

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BORULARDA PÜRÜZLÜLÜĞÜN**  
**BULUNABİLMESİ İÇİN**  
**TEST DÜZENEĞİ TASARIMI VE İMALATI**

**SEDA ŞENOL**

**TEMMUZ 2005**

Fen Bilimleri Enstitü Müdürünün onayı

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak Makine Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Veli ÇELİK  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Prof. Dr. Veli ÇELİK

Yrd. Doç. Dr. Necip CAMUŞCU

## ÖZET

### BORULARDA PÜRÜZLÜLÜĞÜN BULUNABİLMESİ İÇİN TEST DÜZENEĞİ TASARIMI VE İMALATI

ŞENOL, Seda

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Temmuz 2005, 63 Sayfa

Bu çalışmada, öncelikle borularda malzeme tipine bağlı pürüzlülük değerlerinin tespit edilebilmesi için bir model tasarlanmıştır. Akışkanın fiziksel özellikleri, denge kavramları ve sıkıştırılmayan akışkanların borularda akımı incelenerek, yapılan hesaplamalar ve ön çalışmalar neticesinde deney düzeneğinin tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Endüstriyel uygulamalarda mutlak pürüzsüzlük olamayacağı ve borularda basınç kayıplarının, sürtünme ve sürüklenme kayıplarından kaynaklanması mantığından yola çıkarak, sistemdeki basınç kayıplarının ölçülmesi suretiyle, pürüzlülük değerlerine ulaşılması hedeflenmiştir. Sistemin ve hesap yöntemlerinin geçerliliğini kanıtlayabilmek için piyasada bulunan

standart borular tercih edilmiş ve üretici firma tarafından öngörölmüş ve bildirilmiş olan değerler kontrol mekanizması olarak kullanılmıştır.

Tek borulu ve sökülebilir bir sistem tasarlanmış olması, aynı düzenekte, standart veya standart dışı farklı boruların pürüzlölük değerinin ölçölmesine olanak sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Borularda pürüzlölük değeri, sıkıştırılmayan akışkanların borulardan akımı, basınç kayıpları.

## **ABSTRACT**

### DESIGNING AND ESTABLISHMENT OF A TESTING APPARATUS TO DETERMINE THE ROUGHNESS ON THE PIPES

ŞENOL, Seda

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor : Prof. Dr. Ali ERİŞEN

July 2005, 63 pages

In this project, a model has been designed initially to evaluate the roughness on the pipes related to the type of material. Parameters of the experimental apparatus are determined as a result of calculations and preliminary work by analysing the physical characteristics of the fluids, equilibrium conception and the flow of incompressible fluids through the pipes.

Roughness values have been targeted by measuring the system pressure losses, since absolute smoothness is not possible in the industrial applications and the friction and drift losses cause to pressure loss in the pipes. In order to prove the validity of the system and the measurement methods, regular pipes in the market have been preferred and the values

suggested by the manufacturer company has been used as the control mechanism.

Single piped and defragmentable system in the same apparatus enables to measure roughness values of different standardised and nonstandardised pipes.

**Key Words:** Roughness values in the pipes, Flow of incompactible fluids through the pipes, Pressure losses

## TEŞEKKÜR

Bana, tez konum kapsamında araştırma olanağı sağlayan, çalışmamın her safhasında yakın ilgi ve önerileri ile beni yönlendiren danışman hocam *Sayın Prof. Dr. Ali ERİŞEN* e (Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi), çalışmalarım sırasında bana her türlü teknik desteği vererek deney düzeneğinin hazırlanmasında maddi ve manevi hiçbir yardımdan kaçınmayan dayım *Sayın Suat DEMİRER* e (Demirer Hidrolik San. A.Ő.), çalışmama destek olarak yardımlarını esirgemeyen dayım *Sayın Turgay Demirer* (Demirer Hidrolik San. A.Ő.) ve kuzenim *Sayın Semih Gökalp* e (Alimar Makine San. ve Tic. Ltd. Őti.), çalışmam sırasındaki yardımlarından dolayı *Sayın Yüksek Jeoloji Mühendisi Bora Teoman* a ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen *sevgili aileme* sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Seda ŞENOL  
Kırıkkale, Temmuz 2005

## ÖNSÖZ

Bilindiği gibi Akışkanlar Mekaniği, çok çeşitli alanlarda uygulanabilir olması nedeniyle mühendisliğin en temel kavramlarından biridir. Zaman içinde konuyla ilgili, sayısız bilim adamı tarafından çalışmalar yapılmış, kavramlar ve yöntemler geliştirilmiş ve neticede bugün, konuyla ilgili genel bir müfredat oluşturulmuştur. Tezin 'Temel Kavramlar' bölümünde, bu geniş kavramlar bütününe; hedeflenen sistemi oluşturmak ve doğru hesap yöntemlerini kullanmak için ihtiyaç duyulan temel bölümleri aktarılmıştır.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### ŞEKİL

1.1	Akım çizgileri a) Ani genişleme, b) Ani daralma.....	19
1.2	Sınır tabaka a) Levha çevresinde sınır tabaka oluşumu, b) Boru içinde sınır tabaka akımı.....	24
1.3	Dirseklerden akımda sınır tabaka ayrışması.....	25
1.4.	a) Boru duvarındaki pürüzler, b) Laminer alt tabakadaki akım çizgilerinin pürüzler tarafından etkilenmesi, c) Pürüzlerin çevresinde sınır tabaka ayrışması, d) İdeal pürüzlülük.....	27
1.5	Moody diyagramı.....	36
1.6	Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	41
1.7	Borularda akış test cihazı şematik gösterimi.....	42
1.8	Basınçölçerlerin şematik gösterimi.....	43
1.9	Akışkan çevrim cihazı şematik gösterimi.....	44
2.1	Deney düzeneğinin gösterimi.....	49
2.2	Akım sisteminin şematik gösterimi.....	50

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

1.1 Malzeme Tipine Göre Pürüzlülük Değerleri.....	29
1.2 Ampirik Sürtünme Faktörü Denklemleri.....	37
2.1 Sistemin Tasarım Parametreleri.....	48
2.2 Sistemde Kullanılan Boruların Özellikleri.....	52
2.3 Sistemin Maliyet Analizi.....	53
3.1 Sistemdeki Sabit Değerler.....	57
3.2 Ölçülen Değerler.....	58
3.3 Hesaplanan Değerler.....	58
3.4 Sonuçların Karşılaştırılması.....	59

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Temel Kavramlar.....	3
1.1.1. Akışkanların Özellikleri.....	3
1.1.1.1.Akışkanların Fiziksel Özellikleri.....	3
1.1.1.1.1.Yoğunluk.....	3
1.1.1.1.2.Viskozite.....	4
1.1.1.2. Akışkanların Hidrolik Sistemlerdeki Temel Özellikleri...6	
1.1.2. Korunum Yasaları.....	8
1.1.2.1. Kütlenin Korunumu.....	8
1.1.2.2. Enerjinin Korunumu.....	10
1.1.2.2.1.Mekanik Enerjinin Korunumunun Dayandığı Kavramlar.....	10
1.1.2.2.1.1.Enerjinin Korunumu İlkesi.....	10
1.1.2.2.1.2.Termodinamiğin 1. Yasası.....	11
1.1.2.2.2.Enerji Terimleri.....	14

1.1.2.2.2.1.Basınç.....	14
1.1.2.2.2.2.Kinetik Enerji.....	15
1.1.2.2.2.3.Potansiyel Enerji .....	16
1.1.2.2.2.4.İş.....	16
1.1.2.2.2.5.Sürtünme Kayıpları.....	17
1.1.3. Sıkıştırılmayan Akışkanların Borulardan Akımı.....	17
1.1.3.1. Akım Rejimlerinin İncelenmesi.....	18
1.1.3.1.1.Tabakalı ve Karmaşalı Akım Rejimleri.....	18
1.1.3.1.2.Karmaşanın (Türbülansın) Niteliği.....	19
1.1.3.1.3.Borularda Tabakalı ve Karmaşalı Akım Rejimlerinde Momentum İletim Mekanizması..	20
1.1.3.2.Sınır Tabaka Teorisi.....	23
1.1.3.2.1.Borularda Sınır Tabaka Ayrışması.....	25
1.1.3.2.2.Dirseklerde Sınır Tabaka Ayrışması.....	25
1.1.3.2.3.Boru Duvarlarındaki Pürüzlerde Sınır Tabaka Ayrışması.....	26
1.1.3.3.Borulardan Akımda Basınç Kayıplarının Nedenleri.....	28
1.1.3.3.1.Pürüzlülük.....	28
1.1.3.3.2.Sürtünme ve Sürüklenme Kayıpları.....	30
1.1.3.3.3.Sürtünme Faktörü Korelasyonları.....	33
1.1.3.3.4.Sıcaklığın Sürtünme Faktörü Üzerindeki Etkisi.....	34
1.1.3.3.5.Bağlantı Elemanlarında Sürüklenme Kayıpları.....	35

1.2. Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmaların Kaynak Araştırması.....	39
1.3. Çalışmanın Amacı.....	44
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>47</b>
2.1. Materyal.....	47
2.1.1. Deney Düzeneğinin Tasarımı.....	47
2.1.2. Deney Düzeneği ve Ekipmanların Tanıtılması.....	49
2.1.2.1. Pompa ve Motor.....	50
2.1.2.2. Depo.....	51
2.1.2.3. Borular.....	51
2.1.2.4. Manometre.....	52
2.1.2.5. Debimetre .....	52
2.1.3. Deney Düzeneğinin Maliyet Analizi.....	53
2.2. Yöntem.....	54
2.2.1. Ölçüm Yöntemi.....	54
2.2.2. Hesaplama Yöntemi.....	54
<b>3. ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>	<b>57</b>
3.1. Deney Sonuçları.....	57
<b>4. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>60</b>
KAYNAKLAR.....	62
EK-1.....	63

## 1. GİRİŞ

Genel olarak maddesel cisimler doğada; katı, sıvı ve gaz halde bulunurlar. Bunlardan sadece katı cisimlerin zorlama etkisi altında davranışını inceleyen bilime Mekanik, sıvı ve gaz halde bulunan ortamların zorlama altında davranışlarını inceleyen bilime ise Akışkanlar Mekaniği denir.

Zorlama etkisi altında maddesel ortamlarda gerilmeler meydana gelebilir. Gerilme, zorlamaya karşı direnmeyi sembolize eden bir büyüklüktür. Bu büyüklükler Normal (çekme ve basma) gerilme ve Teğetsel (kayma) gerilmeleridir. Katı ortamlarda bu büyüklükler çok yüksek değerlere çıkabildikleri halde, akışkan (gaz ve sıvı) ortamlarda, basma gerilmesi hariç, çok küçüktür. Bu nedenle akışkan ortamlara, "kayma gerilmesi meydana getirebilecek en küçük zorlama etkisinde dahi şeklini değiştiren maddesel ortamlar " demek mümkündür.

Sıvı ortamlar normal doğrultudaki gerilmelere (basınç) karşı bir katı gibi direnç gösterirken, gaz ortamlar normal doğrultudaki gerilmelere de karşı koyamazlar. Bu nedenle sıvı ve gaz ortamları birbirinden ayıran en önemli özellik, sıkıştırılabilirlik özelliğidir. Teorik olarak sıvılar sıkıştırılmayan akışkanlar olarak kabul edilir. Gazlar ise çok kolay sıkıştırılabilirlik genişleyebilirler. Sıvılar serbest yüzeye sahip olurken, gazlar serbest yüzey teşkil edemezler<sup>(1)</sup>.

Akışkanlar Mekaniği; statik, kinematik ve dinamik bölümlerinden meydana gelmiştir. Akışkan ortam statik (hareketsiz) halde iken veya ideal

akışkanlar hareket halinde olsalar dahi, sıfır kayma gerilmesine maruzdurlar. Buna göre sonsuz küçük bir zorlama etkisinde dahi hiç direnç göstermeden akış eylemine geçen akışkan ortamlara İdeal Akışkan denir. Bu akışkanlarda akışa karşı direnci gösteren viskozite yok kabul edilmiştir. Ancak doğada viskozitesiz yani ideal bir akışkan olmadığı halde, ideal kavramlar bilimde kolaylıklar ve matematiksel çözümler sağladığından daima yapılmaktadır.

Pratikte karşılaşılan akışkanların hemen hepsinde az veya çok viskozite mevcuttur. Bu tür akışkanlara Gerçek Akışkan veya Sürtünmeli Akışkan denir.

Tez kapsamı içinde incelenecek akışkan türü ise Newtonien Akışkan veya Örnek Sürtünmeli Akışkan olarak isimlendirilir. Test düzeneğinde, hem fiziksel özelliklerinin uygunluğu, hem de ekonomik olması açısından, akışkan olarak su tercih edilmiştir.

Bu araştırmanın amacı, akışkanlar mekaniğinde sıkıştırılmayan akışkanların boru içinden akımı kavramını laboratuvar ortamına taşıyarak ve basınç kayıplarından yola çıkarak farklı malzemeler için pürüzlülük değerlerini tespit edebilmektir.

Bu kapsamda akışkanların fiziksel özellikleri, korunum yasaları, borularda oluşan akım rejimleri, sınır tabaka kavramı ve basınç kayıplarının nedenleri incelenerek deneyler sırasında kullanılacak formülizasyon oluşturulmuştur. Tezin 'Araştırma Bulguları' bölümünde yapılan deneyler sonucunda yapılan hesaplamalar ve ulaşılan değerler bulunmaktadır.

## 1.1. Temel Kavramlar

### 1.1.1. Akışkanların Özellikleri

Akışkanların davranışlarını inceleyebilmek için öncelikle bazı özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu anlamda fiziksel ve temel özelliklere değinmek uygun olacaktır.

#### 1.1.1.1. Akışkanların Fiziksel Özellikleri

Fiziksel özellikler akışkanların kimliği, onları birbirinden ayıran özellikleridir. Akışkanların akımını etkileyen en temel fiziksel özellikler iki ana başlık altında toplanabilir: yoğunluk ve viskozite.

##### 1.1.1.1.1. Yoğunluk

Yoğunluk, maddenin birim hacmindeki kütlesi olarak tanımlanır:

$$\rho = \frac{\text{kütle}}{\text{hacim}} = \frac{m}{V} = \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.1)$$

Bir maddenin yoğunluğu  $\rho$ , maddeyi oluşturan moleküllerin kütlesine ve yerleşim düzenine göre aralarında kalan  $r_0$  mesafesine bağlıdır.

Sıvıların yoğunluğu, moleküllerin ağırlığına değil, yapılarına ve molekülleri arasındaki van de Waals kuvvetlerinin, özellikle hidrojen bağlarının varlığına bağlıdır.



### 1.1.1.1.2.Viskozite

Akış, maddenin moleküllerini bir arada tutan etkileşim kuvvetleriyle akışkanı akmaya zorlayan dış kuvvetlerin dengesine dayanır. Akışkan küçük moleküllerden oluşuyorsa, moleküllerin arasında etkileşim kuvvetleri bulunsa bile, etki eden dış kuvvetlere karşı kalıcı bir direnç göstermez. Dış kuvvetlerin etkisi altında akışkanın şeklinde meydana gelen değişim, yani deformasyon, kuvvetin etkisi ortadan kalkınca tekrar düzelmez. Akışkan verilen şekli alır, diğer bir deyişle, plastik davranış gösterir.

Hareketsiz duran bir akışkanı akmaya zorlayabilmek için bir kuvvetin sürekli olarak uygulanması gerekir. Kuvvet bir vektördür. Akışkanlar Mekaniğinde alan da bir vektör olarak alınır; vektörün büyüklüğü alanın nümerik değeri, yönü ise alana dik (normal) yöndür. Eğer kuvvet vektörü uygulandığı yüzeyin alan vektörüne dik yönde ise (alana paralelse), etkiyen kuvvet akışkan tabakalarını birbiri üzerinden kaydırır, deformasyona uğratar. Bu nedenle birim alana düşen kuvvete de kayma gerilimi denir.

$$\tau = \frac{F}{A} \perp \quad (1.2)$$

Akışı sağlayabilmek için sürekli olarak uygulanan kuvvet, akımın en kesit alanına dik yönde veya alan vektörüne paralelse, akış basınç altında meydana gelir.

$$P = \frac{F}{A} // \quad (1.3)$$

Akışkanı çevreleyen bir katı duvar yoksa, akışkan bütünüyle aynı hızda akar (jet akımı). Ancak akım, boru gibi, katı bir duvarla çevrelenmiş bir kanalda oluyorsa, akışkan molekülleri katı duvara yapışarak hareketsiz kalır.

Fakat basınç etkisiyle akışkan akıma zorlandığından, merkezde maksimum, duvarlarda sıfır olan bir hız dağılımı meydana gelir (Poiseuille akımı). Kapalı kanallardaki akım basınç farkıyla yaratılsa bile, duvar etkisi altında akışkan içinde yine kayma gerilimi gradyanı oluşacaktır.

Akımı sağlayan kuvvetin etki mekanizması ne olursa olsun, akışkan kayma gerilimi gradyanları altında hareket edecek ve bu gerilimin etkisinde ince bir tabaka haline gelinceye kadar sürekli deformasyona uğrayacaktır.  $x$  akıma paralel,  $y$  dik yön olarak alınır, akışkan içindeki deformasyon, bu yönlerdeki boyut değişimlerinin oranı yani  $dx/dy$  olarak tanımlanır. Akımın olabilmesi için bu deformasyonun sürekli olarak meydana gelmesi gerekir. Bu durumda, sürekli şekil değiştirme veya deformasyon hızı  $\gamma$ , etkiyen kayma gerilimi yönünde dik yönde akışkanın hızının değişimine eşdeğerdir:

$$\gamma = \frac{1}{dt} \frac{dx}{dy} = \frac{1}{dy} \frac{dx}{dt} = \frac{dV_x}{dy} \quad (1.4)$$

Kararlı halde akan bir akışkanda, hız değişimi uygulanan kayma gerilimiyle doğru orantılıysa bu tür akışkanlara Newton Akışkanı denir. Kayma gerilimiyle hız değişimi arasındaki orantı katsayısı, yani viskozite  $\mu$ , akışkanların şekil değiştirme özelliğini belirten fiziksel özelliktir<sup>(2)</sup>.

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \left[ \frac{kg}{ms} \right] \quad (1.5)$$

### **Kinematik Viskozite**

Kinematik viskozite ise akışkanın viskozitesinin yoğunluğuna oranıdır:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{kg/ms}{kg/m^3} = \frac{m^2}{s} \right] \quad (1.6)$$

### 1.1.1.2. Akışkanların Hidrolik Sistemlerdeki Temel Özellikleri

Bir hidrolik devrede akışkan, hidrostatığın temel prensipleri içinde, pompa tarafından mekanik enerji şeklinde çevrilen gücü bir noktadan başka bir noktaya taşır. Son noktada bu gücü hidrolik enerjiden tekrar mekanik enerjiye çeviren dönüştürücülere teslim eder. Kısaca hidrolik sistemde hidrolik akışkanın temel görevi, kuvvetlerin ve hareketlerin iletilmesidir. İş biten akışkan ya tanka döner (açık sistemler) veya tanka dönmeden tekrar birinci noktadaki pompaya döner (kapalı sistemler).

Küçük bir kol ile tonlarca yükü hareket ettiren, boru ve hortumlarla istenilen yerde bu hareketi gerçekleştiren akışkan taşıdığı büyük güçlerin etkisi altında çeşitli değişikliklere uğrar. Özelliği bozulur, kirlenir ve görevini yapamaz hale gelir. Ancak ideal olarak sıcaklığına ve temizliğine dikkat edilirse kullanım ömrü de arttırılmış olur. Bunun yanında küçük bir yabancı madde yüzünden sistem kullanılamaz hale gelebilir. Bütün uygulama alanlarında kullanılacak tek tip akışkan bulunamadığından, akışkan seçimi kullanım alanına göre yapılmalıdır. Uzun ömürlü ve ekonomik bir çalışma, ancak uygun bir akışkan seçimi ile mümkün olabilir.

Dünya üzerinde fazlasıyla bulunan su, yıllarca hidrolik akışkan olarak kullanılmıştır. Daha sonra petrol ürünleri üstün yağlama özelliklerinden ve temasta buldukları madeni parçaları paslandırmadıkları için zamanla hidrolik devrelerde suyun yerini almaya başlamıştır. Ancak petrol ürünlerinin

pahalı olması ve çevre kirliliğine verilen önemin artması sebepleriyle sulu akışkanların kullanımı tekrar önem kazanmıştır. Yakın bir gelecekte özellikle yer ve ağırlığın büyük sorun olmadığı endüstriyel uygulamalarda sulu akışkanların petrol türevlerinin yerini alması beklenebilir. Bu konudaki araştırmalar yoğun bir şekilde sürdürülmekte, en az parça değişimi yapılarak yağ ile çalışan makineleri sulu akışkanlarla çalıştırabilmenin yolları aranmaktadır<sup>(3)</sup>.

Hidrolik sistemlerin görevlerini tam olarak yapabilmeleri için sistemde kullanılan akışkanların aşağıda belirtilen özelliklere sahip olmaları gerekir:

- Sistemden beklenen tüm çalışma sıcaklıklarında akışkan, basınç ve hız değişimlerine imkan verecek kadar akıcı olmalıdır. Bunun yanında akıcılığı, yüksek sıcaklıklarda sistemde kaçaqlara sebep olmayacak sınırlarda kalabilmeli yani istenilenden fazla incelmemelidir.
- Akışkanın viskozitesi bütün çalışma şartlarında sürtünen parçalar arasında film oluşumuna imkan vermeli, yani yağlama ve aşınmayı önleyici özelliği yeteri kadar iyi olmalıdır.
- Yüksek sıcaklıklarda termal dengesi, uzun süreli çalışmalarda kimyasal özellikleri değişmemelidir.
- Ergimiş havayı dışarı atabilmeli, sistemde köpük oluşumuna engel olmalıdır.
- Akışkan içinde bulunan ve kirlenmeye neden olan maddelerle reaksiyona girmemeli, yüzey gerilim değeri istenilen seviyede olmalıdır.

- Hidrolik makinelerin çeşitli bölümlerinde akışkan sık sık makinenin pompalama elemanları tarafından kesilir. Bu kesilmeler sonucunda akışkanın viskozitesi istenilen aralıklarda kalmalı yani yırtılmalara karşı dayanıklı olmalıdır.
- Filtreleme (temizleme) kolay olmalı, akışkanın buharlaşma basıncı pompa girişinde kavitasyona sebep olmayacak seviyede olmalıdır.
- Tortu oluşturmamalı, düşük maliyetli ve sürekli bulunabilir olmalıdır.
- Diğer hidrolik akışkanlarla uyumlu ve değiştirilebilirlik özelliklerine sahip olmalıdır.

## **1.1.2. Korunum Yasaları**

### **1.1.2.1.Kütlenin Korunumu**

Her ne kadar hidrolik tanımında hidrostatik iş yapabilme kapasitesinin hidrodinamik iş yapabilme kapasitesinden yüksek olması mantığı yer alsada, sonuçta farklı hidrolik devre elemanları arasında bir sıvı akışı mevcuttur. Bu akış hidrodinamik yasaları çerçevesinde gerçekleşir.

En temel yasa, maddenin korunumu yasasıdır. Bu yasa çerçevesinde, maddenin yaratılamaz ve yok edilemez olduğu bilinir. Akışkanlar Mekaniğinde “süreklilik yasası” olarak anılan maddenin korunumu prensibi, bir boru içindeki akışta şöyle yorumlanır:

Bir boru içindeki akışta, bir kesitten birim zamanda geçen kütle miktarı, boruya yeni akış eklenmediği yada borudan dışarı akış alınmadığı sürece sabittir. Bunun sonucu olarak boru kesit alanındaki değişiklik birim zamanda

geçen akışkan kütle miktarını değiştirmmez. Ancak kütle miktarı aynı kalarak kesit alan değiştiğinden, aynı miktarda kütleyi birim zamanda değişik bir kesit alanından geçişini sağlayabilmek için akışkan akış hızını değiştirir.

Hidrolikte kullanılan sıvıların pratik olarak sıkıştırılmaz oldukları kabul edildiğinden, akış boyunca sıvının yoğunluğu sabittir. Bu durumda süreklilik yasaını temelden ele alırsak:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q = \text{sabit} \quad (1.7)$$

$\dot{m}$  : birim zamanda akan kütle miktarı

$\rho$  : yoğunluk

$Q$  : hacimsel debi

Yoğunluğun da sabit olduğu göz önüne alınırsa, bu hidrolik akışlarda neden temel verilerden birinin debi olduğunu ortaya koyar ki, süreklilik yasaı debinin sabit olması gerektiğini söylemektedir.

$$Q = \text{sabit}$$

Akışkanın debisi, akışkanın hızı  $V$  ve kesit alanı  $A$  nın çarpımına denktir.

$$Q = V \cdot A \quad (1.8)$$

Bu durumda, süreklilik denklemini:

$$Q = V_1 \times A_1 = V_2 \times A_2 \quad (1.9)$$

halini alır.

## **1.1.2.2.Enerjinin Korunumu**

### **1.1.2.2.1. Mekanik Enerjinin Korunumunun Dayandığı Kavramlar**

Mekanik enerji korunumu iki temel kurala dayanır:

Enerjinin Korunumu İlkesi

Termodinamiğin 1. Yasası

#### **1.1.2.2.1.1.Enerjinin Korunumu İlkesi**

Kütlenin korunumu ilkesinde olduğu gibi, enerji de yaratılamaz ve yok edilemez, ancak enerji türleri birbirine dönüştürülebilir. Bu kural Termodinamiğin 1. Yasasının esasını, dolayısıyla mekanik enerji korunumunun temel ilkesini oluşturur. Enerji korunumu ilkesine göre mekanik enerji, ısı enerjisi, kimyasal enerji, elektrik enerjisi, manyetik enerji ve yüzey enerjisi bir arada ele alınmalıdır. Bu enerji türleri içinde mekanik enerji, akışkanların akımını doğrudan etkiler. Akım sistemlerinde ısı enerjisi de bulunur, fakat ısı iletimi, mekanik enerji veya momentum iletimiyle birlikte nadiren ele alınır. Isı daha çok, akışkanın boru duvarlarına sürtünmesi nedeniyle mekanik enerjinin tersinirliğini kaybederek ısıya dönüşmesi, "mekanik enerji kaybı" olarak mekanik enerji korunumunda yer alır. Diğer enerji türleri, ilgili durumlarda enerji, güç veya kuvvet denkliklerinde yer alırlar.

### 1.1.2.2.1. Termodinamiğin 1. Yasası:

Termodinamiğin 1. Yasası, enerji korunumu ilkesinin ısı ve mekanik enerji türlerini kapsayacak şekilde uygulanışıdır.

$$q - W = \Delta E \quad (1.10)$$

denklemlerle ifade edilen termodinamiğin 1. yasasında  $q(J)$  verilen ısıyı,  $W(J)$  sistemin yaptığı işi,  $\Delta E (J)$  sistemdeki toplam enerji değişimini simgeler.

Akan bir akışkan sistemindeki toplam enerji  $E$ , kinetik, potansiyel, basınç ve iç enerjilerden oluşur.

$$E = \frac{P}{\rho} + gz + \frac{V^2}{2} + u \quad (1.11)$$

Genel akım denklemi, tüm terimleriyle mekanik enerji değişimine uygulanabilir.

[sisteme sınırlarından giren mekanik enerji akımı] – [sistemin sınırlarından çıkan mekanik enerji akımı] ± [sistemin içindeki mekanik enerji üretim hızı] = [sistemin içindeki mekanik enerji birikimi hızı]

Akım sistemlerinde enerjinin üretimi değil, (-) işaretiyle tüketimi söz konusudur ve mekanik enerjinin, iş verimi açısından faydası daha az olan ısı enerjisine dönüşmesini simgeler. Burada mekanik enerji denkliğiyle diğer denklemler arasındaki bir farklılığa işaret etmek gerekir: Birikim terimi genelde, sistemin hacmi içerisinde zaman içinde biriken ve azalan niteliği simgeler; oysa mekanik enerji iletildiğinde, birikim, sistemin enerji dengesi takip edilen yola bağlı olarak yetersiz kaldığında dışarıdan pompayla sisteme enerji (iş) verilmesini simgeler. Buna karşılık tüketim [(-) üretim] mekanik enerjinin yok olması değil daha az faydalı bir enerji türü olan ısıya dönüşümüdür. Bu



tanımlarla termodinamiğin 1. yasası aşağıdaki denklemle enerji denkleği şeklinde dönüşür:

$$\frac{\delta q_H}{\delta t} + \left[ \frac{P_1}{\rho_1} + gz_1 + \frac{V_1^2}{2} + u_1 \right] \rho_1 V_1 A_1 = \frac{\delta W_s}{\delta t} + \left[ \frac{P_2}{\rho_2} + gz_2 + \frac{V_2^2}{2} + u_2 \right] \rho_2 V_2 A_2 \quad (1.12)$$

Bu denklemde  $\delta$ , yola (işleme) bağlı olarak değişimi simgelemektedir. Denklemdaki bütün terimlerin birimi (J/s)'dir. Sistemin giriş ve çıkışındaki enerji değerleri arasındaki fark, sisteme işlem sırasında verilen iş ve açığa çıkan ısı enerjilerinden kaynaklanır.

Denklemin her iki tarafı, kütleli debiyi veren:

$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (1.13)$$

ifadesine bölünürse:

$$q_H + \frac{P_1}{\rho_1} + gz_1 + \frac{V_1^2}{2} + u_1 = W_s + \frac{P_2}{\rho_2} + gz_2 + \frac{V_2^2}{2} + u_2 \quad (1.14)$$

denklemin bütün terimlerinin birimi [J/kg] olur.

Bu denklemde yoğunluk  $\rho$ , özgül hacim  $\nu$  cinsinden yazılır ve enerjilerdeki değişim  $\Delta$  ile gösterilirse, sisteme verilen iş ile ısıya dönüşen mekanik enerji arasındaki farkın sistemin sahip olduğu enerji türlerinde değişime yol açacağı açıkça görülebilir.

$$q_H - W_s = \Delta u - \Delta P \nu + \Delta V^2 / 2 + g \Delta z \quad (1.15)$$

denkleminin sağ tarafında, ilk iki terimin toplamı entalpi farkı  $\Delta H$ 'ye eşittir:

$$\Delta H = \Delta u + \Delta P \nu \quad (1.16)$$

denklemin entalpi farkı cinsinden yazılırsa,

$$q_H - W_s = \Delta H + \Delta V^2 / 2 + g \Delta z \quad (1.17)$$

denklemini elde edilir. Fakat Termodinamiğin 2. yasasına göre, entalpi farkı aynı zamanda, sabit sıcaklıkta entropi farkıyla sabit hacimde basınç farkının toplamına eşittir:

$$\Delta H = T\Delta S + v\Delta P \quad (1.18)$$

ana denklemde yerine koyarsak:

$$q_H - W_s = v\Delta P + \Delta V^2 / 2 + g\Delta z + T\Delta S \quad (1.19)$$

haline dönüşür. Termodinamiğin 2. yasasına göre, sabit sıcaklıktaki entropi artışı, tersinir işlemlerde iletilen ısıya eşit, tersinmeyen sistemlerde ise büyüktür:

$$T\Delta S \geq q_H \quad (1.20)$$

O halde;

$$-W_s = v\Delta P + \Delta V^2 / 2 + g\Delta z + (T\Delta S - q_H) \quad (1.21)$$

denkleminde, parantez içindeki terim daima sıfırdan büyüktür. Bu terim mekanik enerji kaybını, diğer bir deyişle, sürtünme ve sürüklenme yoluyla mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşümünü simgeler ve  $h_s$  simgesiyle gösterilir. Denklemde, iş teriminin önündeki (-) işareti dışarıya iş verildiğini simgeler. Akan akışkana (sisteme) genellikle pompa, fan veya kompresörle iş verildiği için işaret (+) olur.

Özgül hacim yoğunluk cinsinden ifade edilir, fark terimleri de sistemin giriş (1) ve çıkışındaki (2) enerji değerleriyle açık olarak yazılırsa mekanik enerji denkliği elde edilir.

$$\frac{P_1}{\rho_1} + gz_1 + \frac{V_1^2}{2} + W_s = \frac{P_2}{\rho_2} + gz_2 + \frac{V_2^2}{2} + h_s \quad (1.22)$$

Genel olarak mekanik enerji denkliği, Bernouilli denklemi diye bilinir.

Denklemin bu formunda tüm enerji birimleri ( $m^2 / s^2$ ) 'dir.

Denklemin her iki tarafı yoğunluk  $\rho$  ile çarpılırsa terimlerin birimi basınç birimine ( $N / m^2$ ) dönüşür.

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + W_s = P_2 + \rho g z_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + h_s \quad (1.23)$$

Mekanik enerji denkliğinin üçüncü yazılış tarzı, terimlerin (m) birimleriyle ifadesidir. Özellikle sistemde pompa varsa, basınç pompanın yukarıya çıkardığı su sütununun yüksekliği cinsinden ifade edildiğinden bu birimlerin kullanımı son derece elverişli olur.

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + W_s = \frac{P_2}{\rho_2 g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_s \quad (1.24)$$

#### 1.1.2.2.2.Enerji Terimleri

##### 1.1.2.2.2.1.Basınç

Basınç, mutlak basınç veya ölçek basıncı olarak iki şekilde ifade edilebilir. Ölçek basıncı sistemin içinde bourdon türü bir manometreyle ölçülen basınçtır. Sistemin içindeki basınç atmosferik basınca eşit olduğu zaman manometre sıfır basınç gösterir. O halde ölçek basıncı, sistemin içindeki basınçla atmosferik basınç arasındaki farktır. Sistemin içinde vakum olması durumunda ölçek (-) değer gösterir. Ölçek basıncının alabileceği minimum değer, mutlak boşluk, -1 atm'e eşdeğer bir birimdir. Mutlak basınç, (=ölçek basıncı+atmosferik basınç) olarak toplam basınca eşittir. Hidrostatik

basınç, bir kap içinde bulunan akışkanın ağırlığının taban alanına bölümüne eşittir. Herhangi bir noktada hidrostatik basınç, o noktanın üzerinde bulunan akışkanın ağırlığının o noktadaki en kesit alanına bölümüne eşittir, diğer bir deyişle, üstte kalan akışkanın taban düzleminde altta kalan akışkana yaptığı baskıdır.

#### **1.1.2.2.2.Kinetik Enerji**

Kinetik enerji akışkanın hızı nedeniyle kazanmış olduğu enerjidir. Borulardan akımda, hız duvardaki sıfır değeriyle merkezdeki maksimum değeri arasında parabolik veya hiperbolik bir değişim gösterir. Ancak kinetik enerji boru içindeki ortalama hıza göre hesaplanır. Bilinmesi gereken çok önemli bir nokta ,hızın, dolayısıyla kinetik enerjinin, ancak akım yönünün en kesit alanında bir değişiklik olursa değişmesidir. Diğer bir deyişle, boru içinden akımda,kinetik enerji değişimini kütle denkliği belirler. Pompa akışkanın basıncını artırır, hızını etkilemez. Ancak bu kural sadece kapalı kanallardan akımda geçerlidir. Akışkan, bir borudan (veya hortumdan) dışarıya, açık ortama akıyorsa boru içinde sürtünme yoluyla tüketemediği tüm ölçek basıncı hıza dönüşür, borudan çıkar çıkmaz hızı artar. Belirli bir  $V$  hızıyla akan akışkan aniden durdurulursa, örneğin bir duvara veya cisme çarparsa, akışkanın tüm kinetik enerjisi basınca dönüşür. Bu basınca çarpma veya daha genel olarak durma basıncı denir.

### 1.1.2.2.3.Potansiyel Enerji

Akışkanların potansiyel enerjisi, iki atom arasındaki potansiyel enerjinin eşdeğeridir. İki atom arasındaki potansiyel enerji, ancak atomlardan birinin diğerine göre olan denge konumundan uzaklaşmasıyla ortaya çıkan ve atomu denge konumuna döndürmeye yönelik bir enerji türüdür. Akışkanlar mekaniğinde, atomlardan birinin eşdeğeri dünya, diğerinin eşdeğeri ise akışkanın birim kütesidir. Akışkan yeryüzünden uzaklaştığı anda potansiyel enerji kazanır. Ancak, potansiyel enerjiyi belirlemek için mutlaka yeryüzünün referans alınması gerekmez, pratikte gelebileceği minimum düzlem, potansiyel enerjinin sıfır düzeyi olarak kabul edilir. Bir diğer önemli nokta da: potansiyel enerjinin denge konumunun ancak yerçekimi ivmesi altında geçerli olduğudur.

### 1.1.2.2.4.İş

Pompanın yaptığı iş terimi  $W_s$ , ancak seçilen sistemin kontrol hacmi içinde bir pompa varsa denklikte göz önüne alınır. Sistemin sınırları pompa çıkışından geçirilirse, iş terimi pompanın verdiği basınç şeklinde göz önüne alınır. Bir başka önemli nokta pompaların asıl olarak elektrik enerjisini basınç enerjisine dönüştürmelidir. Bu nedenle akışkana dışarıdan enerji vermiş olurlar. Sistemin toplam mekanik enerjisi ancak sistemin içinde bir pompa varsa değişir. Pompalar için geçerli olan kavramlar, kompresör ve fan gibi akışkana enerji veren diğer araçlar için de geçerlidir.

#### **1.1.2.2.5.Sürtünme Kayıpları**

Sürtünme kayıpları esas olarak akışkanın duvara sürtünmesiyle mekanik enerjinin ısıya dönüşmesinden kaynaklanır. Diğer bir bakış açısıyla sabit duvar molekülleriyle çarpışan akışkan molekülleri hız kaybederler; momentumlarına paralel olarak kinetik enerjileri de azalır. Yer değişimi kinetik enerjileri titreşim enerjisine (iç enerji  $u$ ), dolayısıyla sıcaklığa dönüşür. Duvarlarla sınırlanmayan serbest akımda sürtünmenin olmadığı kabul edilir.

#### **1.1.3. Sıkıştırılmayan Akışkanların Borulardan Akımı**

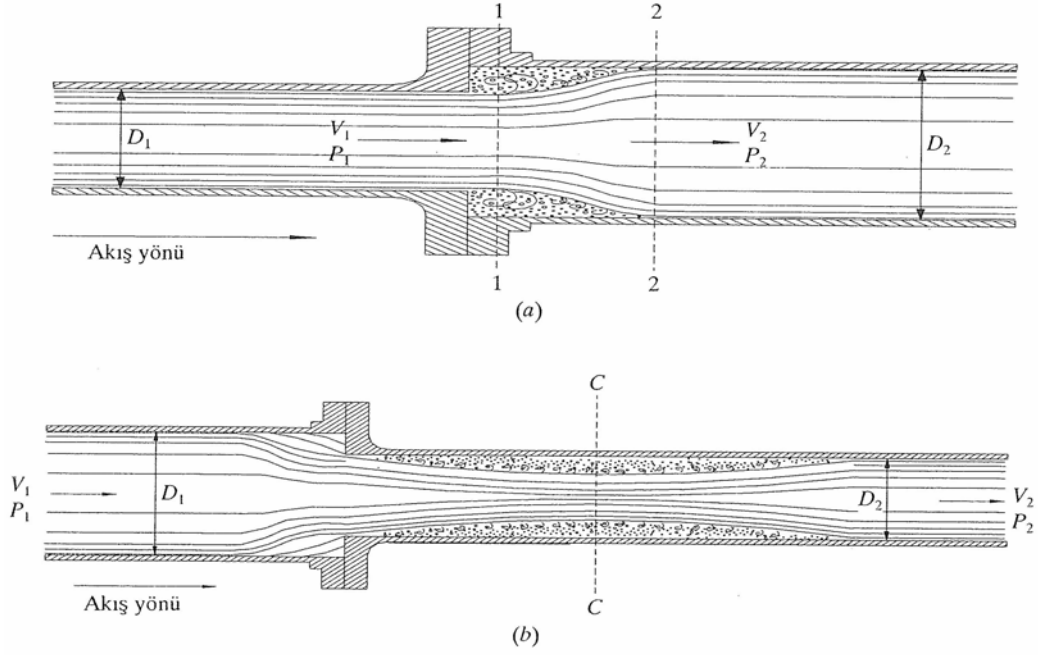
Optimum koşullar altında akışkanın mekanik enerjisi yüksek olduğu için akışkan molekülleri arasındaki etkileşim kuvvetleri kitlesel hareketleri engelleyemez ve akışkan içinde karmaşa başlar. Karmaşalı akımda momentum iletim hızı akışkan hızının bir fonksiyonudur. Bu nedenlerle, teorik bir yaklaşım mümkün değildir. Hız dağılımı denklemlerinin çıkarılmasında belirli bir noktaya kadar yaklaşılabilir. Fakat bir noktadan sonra hız dağılımı veya kayma gerilimi hesaplarının başlangıç noktası deneysel verilere dayanır. Bu nedenle, karmaşalı rejimde hız dağılımı denklemleri yarı teorik (veya eşdeğer olarak yarı ampirik ) olarak kabul edilir. Aynı şekilde akımın sağlanabilmesi için gerekli basınç farkları da  $f$  faktörü gibi ampirik katsayıların kullanımıyla hesaplanabilir.

### **1.1.3.1.Akım Rejimlerinin İncelenmesi**

#### **1.1.3.1.1.Tabakalı ve Karmaşalı Akım Rejimleri**

Simgesel olarak akım, kanal içinde çizilen çizgilerle anlatılmaya çalışılır. Herhangi bir noktada hızın yönünün bu akım çizgilerinin eğimi doğrultusunda olacağı ve akım çizgisini kesen yönde bir akım olamayacağı varsayılır. Akım çizgileri kavram olarak kayma gerilimi altında aşırı derecede deformasyona uğrayarak tabaka haline dönüşmüş sıvı kümelerini dolayısıyla laminer (tabakalı) akım rejimini simgeler. Ancak gösterim kolaylığı açısından akım çizgileri, tabakalı akım rejimi geçerli olmadığı zaman da hızın büyüklüğünü ve yönünü göstermek için kullanılabilir. Akım çizgileri arasından geçen debinin sabit olduğu varsayılır. Akım çizgileri ne kadar sıkısa debi ve hız da o kadar fazladır. Bu çizgiler genelde akımı sınırlayan duvarların profilini takip etmeye çalışır. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi duvar profili ani bir değişim gösteriyorsa çizgiler kopar ve çevrinti oluşturur. Düzenli tabakalar halindeki akım (laminer akım) yerine sıvı kümelerinin rasgele yönlerdeki hareketinin yer aldığı bu karmaşalı rejime türbülanslı rejim denir.

Borunun en kesit alanı sabit kaldığından, akışkanın debisi arttıkça akışkanın ortalama hızı ve merkezdeki maksimum hızı da artar. Akışkan molekülleri arasında viskozite ile simgelenen etkileşim kuvvetleri azsa, kayma gerilimi altında deformasyonu da az olacaktır.



**Şekil 1.1** Akım çizgileri **a)** Ani genişleme, **b)** Ani daralma

### 1.1.3.1.2.Karmaşanın (Türbülansın) Niteliği

Akışkan içinde karmaşa kendiliğinden oluşan bir olay değil, oluşabilmesi için gerekli enerjinin sisteme verilmesiyle sağlanabilen bir durumdur. Akışkan içinde karmaşa oluşmasını önleyen etkileri şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Akışkan kütlelerinin hareket etmeye karşı belirli bir ataleti vardır.
2. Moleküller arası çekim kuvvetlerin bir göstergesi olarak viskozite, akışkanın içindeki bağıl hareketleri önleme (söndürme) yönünde etkir.
3. Sistem olarak alınan akışkan üzerinde etkiyen bir başka kuvvet yoksa, Newton'un 3. yasasına göre akışkan kitlesi ya durgun olarak kalır yada sabit hızda kütleli hareketine devam eder.



Oysa karmaşalı akım (türbülans), akışkanın değişik büyüklükteki kümeler halinde hareket etmesidir. Akışkan üzerine başka bir etki olmaksızın tek başına bir kuvvet etkirse, akışkan kitle halinde hareket eder. Bu nedenle akışkanı kümeler halinde bağımsız hareket eden birimlere dönüştürebilecek bir başka etkinin olması gerekir: Bu etki, kayma geriliminin yarattığı direnç ve kayma (deformasyon) etkisidir. Kayma geriliminin şiddetine bağlı olarak akışkan kitlesi içinde bir küme, dönme hareketi yapmaya zorlanır. Yaratılan kayma etkisi akışkan içinde değişik noktalarda farklılık gösteriyorsa, akışkan kümelerinin hacimleri de ortalama büyüklük etrafında istatistiksel bir dağılım gösterir.

#### **1.1.3.1.3. Borularda Tabakalı ve Karmaşalı Akım Rejimlerinde Momentum İletim Mekanizması**

Milyarlarca molekülün aynı anda hareketiyle borunun merkezinden duvarlara doğru iletilen momentumun yayılım hızı, moleküllerin bireysel hareketleriyle iletilen momentum hızına göre çok daha fazla olduğu için, hız farklarının çok kısa bir zamanda ortadan kalkması ve akışkanın boru içinde her yerde aynı hızda akması beklenirdi. Oysa kayma geriliminin duvarlara doğru artması, molekül kümelerinin duvarlara yaklaşırken parçalanmasına ve deformasyona uğramasına neden olur. Akışkan kümesinin deformasyonu, küme içinde hız gradyanı yaratıldığı anlamına gelir. Hız gradyanı altında momentumun moleküler mekanizmayla iletilmesi için itici güç artar. Duvara doğru kayma gerili arttıkça kümenin deformasyonu da artar ve sonunda

duvar kenarlarında akım rejimi, tabakalı akım haline dönüşür. Tabakalı akım rejiminde momentum iletimi sadece moleküler mekanizmayla gerçekleşir.

Akışkanın hızı ne kadar fazla olursa olsun, kapalı bir kanal içinde, sadece karmaşalı akım rejimini gözlemek mümkün değildir, kayma geriliminin maksimum değerine ulaştığı duvar çevresinde akım mutlaka duvara doğru hızları azalan tabakalar şeklinde oluşacaktır. Tabakalı akımın görüldüğü bu bölgeye laminer alt tabaka yada laminer sınır tabaka denir.

Karmaşalı akım rejiminde laminer sınır tabakanın gözardı edilemeyecek varlığı, borunun merkezinden duvara doğru momentumun iki ayrı mekanizmayla iletildiğini gösterir. Merkez bölgesinde kümeler rahatlıkla hareket edebildikleri için momentum esas olarak kitlesel mekanizmayla iletilir. Kümelerin ani hızlarının zamana göre ortalaması sıfır olsa da ani hızların çarpımının ortalaması sıfırdan farklı bir değere eşitlenir. Silindirik koordinatlarda anlık hızların çarpımı:

$$\overline{V'_z V'_r} \geq 0, \quad \overline{V'_z V'_\theta} \geq 0, \quad \overline{V'_z V'_z} \geq 0$$

akışkanın yoğunluğuyla çarpılınca,

$$\tau_{zz} = -\rho \overline{V'^2_z} \quad (1.25)$$

$$\tau_{zr} = -\rho \overline{V'_z V'_r} \quad (1.26)$$

şeklindeki normal gerilim ve kayma gerilimi denklemleri elde edilir. Bu denklemler, kitlesel mekanizmayla momentum iletimini veren:

$$\tau_k = \rho VV \quad (1.27)$$

denklemin benzeridir. Anlık hızların yarattığı bu tür gerilimlere Reynolds gerilimleri denir.

Duvar çevresindeki tabakalı akım bölgesinde, momentum moleküler mekanizma ile iletilir. Bu mekanizmayla momentum akısı aşağıdaki denklemle verilir:

$$\tau_{rz} = \mu \Delta V_z / \Delta r \quad (1.28)$$

Merkezden duvara doğru gidildikçe toplam momentum akısı içinde kitlesel mekanizmanın etkisi azalır, moleküler mekanizmanın etkisi artar. Herhangi bir  $r$  noktasında her iki mekanizma da etkilidir. Kitlesel momentum akısının moleküler mekanizmayla momentum akısına oranı, akım rejiminin hangi mekanizmanın kontrolü altında olduğunu gösterir. Bir önceki denklemde fark terimleri ( $\Delta$ ) göz ardı edilirse ,

$$\tau_k / \tau_{rz} = (\rho V_z' V_r') / (\mu V_z' / r) \quad (1.29)$$

$$\tau_k / \tau_{rz} = \rho V_r' r / \mu \quad (1.30)$$

elde edilir. Bu denklem yerel değerlere göre Reynolds Sayısıdır. Ancak yerel hızların, özellikle de geçici hızların tayini çok zordur. Kümelerin yerel hızı ortalama hızla doğru orantılı olarak arttığı için, genellikle ortalama hız değeri ile hesaplanan Reynolds sayısı, karmaşanın gelişebilirliği için kriter olarak kullanılır. Ayrıca  $r$  yerine karakteristik uzunluk olarak boru çapı  $D$  alınır.

$$Re = DV\rho / \mu \quad (1.31)$$

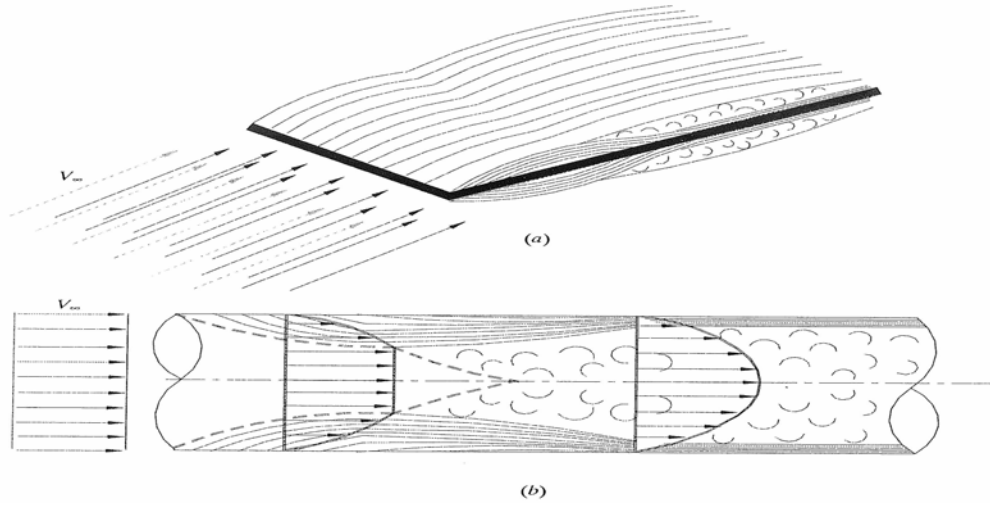
Akım rejiminin tabakalı (laminer) rejimden karmaşalı rejime geçtiği hızdaki Reynolds sayısı, kritik Reynolds sayısı olarak adlandırılır. Borulardan akım için kritik Reynolds sayısı boru duvarlarının pürüzlülüğüne göre 2100-4000 arasında değişebilir. Genelde 2300 olarak kabul edilir.

$$Re_{kr} = DV\rho / \mu = 2300 \quad (1.32)$$

### 1.1.3.2.Sınır Tabaka Teorisi

Akışkanın viskozitesi çok azsa, molekülleri arasındaki etkileşim de az olacağından *ideal* bir akışkan olarak kabul edilebilir. Akışkan kitlesi duvarlar tarafından etkilenmediğinden, hızı tüm en kesit alanı üzerinde hemen hemen sabit, hız profili düzlemseldir. Gerçek akışkanlar belirli bir viskoziteye sahip olduklarından, akışkan hızının duvarlardaki hareketsiz bölgeden, merkezdeki duvardan etkilenmemiş potansiyel hıza (maksimum hıza) ulaşması ani olamaz; belirli bir bölge içinde hız artarak potansiyel hıza erişir. Bir karşı basınç olmadığı halde sadece duvar etkisi altında, moleküler etkileşim kuvvetleri aracılığıyla hızın potansiyel hıza göre azaldığı bu bölgeye sınır tabaka denir. En basit tanımıyla sınır tabaka kalınlığı, hızın duvardaki değerinden, duvarın varlığından etkilenmemiş olan potansiyel hızın %99'una ( $V = 0.99V_{\infty}$ ) ulaştığı kalınlıktır.

Sınır tabaka oluşumunu, şekil 1.2.a' da verilen, sabit potansiyel hız  $V_{\infty}$  profiliyle akan akışkanın içine yerleştirilmiş bir levha örneğiyle açıklanırsa: Levhaya ilk değen akışkanın hızı sıfır olacaktır. Bu tabakanın moleküller arası çekim etkileşim kuvvetleri aracılığıyla diğer akışkan tabakalarını da yavaşlatabilmesi için, momentum iletim hızıyla orantılı olarak belirli bir zaman geçmesi gerekir. Ancak bu zaman zarfında, akışkan levha üzerinde ilerledikçe, hızı azalan akışkan tabakaları daha üstte bulunan tabakaların hızını da yavaşlatacak ve sınır tabaka kalınlığı levha üzerinde giderek artacaktır. Şekildeki gibi hızın, potansiyel hızdan daha düşük olduğu bölgelerin üst sınırının profili çizilirse, sınır tabaka bölgesinin profili çıkartılmış olur.



**Şekil 1.2** Sınır tabaka **a)** Levha çevresinde sınır tabaka oluşumu, **b)** Boru içinde sınır tabaka akımı

Levha üzerinden akımda Reynolds sayısı içinde yer alan hız terimi için potansiyel hız  $V_\infty$ , 'karakteristik uzunluk' olarak da levhanın akışkan akımına göre ön kenarından itibaren levha uzunluğu  $X$  alınırsa:

$$Re_x = XV_\infty \rho / \mu \quad (1.33)$$

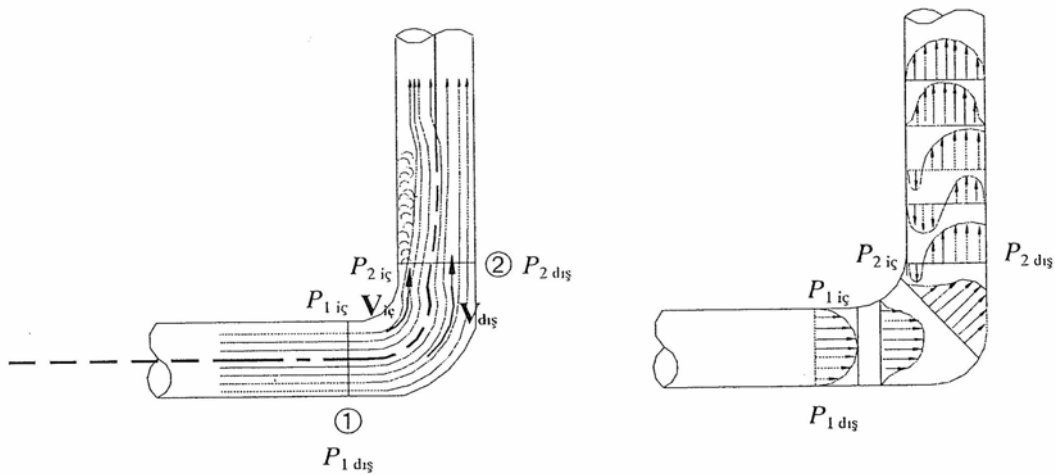
Bu yeni tanımlarla, levha üzerinden akım için kritik Reynolds sayısı 500.000'dir. Levha pürüzsüzse, sınır tabaka içinde karmaşa ancak Reynolds sayısı 1.000.000'a erişince başlar. Bu nedenle levha üzerinde belirli bir mesafeye kadar sınır tabaka içindeki akım tabakalar halindedir. Kritik Reynolds sayısı değeri aşılmca, sınır tabaka içinde karmaşa başlar, sınır tabaka kalınlığı hızla artar. Levhaya çok yakın bir bölgede yine tabakalı akım rejimi vardır. Bu bölgeye laminer alt tabaka denir.

### 1.1.3.2.1. Borularda Sınır Tabaka Ayrışması

Boru en kesit alanının tankın en kesit alanına göre çok küçük olduğu durumlarda boruya girişte akışkanın hızı artar ve mekanik enerji denkleğine göre basıncı düşer. Bu enerji değişimi tanktaki akışkan üzerinde belirli bir çekme etkisi yaratır ve akışkan boruya daralan bir jet akımıyla girer. Diğer bir deyişle, boru girişinde sınır tabaka ayrışması görülür.

Akışkanın takip ettiği katı yüzey ani olarak yön değiştirirse, akışkanın belirli bir ataleti olduğu için bu yön değişimini takip edemez. Yön değiştiren katı duvar boyunca meydana gelen basınç ve hız değişimleri duvar çevresinde ters basınç gradyanları yaratır. Bu basınç gradyanlarının etkisiyle akım yönüne ters yönde hız veya eşdeğer olarak karmaşık akım yaratılır. Laminer alt tabaka katı yüzeyinden ayrılır. Bunun yerini çevrinti akımları alır. Bu olaya sınır tabaka ayrışması, yol açtığı etkiye de sürüklenme kuvvetleri denir.

### 1.1.3.2.2. Dirseklerde Sınır Tabaka Ayrışması



Şekil 1.3 Dirseklerden akımda sınır tabaka ayrışması

Şekil 1.3' de görülen dirseğe akım, belirli bir hız dağılımıyla gelir. Toplam kütle denkliğine göre dirsekten geçiş sırasında debi değişmez. Debiyi sabit tutabilmek için dirseğin dış (geniş) yüzeyindeki akışkan hızının artması, iç (dar) yüzeyindeki akışkanın daha yavaş akması gerekir.

Akışkanın hızında, dar ve geniş yüzeyler arasında meydana gelen bu farklılığın mekanik enerji korunumuna göre bir başka enerji türünde değişime yol açması gerekir. Dirseğe girmeden önce hız dağılımı radyal yönde simetrik olduğundan basınç kesitin her yönünde aynıdır. Dirsek üzerinde iç ve dış yüzeyler arasında hız farkı belirince, basınçta da orantılı olarak bir değişimin meydana gelmesi beklenir. Dirseğin iç ve dış yüzeyleri arasında mekanik enerji korunumundan,

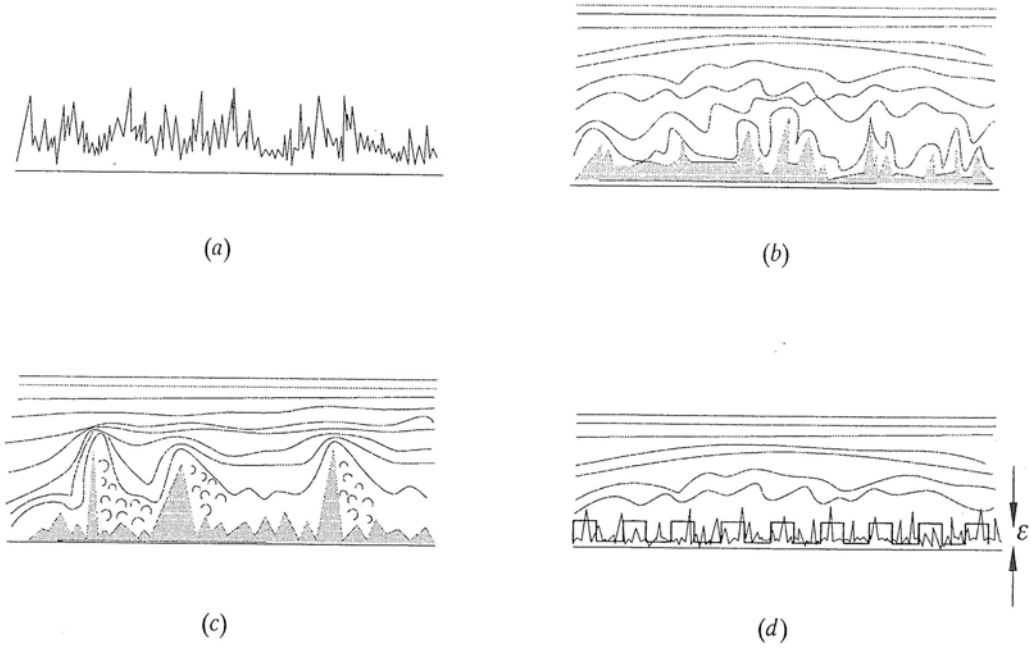
$$P_{iç} + \frac{\rho V_{iç}^2}{2} = P_{dış} + \frac{\rho V_{dış}^2}{2} \quad (1.34)$$

dirseğin iç yüzeyindeki hız azalmasının basınçta artışa neden olacağını görebiliriz. Akışkan dirsek üzerinde ilerledikçe hızı azalır, basıncı artar. Belirli bir noktadan sonra iç yüzeyindeki akım geriye döner, çevrinti hareketleri ve karmaşalı akım başlar. Akışkan dirseği geçtikten sonra hız dağılımı tekrar eski haline döner. Bu arada meydana gelen karmaşalı akım, akışkan kümeleri arasındaki sürtünmeden kaynaklanan basınç kayıplarına neden olur.

### 1.1.3.2.3. Boru Duvarlarındaki Pürüzlerde Sınır Tabaka Ayrışması

Şekil 1.4.c 'de görülen pürüzlülük çevresinde sınır tabaka ayrışması, mekanizma olarak dirseklerde görülen olgunun aynısı fakat mikro ölçeklidir.

Endüstride kullanılan borularda pürüzlülük mikrometre mertebesinde olmasına rağmen pürüzler sayıca çok fazla olduğu için mekanik enerji kayıplarına da etkisi fazladır. Bu etki sürtünme faktörü  $f$  ile bağlantılı olarak incelenir.



**Şekil 1.4.** a) Boru duvarındaki pürüzler, b) Laminer alt tabakadaki akım çizgilerinin pürüzler tarafından etkilenmesi, c) Pürüzlerin çevresinde sınır tabaka ayrışması, d) İdeal pürüzlülük

Şekil 1.4' de pürüz etrafında gerçekleşen akım gösterilmiştir. Akım çizgileri pürüzün ön yüzeyini pürüzün tepesine kadar takip edebilir. Akışkanın hızı azsa, akışkan tabakalar halinde laminer rejimde akıyorsa, pürüzün profilini rahatlıkla takip eder; bu şekilde kat ettiği yol uzar fakat sınır tabakada



ayrışma görülmez. Akışkanın pürüz çevresinde dolaşmasıyla kat ettiği yolun uzaması sürtünme faktörü  $f$  değerinin yükselmesine yol açar. Sınır tabakada ayrışma olmaması, sürtünme faktörü  $f$  değerinin tüm pürüzlülük oranları  $\frac{\varepsilon}{D}$  için aynı kalmasına neden olur. Karmaşalı rejimde akışkanın hızı arttıkça ataleti ani dönüşlere engel olur. Pürüzün ön yüzeyinde tepeye tırmanırken akışkanın hızı artar, akım çizgilerinin arası daralır. Pürüzden sonraki boşluk, akışkanın hızının düşmesine, basıncının bağıl olarak artmasına neden olur. Dirseklerde görülen sınır tabaka ayrışması ve karmaşalı akım mikro ölçekte pürüzün arka yüzeyinde de görülür.

Akım çizgilerinin pürüz etrafını dolaşmamaları nedeniyle bağıl olarak kat ettikleri yol azalır. Bu olgu karmaşalı akımda  $f$  değerinin tabakalı akımdaki değerlere göre daha düşük olmasına yol açar. Pürüzün arka yüzeyinde görülen karmaşalı akım  $f'$  nin pürüzlülük oranına bağımlı olmasına yol açar.

Pürüz yüksekliği arttıkça, karmaşanın olduğu bölgenin genişliği de artacağından basınç kayıpları, dolayısıyla  $f$  artar.

### **1.1.3.3.Borulardan Akımda Basınç Kayıplarının Nedenleri**

#### **1.1.3.3.1.Pürüzlülük**

Pürüzlülük, boru duvarlarının yapıldığı malzemenin yapımından ileri gelen yüzey düzensizlikleridir ve bunlar şekil 1.4.a' daki dibi değişik uzunluktadırlar. Şekilde gösterilen gerçek pürüzler boru boyunca düzensizlik gösterir. Basınç kaybı hesaplarında kullanılmak üzere, şekil 1.4.d' de

gösterilen pürüzlerin ortalama boyutlarına eşdeğer, sabit bir pürüzlülük boyu  $\varepsilon$  tanımlanmıştır.

Çizelge 1.1'de değişik yapım malzemeleri için kabul edilen ortalama pürüzlülük değerleri verilmiştir. Çizelgedeki pürüzlülük değerleri yeni borular için geçerlidir. Borular eskidikçe aşındığından pürüzlülükleri de artar.  $\varepsilon$  değerinin tek başına fazla bir anlamı yoktur. Basınç kayıplarında önemli olan parametre, pürüzlülüğün boru çapına oranı ( $\varepsilon/D$ ) olarak tanımlanan cidar şekil faktörü veya pürüzlülük oranıdır. Bu nedenle, aynı malzemedan yapılmış ince bir borunun duvar şekli faktörü ( $\varepsilon/D$ ) büyük olduğu halde, büyük çaplı borunun ( $\varepsilon/D$ ) değeri çok küçülebilir. Boru çapı çok fazla artarsa, duvar pürüzlülüğünün önemi azalır. Limit durumunda erişilen ( $\varepsilon/D$ ) pürüzlülük oranına hidrolik pürüzlülük ve bu tip borulara da hidrolik pürüzsüz boru veya pürüzsüz boru denir.

**Çizelge 1.1** Malzeme Tipine Göre Pürüzlülük Değerleri

<b>Malzeme</b>	$\varepsilon(mm)$
Pirinç,cam,paslanmaz çelik,bakır	Pürüzsüz
Çekme boru	0.002
Çelik veya dökme demir	0.046
Asfaltlı dökme demir	0.122
Galvanizli çelik	0.152
Dökme demir	0.259
Beton	0.3-3.0
Perçinli çelik	0.9-9.0

### 1.1.3.3.2.Sürtünme ve Sürüklenme Kayıpları

Borularda basınç kayıpları iki ayrı nedenle meydana gelebilir:

1. Sürtünme kayıpları
2. Sürüklenme kayıpları

**Sürtünme kayıpları**, moleküller arası etkileşim kuvvetlerinden kaynaklanır. Moleküller arası çarpışmadan sonra toplam kinetik enerji iki molekül arasında paylaşılır. Duvar molekülleriyle çarpışan akışkan molekülünün yer değişim kinetik enerjisi azalır. Duvardaki moleküller yer değiştiremedikleri için kazandıkları enerji titreşim ve dönme hareketlerinde harcanır. Bu tür moleküler hareketler iç enerjinin, dolayısıyla sıcaklığın artmasına neden olur. Mekanik enerji ısı enerjisine dönüşür. Akışkanın ortalama hızı toplam kütle denkliği tarafından kontrol edildiği için, ısıya dönüşen mekanik enerji basıncın azalmasına neden olur. Makro sistemlerde sürtünme olayına benzerliği nedeniyle, meydana gelen basınç kayıpları 'sürtünme kayıpları' diye anılır. Duvar molekülleriyle çarpışma sayısına bağlı olarak sürtünme kayıpları da artacaktır. Boru üzerinde ilerledikçe akışkan molekülleri daha fazla sayıda duvar molekülüyle çarpışacağından, sürtünme kayıpları boru uzunluğunun bir fonksiyonu olacaktır. Boru çapı ne kadar büyük olursa, toplam akışkan molekülleri içinde duvarla çarpışan moleküllerin oranı azalacağından, sürtünme kayıpları da azalacaktır.

**Sürüklenme kayıpları**, pürüzün akım yönüne göre arka yüzeyinde sınır tabaka ayrışması ve meydana gelen çevrinti hareketlerinden kaynaklanır. Endüstriyel sistemlerde mutlak pürüzsüzlük olamayacağından sürtünme ve sürüklenme etkilerini birbirinden ayırmak zordur. Bu nedenle,

mekanik enerji korunumundaki basınç kayıpları terimi, her iki etkiyi de göz önüne alan bir  $f$  faktörü içerir.

Sürtünme faktörü, duvardaki kayma geriliminin kinetik enerjiye oranı olarak yorumlanır.

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (1.35)$$

Burada  $V$ , akışkanın ortalama hızıdır.

Basınç kayıplarıyla kayma gerilimi arasındaki ilişki momentum dengelerinden çıkartılır:

$$\tau_w = \frac{(\Delta P)R}{2L} \quad (1.36)$$

Borudaki basınç kayıpları,

$$\Delta P = \frac{2\tau_w L}{R} = \frac{4\tau_w L}{D} \quad (1.37)$$

denklemlerle boru duvarındaki kayma gerilimi cinsinden gösterilebilir. Bu denklem enerji terimiyle çarpılıp bölünerek tekrar düzenlendiğinde, kayma geriliminin kinetik enerjiye oranını, dolayısıyla sürtünme faktörü-basınç kaybı bağıntısını veren bir denklem elde edilir.

$$h_s = \Delta P = \frac{4\tau_w L}{D} \left( \frac{\frac{1}{2}\rho V^2}{\frac{1}{2}\rho V^2} \right) = 4 \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V^2} \right) \left( \frac{1}{2}\rho V^2 \right) = 4 \left( \frac{L}{D} \right) f \left( \frac{1}{2}\rho V^2 \right) \quad (1.38)$$

Denklem yoğunluğa bölünürse, sürtünme kayıplarını veren:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = 4 \left( \frac{L}{D} \right) f \left( \frac{1}{2}V^2 \right) \quad (1.39)$$

Darcy-Weisbach denklemi elde edilir. Bu denklem, tüm akışkan ve akım rejimleri için kullanılan genel bir denklemdir. Denklemdaki  $(4L/D)$  oranı, momentum iletim alanının akım alanına oranı  $((\pi DL)/(\pi D^2/4))$  veya toplam ıslak çevrenin akım en kesit alanına oranı olarak değerlendirilebilir. Ayrıca bu oran içerdiği  $L$  terimiyle, kayıpların yola bağımlılığını göstererek termodinamiğin birinci yasasına uyum sağlar.

Sürüklenme kuvveti,  $C_D$  sürüklenme katsayısıyla kinetik enerjinin çarpımı şeklinde ifade edilir:

$$F_D = AC_D \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.40)$$

Bu denklem en kesit alanına bölünerek basınç cinsinden yazılabilir:

$$\Delta P_{\text{sürüklenme}} = C_D \left( \frac{1}{2} \rho V^2 \right) \quad (1.41)$$

Sürüklenme katsayısı cismin geometrik şekline (küre, silindir, disk) ve akım hızına, dolayısıyla da Reynolds sayısına bağlı olarak değişir.

(1.39) denklemi,

$$\Delta P = \left( f \frac{4L}{D} \right) \left( \rho \frac{V^2}{2} \right)$$

şeklinde yazılırsa  $f$  sürtünme faktörünün,  $C_D$  sürüklenme katsayısının eşdeğeri olduğu görülür. Bu denklem, belirli bir şekil için tanımlanmıştır. Borulardan akım için bu 'belirli şekil' birim uzunlukta boru duvarındaki pürüzler olarak düşünülürse, boru hattı boyunca bu şekil  $L$  defa tekrarlanacaktır. Akan akışkanın çevreyle temas eden kesimi de bu kayıplara maruz kalacaktır. Salt sürüklenme kayıpları açısından  $4fL/D$  faktörü bu

şekilde değerlendirilebilir. Diğer bir bakış açısıyla,  $4fL/D$  faktörü, sürüklenme kayıplarının oluşum mekanizması içinde zorunlu olarak yer alan pürüz etrafında sürtünme kayıplarıdır.

Bu noktaya kadar verilen denklemlerdeki  $\Delta P$ , sadece sürtünme ve sürüklenme kayıplarını karşılamak için gerekli basınç farkıdır. Sistemin akımını sağlamak için gerekli toplam basınç farkı olarak alınmamalıdır.

(1.39) denklemi metre Akışkan Sütunu [mAS] birimlerinde,

$$H_s = 4 \left( \frac{L}{D} \right) f \left( \frac{1}{2g} V^2 \right) \quad (1.39a)$$

veya [Pa] biriminde,

$$h_s = 4 \left( \frac{L}{D} \right) f \left( \frac{1}{2} \rho V^2 \right) \quad (1.39b)$$

yazılabilir. Pompa basınçları [mSS] birimlerinde verildiği için, (1.39a) denkleminin pompa seçiminde kullanılan sistem eğrilerinin oluşturulmasında kullanılması daha uygun olur. (1.39b) denkleminin kullanımı, yükseklik farkının bulunmadığı sistemlerde mekanik enerji korunumundaki basınç kayıplarının kinetik enerji birimi cinsinden ifade edilmesinde uygundur:

$$P_1 - P_2 = \Delta \left( \frac{\rho V^2}{2} \right) + \left( 4f \frac{L}{D} \right) \left( \frac{\rho V^2}{2} \right) \quad (1.42)$$

### 1.1.3.3.3. Sürtünme Faktörü Korelasyonları

(1.35) denklemiyle duvardaki kayma geriliminin kinetik enerjiye oranı olarak tanımlanan sürtünme faktörü  $f$ , Fanning sürtünme faktörüdür. Şekil

faktörünün bir mekanizmaya dayandırılmadan sadece  $L/D$  olarak kabul edildiği Darcy sürtünme faktörü de kullanılabilir.

#### 1.1.3.3.4.Sıcaklığın Sürtünme Faktörü Üzerindeki Etkisi

Sürtünme faktörü Reynolds sayısının, Reynolds sayısı da akışkanın yoğunluk ve viskozitesinin bir fonksiyonu olduğu ve akışkanın özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişeceği için sürtünme faktörü de değişecektir. Viskoziteye bağlı olarak Reynolds sayısı,  $f$  ve boru içindeki hız profili değişir. Eğer hız profilinin bilinmesi kesinlikle gerekli değilse, sürtünme faktörü dolayısıyla basınç kaybı üzerine duvar sıcaklığının etkisi aşağıdaki gibi göz önüne alınabilir:

1. Boru giriş ve çıkışlarındaki akışkan sıcaklıklarının aritmetik ortalaması alınır. Reynolds sayısı bu ortalama sıcaklıktaki fiziksel özelliklere göre hesaplanır.
2. Sürtünme faktörü  $f$ , Moody diyagramından bulunur veya Colebrook denklemi ile amirik sürtünme faktörü denklemlerinden uygun olanıyla hesaplanır.
3. Bulunan sürtünme faktörü, sıcaklık düzeltme faktörü  $\phi$ 'ye bölünür.  $\phi$ , Reynolds sayısı ve akışkanın ısıtılma veya soğutulmasına göre aşağıdaki denklemlerden bulunur.

Karmaşalı akım rejimi:

$$\text{Re} > 2300 \quad \rightarrow \quad \begin{array}{ll} \text{ısıtmada} & \phi = (\mu_i / \mu_w)^{0.17} \\ \text{sogumada} & \phi = (\mu_i / \mu_w)^{0.11} \end{array}$$

Tabakalı akım rejimi:

$$\begin{array}{l} \text{Re} < 2300 \quad \rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{ısıtmada} \quad \phi = (\mu_i / \mu_w)^{0.38} \\ \text{sogumada} \quad \phi = (\mu_i / \mu_w)^{0.23} \end{array} \end{array}$$

Bu denklemlerde  $\mu_i$ , akışkanın ortalama sıcaklığındaki viskozitesi,  $\mu_w$  ise akışkanın duvar sıcaklığındaki viskozitesidir.

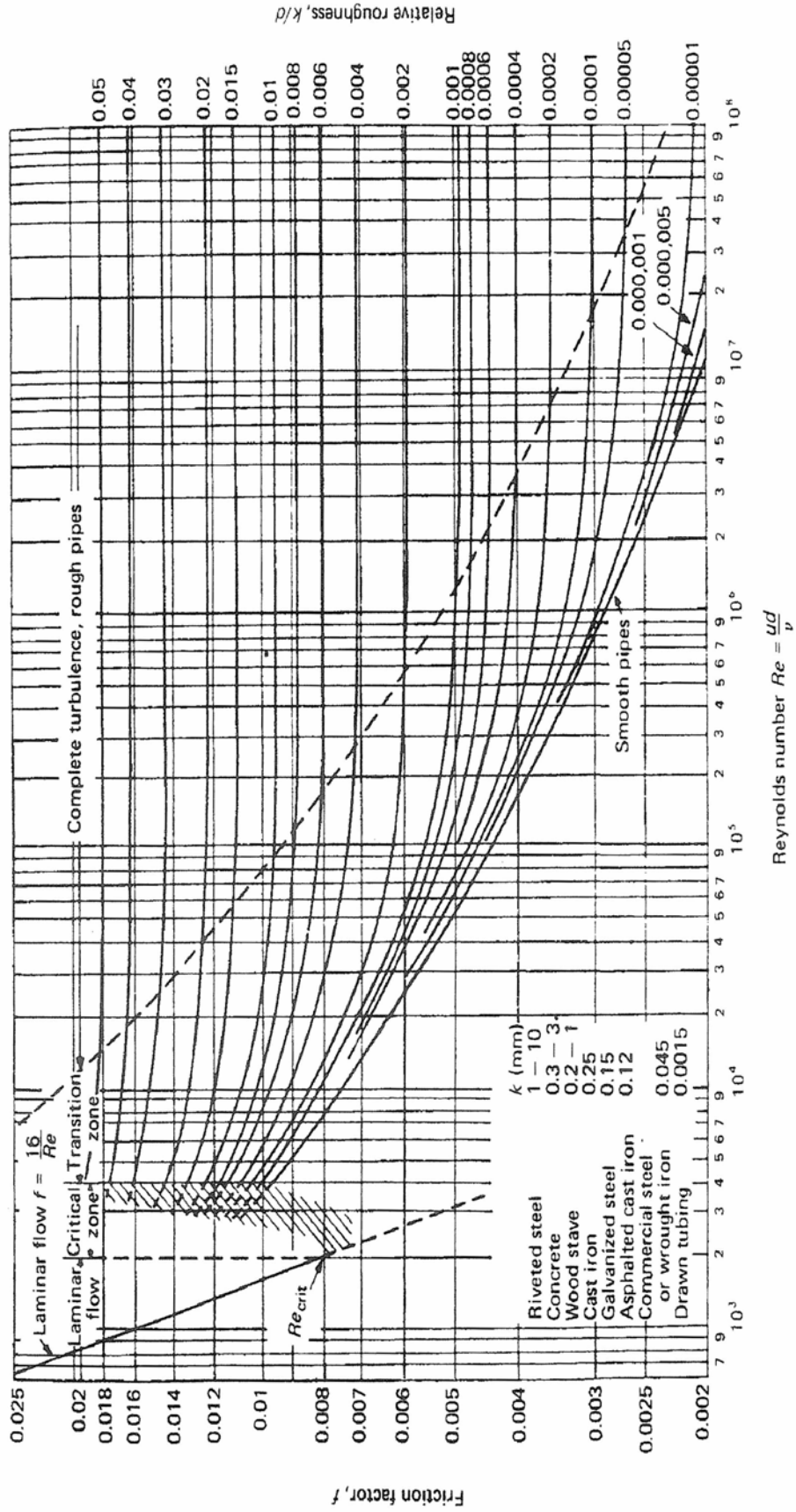
### 1.1.3.3.5. Bağlantı Elemanlarında Sürüklenme Kayıpları

Akışkan nakil hattı üzerine yerleştirilen bağlantı elemanlarında ve boru çaplarının ani olarak değiştiği bölgelerde sürüklenme kayıpları meydana gelir.

Bağlantı elemanlarındaki sürüklenme kayıpları “eşdeğer uzunluk” cinsinden verilir. Eşdeğer uzunluk, bağlantı elemanlarındaki basınç kaybına eşit bir basınç kaybı yaratacak aynı çaptaki borunun uzunluğu şeklinde tanımlanabilir. Genelde eşdeğer uzunluklar, elemanın bağlandığı borunun çapına göre değişir. Böylelikle, bağlantı elemanlarının şekil faktörü  $L/D$ ' yi de içeren yeni bir basınç farkı denklemi elde edilir.

$$\Delta P = 4f \left[ \left( \frac{L}{Di} \right)_{\text{boru}} + \sum \left( \frac{L}{Di} \right)_{\text{baglan}} \right] \left( \frac{\rho V^2}{2} \right) \quad (1.43)$$





Şekil 1.5 Moody Diyagramı

**Çizelge 1.2** Ampirik Sürtünme Faktörü Denklemleri

<b>Denklem</b>	<b>Re aralığı</b>	<b>Pürüzlülük</b>
<b>Wood Denklemi</b> $f = a + b Re^{-c}$ $a = 0.0235 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.225} + 0.1325 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)$ $b = 0.0235 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.44}$ $c = 0.0235 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.134}$	Re>2300	Pürüzlü
<b>Pürüzsüz borular için Nikuradse Denklemi</b> $\frac{1}{\sqrt{f_D}} = 0.86 \ln [Re \sqrt{f_D}] - 0.8$		Pürüzlü
<b>Pürüzlü borular için Nikuradse Denklemi</b> $\frac{1}{\sqrt{f_D}} = 1.14 - 0.86 \ln \left[ \frac{\varepsilon}{D} \right]$		Pürüzlü
<b>Blasius Denklemi</b> $f = 0.079 Re^{-1/4}$	Re<100000	Hidrolik pürüzsüz Boru $\frac{\varepsilon}{D} \cong 0$

**Çizelge 1.2 (devam)**

<p><b>Swamee-Jain Denklemi</b></p> $f_D = \frac{1.325}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3.27D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$	$5000 \leq Re \leq 10^8$	$10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 10^{-2}$
<p><b>Olujic Denklemi</b></p> $f = \left\{ -1.737 \ln \left[ \begin{array}{l} 0.269 \frac{\varepsilon}{D} - \frac{2.185}{Re} \\ \times \left( \ln 0.269 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{14.5}{Re} \right) \end{array} \right] \right\}^{-2}$	$Re > 4000$	Pürüzlü
<p><b>Von Karman-Prandtl Denklemi</b></p> $\frac{1}{\sqrt{f_D}} = 2.0 \log_{10} (Re \sqrt{f_D}) - 0.8$	$3000 < Re < 1 \times 10^7$	Hidrolik pürüzsüz boru
<p><b>Colebrook Denklemi</b></p> $\frac{1}{\sqrt{f}} = -4.0 \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon}{Di} + \frac{1.255}{Re \sqrt{f}} \right]$	$3000 < Re < 1 \times 10^7$	Pürüzlü
<p><b>Jain Denklemi</b></p> $f_D = 0.3138 Re^{-1/4}$ $f_D = 0.1188 Re^{-1/4}$	$3000 < Re < 1 \times 10^5$ $1 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^7$	Hidrolik pürüzsüz boru

## 1.2. Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmaların Kaynak Araştırması

Yüzey pürüzlülüğü, dalgalılığı ve düzlüğü elektrik yükünün bir motor parçasına dağıtılabilmesi açısından önemli faktörlerdir ve bir parçanın servis ömrünü belirlerler. Panel boyunca kabul edilebilir olmayan yüzey bitimleri motor bileşenlerinin vakitsiz arıza vermesine yol açabilir ki bu gerek makinenin sahibi gerekse makinenin onarım, ölçüm ve bakımının yapıldığı tamir atölyesi açısından yüksek maliyetli sonuçlar doğurabilecek bir durumdur<sup>(4)</sup>.

Roland Huggins<sup>(5)</sup>, “Su Hızının Hidroliğin Doğruluğu ve Kesinliği Üzerindeki Etkisi” isimli makalesinde konuya şu şekilde değinmiştir:

Bilindiği gibi su bir borunun içinden akarken, sürtünme yüzünden bir enerji kaybı olur. Bu kayıp, su partiküllerinin birbirleriyle olduğu gibi boruyla da sürtünmelerinden kaynaklanır. Teknik olarak bu kayıp sürekli değildir, suyun hızıyla değişir. Sürtünme kayıplarını etkileyen su hızının tabakalı (laminer), geçiş ve karmaşalı (türbülanslı) akışlar olmak üzere üç ana aşaması vardır. Tabakalı ve geçiş aşamalarında sürtünme kaybı faktörü su hızı ile birlikte ağır değişikliklere uğrar. Bu aşamalar çok düşük akış oranlarında meydana gelir. Neyse ki, endüstride rastlanılan akışlar yalnızca sürtünme kaybı faktörü üzerindeki etkinin nispeten lineer olduğu türbülans aşamasındadır. Sürtünme kayıplarının tahmininde, bazı denklemlerde bu değişiklik hesaba katılırken, kimilerindeyse itibar edilmemektedir.

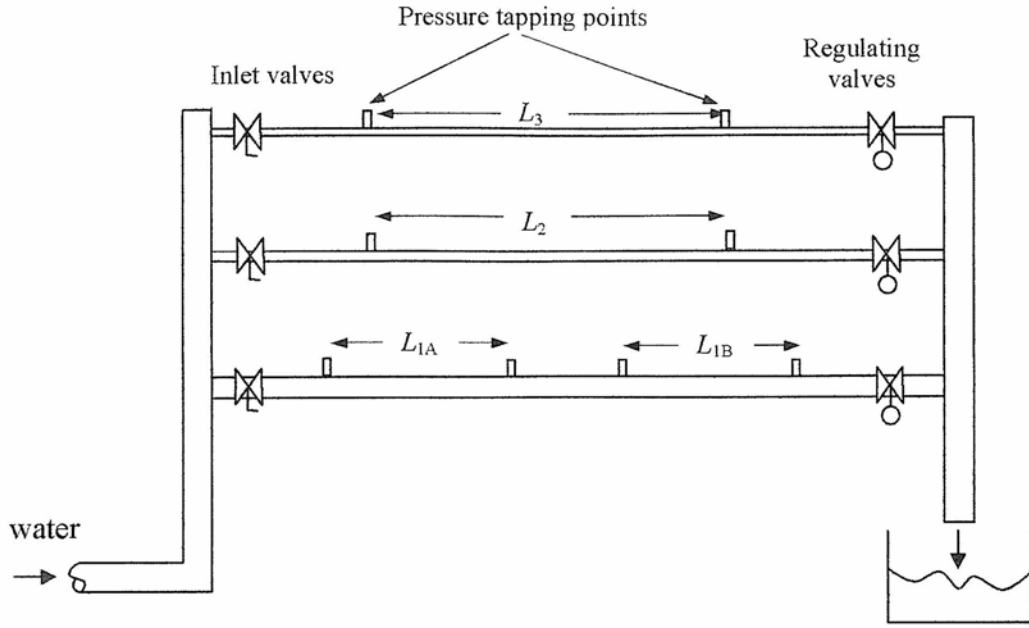
Her ne kadar kesin bir doğruluk ifade eden hesaplanmış kayıptan bahsediliyor olsa da hesaplamaların yalnızca gerçek kayıpların matematiksel bir tahmininden ibaret olduğuna dikkat çekilmelidir.

Matematiksel denklemlerin temel problemlerinden biri uygulanmalarının çok daha güç oluşudur. Örneğin sürtünme faktörü aynı boru materyali için bir değişmez değildir, su hızı ile değişir. Sürtünme faktörünü belirlemenin tipik metodu Moody diyagramının kullanılmasıdır. Diyagramda Reynolds rakamları (su hızındaki artıştan dolayı) yükseldikçe sürtünme faktörü düşer. Kullanımını kısıtlayan bir diğer ciddi sebep de yeni boru tesisatı hariç boru materyalinin pürüzlülüğüne dair halihazırda çok az bilgi olması veya hiç olmamasıdır.

Sürtünme faktörleri, belirli pürüzlülüğün boru çapına bölünmesiyle belirlenen, yeni boru için göreceli pürüzlülüğe dayanmaktadır.

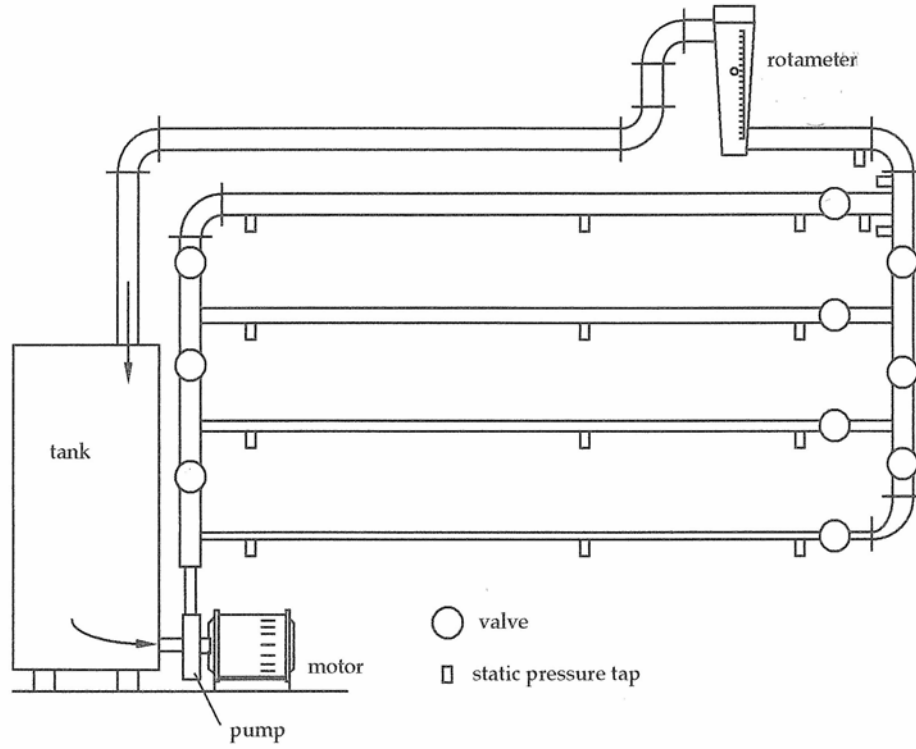
Akım sistemlerinde oluşan enerji kayıplarının tespit edilmesiyle ilgili çok sayıda akademik çalışma mevcuttur. Birçok üniversitede laboratuvar çalışmaları kapsamında, akışkanlar mekaniği kendine önemli bir yer bulmakta ve sürtünme kayıpları ile boru pürüzlülük değerleri çeşitli deney düzenekleri yardımıyla incelenmektedir. Uygulanmış sistemler her zaman olduğu gibi bu çalışmada da, deney düzeneğinin tasarımına ışık tutmuştur.

Şekil 1.6 'da görülen deney düzeneği dört borudan oluşmaktadır. Pürüzlendirilmiş 1B numaralı boru hariç tüm borular bakır malzemedendir yapılmıştır. 1A ve 1B boruları aynı çapta ve seri olarak bağlanmış durumdadırlar. Tüm borular ayrı ayrı test edilir. Boru hatları üzerinde basınç ölçerler ve vanalar bulunmaktadır. Giriş vanaları yardımıyla hatlarda akış ayrı olarak sağlanır ve basınç düşümleri ölçülür. Çıkış vanaları yardımıyla da farklı debiler için basınç düşümleri incelenir<sup>(6)</sup>.



**Şekil 1.6.** Deney düzeneğinin şematik gösterimi

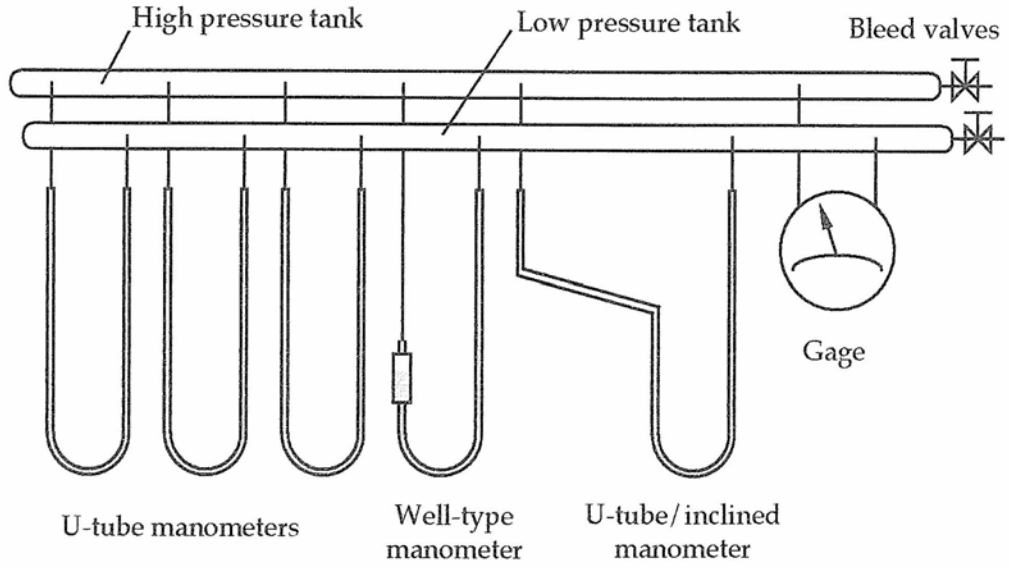
Şekil 1.7, borularda akış test cihazının şematik gösterimidir. Cihaz, bir merkezkaç pompa ve tarafından tahliye edilen bir su deposunu içermektedir. Sistem dört farklı çapta olan hatlardan oluşmaktadır. Sisteme basınç farklarını ölçebilmek için manometreler ve debiyi ölçebilmek için de bir debi metre yerleştirilmiştir. Cihazda 1", 3/4", 1/2", 3/8" bakır borular, 1" 90 T-bağlantı, 1"90 dirsek, 1" vana ve 3/4" vana yer almaktadır.



**Şekil 1.7.** Borularda akış test cihazı şematik gösterimi

Amaç, debinin fonksiyonu olarak oluşan basınç farklarını ölçebilmektir. Basınç farkları ölçüldükten sonra  $f$  sürtünme faktörü hesaplanır, Moody diyagramı kullanılarak boru pürüzlülük değeri bulunur.

Basınç farkları birçok yolla ölçülebilir. Bourdon tüpü ölçü cihazları, manometreler ve transdüserler bunlardan bazılarıdır. Şekil 1.8' de bu ölçüm cihazlarının örnekleri gösterilmiştir<sup>(7)</sup>.

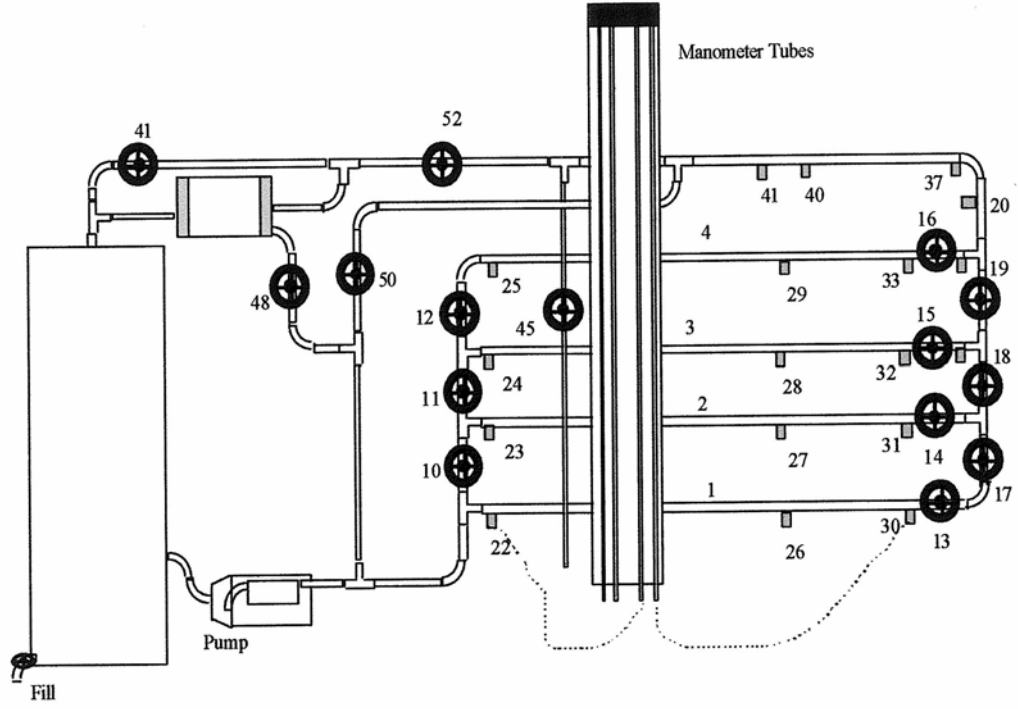


**Şekil 1.8.** Basınçölçerlerin şematik gösterimi

Sıkıştırılmayan akışkanların akımlarında yoğunluk, viskozite ve sıcaklığın değişmediği ve özgül ağırlığın sabit olduğu kabul edilir. Belirli çap ve uzunluktaki bir boru için sürtünmeye bağlı basınç kayıpları  $Re$  sayısının ve buna bağlı olarak yoğunluk, viskozite ve hızın fonksiyonudur. Karmaşa ne kadar çok olursa sürtünme kayıplarının ölçülen basınç düşümüne katkısı o kadar çok olur. Bu kavram, deneysel anlamda büyük önem taşımaktadır<sup>(8)</sup>.

Şekil 1.9'da görülen çevrim cihazının amacı da dört farklı çaptaki bakır borunun basınç düşümlerini belirlemek ve yüzey pürüzlülüğü şartnamesini oluşturmaktır. Dört farklı boruda değişik debiler için basınç düşümleri ölçüm cihazları yardımıyla ölçülür. Sonuçlar, bakır boru için, pürüzlülük değerini tespit etmek için kullanılır<sup>(9)</sup>.





**Şekil 1.9.** Akışkan çevrim cihazı şematik gösterimi

Borularda akışın kapasitesi, duvarların pürüzlülüğünün etkisi altındadır. Pürüzlülüğün artması akımı engellemekle kalmaz ayrıca hidrolik kapasitenin düşüşünde önemli rol oynar. Yapılan çalışmaların sonuçları göstermektedir ki; bu istenmeyen pürüzlülükler sistemlerin kapasitesini yaklaşık %25 ine kadar düşmesine yol açabilmektedir<sup>(10)</sup>.

### 1.3. Çalışmanın Amacı

Akışkanlar mekaniği esas olarak momentum iletimi ve mekanik enerji denklileri üzerine kurulmuştur. Isı iletimi akım problemlerinde yer almaz.

Genellikle ısı iletiminin etkisi akışkanın fiziksel özelliklerindeki değişimlerin denkliklere katılması şeklinde ele alınır. Ancak ısı iletimi ile momentum iletiminin kesiştiği olay, mekanik enerjinin sürtünme yoluyla daha az kullanılabilir formdaki ısı enerjisine dönüşümü, akışkanlar mekaniğinde çok önemli bir problem oluşturur ve mekanik enerji yada basınç kaybı olarak anılır.

Bir boru içinden akışkanın akabilmesi için borunun bir kesitindeki basıncın diğer kesite göre daha büyük olması gerekir. Akışkana uygulanan kuvvet  $F(=A\Delta P)$ , akışkanın akmasını sağlar, yani basınç birim hacimdeki akışkanın kinetik enerjisine dönüşür. Uygulanan dış kuvvet altında  $V$  hızıyla akan akışkanın her bir molekülü artık  $mV$  kadar bir momentuma sahiptir. Akışkan moleküllerinin hızı dış kuvvet tarafından dayatılan ve iç enerjisinden kaynaklanan hızların bileşkesine eşittir. Katı duvarlara çarpan akışkan moleküllerinin kinetik enerjisi katı moleküllerde titreşime neden olur. Böylelikle dış kuvvetlerin akışkan içinde yarattığı mekanik enerji, katı duvar tarafından ısıya dönüştürülerek basınç kaybına neden olur. Bununla birlikte katı duvarların yüzey düzensizlikleri nedeniyle meydana gelen sınır tabaka ayrışması ve çevrinti hareketleri de basınç kayıplarının bir diğer önemli sebebidir. Endüstriyel uygulamalarda mutlak pürüzsüzlük söz konusu değildir ve bu etkileri ayırmak oldukça zordur. Bu nedenle basınç kayıpları, her iki etkiyi de içine alan sürtünme faktörünü içerir.

Bu çalışmanın amacı, hazırlanan akım sisteminde farklı malzemelerden yapılmış, yani farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip boruların, sistemin giriş ve çıkış basınç değerlerinin ölçülmesi suretiyle bulunan basınç

kayıplarından sürtünme faktörlerine ulaşmaktır. Hesaplanan sürtünme faktörü değerlerinden de kullanılan malzemelerin pürüzlülük değerlerine geçilir. Bu değer her malzeme için farklılık gösterdiği gibi malzeme kullanıldıkça da değişir. Hazırlanan deney düzeneğinin temel amacı referans çaptaki istenilen her borunun, basınç kayıplarından yola çıkarak, pürüzlülük değerini bulabilmektir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Deney Düzeneğinin Tasarımı

Sürtünme kuvvetlerinin bulunduğu boru akış deneyleri, akışkanların hareket davranışlarının incelenmesinde önemli bir yer teşkil etmektedir. Genellikle akışkanlar, boru içinde bir yerden bir yere pompalar yardımıyla taşınırlar. Pompalar, mekanik enerjiyi (moment, hız) hidrolik enerjiye (debi, basınç) dönüştürürler. Boru içindeki sürtünme kayıpları da basınç düşümüne yol açar. Boru içinde oluşan basınç kayıpları aşağıdaki etkenlerin bir fonksiyonudur:

- Boru uzunluğu
- Akışkanın hızı
- Boru çapı
- Boru duvar pürüzlülüğü
- Akışkanın özellikleri (yoğunluk ve viskozite)<sup>(6)</sup>

Bu etkenlerden; boru uzunluğu, akışkan hızı, boru çapı ve sıcaklığın (buna bağlı olarak akışkan özelliklerinin) sabit kaldığı kabul edildiğinde boruda oluşan basınç kaybından, boru duvar pürüzlülük değerlerine ulaşılabilir.

Deney düzeneğinin tasarlanmasındaki amaç, farklı malzemelerden yapılmış boruların pürüzlülük değerlerini tespit edebilmektir. Bunun için akım sisteminde oluşan basınç farkı ölçülerek, boruların sürtünme faktörü

hesaplanmıştır. Sürtünme faktörü ( $f$ ), Reynolds sayısı ( $Re$ ) ve pürüzlülük oranının ( $\varepsilon/D$ ) fonksiyonudur. Moody diyagramı, sürtünme faktörünün, Reynolds sayısı ve pürüzlülük oranı üzerindeki fonksiyonel bağımlılığını gösterir.

Sürtünme faktörü ve  $Re$  sayısı hesaplandığında Moody Diyagramı okumalarıyla malzemelerin pürüzlülük değerlerine ulaşılır.

Bu kavramlardan yola çıkarak, yapılan araştırmalar neticesinde, mevcut düzeneklerin benzeri bir model oluşturulmuştur.

**Çizelge 2.1** Tasarım Parametreleri

Parametre	Büyükük	Yapılan İşlem
Boru Uzunluğu	1 m	Kabul edildi
Boru Çapı	½"	Kabul edildi
Akışkanın hızı	3-5 m/s	Kabul edildi
Debi	40 lt/dk	Hesaplandı
Basınç Farkı	1-3 bar	Hesaplandı
Motor	0.5 BG, Basma yüksekliği 35 m	Seçildi

## 2.1.2. Deney Düzeneği ve Ekipmanların Tanıtılması

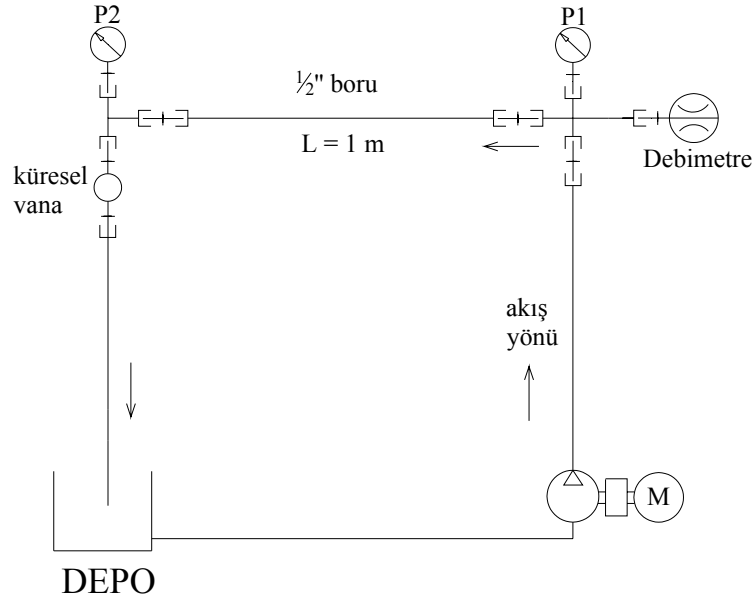


**Şekil 2.1.** Deney düzeneğinin gösterimi

Şekil 2.1’de deney düzeneği görölmektedir. Akım sisteminin şematik gösterimi ise Şekil 2.2’de verilmiştir. Düzenek, farklı malzemelerden yapılmış ½” çapında ve 1 m uzunluğundaki boruların monte edilebildiği tek borulu bir sistemdir. Sistem; motor, pompa, su tankı, ½” lik boru, manometreler ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır.

Şekilde, akım yönü ve ölçüm yapılacak basınç noktaları gösterilmiştir.  $P_1$  akışkanın sisteme giriş basıncını,  $P_2$  ise sistemden çıkış basıncını

simgelemektedir. Akışkan olarak, fiziksel özellikleri ve temizliği göz önünde bulundurularak, su kullanılmıştır.



**Şekil 2.2.** Akım sisteminin şematik gösterimi

Deney düzeneğini oluşturan ekipmanlar sırasıyla aşağıdaki gibidir:

### 2.1.2.1.Pompa ve Motor

Bilindiği gibi pompa, mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştüren bir araçtır. Motoru tarafından (ilk hareket ettirici) tahrik edildiğinde, pompa temelde iki görevi yerine getirir. Pompa öncelikle, giriş portunda bir vakum oluşturur. Bu vakum, atmosferik basıncın akışkanı depodan pompaya doğru

göndermesini sağlar. İkinci olarak pompanın mekanik hareketi, bu akışkanı pompalama boşluklarında hapsederek, pompa içinden geçirip sisteme basar.

Sistemde, 220 V monofaze preferical pompa kullanılmıştır. Motor gücü 0.5 BG, kapasitesi 40 lt/dk, giriş-çıkış ağzları 1” ve basma yüksekliği maksimum 35 m 'dir.

### **2.1.2.2.Depo**

Uygun ve doğru olarak tasarlandıkları ve üretildikleri taktirde, depoların (veya tankların), sistemin işlevi ve ekonomik performansı üzerinde çok büyük etkileri vardır. Depo, sistemden geri dönen akışkanın depolanmasını ve korunmasını sağlar. Hareketlendiricideki güç kayıplarından kaynaklanan yüksek harareti dağıtarak düşürür. Havanın akışkandan ayrılmasını sağlar. Kirleticilerin akışkandan arındırılıp, deponun dibine çökeltilmesine olanak tanır. Ayrıca bu uygulamada depo, pompa ve motor için bir montaj platformu olarak da işlev görmektedir<sup>(11)</sup>.

Depo, 400 x 600 x 400 mm ebatlarında, ST 37 tipi su tankıdır. Deponun üzerinde su seviyesini takip etmek üzere bir gösterge bulunmaktadır.

### **2.1.2.3.Borular**

Kullanılan boruların özellikleri Çizelge 2.1'de belirtilmiştir.



**Çizelge 2.2** Sistemde Kullanılan Boruların Özellikleri

<b>Boru No</b>	<b>Borunun Tipi</b>	<b>Di (mm)</b>
<b>1</b>	16 x 2 Çelik Boru	12
<b>2</b>	Hortum	12,7
<b>3</b>	Körüklü Teflon Hortum	12,7
<b>4</b>	16 x 2 Bakır Boru	12

#### **2.1.2.4.Manometre**

Basınç; mutlak basınç, ölçek basıncı veya basınç farkı (diferansiyel basınç) şeklinde ölçülebilir. Bir ölçüm aracının mutlak basıncı ölçebilmesi için, ya yapısı içinde mutlak boşluğun bulunması veya aracın mutlak boşluğa göre kalibrasyonunun (ayarının) yapılması gerekir. Ölçek basıncını ölçen araçlar atmosferik basınçta, yani ortam şartlarında hareketsiz ve tepkisiz kalırlar. Basınç ortam basıncından saptığı anda ölçüm mekanizması devreye girer<sup>(2)</sup>.

Deney düzeneğinde iki adet 1 bar'lık, kuru tip manometre kullanılmıştır.

#### **2.1.2.5.Debimetre**

Akım doğrudan yada dolaylı olarak ölçülebilir. Akım yolunda bulunan bir cismin dönme hızının kalibrasyonu ile debinin doğrudan ölçümü sayaçlar yardımıyla yapılır<sup>(2)</sup>.

Sistemde sayaç tipi bir debimetre kullanılmıştır.

### 2.1.3. Deney Düzeneğinin Maliyet Analizi

Deney düzeneğini oluşturan ekipmanların fiyatları ve işçilik ücretleri değerlendirilerek, çalışmanın maliyet analizi yapılmış ve toplam maliyet hesaplanarak Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.3** Sistemin Maliyet Analizi

	<b>MALZEME</b>	<b>Açıklama</b>	<b>Miktar (Ad.)</b>	<b>Birim Fiyat (YTL)</b>	<b>İşçilik Bedeli (YTL)</b>	<b>Maliyet (YTL)</b>
1	<b>Tezgah ve Depo</b>	Malzeme ve boya	1	325	100	425
2	<b>Pompa ve Motor</b>	40lt/dk 0.5 BG	1	110	-	110
3	<b>Borular</b>	Çelik 16x2	1	4,20	-	4,20
		R1 Hortum ½”	1	12	-	12
		Sp. Hortum ½”	1	27,80	-	27,80
		Bakır 16x2	1	8	-	8
4	<b>Manometre</b>	1Bar	2	14,20	-	28,40
5	<b>Debimetre</b>	Sayaç	1	150	-	150
6	<b>Bağlantı Elemanları</b>	Kelepçe,rakor, hortum ve boru	21	2	55	97
<b>TOPLAM MALİYET</b>						<b>862,40</b>

## **2.2. Yöntem**

### **2.2.1. Ölçüm Yöntemi**

Ölçümlerin doğru ve güvenli bir şekilde yapılabilmesi için, tüm kontroller yapılmış , sistem çalışmaya hazır hale getirilmiş olmalıdır.

İlk adımda tank su ile doldurulur. Test edilecek boru seçilerek sistem üzerindeki bağlantıları yapılır. Boru bağlantıları kontrol edilerek, olası kaçaqlar mümkün olduğunca baştan önlenmelidir. Manometreler ile debi metre deney düzeneği üzerinde sabit olarak yer almaktadır. Ancak sistem çalıştırılmadan önce ölçüm cihazlarının bağlantı kontrolleri de tamamlanmış olmalıdır.

Bağlantılar yapıldıktan sonra, motor güç kaynağına bağlanır. Akış başlar ve basınç ölçümünde stabilite sağlandığında, değerler kaydedilir ve motor durdurulur. Borudaki su boşaltılarak bağlantıları sökülür ve ölçüm yapılacak olan diğer boru sisteme bağlanır. Bu adımlar tüm borular için uygulanır ve deney sonuçları kaydedilir.

### **2.2.2. Hesaplama Yöntemi**

Sistem çalıştırılıp, deney sonuçları kaydedildikten sonra gerekli hesaplamalar yapılır. Hesaplama yönteminde izlenecek olan adımlar aşağıda sırayla verilmiştir:

Öncelikle kesit alan hesaplanır:

$$A = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (2.1)$$

Debi  $Q$  , debimetre yardımıyla ölçülür ve akımın hızı hesaplanır:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

Daha sonra sistemde oluşan akım rejimini belirleyebilmek için Re sayısı hesaplanır:

$$Re = \frac{D_i V \rho}{\mu} \quad (1.31)$$

$Re < 2300$  için akımın tabakalı (laminer) rejimde,

$Re > 2300$  için akımın karmaşalı (türbülanslı) rejimde olduğu kabul edilir.

Manometrelerde ölçülen basınç değerleri kaydedilir ve basınç farkı hesaplanır:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (2.3)$$

Ölçüm değerleri bar cinsinden yapıldığı için, ölçüm yapıldıktan sonra elde edilen değerler Pa birimine çevrilmelidir.

Karmaşalı akım rejimi için, sadece sürtünme ve sürüklenme kayıplarını karşılamak için gerekli olan ve bağlantı elemanlarındaki sürüklenme kayıplarını da içeren basınç farkı  $\Delta P$  daha önceki bölümde anlatılan (1.43) denklemleri yardımıyla hesaplanır:

$$\Delta P = 4f \left[ \left( \frac{L}{D_i} \right)_{boru} + \sum \left( \frac{L}{D_i} \right)_{baglan} \right] \left( \frac{\rho V^2}{2} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (1.43)$$

Birimler aşağıdaki gibi olmalıdır:

$$\Delta P [\text{Pa}], D_i, L_{\text{boru}} [m], V [m/s], \rho [kg/m^3]$$

Sistemde kullanılan bağlantı elemanlarındaki (rakorlar) kayıpların şekil faktörü  $L/D_i$  değeri bilinmediği için, pürüzsüz bakır boru için Moody Diyagramı okumasıyla gerçek sürtünme faktörü  $f$  değeri bulunur. Denklemden yerine konularak bağlantı elemanları için şekil faktörü  $\sum \left[ \frac{L}{D_i} \right]_{\text{bağlan}}$  değeri hesaplanır.

Tüm borular için sürtünme faktörü  $f$  hesaplandıktan sonra, Reynolds sayısı kullanılarak Colebrook Denklemi yardımıyla  $\varepsilon/D_i$  değerine ulaşılır. Denklem yerine Moody diyagramından da faydalanılabilir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4.0 \log \left[ \frac{\varepsilon}{D_i} + \frac{1.255}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad \text{Colebrook Denklemi} \quad (2.6)$$

Her iki yöntemde de iç çap değeri yerine konularak boru için  $\varepsilon$  pürüzlülük değerine ulaşılır.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. Deney Sonuçları

Deney düzeneğinde sabit bulunan değerler Çizelge 3.1' de gösterilmiştir. Su için yoğunluk ve viskozite değerleri, Ek-1' de sunulan Suyun Sıcaklığa Bağlı Fiziksel Özellikleri Tablosu yardımıyla tespit edilmektedir.

Deney prosedürü her boruya iki farklı debi değeri için uygulanmış ve yapılan deneyler sonucunda ölçülen değerler Çizelge 3.2' de gösterilmiştir.

Ölçümler neticesinde yapılan hesaplamalar ise Çizelge 3.3' te bulunmaktadır.

**Çizelge 3.1** Sistemdeki Sabit Değerler

$\sum \left[ \frac{L}{Di} \right]_{bağlan} = 68,3$			<b>1. Boru</b> Dikişsiz Soğuk Çekme Paslanmaz Çelik Boru (16 x 2)	<b>2. Boru</b> ½ " hortum	<b>3. Boru</b> ½" körüklü teflon hortum	<b>4. Boru</b> bakır boru (16 x 2)
BORU	L	m	1	1	1	1
	Di	mm	12	12,7	12,7	12
	A	m <sup>2</sup>	1,130x10 <sup>-4</sup>	1,266x10 <sup>-4</sup>	1,266x10 <sup>-4</sup>	1,130x10 <sup>-4</sup>
SU 18°C	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000
	$\mu$	kg/ms	1x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-3</sup>

**Çizelge 3.2** Ölçülen Değerler

Boru	Q (lt/dk)	P1 (bar)	P2 (bar)
Dikişsiz Soğuk Çekme Paslanmaz Çelik Boru (16 x 2)	25	0,43	0,18
½ " Hortum	25	0,53	0,17
½" Spiral Teflon Hortum	25	0,84	0,13
Bakır Boru (16 x 2)	25	0,43	0,21

**Çizelge 3.3** Hesaplanan Değerler

Boru	$\Delta P$ (Pa)	V (m/s)	Re	f	$\varepsilon / Di$	$\varepsilon$ (mm)
Dikişsiz Soğuk Çekme Paslanmaz Çelik Boru (16 x 2)	$0,25 \times 10^5$	3,7	44.400	0,00602	0,000235	0,0028
½ " Hortum	$0,36 \times 10^5$	3,3	41.910	0,01124	0,004102	0,0520
½" Spiral Teflon Hortum	$0,71 \times 10^5$	3,3	41.910	0,02216	0,020720	0,2631
Bakır Boru (16 x 2)	$0,22 \times 10^5$	3,7	44.400	0,00530	0	Pürüzsüz

**Çizelge 3.4** Sonuçların Karşılaştırılması

<b>Boru</b>	<b>Q (lt/dk)</b>	<b><math>\mathcal{E}</math> (mm) Colebrook</b>	<b><math>\mathcal{E}</math> (mm) Moody</b>	<b><math>\mathcal{E}</math> (mm) Bilinen</b>
Dikişsiz Soğuk Çekme Paslanmaz Çelik Boru (16 x 2)	25	0,0028	0,0096	0,0015
½ " Hortum	25	0,0520	0,0130	---
½" Spiral Teflon Hortum	25	0,2631	pürüzlü	---
Bakır Boru (16 x 2)	25	-0,000020	pürüzsüz	pürüzsüz



#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Sonuçların tartışılmasında, sapmaya dair referanslar malzemenin bilinen pürüzlülük değeriyle, deneyler sonucunda hesaplananın karşılaştırılması ile gösterilebilir. Hedef materyalin incelenmesi olduğu için, malzemeler ayrı ayrı değerlendirilir. İncelenmiş olan dört farklı malzemedeki çelik ve bakır için bilinen pürüzlülük değerleri, daha önceki bölümlerde Çizelge 1.1’ de verilmişti. Hortumlar için ise bilinen pürüzlülük değerleri bulunmamaktadır.

Sistemde oluşan kayıpların tespit edilmesi bakır borunun literatürde belirtildiği gibi pürüzsüz bir malzeme olarak kabul edilmesi sonucunda bulunmuştur.

Sonuçlarda oluşan farklılıklar bu kabulden kaynaklanmaktadır. Literatürde rakorlar için eşdeğer bir L/Di değerinin bulunmaması bu kabulü kaçınılmaz kılmaktadır.

Farklı boru tiplerine uygulanan deneyler sonucunda, boruların çoğunluğu için gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Boru çapının büyük olmasının, duvar pürüzlülüğünün basınç kaybına olan katkısının önemini azalttığı gözlemlenmiştir. Sistemin tasarımında ½” lik boruların tercih edilmesinin sebebi tüm borularda uygulanan standart bir çap olması ve deney materyallerinin arttırılmasına olanak sağlamasıdır. Ancak

Çapın daha kk tutulması deney düzeneğinden elde edilen sonuçların gerçeğe yaklaşmasına bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Sonuçları gerçeğe yaklaştırmak adına, dikkat çekilmesi gereken bir diğer parametre de borunun boyudur. Borunun boyunu uzatmak da sürtünme kayıplarını arttırmak anlamında ikinci bir alternatif olabilirdi. Ancak bu noktada da deney düzeneğinin tasarımı dikkate alınmalıdır. Tasarım sırasında, sistemin daha kullanışlı olması için, kayıpları tespit edebilen en kk değerler tercih edilmiştir.

Bunların yanında sonuçların değerlendirilmesi anlamında, hesaplamalarla ilgili belirtilmesi gereken önemli bir nokta bulunmaktadır. Bilindiği gibi, sürtünme faktörü  $f$ , Reynolds sayısı  $Re$  ve  $\epsilon/Di$ 'nin bir fonksiyonudur ve amprik denklemler ya da Moody Diyagramı yardımıyla bulunur.

Ulaşmak istenilen malzemenin pürüzlülük değerini  $\epsilon$  için, her iki yöntem de uygulandığında, Sonuçların Karşılaştırılması Tablosunda da görüleceği gibi, Colebrook Denklemiyle yapılan hesaplamalar Moody Diyagramı okumalarına göre daha sağlıklı sonuçlar meydana getirmektedir.

Ve son olarak, tüm boruların deney sonuçları değerlendirilecek olursa, deney düzeneğinden elde edilen sonuçlarda bilinen değerlere göre bir sapma oluştuğu gözlemlenmiştir. Ancak basınç kaybı denklemine dayalı hesaplamaları geçersiz kılacak bir hataya yol amadığu düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. M. M. Soğukoğlu, Akışkanlar Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000
2. S. Peker, Ş. Ş. Helvacı, Akışkanlar Mekaniği Kavramlar, Problemler, Uygulamalar, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2003
3. TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Hidrolik Devre Elemanları ve Uygulama Teknikleri, Yapım Tanıtım Yayıncılık, İstanbul, 2001
4. AR, Incorrect Surface Finishes can Lead to Premature Engine Part Failures, Technical Articles, 1995
5. R. Huggins, Water Velocity: Its Impact on the Accuracy of Hydraulic Calculations, Technical Articles, 1996
6. Pipe Friction Measurement, Hydraulics Laboratory L109, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales
7. W. S. Janna, A Manual for the Mechanics of Fluids Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Memphis State University, 1997
8. Viscous Flow Experiment No 2, University of Texas, Arlington
9. Pipe Friction, Fluid Mechanics Laboratory, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, 2003
10. M. F. Maghrebi, The Role of Local Roughness in the Hydraulic Capacity of Sewer Pipes, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 2002
11. P. Rohner, Endüstriyel Hidrolik Kontrol, Evren Ofset, Ankara, 1994
12. Y. A. Çengel, M. A. Boles, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, McGraw-Hill, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2000
13. S. Melek, Ölçüler Birimler ve Tablolar, Hacettepe Üniversitesi Hastaneleri Basımevi, Ankara, 2005

## Ek 1. Suyun Sıcaklığa Bağlı Fiziksel Özellikleri

Sıcaklık T (°C)	Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Viskozite $\mu \times 10^3$ (kg/ms $\equiv$ Pas)
0	1000	1,75
10	1000	1,30
20	998,40	1,01
30	995,82	0,80
40	991,87	0,66
50	987,95	0,55
60	985,42	0,47
70	977,71	0,40
80	972,01	0,35
90	964,88	0,31
100	957,85	0,28