

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARARSIZ AKIM ANALİZLERİYLE BORU  
HATLARINDAKİ KAÇAK NOKTALARININ BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MANSURALI TURANBAEV**

**DENİZLİ, HAZİRAN-2019**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KARARSIZ AKIM ANALİZLERİYLE BORU  
HATLARINDAKİ KAÇAK NOKTALARININ BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MANSURALI TURANBAEV**

**DENİZLİ, HAZİRAN-2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

MANSURALI TURANBAEV tarafından hazırlanan “KARARSIZ AKIM ANALİZLERİYLE BORU HATLARINDAKİ KAÇAK NOKTALARININ BELİRLENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 20.06.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

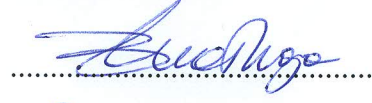
Jüri Üyeleri

İmza

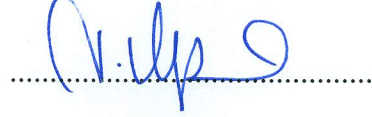
Danışman  
Prof. Dr. Abdullah Cem KOÇ



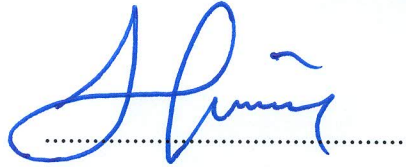
Üye  
Prof. Dr. Birol KAYA  
Dokuz Eylül Üniversitesi



Üye  
Prof. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ  
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/07/2019 tarih ve ...23/10..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**MANSURALI TURANBAEV**



## ÖZET

### KARARSIZ AKIM ANALİZLERİYLE BORU HATLARINDAKİ KAÇAK NOKTALARININ BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MANSURALI TURANBAEV

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ABDULLAH CEM KOÇ)

DENİZLİ, HAZİRAN-2019

Boru hatlarında doğal veya insan etkisiyle kaçaklar meydana gelebilmektedir. Uzunluğu kilometrelerce olabilen boru hatları üzerindeki kaçakların yerlerinin ve miktarlarının en kısa sürede ve en az maliyetle tespit edilmesi önemlidir. Böylece hem iletilen akışkanın kaybı azaltılabilecek hem de sızan akışkanın çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirilecektir. Kararsız akımların boru hatlarındaki kaçak noktalarının ve miktarlarının belirlenmesinde kullanımı son yıllarda artmaktadır. Bu çalışmada sabit seviyeli iki hazne arasındaki bir boru hattının mansap ucundaki vananın kısmen kapatılmasıyla meydana gelen su darbesi sonucu oluşan basınç dalgalarının değişimi ele alınmıştır. Basınç dalgalarının zaman ve frekans alanındaki değerlerinin, kaçaksız durumdaki benzer değerler ile karşılaştırılmasıyla, kaçak yeri ve miktarı tespit edilebilmektedir. Kaçak yerinin belirlenmesinde basınç değerlerinin zaman alanındaki değişimlerinin kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür. Kaçak miktarının belirlenmesinde ise basınç değerlerinin frekans analizi sonucunda elde edilen Spektral Güç değerlerinin frekans alanındaki değişimlerinin kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER:** Boru Hattı, Su Darbesi, Kaçak, Zaman Bölgesi, Frekans Bölgesi

## **ABSTRACT**

### **DETERMINATION OF LEAKAGE POINTS IN PIPELINES BY TRANSIENT FLOW ANALYSIS**

**MSC THESIS**

**MANSURALI TURANBAEV**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:PROF. DR. ABDULLAH CEM KOÇ)**

**DENİZLİ, JUNE 2019**

Leakage in pipelines may occur due to natural or human effects. Pipelines can be many kilometers in length so, it is important to determine the location and amount of leaks in the shortest time and with minimum cost. Thus, the loss of the transmitted fluid can be reduced and the negative effects of the leaked fluid to the environment will be minimized. The use of transient flows in detecting leakage points and quantities in pipelines has increased in recent years. In this study, the change of pressure waves resulting from the waterhammer by partially closing the valve at the downstream end of a pipeline between the two constant water level reservoirs is discussed. By comparing the values of the pressure waves in the time and frequency domain with the similar values in the no-leak state, the leakage location and the amount can be determined. It has been found that it is appropriate to use the changes of the pressure values in the time domain to determine the leak location. In determining the amount of leakage, it was seen that it is more appropriate to use the changes of the spectral power values in the frequency domain which is obtained as a result of the frequency analysis of the pressure values.

**KEYWORDS:** Pipeline, Waterhammer, Leakage, Time Domain, Frequency Domain

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	iv
TABLO LİSTESİ .....	v
SEMBOL LİSTESİ .....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
1.2 Literatür Özeti .....	2
1.2.1 Kararsız Akım (Su Darbesi) Çalışmaları .....	2
1.2.2 Boru Hatlarında Kaçak Tespiti Çalışmaları.....	3
1.2.3 Kararsız Akımlar Yardımı ile Kaçak Tespiti Çalışmaları .....	4
<b>2. SU DARBESİ ANALİZİ.....</b>	<b>8</b>
2.1 Kararsız Akım Denklemleri .....	8
2.1.1 Momentum Denklemi .....	8
2.1.2 Süreklilik Denklemi .....	11
2.1.3 Kararsız Akım Kısmi Diferansiyel Denklem Sistemi.....	14
2.2 Karakteristikler Yöntemi İle Su Darbesi Denklemlerinin Çözümü ...	15
2.2.1 Karakteristikler Yöntemi .....	15
2.2.2 Karakteristikler Yönteminin Su Darbesine Uyarlanması .....	16
2.2.3 Sınır Şartları.....	20
2.2.3.1 Sabit Seviyeli Hazne Sınır Şartı .....	20
2.2.3.2 Vana Sınır Şartı .....	21
2.2.3.3 Kaçak Noktası Sınır Şartı.....	22
<b>3. FOURIER DÖNÜŞÜMÜ .....</b>	<b>23</b>
3.1 Ayrık Fourier Dönüşümü .....	23
3.1.1 Hızlı Fourier Dönüşümü .....	24
3.1.2 MATLAB Hızlı Fourier Dönüşümü Fonksiyonu: <i>fft</i> .....	25
<b>4. SAYISAL ANALİZ .....</b>	<b>27</b>
4.1 Örnek Sistem ve Simülasyonlar .....	27
4.2 Simülasyon Sonuçları.....	29
4.3 Simülasyonların Analizi .....	35
4.3.1 Kaçak Yerinin Zaman Alanında Tespiti .....	35
4.3.2 Kaçak Miktarının Zaman Alanında Tespiti .....	36
4.3.3 Kaçak Yerinin Frekans Alanında Tespiti.....	38
4.3.4 Kaçak Miktarının Frekans Alanında Tespiti.....	39
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>41</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>43</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>50</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Momentum denkleminin sembolik diyagramı ve kontrol hacmi.....	8
Şekil 2.2: Süreklilik denkleminin sembolik diyagramı ve kontrol hacmi.....	11
Şekil 2.3: Bir boru için $xt$ düzlemi ve karakteristik doğrulardan oluşan ağ.....	18
Şekil 2.4: Kaçak noktası için karakteristik doğrular .....	22
Şekil 3.1: Ayrık Fourier serisinin örnek noktaları .....	23
Şekil 3.2: Örnek sistem ve bilgileri (kaçak yok).....	25
Şekil 3.3: Piyezometre kotlarının zaman alanındaki değişimleri.....	26
Şekil 3.4: Güç spektrumu.....	26
Şekil 4.1: Örnek sistem ve parametreleri (kaçaklı).....	27
Şekil 4.2: Kaçaksız simülasyonlar için Piyezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri.....	30
Şekil 4.3: $f = 0$ ve $Tc = 0,3$ s olan kaçaklı simülasyonlar için Piyezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri.....	31
Şekil 4.4: $f = 0$ ve $Tc = 30$ s olan kaçaklı simülasyonlar için Piyezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri.....	32
Şekil 4.5: $f = 0,02$ ve $Tc = 0,3$ s olan kaçaklı simülasyonlar için Piyezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri.....	33
Şekil 4.6: $f = 0,02$ ve $Tc = 30$ s olan kaçaklı simülasyonlar için Piyezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri.....	34
Şekil 4.7: Kaçaklı ve kaçaksız sistemlerin basınç dalgalarının karşılaştırılması .....	35
Şekil 4.8: Hızlı (a) ve yavaş (b) kapanan vanalar için zaman alanında kaçak yansıması.....	36
Şekil 4.9: Hızlı (a) ve yavaş (b) kapanan vanalar için zaman alanında kaçak miktarı tespiti .....	37
Şekil 4.10: Hızlı (a) ve yavaş (b) kapanan vanalar için zaman alanında kaçak çapı piyezometre kotu farkı ilişkisi.....	37
Şekil 4.11: $f0c03$ kodlu sistem (a) ve piklerinin (b) Spektral Güç-Frekans grafikleri.....	38
Şekil 4.12: $f0d10c03x75$ kodlu sistem (a) ve piklerinin (b) Spektral Güç-Frekans grafikleri .....	39
Şekil 4.13: $f0c03$ ve $f0d10c03x75$ kodlu sistemlerin frekans alanındaki piklerinin farkları.....	39
Şekil 4.14: Hızlı (a) ve yavaş (b) kapanan vanalar için frekans alanında kaçak miktarı tespiti .....	40

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 4.1: Sayısal simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri .....28

Tablo 4.2: Simülasyon kodlama örnekleri .....28



## SEMBOL LİSTESİ

$A$	:	Boru kesit alanı
$A_G$	:	Vana açıklık alanı
$a$	:	Dalga yayılma hızı
$B$	:	Boru sabiti, $a/gA$
$C_d$	:	Orifis debisinin katsayısı
$C_M, C_P$	:	Karakteristikler denkleminin sabitleri
$C^+, C^-$	:	Karakteristikler denklemi için verilen isim
$C_V$	:	Vana yük kayıp katsayısı
$D$	:	Boru çapı
$d_L$	:	Kaçak orifisi çapı
$E$	:	Elastisite modülü
$e$	:	Boru duvarının et kalınlığı
$F$	:	Frekans yanıt fonksiyonu
$f$	:	Darcy-Weisbach kayıp katsayısı; Frekans
$g$	:	Yerçekimi ivmesi
$H$	:	Piyezometre kotu
$H_0$	:	Kararlı durum piyezometre kotu
$H_P$	:	Kararsız durum piyezometre kotu
$H_{PD}$	:	Kaçak yerinin mansabındaki piyezometre kotu
$H_{PU}$	:	Kaçak yerinin membasındaki piyezometre kotu
$H_v$	:	Hidrolik yük kaybı
$\Delta H$	:	Piyezometre kotunda oluşan ani azalma
$K$	:	Akışkanın hacimsel elastisite modülü
$L$	:	Boru uzunluğu
$Q$	:	Debi
$Q_L$	:	Kaçak debisi
$Q_0$	:	Kararlı durum debisi
$Q_P$	:	Kararsız durum debisi
$Q_{PD}$	:	Kaçak yerinin mansabındaki debi
$Q_{PU}$	:	Kaçak yerinin membasındaki debi
$P$	:	Basınç
$r$	:	Boru yarıçapı
$t$	:	Zaman
$T_c$	:	Vana manevra süresi
$\tau$	:	Boyutsuz vana açıklık katsayısı
$V$	:	Akış hızı
$\Psi$	:	Hacim
$x$	:	Mesafe
$z$	:	Boru eksen kotu
$z_L$	:	Kaçığın (orifisin) bulunduğu noktadaki boru eksen kotu
$\gamma$	:	Akışkanın özgül ağırlığı
$\Lambda$	:	Matrisin özdeğeri
$\lambda$	:	Rastgele bir parametre
$\rho$	:	Akışkanın yoğunluğu

## ÖNSÖZ

Bu tezin gerçekleştirilmesinde her yönden bana destek olan tez danışmanım Prof. Dr. Abdullah Cem KOÇ'a saygı ve şükranlarımı sunarım. Değerli katkılarıyla tezin gelişimi için önerilerde bulunan jüri üyeleri Prof. Dr. Birol KAYA ve Prof. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ'a teşekkür ederim. Ayrıca koşullar ne olursa olsun hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme de minnettarım.



# 1. GİRİŞ

Basınçlı boru hatlarında zaman zaman sızıntılar oluşabilmektedir. Bunlar basınç değişimleri sonucu boru malzemesinin dayanımının aşılması veya deprem, heyelan gibi doğal olaylar sonucunda boru hatlarının zarar görmesi ile meydana gelebileceği gibi dışarıdan insan müdahalesiyle de meydana gelebilmektedir. Genellikle bu tür bir sızıntı dışarıdan görülene kadar tespit edilememektedir. Geçen sürede hem boru hattında iletilen akışkan kaybolmakta hem de çevresel sorunlar meydana gelmektedir. Kaçak noktalarının yerlerinin ve sızıntı miktarının hızlı bir şekilde tespit edilmesi önemlidir. Bu tez ile boru hatlarındaki kırık noktalarının yerlerinin ve sızıntı debisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Son yıllarda boru hatlarında meydana gelen arızaların tespiti ile ilgili tekniklerin geliştirilmesi ön plana çıkmıştır ve kararsız akım analizi tabanlı yöntemlerde önemli bir potansiyel görülmüştür. Kararsız akım temelli yöntemlerin maliyeti azdır ve sisteme zarar vermemektedir.

Boru hatlarındaki basınç, hız ve debi gibi akış parametrelerinin herhangi bir noktada zamanla değişmemesi kararlı akım olarak bilinir. Boru hattında akışkan kararlı durumda iken bir noktada akım koşullarında oluşan değişiklik kararsız akımı meydana getirir. Kararsızlık akış koşullarının meydana geldiği noktadan boru hattı boyunca basınç dalgası formunda yayılır. Boru hatlarındaki en belirgin örneği su darbesidir. Su darbesi bir vananın hızlı kapanmasıyla veya açılmasıyla ortaya çıkan kararsız akım dalgalarını tanımlamak için kullanılır (Chaudry 2014).

## 1.1 Amaç ve Kapsam

Tezin amacı boru hatlarında meydana gelen kaçakların veya sızıntıların olduğu noktaların yerlerinin ve kaçak debisinin kararsız akımlarla (su darbesiyle) belirlenmesidir. Su darbeleri genellikle boru hattına zarar verdikleri için istenmezler. Ancak bu çalışmada boru hattına zarar vermeyecek büyüklükte bir su darbesi oluşturularak bunun meydana getirdiği basınç değişimlerinin izlenmesi ile kaçak noktalarının yerlerinin ve kaçak miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yani su darbeleri faydalı bir amaç için kullanılmıştır. Boru hattında

debide meydana gelen tüm değişimler az ya da çok basınç dalgalanmalarına yol açmaktadır. Vanaların açılması veya kapanması, pompaların çalışması veya durması su darbelerine neden olur. Bu çalışma kapsamında pompa içermeyen yani yerçekimiyle akışkanı ileten, memba ve mansap uçlarında sabit piyezometre kotuna sahip, üniform çaplı bir boru hattı göz önüne alınacaktır. Borunun mansap ucunda bulunan bir vananın kısmen kapatılmasıyla kararsız akım oluşturulduğu ve sonrasında basınç dalgalanmalarının yine vananın olduğu yerdeki basınç ölçerler ile kaydedildiği varsayılmıştır. Basınç değişimlerinin zaman ve frekans bölgelerinde incelenmesiyle kırık noktasının yerinin ve sızıntısının miktarını belirlenmesi amaçlanmaktadır.

## 1.2 Literatür Özeti

Tez kapsamında incelenen literatür üç ana grupta toplanabilir. Birinci grupta kararsız akım (su darbesi) analizi teorisinin oluşumuna yönelik çalışmalar göz önüne alınmıştır. Su darbesi sonucunda oluşan basınç dalgalanmalarının zamana ve frekansa bağlı olarak analizine yönelik literatür bu kapsamda incelenmiştir. İkinci grupta ise boru hatlarında meydana gelen kaçakların yerlerinin ve kaçak miktarlarının tespiti için kullanılan yöntemlere yönelik çalışmalara değinilmiştir. Son olarak bu tezin de konusu olan kararsız akım analizleri ile boru hatlarındaki kaçakların tespitine yönelik yapılan çalışmalar incelenmiştir.

### 1.2.1 Kararsız Akım (Su Darbesi) Çalışmaları

Kararsız akımların incelenmesi, havadaki ses dalgalarının yayılması, yüzeysel sulardaki dalgaların yayılması ve atardamarlardaki kan akışının araştırılmasıyla başlamıştır. Bu konudaki bilinen ilk çalışma, Newton tarafından havadaki ses dalgalarının ve kanallardaki su dalgalarının yayılımının incelenmesidir. Euler dalga yayılımı için Denklem 1.1’de gösterilen kısmi diferansiyel denklemi geliştirmiştir (Chaudhry 1979).

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

Denklem 1.1’in genel bir çözümü Denklem 1.2’de gösterilmiştir.

$$y = F(x + at) + f(x - at) \quad (1.2)$$

Burada  $F$ , giden ve  $f$ , yansıyan dalgaların büyüklüğünü temsil eden fonksiyonlardır. Monge (1789), kısmi diferansiyel denklemleri birleştirmek için grafiksel bir yöntem geliştirmiş ve karakteristikler yöntemi terimini ortaya atmıştır. Young (1808), basınç dalgalarının borulardaki yayılımını araştırmıştır. Michaud (1878), hava boşlukları ve emniyet vanalarının tasarımını ve kullanımını sunmuştur. Gromeka (1883), ilk kez su darbesi analizinde sürtünme kayıplarını ilave etmiştir, akışkanın sıkıştırılmaz olduğunu ve sürtünme kayıplarının akış hızıyla doğru orantılı olduğunu varsaymaktadır. Joukowski (1898), Moskova'da 7,62 km uzunluğunda ve 50 mm çapında, 305 m uzunluğunda ve 101,5 mm çapında, 305 m uzunluğunda ve 152,5 mm çapında olan farklı boru hatları üzerinde vana kapanmasının oluşturduğu basınç değişimleriyle ilgili kapsamlı deneyler yapmıştır. Deneysel ve teorik çalışmalarına dayanarak, su darbesinin temel teorisi üzerine çok sayıda makale yayınlamıştır. Basınç artışının, vana kapanma sürelerinin  $2L/a$ 'dan küçük olması durumu için maksimum olduğunu belirlemiştir. Burada  $L$ , boru hattının uzunluğu ve  $a$ , dalga yayılma hızıdır (Chaudhry 1979).

Kararsız akımlar (su darbeleri) üzerine yazılmış birçok kitap da bulunmaktadır (Parmakian 1963; Pickford 1969; Jaeger 1977; Wylie ve Streeter 1978; Chaudhry 1979; Watters 2000). Kararsız akımlar teorisi ve çeşitli alanlardaki uygulamaları konusunda tüm dünyada lisansüstü tez çalışmaları ile araştırmalar devam etmekte olup her yıl çok sayıda makale yayınlanmaktadır.

### **1.2.2 Boru Hatlarında Kaçak Tespiti Çalışmaları**

Boru hatlarının işletilmesi sırasında karşılaşılan en önemli iki sorun olan sızıntıların ve tıkanıklıkların yerlerinin tespiti konusunda literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tezin konusu sızıntılar (kaçaklar) olduğu için boru hatlarındaki kaçakların tespit edilmesi ile ilgili geliştirilen yöntemler bu bölümde incelenmiştir.

Boru hatlarında kaçak tespit yöntemleri genel olarak donanım (ölçüm) tabanlı yöntemler ve yazılım (hesaplama) tabanlı yöntemler olarak iki grupta incelenebilir (Sarkar ve Datta 2016). Donanım veya ölçüm tabanlı kaçak tespit yöntemleri boru hattındaki kaçıktan dolayı oluşan titreşimleri veya zemine sızan akışkanı tespit etmek üzere geliştirilmiştir. Boru hattı üzerine yerleştirilen sabit veya geçici ölçüm cihazlarının tespit ettiği sinyaller ile boru hattının içinden geçtiği zemini inceleyen cihazlar yardımıyla kaçak yerleri belirlenebilmektedir. Bu yöntemler arasında akustik reflektometre (Papadopoulou ve diğ. 2008), empedans yöntemi (Kim 2014),

anlık kablosuz alıcılar (Trincherro ve Stefanelli 2009; Sun ve Akyildiz 2010; Kadi ve diğ. 2013; Sun ve diğ. 2011), yer radarı (Ayala-Cabrera ve diğ. 2011; Lai ve diğ. 2016), fiber optik alıcılar (Huang ve diğ. 2007; Kurmer ve diğ. 1991; Bhuiyan ve diğ. 2016), piyezo-elektrik alıcılar (Ozevin ve Harding 2012; Grabec 1978; Ozevin 2011) sayılabilir.

Yazılım tabanlı kaçak tespit yöntemleri, boru hattı üzerine yerleştirilen basınçölçerlerin kaydettiği dijital sinyaller ile kaçak olmadan önce yine aynı basınçölçerlerden alınan sinyallerin karşılaştırılarak, kaçağın yerinin ve kaçak miktarının hesaplanması prensibine dayanır. Bu yöntemler arasında frekans yanıt diyagramı (Lee ve diğ. 2005), harmonik dalgacık (Hu ve diğ. 2011), karakteristikler yöntemi tabanlı basınç dalgalanması (Lei ve diğ. 2012), negatif basınç dalgası tabanlı (Sun ve Chang 2014; Chuanhu ve diğ. 2008), bulanık mantık (da Silva ve diğ. 2005), hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı (Mansour ve diğ. 2012), genetik algoritma ile ters kararsız akım analizi kombinasyonu (Vitkovsky ve diğ. 2000; Liggett ve Chen 1994; Murphy ve diğ. 1993; Simpson ve diğ. 1994) sayılabilir.

### **1.2.3 Kararsız Akımlar Yardımı ile Kaçak Tespiti Çalışmaları**

Son zamanlarda özellikle ters kararsız akım analizi olmak üzere boru hatlarında meydana gelen kaçakların kararsız akım temelli tespiti yaygın hale gelmiştir. Neredeyse yüzyıl önce Babbitt (1920), su basmış caddelerin basit bir şekilde gözlemlenmesinden ve anormal bitki örtüsü büyümesinden demir izleyicilere, stetoskoplardan kimyasal izleyici enjeksiyonlarına ve akustik yöntemlere kadar değişen farklı kaçak tespit tekniklerini araştırmıştır. Babbitt (1920) boru hattında oluşan basınç dalgalanmalarının kaçak tespit yöntemi olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Buna göre kaçakların basınç dalgalanmalarında oluşturduğu azalma kaçak tespitinde kullanılabilir. Bu çalışma Wang ve diğ. (2002) tarafından geliştirilmiş metodun temelini oluşturmuştur. Basınç dalgalarının irdelenmesi, araştırmacılar tarafından kabul edilen kararsız akım ile kaçak tespiti yöntemlerinin birçok varyasyonunun ortak bir özelliğidir.

Boru hatlarında oluşan kaçakların tespiti için kararsız akımları kullanan ilk teknik, borunun çatlaması sonucu oluşan düşük basınç dalgalanmasını tespit etmeyi amaçlayan yöntemdir (Silva ve diğ. 1996; Misiunas ve diğ. 2003, 2004, 2005). Bu negatif basınç dalgasının her basınç dönüştürücüsüne (transducer) vardığı zaman ( $t$ ) ve dalga yayılma hızı ( $a$ ) bilgisi kullanılarak kaçağın olduğu yer belirlenebilmektedir. Bu yaklaşım gerçek zamanlı bir hata izleme sistemine kolayca dahil edilebilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı, kaçak miktarı az ise

arka plan gürültüsü ile maskelenebilecek çok küçük bir basınç sinyalinin algılanmasını gerektirmesidir. Bu tezde de kullanılan diğer bir yaklaşım ise, boru hattında yapay olarak meydana getirilen bir su darbesi sonucu oluşan basınç sinyallerinin analizini gerektirmektedir. Kararsız akım sinyali yolculuğu sırasında sistemin yapılandırılması ve bütünlüğü ile ilgili özelliklere sahip olmaktadır. Bu sinyalin analizi kaçakları açığa çıkarabilmekte ve tespit edebilmektedir. Oluşturulan basınç dalgalanmalarının sisteme zarar vermeyecek büyüklükte olması gereklidir ve düzenli olarak sistemin kontrol edilmesi amacıyla kullanılabilir.

Bir kaçak, kararsız akım sinyalini iki şekilde etkiler:

- Basınç dalgasının sönümlenmesini arttırarak (Wang ve diğ. 2002),
- Basınç dalgasında yansımalar oluşturarak (Jönsson ve Larson 1992; Jönsson 1995; Covas ve Ramos 1999; Jönsson 2001).

Bu etkilerin tanımlanması ve incelenmesi tüm kararsız akım ile kaçak tespiti tekniklerinin merkezindedir. Bu etkilerin kullanılabilmesi ile ilgili esasen üç düşünce vardır. Birincisi, basınç dalgası sinyalinin zaman alanındaki analizini içeren “*ters kararsız akım*” yöntemidir. Bu yöntem, ölçülen basınç değerleri ile sistemin kaçığı da içeren bir modelinden hesaplanan basınç değerleri arasındaki farkı minimum yapan kaçık parametrelerinin optimize edilmesine dayanır. İkincisi, kaçığın sistemin frekans tepkisini de değıştirmesine dayanan “*frekans alanı*” teknikleridir. Bu yöntem basınç dalgası sinyalinin zaman alanında değıl frekans alanında incelenmesine dayanır. Üçüncüsü, “*doğrudan kararsız akım analizi*” olarak adlandırılır. Sistemin kaçığı içeren modelinin çok fazla bilinmeyişi olması nedeniyle çözümüyle uğraşmayıp, yalnızca basınçölçerlerden gelen sinyallerdeki kaçık kaynaklı etkileri belirlemeye çalışır. Bu kategoriye giren teknikler, basınç dalgası sinyalinin davranışını zaman veya frekans alanında incelemelerine göre farklı isimler alırlar (Colombo ve diğ. 2009).

Pudar ve Liggett (1992) tarafından boru hatlarında oluşan kaçıkların tespiti için ters kararsız akım analizinden yararlanılması, bu yöntemin kaçık tespit araştırmalarında kullanımının dönüm noktası olmuştur. Genellikle kararsız akım analiziyle kaçık tespit, sistem özelliklerinin (boru pürüzlülüğü, kaçık yeri, kaçık debisi vb.) bilindiğı ve bunlara göre basınç ile debilerin hesaplanması şeklinde yapılmaktadır. Ters kararsız akım analizi ile kaçık tespitinde ise sistem durumu bilinmektedir (basınçlar, debiler vb.), ancak bazı parametreler (boru pürüzlülüğü, kaçık yeri ve debisi vb.) bilinmemektedir. Tipik olarak sistemin durum değışkenleri su darbesi sırasında kaydedilmektedir ve aynı sistemde kaçık olmayan durumdaki

ölçümler ile karşılaştırılmaktadır. Potansiyel kaçaklar kaçak olan ve olmayan sistemin basınç izleri eşleşene kadar sayısal olarak hidrolik bir benzeşim modelinde test edilmektedir. Ardından boru pürüzlülüğü ve kaçak miktarı ile konumu gibi sistem parametreleri için ters problem çözülmektedir. Burada amaç türev tabanlı Levenberg Marquardt (LM) ve Genetik Algoritma (GA) yöntemleriyle elde edilen, kararlı durum koşulları altında ölçülen ve hesaplanan basınç kotları arasındaki farkların kareleri toplamını en aza indirmektir. Çeşitli araştırmacılar (Vitkovsky ve diğ. 2002; Kapelan ve diğ. 2003, 2002) bu amacı gerçekleştirmeye ve hibrit yaklaşımlar geliştirmeye çalışmışlardır. Genel olarak ters kararsız akım analizi literatürünün önemli bir kısmı, ters problemin çözümünün iyileştirilmesi veya hızlandırılması ile ilgilidir (Kapelan ve diğ. 2004, 2003, 2002; Nash ve Karney 1999; Vitkovsky ve diğ. 2006, 2003, 2002, 2001).

Frekans alanı teknikleri ile kaçak tespitinde, boru hattının mansabındaki bir vana, belirli bir düzende periyodik olarak açılıp kapatılarak sistemde sürekli salınımlı akış üretilir. Bu sırada vananın bulunduğu noktadaki basınç yüksekliği değeri ve debi kaydedilir. Bu işlem vana salınımlarının periyodu değiştirilerek bir dizi frekans için tekrarlanır. Frekans yanıt modeli, sistemin bilinen geometri ve parametrelerden (önerilen sistemler için) veya kuruluma gerçekleştirilen deneysel ya da saha ölçümlerinden (mevcut sistemler) sayısal olarak modellenmesiyle elde edilen kaçak olmayan sistemle karşılaştırılabilir (Mpesha ve diğ. 2001). Lee ve diğ. (2005), basınç dalgalarının oluşturduğu sinyallerin frekans alanındaki analizini içeren, ters rezonans ve tepe sıralama yöntemleri adlarıyla bilinen iki kararsız akım kaçak tespit tekniği geliştirmişlerdir, aynı araştırmacılar bu alandaki ilk deneysel çalışma örneğini de gerçekleştirmişlerdir (Lee ve diğ. 2006). Araştırmaları sonucunda sistemden elde edilebilecek bilgi miktarını en üst düzeye çıkarmak için kararsız akım temelli kaçak tespitinde (çok çeşitli frekanslar içeren) yalnızca keskin kararsız akım sinyallerin kullanılması gerektiğini belirlemişlerdir. Covas ve ark. (2005), kaçak yerini belirlemek için borunun frekans yanıtı üzerinde bir Fourier dönüşümü gerçekleştirmiştir.

Bu tez çalışmasında da kullanılan doğrudan kararsız akım analizlerinde ise su darbesi sonucu boru hattında meydana gelen basınç dalgalanmasının oluşturduğu sinyal bir kaçağa ulaştığında, ana dalganın enerjisinin bir kısmı yansıtılan yeni bir sinyal oluşturmak için yönlendirilir. Bu yansıtılan sinyalin tespiti ve varış zamanının ölçümü, kaçağı açığa çıkarmak için kullanılabilir. Yansıtılan sinyalin basınçölçerlere ulaşma süresi, ana sinyalin geçici kaynaktan kaçağa gitmesi ve yansıtılan dalganın ölçüm noktasına gitmesi için gereken süredir.

Bilinen bir dalga yayılma hızı göz önüne alındığında, çatlakın yeri bu varış zamanından belirlenebilir. Çok sayıda yayın, kaçaktan yansıyan basınç sinyallerinin kaçak yeri ve miktarının tespiti için kullanılmasını önermiştir (Jönsson ve Larson 1992; Covas ve Ramos 1999; Jönsson 2001; Brunone ve Ferrante 2001). Uygulanması basit olsa da boru hattı titreşimleri, arka plan kararsız akımları ve cihaz gürültüsü kaçak yansıma sinyallerini engelleyebileceğinden önemli bir deneyim gereklidir.



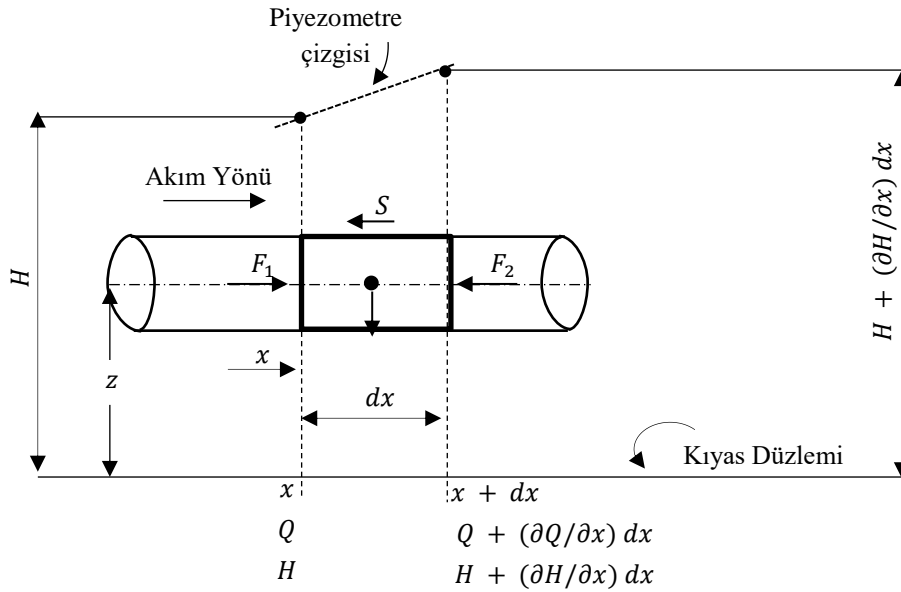
## 2. SU DARBESİ ANALİZİ

### 2.1 Kararsız Akım Denklemleri

Basınçlı borulardaki kararsız (zamanla değişen, permanan olmayan) akımlar kütle ve momentumun korunumu denklemleriyle tanımlanır. Bu denklemler sırasıyla süreklilik ve momentum denklemleri olarak adlandırılır. Momentum denkleminin hareket veya dinamik denklem olarak adlandırıldığı da görülmektedir. Momentum ve süreklilik denklemleri, debi ve piyezometre kotunun mesafe ve zamana bağlı olduğu kısmi diferansiyel denklem sistemini oluşturmaktadır (Chaudhry 2014). Bu bölümde momentum ve süreklilik denklemlerinin elde edilişi gösterilecektir.

#### 2.1.1 Momentum Denklemi

Herhangi bir akışkanın sabit çaplı yatay silindirik bir boru hattı boyunca akışı baz alınarak momentum denkleminin sembolik diyagramı Şekil 2.1'de verilmektedir. Burada, mesafe ( $x$ ), debi ( $Q$ ) ve akış hızının ( $V$ ), akım yönünde pozitif olduğu kabul edilmektedir. Piyezometre kotu ( $H$ ) şekilde gösterilen kıyas düzleminin üzerindeki boru eksenini kotunu belirtmektedir.



Şekil 2.1: Kontrol hacmi ve momentum denkleminin sembolik diyagramı (Chaudhry 1979)

Boru içinde kesit alanı  $A$  ve uzunluğu  $dx$  olan yatay bir kontrol hacmini ele alınsın (Şekil 2.1). Eğer  $x$  mesafesindeki piyezometre kotu ve debi  $H$  ve  $Q$  ise,  $x + dx$  mesafesine karşılık gelen değerler de sırasıyla  $H + (\partial H/\partial x)dx$  ve  $Q + (\partial Q/\partial x)dx$  olacaktır. Kontrol hacmi üzerinde  $x$  doğrultusunda etki eden  $F_1$ ,  $F_2$  ve  $S$  kuvvetleri bulunmaktadır. Bunlardan  $F_1$  ve  $F_2$  basınca bağlı kuvvetler iken,  $S$  ise sürtünmeden dolayı oluşan kesme kuvvetidir. Eğer  $\gamma$ , akışkanın özgül ağırlığı ve  $z$ , boru ekseninin kıyas düzlemi üzerindeki yüksekliği olarak ele alınırsa;

$$F_1 = \gamma A(H - z) \quad (2.1)$$

$$F_2 = \gamma(H - z + \frac{\partial H}{\partial x} dx)A \quad (2.2)$$

Eğer sürtünme kaybını hesaplamak için Darcy-Weisbach formülü kullanılırsa, kesme kuvveti;

$$S = \frac{\gamma f V^2}{g} \pi D dx \quad (2.3)$$

Burada  $g$ , yerçekimi ivmesi;  $f$ , sürtünme katsayısı ve  $D$ , borunun çapını belirtmektedir. Kontrol hacmi üzerine etki eden bileşke kuvvet ( $F$ ), (2.4) eşitliği ile verilmektedir.

$$F = F_1 - F_2 - S \quad (2.4)$$

(2.1)'den (2.3)'e kadar olan eşitliklerde  $F_1$ ,  $F_2$  ve  $S$ 'i ifade eden denklemler (2.4) eşitliğindeki yerlerine yazılırsa,

$$F = -\gamma A \frac{\partial H}{\partial x} dx - \frac{\gamma f V^2}{g} \pi D dx \quad (2.5)$$

Newton'un ikinci hareket yasasına göre,

$$\text{Kuvvet} = \text{Kütle} \times \text{İvme} \quad (2.6)$$

Kontrol hacmi için dikkate alınır,

$$\text{Kütle} = \frac{\gamma}{g} A dx \quad \& \quad \text{İvme} = \frac{dV}{dt} \quad (2.7)$$

(2.5) ve (2.7) denklemleri (2.6) eşitliğindeki yerlerine yazıldıktan sonra  $\gamma A dx$  ile bölünürse,

$$\frac{dV}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{fV^2}{2D} \quad (2.8)$$

Hızın zamana göre tam türevi, hızın zaman ( $t$ ) ve konuma ( $x$ ) göre kısmi türevlerinin toplamı şeklinde yazılırsa,

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.9.a)$$

ya da  $\frac{dx}{dt} = V$  alınarak;

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2.9.b)$$

(2.9.b) eşitliği (2.8) denkleminde yerine yazılarak yeniden düzenlenirse,

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV^2}{2D} = 0 \quad (2.10)$$

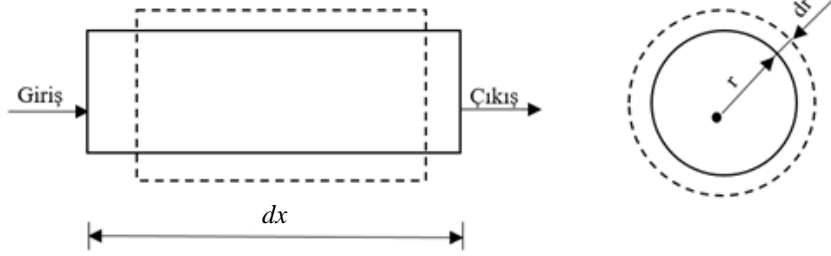
Kararsız akım problemlerinin çoğunda  $V(\partial V/\partial x)$  ifadesi  $\partial V/\partial t$  ifadesine kıyasla çok küçüktür dolayısıyla ihmal edilebilir. Boru hattındaki ters yönlü akımın işaretini de negatif alabilmek için (2.10) eşitliğindeki  $V^2$ 'nin yerine  $V|V|$  yazılabilir. Burada  $|V|$  ifadesi  $V$ 'nin mutlak değerini ifade etmektedir. (2.10) eşitliğinin debi ( $Q$ ) cinsinden yazılması ve düzenlenmesiyle momentum denkleminin son hali elde edilir (Chaudhry 1979).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2.11)$$

(2.3), (2.5), (2.8), (2.10) ve (2.11) eşitliklerinde sürtünme kaybının hesaplanması için Darcy-Weisbach formülü kullanılmıştır. Eğer bu kayıplar için genel üstel formül yazılırsa, (2.11) eşitliğinin son terimi  $\frac{kQ|Q|^m}{D^b}$  olmaktadır ve burada  $k$ ,  $m$ ,  $b$  değerleri uygulanan formüle göre değişiklik göstermektedir. Hazen-Williams formülü için  $m = 1.85$  ve  $b = 2.87$  iken, Darcy-Weisbach için  $m = 1$  ve  $b = 3$  olarak alınmalıdır. Eğer  $m$  ve  $b$ 'nin doğru değerleri kullanılırsa, sonuç uygulanan formülden bağımsız hale gelmektedir (Darcy-Weisbach ve Hazen-Williams formülleri karşılaştırılabilir sonuçlar verebilmektedir).

## 2.1.2 Süreklilik Denklemi

Sabit kesitli yatay bir boru içerisinde Şekil 2.2'deki gibi bir kontrol hacminin olduğu varsayılmıştır.



Şekil 2.2: Süreklilik denkleminin sembolik diyagramı ve kontrol hacmi (Chaudhry 1979)

Akışkanın giren hacmi ( $V_{in}$ ) ve çıkan hacminin ( $V_{out}$ ),  $dt$  zaman aralığı boyunca değişimi,

$$V_{in} = V\pi r^2 dt \quad (2.12)$$

$$V_{out} = (V + \frac{\partial V}{\partial x} dx)\pi r^2 dt \quad (2.13)$$

Burada  $r$ , borunun yarıçapını ifade etmektedir. Akışkanın hacminde  $dt$  zamanı boyunca oluşan artış,

$$dV_t = V_{in} - V_{out} = -\frac{\partial V}{\partial x} dx dt \pi r^2 \quad (2.14)$$

$dt$  zaman aralığı boyunca oluşan basınç değişimi  $dp = (\partial p / \partial t) dt$  denklemiyle hesaplanmaktadır. Bu basınç değişimi boru duvarının radyal bir şekilde genişlemesine ya da daralmasına ve akışkanın sıkıştırılabilirliğinden dolayı kontrol hacmi uzunluğunun azalmasına ya da artmasına neden olmaktadır (Şekil (2.2)).

İlk olarak borunun radyal genişlemesi ya da daralmasından kaynaklanan hacim değişimi ( $dV_r$ ) dikkate alınsın. Boruda basınçtan ( $p$ ) dolayı oluşan radyal ya da çevresel gerilme ( $\sigma$ ) (2.15) eşitliğinde verilmektedir.

$$\sigma = p \frac{r}{e} \quad (2.15)$$

Burada  $e$ , boru duvarının kalınlığını (et kalınlığı) ifade etmektedir. Basınç değişiminin tam çözümü  $dp = \frac{\partial p}{\partial t} dt + \frac{\partial p}{\partial x} dx$  olmaktadır, ancak kararsız akım denklemlerinin yaklaşık çözümünde basıncın konuma göre değişimi ( $\frac{\partial p}{\partial x}$ ) ihmal edilebilmektedir. Basınç değişiminden dolayı meydana gelen radyal değişim ( $d\sigma$ ) (2.16) eşitliğinde verilmektedir.

$$d\sigma = dp \frac{r}{e} = \frac{\partial p}{\partial t} dt \frac{r}{e} \quad (2.16)$$

Burada,  $r$ , yarıçapı  $dr$  miktarı kadar artırılarak  $r + dr$  elde edildiğinde oluşan radyal değişim (2.17) eşitliğinde verilmektedir.

$$d\epsilon = \frac{dr}{r} \quad (2.17)$$

Eğer boru malzemesi doğrusal elastik olarak kabul edilirse, malzemenin elastisite modülü (2.18) eşitliği ile bulunabilmektedir.

$$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (2.18)$$

Burada  $E$ , Young'un elastisite modülüdür. (2.16) ve (2.17) eşitliklerindeki  $d\sigma$  ve  $d\epsilon$  ifadeleri (2.18) eşitliğindeki yerlerine yazılırsa,

$$E = \frac{(\partial p / \partial t) dt (r/e)}{dr/r} \quad (2.19)$$

ya da

$$dr = \frac{\partial p}{\partial t} \frac{r^2}{eE} dt \quad (2.20)$$

Borunun radyal genişlemesi veya daralmasından dolayı kontrol hacmindeki değişim;

$$dV_r = 2\pi r dx dr \quad (2.21)$$

(2.20) eşitliğindeki  $dr$  değeri (2.21) denkleminde yerine yazılırsa,

$$dV_r = 2\pi \frac{\partial p}{\partial t} \frac{r^3}{eE} dt dx \quad (2.22)$$

İkinci olarak akışkanın sıkıştırılabilirliğinden dolayı meydana gelen hacim değişimi ( $dV_c$ ) ele alınmıştır. Akışkan elemanının başlangıç hacmi,

$$V = \pi r^2 dx \quad (2.23)$$

Akışkanın hacimsel elastisite modülü ( $K$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$K = -\frac{dp}{dV_c/V} \quad (2.24)$$

(2.23) eşitliğindeki  $V$  düzenlenirse ve  $dp = (\partial p/\partial t)dt$  eşitliği de dikkate alınırsa, (2.25) eşitliği oluşmaktadır.

$$dV_c = -\frac{\partial p}{\partial t} \frac{dt}{K} \pi r^2 dx \quad (2.25)$$

Eğer akışkan yoğunluğunun kontrol hacmi içerisinde belli bir zamanda sabit olduğu kabul edilirse ve bunun ardından kütle korunumu kanunu ifade edilirse,

$$dV_i + dV_c = dV_r \quad (2.26)$$

$dV_i$ ,  $dV_c$  ve  $dV_r$  ifadelerinin yerine sırasıyla (2.14), (2.22) ve (2.25) eşitlikleri yazılırsa ve  $\pi r^2 dx dt$  değeri ile bölünürse,

$$-\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{2r}{eE} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.27)$$

ya da

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \left( \frac{2r}{eE} + \frac{1}{K} \right) = 0 \quad (2.28)$$

Su darbesi dalga yayılma hızı ( $a$ ) eşitlik (2.29)'da verilmiştir.

$$a^2 = \frac{K}{\rho[1 + (KD/eE)]} \quad (2.29)$$

Burada  $\rho$ , akışkanın yoğunluğunu ifade etmektedir.  $p = \rho g(H - z)$  ifadesiyle verilmektedir. Burada  $z$ , boru eksen kotudur, eğer kıyas düzlemi olarak boru eksen kotu alınırsa  $z$  sıfır olmaktadır. Piyezometre kotu ( $H$ ) hem zamana ( $t$ ) hem de konuma ( $x$ ) göre değişmektedir. Ancak su darbesi denklemlerinin yaklaşık çözümünde  $H$ 'ın konuma göre

değişimi ihmal edilebilmektedir. Buna göre terimler yeniden düzenlenirse ve  $VA$  yerine  $Q$  yazılırsa (2.30) eşitliği oluşmaktadır (Chaudhry 1979).

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.30)$$

### 2.1.3 Kararsız Akım Kısmi Diferansiyel Denklem Sistemi

Momentum denklemi (2.11) ve süreklilik denklemi (2.30) birinci dereceden kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu denklemlerde  $x$  ve  $t$  bağımsız değerler,  $Q$  ve  $H$  ise bağımlı değerlerdir.  $A$  ve  $D$  gibi değerler borunun karakteristik özellikleri olup, zamanla değişmezler ama  $x$ 'in bir fonksiyonu olabilirler. Su darbesi sonucu meydana gelen basınç dalgasının yayılma hızı ( $a$ ) sistemin karakteristik özelliklerine bağlı olmasına rağmen laboratuvar deneyleri basıncın azalmasıyla ciddi bir oranda dalga yayılma hızının da azaldığını göstermiştir. Sürtünme katsayısı ( $f$ ) Reynolds sayısına bağlı olarak değişmektedir.

(2.11) ve (2.30) eşitliklerindeki doğrusal olmayan terimler sadece birinci dereceden türevler içermektedir ve bunlar quasi-linear olarak adlandırılmaktadır. Bu tür denklemler eliptik, parabolik ve hiperbolik olarak sınıflandırılabilir, su darbesi denklemleri hiperbolik türde kısmi diferansiyel denklemlerdir ve ayrıca (2.31) eşitliğindeki gibi matris formatında yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} Q \\ H \end{Bmatrix} = - [B(Q, H)] \frac{\partial}{\partial x} \begin{Bmatrix} Q \\ H \end{Bmatrix} - [G(Q, H)] \quad (2.31)$$

$$\text{burada, } B = \begin{bmatrix} 0 & gA \\ \frac{a^2}{gA} & 0 \end{bmatrix} \text{ ve } G = \begin{Bmatrix} fQ|Q| \\ \frac{2DA}{0} \end{Bmatrix}, \text{ dir.}$$

B matrisinin öz değerleri ( $\Lambda$ ) denklemler grubunun türünü belirlemektedir. B matrisinin karakteristik denklemi,

$$\Lambda^2 - a^2 = 0 \quad (2.32)$$

$$\Lambda = \pm a \quad (2.33)$$

$a$  değerinin reel, öz değerlerin de reel ve birbirinden farklı değerler olması (2.11) ve (2.32) eşitliklerinin hiperbolik kısmi diferansiyel denklemlerin bir türü olduğunu göstermektedir.

## 2.2 Karakteristikler Yöntemi İle Su Darbesi Denklemlerinin Çözümü

### 2.2.1 Karakteristikler Yöntemi

Karakteristikler yöntemi hiperbolik kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan bir yöntemdir. Kısmi diferansiyel denklemler  $L_1$  ve  $L_2$  den oluşan bir diferansiyel denklem takımı olsun,

$$L_1: a_1 \frac{\partial f}{\partial x} + b_1 \frac{\partial f}{\partial t} + c_1 \frac{\partial g}{\partial x} + d_1 \frac{\partial g}{\partial t} + e_1 = 0 \quad (2.34)$$

$$L_2: a_2 \frac{\partial f}{\partial x} + b_2 \frac{\partial f}{\partial t} + c_2 \frac{\partial g}{\partial x} + d_2 \frac{\partial g}{\partial t} + e_2 = 0 \quad (2.35)$$

Burada,  $x$  ve  $t$  bağımsız değişkenler  $f(x, t)$  ve  $g(x, t)$  fonksiyonlardır. Bu iki diferansiyel denklemin çözümü bu denklemlerin her türlü doğrusal kombinasyonunun da çözümüdür.

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (\lambda, \text{ rasgele bir parametre}) \quad (2.36)$$

$$\underbrace{(a_1 + \lambda a_2) \frac{\partial f}{\partial x} + (b_1 + \lambda b_2) \frac{\partial f}{\partial t}}_{\frac{df}{dt}} + \underbrace{(c_1 + \lambda c_2) \frac{\partial g}{\partial x} + (d_1 + \lambda d_2) \frac{\partial g}{\partial t}}_{\frac{dg}{dt}} + e_1 + \lambda e_2 = 0 \quad (2.37)$$

Tam türevin zaman ( $t$ ) ve konuma ( $x$ ) göre kısmi türevler cinsinden ifadesi,

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.38)$$

$\lambda$ , keyfi bir parametre olduğuna göre adi türevleri oluşturacak şekilde belirlenebilir.

$$\frac{df}{dt} = \left( \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{a_1 + \lambda a_2}{b_1 + \lambda b_2} \frac{\partial f}{\partial x} \right) (b_1 + \lambda b_2) \frac{dx}{dt} = \left( \frac{\partial g}{\partial t} + \frac{c_1 + \lambda c_2}{d_1 + \lambda d_2} \frac{\partial g}{\partial x} \right) (d_1 + \lambda d_2) \quad (2.39)$$

$\frac{dx}{dt} = \frac{a_1 + \lambda a_2}{b_1 + \lambda b_2} = \frac{c_1 + \lambda c_2}{d_1 + \lambda d_2}$ , ifadesinde içler dışlar çarpımı yapılırsa,

$$\lambda^2 \underbrace{(a_2 d_2 - b_2 c_2)}_A + \lambda \underbrace{(a_2 d_1 + a_1 d_2 - b_2 c_1 - b_1 c_2)}_B + \underbrace{a_1 d_1 - b_1 c_1}_C = 0$$

$A\lambda^2 + B\lambda + C = 0$ , ikinci derece denkleminin çözülmesiyle  $\lambda$  bulunur.

$$\lambda_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2.40)$$

## 2.2.2 Karakteristikler Yönteminin Su Darbesine Uyarlanması

Karakteristikler yönteminin genel açıklamalarındaki  $f(x, t)$  denklemi su darbesi olayında debinin yere ve zamana göre değişimini veren  $Q(x, t)$  ifadesine karşılık gelmektedir. Benzer şekilde  $g(x, t)$  ifadesi ise piyezometre kotunun yer ve zamana göre değişimini veren  $H(x, t)$  ifadesine karşılık gelmektedir. Böylece Karakteristikler yöntemindeki  $L_1$  denklemi süreklilik denkleminin (2.30) ve  $L_2$  denkleminin dinamik denkleme (2.11) karşılık gelmektedir.

Süreklilik denklemi: 
$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

Dinamik denklem: 
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0$$

(2.34) ve (2.35) denklemlerindeki katsayıların su darbesi durumundaki karşılıkları aşağıda verilmiştir.

$$a_1 = \frac{a^2}{gA}; \quad d_1 = 1; \quad b_2 = 1; \quad c_2 = gA; \quad e_2 = \frac{f}{2DA} Q|Q|$$

$$b_1 = c_1 = e_1 = a_2 = d_2 = 0$$

Karakteristikler yöntemindeki  $\lambda$ 'ya bağlı ikinci dereceden denklemin katsayıları

$A = -gA$ ;  $B = 0$ ;  $C = a^2/gA$  olur.

$$\lambda_{1,2} = \frac{-0 \pm \sqrt{0^2 - 4(-gA \frac{a^2}{gA})}}{-2gA} = \pm \frac{a}{gA} \quad (2.41)$$

Süreklilik denklemi ve dinamik denklem  $L = L_1 + \lambda L_2$  ifadesine göre birleştirilirse,

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \lambda \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\lambda f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2.42)$$

Debi ve piyezometre kotunun zamana göre türevleri, debi ve piyezometre kotunun yer ve zamana göre kısmi türevleri cinsinden yazılırsa,

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad \text{ve} \quad \frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (2.43)$$

$L$  denklemi sırasıyla 2.41 eşitliğindeki  $\lambda$  değerlerine göre çözülmektedir.

İlk olarak  $L$  denkleminde  $\lambda = + a/gA$  yazılırsa,

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{a}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{a}{gA} gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{af}{2gA^2D} Q|Q| = 0 \quad (2.44)$$

sadeleştirmeler yapılırsa,

$$\frac{a}{gA} \left[ a \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \right] + \left[ a \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \frac{af}{2gA^2D} Q|Q| = 0 \quad (2.45)$$

$$\frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{dH}{dt} + \frac{af}{2gA^2D} Q|Q| = 0 \quad K^+ \quad (2.46)$$

$$\frac{dx}{dt} = a \quad C^+ \quad (2.47)$$

İkinci olarak  $L$  denkleminde  $\lambda = - a/gA$  yazılırsa,

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{a}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{a}{gA} gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{af}{2gA^2D} Q|Q| = 0 \quad (2.48)$$

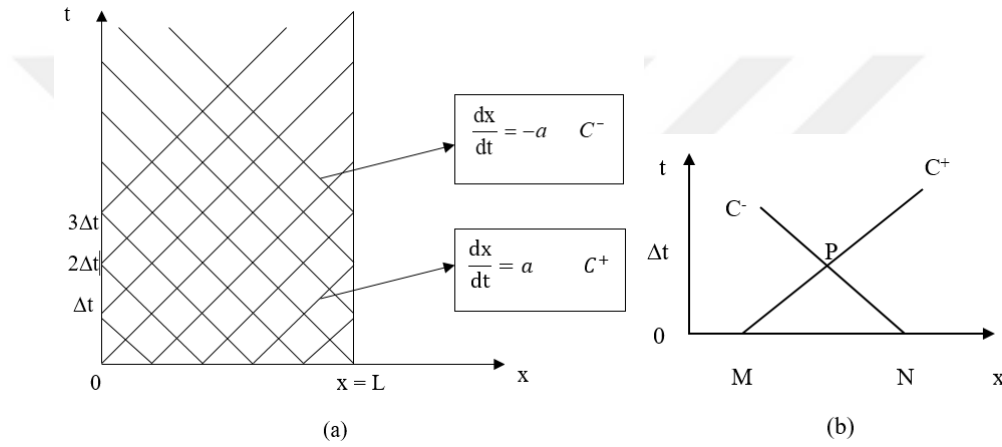
sadeleştirmeler yapılırsa,

$$-\frac{a}{gA} \left[ -a \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \right] + \left[ -a \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] - \frac{af}{2gA^2D} Q|Q| = 0 \quad (2.49)$$

$$-\frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{dH}{dt} - \frac{af}{2gA^2D} Q|Q| = 0 \quad K^+ \quad (2.50)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad C^+ \quad (2.51)$$

(2.46) ve (2.50) denklemleri karakteristik denklemler olarak adlandırılır ve sırasıyla (2.47) ve (2.51) denklemleri üzerinde çözümleri vardır.  $(x, t)$  düzleminde çizilen  $\frac{dx}{dt} = \pm a$  doğrularına karakteristik doğrular ya da kısaca karakteristikler adı verilir.  $K^+$  karakteristik denklemini  $C^+$  karakteristiği boyunca,  $K^-$  karakteristik denklemini ise  $C^-$  karakteristiği boyunca geçerlidir.  $L$  uzunluğundaki üniform bir borudaki su darbesi çözümü için oluşturulan  $(x - t)$  düzlemi ve karakteristik doğrulardan oluşan ağ Şekil (2.3.a)'da görülmektedir. Çözüm sadece ağın düğüm noktalarında bulunabileceği için boru uygun sayıda parçaya bölünerek parçaların birleşim noktalarından karakteristik doğrular çıkmaktadır.  $t = 0$  anı kararlı durumdur ve bu anda boru üzerindeki tüm noktaların debi ( $Q$ ) ve piyezometre kotu ( $H$ ) değerleri bilinmektedir.



Şekil 2.3: Bir boru için  $xt$  düzlemi ve karakteristik doğrulardan oluşan ağ

Şekil 2.3.b'de gösterildiği gibi  $t = 0$  anında hidrolik parametreleri (debi, piyezometre kotu) bilinen  $M$  ve  $N$  noktalarından hareket ederek  $t = \Delta t$  saniye sonra  $P$  noktasının hidrolik parametreleri hesaplanabilir. Daha sonra  $t = \Delta t$  anındaki parametrelerden hareketle  $t = 2\Delta t$  anındaki parametreler hesaplanabilir. Bu işlem istenen zamana kadar devam eder. Hesapların  $t = 0$ 'dan başlayarak  $\Delta t$  zaman aralıklarıyla yapılması gereklidir. Her hesap adımında bir önceki adımın verileri kullanılmaktadır. Karakteristik denklemleri sonlu farklar biçiminde yazılırsa,  $C^+$  karakteristiği boyunca geçerli olan  $K^+$  karakteristik denklemini  $M$  ve  $P$  noktaları için,

$$\frac{a}{gA} (Q_P - Q_M) + (H_P - H_M) + \frac{f \Delta x}{2gA^2 D} Q_M |Q_M| = 0 \quad (2.52)$$

ve  $C^-$  karakteristiği boyunca geçerli olan  $K^-$  karakteristik denklemini  $N$  ve  $P$  noktaları için,

$$-\frac{a}{gA}(Q_P - Q_N) + (H_P - H_N) - \frac{f\Delta x}{2gA^2D}Q_N|Q_N| = 0 \quad (2.53)$$

Bu denklemlerde bilinmeyenler  $Q_P$  ve  $H_P$  değerleridir. İki bilinmeyenli iki denklem çözümü yapılarak sonuç bulunmaktadır.

(2.52) ve (2.53) denklemleri  $H_P$ 'ye göre düzenlenirse ve  $B = \frac{a}{gA}$ ,  $R = \frac{f\Delta x}{2gA^2D}$  olarak kısaltılırsa;

$$C^+: H_P = H_M - B(Q_P - Q_M) - RQ_M|Q_M| \quad (2.54)$$

$$C^-: H_P = H_N + B(Q_P - Q_N) + RQ_N|Q_N| \quad (2.55)$$

Başlangıçta kararlı akım durumunda debiler birbirine eşittir ( $Q_M = Q_N$ ). (2.54) ve (2.55) eşitlikleri basit formda yazılırsa,

$$C^+: H_{P_i} = C_P - BQ_{P_i} \quad (2.56)$$

$$C^-: H_{P_i} = C_M + BQ_{P_i} \quad (2.57)$$

Burada  $C_P$  ve  $C_M$  bir önceki zaman adımında ve çözümü yapılan noktanın komşu noktalarının değerleri kullanılarak hesaplanmış olan sabit değerlerdir.

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \quad (2.58)$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (2.59)$$

(2.56) ve (2.57) eşitlikleri toplanarak,

$$H_{P_i} = (C_P + C_M)/2 \quad (2.60)$$

$Q_{P_i}$ , değeri doğrudan (2.56) ve (2.57) eşitliklerinden elde edilebilir.

$$Q_{P_i} = (C_P - H_{P_i})/B \quad \& \quad Q_{P_i} = (H_{P_i} - C_M)/B \quad (2.61)$$

Şekil (2.3.b)'deki  $P$  noktası  $x = 0$  veya  $x = L$  noktalarındaysa sadece bir karakteristik doğru bulunacağı için iki bilinmeyenli bir denklem yazılabilecektir. Bu durumda bir sınır

şartına ihtiyaç vardır. Sınır şartı ile  $P$  noktasının debi veya piyezometre kotundan biri hesaplanabiliyorsa diğer bilinmeyen karakteristik denklem yardımıyla bulunabilir.

### 2.2.3 Sınır Şartları

Karakteristik doğruların kesim noktasında ( $P$ ), debi ( $Q$ ) ve piyezometre kotu ( $H$ ) değerleri Bölüm 2.2.2'deki formüllerle hesaplanır. Ancak boru hattının memba ve mansap uçlarında birer tane  $C^-$  veya  $C^+$  ifadesi olacağı için 2 bilinmeyenli denklem takımı çözülemeyecektir. Bu amaçla boru hattının memba ucunda bulunan haznenin sabit seviyeli olduğu varsayılarak piyezometre kotunun bilindiği bir sınır şartı geliştirilebilir. Benzer şekilde boru hattının mansap ucunda bulunan vananın da belli bir kurala göre açılıp kapandığı varsayılarak debinin bilindiği bir sınır şartı geliştirilebilir. Kaçak noktası ise boru hattı üzerindeki iki düğüm noktasının arasında bulunan bir orifis gibi düşünülerek bu noktadaki debinin piyezometre kotuna bağlı değişimi bir sınır şartı olarak tanımlanabilir. Boru hatlarında yukarıdakilerden başka hidrolik elemanlar da (pompalar, basınç kırıcı vanalar, çek valfler vb.) bulunabilir ve literatürde bu elemanlar için de sınır şartları geliştirilmiştir. Ancak bu tez kapsamında ele alınan boru hattında bulunan sınır şartları aşağıda açıklanmıştır.

#### 2.2.3.1 Sabit Seviyeli Hazne Sınır Şartı

Kısa süreli kararsız akım analizinde hidrolik seviye çizgisinin yüksekliği büyük bir memba kaynağı için sabit olarak kabul edilebilir.

$$H_{P_1} = H_0 \quad (2.62)$$

Burada  $H_0$ , memba haznesi su yüzeyi kotudur. Denklem (2.62)'ye göre her bir adım aralığı için  $H_{P_1}$  değeri bilinmektedir ve  $Q_{P_1}$  değeri (2.61) eşitliği kullanılarak Denklem (2.63)'deki gibi elde edilebilmektedir.

$$Q_{P_1} = (H_{P_1} - C_M) / \left(\frac{a}{gA}\right) \quad (2.63)$$

### 2.2.3.2 Vana Sınır Şartı

Boru hattının mansap ucunda bulunan bir vanadan geçen debi, kararlı akım durumunda orifisten akış gibi değerlendirilebilir. Bu durumda Denklem (2.64)'deki orifis ifadesi yazılabilir.

$$Q_0 = (C_d A_G)_0 \sqrt{2gH_v} \quad (2.64)$$

Burada  $Q_0$ , kararlı akım durumunda vanadan geçen debi,  $H_v$ , vana boyunca meydana gelen hidrolik yük kaybı ve  $(C_d A_G)_0$ , vana açıklığının debi katsayısı ile çarpımıdır. Kararsız akım durumunda (2.64) eşitliği (2.65) eşitliğine dönüşmektedir.

$$Q_P = C_d A_G \sqrt{2g\Delta H} \quad (2.65)$$

Burada  $\Delta H$ , vana boyunca piyezometre kotunda oluşan ani azalmadır. (2.64) ve (2.65) eşitlikleri kullanılarak boyutsuz vana açıklığı katsayısı ( $\tau$ ) elde edilebilir.

$$\tau = \frac{C_d A_G}{(C_d A_G)_0} \quad (2.66)$$

(2.65) eşitliği (2.64) eşitliğine bölünürse kararsız akım durumunda vanadan geçen debi ( $Q_P$ ) Denklem (2.67) ile hesaplanabilir.

$$Q_P = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}} \tau \sqrt{\Delta H} \quad (2.67)$$

Kararlı akım için  $\tau = 1$  ve vananın kapanmasıyla akımın durması halinde  $\tau = 0$  değerlerini almaktadır.  $\tau$  değeri genellikle 0 ile 1 arasında değişmektedir, ancak vana kararlı durumdan itibaren açılırsa, 1'den yüksek değerleri de alabilmektedir. Boru hattının mansap bölümü için (2.56) ile (2.67) eşitlikleri birlikte çözümlerse, debiyi vana yük kayıp katsayısı ( $C_V$ ) cinsinden veren (2.68) eşitliği elde edilir.

$$Q_P = -BC_V + \sqrt{BC_V^2 + 2C_V C_P} \quad (2.68)$$

Burada  $C_V = (Q_0 \tau)^2 / 2H_0$  'dir.  $H_P$  değeri, (2.56) veya (2.67) eşitliklerinden birisi kullanılarak hesaplanır.

### 2.2.3.3 Kaçak Noktası Sınır Şartı

Boru hattında meydana gelen bir kaçak karakteristikler yönteminde, iki düğüm noktası arasında debideki bir süreksizlik olarak temsil edilebilir. İki düğüm noktasının arasında oluşan kaçağın debisi ( $Q_L$ ) ile kaçak yerinin membasındaki debi ( $Q_{PU}$ ) ve mansabındaki debi ( $Q_{PD}$ ) arasında Denklem (2.69)'da verilen ilişki vardır.

$$Q_{PU} = Q_{PD} + Q_L \quad (2.69)$$

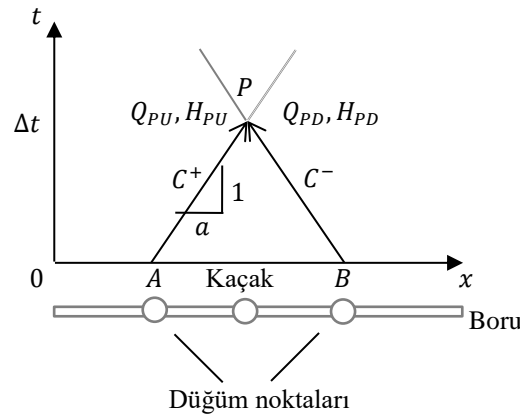
Burada  $Q_L$ , kaçıktan dışarı sızan su miktarıdır. Eğer kaçak dairesel kesitli bir orifis olarak düşünülürse, (2.69) eşitliğindeki  $Q_L$ 'yi bulmak için (2.70) eşitliği kullanılabilir.

$$Q_L = C_d * \left( \frac{\pi d_L^2}{4} \right) * \sqrt{2g(H_{PU} - z_L)} \quad (2.70)$$

Burada  $C_d$ , orifisin debi katsayısı,  $z_L$ , kaçağın (orifisin) bulunduğu noktadaki boru eksen kotu ve  $d_L$ , kaçak orifisinin çapını belirtmektedir. Küçük kaçaklar için kaçağın memba ve mansap uçlarındaki piyezometre yükseklikleri birbirine eşit olarak kabul edilebilir (Denklem 2.71).

$$H_{PU} = H_{PD} \quad (2.71)$$

Kaçak noktasındaki bilinmeyenler ( $Q_{PU}, H_{PU}, Q_{PD}, H_{PD}$ ), karakteristik eşitlikler (Denklemler (2.52) ve (2.53)) ile kaçak noktasının her iki ucundaki piyezometre kotları ve debiler arasındaki ilişkiler (Denklemler (2.69) ve (2.71)) yardımıyla belirlenmektedir. Kaçak noktası sınır şartının şematik görünümü Şekil 2.4'te verilmiştir (Lee 2005).



Şekil 2.4: Kaçak noktası için karakteristik doğrular

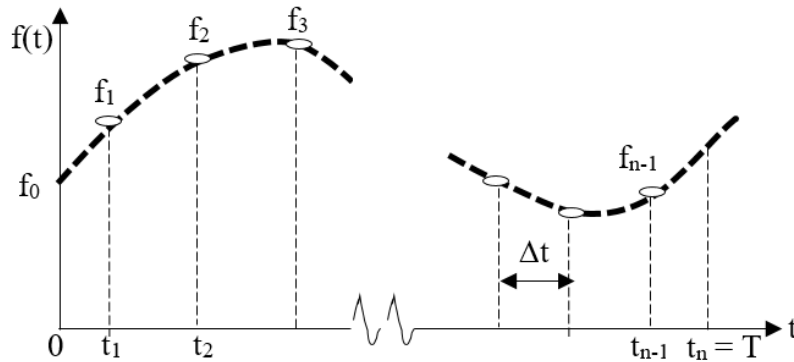
### 3. FOURIER DÖNÜŞÜMÜ

Su darbesi sonucu oluşan basınç dalgalanmaları zamana bağlı olarak çizildiğinde sinüzoidal periyodik dalgalar şeklinde olduğu görülmektedir. Bu tür periyodik sinyallerin frekans bölgesinde (alanında) gösterimi ve analizi, zaman alanından daha uygun olmaktadır. Periyodik sinyallerin zaman alanından frekans alanına dönüşümü için en yaygın kullanılan yöntem Fourier dönüşümüdür.

Fourier dönüşümü Fransız matematikçi Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) tarafından zaman bölgesindeki sinyalleri frekans bölgesindeki sinyallere dönüştürmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu metodu özellikle sayısal sinyallerle ilgilenen iletişim mühendisleri, fizikçiler ve istatistikçiler yaygın bir şekilde kullanmaktadır.

#### 3.1 Ayırık Fourier Dönüşümü

Mühendislikte fonksiyonlar genellikle sınırlı ayırık değerler grubu ile ifade edilmektedir. Veriler çoğu kez belirli zaman aralıklarında toplanmakta ya da sürekli ölçümler ayırık formata dönüştürülmektedir. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, 0’dan T’ye kadar olan aralık  $\Delta t=T/n$  genişliğindeki n adet eşit aralıklı alt bölümlere ayrılabilir.  $j$  alt indisi alınan örneklerin ayırık zamanlarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Buna göre  $f_j, t_j$  zamanında alınan sürekli fonksiyonun  $f(t)$  değerini belirtmektedir. Veriler  $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$  noktaları (alt indisleri) için dikkate alınmaktadır,  $j = n$  noktasının değeri Fourier dönüşümünde kullanılmamaktadır.



Şekil 3.1: Ayırık Fourier serisinin örnek noktaları

Ayrık Fourier dönüşümü Şekil 3.1'deki sistem için aşağıdaki gibi yazılırsa,

$$F_k = \sum_{j=0}^{n-1} (f_j e^{-ik\omega_0 j}) \quad k = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.1)$$

ve ters Fourier dönüşümü,

$$f_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (F_k e^{-ik\omega_0 j}) \quad j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.2)$$

Sinyal içinde ölçülebilen en yüksek frekans *Nyquist frekansı* olarak bilinmektedir ve örnek frekansının yarısına eşit olarak kabul edilmektedir. En kısa örnek zaman aralığından daha hızlı oluşan periyodik değişimlerin algılanması çok zordur. Algılanabilen en düşük frekans da toplam örnek uzunluğunun tersi kadardır (Chapra 2012).

### 3.1.1 Hızlı Fourier Dönüşümü

Denklem (3.1) tabanlı Ayrık Fourier Dönüşümünü (AFD) hesaplamak için algoritma geliştirilmiş olmasına rağmen,  $n^2$  adet işlem gerektirdiğinden dolayı hesaplanması zordur. Orta ölçekteki veri örnekleri için bile AFD'nin doğrudan uygulanması aşırı zaman alabilmektedir.

Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD), AFD'yi daha ekonomik biçimde hesaplamak için geliştirilmiş bir algoritmadır. Bu yöntemin hızlı olmasının nedeni önceki hesaplamaların sonuçlarını kullanarak işlem sayısını azaltmasından dolayıdır. Ayrıca dönüşümü yaklaşık  $n \log_2 n$  adet işlemle hesaplamak için trigonometrik fonksiyonların sürekliliği ve simetrisi kullanılmaktadır. Örneğin 50 adet veri için HFD standart AFD'ye göre yaklaşık 10 kat, 1000 adet veri için ise yaklaşık 100 kat daha hızlıdır (Chapra 2012).

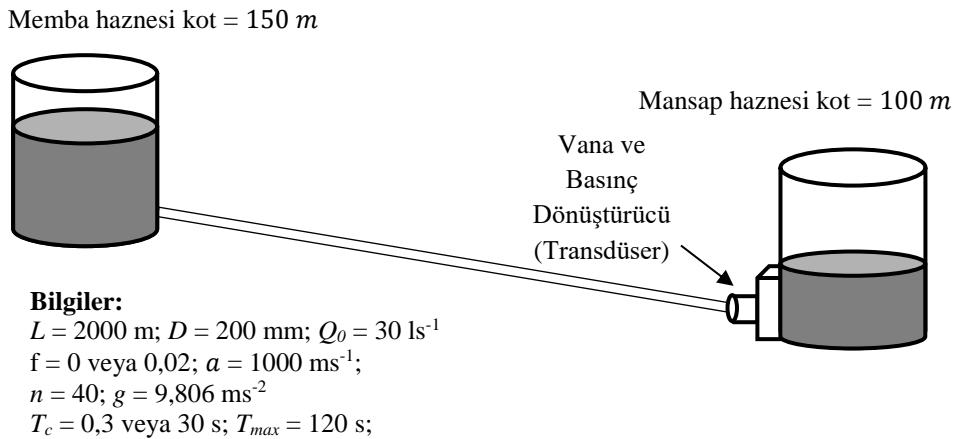
İlk HFD algoritması on dokuzuncu yüzyılın başlarında Gauss tarafından geliştirilmiştir ve yirminci yüzyılın başlarında Runge, Danielson ve Lanczos gibi bilim adamları da katkıda bulunmuşlardır. Ayrık dönüşümlerin genellikle el ile hesaplanması çok zaman aldığı için, modern dijital bilgisayarın geliştirilmesinden önce fazla ilgi görmemiştir. 1965 yılında J. W. Cooley ve J. W. Tukey HFD'yi hesaplamak için bir algoritma belirledikleri temel bir makale yayınlamışlardır. Gauss ve diğer araştırmacıların algoritmalarına benzeyen bu şema Cooley-Tukey algoritması olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemi baz alan çok sayıda yaklaşım

mevcuttur, en yaygın olan yöntem MATLAB tarafından da HFD fonksiyonu ( $fft$ ) için kullanılan FFTW'dir (Frigo ve Johnson 1998).

### 3.1.2 MATLAB Hızlı Fourier Dönüşümü Fonksiyonu: $fft$

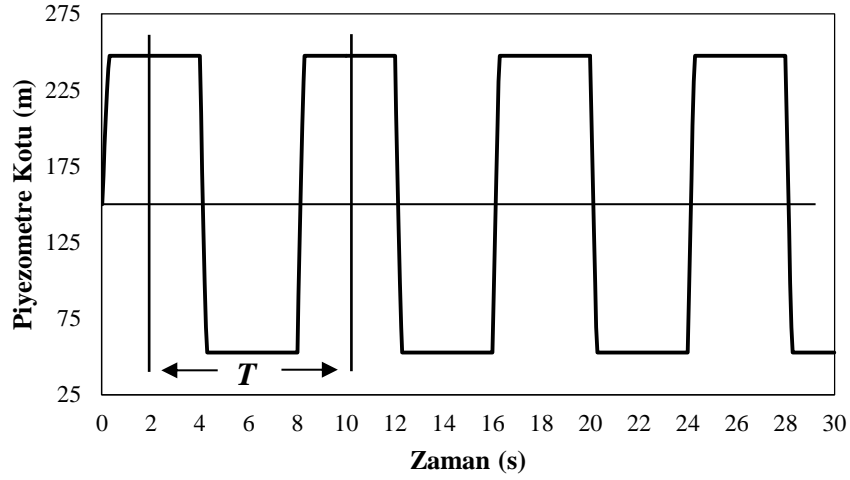
MATLAB'ın  $fft$  işlevi AFD'yi hesaplamanın çok etkili bir yoludur. Fonksiyonun MATLAB'da kullanımını  $F = fft(f, n)$  şeklindedir. Burada  $F$ , ayrık Fourier dönüşümünü içeren vektörü ifade ederken,  $f$ , sayısal sinyal vektörünü ifade etmektedir,  $n$  ise sayısal sinyal vektöründeki eleman sayısını göstermektedir.

Şekil 3.3'te gösterilen iki su haznesi arasındaki akımı sağlayan bir boru ve borunun mansap ucunda bulunan vana ve basınç dönüştürücü (transdüser) sistemi HFD için örnek olarak ele alınmıştır. Memba ve mansap hazneleri su yüzeyi kotları sırasıyla 150 m ve 100 m olup su seviyelerinin analiz süresince sabit kaldığı varsayılmıştır. Hazneleri birleştiren yatay borunun uzunluğu ( $L$ ) 2000 m olup çapı ( $D$ ) 200 mm'dir. Kararlı durum için debisi ( $Q_0$ )  $30 \text{ ls}^{-1}$  olarak dikkate alınmıştır. Borudaki sürtünmeye bağlı enerji kayıpları ihmal edilmiştir dolayısıyla Darcy-Weisbach kayıp katsayısının değeri ( $f$ ) sıfır alınacaktır. Sistemde su darbesinin borunun mansap ucunda bulunan vana ve basınç dönüştürücüsünün kapanmasıyla oluştuğu ve basınç dalgası yayılma hızının ( $a$ )  $1000 \text{ ms}^{-1}$  olduğu kabul edilmiştir. Su darbesi sonucu oluşan basınç değişimlerinin vana ve basınç dönüştürücüsünün hemen membaında bulunan bir basınç dönüştürücü (transdüser) yardımıyla 120 saniye süresince ( $T_{max}$ ) kaydedildiği varsayılmıştır.



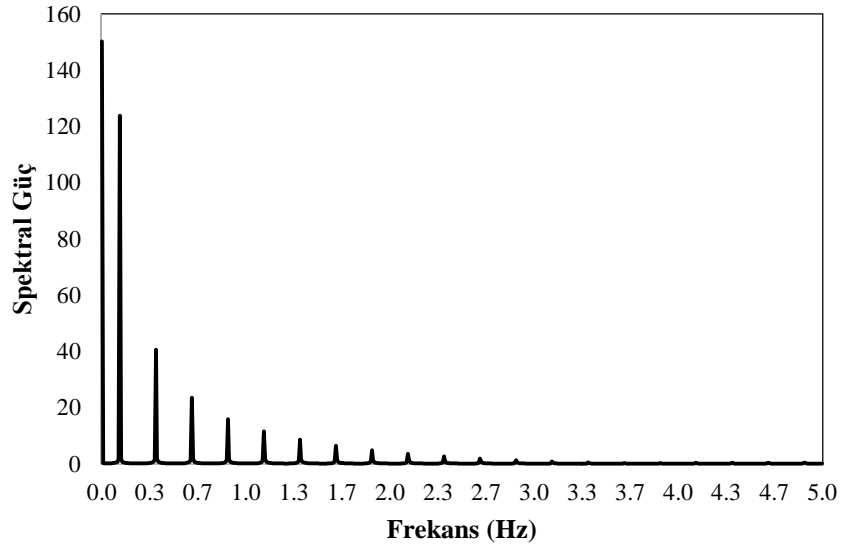
Şekil 3.2: Örnek sistem ve bilgileri (kaçak yok)

Örnek sistemde vananın hızlı kapanmasıyla oluşan su darbesi sonucu basınç dönüştürücünün bulunduğu noktadaki piyezometre kotlarının zamana göre değişimi Şekil 3.4'te verilmiştir. Piyezometre kotu değerlerinin periyodu ( $T = 8$  s) olan kare dalga şeklinde sinüzoidal bir sinyal oluşturduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.3: Piyezometre kotlarının zaman alanındaki değişimleri

Piyezometre kotu sinyaline MATLAB'ın fft fonksiyonu ile HFD uygulanırsa, frekans alanındaki güç-frekans ilişkisini gösteren güç spektrumu çizilebilir (Şekil 3.5). Frekansı sıfır olan güç değeri sinyallerdeki eğilimi (trend) göstermektedir. Güç spektrumu incelendiği zaman, frekans arttıkça sönümlenen tepeler (pikler) görülmektedir. Piyezometre kotu sinyalleri kare dalga şeklinde olduğu için sönümlenen pikler oluşmaktadır.

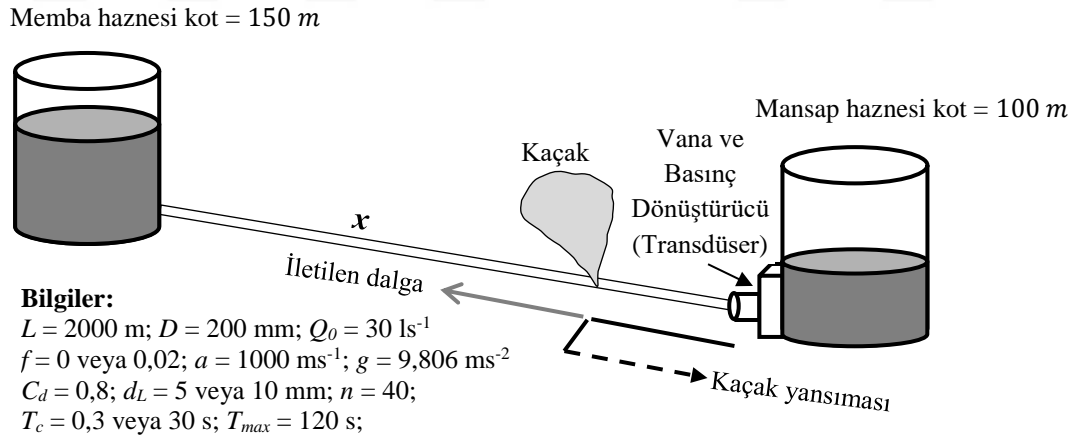


Şekil 3.4: Güç spektrumu

## 4. SAYISAL ANALİZ

### 4.1 Örnek Sistem ve Simülasyonlar

Bu tez kapsamında kullanılan kaçak tespiti yöntemi, boru hattında yapay olarak oluşturulan bir su darbesi sonucunda gerçekleşecek olan basınç dalgalarının ölçümüne dayanmaktadır. Ancak tez kapsamında deneysel çalışmalar yapılmadığı için örnek bir sistemde oluşturulan su darbesi sonucu elde edilmesi gereken piyezometre kotları 2. Bölümde açıklanan yöntemlerle hesaplanmıştır. Bölüm 3.1.2’de tanıtılan örnek hazne-boru-vana sisteminde boru üzerinde memba haznesine  $x$  metre uzaklıktaki bir noktada bulunan  $d_L$  çapında dairesel bir açıklıktan akışkanın atmosfere serbest bir şekilde akmasıyla kaçak meydana geldiği varsayılmıştır (Şekil 4.1). Su darbesi, boru hattının mansap ucunda bulunan bir vananın, tam açık konumdan yarıya kadar kapatılması ile oluşturulmuştur, böylece kaçak kontrolü sırasında boru hattı çalışmaya devam edebilecektir. Mansap vanasının hemen membaında bulunan bir basınç dönüştürücüde ölçülmesi gereken piyezometre kotu değerleri yazılan bir MATLAB kodu yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 4.1: Örnek sistem ve parametreleri (kaçaklı)

Öncelikle kaçak olmayan ( $d_L = 0$ ) sistem davranışını görmek üzere enerji kayıplarının ihmal edildiği ( $f = 0$ ) ve enerji kayıplarının hesaba katıldığı ( $f = 0,02$ ) durumlar ile vananın hızlı kapandığı ( $T_c = 0,3$  s) ve vananın yavaş kapandığı ( $T_c = 30$  s) durumları temsilen 4 adet simülasyon yapılmıştır. Daha sonra Darcy-Weisbach kayıp katsayısı ( $f$ ), kaçak çapı ( $d_L$ ), vana kapanma süresi ( $T_c$ ) ve kaçak yerinin arasında bulunduğu düğüm noktası numaraları ( $n$ ) ile

başlangıca mesafe aralığı ( $x$ ) Tablo 4.1’de verilen değerlere göre değiştirilerek kaçak olan durumu temsil eden 16 adet simülasyon yapılmıştır.

Tablo 4.1: Sayısal simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri

$f$	$d_L$ (mm)	$T_c$ (s)	$n$	$x$ (m)
0	5	0,3	20-21	975
0,02	10	30	30-31	1475

Simülasyonları temsil etmek amacıyla bir kodlama sistemi oluşturulmuştur. Darcy-Weisbach kayıp katsayısı ( $f$ ), kaçak çapı ( $d_L$ ), vana hareket süresi ( $T_c$ ) ve kaçak yeri ( $x$ ) simülasyonları birbirinden ayıran parametreler oldukları için kodlamada bu parametreleri temsil eden harfler ve parametre değerlerini temsil eden sayılar kullanılmıştır. Tablo 4.2’de bazı simülasyonların parametre değerleri ve kodlamaları verilmiştir.

Tablo 4.2: Simülasyon kodlama örnekleri

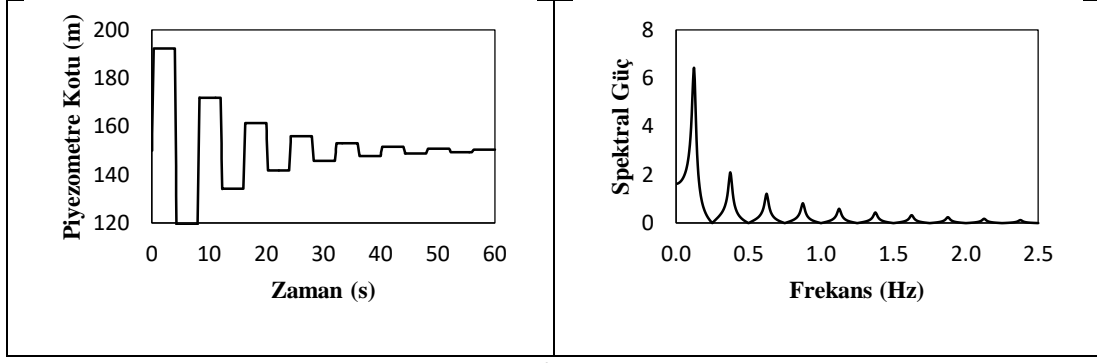
$f$	$d_L$ (mm)	$T_c$ (s)	$x$ (m)	Kodlama	Açıklama
0	0	0,3	0	f0c03	Enerji kayıpsız ve kaçaksız sistem, vana manevra süresi 0,3 s.
0	5	0,3	975	f0d5c03x50	Enerji kayıpsız sistem ve borunun orta noktasında (%50) 5 mm çapında kaçak var, vana manevra süresi 0,3 s.
0,02	10	30	1475	f002d10c30x75	Darcy-Weisbach kayıp katsayısı 0,02 ve borunun son çeyreğinde (%75) 10 mm çapında kaçak var, vana manevra süresi 30 s.

## 4.2 Simülasyon Sonuçları

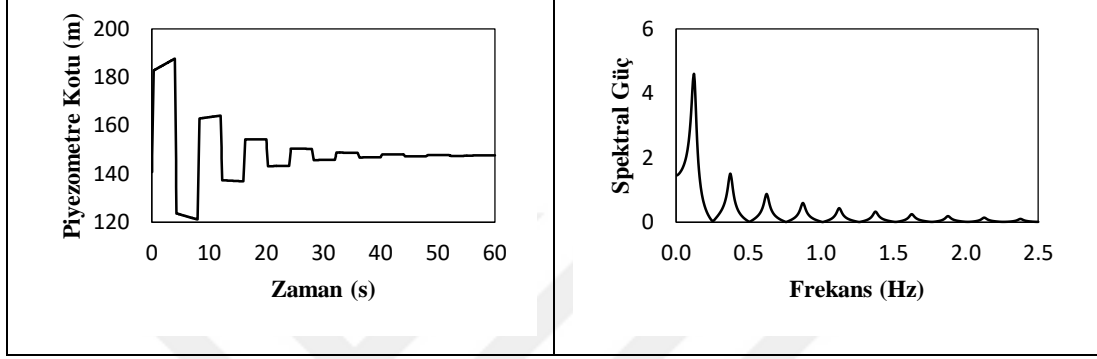
Kaçaklı ve kaçaksız durumlar için, vananın yarıya kadar kapanmasıyla oluşan su darbesi sonucu, basınç ölçerin bulunduğu noktadaki piyezometre kotu değerlerinin, zaman alanındaki değişimi ve piyezometre kotu değerlerinin MATLAB'ın *fft* komutu yardımıyla elde edilen güç değerlerinin frekans alanındaki değişimleri, simülasyon kodlamalarıyla Şekiller 4.2 ile 4.6 arasında verilmiştir. Su darbesi hesaplarının 120 s süresince yapılmasına rağmen, Piyezometre Kotu değerlerinin 60 s ve Spektral Güç değerlerinin 2,5 Hz 'den sonra sönümlenmesi dolayısıyla Şekiller 4.2 ve 4.6 arasındaki grafikler 60 s ve 2,5 Hz değerlerine kadar çizdirilmiştir. Piyezometre kotu-Zaman grafiği çizilirken zaman aralığının 0,05 s alınmasıyla 60 saniye için hesaplanan 1200 adet Piyezometre kotu değeri kullanılmıştır. Spektral Güç-Frekans grafiği ise frekans aralığının  $1/120 = 0,00833 \sim 0,01$  olduğu 300 adet Spektral Güç değeri ile çizilmiştir ki bu da 2,5 Hz'e karşılık gelmektedir.

Enerji kayıplarının ihmal edildiği ( $f = 0$ ) ve kayıpların göz önüne alındığı ( $f = 0,02$ ) durumların Piyezometre kotu-Zaman grafikleri incelendiğinde tüm simülasyonlarda kayıpsız durumlar için hesaplanan piyezometre kotu değerlerinin kayıplı durumlardakilerden daha büyük olduğu ve Piyezometre kotu değerlerinin dalgalanmasındaki sönümlenmenin de kayıplı durumlarda daha fazla olduğu görülmektedir. Benzer bir durum Spektral Güç değerlerinde de görülmektedir. Kayıpsız durumlarda Spektral güç değerleri daha büyük hesaplanmıştır.

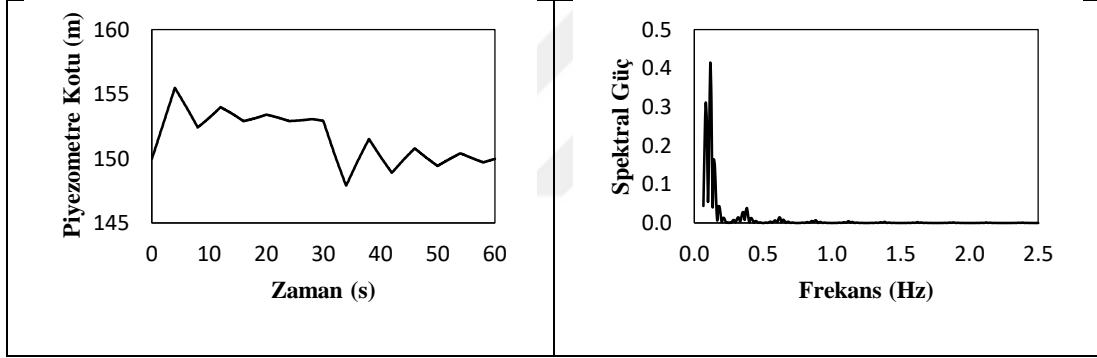
Vana manevra (kapanma) süresinin hızlı (0,3 s) ve yavaş (30 s) olduğu durumların hem Piyezometre kotu-Zaman hem de Spektral Güç-Frekans grafikleri incelendiğinde, vana kapanma süresinin hızlı olduğu durumlardaki sinyallerin daha periyodik görüldüğü tespit edilmiştir. Bunun sebebinin vanada oluşan basınç dalgasının yansımalarının tekrar vanaya geldiğinde vana hareketinin sona ermiş olması, dolayısıyla dalgalanmalar devam ettikçe borunun her iki ucunda aynı şekilde yansımaları olduğu düşünülmektedir. Yavaş kapanma durumunda ise basınç dalgasının yansımaları vananın bulunduğu noktaya her gelişinde farklı bir vana sınır şartı ile karşılaşmakta ve bu da farklı basınç dalgalarının boru içerisinde birbirleriyle girişim yaparak sinyallerin gürültülü görünmesine yol açmaktadır.



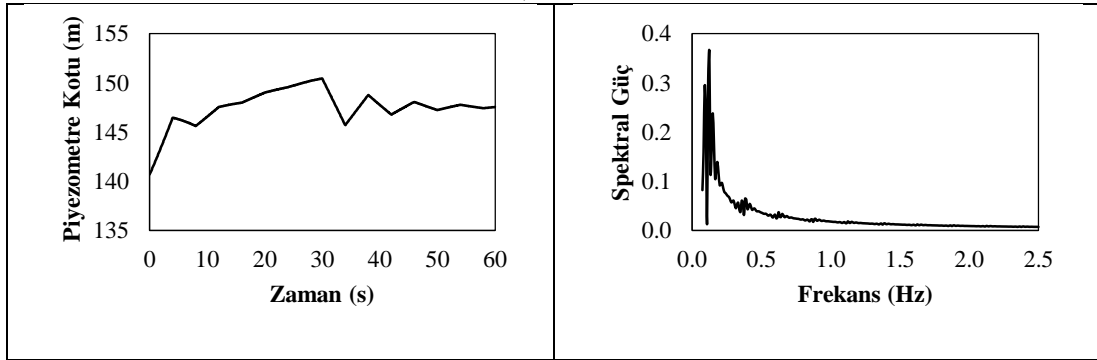
a) f0c03



b) f002c03

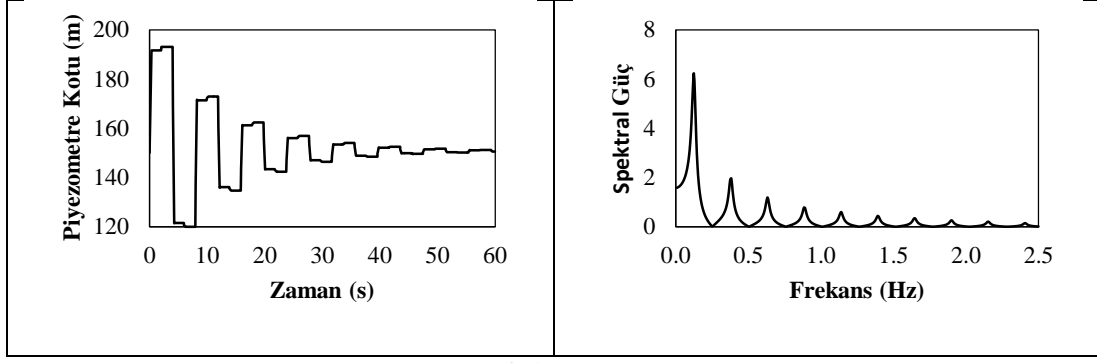


c) f0c30

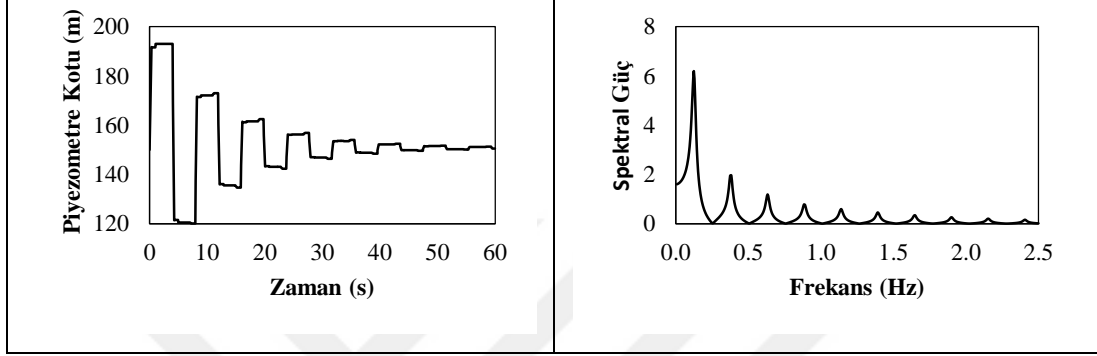


d) f002c30

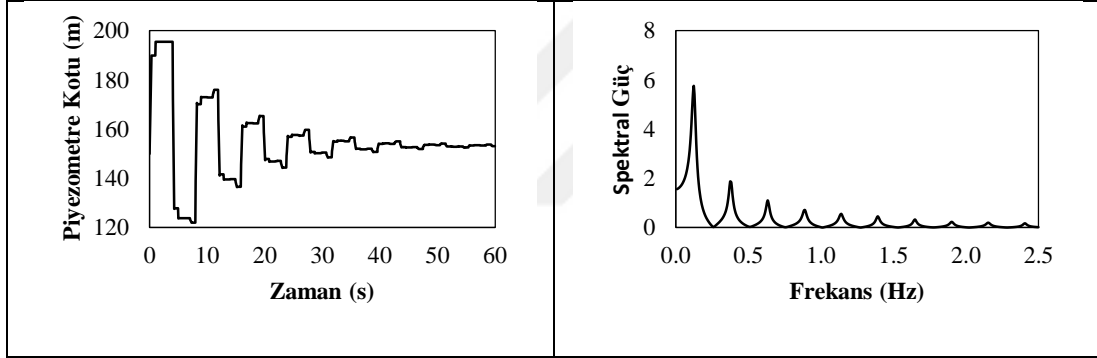
Şekil 4.2: Kaçaksız simülasyonlar için Piezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri



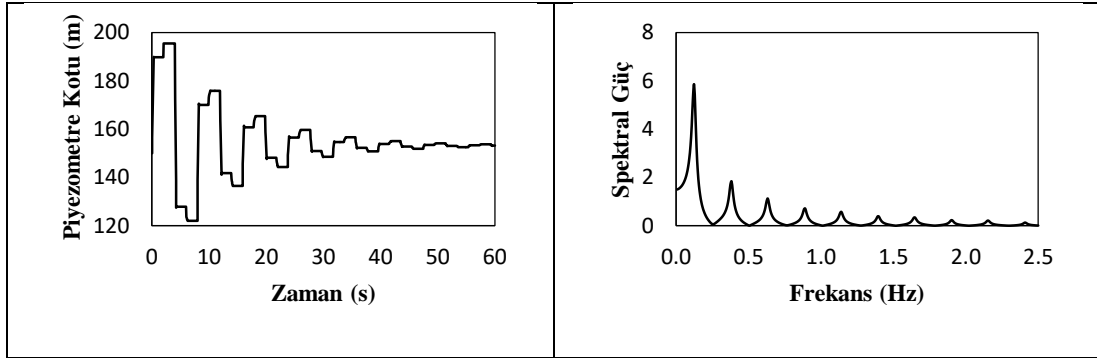
a) f0d5c03x50



b) f0d5c03x75

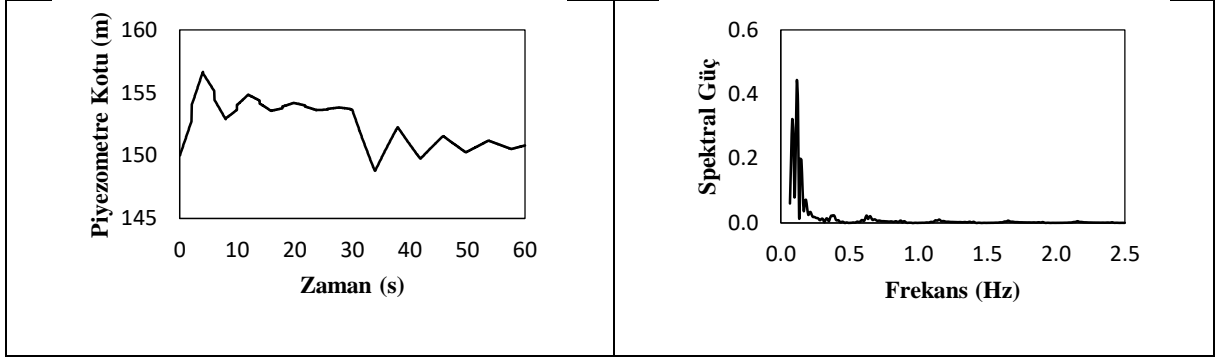


c) f0d10c03x75

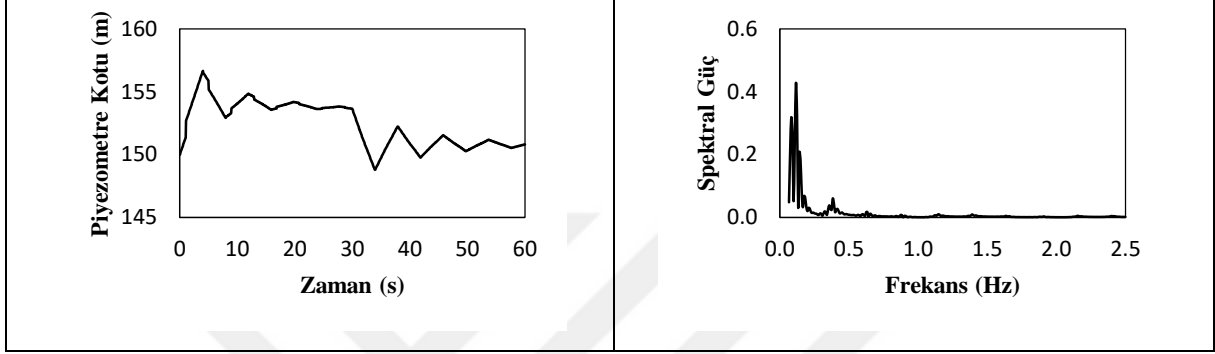


d) f0d10c03x50

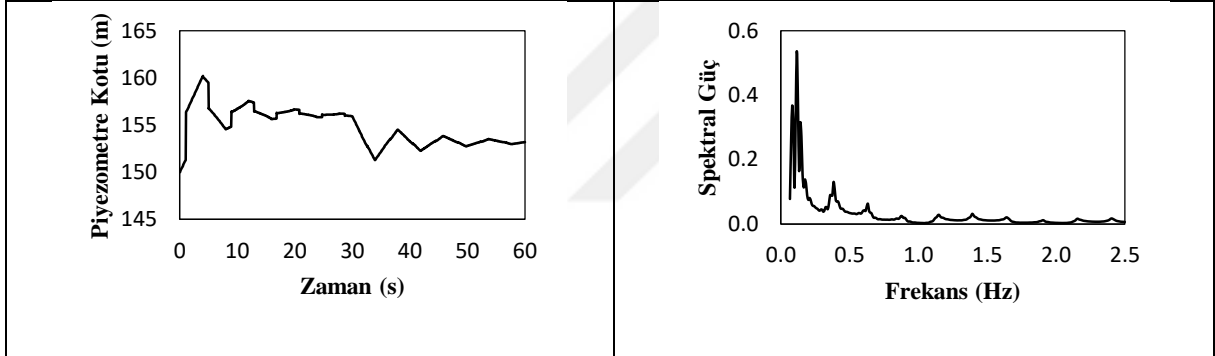
Şekil 4.3:  $f = 0$  ve  $T_c = 0,3$  s olan kaçaklı simülasyonlar için Piezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri



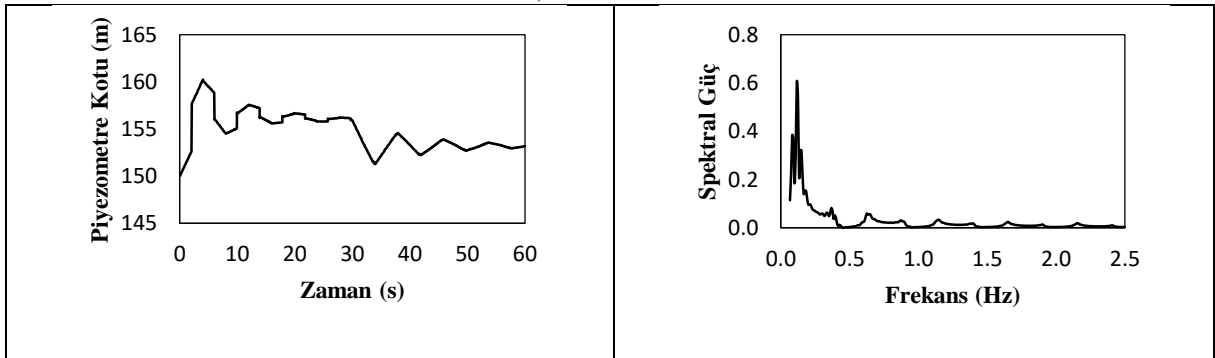
a) f0d5c30x50



b) f0d5c30x75

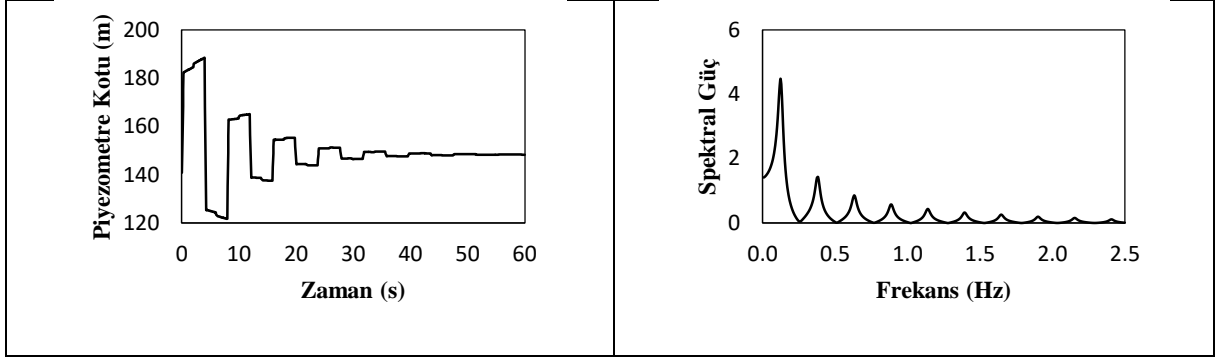


c) f0d10c30x75

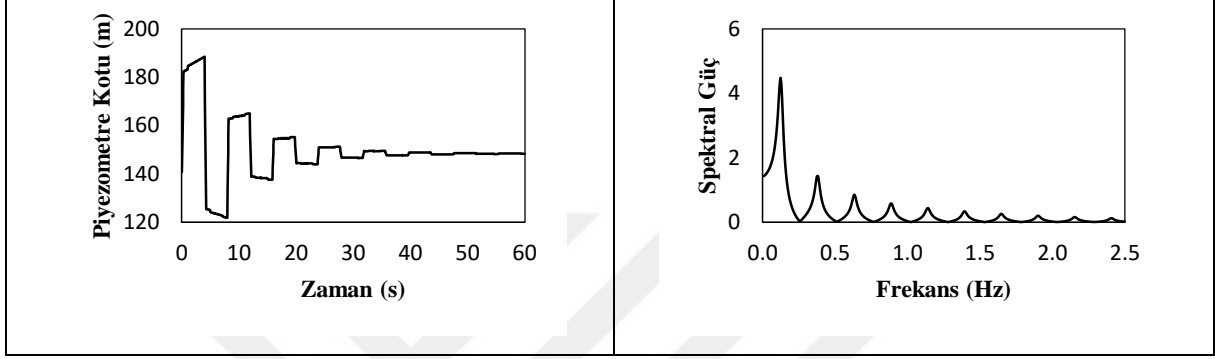


d) f0d10c30x50

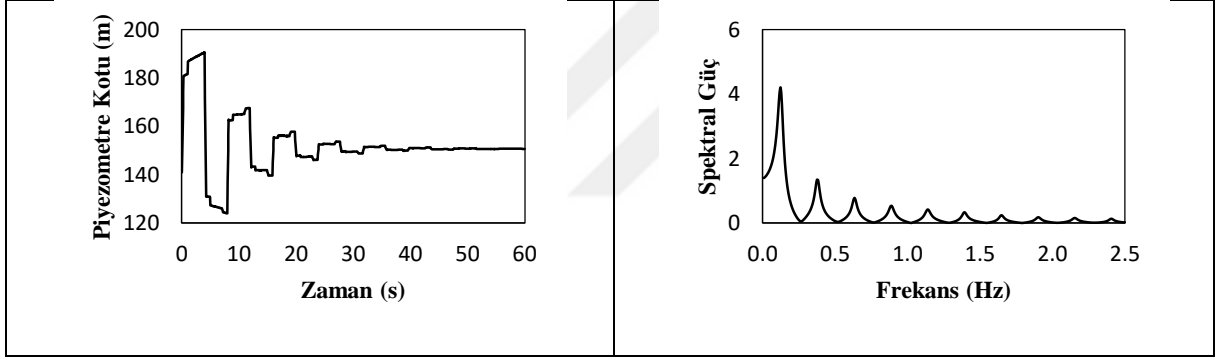
Şekil 4.4:  $f = 0$  ve  $T_c = 30$  s olan kaçaklı simülasyonlar için Piezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri



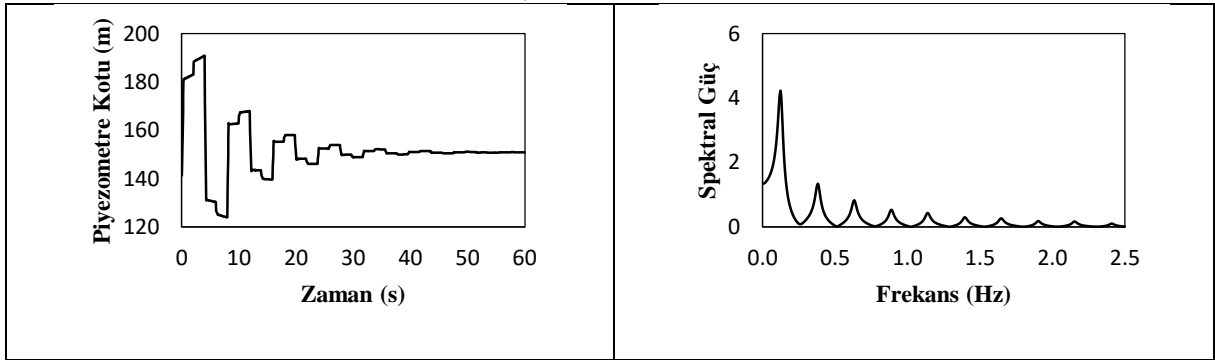
a) f002d5c03x50



b) f002d5c03x75

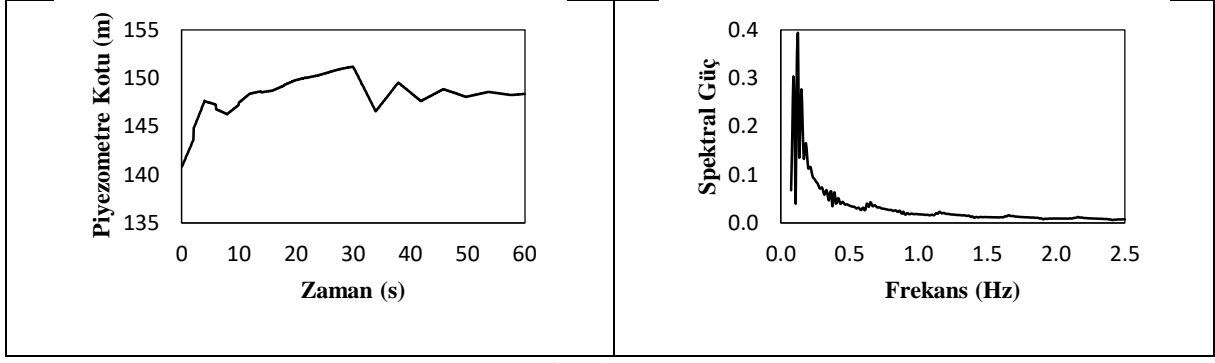


c) f002d10c03x75

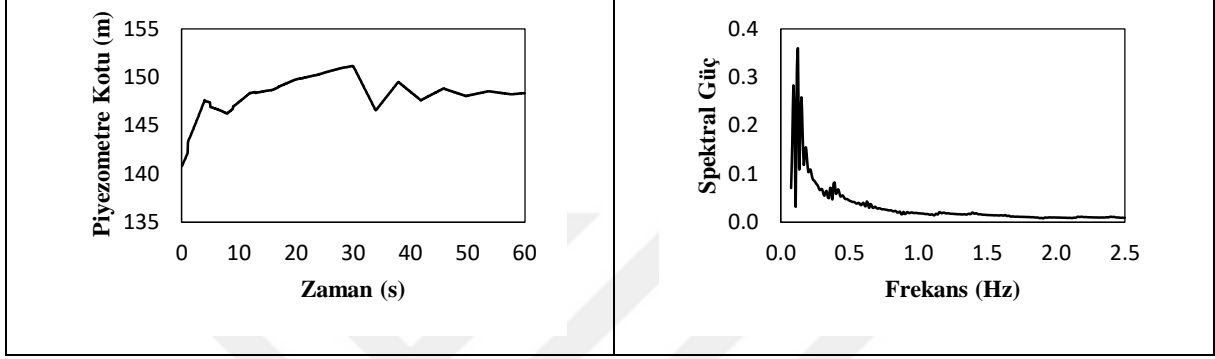


d) f002d10c03x50

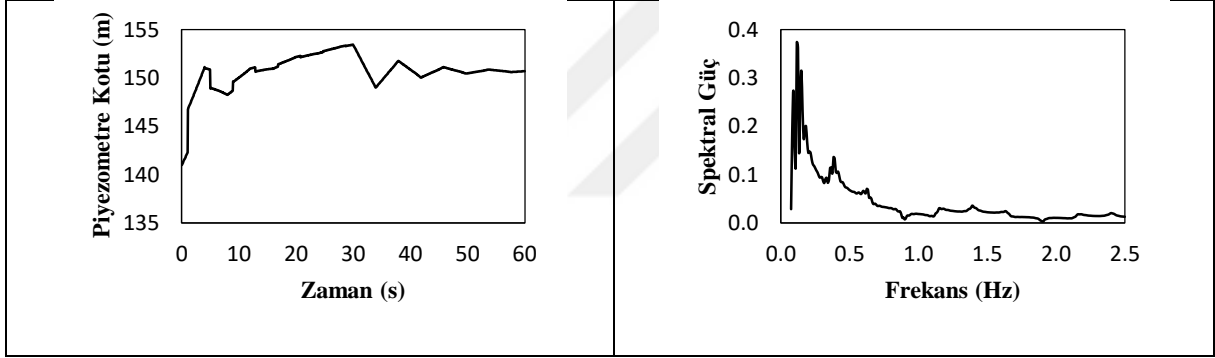
Şekil 4.5:  $f = 0,02$  ve  $T_c = 0,3$  s olan kaçaklı simülasyonlar için Piezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri



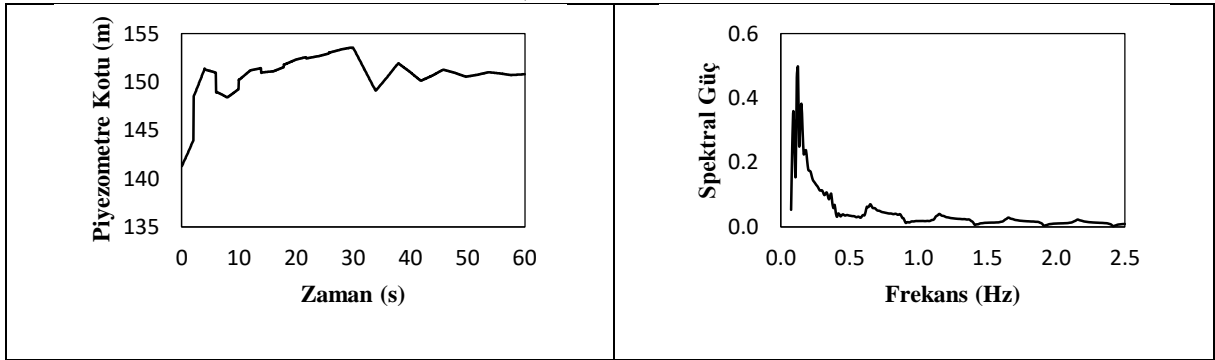
a) f002d5c30x50



b) f002d5c30x75



c) f002d10c30x75

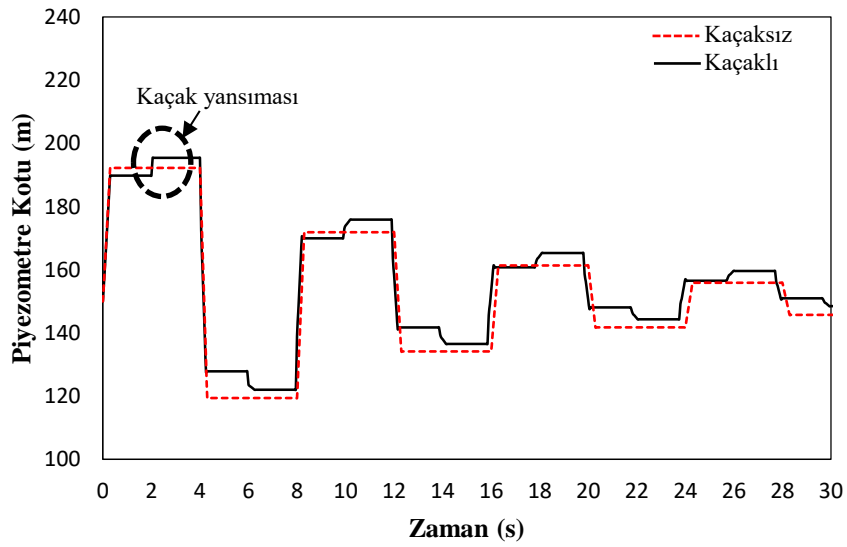


d) f002d10c30x50

Şekil 4.6:  $f = 0,02$  ve  $T_c = 30$  s olan kaçaklı simülasyonlar için Piezometre Kotu ve Spektral Güç değerleri

Kaçaksız ( $d = 0$ ) ve kaçaklı ( $d = 5$  veya  $d = 10$ ) olduğu durumların Piezometre kotu-Zaman grafikleri incelendiğinde, kaçaklı durumlarda basınç dalgası üzerinde bir dış (girinti veya çıkıntı) oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.7). Bunun nedeninin basınç dalgasının

kaçaksız durumda memba haznesinden yansımaya rağmen kaçaklı durumda kaçığın olduğu noktadan da küçük bir yansıma olmasıdır. Kaçak çapı arttıkça basınç dalgası daha fazla etkilendiği için dişin yüksekliği de artmaktadır. Kaçaklı ve kaçaksız durumlarda Spektral güç-Frekans grafikleri Şekil olarak birbirlerine benzeseler de güç değerleri arasında az da olsa bir fark gözlenmiştir. Kaçak çapı arttıkça hızlı kapanma durumunda maksimum güç değeri azalmakta, yavaş kapanma durumunda maksimum güç değerleri artmaktadır. Kaçak yerindeki farklılık ( $x = 975$  veya  $x = 1475$ ) ise Piyezometre kotu-Zaman grafiklerinde basınç dalgası üzerindeki dişin konumunu değiştirmektedir. Kaçak noktası vanaya ne kadar yakınsa yansıma da o kadar çabuk olacağı için diş daha önce oluşmaktadır. Spektral güç-Frekans grafiklerinde ise kaçak noktasının yeri vanadan uzaklaştıkça maksimum güç değerleri artmaktadır.



Şekil 4.7: Kaçaklı ve kaçaksız sistemlerin basınç dalgalarının karşılaştırılması

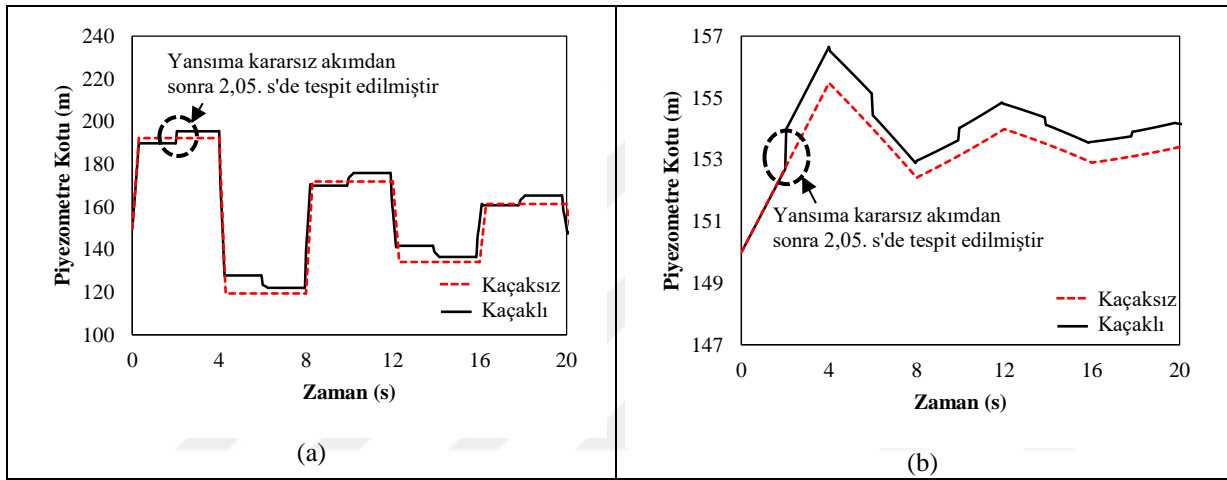
### 4.3 Simülasyonların Analizi

Bölüm 4.2’de verilen simülasyon sonuçları (Piyezometre kotu-Zaman, Spektral Güç-Frekans grafikleri) kaçak yerinin ve miktarının tespiti amacıyla analiz edilecektir.

#### 4.3.1 Kaçak Yerinin Zaman Alanında Tespiti

Kaçaklı ve kaçaksız simülasyonların Piyezometre kotu - Zaman grafikleri karşılaştırıldığında (Şekil 4.8), kaçaksız sistemlerde basınç dalgasının yalnızca haznedeki yansıma ile yön değiştirdiği görülmektedir. Ancak kaçaklı sistemlerde kaçak yerinden küçükte

olsa bir basınç dalgası yansıması olmaktadır. Bu durum basınç dalgasının üzerindeki bir çıkıntı (diş) şeklinde görülmektedir. Kaçak yerinin belirlenmesi için kaçaklı sistemin piyezometre kotundaki ani yükselmenin (dişin) olduğu zamanı bilmek yeterlidir. Su darbesinin başlangıcı ile piyezometre kotundaki diş arasındaki zaman farkı, basınç dalgasının vana ile kaçak noktası arasında gidip-gelme süresine eşittir. Örneğin Şekil 4.8’de verilen Piyezometre kotu – Zaman grafikleri, enerji kaybı ihmal edilen ( $f = 0$ ) ve çapı ( $d_L$ ) 10 mm olan bir kaçağın hızlı ve yavaş kapanma durumunda, aynı sistemlerin kaçaksız halleri ile farklarını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi her iki kapanma süresinde de basınç dalgasının kaçak noktasından yansıyarak vananın olduğu noktaya gelme süresi 2,05 saniye sürmektedir.

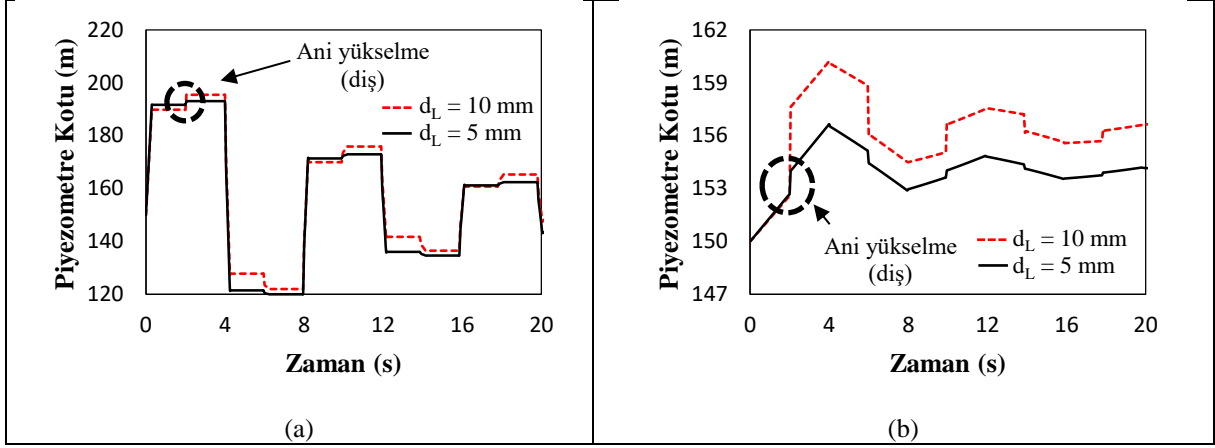


Şekil 4.8: Hızlı (a) ve yavaş (b) kapanan vanalar için zaman alanında kaçak yansıması

Basınç dalgası yayılma hızı ( $a$ ) 1000 m/s olduğuna göre, kaçağın vanaya olan uzaklığı,  $(L - x) = a * t_{yansima} / 2 = 1000 * 2,05 / 2 = 1025 m$ . Buna göre kaçak borunun mansap ucuna 1025 m, memba ucuna da 975 m uzaklıkta meydana gelmiştir.

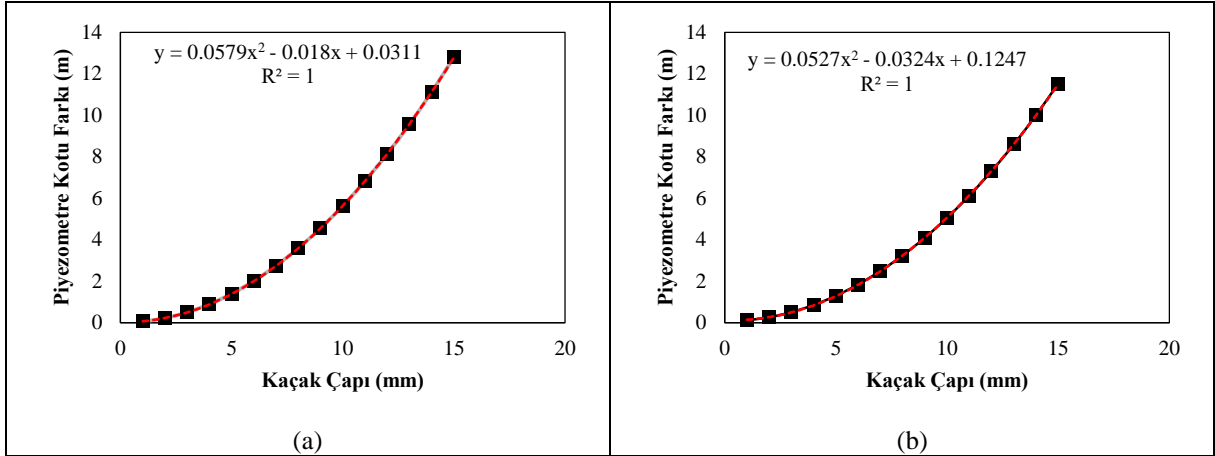
#### 4.3.2 Kaçak Miktarının Zaman Alanında Tespiti

Basınç dalgasının kaçak yerinden yansıması sonucu Piyezometre kotu – Zaman grafiğinde bir çıkıntı (diş) oluştuğu Bölüm 4.3.1’de belirtilmişti. Bu dişlerin yükseklikleri ile kaçak miktarı ve dolayısıyla kaçak çapı arasında bir ilişki olduğu görülmektedir (Şekil 4.9). Özellikle ilk dişin yüksekliği diğerlerinden daha fazla olduğu için dikkate alınacaktır. Kaçak çapı arttıkça piyezometre kotu farkı (diş yüksekliği) da artmaktadır.



Şekil 4.9: Hızlı (a) ve yavaş (b) kapanan vanalar için zaman alanında kaçak miktarı tespiti

Bir sistemde kaçak olduğu belirlendikten ve kaçak yeri Bölüm 4.3.1’de belirtilen şekilde tespit edildikten sonra, bu kaçak yeri için farklı kaçak çaplarındaki piyezometre kotu farkları çizdirilerek, ölçülen piyezometre kotu farkına karşılık gelen kaçak çapı tespit edilir. Örneğin, enerji kaybının ihmal edildiği ( $f = 0$ ) ve kaçak yerinin  $x = 975 m$  olduğu durumda, kaçak çaplarının ( $d_L$ )  $1 mm$  ile  $15 mm$  arasında değiştiği durumlar için, vananın hızlı ve yavaş kapanmasında, Kaçak çapı – Piyezometre kotu farkı grafikleri sırasıyla Şekil 4.10.a ve 4.10.b’de verilmiştir. Her iki grafikte de Kaçak çapı – Piyezometre kotu farkı arasındaki ilişkinin mükemmel bir şekilde parabolik olduğu görülmektedir.



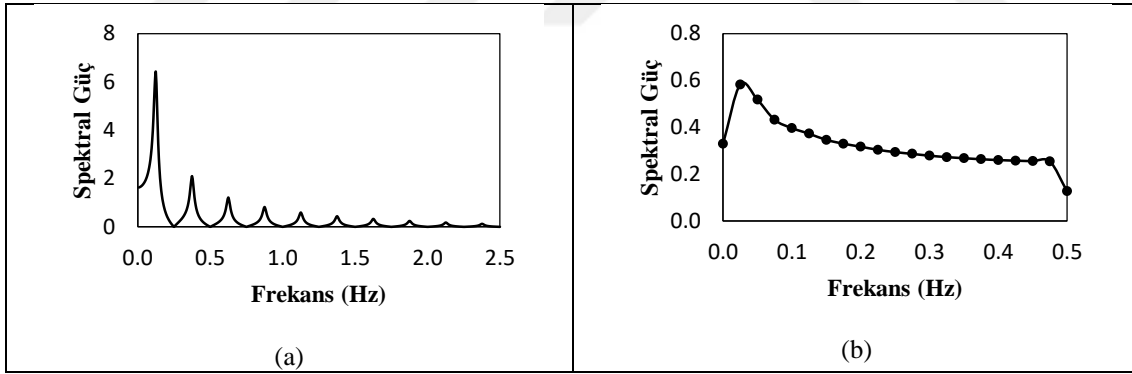
Şekil 4.10: Hızlı (a) ve yavaş (b) kapanan vanalar için zaman alanında kaçak çapı piyezometre kotu farkı ilişkisi

Vananın hızlı kapanması sonucu kaçaklı durumu gösteren Şekil 4.9.a’da ilk basınç dalgasındaki siyah çizgideki ani yükselmenin (Piyezometre Kotu Farkı)  $1,40 m$ , kırmızı çizgideki ani yükselmenin  $5,64 m$  olduğu görülmektedir. Şekil 4.10.a’da Piyezometre Kotu Farklarına karşılık gelen kaçak çapları,  $1,40 m$  için  $5 mm$  ve  $5,64 m$  için  $10 mm$  olarak

okunmuştur. Benzer şekilde vananın yavaş kapanması sonucu kaçaklı durumu gösteren Şekil 4.9.b'de ilk basınç dalgasındaki siyah çizgideki ani yükselmenin (Piyezometre Kotu Farkı) 1,30 m, kırmızı çizgideki ani yükselmenin 5,03 m olduğu görülmektedir. Şekil 4.10.b'de Piyezometre Kotu Farklarına karşılık gelen kaçak çapları 1,30 m için 5 mm ve 5,03 m için 10 mm olarak okunmuştur.

### 4.3.3 Kaçak Yerinin Frekans Alanında Tespiti

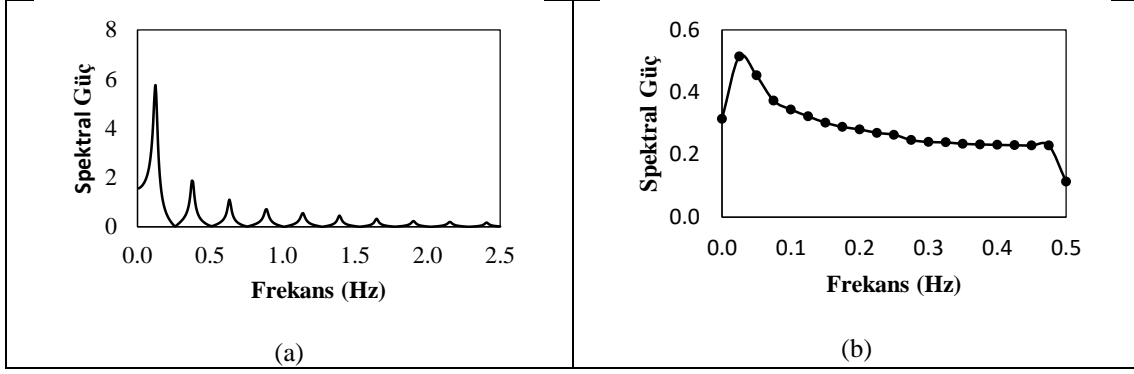
Kaçak yerinin ( $x$ ) frekans alanında tespitinde, Spektral Güç-Frekans grafiklerindeki en büyük güç değerleri (pikler) gözönüne alınmaktadır. Önce kaçaksız durumda elde edilen Spektral Güç-Frekans grafiğinin pik değerleri belirlenir, piklerin sırası değiştirilmeden sadece pik değerlerine bir kez daha Fourier dönüşümü uygulanır. Örneğin *f0c03* kodlu sistemin Spektral Güç-Frekans grafiği Şekil 4.11.a'da görülmektedir. Buradaki pik noktaları MATLAB'ın *findpeaks* komutu ile kolayca bulunabilmektedir. Söz konusu pik değerlerinin sırası değiştirilmeden MATLAB'ın *fft* komutu ile bir kez daha Fourier dönüşümü yapıldığında Şekil 4.11.b'deki Spektral Güç-Frekans grafiği elde edilir.



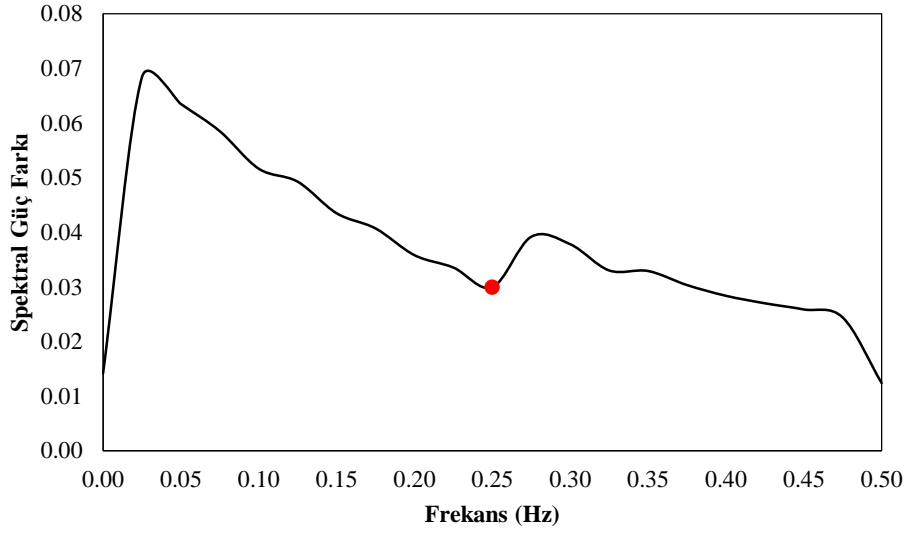
Şekil 4.11: *f0c03* kodlu sistem (a) ve piklerinin (b) Spektral Güç-Frekans grafikleri

Kaçaklı durum için de benzer işlemler tekrarlanır. Örneğin *f0d10c03x75* kodlu sistemin Spektral Güç-Frekans grafiği Şekil 4.12.a'da, elde edilen grafiğin pik değerlerinin bir kez daha Fourier dönüşümü yapıldığında bulunan Spektral Güç-Frekans grafiği Şekil 4.12.b'de verilmiştir.

4.11.b ve 4.12.b grafiklerinin pik noktalara karşılık gelen Spektral Güç değerleri arasındaki farklar alınır Şekil 4.13'teki grafik elde edilir. Bu grafikteki global minimumun yeri (Şekil 4.13'teki kırmızı nokta) kaçak yerine göre değişmektedir.



Şekil 4.12:  $f0d10c03x75$  kodlu sistem (a) ve piklerinin (b) Spektral Güç-Frekans grafikleri



Şekil 4.13:  $f0c03$  ve  $f0d10c03x75$  kodlu sistemlerin frekans alanındaki piklerinin farkları

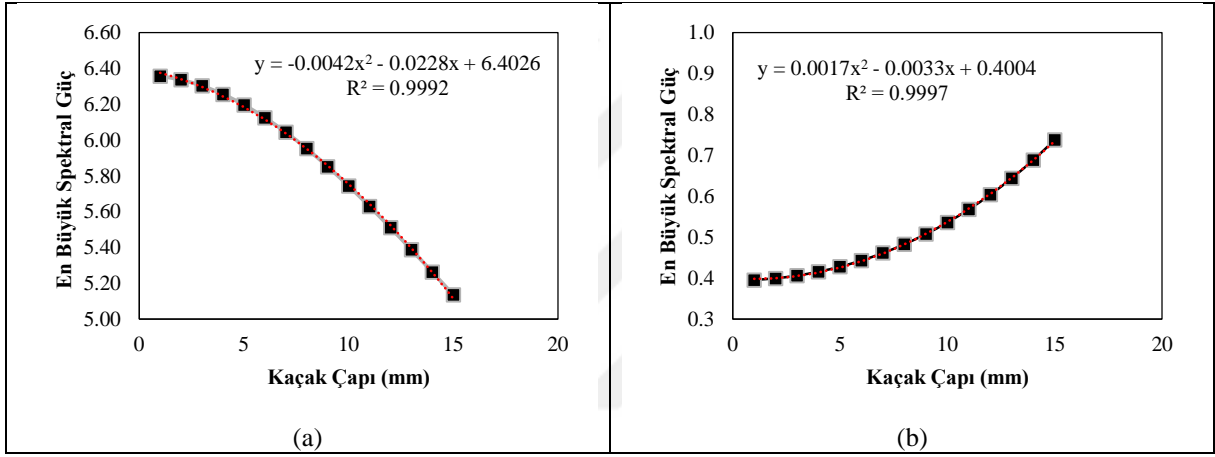
Grafikteki global minimuma karşılık gelen frekans değerinin 0,25 olması kaçak yerinin borunun ilk veya son çeyrek noktasında yani örnekteki 2000 m uzunluğundaki borunun 500 m veya 1500 m noktalarında olduğunu göstermektedir. Eğer kaçak yeri boru hattının tam orta noktasındaysa global minimum frekansı 0,5 olan nokta olmaktadır.

#### 4.3.4 Kaçak Miktarının Frekans Alanında Tespiti

Şekil 4.2 ile 4.6 arasındaki Spektral Güç-Frekans grafikleri incelendiğinde, kaçak miktarı ile en büyük spektral güç değerleri arasında bir ilişki olduğu görülmektedir. Hızlı kapanma durumunda (kodu c03 olanlar) kaçak çapı arttıkça en büyük spektral güç değerleri azalmaktadır. Tersine yavaş kapanma durumunda (kodu c30 olanlar) kaçak çapı arttıkça en büyük spektral güç değerleri artmaktadır. Enerji kayıplarının ihmal edildiği sistemlerde (kodu

$f_0$  olanlar) en büyük spektral güç ilk pik değeridir. Ancak sistemde enerji kaybı varsa (kodu  $f_{002}$  olanlar) bir eğilim (trend) oluşmaktadır. Eğilimin spektral güç grafiğindeki gösterimi düşük frekansta çok yüksek bir güç değeri şeklindedir, bu durumda ilk pik değeri eğilimi temsil ettiği için ikinci pik değeri esas alınmalıdır.

Örneğin, enerji kaybının ihmal edildiği ( $f = 0$ ) ve kaçak yerinin  $x = 1475 m$  olduğu durumda, kaçak çaplarının ( $d_L$ )  $1 mm$  ile  $15 mm$  arasındaki değerleri için, vananın hızlı ve yavaş kapanmasında, Kaçak Çapı-En Büyük Spektral Güç grafikleri sırasıyla Şekil 4.14.a ve 4.14.b'de verilmiştir. Her iki grafikte de Kaçak Çapı-En Büyük Spektral Güç arasındaki ilişkinin mükemmel bir şekilde parabolik olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14: Hızlı (a) ve yavaş (b) kapanan vanalar için frekans alanında kaçak miktarı tespiti

Vananın hızlı kapanması sonucu kaçaklı durumun Spektral Güç-Frekans grafiği olan Şekil 4.3.c'de En Büyük Spektral Güç değerinin 5,74 olduğu görülmektedir. Şekil 4.14.a'dan En Büyük Spektral Güç değeri 5,74 için Kaçak Çapı 10 mm olarak okunmaktadır. Benzer şekilde vananın yavaş kapanması sonucu kaçaklı durumun Spektral Güç-Frekans grafiği olan Şekil 4.4.c'den En Büyük Spektral Güç değerinin 0,54 olduğu görülmektedir. Şekil 4.14.b'den En Büyük Spektral Güç değeri 0,54'e karşılık Kaçak Çapı 10 mm olarak okunmaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kaçak yeri ve miktarının belirlenmesinde, basınç dalgasının zaman alanındaki değerlerini kullanmanın daha kolay olduğu görülmüştür. Çünkü zaman alanında kaçaksız ve kaçaklı durumlar arasındaki fark çok belirgindir ve basınç dalgası üzerindeki kaçaktan dolayı oluşan yansımanın etkisi, ani piyezometre kotu farkı değişimi olarak kendisini göstermektedir. Daha sonra bu yükselmenin yeri kullanılarak kaçağın yeri (Bölüm 4.3.2), yüksekliği kullanılarak da kaçağın miktarı (Bölüm 4.3.2) kolayca belirlenmektedir. Vananın manevra süresi ne kadar kısa ise (su darbesi ne kadar şiddetli ise) oluşan basınç dalgası ve bu dalga üzerindeki kaçak noktasından yansıma etkisi o kadar belirgin olmaktadır. Ancak vana kapanma süresinin kısalmasıyla su darbesi etkisiyle oluşan basınç değişimleri de artacağı için bu durumun boruya hasar verecek düzeye ulaşmaması gereklidir. Vana kapanma süresinin çok uzaması durumunda da basınç değişimleri az olmakta ancak bu sefer de kaçak noktasından oluşan yansımanın etkisinin basınç dalgası üzerinde tespit edilmesi zorlaşmaktadır.

Vananın tam olarak kapatılması su darbesini şiddetlendirmekte ve basınç dalgası değişimlerini daha belirgin yapmaktadır. Ancak, bu tez kapsamında önerilen yöntemin pratikte çalışan bir sistemde uygulanacağı düşünüldüğünde, sistemi durdurmamak için yarıya kadar kapanma yeterli görülmüştür. Vananın kapanmaya başlamasından itibaren su darbesi oluşmakta ve basınç dalgaları giderek sönümlenmektedir. Basınç değerlerinin kayıt süresi için 2 dakika (120 saniye) yeterli görülmüştür, çoğu durumda bu sürenin sonuna bile varmadan sönümlenme gerçekleşmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında sabit seviyeli iki hazne arasında oluşan akımda, mansap haznesi girişinde (borunun mansap ucunda) bulunan bir vananın, yarım kapanması sonucu oluşan su darbesinin, vananın hemen yanında bulunan bir basınçölçerde kaydedilen basınç dalgası değişimi değerlerinin, kaçaksız durumda aynı şekilde oluşturulan su darbesi sonucu kaydedilen basınç dalgası değişimleriyle karşılaştırılması yöntemi kullanılmıştır. Böylece eğer sistemin (borunun) herhangi bir noktasında kaçak varsa tespit edilebilmektedir. Kaçak yerinin tespitinde zaman alanında çalışmanın frekans alanından daha uygun olduğu belirlenmiştir. Çünkü frekans alanında ve özellikle yavaş kapanma durumunda, kaçak yerinin belirlenmesinde kullanılan piklerin farkı çok az olmakta ve belirlenmesi güçleşmektedir. Kaçak miktarının (kaçak çapının) tespitinde ise frekans alanında çalışmak zaman alanında çalışmaya göre daha uygun bulunmuştur. Çünkü zaman alanında kaçak miktarını belirleyebilmek için önce kaçak

yerinin bilinmesi gereklidir. Oysa frekans alanında kaçak yeri bilinmeden de kaçak miktarı tespit edilebilir.

Bu çalışma önerilen yönteme bir giriş niteliğinde olup; vananın ve basınçölçerin farklı yerlerde bulunması durumları araştırılabilir. Tez kapsamında borunun yalnızca bir noktasında kaçak olduğu varsayılmıştır. Kaçak noktalarının sayısının artması durumları ileriki çalışmalarda incelenebilir. Çalışma tek bir boru hattında değil, bir su dağıtım sisteminde (ağ şebekede) kaçak yerinin tespiti için geliştirilebilir.



## 6. KAYNAKLAR

Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Perez-Garcia, R., “Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images”, *J. Appl. Geophys.*, 75 (4), 679-686, (2011).

Babbitt, H. E., “The detection of leaks in underground pipes”, *Journal of AWWA*, 7, 589-595, (1920).

Bhuiyan, S., Hossain Alamgir, M., Alam, M. J., “A computational model of thermal monitoring at a leakage in pipelines”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 92, 330-338, (2016).

Brunone, B., Ferrante, M., “Detecting leaks in pressurized pipes by means of transients”, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR 39 (5), 539-547, (2001).

Chapra, S. C., *Applied Numerical Methods*, New York: McGraw-Hill Companies, 380-404, (2012).

Chaudhry, M. H., *Applied Hydraulic Transients*, New York: Van Nostrand Reinhold Company, (1979).

Chaudhry, M. H., *Applied Hydraulic Transients*, Third Edition, New York: Springer, (2014).

Chuanhu, G., Guizeng, W., Hao, Y., “Analysis of the smallest detectable leakage flow rate of negative pressure wave-based leak detection systems for liquid pipelines”, *Comput. Chem. Eng.*, 32, 1669-1680, (2008).

Colombo, A. F. Lee, P., Karney, B. W., “A selective review of transient-based leak detection methods”, *Journal of Hydro-environment Research*, 2, 212-227, (2009).

Covas, D., Ramos, H., Almeida, A. B., “Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 131 (12), 1106-1116, (2005).

Covas, D., Ramos, H., “Leakage Detection In Single Pipelines Using Pressure Wave Behavior”, *Proceedings of CCWI'99*, Exeter, UK, 287-299, (1999).

da Silva, H. V., Morooka Celso, K., Guilherme Ivan, R., Fonseca Tiago, C., Mendes Jose, R. P., “Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system”, *J. Petroleum Sci. Eng.*, 49, 223-238, (2005).

Frigo, M. and Johnson, S. G., “FFTW: An Adaptive Software Architecture for the FFT”, *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 3, 1381-1384, (1998).

Grabec, I., “Application of correlation techniques for localization of acoustic emission sources”, *Ultrasonics*, 16 (3), 111-115, (1978).

Gromeka, S., “Concerning the Propagation Velocity of Waterhammer Waves in Elastic Pipes”, *Scientific Soc. of Univ. of Kazan, Kazan*, (1883).

Hu, J., Zhang, L., Liang, W., “Detection of small leakage from long transportation pipeline with complex noise”, *J. Loss Prev. Process Industries*, 24, 449-457, (2011).

Huang, Sh., Lin, W., Tsai, M., Chen, M., “Fiber optic in line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks”, *Sensors Actuators, A* 135, 570-579, (2007).

Jaeger, C., *Fluid Transients*, Glasgow and London: Blackie and Son Limited, (1977).

Joukowski, N., “Über den hydraulischen Stoß in Wasserleitungsröhren.” [About hydraulic hammer in water pipes], Mem. Imperial Academy Soc. of St. Petersburg, USSR, (1898).

Jönsson, L., “Experimental Studies of Leak Detection using Hydraulic Transients”, *29<sup>th</sup> IAHR Congress Proceedings*, Beijing, China, 16-21, (2001).

Jönsson, L., “Computer and laboratory studies of leak detection using hydraulic transients”, (ed: N. T. Tsiourtis), *Water Resources Management Under Drought or Water Shortage Conditions*, Balkema, Rotterdam, 119-126, (1995).

Jönsson, L., Larson, M., “Leak detection through hydraulic transient analysis”, (eds: B. Coulbeck and E. Evans), *Pipeline Systems*, Kluwer Academic Publishers, 273-286, (1992).

Kadi, AL T., Tuwajri, AL Z., Omran, AL A., “Wireless sensor networks for leakage detection in underground pipelines: a survey paper”, *Procedia Comput. Sci.*, 21, 491-498, (2013).

Kapelan, Z. S., Savic, D. A., Walters, G. A., “Incorporation of prior information on parameters in inverse transient analysis for leak detection and roughness calibration”, *Urban Water Journal*, 129-143, (2004).

Kapelan, Z. S., Savic, D. A., Walters, G. A., “A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks”, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR 41 (5), 481-492, (2003).

Kapelan, Z. S., Savic, D. A., Walters, G. A., “Optimal sampling design for calibration of transient network models using multi-objective gas”, (eds: Cabrera and Jr. Cabrera), *Pumps, Electromechanical devices and Systems Applied to Urban Water Management*, Valencia, Spain, (2003).

Kapelan, Z. S., Savic, D. A., Walters, G. A., “Hybrid GA for calibration of water distribution models”, *Proc. EWRI*, Roanoke, VA, (2002).

Kim, S., “Inverse Transient Analysis for a branched pipeline system with leakage and blockage using impedance method”, *Procedia Eng.*, 89, 1350-1357, (2014).

Kurmer, J. P., Kingsley, S. A., Laudo, J. S., Kark, S. J., “Distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection”, *Distributed Multiplexed Fiber Opt. Sensors, Proc. SPIE*, 1586, 117-128, (1991).

Lai, W., Chang, R., Sham, J., Pang, K., “Perturbation mapping of water leak in buried water pipes via laboratory validation experiments with high-frequency ground penetrating radar (GPR), *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 52, 157-167, (2016).

Larock, B. E., Jeppson, R. W., Watters, G. Z., *Hydraulics of Pipeline Systems*, Florida: CRC Press LLC, 274-364, (2000).

Lee, P. J., “Using system response functions of liquid pipelines for leak and blockage detection”, PhD Thesis, *The University of Adelaide*, Adelaide, (2005).

Lee, J. P., Vitkovsky, P. J., Lambert F. M., Simpson R. A., Liggett, A. J., “Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 131 (7), 596-604, (2005).

Lee, J. P., Vitkovsky, P. J., Lambert F. M., Simpson R. A., Liggett, A. J., “Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study”, *J. Sound Vib.*, 284, 1051-1073, (2005).

Lee, J. P., Lambert F. M., Simpson R. A., Vitkovsky, P. J., “Experimental verification of the frequency response method of leak detection”, *Journal of Hydraulic Research*, 44 (5), 451-468, (2006).

Lei, X. G., Kai-lin, Y., Fu-tian, L. I., Tao, W., Hui, F., “Analysis of first transient pressure oscillation for leak detection in a single pipeline”, *J. Hydrodynamics*, 24 (3), 363-370, (2012).

Liggett, A. J., Chen, L. C., “Inverse transient analysis in pipe networks”, *J. Hydraulic Eng.*, 120 (8), 934-955, (1994).

Mansour, R. Ben, Habib, M. A., Khalifa, A., Toumi Youcef, K., Chatzigeorgiou, D., “Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction”, *Comput. Fluids*, 57, 110-123, (2012).

Michaud, J., “Coups de bélier dans les conduites. Étude des moyens employés pour en atténuer les effets”, *Bulletin de la Société Vaudoise des Ingénieurs et des Architectes*, Lausanne, Switzerland, 56-64, (1878).

Misiunas, D., Vitkovsky, J., Olsson, G., Simpson, A. R., Lambert, M., “Pipeline burst detection and location using a continuous monitoring technique”, *CCWI*, Imperial College London, UK, (2003).

Misiunas, D., Vitkovsky, J. P., Olsson, G., Simpson, A. R., Lambert, M. F., “Burst Detection and Location in Pipe Networks using a Continuous Monitoring Technique. The Practical Application of Surge Analysis for Design and Operation”, *International conference on pressure surges*, Chester, UK, 225-237, (2004).

Misiunas, D., Vitkovsky, J. P., Olsson, G., Simpson, A. R., Lambert, M. F., “Pipeline break detection using pressure transient monitoring”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 131 (4), 316-325, (2005).

Monge, G., “Graphical Integration”, *Ann. des Ing. Sortis des Ecoles de Gand*, (1789).

Mpesha, W., Gassman, S. L., Chaudhry, M. H., “Leak detection in pipes by frequency response method”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 127 (2), 134-147, (2001).

Murphy, L. J., Simpson, A. R., Dandy, G. C., “Design of a network using genetic algorithms”, *Water*, 20, 40-42, (1993).

Nash, G. A., Karney, B. W., “Efficient inverse transient analysis in series pipe systems”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 125 (7), 761-764, (1999).

Ozevin, D., Harding, J., “Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity”, *Int. J. Press. Vessels Pip.*, 92, 63-69, (2012).

Ozevin, D., “Geometry based acoustic source location for spaced frames”, *Int. J. Struct. Health Monit.*, 10 (5), 503-510, (2011).

Papadopoulou, K. A., Shamout, M. N., Lennox, B., Mackay, D., Taylor, A. R., Turner, J. T., Wang, X., “An evaluation of acoustic reflectometry for leakage and blockage detection”, *IMechE*, 222, 959-966, (2008).

Parmakian, J., *Waterhammer Analysis*, New York: Dover Publications Inc., (1963).

Pickford, J., *Analysis of Surge*, London: MacMillan and Co. Ltd., (1969).

Pudar, R. S., Liggett, J. A., “Leaks in pipe networks”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 118 (7), 1031-1046, (1992).

Sarkar, Sh., Datta, Sh., “A review on different pipeline fault detection methods”, *J. Loss Prev. Process Industries*, 41, 97-106, (2016).

Silva, R., Buiatta, C., Cruz, S., Pereira, J., “Pressure wave behavior and leak detection in pipelines”, *Computers and Chemical Engineering*, 20, S491-S496, (1996).

Simpson, A. R., Dandy, G. C., Murphy, L. J., “Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization”, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 120 (4), 423-443, (1994).

Sun, Liang, Chang, Ning, “Integrated-signal-based leak location method for liquid pipelines”, *J. Loss Prev. Process Industries*, 32, 311-318, (2014).

Sun, Z., Akyildiz, I. F., “Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks”, *IEEE Trans. Antenna Propag.*, 58 (7), 2426-2435, (2010).

Sun, Z., Wang, P., Vuran, M. C., Al-Rodhaan, M. A., Al-Dhehaan, M. A., Akyildiz, I. F., “MISE-PIPE: magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring”, *Ad Hoc Netw.*, 9, 218-227, (2011).

Trincherro, D., Stefanelli, R., “Microwave architectures for wireless mobile monitoring networks inside water distribution conduits”, *Micr. Theory Tech. IEEE*, 12, 3298-3306, (2009).

Vitkovsky, J. P., Stephens, M., Bergant, A., Simpson, A. R., Lambert, M. F., “Numerical error in weighting function-based unsteady friction models for pipe transients”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 132 (7), 709-721, (2006).

Vitkovsky, J. P., Liggett, J. A., Simpson, A. R., Lambert, M. F., “Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 129 (6), 480-491, (2003).

Vitkovsky, J. P., Lee, P. J., Stephens, M. L., Lambert, M. F., Simpson, A. R., Liggett, J. A., “Leak and blockage detection in pipelines via an impulse response method”, (eds: E. Cabrera and E. Jr. Cabrera), *Pumps, Electromechanical devices and Systems Applied to Urban Water Management*, Valencia, Spain, 423-430, (2003).

Vitkovsky, J. P., Simpson, A. R., Lambert, M. F., “Minimization Algorithms and Experimental Inverse Transient Leak Detection”, *EWRI*, Roanoke, VA, (2002).

Vitkovsky, J. P., “Inverse transient analysis and modeling of unsteady pipe flow: theory, applications and experimental verification”, PhD Thesis, *The University of Adelaide*, Adelaide, (2001).

Vitkovsky, P. J., Simpson, R. A., Lambert, F. M., “Leak detection and calibration using transients and Genetic Algorithms”, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 126, 262-265, (2000).

Young, T., “Hydraulic Investigations”, *Phil. Trans.*, Royal Society, London, 164-186, (1808).

Wang, X. J., Lambert, M. F., Simpson, A. R., Liggett, J. A., Vitkovsky, J. P., “Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 128 (7), 697-711, (2002).

Wylie, E. B. and Streeter, V. L., *Fluid Transients*, New York: McGraw-Hill International Book Company, (1978).

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : MANSURALI TURANBAEV  
Doğum Yeri ve Tarihi : KIRGIZİSTAN / 10.09.1993  
Lisans Üniversite : PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
Elektronik posta : m.ali.turan1009@gmail.com  
İletişim Adresi : 0553 081 06 93