 90	48 56,7 60,8 63,1
<p>V. Dik üçgen</p> $4R = \frac{2b \sin \alpha}{(1 + \sin \alpha + \cos \alpha)}$ 	α (derece) 0 10 20 30 40 45	48,0 49,9 51,2 52,0 52,4 52,5

5.9. Sürtünme Kayıplarının Amprik (Deneysel) Formüllerle Hesaplanması

Sürtünme katsayısının (f) hıza bağımlı olması ve çözüm için deneme-tekrar yönteminin gerekliliği karışık boru sistemlerinde Darcy-Weisbach formülünün kullanımında büyük sıkıntılara ve işlemlerin uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle su için geliştirilen bazı deneysel formüller pratik hesaplamalarda oldukça faydalar sağlamaktadır. Bu deneysel formüllere üslü formüller de denmektedir. Bugün en çok kullanılan amprik eşitlikler;

$$V = C.R^\alpha . I^\beta$$

şeklinde olanlardır. Burada; V ortalama hızı, C pürüzlülük katsayısı, R hidrolik yarıçapı ve I borunun birim boyunun yük kaybını göstermektedir. Bu eşitliklerde boru cinsine bağlı olan C katsayısı Reynolds sayısından bağımsız olduğundan deneme ve tekrar yoluyla hesap güçlüğü ortadan kaldırılmıştır. Bugün için en güvenilir şekilde kullanılan eşitlikler Chezy, Manning, Williams-Hazen ve Blair'dir (Tezer 1978).

Chezy formülünde sürtünme kaybı;

$$h_L = \frac{V^2 \cdot L}{C^2 \cdot R}$$

ile bulunur. Burada;

- h_L : Sürtünme kaybı (m),
- V : Akışkanın ortalama hızı (m/s),
- L : Boru uzunluğu (m),
- C : Chezy katsayısıdır.

Chezy katsayısı Ganguillet ve Kutter tarafından geliştirilen aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunabilir (Tezer 1978).

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{I} + \frac{1}{N}}{1 + \frac{N}{R^{0,5}} \cdot \left(23 + \frac{0,00155}{I} \right)}$$

N pürüzlülük katsayısı çimento kaplı boru veya düz ahşap boru için 0,010, yeni çelik çekme boru için 0,011, beton boru için 0,012, çıplak döküm boru için 0,013 ve perçinli çelik boru için 0,014 alınabilir. Yeni döküm boruda Chezy katsayısı;

$$C = \frac{100\sqrt{R}}{0,25 + \sqrt{R}} \text{ ile bulunur (Tezer 1978).}$$

Manning formülü özellikle açık su yollarında, tünellerde ve büyük çaplı borularda iyi sonuç vermektedir. Bu formülde yük kaybı;

$$h_L = \left[\frac{V}{n.R^{2/3}} \right]^2 .L$$

Burada;

h_L : Yük kaybı (m),
 V : Ortalama hız (m/s),
 L : Boru uzunluğu (m/s),
 n : Katsayı (-).

Katsayı (n), yeni döküm boruda 94, eski döküm boruda 54, yeni kaplanmış döküm boruda 114, eski kaplanmış döküm boruda 94, perçinli çelik boruda 70, perçinsiz çelik boruda 90, plastik borularda 143, cilalı asbest boruda 84, normal asbest boruda 67, beton boruda 77, kanalizasyon borularında 91, toprak künkerlerinde 40 alınabilir (Tezer 1978).

Büyük boru çaplarında en güvenilir amprik formüllerden birisi olan Williams-Hazen formülünde yük kaybı;

$$h_L = \left[\frac{V}{0,85.W.R^{0,63}} \right]^{1/0,54} .L$$

ile hesaplanır (Karahan 1986). Burada; W Katsayısı çizelge 5.4'den alınabilir.

Çizelge 5.4. Williams Hazen formülü için W katsayıları (Ayyıldız 1983)

Boru cinsi	W-katsayısı
Plastik borular	150
Yeni asbest borular	140
Yeni dökme demir borular	130
10 yıl kullanılmış dökme demir borular	110
20 yıl kullanılmış dökme demir borular	80
30 yıl kullanılmış dökme demir borular	50
Yeni sırlı künk	114
Eski sırlı künk	97
Yeni kaynaklı çelik borular	140
Eski kaynaklı çelik borular	120
Enine perçinli çelik borular	130
Enine ve boyuna perçinli çelik borular	115
Bakır, kurşun, pirinç borular (küçük çaplı):	
düz ve içi cilalı	140
eski paslanmış	80
hurda	60
Yeni ve cilalı çimento borular	140
Beton borular	120

Williams-Hazen formülü 5 cm'den daha büyük boru çapları ve ortalama hızın 3 m/s'den daha küçük değerleri için olumlu sonuçlar vermektedir.

J.S. Blair tarafından 1949'da geliştirilen Blair formülleri boru tipine göre 4 sınıf altında toplanmıştır. Her boru tipi için ayrı üs değerleri kullanılmıştır. Hangi borunun hangi sınıfa girdiği çizelge 5.5'de görülmektedir. Sınıflarına göre çeşitli borulardaki sürtünme kayıplarının hesaplanması aşağıdaki formüllerle bulunabilir (Tezer 1978).

$$\text{I. Sınıf borularda; } h_L = \left[\frac{V}{194,5.R^{0,71}} \right]^{1/0,57} .L$$

$$\text{II. Sınıf borularda; } h_L = \left[\frac{V}{154,1.R^{0,69}} \right]^{1/0,55} .L$$

$$\text{III. Sınıf borularda; } h_L = \left[\frac{V}{133,4.R^{0,68}} \right]^{1/0,54} .L$$

$$\text{IV. Sınıf borularda; } h_L = \left[\frac{V}{107,3.R^{0,67}} \right]^{1/0,52} .L$$

Çizelge 5.5. Blair formülleri için boru tipleri (Tezer 1978).

Boru cinsi	Sınıfı
Teknik olarak pürüzsüz, cam, kurşun, bakır, plastik, alüminyum gibi malzemeden çekme yoluyla elde edilen borular.	I
Çıplak çelik, yumuşak demir, asbestli çimento (etermit, everit v.b), püskürtme bitüm astarlı borular.	II
Bitüm kaplı çelik borular, beton borular (çimento kaplı veya püskürtme olarak imal edilmiş).	III
Galvaniz borular (sıcak doldurma veya elektroliz yöntemle kaplanmış), savurma veya düşey döküm borular, bitümle kaplanmış döküm borular	IV

Blair formüllerinde yalnızca boru sınıfının seçilerek hesaplama yapılması uygulamada kolaylıklar sağlamaktadır. Boruların sınıflandırılması boru mutlak pürüzlülüğüne göredir ve daha geniş uygulama alanı bulmaktadır. Blair formüllerinden yararlanılarak nomagramlar da geliştirilmiştir.