



**ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**MM302
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ LABORATUARI DERSİ**

BORULARDA BASINÇ KAYBI VE SÜRTÜNME DENEYİ

**Hazırlayan
Yrd.Doç.Dr. Mustafa ÖZBEY**

SAMSUN

BORULARDA BASINÇ KAYBI VE SÜRTÜNME DENEYİ

DENEYİN AMACI:

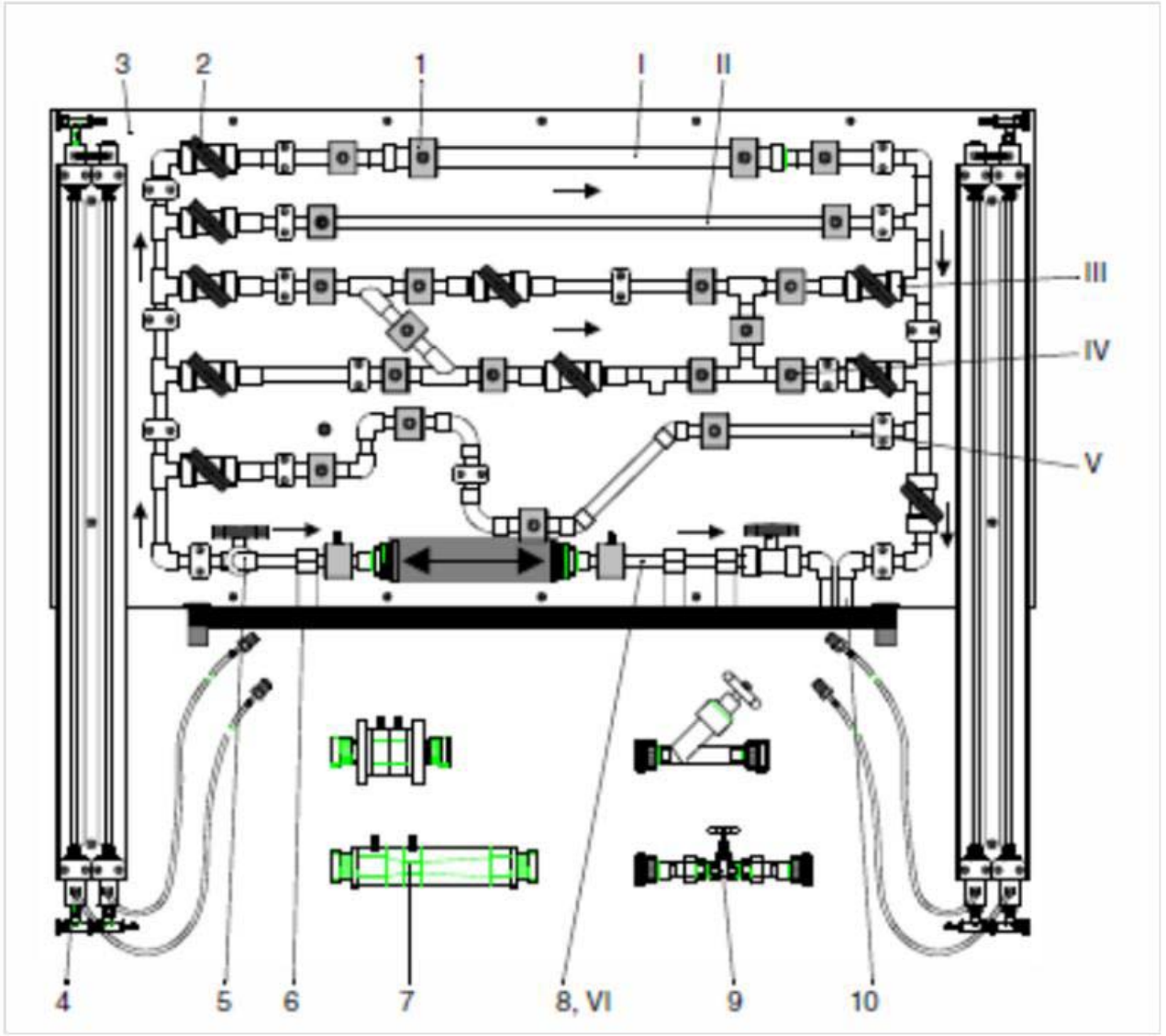
Boru akımlarında sürtünmeye ve değişik boru elemanlarının sebep olduğu yerel dirence bağlı basınç kayıplarının deneysel olarak ölçülmesi ve sürtünme faktörü ile yerel kayıp katsayılarının belirlenmesidir.

DENEY KAPSAMI:

Genel olarak Bernoulli denkleminin uygulamalarını içermektedir. Boru ve elemanların giriş-çıkış kesitlerinde manometre yardımıyla statik basınçlarının ölçülmesini; farklı pürüzlülükteki borularda sürtünmeye bağlı ve değişik boru elemanlarının (branşman, dirsek, vana, T bağlantı elemanları, redüksiyon vb.) meydana getirdiği dirence bağlı yerel basınç kayıplarının belirlenmesini; sürtünme faktörünün ve yerel kayıp katsayılarının belirlenmesini kapsamaktadır. Bunların yanında hacimsel debi ölçümü, ortalama akım hızı ve Reynolds sayısı belirlenmesini de içermektedir.

DENEY DÜZENEGİ:

Deney düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 1'de verilmiştir. Deney düzeneği temel olarak santrifüj pompa, hız kontrol cihazı, elektromanyetik debimetre ve tesisattan oluşan kapalı bir sistemdir. Deney düzeneğinin içerdiği tesisat elemanları Tablo 1'de açıklamalı olarak verilmiştir. Deney düzeneğinde bulunan tesisat elemanları: düz boru, genişleyen ve daralan kesitli boru, çeşitli dirsekler, branşmanlar, muhtelif vanalar ve bağlantı elemanları. Bunlara ilaveten 2 farklı vana, birer ventüri, orifis ve lüle bulunmaktadır, fakat bunlar birbiri yerine değişmeli kullanılabilir. Deney düzeneği Şekil 1'de gösterildiği gibi 6 ana hattan oluşmaktadır. Sistemi oluşturan tesisat elemanları boru iç çapı 17 mm'dir, sadece I nolu hattaki daralma ve genişleme kesitleri bulunan boru iç çapı 28,4 mm'dir. Sisteme giriş tek hattan olup, ilk girişte 2'ye ayrılmaktadır. Bunlardan biri VI numaralı hattı, yani vana, ventüri, orifis ve lüle bağlanabilen ayrı bir hattı beslemektedir. Diğerleri ise I-V numaralı hatları beslemektedir. Tesisatta bulunan muhtelif vanalar yardımıyla bu hatlarda ayrı ayrı veya hatlar arasında akım sağlanabilir. Sistemde bulunan boru ve diğer tesisat elemanları hakkında detaylı bilgi Tablo 2'de verilmiştir. Aynı zamanda bu tabloda elemanların hangi hat üzerinde bulunduğu da gösterilmiştir.

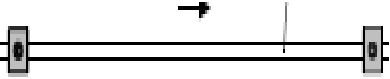
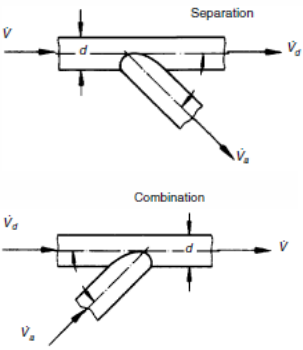


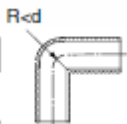
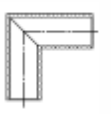
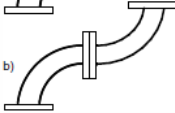
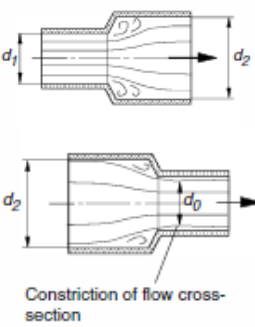


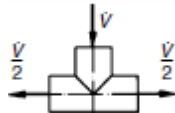
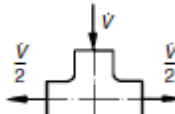
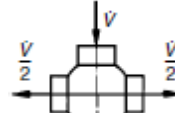
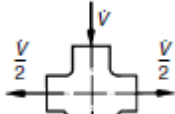
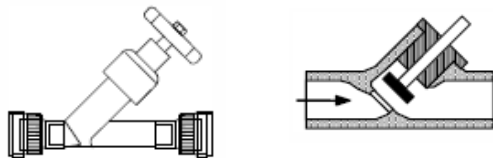
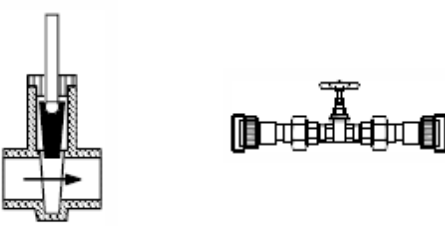
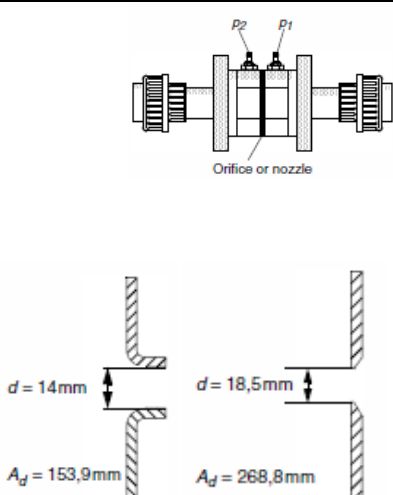

Şekil 1. Deney Düzenliğinin Şematik Görünümü

Tablo 1. Deney Düzenliği Elemanları

No	Adı	No	Adı
1	Statik Basınç Nipelleri	7	Ventürimetre ve orifis metre
2	Vanalar	8	Ayarlanabilir Boru Parçası
3	Panel Tezgah	9	Vana
4	Manometreler	10	Çıkış Hattı
5	Giriş Borusu	I-VI	Akım Hatları
6	Çelik Konstrüksiyon		

Tablo 2. Sistem Elemanlarının Hat ve Detay Bilgileri

Hat No	Adı	Şekil	f veya K	Özellikleri
II	Boru		Laminer: $f = \frac{64}{Re}$ Türbülanslı: $f = \frac{0.316}{Re^{1/4}}$	PVC 20x1,5 düz boru, uzunluk 800mm, pürüzsüz, iç çapı 17 mm
III / IV	45° lik branşlar		0,7 0,3	45° boru ayrılma branşmanı, 45° boru birleşme branşmanı,
V	45° dirsek		0,35	Geniş açılı (135°) dirsek, yuvarlatılmış
V	90° dirsek		0,1 (x2)	Yuvarlatılmış 90° dirsek, R>d
V	90° dirsek		0,2 (x2)	Yuvarlak köşeli 90° dirsek, R<d
V	90° dirsek		0,6 (x2)	Keskin köşeli 90° dirsek
V	180° dirsek, yuvarlak		0,4	Yuvarlatılmış 180° lik S dirsek
I	Boru Daralma ve Genişleme		2,4	PVC boru, Genişleme ve daralma: 20x1,5 - 32x1,8 d = 17 mm, D = 28,4 mm, d/D=0,6

III / IV	T Branşman		1,3	Düz alınlı ve keskin kenarlı T elemanı, giriş-çıkış kesit çapları eşit
III / IV	T Branşman		0,7	Düz alınlı ve yuvarlak kenarlı T elemanı, giriş-çıkış kesit çapları eşit
III / IV	T Branşman		5	Küresel alınlı ve keskin kenarlı T elemanı, giriş-çıkış kesit çapları eşit
III / IV	T Branşman		0,9	Küresel alınlı ve yuvarlak kenarlı T elemanı, giriş-çıkış kesit çapları eşit
VI	Vana		5 (tam açık)	Tapalı (açılı) vana
VI	Vana		1,5 (tam açık)	Sürgülü vana
VI	Orifis ve Lüle		Orifis: $C_d = 0,67$	Orifis: $D = 28,4 \text{ mm}$ $d = 18,5 \text{ mm}$ $\beta = d/D = 0,65$
			Lüle: $C_d = 1,0$	Lüle: $D = 28,4 \text{ mm}$ $d = 14,0 \text{ mm}$ $\beta = d/D = 0,5$
VI	Ventüri		$C_d = 1,0$	Ventüri: $D = 20,8 \text{ mm}$ $d = 10,4 \text{ mm}$ $\beta = d/D = 0,5$

DENEYİN YAPILIŞI:

Tesisat elemanları düzener üzerinde altı farklı akım hattı üzerinde değişik yerlerde bulunmaktadır. Elemanların basınç kayıplarının ölçülmesi için bulunduğu hatta akım sağlanmalıdır. Bu işlem sistemde bulunan hatların giriş-çıkış vanaları açıp-kapatılarak yapılır. Sistem ana giriş-çıkış vanaları ile hangi hattan akım verilecekse o hattın giriş-çıkış vanaları açık, diğer tüm vanalar kapalı olmalıdır. Vanaların açık pozisyonu vana kolunun boru ile paralel olduğu, kapalı konumu ise boruya dik olduğu pozisyonudur. Deneyin yapılışı aşağıda açıklanmıştır, deneyi 5 farklı debide, yani 5 farklı akım hızında ve 5 farklı tesisat elemanı için yapınız.

1. Tesisattaki tüm vanalar kapalı konumda iken pompa çalıştırılır.
2. Pompa hızı frekans kontrollü hız kontrol cihazı (inverter) ile belirli bir hıza ayarlanır.
3. Testi yapılacak elemanın bulunduğu hat belirlenip, elemanın giriş-çıkış basınç ölçüm noktalarına manometre bağlantıları yapılarak hattın giriş vanası açılır.
4. Başlangıçta manometrelerin altındaki drenaj ve üstündeki hava boşaltma vanaları kapalı tutulmalıdır.
5. Manometre kollarındaki sıvı seviyeleri eşit değilse sistemdeki hava alınmalıdır. Bu işlem manometrelerin altındaki drenaj vanaları hafif açılarak sistemdeki tüm havanın çıkması için bir süre beklenir. Hava kabarcıkları çıkışı kesildikten sonra manometrelerin altındaki drenaj vanaları kapatılır.
6. Tesisatın çıkış vanası yavaşça açılarak ilgili hatta akım sağlanır.
7. Manometrelerde meydana gelen sıvı yükseklikleri ölçülebilir aralıkta değilse, tesisat çıkış vanası kapatılarak manometrelerin üstündeki hava boşaltma vanası hafif açılarak manometrelerdeki sıvı seviyesinin istenilen bir seviyeye yükselmesi sağlanır. Sağlıklı basınç ölçümü için yani basınç ölçümlerinin gerçekleşeceği aralığı kapsaması açısından manometrelerdeki sıvı yüksekliklerinin referans olarak orta skalada ayarlanması gerekir. Manometrelerdeki sıvı seviyeleri ayarlandıktan sonra havalandırma vanaları kapatılır.
8. Manometrelerin her iki kolundaki seviyelerin eşit olması sağlandıktan sonra tesisat çıkış vanası yavaşça açılarak deneye devam edilir.
9. Deney verileri (su sıcaklığı, debi ve basınçlar) alınarak Tablo 3'de ilgili yerlere kaydedilir.
10. Bir tesisat elemanının basınç ölçümleri alındıktan sonra diğer ölçüm alınacak hat belirlenerek o hattın giriş vanası açıldıktan sonra ilgili noktalara manometre bağlantıları yapılır. Tesisat çıkış vanası kapatılarak manometrelerdeki seviyelerin eşit olup olmadığı kontrol edildikten sonra deneye devam edilir. Manometrik yükseklikler eşit değilse madde 5' açıklanan hava alma işlemi tekrarlanır. Eşitlik sağlandıktan sonra tesisat çıkış vanası açılarak deneye devam edilir.
11. Basınç farkı ölçümü yapılacak diğer tüm elemanlar için madde 9 ve 10'da belirtilen işlemler ilgili basınç ölçüm noktalarına manometre bağlantıları yapılarak tekrarlanır.
12. Deney sonlandırılırken tüm hatların giriş vanaları kapalı pozisyona getirildikten sonra pompa durdurulur. Tesisat giriş vanası tamamen açık bırakılır.
13. Sistem uzun süre çalıştırılmayacaksa tüm vanalar, manometrelerin drenaj ve hava alma vanaları da dahil, açık bırakılır.

HESAPLAMALAR:

Boru hattında farklı kesitlerdeki basınç farkları ve akım debisi ölçülür. Basınç farkı ve debi ölçüm sonuçlarından yararlanılarak akım ortalama hızı, Re (Reynolds sayısı), sürtünme faktörü ve yerel kayıp katsayıları hesaplanarak belirlenir. Akım ortalama hızı süreklilik denklemi, sürtünme faktörü ve yerel kayıp katsayıları Bernoulli denklemi kullanılarak belirlenir. Hesaplamalara ilişkin denklem ve bağıntılar aşağıda verilmiştir:

Akım ortalama hızı ile hacimsel debi arasındaki ilişki: $\dot{V} = AV$

Kütle korunumu bağıntısı: $A_1V_1 = A_2V_2$ (sıkıştırılmaz akışkanlar için)

Burada, V ortalama akım hızıdır, m/s, A boru kesit alanıdır, 1 ve 2 alt indisleri ise sırasıyla elemanların giriş çıkış kesitlerini simgeler.

Reynolds sayısı: $Re = \frac{VD}{\nu}$

Burada, D boru çapı, m , ve ν akışkanın kinematik viskozitesidir, m^2/s .

Bernoulli denklemi:

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

Bernoulli denklemi enerjinin korunumu ilkesine dayanır ve sistemde kontrol hacim sınırları dışına etki eden enerji yükleri olmadığı 2 farklı kesit arasında uygulandığında yukarıdaki şekilde verilir. Burada, P statik basınç, Pa, ρ akışkanın yoğunluğu, kg/m^3 , g yerçekimi ivmesi, m/s^2 , z potansiyel yükseklik, m , H_k ise viskoz etkilerin sebep olduğu enerji kaybını verir, m . Bu bağıntıda akışkanın sahip olduğu ve dikkate alınan enerjileri enerji yükü formunda verilmiştir. Bernoulli

denklemindeki $\frac{P}{\rho g}$ terimi statik basınç enerji yükünü, $\frac{V^2}{2g}$ dinamik basınç enerji yükünü, z potansiyel enerji yükünü ve H_k enerji kaybını basınç yükü olarak vermektedir.

Boru hatları farklı malzemeli ve farklı ebatlarda borulardan, vana, nipel ve dirsek gibi tesisat elemanlarından oluşur. Boru hatlarındaki basınç kaybı viskoz etkilerin sebep olduğu sürtünmeden dolayı meydana gelen sürekli kayıplar ile farklı boru ve tesisat elemanlarının sebep olduğu direncin meydana getirdiği yerel kayıpların toplamıdır.

$$H_k = H_{k,sürtünme} + H_{k,yerel}$$

Birçok boru ve tesisat elemanı pek uzun olmayan bir boru hattı için yerel kayıplar sürtünme kayıplardan daha büyük olabilir.

Bir boru akımında sürtünmeden kaynaklanan kayıplar süreklidir, yani daima mevcuttur, bu yüzden sürekli kayıplar diye de adlandırılır. Sürekli kayıplar, akışkan yoğunluğu ve viskozitesi, boru çapı ve uzunluğu, boru iç yüzeyinin pürüzlülüğü ve akım hızına bağlıdır.

$$H_k = f(\rho, \mu, D, L, \varepsilon, V)$$

Burada ρ akışkan yoğunluğu, μ akışkan dinamik viskozitesi, D boru iç çapı, L boru uzunluğu, V akım ortalama hızı ve ε boru iç yüzeyinin pürüzlülüğünü ifade eden karakteristik bir uzunluktur ve pürüzlülük diye adlandırılır. Pürüzlülük boru iç yüzeyini oluşturan ortalama yüzeyin altındaki girintilerin veya üstündeki çıkıntıların yüksekliklerinin en büyük değerlerinin ortalaması olarak alınır, ortalama pürüzlülük yüksekliği olarak da anılır.

Viskoz etkilerin meydana getirdiği sürtünme kuvvetlerini boyutlandıran boyutsuz bir katsayı tanımlanır. Bu katsayı sürtünme faktörü (f) diye adlandırılır ve katı yüzey üzerinde meydana gelen kayma gerilmeleri ile boru kesitindeki ortalama dinamik basınç arasındaki orandır ve aşağıdaki gibi formülize edilir.

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

Burada τ_w viskoz etkilerin yani sürtünmeden kaynaklanan boru yüzeyindeki kayma gerilmesidir.

Viskoz sürtünmelerin büyüklüğü dolayısıyla sürtünme faktörü akışkan yoğunluğuna ve viskozitesine, akım ortalama hızı ve boru çapına ve ayrıca boru pürüzlülüğüne bağlıdır.

$$f = f(\rho, \mu, D, L, \varepsilon, V)$$

Sürtünme katsayısının bağlı olduğu parametreler iki farklı boyutsuz parametre oluşturacak şekilde düzenlenebilir, bunlar Reynolds sayısı ve bağıl pürüzlülüktür. Bağıl pürüzlülük, ε/D , ortalama pürüzlülük yüksekliğinin boru iç çapına oranıdır.

$$f = f\left(\frac{\rho V D}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

Laminer, tam gelişmiş, kararlı ve sıkıştırılmaz boru akımı için sürtünme faktörü ile basınç düşüşü arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı vardır.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2$$

Eşitliğin her iki tarafı akışkanın özgül ağırlığına bölünürse basınç kaybı akışkan yükseltisi yani basınç yükü olarak elde edilir ve aşağıda verilen denklem viskoz etkilerin sebep olduğu sürtünmeden meydana gelen basınç yük kaybıdır.

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

Basınç kaybı ile sürtünme faktörü arasındaki bu bağıntı her iki laminar ve türbülanslı rejim için de kullanılır.

Laminar boru akımı için sürtünme faktörü ile Re sayısı arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir. Buradan görüldüğü gibi laminar akımlarda sürtünme faktörü boru pürüzlülüğüne bağlı değildir.

$$f = \frac{64}{Re}$$

Türbülanslı tam gelişmiş pürüzsüz bir boru akımında sürtünme faktörü ile Reynolds sayısı arasındaki deneysel olarak bulunan bağıntı Blasius formülü olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibidir.

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}}$$

Pürüzlü borular için deneysel olarak bulunan sürtünme faktörü, Reynolds sayısı ve bağıl pürüzlülük arasındaki bağıntı da aşağıda verilmiştir ve Colebrook bağıntısı olarak adlandırılır.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{(\varepsilon/D)}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Boru akımları için sürtünme faktörü, Reynolds sayısı ve bağıl pürüzlülük arasındaki ilişki pürüzlü ve pürüzsüz borular, laminar ve türbülanslı akımlar için deneysel veriler kullanılarak elde edilen Moody diyagramı ile verilir. Moody diyagramı ekte verilmiştir.

Yerel kayıpları boyutlandırılan kayıp katsayısı diye adlandırılan boyutsuz bir katsayı (K), tanımlanır. Bu katsayı ile dinamik basınç yükünün çarpımı yerel basınç yük kaybını verir.

$$H_{k,yerel} = K \frac{V^2}{2g}$$

Yerel kayıplar sürekli var olan sürtünme kayıplarından hariç akıma karşı ilave direnç meydana getiren tüm elemanların sebep olduğu kayıplardır. Bu elemanların her biri akım hızının değerini ve/veya yönünü değiştirir ve bu da sürtünme katsayısından farklı değerlendirilen ilave bir basınç kaybına sebep olur. Eğer bir eleman akımın yavaş yavaş ivmelenmesine sebep oluyorsa sebep olduğu kayıplar nispeten daha düşüktür, nispeten daha büyük kayıplara akım kesit alanlarında ani daralmalar meydana getiren elemanlar sebep olur. Kayıp katsayılarının değerleri deneysel olarak tespit edilir.

Boru kesit alanında ani genişleme ve daralmanın sebep olduğu kayıp katsayısı aşağıdaki bağıntıda olduğu gibi elde edilir.

$$K = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 = \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right)^2$$

Burada, A_1 ve A_2 sırasıyla önceki ve sonraki akım kesit alanını, d ve D ise sırasıyla küçük ve büyük kesit çaplarını simgelemektedir. Fakat A_2 , A_1 den oldukça büyükse, örneğin bir borudan depoya giriş gibi, kayıp katsayısı 1 olur, çünkü akımın kinetik enerjisi neredeyse tamamen kaybolur.

Pratikte yerel kayıplar kayıp katsayısına denk gelen ek boru uzunluğu olarak da dikkate alınır. Kayıp katsayısı ile denk geldiği ek uzunluk arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$K \frac{V^2}{2g} = 4f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$L_e = K \frac{D}{4f}$$

Boru hattının mevcut uzunluğuna ilave olarak boru hattında mevcut diğer elemanların sebep olduğu kayıpları ilave uzunluk olarak mevcut boru uzunluğuna ilave ederek, boru hattında meydana gelen toplam kayıpları sürekli kayıplar bağıntısında boru uzunluğu yerine boru uzunluğu ile diğer elemanların kayıp katsayısına denk gelen ek uzunluğu ilave edilerek de hesaplanabilir.

$$H_k = H_{k,sürekli} + H_{k,yerel} = 4f \frac{(L + L_e)}{D} \frac{V^2}{2g}$$

SORULAR:

1. Tablo 3'de istenilen büyüklükleri gerekli hesaplamaları yaparak belirleyiniz: basınç kaybı (ΔP), ortalama akım hızı (V_{ort}), kinematik viskozite (ν), Reynolds sayısı (Re), deneysel ve teorik olarak sürtünme faktörü (f) veya yerel kayıp katsayısı (K).
2. Yerel kayıp katsayılarına eşdeğer uzunlukları (L_e) belirleyiniz.
3. Her bir eleman için basınç kaybı (ΔP), sürtünme faktörü (f) ve yerel kayıp katsayısı (K) büyüklüklerinin Reynolds sayısına göre değişimlerinin ayrı ayrı grafiğini çiziniz.
4. Sonuçları irdeleyiniz.
5. Tesisattaki basınç kayıplarını azaltmak için yapılabilecek müdahaleleri açıklayınız.

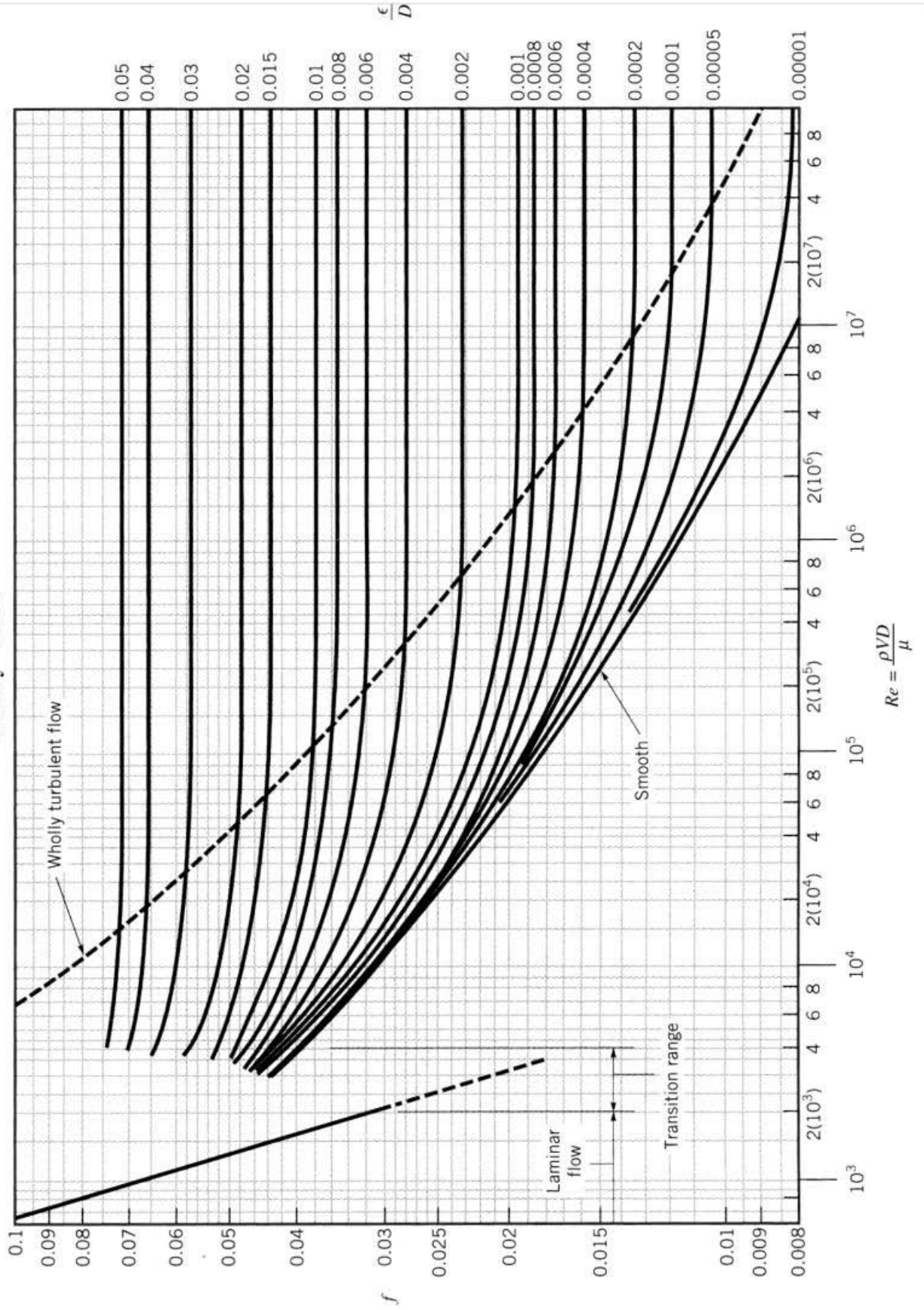
Tablo 3. Deney verileri

Q, ml/s	V _{ort} , m/s	T, °C	ρ , kg/m ³	ν , m ² /s	Re

Eleman	h ₁ , cmSS	h ₂ , cmSS	ΔP , Pa	f veya K	
				deneysel	teorik
Düz boru, D = 17 mm, L = 80 cm					
Düz boru, D = 28,4 mm, L = 55 cm					
Boru genişleme					
Boru daralma					
45° branş, ayrılma					
45° branş, birleşme					
45° dirsek					
90° dirsek, yuvarlatılmış					
90° dirsek, yuvarlak köşeli					
90° dirsek, keskin köşeli					
180° dirsek, yuvarlak					
T, düz alınlı ve keskin kenarlı					
T, düz alınlı ve yuvarlak kenarlı					
T, küresel alınlı ve keskin kenarlı					
T, küresel alınlı ve yuvarlak kenarlı					
Vana, tapalı					
Vana, sürgülü					

Not: Bu sayfayı 5 adet çoğaltınız.

Moody chart



Tablo 4. Suyun yoğunluk ve kinematik viskozitesinin sıcaklığa göre değişimi

Sıcaklık, °C	Yoęunluk, kg/m ³	K, nematik viskozite, 10 ⁻⁶ m ² /s
15	999,0	1,134
16	998,8	1,106
17	998,7	1,079
18	998,5	1,053
19	998,4	1,028
20	998,2	1,004
21	998,0	0,980
22	997,8	0,957
23	997,5	0,935
24	997,3	0,914
25	997,0	0,894
26	996,8	0,875
27	996,5	0,856
28	996,2	0,837
29	995,9	0,819
30	995,6	0,801