



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

KAPANMA HALİNDEKİ HİDROLİK KAPAKLarda
HİDRODİNAMİK YÜKLER

2003 - 97

PROJE NO : 199I017 (İNTAG-831)

İnsaat ve Çevre Teknolojileri Araştırma Grubu
Construction and Environmental Technologies
Research Grant Committee

**KAPANMA HALİNDEKİ HİDROLİK KAPAKLarda
HİDRODİNAMİK YÜKLER**

2003 - 97

PROJE NO : 199I017 (İNTAG-831)

**İSMAİL AYDIN
ONUR DÜNDAR
İLKER T. TELÇİ**

**ŞUBAT 2003
ANKARA**

ÖNSÖZ

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik laboratuvarında 1980 li yıllarda bu yana gerçekleştirilen, hidrolik kapak model çalışmalarında karşılaşılan bazı sorunlara çözüm üretmek ve laboratuvarımızın araştırma yeteneklerini artırmak amacıyla başlatılan bir çalışma, zaman içinde genişleyerek bu proje ile sonuçlandırılmıştır. Başlangıçta, deneysel verilerin daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla hareket edilmiş, ulaşılan bu sonuçta ise, laboratuvar deneyleri öncesinde, tasarımcının da kullanabileceği bir bilimsel araç elde edilmiştir. Bu araştırma projesi, ODTÜ araştırma fonu tarafından AFP-99.03.03.05 kod nolu proje ile ve TÜBİTAK tarafından INTAG-831 kod nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar TÜBİTAK ve ODTÜ'ye, sağladıkları mali destek için müteşekkirdir.

Model inşaasında emeği ile katkıda bulunan Hidrolik laboratuvarı personeline, elektronik hareket-kontrol ve veri toplama sisteminin kurulmasında, bilgi ve becerileri ile sorunların çözümüne katkı sağlayan, Sn. Elektrik Y. Müh. Okan Demirel ve TDG Ltd. grubuna teşekkür ederim.

Bu proje başlatıldığında, henüz araştımanın deneysel programını yürütecek proje ekibi oluşmamıştı. İlk deneyler, Hidrolik laboratuvarı Araştırma Görevlilerinin gönüllü katkılarıyla gerçekleştirılmıştır. Daha sonra, yüksek lisans tezlerini proje kapsamından seçen Araştırma Görevlileri Onur Dündar ve İlker T. Telci araştırma ekibine katılmışlardır. İlker ve Onur, sabah erken saatlerden başlayıp gece geç saatlerde tamamlanabilecek, uzun deney programlarını, yaklaşık üç yıl boyunca, eksilmeyen kararlılık ve özenle gerçekleştirmiştir. Bu araştımanın başarı ile sonuçlanmasında özverili katkılarından dolayı Onur ve İlker'e teşekkür ederim.

Doç. Dr. İsmail Aydin

Proje yöneticisi

İÇİNDEKİLER

Kapak sayfası	
Önsöz	i
İçindekiler	ii
Tablolar listesi	v
Figürler listesi	vi
Fotoğraflar listesi	ix
Semboller listesi	x
Öz	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Problemin tanımı	1
1.2 Hidrolik ve matematik modelleme	2
1.3 Literatür araştırması	3
1.4 Çalışmanın amaç ve kapsamı	4
2. HİDROLİK MODEL VE SABİT KAPAK DENEYLERİ	5
2.1 Kapsamlı hidrolik model	5
2.2 Modelleme yaklaşımı	9
2.2.1 Kapak tam açık konumunda yük kayıp katsayıları (Deney A.1)	9
2.2.2 Kapak kısmi açık konumunda yük kayıp katsayıları (Deney A.2)	10
2.3 Üst-akım	17
2.3.1 Üst-akım hidrolik modeli ve deneyler	19
2.3.2 Üst-akım modeli	19
2.3.3 Üst-akım kayıp katsayıları (Deney A.3)	22
2.3.4 Üst-akım menba basıncı düzeltmesi (Deney A.4)	22
2.4 Kapağın kısmi açıklıklarında sistem debisi	25
2.4.1 Türbin kontrolünde sistem debisi	25
2.4.2 Kapak kontrolünde sistem debisi	26
2.5 Havalandırma bacasında debi ölçümü (Deney A.5)	26

3. MATEMATİK MODEL	30
3.1 Kapanmakta olan kapağın neden olduğu zamana bağımlı akım	30
3.1.1 Alik bölümünde zamana bağımlı akım	30
3.1.2 Cebri boru bölgesinde zamana bağımlı akım	31
3.1.3 Havalandırma bacاسında zamana bağımlı akım	32
3.2 Denklemlerin boyutsuzlaştırılması ve önemli boyutsuz parametreler	33
3.3 Denklemlerin sayısal çözümü	35
4. KAPANMA SIRASINDA HAVA DEBİSİ DENEYLERİ	36
4.1 Elektronik veri toplama sistemi	36
4.2 Kapak hareket kontrol sistemi	36
4.3 Hava debisi deneyleri	36
4.3.1 Elektronik basınç dönüştürücü kalibrasyonu	36
4.3.2 Deney değişkenleri	39
4.3.3 Deneylerde takip edilen adımlar	40
4.4 Hesaplanan ve ölçülen değerlerin zamanda değişimi (Deney B.1)	41
4.5 Hava ihtiyacı	48
4.5.1 En büyük sızma açıklığında hava ihtiyacı (Deney B.2)	48
4.5.2 Azalan sızma açıklığında hava ihtiyacı (Deney B.3)	48
4.5.3 Ölçülen ve hesaplanan hava ihtiyacı verileri arasında bağlılığı (Deney B.4)	50
5. KAPAK ALT-DUDAK BASINÇ ÖLÇÜMLERİ	59
5.1 Kapak detayları	59
5.2 Basınç ölçümü	59
5.2.1 Basınç ölçümünde takip edilen adımlar	62
5.2.2 Veri işleme	64
5.2.3 Ölçülen debi ve piyezometrik yük'lere uygulanan düzeltmeler	64
5.3 Alt-dudak aşağı-çekme kuvvetleri	65
5.3.1 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı tanımı	66
5.3.2 Alt-dudakta basınç dağılımları (Deney C.1)	66
5.3.3 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı – Reynolds sayısı ilişkisi	67

5.3.4 Kapak açıklığı ve alt-dudak açısının fonksiyonu olarak aşağı-çekme kuvvet katsayısı (Deney C.2)	75
5.3.5 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı, literatür verileri ile karşılaştırma	77
5.3.6 Aşağı-çekme kuvveti hesaplamaları	77
5.4 Basınç kayıtları spektral analizleri	79
6. HİDRODİNAMİK KUVVET ÖLÇÜMLERİ	93
6.1 Kuvvet ölçüm yöntemi	93
6.2 Kuvvet ölçüm düzeneği	93
6.3 Sabit kapak aşağı-çekme kuvveti ölçümleri (Deney D.1)	94
6.4 Kapanma halindeki kapak aşağı-çekme kuvveti ölçümleri (Deney D.2)	98
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	112
8. REFERANSLAR	115
9. EKLER	118
10. PROJE ÖZET BİLGİ FORMU	

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 5.1 Kapak dudak açıları

59

FİGÜRLER LİSTESİ

Figür 2.1	Kapsamlı model şematik görünüm.	7
Figür 2.2	Kapak bölgesi detayları.	8
Figür 2.3	Kapak açık konumunda piyezometrik ölçümler.	11
Figür 2.4	Kuyruksuyu ölçümleri.	11
Figür 2.5	Kesit daralma katsayısı.	15
Figür 2.6	Kapak bölgesi hidrolik yük kayıp katsayısı.	15
Figür 2.7	Havalandırma bacاسında su seviyeleri.	16
Figür 2.8	Cebri boruda hidrolik yük kayıp katsayısı.	18
Figür 2.9	Üst-akım deney düzeneği.	20
Figür 2.10	Ölçülen ve hesaplanan üst-akım debileri arasında bağlılık.	23
Figür 2.11	Kapak yuvasında su seviyesi, ölçülen ve hesaplanan değerler arasında bağlılık.	23
Figür 2.12	Kapak bölgesinde akım çizgileri	24
Figür 2.13	Kapak mansap yüzünde durgunluk fonksiyonu	24
Figür 2.14	Ölçülen ve hesaplanan sistem debileri	27
Figür 2.15	Hava bacası girişi yük kayıp katsayısı deney düzeneği	29
Figür 2.16	Hava bacası girişi yük kayıp katsayısı	29
Figür 4.1	Elektronik hareket kontrol ve veri toplama sistemi şeması	37
Figür 4.2	Hava debisi filtresiz ve filitrelenmiş kayıtları	42
Figür 4.3	Hesaplanan ve ölçülen hava debileri ($Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s}$)	43
Figür 4.4	Hesaplanan ve ölçülen hava debileri ($Q_m=0.040 \text{ m}^3/\text{s}$)	44
Figür 4.5	Kapak arkasında basınçlar ($Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s}$)	46
Figür 4.6	Kapak arkasında basınçlar ($Q_m=0.040 \text{ m}^3/\text{s}$)	47
Figür 4.7	Hava ihtiyacı oranları ($a_{um}=0.0088 \text{ m}, a_{dm}=0.0105 \text{ m}$)	49
Figür 4.8	Hava ihtiyacı oranları ($Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s}, H_r=0.162$)	51
Figür 4.9	Hava ihtiyacı oranları ($Q_m=0.040 \text{ m}^3/\text{s}, H_r=0.023$)	54
Figür 4.10	Hesaplanan ve ölçülen hava ihtiyacı arasında bağlılık	57

Figür 5.1	Kapak detayları	60
Figür 5.2	Güç yoğunluğu dağılımı	63
Figür 5.3	Alt-dudakta basınç dağılımları, Dudak A	68
Figür 5.4	Alt-dudakta basınç dağılımları, Dudak B	69
Figür 5.5	Alt-dudakta basınç dağılımları, Dudak C	70
Figür 5.6	Alt-dudakta basınç dağılımları, Dudak D	71
Figür 5.7	Aşağı-çekme kuvvet katsayısı- R_g ilişkisi, $y = 0.1$	73
Figür 5.8	Aşağı-çekme kuvvet katsayısı- R_g ilişkisi, $y = 0.2$	73
Figür 5.9	Aşağı-çekme kuvvet katsayısı- R_g ilişkisi, $y = 0.4$	74
Figür 5.10	Aşağı-çekme kuvvet katsayısı- R_g ilişkisi, $y = 0.6$	74
Figür 5.11	Aşağı-çekme kuvvet katsayısı- R_g ilişkisi, $y = 0.8$	75
Figür 5.12	Aşağı-çekme kuvvet katsayısı, K_L	77
Figür 5.13	Aşağı-çekme kuvvet katsayısı, K_B , karşılaştırması	79
Figür 5.14	Matematik modelden hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri ($\theta = 45^0$, $T_c = 10$ s, $a_{um} = 0.01$ m, $Q_m = 0.120$ m ³ /s)	81
Figür 5.15	Matematik modelden hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri ($\theta = 45^0$, $T_c = 10$ s, $a_{um} = 0.01$ m, $Q_m = 0.090$ m ³ /s)	81
Figür 5.16	Matematik modelden hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri ($\theta = 45^0$, $T_c = 10$ s, $a_{um} = 0.01$ m, $Q_m = 0.070$ m ³ /s)	82
Figür 5.17	Matematik modelden hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri ($\theta = 45^0$, $T_c = 10$ s, $a_{um} = 0.01$ m, $Q_m = 0.050$ m ³ /s)	82
Figür 5.18	Ölçülmüş ve bağlantı tüpü etkisi için düzeltilmiş basınç kayıtları	85
Figür 5.19	Ölçülmüş ve düzeltilmiş basınçların spektral analizleri	86
Figür 5.20	Basınç salınım yoğunluğu	87
Figür 5.21	Güç yoğunluğu dağılımları, Dudak A	89
Figür 5.22	Güç yoğunluğu dağılımları, Dudak B	90
Figür 5.23	Güç yoğunluğu dağılımları, Dudak C	91
Figür 5.24	Güç yoğunluğu dağılımları, Dudak D	92
Figür 6.1	Kapak yuvasında su seviyeleri ($a_{um} = 0.0088$ m, $a_{ud} = 0.0105$ m, $\alpha_u = 4$, $\alpha_d = 10$)	95

Figür 6.2	Kapak yuvasında su seviyeleri ($a_{um} = 0.0088 \text{ m}$, $a_{ud} = 0.0042 \text{ m}$, $\alpha_u = 4$, $\alpha_d = 1$)	96
Figür 6.3	Kapak yuvasında su seviyeleri ($a_{um} = 0.0088 \text{ m}$, $a_{ud} = 0.0028 \text{ m}$, $\alpha_u = 4$, $\alpha_d = 1$)	97
Figür 6.4	Kapak sabit konumda hidrodinamik kuvvet ölçümleri ($\theta = 44.7^\circ$, $a_{um} = 0.0088 \text{ m}$, $a_{dm} = 0.0105 \text{ m}$, $\alpha_u = 4$, $\alpha_d = 10$)	99
Figür 6.5	Kapak sabit konumda hidrodinamik kuvvet ölçümleri ($\theta = 44.7^\circ$, $a_{um} = 0.0088 \text{ m}$, $a_{dm} = 0.0042 \text{ m}$, $\alpha_u = 4$, $\alpha_d = 1$)	100
Figür 6.6	Kapak sabit konumda hidrodinamik kuvvet ölçümleri ($\theta = 44.7^\circ$, $a_{um} = 0.0088 \text{ m}$, $a_{dm} = 0.0028 \text{ m}$, $\alpha_u = 4$, $\alpha_d = 1$)	101
Figür 6.7	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0105 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=10$, $Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s}$)	102
Figür 6.8	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0105 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=10$, $Q_m=0.072 \text{ m}^3/\text{s}$)	103
Figür 6.9	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0105 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=10$, $Q_m=0.051 \text{ m}^3/\text{s}$)	104
Figür 6.10	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0042 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=1$, $Q_m=0.119 \text{ m}^3/\text{s}$)	105
Figür 6.11	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0042 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=1$, $Q_m=0.074 \text{ m}^3/\text{s}$)	106
Figür 6.12	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0042 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=1$, $Q_m=0.050 \text{ m}^3/\text{s}$)	107
Figür 6.13	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0028 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=1$, $Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s}$)	108
Figür 6.14	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0028 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=1$, $Q_m=0.075 \text{ m}^3/\text{s}$)	109
Figür 6.15	Hareketli kapakta hidrodinamik yükler ($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0.0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0.0028 \text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=1$, $Q_m=0.052 \text{ m}^3/\text{s}$)	110

FOTOĞRAFLAR LİSTESİ

Foto 2.1	Kapsamlı modelden görünümler.	6
Foto 4.1	Elektrik motoru, zincir-dişli sistemi.	38
Foto 5.1	Basınç ölçümünde kullanılan kapak.	61
Foto 5.2	Kapak dudağında akım çizgileri.	72

SEMBOLLER LİSTESİ

A	kesit alan
a_d	mansap yüzü sızma açıklığı
a_{dm}	mansap yüzü minimum sızma açıklığı
A_c	daralmış kesit alanı
A_g	kapak dudak altı aktif kesit alanı
A_h	kapağın yatay düzlemde projeksiyon alanı
A_p	cebri boru kesit alanı
A_s	havalandırma bacası kesit alanı
A_t	kapak bölgesi (tunnel) kesit alanı
a_u	menba yüzü sızma açıklığı
a_{um}	menba yüzü minimum sızma açıklığı
c_c	kesit daralma katsayısı
e	kapak açıklığı
e_0	kapak bölgesi tunnel kesit yüksekliği
f	Darcy sürtünme katsayısı
F_d	kapakta (düşey yönde etkiyen) toplam aşağı-çekme kuvveti
F_{dL}	kapak dudağında etkiyen aşağı-çekme kuvveti
F_{dT}	kapak tepe yüzünde etkiyen aşağı-çekme kuvveti
f_s	durgunluk fonksiyonu
F_{rc}	daralmış kesitte Froude sayısı
g	yerçekimi ivmesi
H	toplam hidrolik yük
H_c	daralmış kesitte toplam hidrolik yük
h_c	düzeltilmiş piyezometrik yük
H_{cg}	kapak-altı akımın daralmış kesitteki toplam hidrolik yükü
H_{co}	üst-akımın daralmış kesitte toplam hidrolik yükü
H_d	üst-akım mansap çıkışında toplam yük
h_e	ölçülen piyezometrik yük
\bar{h}_L	kapak dudağında ortalama piyezometrik yük

H_m	cebri boruda kapak tam açıkken (maksimum) toplam yük
H_r	boyutsuz dinamik yük
H_s	havalandırma bacası çıkışında toplam yük
H_u	üst-akım menba girişinde toplam yük
H_1	rezervuar su yüzü yüksekliği
H_{1e}	ölçülen rezervuar su yüzü yüksekliği
h_2	kapak yuvasında su seviyesi
h_3	havalandırma bacasında su seviyesi
H_4	kuyruk-suyu seviyesi
K_B	aşağı-çekme kuvvet katsayısı (Naudascher, 1991)
K_d	kısmi kapak açıklıkları için cebri boruda yük kayıp katsayısı
K_{d1}	kapak tam açıkken cebri boru yük kayıp katsayısı
K_e	alık bölgesi yük kayıp katsayısı
K_{es}	havalandırma bacası giriş kayıp katsayısı
K_g	kısmi açıklıklarda kapak bölgesi yük kayıp katsayısı
K_{g1}	kapak tam açıkken kapak bölgesi yük kayıp katsayısı
K_j	hidrolik sıçrama yük kayıp katsayısı
K_L	aşağı-çekme kuvvet katsayısı
K_{od}	üst-akım mansap yüzü yük kayıp katsayısı
K_{ou}	üst-akım menba yüzü yük kayıp katsayısı
L_a	havalandırma bacasında hava dolu kısmın boyu
l_s	kapağın, kapak yuvası içinde kalan kısmının boyu
L_w	havalandırma bacasında su dolu kısmın boyu
P_a	havalandırma bacasında su yüzeyinde etkiyen hava basıncı
P_s	havalandırma bacası çıkışında basınç
Q	debi
Q_a	hava ihtiyacı
Q_c	düzeltilmiş sistem debisi
Q_e	ölçülen sistem debisi
Q_g	kapak-altı debisi
Q_l	alıkta debi
Q_m	maksimum (başlangıç) debi
Q_o	üst-akım debisi

Q_p	cebri boruda debi
Q_s	havalandırma bacاسında debi
R_h	hidrolik çap
R_g	kapak-altı aktif kesitte Reynolds sayısı
R_p	cebri boruda Reynolds sayısı
R_s	havalandırma bacاسında Reynolds sayısı
R_t	kapak bölgesi tünel kesitte Reynolds sayısı
s	kapak dudağında eğimli mesafe
S_l	alık bölgesi incelik katsayısı
S_p	cebri boru incelik katsayısı
S_w	cebri boru da su dolu kısmın incelik katsayısı
t	zaman
T_c	kapak kapatma süresi
T_r	boyutsuz kapatma süresi
U	ortalama hız
U_c	daralmış kesitte ortalama hız
U_d	üst-akım mansap yüzü ortalama hız
U_g	kapak-altı akım ortalama hız
U_p	cebri boruda ortalama hız
U_s	havalandırma bacاسında ortalama hız
U_{stg}	durgunluk hızı
U_t	tünel kesitte ortalama hız
U_u	üst-akım menba yüzü ortalama hız
w	tünel genişliği
x	eksenel mesafe
y	boyutsuz kapak açıklığı (e/e_0)
z	yükseklik yükü
\bar{z}_{gL}	kapak dudağı eğimli yüzeyin orta yüksekliği
\bar{z}_{gT}	kapak tepe yüzü orta yüksekliği
z_w	cebri boru su dolu kısmı orta yüksekliği
α_d	üst-akım mansap yüzü yük kayıp düzeltme katsayısı
α_u	üst-akım menba yüzü yük kayıp düzeltme katsayısı

θ	dudak açısı
ρ	yoğunluk
ν	kinematik vizkozite
γ_a	havanın özgül ağırlığı
γ_w	suyun özgül ağırlığı
γ_s	havalandırma bacasındaki akişkanın özgül ağırlığı
Δh_d	cebri boruda toplam yük kaybı
Δh_e	alıkta yük kaybı
Δh_{es}	havalandırma bacasında giriş yük kaybı
Δh_j	hidrolik sıçramada yük kaybı
Δh_g	kapak bölgesinde yük kaybı
Δh_{g1}	kapak bölgesinde kapak tam açıkken yük kaybı
Δh_o	üst-akım yük kaybı
Δh_{od}	üst-akım mansap yüzü yük kaybı
Δh_{ou}	üst-akım menba yüzü yük kaybı
Δt	sayısal çözümde zaman adımı
∇	hacim
∇_p	cebri borunun hacmi
∇_w	cebri borunun su dolu kısmının hacmi

ÖZ

Kapanma halindeki hidrolik kapaklarda etkiyen hidrodinamik yükler, hidrolik modeller üzerinde deneysel olarak incelenmiş ve deneylerden elde edilen veriler değerlendirilerek bir matematik model geliştirilmiştir. Alik-cebri boru arasında konumlandırılmış bir kapağın, kapanması sırasında neden olduğu zamana bağımlı akım, tek boyutlu integral enerji ve integral süreklilik denklemlerinin birlikte sayısal çözümü yoluyla modellenmiştir. Matematik model, hidrolik modelden elde edilen yük kayıp katsayılarından faydalananarak, zamana bağımlı akım için, sistem içindeki piyezometre hattını, kapak altından ve üstünden geçen su debilerini ve havalandırma bacasından gelen hava debisini hesaplamaktadır. Kapak üzerinden aşan üst-akım debisine bağlı olarak, kapak yuvasındaki su seviyesi ve havalandırma bacasından gelen hava debisine bağlı olarak, kapak mansabındaki basınç düşmesi hesaplanabilmektedir. Kapak dudağında yapılan basınç dağılımı ölçümllerinden, aşağı-çekme kuvvet katsayısı tanımlanmış ve dudak açısı ile kapak açıklığının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Aşağı-çekme kuvvet katsayısı ve kapak bölgesinde hesaplanan basınçlardan kapak alt-dudağındaki basınç yükü, kapak yuvası içindeki su seviyesinden kapak üst yüzeyindeki basınç yükü zamana bağımlı olarak elde edilmektedir. Böylece, hareket halindeki kapakta etkiyen hidrodinamik yük, kapak açıklığının fonksiyonu olarak hesaplanabilmektedir. Matematik modelden hesaplanan hava debisi ve hidrodinamik yükler, doğrudan ölçümllerle karşılaştırılmıştır. Geliştirilen bilgisayar programı prototip ölçekte de koşturulabileceğinden, tasarım aşamasında da kullanılabilecektir.

1. GİRİŞ

1.1 Problemin tanımı

Dikdörtgen kesitli düz kapaklar, hidroelektrik santrallerde, türbinlerin su alma yapılarında, genellikle yüksek hidrolik yük altında, akım kontrol ve acil kapatma amacıyla kullanılırlar. Bu tür kapakların inşaası ve bakım-onarımı, diğer turlere oranla daha ucuz ve kolaydır. Ancak, özellikle hızlı kapatma durumlarında, kapak etrafındaki zamana bağımlı değişken akım koşulları, kapağın kapanmasını engelleyebilecek yukarı kaldırma (uplift) veya taşıyıcı sistemi zorlayacak büyülükte aşağı çekme kuvvetleri (downpull) oluşturabilir. Bu kuvvetlerin yön ve büyülüğu zaman boyutunda hızla değişebildiği için, kapak ve çevresinde hasara neden olabilecek titreşimler yaratabilirler. Hidrodinamik kuvvetlerin oluşumu ve büyülüğu, kapak, kapak yuvası ve çevresinin geometrik tasarımını, havalandırma olanakları, kapak üzerindeki hidrolik yük, kapanma hızı ve cebri borunun büyülüğu gibi değişkenlere bağlıdır.

Yuvası içinde düşey düzlemde dik olarak konumlandırılmış bir kapak üzerinde, düşey yöndeki hidrodinamik yük, temel olarak kapağın üst ve alt yüzeylerine etkiyen basınç kuvvetlerinin farkı olarak tanımlanabilir. Üst yüzeydeki basınç, kapak yuvasındaki su seviyesi (üstten boneli kapaklarda piyezometre seviyesi) ile orantılıdır. Kapak yuvasındaki su seviyesi ise, sızdırmazlığın, kapağın menba ya da mansap yüzeylerinin hangisinden sağlandığına ve kapak çevresindeki boşluklara bağlıdır. Ayrıca, kapatma işlemi sırasında kapak yüzeyleri ile kapak yuvası yüzeyleri arasındaki sızdırma aralığı da kapanma hareketi boyunca değişebilir. Kapağın alt dudağındaki basınç dağılımı ise akım hızlarına, menba ve mansaptaki basınçlara ve önemli ölçüde alt-dudak geometrisine bağımlıdır. Kapağın mansap yüzündeki basınç, havalandırma bacasından sağlanan hava debisi ile ilişkilidir. Sonuç olarak, zamana bağımlı hidrodinamik yüklerin hesaplanabilmesi için tüm sistem parametreleri arasındaki ilişkiyi açıklayan bir matematik model gereklidir.

1.2 Hidrolik ve matematik modelleme

Hidroelektrik santrallerde, akım kontrol amacıyla çok sayıda hidrolik kapak kullanılmaktadır. Özellikle cebri boru girişlerinde bulunan kapakların tasarım ve işletme koşulları, bir yapıdan diğerine önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Her yapının kendine özgü sınır koşulları, farklı büyüklükleri ve farklı teknolojik seçenekler, tasarımcı tarafından çok iyi değerlendirilmesi gereken ayrıntılardır. Önceki uygulamalardan elde edilen bilgi birikimi yol gösterici olmakla birlikte, her yeni uygulama yeni bazı soru ve sorunları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, yatırım maliyeti yüksek olan hidrolik yapılar için, hidrolik (fiziki) modeller üzerinde deney ve ölçümlerin yapılması yaygın bir uygulamadır. Değişkenlerin bir kısmı hidrolik model üzerinde doğrudan ölçülebilir ve hidrolik benzeşim kurallarından faydalananarak, prototip değerlerine dönüştürülebilir. Bu bağlamda bazı sınırlamalar vardır.

- a) Her fiziki parametrenin model üzerinde doğrudan ölçümü mümkün değildir.
- b) Prototip yapıda var olan etken ve olayların bazıları modelde yeterince gözlenemez veya tamamen olmayabilir. Buna ölçek etkisi de denir.
- c) Bir kez inşa edilen bir modelin her parametresini değiştirmek mümkün olmayabilir, yapılması gereken değişiklik, modeli yeniden inşa etmeye eşdeğer olabilir.
- d) Her proje için yeterli detay ve kapsamda model inşa etmek ve deney yapmak zaman, mekan ve ekonomik açılarından mümkün olmayabilir.

Deneysel elde edilen sonuçların basit, empirik formüller halinde genelleştirilmesi ise, tasarım parametrelerinin çokluğu ve parametreler-arası ilişkinin çoğunlukla doğrusal olmaması nedeniyle, her zaman geçerli bir yol değildir. Sonuçta, hidrolik modellerden elde edilen bilgilerin değerlendirilmesi ve yorumlanmasında, parametreler arasındaki ilişkiyi kuran, matematiksel bir modele ihtiyaç vardır. Ayrıca, matematik model, tasarım aşamasında, alternatiflerin karşılaştırılmasında ve tasarıımı eniyileştirme işleminde kullanılabilecektir. Uzun

vadede ise, hidrolik ve matematik modeller karşılıklı, biri diğerine girdi sağlayan ve böylece her iki yaklaşımın da faydasını ve güvenilirliğini artıran bir sonuç doğuracaktır.

1.3 Literatür araştırması

Hidrolik kapaklar üzerinde oluşabilecek hidrodinamik yükler, genellikle hidrolik modeller üzerinde incelenmiştir. Çok az sayıda prototip ölçümleri mevcuttur (Frizzell 1988). Hidrolik modellerden ölçülen verilerin, boyutsuz parametreler kullanılarak ifade edildiği grafikler, tasarım aşamasında, muhtemel hidrodinamik yükleri elde etmek için kullanılır (Naudascher 1986, 1991). Bu amaçla empirik denklemler de önerilmiştir (Naudascher 1991). Literatürdeki deneysel verilerin hamen tamamı, kapağın sabit konumlarında (zamandan bağımsız akım koşullarında) elde edilmiştir (Naudascher 1991). Kapağın hareketli olduğu durumda, kapanma hızının akıma ve dolayısıyla hidrodinamik yüklerle etkisi yeterince incelenmemiştir (de Vries 1988). Kapanma sırasında oluşan hava debisi ihtiyacı konusunda birçok deneysel çalışma yapılmış (Falvey 1968, Fuentes and Garcia 1984, Jaramillo and Villegas 1988, Rabben and Rouve 1984, Sharma 1976) ancak matematik model kullanarak hava debisi hesaplama yöntemi sadece Falvey 1980 de önerilmiştir. Bu son çalışmada, havalandırma bacası içinden boşalan su için momentum denklemi çözülmüş fakat sistemin diğer komponentleri ile ilişkilendirilmemiştir. Kapağın sabit konumlarında oluşabilen hava ihtiyacı, Orhon 1989 da deneylerle ve momentum denkleminin tek boyutlu sayısal çözümü ile çalışılmıştır. Hidrolik model çalışmalarında dikkate alınması gereken ölçek etkileri Naudascher 1984 te tartışılmıştır.

ODTÜ Hidromekanik laboratuvarında gerçekleştirilen Birecik barajı model çalışmalarında (Göğüş ve diğerleri 1994) ve daha sonra akademik amaçlarla sürdürülən hava debisi ihtiyacının modellenmesi (Aydın 2002) çalışmasında, hareketsiz ve hareketli kapak için sistemin davranışının, tasarıma bağlı olarak, çok farklı olabileceği gözlenmiştir. Her iki durum (hareketli ve hareketsiz) için, kapak ve diğer yapı elemanları üzerindeki hidrodinamik yüklerin hesaplanmasıında kullanılabilecek, akım denklemlerinin çözümünü içeren matematiksel bir model mevcut değildir.

1.4 Çalışmanın amaç ve kapsamı

Bu çalışmada, hidrolik kapakların tasarımında ve model çalışmalarında, kapanma halindeki kapaklar için hidrodinamik yüklerin sayısal çözümleme yoluyla hesaplanması olanak veren bir matematik modelin geliştirilmesi ve deneysel verilerle kalibrasyonu amaçlanmıştır. Amaçlanan matematik modelin oluşturulmasında izlenecek yol ve çalışma başlıklarını aşağıda sıralanmıştır.

- a) Kapak üzerindeki ölçümlerin yapılmacı, kapsamlı bir hidrolik model inşaası ve hidrolik yük kayıp katsayılarının bulunması.
- b) Kısmi açıklıklarda kapak üstünden geçen üst-akım debisinin hesaplanabilmesi için üst-akım hidrolik modeli inşaası, deneyleri ve model oluşturulması.
- c) Basınç ve kuvvetlerin elektronik ölçümu için gerekli elektronik altyapı ve bilgisayar yazılımlarının hazırlanması.
- d) Ölçümlerden elde edilen verilerle, matematik model oluşturulması ve modelin deneysel verilerle sınalanması.
- e) Deneysel verilerin yeterli olmadığı durumda, akım alanının RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemlerinin sayısal çözümünden elde edilerek matematik modelin iyileştirilmesi.

Raporun takip eden bölümlerde, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve matematik modelleme çalışmalarıyla ilgili bulgular sunulacaktır.

2. HİDROLİK MODEL VE SABİT KAPAK DENEYLERİ

2.1 Kapsamlı hidrolik model

Kapanmakta olan kapağın, sistem debisini azaltan etkisi sonucu oluşan, zamana bağımlı akım koşullarının çalışılabilmesi amacıyla, tipik bir türbin giriş yapısı ve cebri boru sistemi, hidrolik model olarak inşa edilmiştir. Hidrolik modelin genel görünümü Foto 2.1'de ve detayları Figür 2.1'de ölçeksiz olarak gösterilmiştir. Deney düzeneğinin büyülüğu hakkında fikir vermesi bakımından bazı kesit boyutları figür üzerinde verilmiştir. Model, menbadan başlayarak sırasıyla, rezervuar, giriş yapısı (alık), dikdörtgen kesitli kapak bölgesi (kesit-2), havalandırma bacası (kesit-3), dikdörtgenden daireye geçiş, dairesel cebri boru, türbini temsilen debi kontrol vanası ve kuyruksuyu seviyesinin ölçüldüğü kanal girişinden oluşmaktadır. Modelin gözlem ve ölçüm yapılan bölümleri saydam, plexiglass malzemeden yapılmıştır. Kapak bölgesi detayları Figür 2.2'de gösterilmiştir.

Modelde, H_1 rezervuar su seviyesini, h_2 kapak yuvası içindeki su seviyesini, h_3 havalandırma bacası içindeki su seviyesini ve H_4 kuyruksuyu seviyesini göstermektedir. Tünel kesit yüksekliği e_0 ile (Figür 2.2), kapak açıklığı e ile gösterilmiştir. Rezervuardan kapağa kadar olan bölüm alık olarak adlandırılmış, kapağın yakın çevresi kapak bölgesi ve kapak ile türbin vanası arasındaki hacim ise cebri boru olarak adlandırılmıştır.

Laboratuvarın yükseltilmiş tanklarından alınan su, önce model rezervuarına dolmakta ve deney sisteminden geçtikten sonra bir debi ölçüm kanalına yönlendirilmektedir. Model rezervuarının yan duvarlarından birine yerleştirilen bir yan savak yardımıyla, rezervuar içinde su seviyesi sabitlenmektedir. Sistemden geçmesi arzu edilen debi miktarının ayarlanması için, türbin yerine konulan vanadan faydalananır. Debi ölçüm kanalında, çalışılan debi büyüğüğe bağlı olarak, keskin kenarlı, dikdörtgen veya üçgen kesitli savaklar kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deney ve ölçümle ilgili sayısal veriler 9. Ekler bölümünde tablolar halinde verilmiştir.

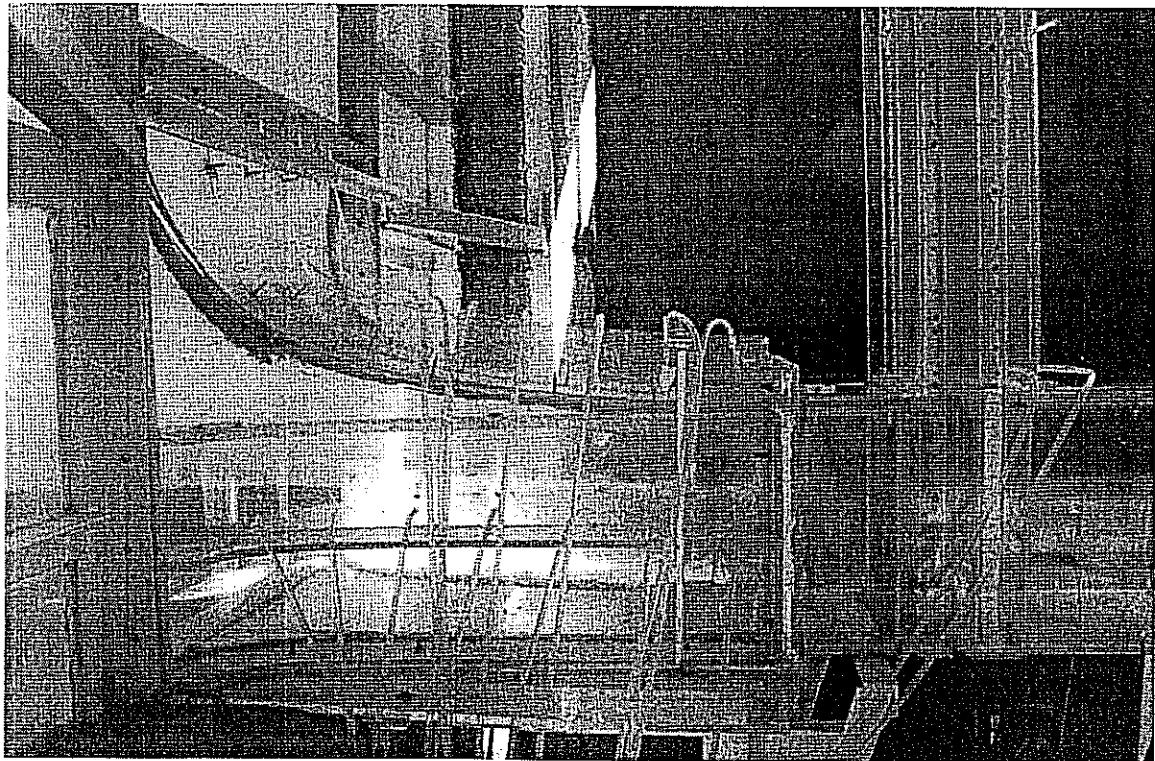
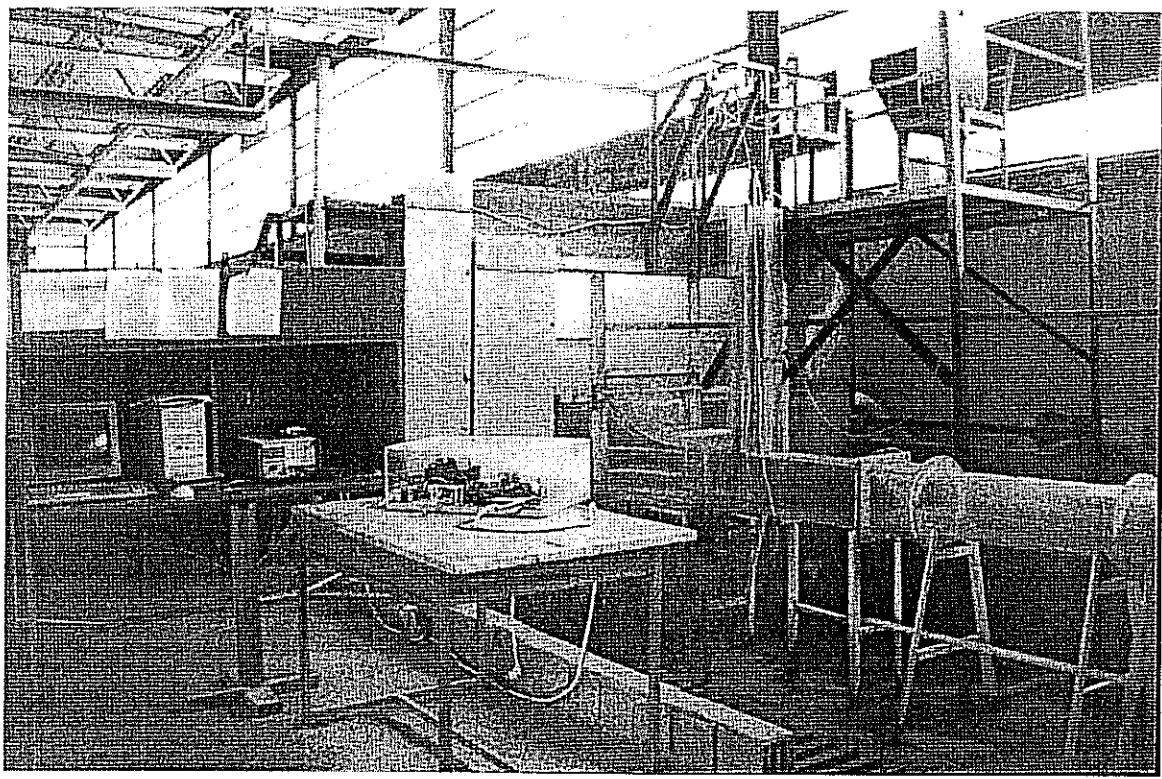
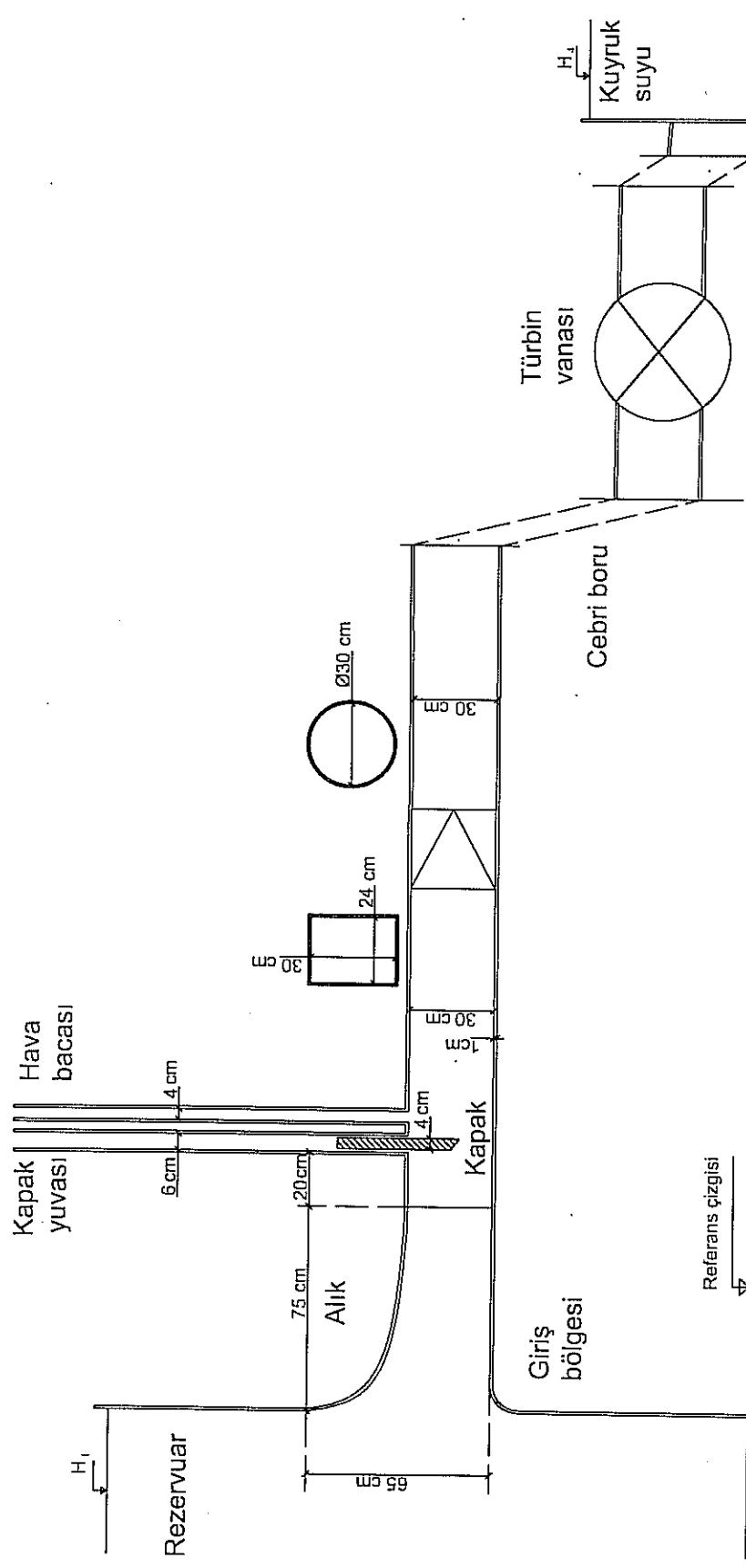
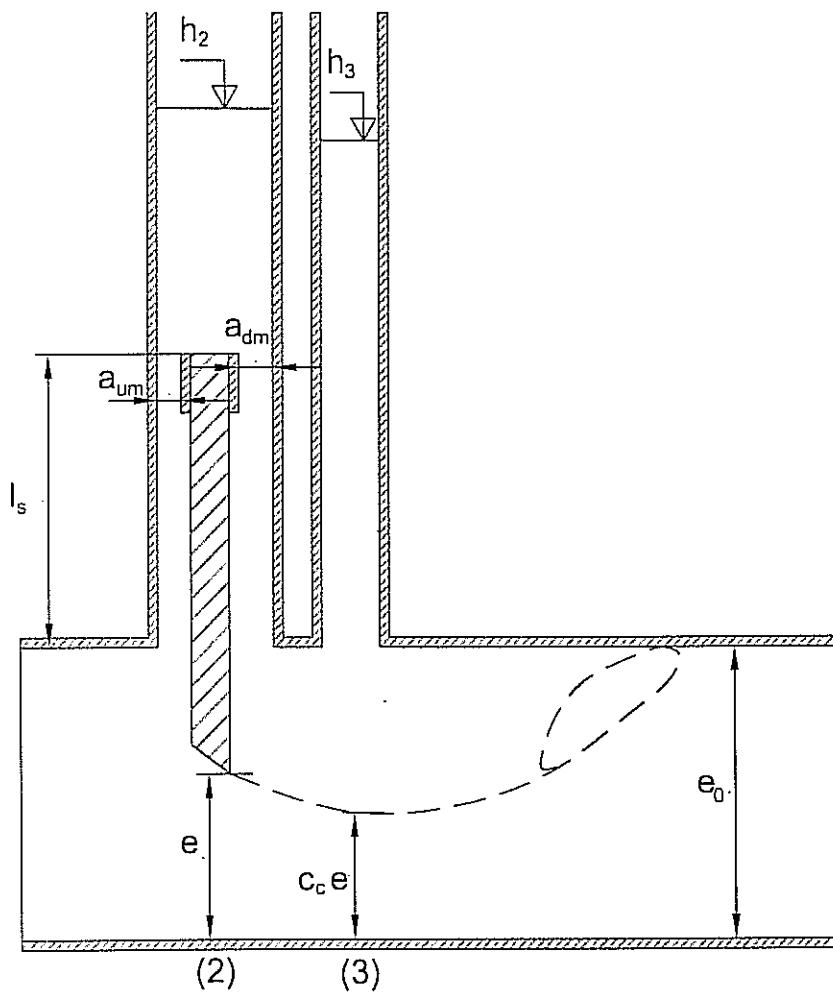


Foto 2.1 Kapsamlı modelden görünümler.



Figür 2.1 Kapsamlı model şematik görünüm



Figür 2.2 Kapak bölgesi detayları

2.2 Modelleme yaklaşımı

Alik-cebri boru sistemindeki akım, özellikle kapak bölgesinde, üç boyutlu, türbülanslı bir akımdır. Kapağın belirli bir konumundan sonra, sisteme hava girdiğinden, iki akışkanlı akımın farklı oluşumlarını gözlelemek mümkündür. Kapanma sırasında, akımın zamana bağlı olduğu da dikkate alınırsa, karmaşık ve çok sayıda vortex oluşumu içeren, türbülanslı bir akım problemi söz konusudur. Kapak bölgesinde oluşan akım koşullarını görüntüleyen bir fotoğraf serisi Ekler bölümünde sunulmuştur. Bu tür karmaşık bir akım probleminin, tüm sistem için üç boyutlu RANS denklemelerinin bir türbülans modeli eşliğinde sayısal çözümü ile çalışılması oldukça pahalı olacaktır. Böyle bir çözümde, türbülans modeli dışında, iki akışkanın oluşturduğu farklı akım türlerinin modellenmesi de gerekecektir. Ayrıca, bu tür bir yaklaşım, akademik amaçlar dışında, mühendislik uygulamaları için çoğunlukla gerekli de değildir. Tasarımcı mühendis açısından bilinmesi gereken, çoğu zaman, belirli kesitlerdeki ortalama değerlerdir. Nadiren, değişkenlerin noktasal değerleri önemli olabilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada entegre edilmiş tek boyutlu enerji denklemi ile süreklilik denklemi matematik modelin özünü oluşturacaktır. Enerji denkleminin sistem boyunca uygulanabilmesi için, yapının belirli bölgelerinde oluşan hidrolik yük kayiplarının hesaplanabilmesi gereklidir.

2.2.1 Kapak tam açık konumunda yük kayıp katsayıları (Deney A.1)

Rezervuardan başlayarak kuyruksuyuna kadar enerji denklemi yazıldığında, yük kayipları üç terim içinde toplanabilir.

$$H_1 - \Delta h_e - \Delta h_{g1} - \Delta h_{d1} = H_4 \quad (2.1)$$

burada Δh_e alıkta yük kaybını, Δh_{g1} kapak bölgesinde (yan duvarlardaki yönlendirici tekerlek yuvalarında oluşan çevrintiler nedeniyle) yük kaybını ve Δh_{d1} cebri borudaki yük kaybını ifade eder. Yük kayiplarının piyezometrik yükseklikler cinsinden tanımları ve kayıp katsayıları ile ifade edilmesi gereklidir.

$$\Delta h_e = H_1 - \left(h_2 + \frac{U_t^2}{2g} \right) = K_e \frac{U_t^2}{2g} \quad (2.2)$$

$$\Delta h_{g1} = h_2 - h_3 = K_{g1} \frac{U_t^2}{2g} \quad (2.3)$$

$$\Delta h_{d1} = H_1 - \Delta h_e - \Delta h_{g1} - H_4 = K_{d1} \frac{U_p^2}{2g} \quad (2.4)$$

burada U_t kapak bölgesinde dikdörtgen tünel kesiti içinde ortalama hız, K_e giriş yük kayıp katsayısı, K_{g1} (kapak tam açıkken) kapak bölgesinde yük kayıp katsayısı, K_{d1} (kapak tam açıkken) cebri boru yük kayıp katsayısı ve U_p cebri boruda ortalama hızdır. Yük kayıp katsayılarının hesaplanması için debi ve su seviyeleri, h_2 , h_3 , ve H_4 kapsamlı modelden ölçülür. Debi değeri, ölçüm kanalındaki savaktan, su seviyeleri plastik hortumlar yardımıyla, rezervuar duvarına monte edilmiş cam manometre tüplerinden okunur. Bu deneylerdeki bağımsız değişken debi olup türbin vanasından ayarlanır. Ölçümler sırasında rezervuar su seviyesi, rezervuar içindeki yan savak kotunda ($H_1=2.3$ m) sabitlenir. Deney verileri Figürler 2.3 ve 2.4' te gösterilmiştir. Figürler üzerinde, ölçülen su seviyelerini sistem debisine bağlı olarak ifade eden fonksiyonlar da yazılmıştır. Denklemler (2.2) ve (2.3) kullanılarak ve denysel ölçümlerden faydalananarak, alık ve kapak bölgesi için kayıp katsayıları bulunur.

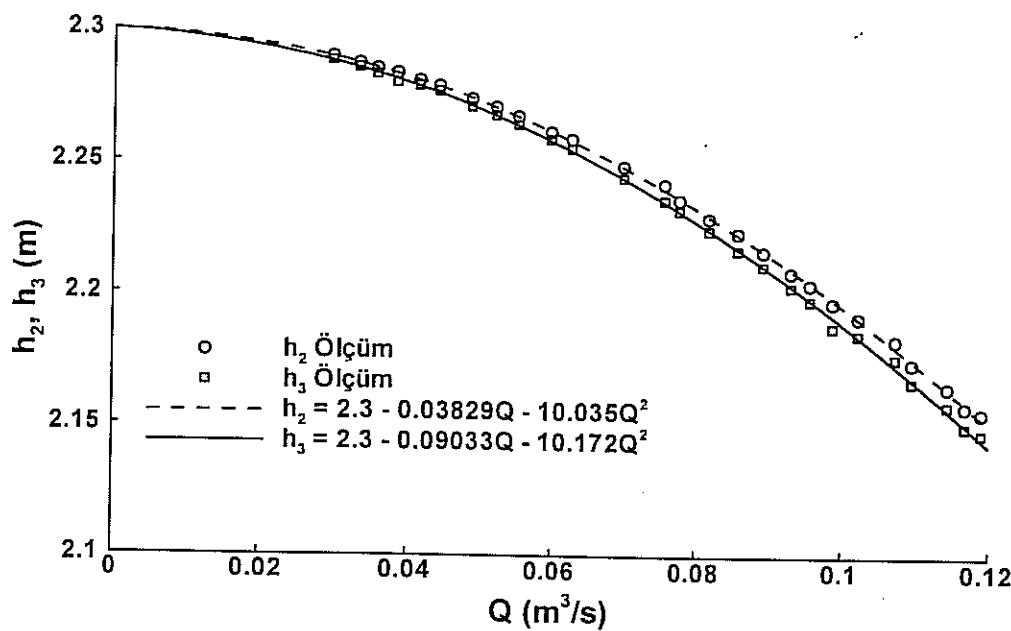
$$K_e = 0.0207 + \frac{12879}{R_t} \quad (2.5)$$

$$K_{g1} = 0.0139 + \frac{17503}{R_t} \quad (2.6)$$

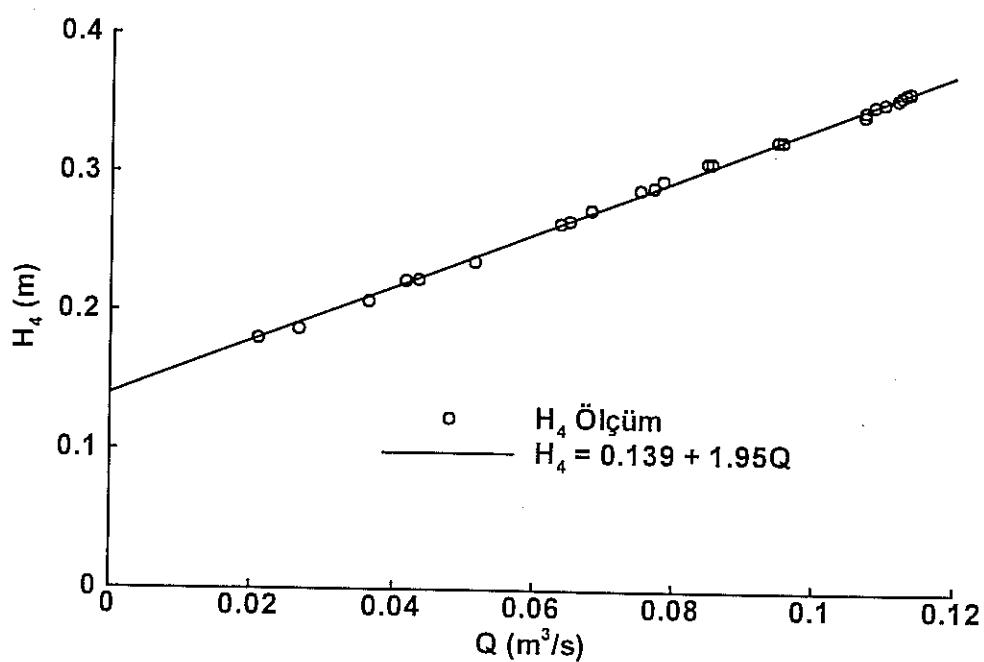
burada R_t ($=D_h U_t / v$) kapak bölgesinde tanımlı Reynolds sayısıdır. Reynolds sayısının tanımında uzunluk ölçüği olarak hidrolik çap, D_h , kullanılmıştır. Hidrolik çap ise kesit alanın ıslak çevreye oranının dört katıdır. Son olarak, herhangi bir başlangıç debisi, Q_m , için K_{d1} denklem (2.4) kullanılarak hesaplanabilir.

2.2.2 Kapak kısmi açık konumunda yük kayıp katsayıları (Deney A.2)

Sistemdeki debiyi kısmak amacıyla, kapak kapatılmaya başlandığında, kapağın mansabındaki kesitte, akım alanı daralır (vena contracta) ve artan hız nedeniyle basınç düşer. Daralmış kesitin üzerinde, havalandırma bacası altında büyük bir çevrinti (vortex) dönmeye devam eder. Kesit-3'te Froude sayısı yeterince büyük olduğunda, batık hidrolik sıçrama oluşur. Daha sonra, havalandırma bacasındaki su seviyesi tünelin tavan seviyesinin altına düştüğünde, sisteme hava girmeye başlar ve serbest yüzeyli bir hidrolik sıçrama oluşur. Doğal olarak, hidrolik sıçrama yeni yük kayıpları oluşturacaktır. İlk anlarda sisteme giren hava, hidrolik



Figür 2.3 Kapak açık konumunda piyezometrik ölçümeler



Figür 2.4 Kuyruksuyu ölçümeleri

sıçramaının da yardımıyla, su ile tam olarak karışır ve su-hava karışımı, hidrolik sıçrama mansabındaki tüm kesiti doldurur. Kapak kapanmaya devam ettiğinde sistemdeki hava oranı artar, hidrolik sıçrama mansaba doğru kayar ve alta su üstte hava olmak üzere iki akışkanın ayrık akımı belirgin bir ara-yüz (interface) ile cebri boru içinde devam eder.

Kısmi açıklıklardaki kapağın getirdiği geometrik kısıtlama nedeniyle ortaya çıkan yeni akım oluşumları, ilave yük kayıpları yaratacağından, denklem (2.1) yeniden yazılmalıdır.

$$H_1 - \Delta h_e - \Delta h_g - \Delta h_j - \Delta h_d = H_4 \quad (2.7)$$

burada, Δh_e daha önce tanımlandığı gibi giriş yük kaybı, Δh_g kısmi açıklıkta kapak yük kaybı, Δh_j hidrolik sıçramaının neden olduğu yük kaybı, Δh_d cebri boru içinde (kısmi kapak açıklığı durumunda) oluşan yük kaybıdır.

Kısmi açıklıkta, kapak yük kaybını bulmak için, rezervuar ile kesit-3 arasında enerji denklemi yeniden yazılır.

$$H_1 - \Delta h_e - \Delta h_g = h_3 + \frac{U_c^2}{2g} \quad (2.8)$$

burada U_c daralmış kesitte (kesit-3) ortalama hızdır. Bu denklemde H_1 sabit, h_3 ve debi modelden ölçülür, Δh_e ise denklem (2.2) ve (2.5) kullanılarak hesaplanabilir. Daralan kesit alanı, A_c , kapak kesitindeki aktif alan cinsinden yazılabilir.

$$A_c = C_c A_g \quad (2.9)$$

burada C_c kesit daralma katsayısı, A_g kapak düdağı altındaki kesit alandır. Kapak bölgesindeki yük kaybı, kayıp katsayısı tanımı ile yapılmalıdır.

$$\Delta h_g = K_g \frac{U_g^2}{2g} \quad (2.10)$$

burada K_g kısmi açıklıklardaki kapak kayıp katsayısı, U_g kısmi açıklıklarda kapak altındaki akımın ortalama hızıdır. Denklem (2.8)'in kullanılabilir olması için, iki bilinmeyen, K_g ve C_c nin deneysel verilerden faydalanaarak, kapak açıklığının fonksiyonu olarak ifade edilmesi gereklidir. Daralma katsayısının bulunması için, daralmış kesitte su derinliğinin doğrudan deneye ölçülmeli, daha önceki Birecik barajı modelinde gerçekleştirilen çalışmada (Aydın 2002) denenmiştir. Kapak

dudağı ucundan boyalı enjekte edilerek, daralmış kesitin üst sınırını belirleyen akım çizgisi görüntülenmiş ve kesit derinliği ölçülmüştür. Ölçümler, o bölgedeki yoğun türbülans ve iki akışkanın (hava ve su) dinamik etkileşimi ve karışımı nedeniyle güvenilir sonuçlar vermemektedir. Diğer bir sorun ise, tek boyutlu olarak çalışılan akımın, özellikle kapak mansabında, tam anlamıyla üç boyutlu olmasıdır. Bu durumda denklem (2.8)'de daralma katsayısının etkisi sadece kesitteki daralma ile sınırlı olmayıp, akımın 3-boyutluğuna bağlı tüm diğer etkileri de taşımaktadır. Daralma katsayısi olarak ismi korunmakla beraber, aslında C_c nin o bölgedeki (denklemlerin içindeki terimlerde ifade edilmeyen) diğer akım özelliklerini de içерdiği bilinmektedir.

Kapak kayıp katsayısi ve kesit daralma katsayısının bulunması için bir seri deney (A.2) yapılmıştır. Bu deneylerde kapak tam açık konumu için bir başlangıç debisi, Q_m , belirlenmiş ve bu debi için türbin vanası açılığı sabitlenmiştir. Daha sonra kapak belirli açıklıklarda sabitlenerek, debi ve havalandırma bacasında su seviyesi, h_3 , ölçülmüştür. Aynı ölçümler farklı başlangıç debileri için tekrarlanmış ve böylece altı ayrı veri seti elde edilmiştir. K_g ve C_c boyutsuz kapak açılığının, y ($=e/e_0$), fonksiyonu olarak ifade edilecektir. Kapak tam açık konumu için bulunan K_{g1} (Denklem 2.6) fonksiyonu incelendiğinde, bu ifadedeki sabit sayıların, kısmi kapak açıklıklarında, boyutsuz açılığın fonksiyonu olacağı görülür. Bu nedenle, Denklem (2.6) genelleştirilerek

$$K_g = C_1 f_1(y) + \frac{C_2 f_2(y)}{R_g} \quad (0 < y \leq 1) \quad (2.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada R_g kısmi kapak açılığı için, hidrolik çap ve kapak altı ortalama hızıyla tanımlanmış kapak Reynolds sayısıdır. Denklemdeki sabit sayılar $C_1 (= 0.0139)$ ve $C_2 (= 17503)$ kapak tam açık ($y=1$) durumundan elde edilir. Fonksiyonlar $f_1(y)$, $f_2(y)$ ve $C_c(y)$ deneyel veri setini en iyi sağlayan fonksiyonlar olarak, bir optimizasyon işlemi sonucu elde edilmiştir. Optimizasyon işleminde önce f_1 ve f_2 için varsayımlı yapılmış ve bir veri seti kullanılarak C_c çözülmüştür. İkinci aşamada ise, birinci aşamada bulunan C_c değerleri kullanılarak, diğer bir veri setinden f_1 çözülmüş ve son aşamada, bilinen C_c ve f_1 için üçüncü bir veri seti kullanılarak f_2 çözülmüştür. Bu işlem, tüm veri setleri ile, bulunan fonksiyonlar

arasında en iyi uyum sağlanıncaya kadar tekrarlanmıştır. Elde edilen fonksiyonlar, en uygun ifade şekli ile aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$C_c = 0.7474 + 0.2683y + 0.0762y^2 - 0.3036y^3 - 0.4346y^4 + 4.282y^5 - 7.159y^6 + 3.763y^7 \quad (2.12)$$

$$f_1 = 12.18 + 3.207y - 140.4y^2 + 414.4y^3 - 610.7y^4 + 458.2y^5 - 135.9y^6 \quad (2.13)$$

$$f_2 = 1 - \exp(-12y^{2.3}) \quad (2.14)$$

Kesit daralma katsayısı, C_c , Figür 2.5'de ve kapak kayıp katsayıları, K_g , Figür 2.6'da sunulmuştur. Denklemler (2.11), (2.12), (2.13) ve (2.14) kullanılarak hesaplanan havalandırma bacası su seviyeleri (h_3), ölçülmüş değerlerle karşılaştırılarak Figür 2.7'de sunulmuştur. Bu figürdeki her eğri, farklı bir başlangıç debisi için, h_3 ün kapak açıklığı ile değişimini göstermektedir.

Bu çalışmada, gerekli olduğunda, bazı fonksiyonlar (denklemler 2.12 ve 2.13'de olduğu gibi) polinomlar kullanılarak ifade edilmiştir. Polinomlarda olabilecek en az sayıda terim kullanılmış ve katsayıılarda anlamlı hane sayısına özellikle dikkat edilmiş, gereksiz detaydan kaçınılmıştır. Yukarıdaki denklemlere bakıldığından çalışılan problem ve deney koşullarında bu kadar hassas sonuçların anlamlı olmadığı düşünülebilir. Ancak, bu fonksiyonlar sayısal çözümde kullanıldıklarından, özellikle kapağın küçük açıklıklarında önem kazanmakta ve parametreler arasındaki ilişki, yeterli hassasiyette kurulmadığında sayısal çözüm stabilitesi kaybolmaktadır.

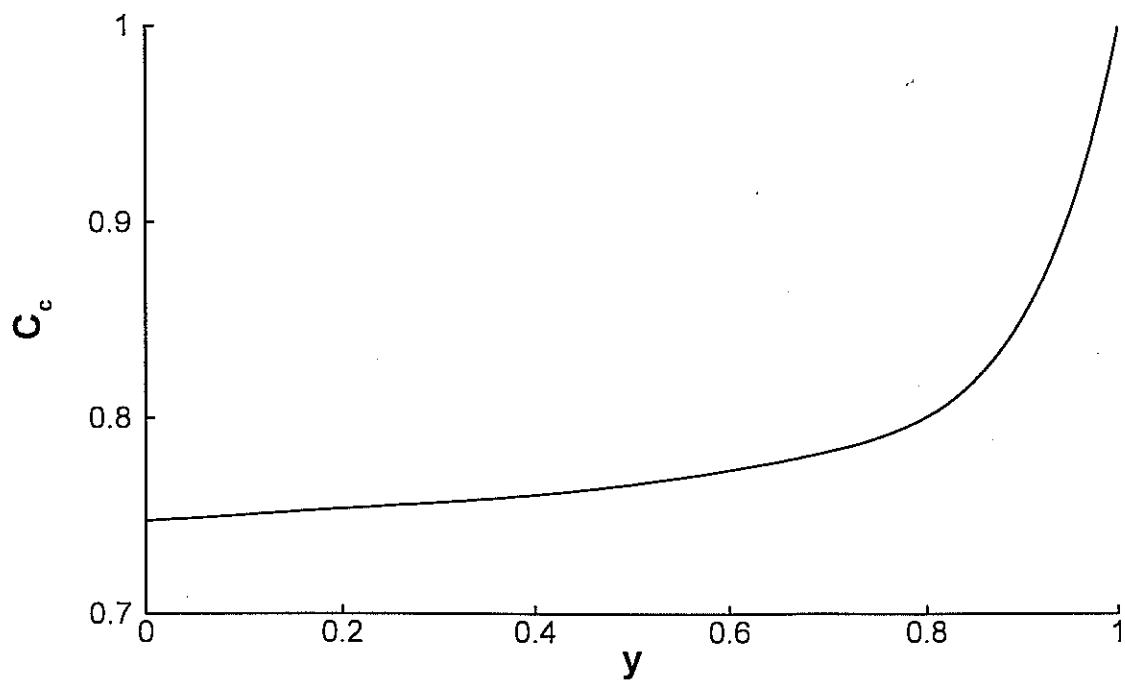
Kısmi açıklıklar için diğer bir yük kaybı nedeni, kapağın mansabında oluşan hidrolik sıçramadır. Hidrolik sıçrama için enerji ve momentum denklemleri yazılarak, yük kayıpları için çözülür. Serbest yüzeyli bir hidrolik sıçrama için

$$\Delta h_j = \frac{(d - C_c e)^3}{4C_c ed} \quad (2.15)$$

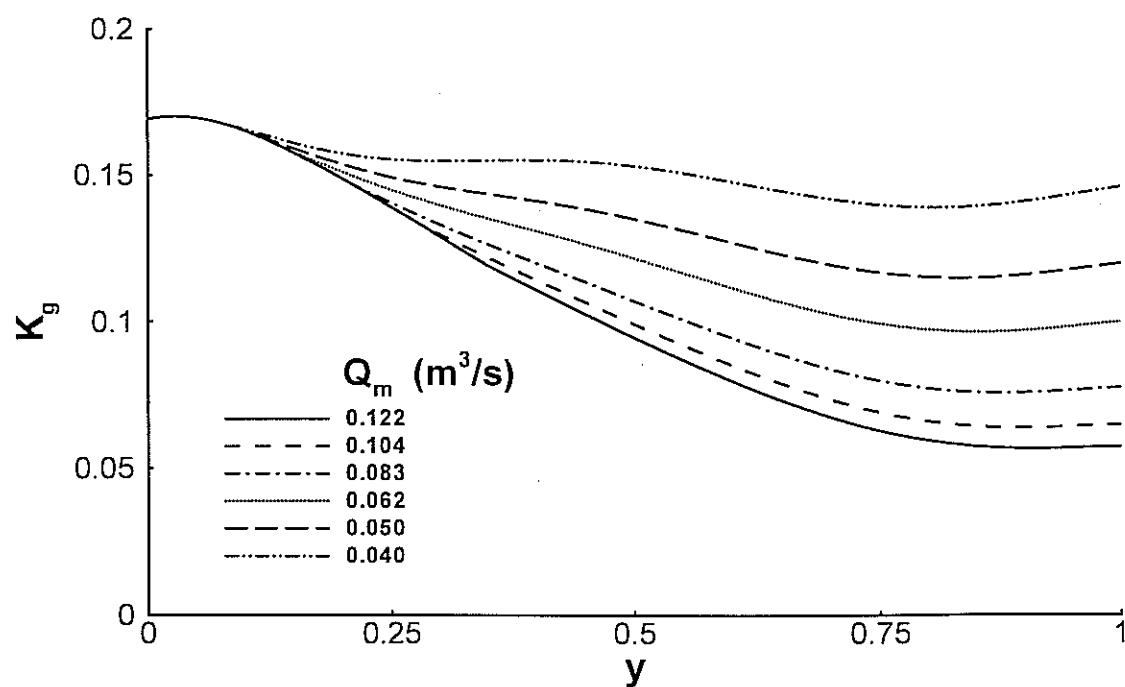
ve batık hidrolik sıçrama için

$$\Delta h_j = \frac{Q_g^2}{2g} \frac{(A_p - A_c)^2}{A_c A_p} \quad (2.16)$$

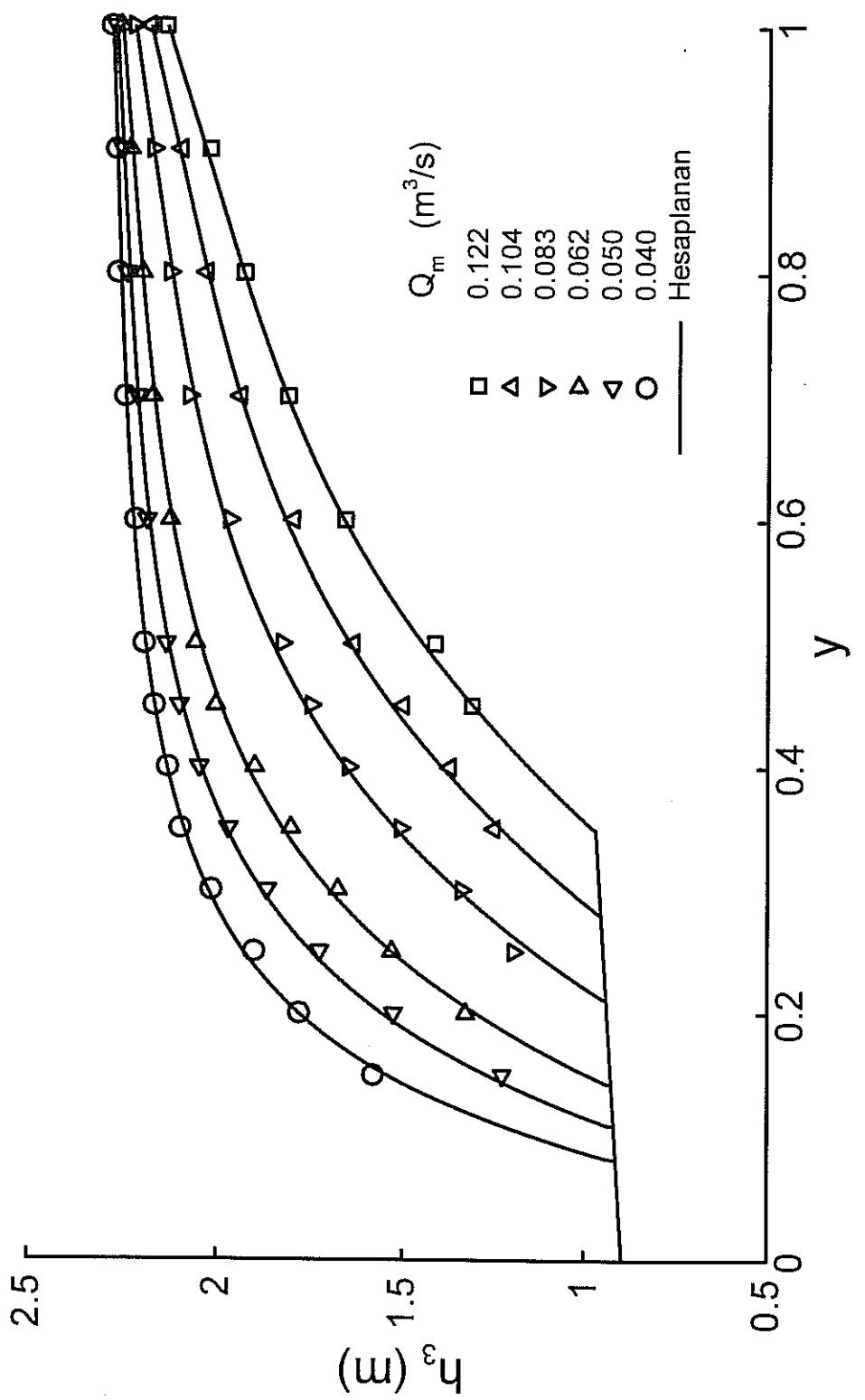
burada d , hidrolik sıçramada sonraki derinliktir.



Figür 2.5 Kesit daralma katsayısı



Figür 2.6 Kapak bölgesi hidrolik yük kayıp katsayısı



Figür 2.7 Havalandırma bacasında su seviyeleri

$$d = \frac{C_c e}{2} (\sqrt{1 + 8F_{rc}^2} - 1) \quad (2.17)$$

Sonraki derinlik hesabında gereken Froude sayısı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$F_{rc} = \frac{U_c}{\sqrt{g C_c e}} \quad (2.18)$$

Hidrolik sıçrama nedeniyle oluşan yük kaybı, Δh_j , kullanılarak kayıp katsayısı tanımlanır.

$$K_j = \frac{\Delta h_j}{U_c^2 / 2g} \quad (2.18)$$

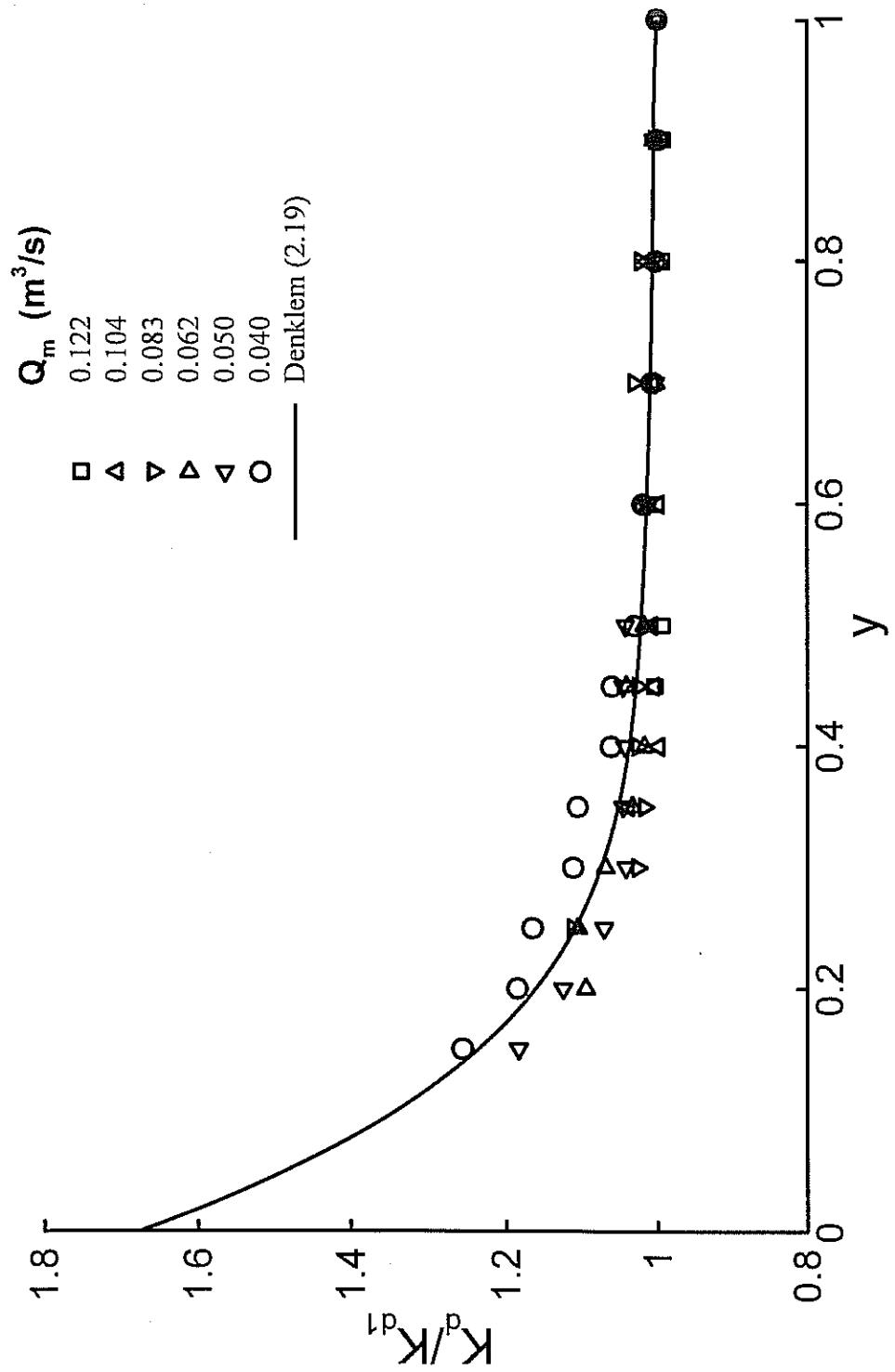
Ve son olarak, cebri boru içindeki yük kaybı, kapak açıklığının fonksiyonu olarak ifade edilmelidir. Kısmi kapak açıklıklarında yapılan debi ve su seviyeleri ölçümelerinden, cebri boru kayıp katsayısı, kapak tam açık konumundaki kayıp katsayısının fraksiyonu olarak elde edilmiştir (Figür 2.8).

$$K_d = K_{d1} (1.676 - 4.432y + 12.32y^2 - 17.48y^3 + 12.46y^4 - 3.538y^5) \quad (2.19)$$

Böylece, sistemdeki yük kayıplarının modellenmesi tamamlanmıştır. Bu deneysel bilgiler kullanılarak herhangi bir kapak açıklığı için debi hesaplamak yada sistemin herhangi bir kesitindeki piyezometre seviyesini bulmak mümkün olacaktır.

2.3 Üst-akım

Zamana bağımlı akım koşullarının çalışılabilmesi için, modellenmesi gereken diğer bir akım alanı, kısmi açıklıklarda kapak üzerinden geçen üst-akımdır. Kapağın kısmi açıklıklarında tünel kesiti içine sarkan kapak nedeniyle oluşan daralma, kapağın menba yüzünde basınç yükselmesine ve mansap yüzünde basınç düşmesine neden olur. Kısmi açıklıklarda kapak hareketini kolaylaştırmak için sızdırmazlık sağlanmadığından, kapak yüzeyleri ile kapak yuvasının yüzeyleri arasında boşluklar oluşur. Kapağın dikey iki yüzü arasındaki basınç farkı nedeniyle, bu boşluklar içinden, menbadan kapak yuvası içine ve kapak üzerinden aşarak mansap yüzünden tekrar tünel içine yönelen bir ikincil akım oluşur. Bu akımın büyülüklüğü kapak etrafındaki boşluklara bağlı olup, hızlı kapanma halinde, sistemin güvenliği için gerekli hava debisi ihtiyacını etkiler. Ayrıca, kapak yuvası içindeki su seviyesi de, bu üst-akıma bağlı olduğundan, kapak üst yüzeyindeki hidrostatik yükü belirler. Mansap yüzü sızdırmaz olan kapaklıarda, kapak



Figür 2.8 Cebri boruda hidrolik yük kayıp katsayısı

yuvasında, menba yüzü basıncı etkin olup, su ile dolu olduğundan aşağı-çekme kuvveti büyütür. Menba yüzü sızdırmaz kapaklarda ise, kapak yuvasında, mansap yüzü basıncı etkin olup, kapanma halinde kapak yuvası hemen boşaltıldığından, aşağı-çekme kuvvetleri göreceli olarak küçüktür.

2.3.1 Üst-akım hidrolik modeli ve deneyler

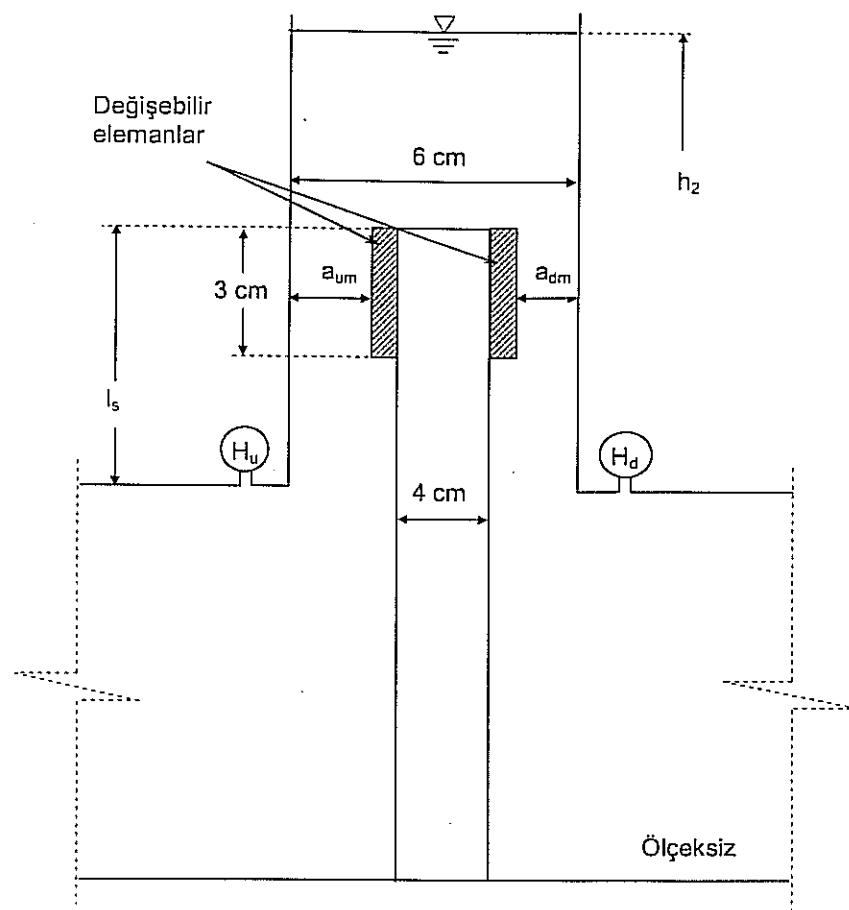
Kapsamlı model üzerinde üst-akım debisinin, kapak-altı akımdan ayrı olarak ölçülmeye olanağı pratik olarak yoktur. Bu nedenle, üst-akım parametrelerinin ölçümüne olanak veren, ayrı bir deney düzeneğine gerek vardır. Böyle bir çalışma, bu proje hazırlıklarının yapıldığı sırada yüksek lisans tezi olarak Arş. Gör. Faruk Güreşçi tarafından başlatılmıştır. Tez çalışması kapsamında inşa edilen deney düzeneğinde, kapak kapalı konumunda tutulmuş, böylece alt-akım sıfırlanmıştır. Üst-akım koşullarını benzeştirebilmek için kapalı duran kapağın üst kısmı, kapak yuvasına doğru uzatılarak, kısmi açıklıkta bir kapak konumu oluşturulmuştur. Bu modelin detayları ve ilgili değişkenler Figür 2.9'da gösterilmiştir. Kapağın menba ve mansap yüzündeki açıklıklar, sırasıyla a_u ve a_d , tünel tavanı üzerinde kapak yuvasına girmiş kısmının boyu l_s , menba yüzünde tünel tavanında üst-akımın kapak yuvasına giriş noktasındaki basınç H_u ve mansap yüzünde üst-akımın tünele geri dönüş noktasındaki basınç H_d ile gösterilmiştir.

Model girişinde ve çıkışında bulunan iki adet vana yardımıyla sistemden geçen debi ve kapak yuvasındaki su seviyesi kontrol edilebilmektedir. Kapağın yuva içinde yatay düzlemdeki konumu değiştirilerek, menba ve mansap yüzlerinde istenilen açıklıklar ayarlanır. Kapak yuvasındaki farklı açıklık değerleri için sistemden geçen debi, H_u , h_2 ve H_d ölçülümüştür (Güreşçi 2001). Üst-akım deneylerinden derlenen veriler, daha sonra proje ekibi tarafından değerlendirilmiş ve aşağıda anlatılan üst-akım modeli elde edilmiştir.

2.3.2 Üst-akım modeli

Üst-akım girişi ile kapak yuvası içindeki su yüzeyi arasında ve su yüzeyi ile üst-akım çıkışı arasında yük kayıpları ayrı ayrı tanımlanır. Menba yüzü için

$$\Delta h_{ou} = H_u - h_2 \quad (2.20)$$



Figür 2.9 Üst-akım deney düzeneği

ve mansap yüzü için

$$\Delta h_{od} = h_u - H_d \quad (2.21)$$

Hidrolik açıdan, üst-akım ile boru akımları arasında benzerlik kurularak, yük kayipları Darcy sürtünme katsayısı ile ifade edilir.

$$\Delta h_{ou} = K_{oe} \frac{U_u^2}{2g} + \alpha_u \int_0^{L_s} f \frac{U_u^2}{2g} \frac{dx}{2a_u} \quad (2.22)$$

$$\Delta h_{od} = K_{oe} \frac{U_d^2}{2g} + \alpha_d \int_0^{L_s} f \frac{U_d^2}{2g} \frac{dx}{2a_d} \quad (2.23)$$

burada K_{oe} üst-akım çıkış kayıp katsayıları, U_u menba yüzü kesit ortalama hızı, U_d mansap yüzü kesit ortalama hızı, x akım çizgileri boyunca eksenel mesafe, α_u ve α_d ise, kesit alan ve yön değişiklikleri sonucu gelişen 3-boyutluluk (non-uniform flow) nedeniyle, yük kayiplarındaki artışı dikkate almak için katsayılar ve f Darcy sürtünme katsayısidır. Yük kayiplarını, toplam kayıp katsayıları ve üst-akım debisi cinsinden yazmak çözüm açısından uygun olacaktır.

$$\Delta h_{ou} = K_{ou} Q_o^2 \quad (2.24)$$

$$\Delta h_{od} = K_{od} Q_o^2 \quad (2.25)$$

Bu tanımlar doğrultusunda, çıkış kayıp katsayısının değeri 1 alınarak denklemler (2.22) ve (2.23) toplam kayıp katsayıları için çözülür.

$$K_{ou} = \frac{1}{2gw^2} \left[\frac{1}{a_{um}^2} + \alpha_u \frac{f}{2} \int_0^{L_s} \frac{dx}{a_u^3} \right] \quad (2.26)$$

$$K_{od} = \frac{1}{2gw^2} \left[\frac{1}{a_{dm}^2} + \alpha_d \frac{f}{2} \int_0^{L_s} \frac{dx}{a_d^3} \right] \quad (2.27)$$

Bu tanımlarda w kapak genişliği, a_{um} , a_{dm} sırasıyla a_u ve a_d nin minimum değerleridir. Böylece her iki yüz için de çıkış kaybı, o bölümün maksimum hız yükü cinsinden yazılmış olur. Denklemler (2.20), (2.21), (2.24) ve (2.25) üst-akım debisi ve kapak yuvası içindeki su seviyesi için çözülür.

$$Q_o = \left[\frac{H_u - H_d}{K_{ou} + K_{od}} \right]^{1/2} \quad (2.28)$$

$$h_2 = \frac{H_u + H_d \frac{K_{ou}}{K_{od}}}{1 + \frac{K_{ou}}{K_{od}}} \quad (2.29)$$

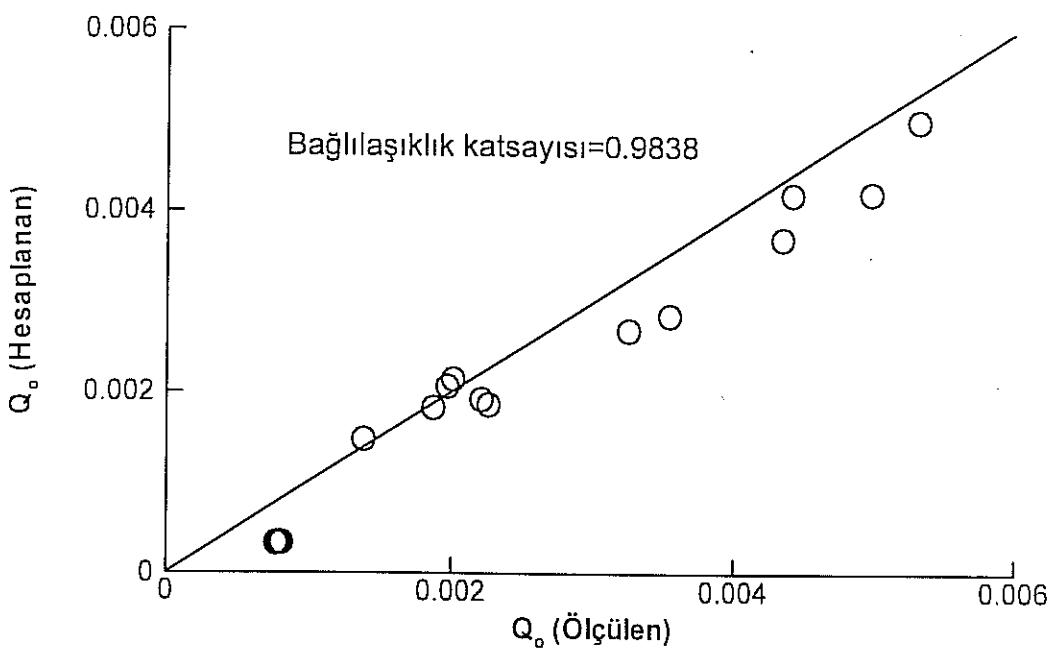
Denklemler (2.26)~(2.29) üst-akım hesaplanması için yeterli bir model oluşturur.

2.3.3 Üst-akım kayıp katsayıları (Deney A.3)

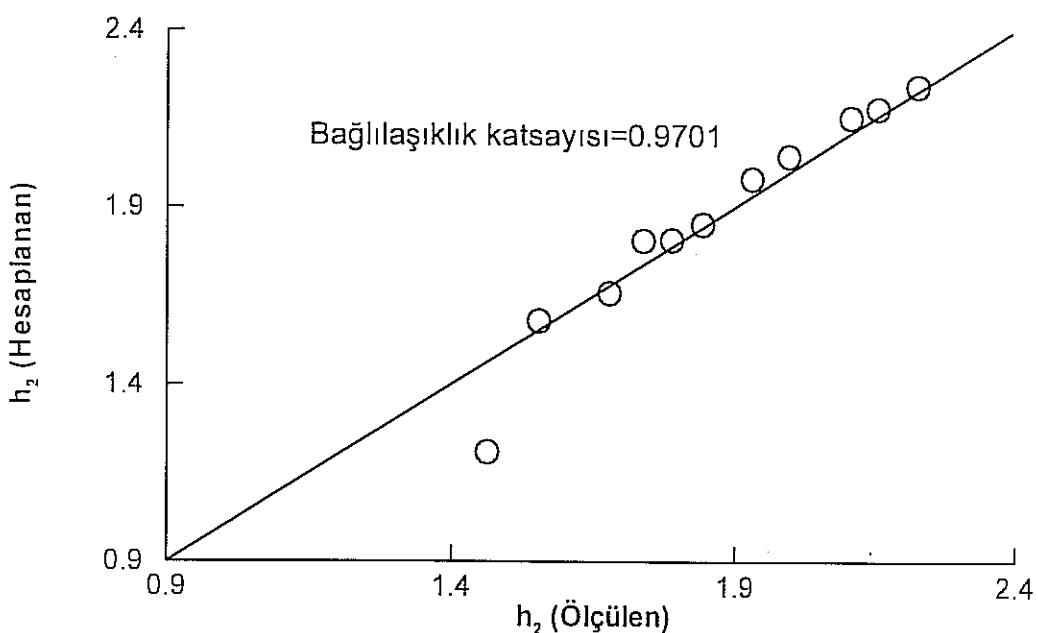
Denklemler (2.26)~(2.29) ile tanımlanan sistemde, toplam kayıp katsayıları içindeki α_u ve α_d değerlerinin bilinmesi gereklidir. Bu amaçla kapsamlı model üzerinde bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Kapağın tam kapalı konumunda (hidrolik modelde) sızdırmazlık sağlanmadığından, üst-akım debisi sıfırlanmamaktadır. Alt-akım sıfırlandığı için (kapağın sadece bu konumunda) üst-akım ölçülebilir. Kapağın yuvası içinde menba ve mansap açıklıklarının 16 farklı kombinasyonu için Q_o , H_u , h_2 ve H_d ölçülmüştür. Bu veriler kullanılarak $\alpha_u=4$ ve $\alpha_d=10$ olarak bulunmuştur. Denklemler içine yerleştirilen α değerleri ile, üst-akım debisi ve kapak yuvası içindeki su seviyesi hesaplanmıştır. Hesaplanmış ve ölçülmüş değerler karşılaştırılarak, iki veri seti arasındaki bağlılığı üst-akım debisi için Figür 2.10'da ve kapak yuvası su seviyesi için Figür 2.11'de gösterilmiştir.

2.3.4 Üst-akım menba basıncı düzeltmesi (Deney A.4)

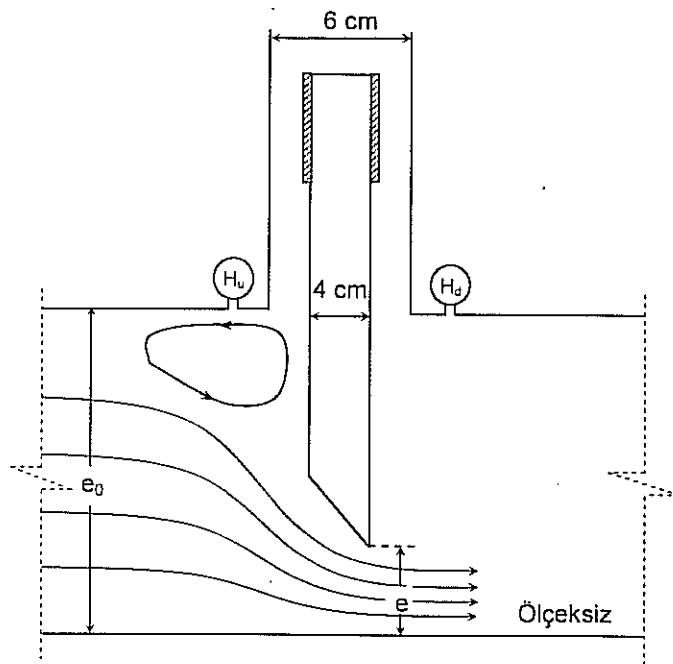
Yukarıda anlatılan üst-akım modelinde, üst-akım giriş ve çıkışındaki hidrolik yükler (H_u , H_d) noktasal değerler olup modelin geliştirilmesi aşamasında doğrudan ölçülmüştür. Kapsamlı model için oluşturulan matematik modelden hesaplanacak piyezometre değerleri ise kesit ortalamaları olacaktır. Örneğin kapak bölgesindeki basınç, rezervuar seviyesinden alık kaybı ve hız yükü çıkarılarak bulunabilir. Bu değer, kapağın tam açık olduğu durumlar için geçerlidir. Kapak kısmen kapatıldığından, o bölgedeki akım çizgileri artık paralel olmayacağı, kapak yüzü ile tünel tavanının oluşturduğu köşede akım yavaşlayacak ve eğer üst-akımın (alt akıma göreceli olarak) küçük olduğu düşünülürse durgun nokta oluşacaktır (Figür 2.12). Üst-akım girişinde, akımın yavaşlaması ve köşede oluşan çevrinti nedeniyle, yerel basınç yükselecek ve üst-akım giriş hidrolik yükü, H_u da bundan etkilenecektir. Akımın yerel olarak durgunlaşmasından kaynaklanan basınç artışı



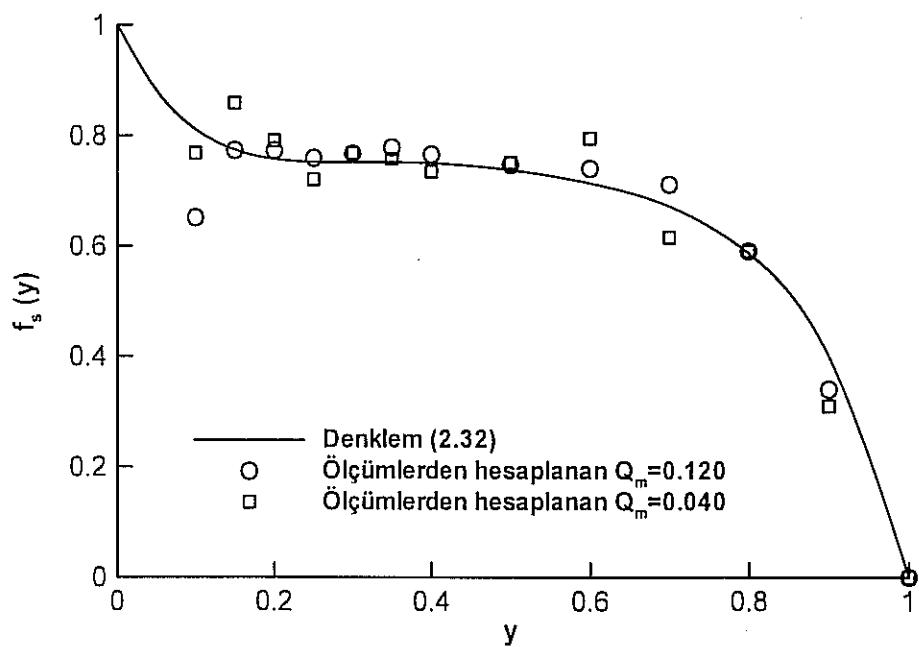
Figür 2.10 Ölçülen ve hesaplanan üst akım debileri arasında bağlılığı



Figür 2.11 Kapak yuvasında su seviyesi, ölçülen ve hesaplanan değerler arasında bağlılığı



Figür 2.12 Kapak bölgesinde akım çizgileri



Figür 2.13 Kapak mansap yüzünde durgunluk fonksiyonu

bir durgunlaşma hızı, U_{stg} , tanımıyla ifade edilerek, kapak kesitindeki hidrolik yük eklenmiştir.

$$H_u = H_1 - (1 + K_e) \frac{U_t^2}{2g} + \frac{U_{stg}^2}{2g} \quad (2.30)$$

Durgunlaşma hızının, kapak açıklığının bir fonksiyonu olarak, tünel ortalama hızı ile orantılı olduğu düşünülmüştür.

$$U_{stg} = f_s(y) U_t \quad (2.31)$$

Durgunlaşma hızının tanımındaki duraklama fonksiyonun, f_s , bulunması için kapsamlı modelde bir seri H_u ve debi ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerde bağımsız değişken boyutsuz kapak açıklığı, y dir. Deneyler iki farklı başlangıç debisi, $Q_m=0,120 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $Q_m=0,040 \text{ m}^3/\text{s}$ için tekrarlanmıştır. Deney verileri kullanılarak Denklem (2.31) duraklama fonksiyonu için çözülmüş ve kapak açıklığına bağımlı değişimi elde edilmiştir.

$$f_s(y) = 1 - 2.985y + 13.73y^2 - 30.05y^3 + 31.45y^4 - 13.14y^5 \quad (2.32)$$

Deney verileri ve Denklem (2.32) Figür 2.13'de karşılaştırılmıştır.

2.4 Kapağın kısmi açıklıklarında sistem debisi

Alıktan gelen akım kapak bölgesindeki ikiye ayrılır.

$$Q_l = Q_g + Q_o \quad (2.33)$$

burada Q_g alt-akım, Q_o ise üst-akımdır. Herhangi bir kapak açıklığında sistemden geçen debi, kapak veya türbin vanasının kontrolünde olabilir. Her iki durumda, debi hesabı için kullanılacak denklem takımları da farklıdır.

2.4.1 Türbin kontrolünde sistem debisi

Verilen bir başlangıç debisi için, belirli bir kapak açıklığına kadar, kapağın debi üzerindeki kontrolü sınırlı olup, toplam sistem debisi, türbin vanası tarafından kontrol edilir. Denklem (2.7) dudak-altı debisi için yeniden yazılır.

$$Q_g = A_g C_d \sqrt{2g(H_1 - H_4 - \Delta h_o)} \quad (2.34)$$

burada C_d debi katsayısı,

$$C_d = \left[K_g + K_e y^2 + K_j \left(\frac{1}{C_c} \right)^2 + K_d \left(\frac{A_g}{A_p} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2.35)$$

ve Δh_o üst-akımdan dolayı sistemdeki yük kaybıdır.

$$\Delta h_o = \frac{(Q_o^2 + 2Q_g Q_o)}{2g} \left(\frac{K_e}{A_t^2} + \frac{K_d}{A_p^2} \right) \quad (2.36)$$

burada A_t kapak bölgesi tünel kesit alanı, A_p cebri boru kesit alanıdır.

2.4.2 Kapak kontrolünde sistem debisi

Kapağın kapalılık oranı yeterli olduğunda sistem debisini kontrol etmeye başlayacaktır. Bu durum, havalandırma bacası içindeki su seviyesi, h_3 , tünel tavan kotunun altına düşüğünde gerçekleşir. Sistem debisi hesabı için Denklem (2.8)'den faydalananır.

$$Q_g = A_g C_d \sqrt{2g(H_1 - h_3 - \Delta h_o)} \quad (2.37)$$

$$C_d = [K_g + K_e y^2 + 1/C_c^2]^{-1/2} \quad (2.38)$$

$$\Delta h_o = \frac{(Q_o^2 + 2Q_g Q_o)}{2g} \left(\frac{K_e}{A_t^2} \right) \quad (2.39)$$

$$h_3 = z_3 + C_c e + d_c \quad (2.40)$$

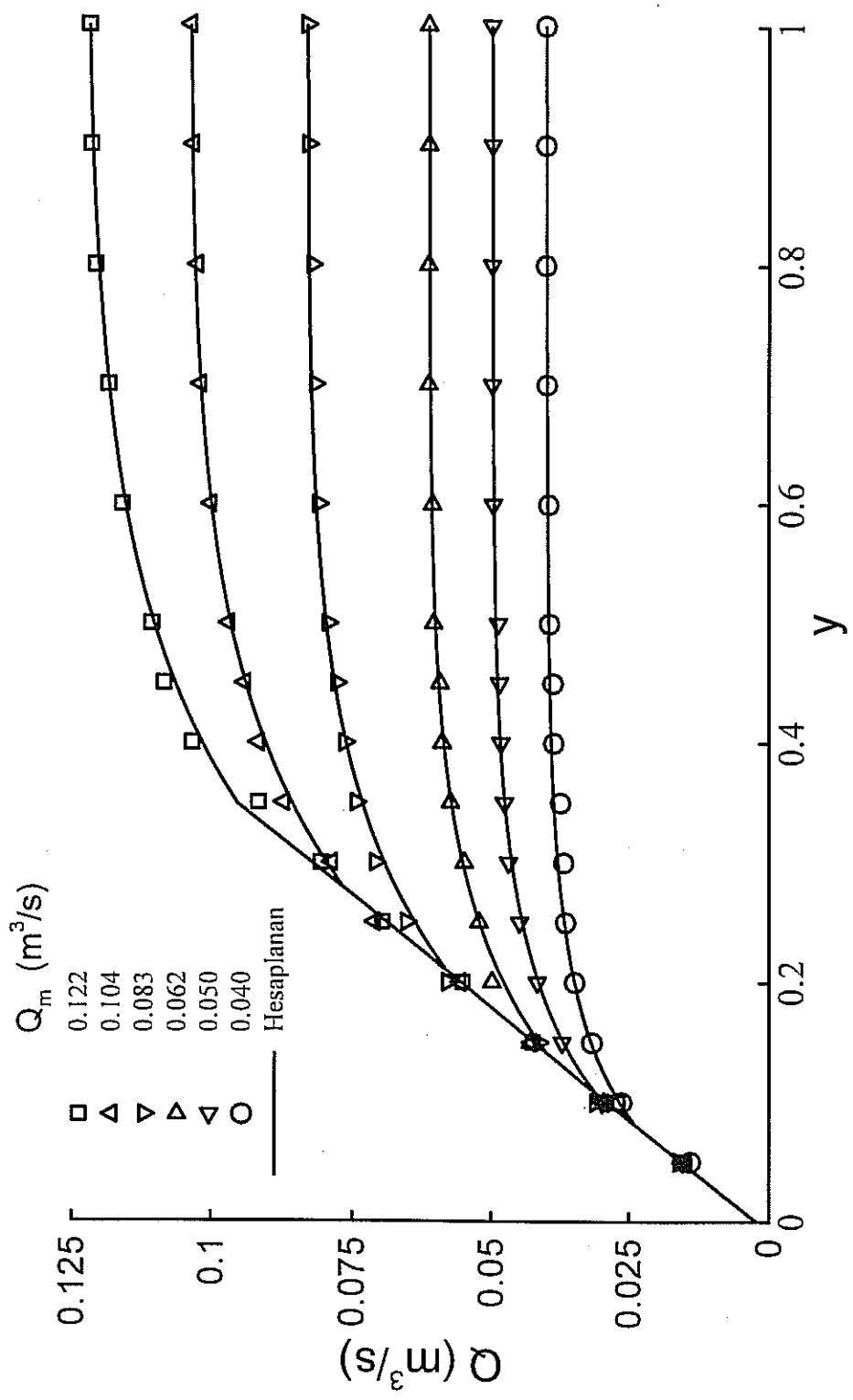
burada z_3 daralmış kesitte tünel taban kotu, d_c ise üst-akımın su derinliğine katkısıdır. Üst-akımın su derinliğine katkısı, açık kanalda kritik derinlik olarak kabul edilmiştir.

$$d_c = [(Q_o / w)^2 / g]^{1/3} \quad (2.41)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak hesaplanan ve deneylerden elde edilen sistem debileri Figür 2.14'de sunulmuştur.

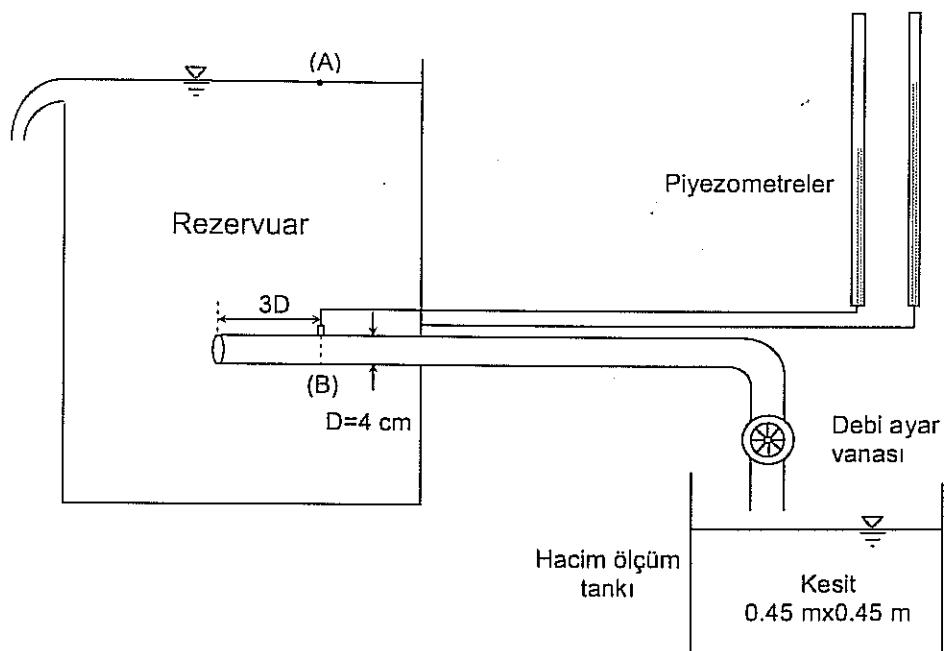
2.5 Havalandırma bacasında debi ölçümü (Deney A.5)

Kapsamlı modelde havalandırma bacası olarak 1.3 m boyunda, 0.04 m çapında, düz plexiglass boru kullanılmıştır. Kapağın kapanması sırasında sisteme emilen hava debisinin, bu boru girişinde ölçülmesi gereklidir. Debi ölçümü için, bacanın atmosfere açık ucundan, 3 boru çapı kadar içerisinde, boru çeperinde açılan bir piyezometre ucundan yararlanılacaktır. Kapanma sırasında emilen havanın debisi, çoğu zaman oldukça küçük olduğundan, boru girişindeki basınç kaybı da oldukça küçüktür. Literatürde, düz boru girişleri için, yük kaybı katsayısı 0.8 olarak

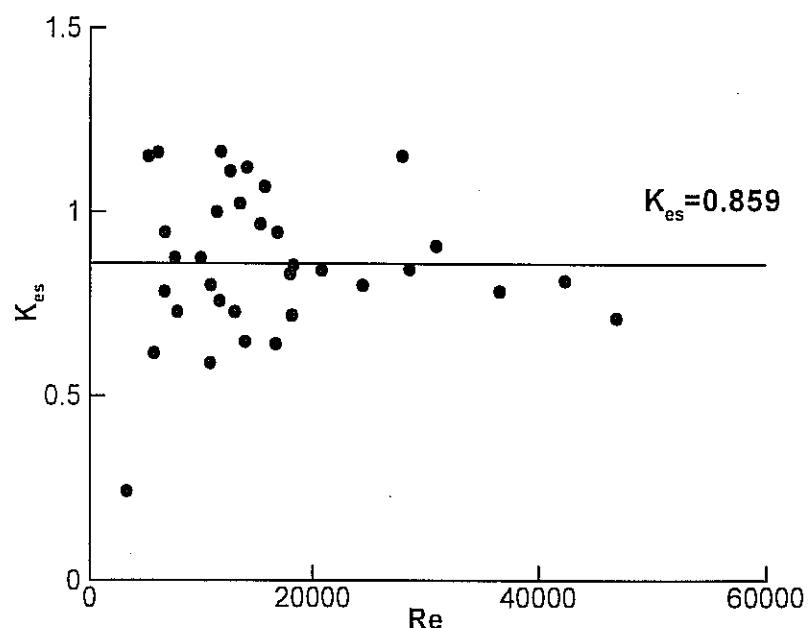


Figür 2.14 Ölçülen ve hesaplanan sistem debileri

bilinmekte dir. Bu çalışmada ölçülecek debiler oldukça küçük olduğundan, düşük Reynolds sayıları için literatürden alınan katsayının geçerli olup olmadığı denenmiştir. Bu amaçla, havalandırma bacası olarak kullanılan boru, büyük bir su rezervuarına bağlanmış (Figür 2.15) ve farklı debiler için, giriş yük kayıp katsayısı ölçülmüştür. Deney sonuçları Figür 2.16'da verilmiştir. Çok küçük debilerle çalışıldığından kayıp katsayısının standart sapması oldukça büyüktür. Ortalama değer, $K_{es}=0.86$ olarak bulunmuştur.



Figür 2.15 Hava bacası girişi yük kayıp katsayıları deney düzeneği



Figür 2.16 Hava bacası girişi yük kayıp katsayısı

3. MATEMATİK MODEL

3.1 Kapanmakta olan kapağın neden olduğu zamana bağımlı akım

Kapanmakta olan kapağın neden olduğu zamana bağımlı akım koşullarını tartışabilmek amacıyla, tipik bir türbin giriş yapısı ve cebri boru sistemi ölçeksiz olarak Figür 2.1'de gösterilmiştir. Matematik modeli oluşturmak için, integral enerji denklemi, alık ve cebri boru bölgeleri için, Aydın 2002'de gösterildiği gibi uygulanacaktır. Önceki çalışmadan farklı olarak, bu kez üst-akım da matematik modele dahil edilmiştir. Rezervuar ile kesit-3 arasında kalan ve alık olarak adlandırılan bölge, denklemlerde 'l' ile gösterilecek, kesit-3 ile türbin vanası arasındaki, cebri boru olarak adlandırılan bölge ise, denklemlerde 'p' ile gösterilecektir.

3.1.1 Alık bölümünde zamana bağımlı akım

Integral enerji denklemi önce alık bölgesi için yazılır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_l \left(\frac{U^2}{2g} + z \right) \gamma_w dV = H_1 Q_l \gamma_w - \Delta h_e Q_l \gamma_w - \Delta h_g Q_g \gamma_w - H_{cg} Q_g \gamma_w - H_u Q_o \gamma_w \quad (3.1)$$

burada U kesitteki ortalama hız, g yerçekimi ivmesi, z kesit hacimsel ortasının referans çizgisinden yüksekliği, γ_w suyun özgül ağırlığı, Q_l alık debisi, Δh_e alık hidrolik yük kaybı, Δh_g kapak bölgesi hidrolik yük kaybı, H_{cg} kapak-altı akımın çıkış yükü, Q_g kapak-altı akım debisi, H_u kapağın menba yüzünde tünel tavanında üst-akımın giriş yükü ve Q_o üst-akım debisidir. Üst ve alt akımların toplamı, sürekliilik gereği alık debisine eşittir (Denklem 2.33). Alt-akımın daralmış kesitteki çıkış yükü, su derinliği, basınç yükü ve hız yükü toplamı olarak yazılabilir.

$$H_{cg} = h_3 + \frac{P_a}{\gamma_w} + \frac{U_c^2}{2g} \quad (3.2)$$

burada P_a , $h_3 > z_{tc}$ olduğunda havalandırma bacası içinde, veya $h_3 < z_{tc}$ olduğunda, tünel içinde, kesit-3'te su yüzüne etkiyen hava basıncıdır. Kapak bölgesinde tünel kesitinin tavan yüksekliği z_{tc} ile gösterilmiştir.

Denklem (3.1)'deki hidrolik yük kayıpları, kayıp katsayıları ve debi cinsinden dinamik yükle ifade edillip, suyun özgül ağırlığına bölünür ve denklem yeniden düzenlenir.

$$\frac{S_I}{2g} \frac{\partial Q_I^2}{\partial t} = \left[H_1 - K_e \frac{Q_I^2}{2gA_t^2} - K_g \frac{Q_g^2}{2gA_g^2} \frac{Q_g}{Q_I} - H_u \frac{Q_o}{Q_I} - H_{cg} \frac{Q_g}{Q_I} \right] Q_I \quad (3.3)$$

burada S_I alık bölgesinin incelik parametresi olup aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$S_I = \int_I \frac{dx}{A} \quad (3.4)$$

Bu denklemde x alık aksı boyunca masafe, A kesit alanıdır. Alık hacmi, daima su ile dolu olduğundan ve bu nedenle yükseklik, z , zamanla değişmediğinden, Denklem (3.3)'den düşürülmüştür.

3.1.2 Cebri boru bölgesinde zamana bağımlı akım

Cebri boru bölgesinin iki giriş ve bir çıkış kesiti vardır. Giriş akımları kapağın altından ve üstünden geçen su debisi ve havalandırma bacasından gelen su veya hava akımı debileridir. Cebri borudaki aktif üç kesiti de içeren integral enerji denklemi yazılır.

$$\frac{\partial}{\partial t_p} \int \left(\frac{U^2}{2g} + z \right) \gamma_w dV = H_{cg} Q_g \gamma_w + H_d Q_o \gamma_w + H_s Q_s \gamma_s - \Delta h_j Q_g \gamma_w - \Delta h_d Q_p \gamma_w - H_4 Q_p \gamma_w \quad (3.5)$$

burada (subscript) s havalandırma bacasını işaret eder. H_d üst-akım çıkışında hidrolik yük, H_s havalandırma bacasından cebri boruya çıkışta hidrolik yük, Q_p cebri borudaki debidir. Başlangıçta, havalandırma bacası su ile dolu olduğundan, s suyun özelliklerini işaret eder. Daha sonra, sisteme hava girdiğinde ise, s havanın özelliklerini işaret eder. Havalandırma bacasından gelen akımın, cebri boru bölgesine giriş yükü, bacadan çıkış değerleri ile tanımlanır.

$$H_s = z_{tc} + \frac{P_s}{\gamma_s} + \frac{U_s^2}{2g} \quad (3.6)$$

Benzer şekilde, üst-akım çıkış yükü de, hava basıncı ve üst-akım hız yükü kullanılarak yazılır.

$$H_d = h_3 + \frac{P_a}{\gamma_w} + \frac{U_d^2}{2g} \quad (h_3 > z_{tc}) \quad (3.7.a)$$

$$H_d = z_{tc} + \frac{P_a}{\gamma_w} + \frac{U_d^2}{2g} \quad (h_3 < z_{tc}) \quad (3.7.b)$$

Yükseklik enerjisini gösteren h_3 , tavan kotu altına düştüğünde, üst-akım çıkış yükseklik enerjisi, tünel tavan yüksekliğine eşitlenir. İntegralleri alarak ve denklemdeki her terimi suyun özgül ağırlığına bölgerek, denklem yeniden yazılır.

$$\frac{1}{2g} \frac{\partial}{\partial t} (Q_p^2 S_w) + \frac{\partial}{\partial t} (z_w V_w) = H_{cg} Q_g + H_d Q_o + H_s Q_s \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - \Delta h_j Q_g - (\Delta h_d + H_4) Q_p \dots \quad (3.8)$$

burada S_w cebri boruda su dolu kısmın incelik parametresi, z_w su dolu kısmın hacimsel orta yüksekliği ve V_w cebri borudaki su hacmidir.

Kapanma sırasında, alık içindeki su hacmi, kapağın hareketine neredeyse anında reaksiyon gösterirken, cebri boru içindeki su, belirli bir gecikme ile reaksiyon gösterir ve debideki azalma, kapağın kapanmasıyla eş-zamanlı değildir. Bunun nedeni, havalandırma bacasından girişi sağlanan hava hacminin, kapağın frenleme etkisini, kapak mansabında azaltmasıdır.

3.1.3 Havalandırma bacasında zamana bağımlı akım

Kapak tam açık konumunda, havalandırma bacası kesit-3'deki piyezometrik seviyeye kadar su doludur. Kapağın kapanmaya başlaması ile birlikte, piyezometrik seviye düştüğünden, baca içindeki su hızla cebri boruya boşalır. Aynı zamanda, baca içinde düşen basınç nedeniyle, sistem hava çekmeye başlar. Havalandırma bacasındaki zamana bağımlı akımı incelerken, iki ayrı akışkan (hava ve su) dikkate alınmalıdır. Alık ve cebri boruda olduğu gibi, havalandırma bacası için de integral enerji denklemi kullanılarak, önce baca içindeki su yüzeyinde hava basıncı (P_a) ve daha sonra bacanın tünele çıkışındaki basınç (hava veya su) (P_s) hesaplanır.

$$P_a = -\gamma_a \left[(K_{es} + 1) \frac{U_s^2}{2g} + f_a \frac{L_a}{D_s} \frac{U_s^2}{2g} + \frac{L_a}{g} \frac{\partial U_s}{\partial t} \right] \quad (L_a = L_s - L_w) \quad (3.9)$$

$$P_s = P_a + \gamma_w L_w \left[1 - \frac{f_w}{D_s} \frac{U_s^2}{2g} - \frac{1}{g} \frac{\partial U_s}{\partial t} \right] \quad (L_w = h_3 - z_{tc}) \quad (3.10)$$

Bu denklemlerde K_{es} havalandırma bacası girişi kayıp katsayısı, f_a baca içindeki hava akımının sürtünme katsayısı, L_a bakanın hava dolu kısmının boyu, U_s baca içinde ortlama hız, L_s baca boyu, f_w baca içindeki su akımının sürtünme katsayısı ve L_w baca içindeki su dolu kısmın boyudur.

Alik, cebri boru ve havalandırma bacasının birleştiği kesitte, her üç hacim arasındaki bağıntı hacimsel süreklilik denklemi yazılarak sağlanır.

$$Q_s = Q_p - Q_l \quad (3.11)$$

burada Q_s havalandırma bacasındaki debidir. Denklemler, (3.3), (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11) tüm sistem için eş-zamanlı çözülmlesi gereken denklem takımını oluşturur.

3.2 Denklemlerin boyutsuzlaştırılması ve önemli boyutsuz parametreler

Yukarıda yazılan denklem takımının, sayısal çözümünden önce, denklemler boyutsuzlaştırılarak, tüm sistemin davranışları için önemli boyutsuz parametre gruplarının tanımlanması, problemin sunulması ve sonuçların irdelenmesinde yardımcı olacaktır. Önce denklemlerde geçen değişkenleri boyutsuzlaşdırın tanımlar yazılır.

$$Q^+ = \frac{Q}{Q_m} \quad H^+ = \frac{H}{H_m} \quad t^+ = \frac{t}{T_c} \quad \gamma_s^+ = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

$$\forall_w^+ = \frac{\forall_w}{\forall_p} \quad S_w^+ = \frac{S_w}{S_p} \quad z_w^+ = \frac{z_w}{z_p} \quad H_m = \frac{1}{\forall_p} \left[\frac{Q_m^2 S_p}{2g} + z_p \forall_p \right]$$

Burada artı işaretli boyutsuz değeri, (subscript) m kapak tam açıkken geçerli (maksimum) değerleri, H_m başlangıçtaki toplam hidrolik yükü, Q_m başlangıçtaki sistem debisini, T_c kapağın kapatılma süresini, z_p cebri borunun hacimsel orta yüksekliğini, S_p cebri boru incilik parametresini gösterir. Boyutsuz değişkenler Denklem (3.5) içine yerleştirildiğinde cebri boru için boyutsuz enerji denklemi elde edilir.

$$\frac{H_r}{T_r} \frac{\partial}{\partial t^+} (Q_p^{+2} S_w^+) + \frac{1-H_r}{T_r} \frac{\partial}{\partial t^+} (z_w^+ V_w^+) = H_{cg}^+ Q_g^+ + H_d^+ Q_o^+ + H_s^+ Q_s^+ \gamma_s^+ - \Delta h_j^+ Q_g^+ - (\Delta h_d^+ + H_4^+) Q_p^+ \dots \dots \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'de zamana bağımlı terimlerin önündeki boyutsuz gurupların tanımı ise aşağıdaki gibidir.

$$H_r = \frac{(Q_m^2 / 2g) S_p}{(Q_m^2 / 2g) S_p + z_p V_p} \quad (3.13)$$

$$T_r = \frac{T_c Q_m}{V_p} \quad (3.14)$$

Bu iki boyutsuz gurup, geometrik tasarımlı verilen, bir alık-cebri boru sisteminin hidrolik benzeşim parametreleridir. Diğer bir ifade ile, inşa edilen bir hidrolik model ile prototipi arasında, kapak kapanması olayının hidrolik bakımından benzeştirilmesinde, model ve prototip değerleri eşitlenmesi gereken boyutsuz guruplardır. H_r kapanma öncesindeki cebri boru içindeki kinetik enerjinin, toplam (kinetik+potansiyel) enerjiye oranıdır. Cebri boru yatay olduğunda, uygun seçilen bir referans seviyesi için $H_r = 1$ olur. Bu durumda denklem (3.12)'de soldan ikinci term düşecektir.

T_r boyutsuz sayısı ise, kapak kapanma süresinin, bir su tanecığının kapak bölgesinden başlayarak cebri borudan çıkışına kadar geçen süreye oranıdır. Büyük T_r değerlerinde, kapanma süresi içinde, çok sayıda su tanesi kapak bölgesinden kuyruksuyuna kadar ulaşabileceğinden, cebri boru içindeki debi, kapak hareketine uygun değişimler gösterebilecektir. Bu durumda alık içindeki debi ile cebri boru içindeki debi arasında fark küçüktür ve böyle bir kapatma işlemi 'yavaş kapatma' olarak adlandırılabilir. Ancak, T_r değeri küçük olduğunda, kapak bölgesinden geçen su tanecikleri, mansap bölgelerine ulaşmadan kapanma işlemi tamamlanacağından, kapağın debideki kısıntısı aşağılarda hissedilmeyecek, cebri boru içindeki su kütlesinin yüksek momentumu sonucu kapağın ardında basınç düşecek, ve böylece havalandırma bacasından hava girişi ile kapağın kısıtı debi telafi edilecektir. Bu durum 'hızlı kapatma' olarak adlandırılır.

3.3 Denklemlerin sayısal çözümü

Kapağın tam açık konumundan başlayarak, tam kapalı konumuna kadar hareketi sonucu oluşan, zamana bağımlı, su ve hava akımını tanımlayan denklem takımı, doğrusal olmayan denklemler içerdiginden, sayısal çözüm için yineleme gereklidir. Denklem (3.3)'te, zaman türevi sonlu farklar yöntemiyle yazıldığında, ikinci derecenden doğrusal olmayan bir denklem elde edilir.

$$aQ_I^2 + bQ_I + c = 0. \quad (3.15.a)$$

$$a = \frac{1}{2g} \left(\frac{K_e}{A_I^2} + \frac{K_g}{A_g^2} + \frac{1}{A_c^2} \right) Q_g \quad (3.15.b)$$

$$b = \frac{S_I}{g\Delta t} \quad (3.15.c)$$

$$c = \left[h_3 + \frac{P_a}{\gamma_w} + \frac{(Q_o^2 - 2Q_o Q_I)}{2g} \left(\frac{K_g}{A_g^2} + \frac{1}{A_c^2} \right) \right] \frac{Q_g}{Q_I} + H_u \frac{Q_o}{Q_I} - \frac{S_I}{g\Delta t} Q_I^{n-1} - H_1 \quad (3.15.d)$$

burada $n-1$ bir önceki zaman noktası Δt ise sayısal zaman adımıdır. Aynı yaklaşımla, denklem (3.8)'de sayısal çözüme uygun hale getirilir.

$$aQ_p^2 + bQ_p + c = 0. \quad (3.16.a)$$

$$a = \frac{S_w}{2g\Delta t} + \frac{K_d}{2g} \frac{Q_p}{A_p^2} \quad (3.16.b)$$

$$b = H_4 \quad (3.16.c)$$

$$c = \frac{(z_w \forall_w)^n - (z_w \forall_w)^{n-1}}{\Delta t} - H_{cg} Q_g - H_d Q_o + \Delta h_j Q_g - H_s Q_s \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - \frac{(S_w Q_p^2)^{n-1}}{2g\Delta t} \quad (3.16.d)$$

Kapak tam açık konumundan başlanarak denklemler (3.15) ve (3.16) yineleme yöntemiyle çözülür.

4. KAPANMA SIRASINDA HAVA DEBİSİ DENEYLERİ

4.1 Elektronik veri toplama sistemi

Hidrolik model, bilgisayar kontrolünde bir veri toplama sistemi ile donatılmıştır (Figür 4.1). Hareketli kapak deneylerinde piyezometre ölçümleri elektronik basınç dönüştürücülerle yapılmıştır. Basınç dönüştürücüler bir elektronik yükseltici kontrolünde çalıştırılmakta ve yükseltici çıkışı bilgisayara yerleştirilen bir A/D (Analog/Digital) dönüştürücüye iletilmektedir. A/D dönüştürücü tarafından sayısallaştırılan veriler bilgisayar ortamında saklanmaktadır. Elektronik yükseltici eş-zamanlı olarak 6 ayrı duyargadan kayıt alınmasına olanak vermektedir. Kayıt sırasında her bir kanalda örnekleme sıklığı 1 kHz düzeyine kadar çıkarılabilir. Ölçümlerde kullanılan basınç dönüştürücüler, dinamik basınç ölçümüne uygun olup, yüksek frekanslardaki basınç salınımlarını da algılayabilmektedir.

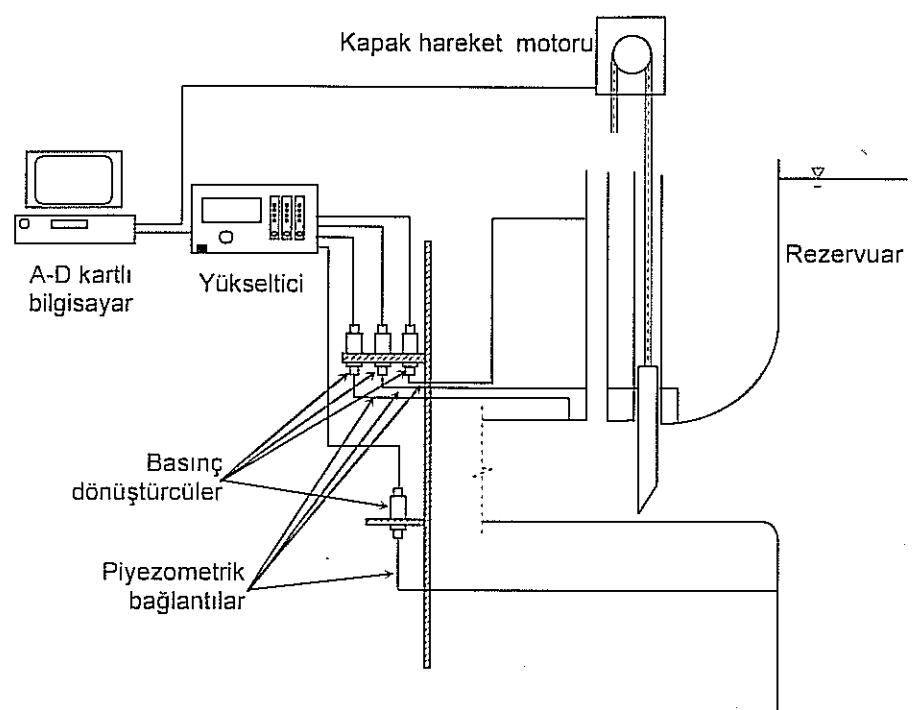
4.2 Kapak hareket kontrol sistemi

Kapanma işleminde kapak hareket hızının istenildiği gibi ayarlanabilmesi için, kapağın hareketi bilgisayar komutlarıyla kontrol edilmektedir. Kapak yuvası içindeki dikey hareket, bir zincir-dişli makara sistemi ile sağlanır (Foto 4.1). Makaralar dönüş hareketini bilgisayar komutlarıyla çalıştırılan bir elektrik motorundan alır. Elektrik motoruya iletişim, yükseltici çıkışlarının da bağlılığı, A/D dönüştürücü tarafından gerçekleştirilir. Bilgisayar komutlarıyla kapağın kapanma hızı ve katedeceği yol sisteme bildirilir. Kapanma sırasında kapağın açıklık konumu, elektronik sistem tarafından, diğer tüm verilerle birlikte zamana karşı kayıt edilir. Böylece, elektronik olarak ölçülen tüm değişkenler doğrudan kapağın açıklık konumu ile ilişkilendirilir.

4.3 Hava debisi deneyleri

4.3.1 Elektronik basınç dönüştürücü kalibrasyonu

Basınç ölçümünde kullanılan dönüştürücüler, deneyler öncesinde kalibre edilir. Kalibrasyon işleminde, önce dönüştürücüler yükselticiye bağlanarak çalışır duruma getirilir ve belirli bir yükseklikte sabitlenir. Saydam bir manometre hortumunun bir ucu dönüştürücüye bağlanır. Hortumun içine bir miktar su doldurularak U-



Figür 4.1 Elektronik hareket kontrol ve veri toplama sistemi

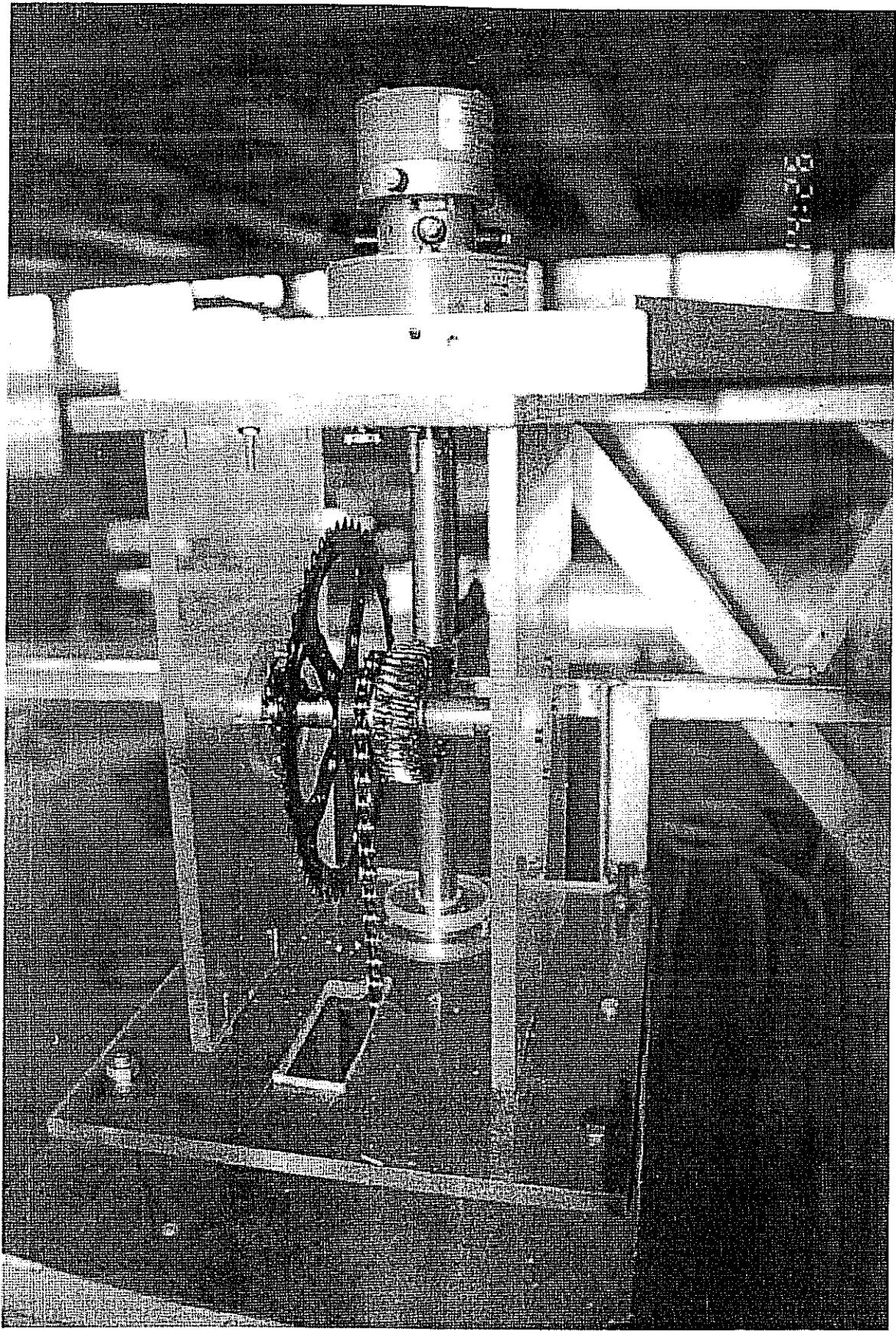


Foto 4.1 Elektrik motoru, zincir-dişli sistemi.

manometre şeklinde tutulur. U-manometre kollarındaki su seviyesi eşit olduğunda dönüştürücüye uygulanan basınç sıfırdır. U-manometrenin kolları aşağı yukarı hareket ettirilerek istenilen basınç uygulanır. Manometre kolları arasındaki yükseklik farkından basınç ölçülür ve aynı zamanda yükselticinin elektronik çıktısı volt biriminde okunur. Bu okumalar, planlanan deneydeki olası basınç ölçüm aralığını kapsayacak şekilde yeterli sayıda tekrarlanır. Uygulanan basınç ve ölçülen volt değerlerinden, basınç-volt ilişkisi doğrusal bir fonksiyon olarak elde edilir. Ölçümlerde kullanılan basınç dönüştürücülerin örnek kalibrasyon eğrileri Ekler bölümünde verilmiştir.

4.3.2 Deney değişkenleri

Matematik modelin sınınamasında dikkate alınacak en önemli parametre, kapağın kapanması sırasında havalandırma bacاسından sisteme emilen hava debisidir. Hava debisi, kapak mansap yüzündeki basınç düşmesine bağımlıdır. Sisteme hava girdikten sonra, havalandırma bacاسının tünel çıkışındaki basınç (P_s), kapak mansap yüzü basıncı olarak tanımlanabilir. Önceki bölümde, matematik model denklemleri boyutsuzlaştırılarak önemli parametreler tartışılmıştı. Burada, deneyler sırasında değişkenlerin nasıl ele alınacağı açıklanacaktır. Hava debisi deneylerinde bağımsız değişkenler,

- a) kapatma hızı, T_c ,
- b) başlangıç debisi, Q_m ,
- c) kapak yuvasında sızma boşlukları, a_{um} ve a_{dm}

olarak belirlenmiştir. Deneye ölçülecek bağımlı değişkenler ise,

- a) üst-akım menba giriş basıncı, H_u ,
- b) kapak mansap yüzü basıncı, P_s ve
- c) havalandırma bacası girişinde basınçtır.

Sınır koşulu olarak rezervuar su seviyesi, H_1 , dikkate alınacaktır. Her deney başlangıcında, rezervuar su seviyesi, rezervuar model duvarı üzerindeki yan savak yardımıyla sabitlenir. Ancak, deney sırasında kapak kapandığı için, rezervuar içindeki su bir miktar yükselebilir ve sabit rezervuar seviyesini bir sınır koşulu olarak sağlamak (model rezervuar yüzey alanı ve savak boyu sonsuz olamayacağı için) güçleşir. Elde edilen kayıtların, özellikle tam kapanma noktasına

yaklaşıldığında, yükseltmiş rezervuar kotu için düzeltilmesi gerekebilir. Bu nedenle, her deneyde rezervuar su kotu da diğer değişkenler gibi kaydedilmiştir.

4.3.3 Deneylerde takip edilen adımlar

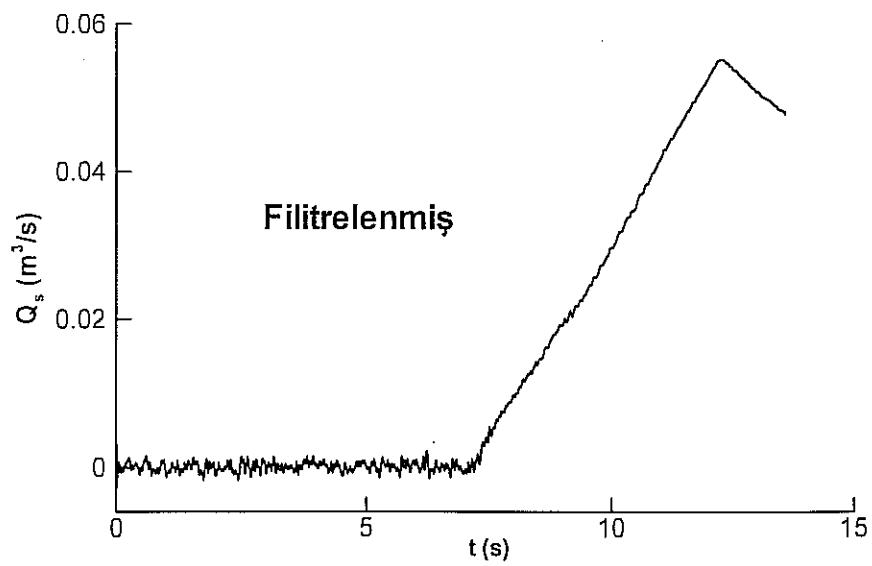
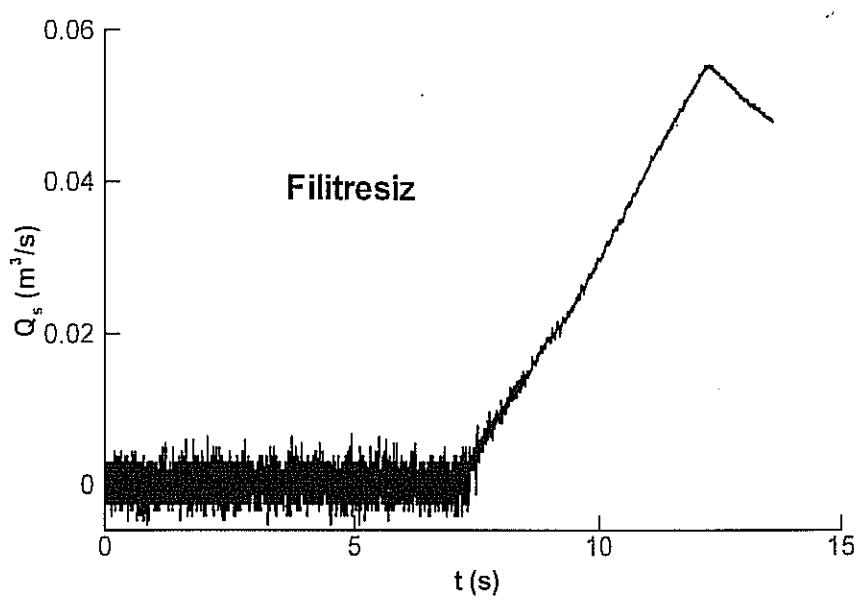
- a) Öncelikle kapak yuvasındaki sızma boşlukları (a_{um} , a_{dm}) belirlenir ve kapağın her iki yüzüne, daima kapak yuvası içinde kalacak şekilde plexiglass parçalar bağlanarak istenilen boşluk elde edilir.
- b) Basınç ölçümünde kullanılacak dönüştürücüler kalibre edilir.
- c) Başlangıç debisi belirlenir. Model giriş vanasından yapılan ilk ayarlamadan sonra, rezervuar su seviyesi, yan savak seviyesiyle eşitlenecek şekilde türbin vanası açıklığı ayarlanır. Sistem giriş-çıkış debilerinin ve rezervuar seviyesinin oturması için bir süre (yaklaşık 15~20 dakika) beklenir. Bu aşamadan sonra deney başlangıç koşulları sağlanmış olur. Sistem başlangıç debisi, Q_m , çıkış kanalındaki savaktan ölçülür.
- d) Kapak, yuvası içinde tam açık konumundan yaklaşık 0.7 m daha yukarıda beklemektedir. Kapağın yukarı bir noktadan harekete başlatılmasının nedeni, sabit hızla hareket etmesini güvence altına almaktır. Kapanma işlemi başlatılmadan, manometre hortum bağlantıları kontrol edilerek hortumlarda hava varsa temizlenir.
- e) Elektronik kayıt için basınç dönüştürücülere bağlanmış hortumlarda, referans basınç değerleri bir manometre yardımıyla okunur.
- f) Bilgisayara kapak hızı (veya kapatma süresi, T_c) ve verilerin saklanacağı dosya isimleri girilir.
- g) Bilgisayar aracılığıyla verilen komutla elektronik kayıt ve kapatma işlemi başlar.
- h) Kapak tam olarak kapandıktan bir kaç saniye sonra, sistemde basınç şokları yaratmadan kontrollü olarak açılır.
- i) Sonraki deney için sistem başlangıç debisinin oturması beklenir.
- j) Kapatma hızı değiştirilerek deney tekrarlanır.
- k) Başlangıç debisi değiştirilerek deney serisi tekrarlanır.
- l) Kapak sızma açıklıkları değiştirilerek deney serileri tekrarlanır.

4.4 Hesaplanan ve ölçülen değerlerin zamanda değişimi (Deney B.1)

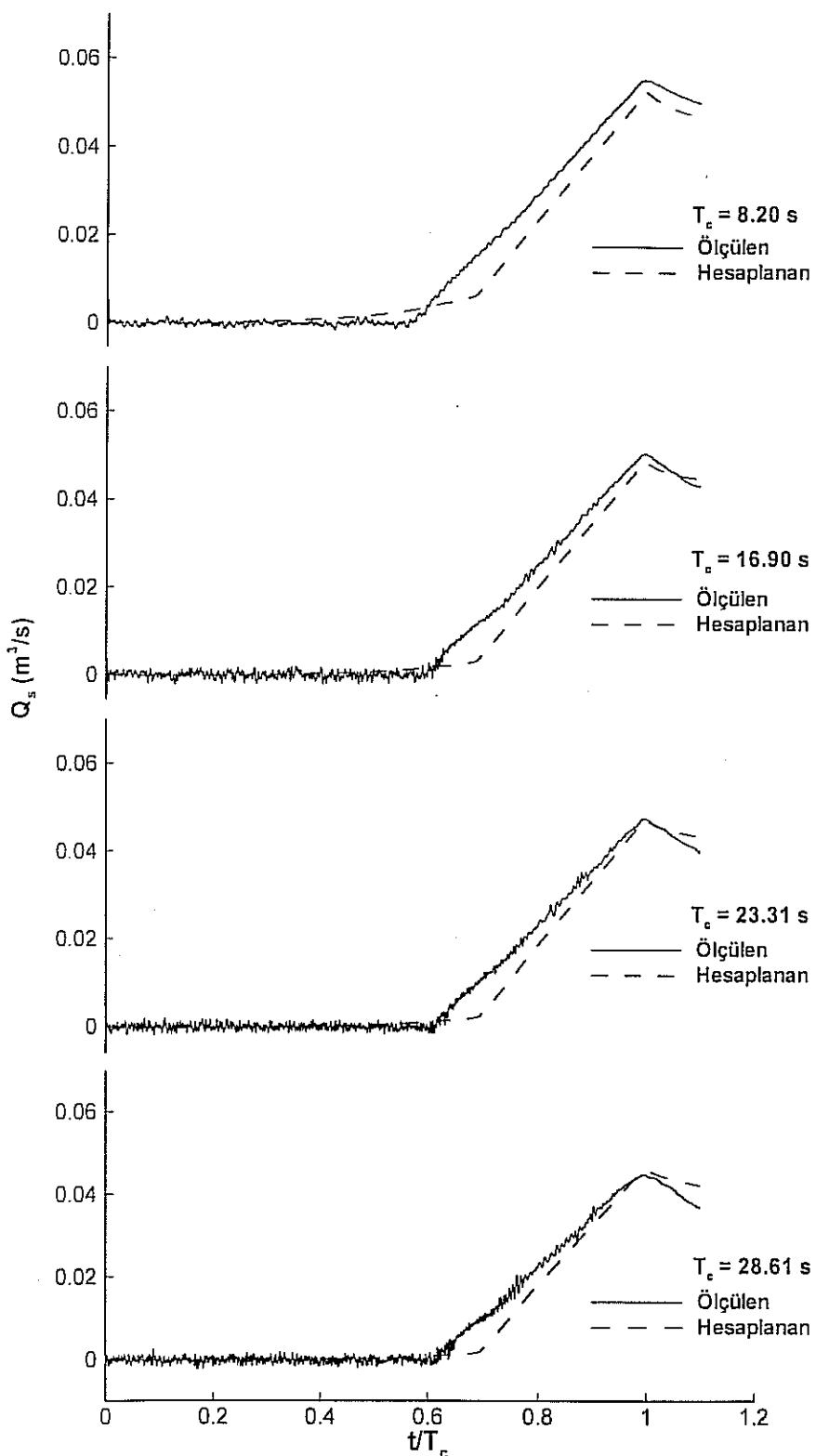
Kapanma hareketi boyunca hava debisini hesaplamak amacıyla, havalandırma bacası girişindeki basınç düşmesi, elektronik basınç dönüştürücü ile ölçülmüştür. Kapanma hareketinin başlangıcında, havalandırma bacası piyezometrik seviyeye (h_3) kadar su ile doludur. Kapak kapanmaya başladığında, kapak dudağı altında çevrintiler oluşur. Havalandırma bacasının yakınındaki bu çevrintiler baca içindeki piyezometrik seviyenin titreşmesine neden olur. Bu nedenle, baca girişindeki basınç kaydı, bacadaki su boşalıp sisteme hava girinceye kadar, bir miktar gürültü içermektedir. Kayıtlardaki gürültüyü temizlemek için sayısal filitreleme yöntemi uygulanmıştır. Filitreleme öncesi ve sonrası hava debisi kayıtları Figür 4.2'de karşılaştırılmıştır.

Sisteme giren hava debisinin zamanda değişimini izeyebilmek amacıyla, iki farklı başlangıç debisi için, farklı kapatma hızlarında elde edilen hava debileri Figür 4.3 ve Figür 4.4'te sunulmuştur. Hidrolik modelden ölçülen hava debisi ile matematik modelden hesaplanarak bulunan hava debisi aynı figürler üzerinde karşılaştırılmaktadır. Figür 4.3'te sunulan verilerin başlangıç debisi (hidrolik modelde ulaşılabilen en büyük debi) $Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s}$, Figür 4.4'te sunulanların ise (hidrolik modelde çalışılan en küçük başlangıç debisi) $Q_m=0.040 \text{ m}^3/\text{s}$ dir. Kapatma süreleri ise 8~33 s arasında değişmektedir. Ölçülen ve hesaplanan değerler karşılaştırıldığında, özellikle büyük başlangıç debisinde oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir. En küçük başlangıç debisi ise, ölçülen hava debisi hesaplanandan belirgin bir şekilde daha büyük bulunmuştur. Bu farklılaşmanın nedeni tam olarak anlaşılamamış olmakla birlikte, deney koşullarının güçlüğü ve düşük debilerde Reynolds sayısının küçük olması nedeniyle akım dinamiklerinin farklılaşması, üzerinde durulması gereken konulardır. İlginç olan diğer bir konu, hesaplanan ve ölçülen verilerde, en yüksek hava debisinin gözlendiği zamanın ve dolayısıyla kapak açıklığının tam olarak çakışmasıdır.

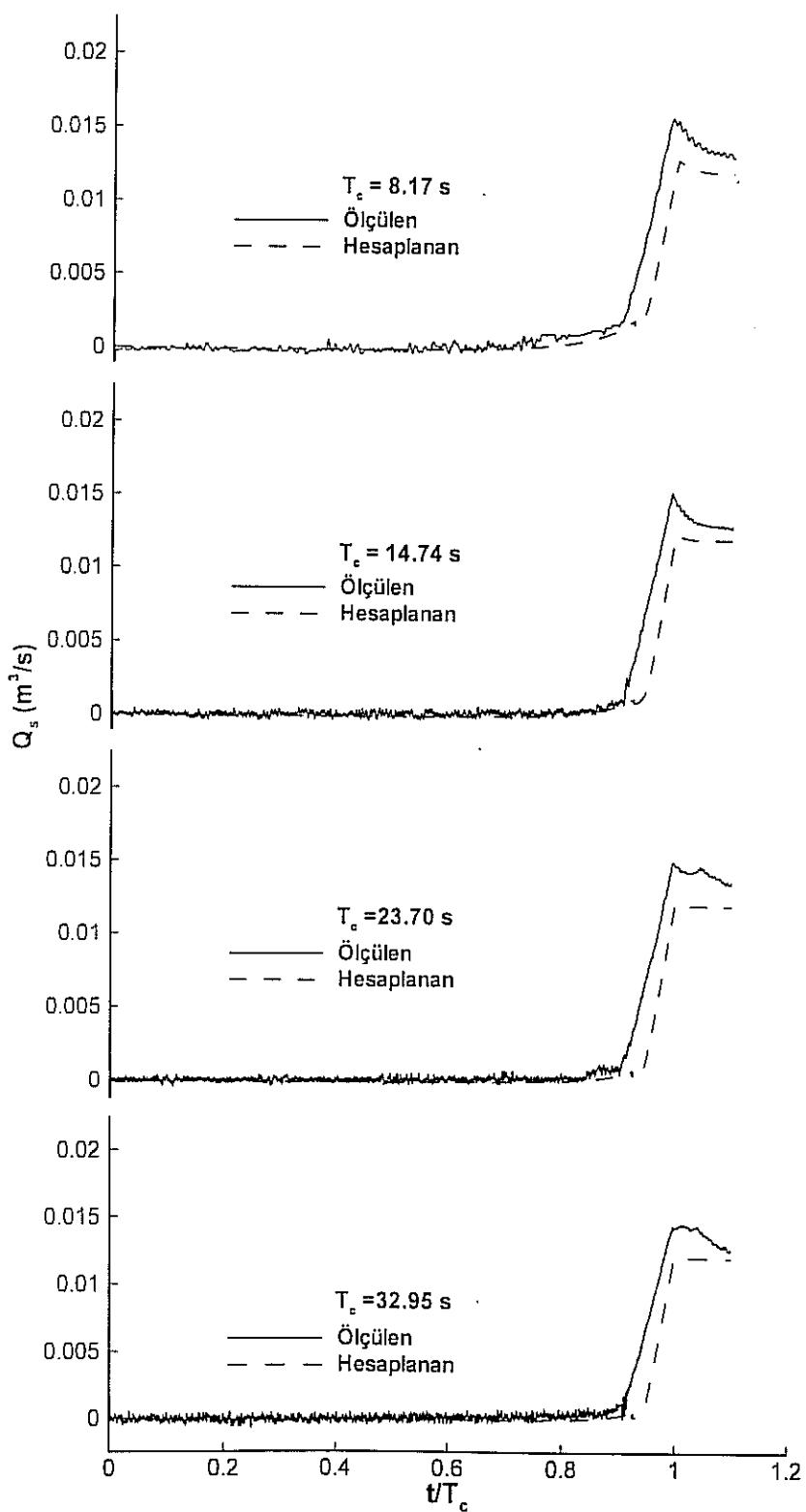
Bu çalışmadaki tüm deneylerde, en yüksek hava debisi, tam kapanma noktasına yakın bir konumda gözlenmiştir. Bu durum, tüm uzun cebri borulu yapılar için geçerlidir. Cebri boru kısaldıkça, en yüksek hava debisi, kapağın daha büyük açıklıklarında gözlenecektir.



Figür 4.2 Hava debisi,filtresiz ve filtrelenmiş kayıtlar



Figür 4.3 Hesaplanan ve ölçülen hava debileri ($Q_m=0,120 \text{ m}^3/\text{s}$, $a_{um}=0,0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0,0105 \text{ m}$).



Figür 4.4 Hesaplanan ve ölçülen hava debileri ($Q_m=0,040 \text{ m}^3/\text{s}$, $a_{um}=0,0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0,0105 \text{ m}$).

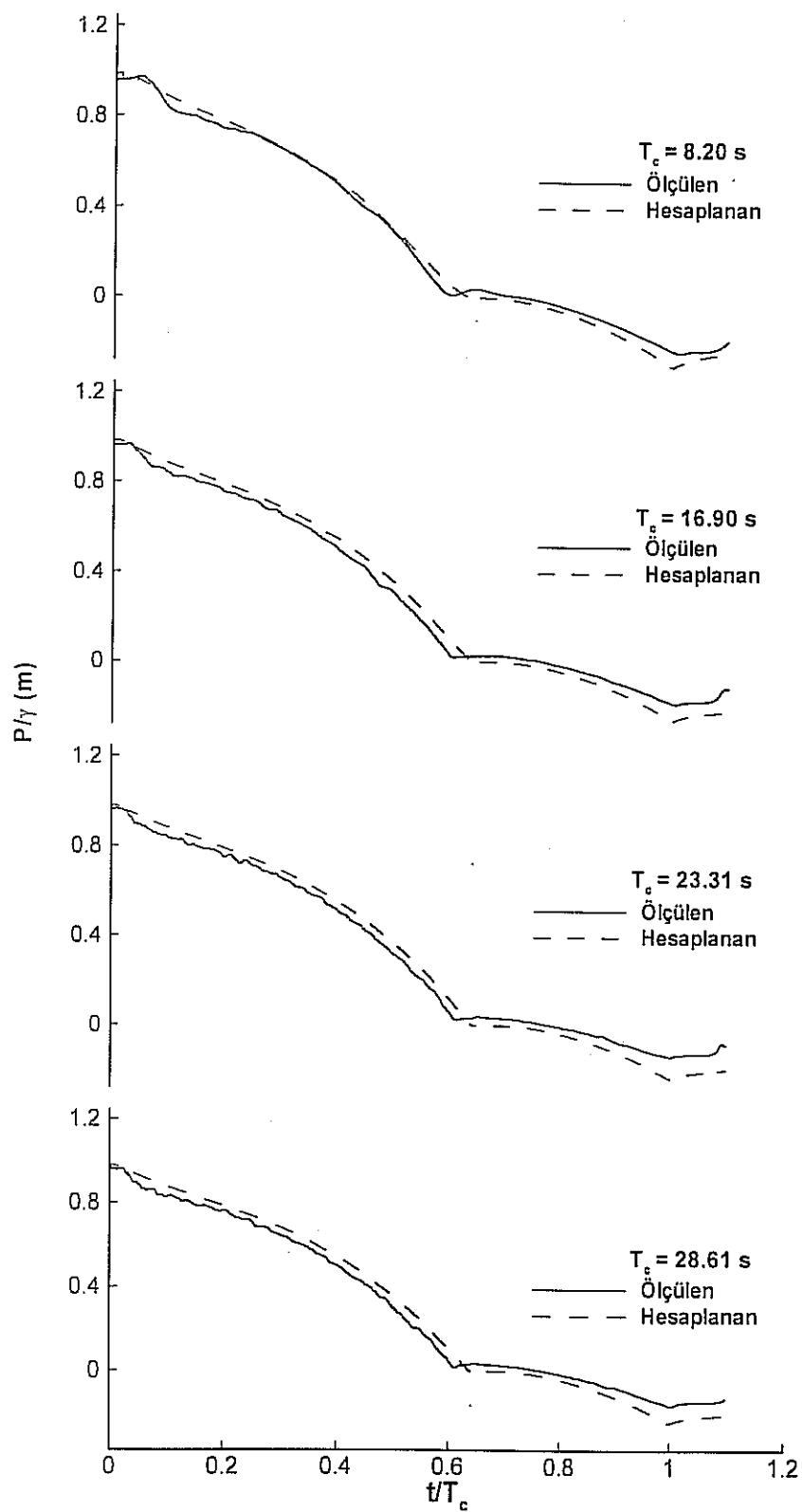
Bir kapatma işleminin başlangıcında, tüm sistem su ile dolu olduğundan, kapak mansap yüzündeki basınç, kapak boyunca değişkendir. Sistemde hava girdiğinde, mansap yüzündeki su boşalır ve o bölgede hava basıncı etkili olur. DeneySEL verilerle hesaplanan verileri karşılaştırmak amacıyla, havalandırma bacasından tünel kesite çıkışta (tünel tavanında) etkiyen basınç kapak arkası basıncı olarak adlandırılacaktır. Figür 4.3 ve Figür 4.4'de hava debisi sunulan koşullarda, kapak arkası basınçları da karşılaştırılmış ve sonuçlar Figür 4.5'te büyük debi için, Figür 4.6'da ise küçük debi için sunulmuştur.

Kapak arkasında en büyük negatif basınç, en büyük başlangıç debisi, en hızlı kapatma ve en küçük üst-akım koşullarında gözlenir. Deneylerdeki en büyük başlangıç debisi $Q_m = 0.120 \text{ m}^3/\text{s}$, en kısa kapatma süresi $T_c = 7.96 \text{ s}$, ve en küçük sızma açıklığı $a_{dm} = 0.0028 \text{ m}$ dir. Bu koşullarda ölçülen en büyük negatif kapak arkası basıncı -0.28 m dir.

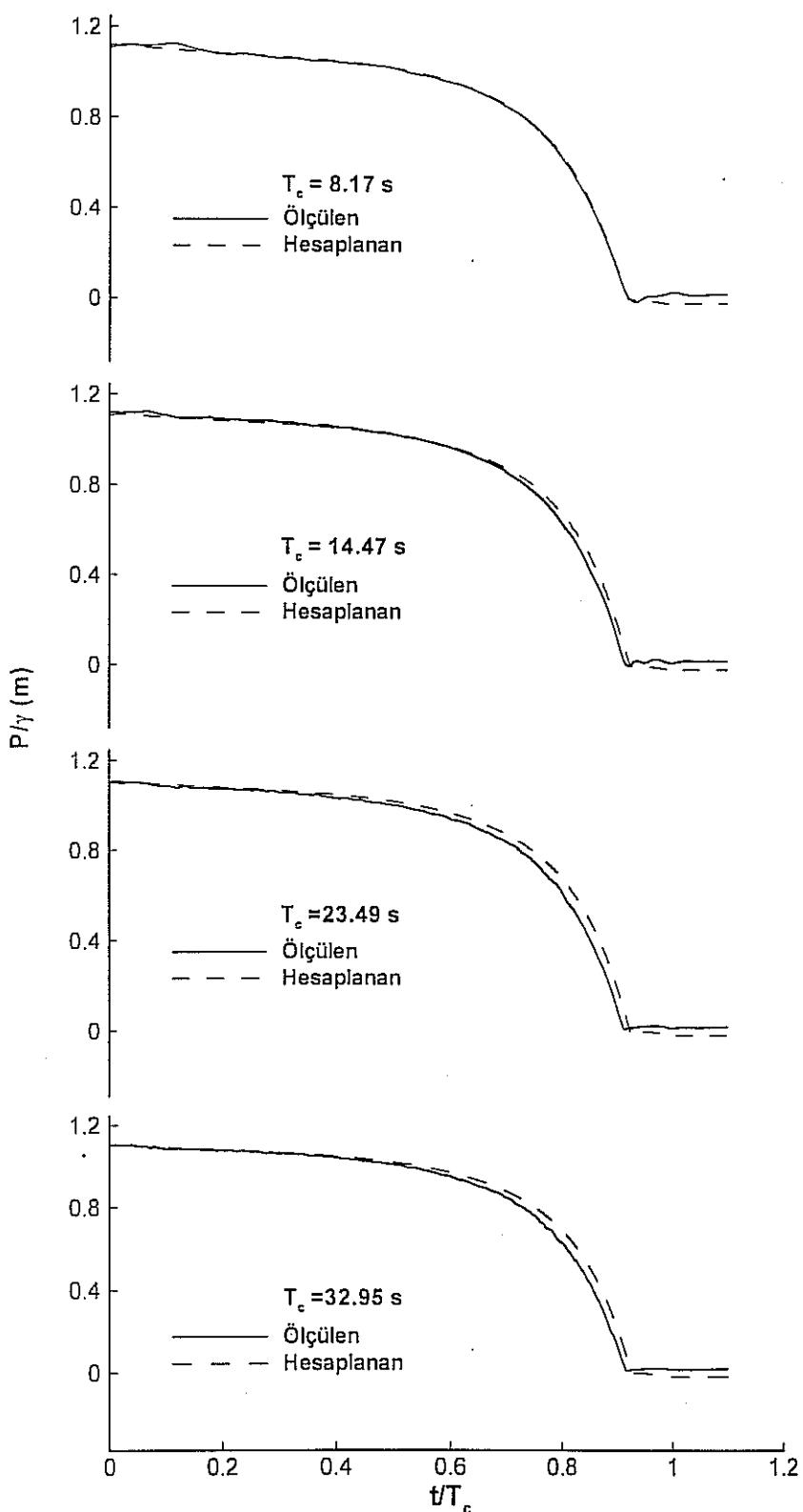
En büyük (negatif) kapak arkası basıncının bulunması, tasarım aşamasında büyük önem taşır. Tüm cebri boru sistemi üzerine negatif basıncın getireceği yüklerin hesaplanması ve kavitaşyon başlangıcının kontrol edilmesi gereklidir. Sistemin maksimum debisi belli olacağinden, sistem için kabul edilebilir en hızlı kapak kapatma hızı, kavitaşyon başlangıcı koşulundan hesaplanabilir.

Hesaplanan ve ölçülen parametrelerin zamanla değişimleri oldukça iyi uyum göstermektedir. Ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerdeki farklılıklar ve zamandaki kaymalar, kısmen deney koşullarındaki zorluklara bağlanabilir. Başlangıçta, tüm piyezometre hortumları su ile doldurulmuştur. Ancak. Daha sonra sisteme hava girdiğinde, küçük bir su damlasının, yüzey gerilim kuvvetleri ile ölçüm noktalarında asılı kalması, özellikle tam kapanma anına yakın kayıtları bozabilmektedir.

Doğal olarak, matematik modelin oluşturulmasında bazı basitleştirici varsayımlar yapılmıştır. En önemlilerinden biri, kapak mansabındaki daralma katsayısıdır. Dudak geometrisi ve akımın üç boyutlu oluşunun, tam olarak, tek bir parametre içinde ifade bulması mümkün değildir. Diğer yandan, kapağın mansabındaki,



Figür 4.5 Kapak mansabında basınçlar ($Q_m=0,120 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $a_{um}=0,0088 \text{ m}$, $a_{dm}=0,0105 \text{ m}$).



Figür 4.6 Kapak mansabında basınçlar ($Q_m=0,040 \text{ m}^3/\text{s}$, $a_{um}= 0,0088 \text{ m}$, $a_{dm}= 0,0105 \text{ m}$).

oldukça karmaşık hava-su karışımı akımı, ayrık hava ve su akımı olarak basitleştirilmiştir.

Genelde, ölçülen ve hesaplanan parametrelerin zaman boyunca değişimlerindeki uyum, model oluşturmada yapılan basitleştirici varsayımların, kabul edilebilir olduğunun bir kanıtı olarak değerlendirilebilir. Unutulmamalıdırki, zamana bağımlı bir akımda, parametrelerin zamanla değişimi, zamandan bağımsız akım koşullarında elde edilen hidrolik yük kayıp katsayıları kullanılarak hesaplanmaktadır.

4.5 Hava ihtiyacı

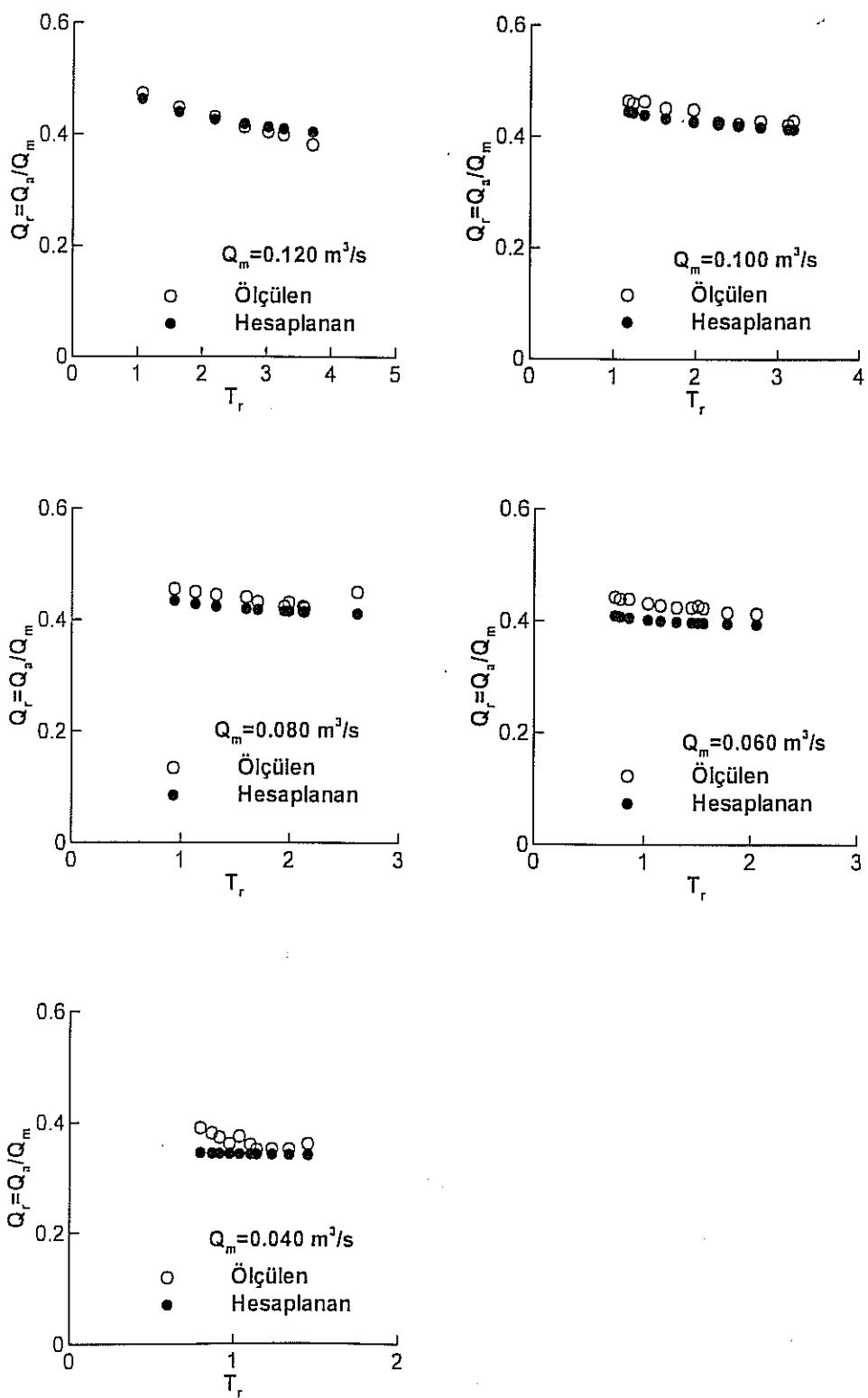
Bir kapanma işleminde gözlenen en büyük hava debisi, kapanmanın gerçekleştiği koşullar için, sistemin hava ihtiyacı, Q_a , olarak adlandırılır. En büyük hava ihtiyacı ise sistemin önemli tasarım parametrelerinden biridir. En büyük hava debisi aynı zamanda kapak arkası basınç için en büyük negatif değer demektir. Geometrisi, boyutları ve maksimum başlangıç debisi belirlenmiş bir tasarımda tek değişken kapak kapatma hızıdır. Böyle bir durumda kullanılacak boyutsuz parametreler, zaman oranı T_r ve debi oranı $Q_r = Q_a/Q_m$ dir.

4.5.1 En büyük sızma açılığında hava ihtiyacı (Deney B.2)

Hava ihtiyacı deneyleri, ilk aşamada, kapağın menba ve mansapta maksimum sızma açıklıkları için gerçekleştirilmiştir. Sistemdeki başlangıç debileri 0.120, 0.100, 0.080, 0.060 ve 0.040 m^3/s , ve kapatma süreleri 7~35 s arasında seçilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan hava ihtiyacı oranları kapatma süresi oranının fonksiyonu olarak Figür 4.7'de sunulmuştur. Önceki deneylerde de gözlendiği gibi, büyük başlangıç debilerinde ölçülmüş ve hesaplanmış değerler arasında tam uyum olduğu halde, küçulen başlangıç debilerinde ölçümler daha büyük hava debisi göstermektedir.

4.5.2 Azalan sızma açılığında hava ihtiyacı (Deney B.3)

Bu deney serisinde, menba ve mansaptaki sızma açıklıkları değişken olarak alınmış ve, en büyük ve en küçük başlangıç debileri için, farklı kapatma hızlarında tekrarlanmıştır. Menba yüzü sızma açılığı azaltıldığında, kapak yuvasındaki su



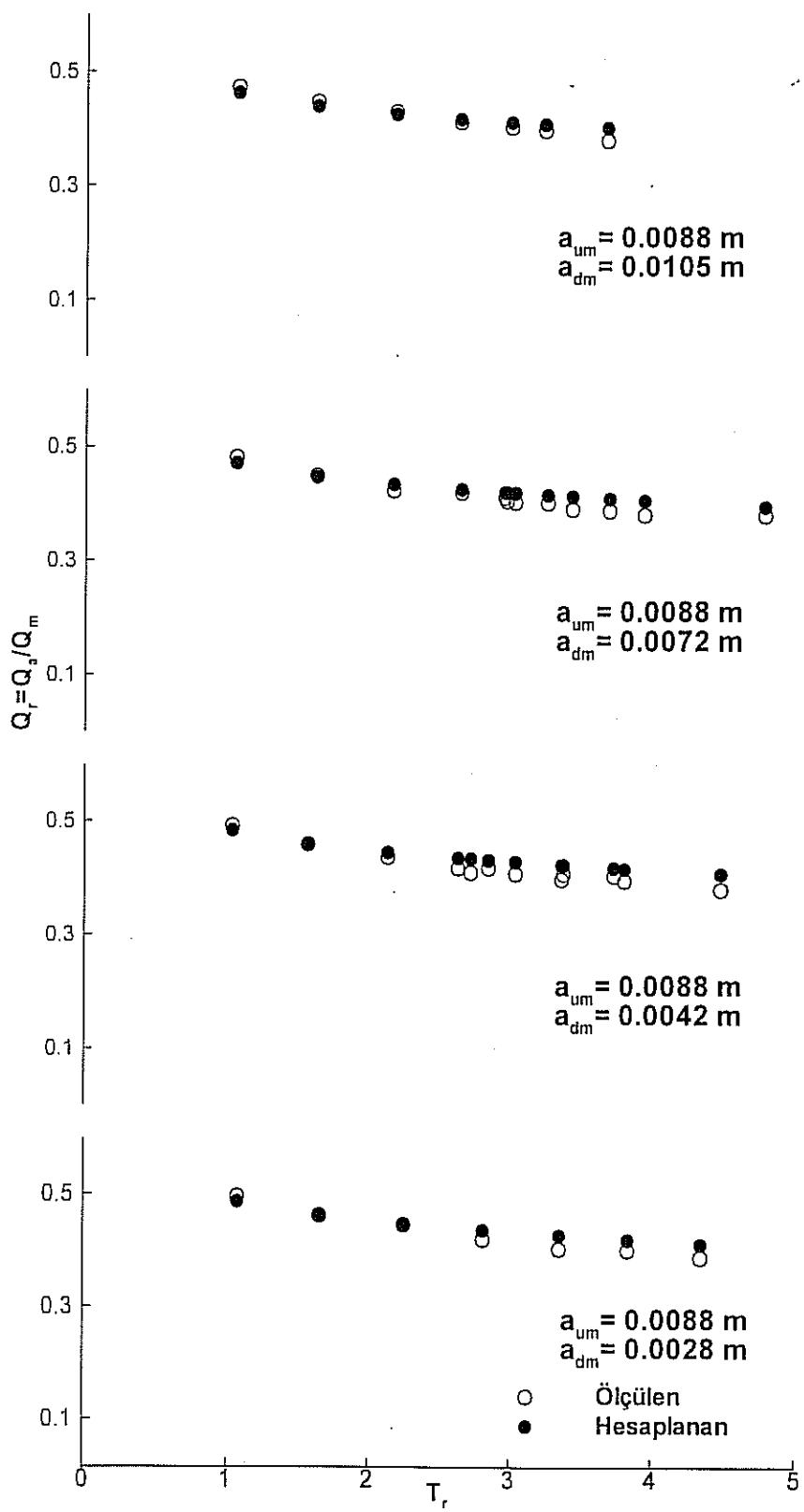
Figür 4.7 Hava ihtiyacı oranları ($a_{um} = 0.0088 \text{ m}$, $a_{dm} = 0.0105 \text{ m}$).

seviyesi azalır ve bu nedenle de üst-akım debisi azalır. Mansap yüzü sızma açıklığı azaltıldığında, doğal olarak, kapak yuvasındaki su seviyesinde artışa rağmen, üst-akım debisi azalır. Artan üst-akım, hava ihtiyacını azaltır. Elde edilen hava ihtiyacı oranları Figür 4.8 ve Figür 4.9'da sunulmuştur. Bu figürlerde her veri setinde sızma açıklıkları farklı olduğundan, üst-akım debileri de farklıdır. Ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki uyumda, önceki deneylere kıyasla, herhangi bir farklılık görülmemiştir, üst-akım hesaplarının sağlamı olduğu sonucuna varılmıştır.

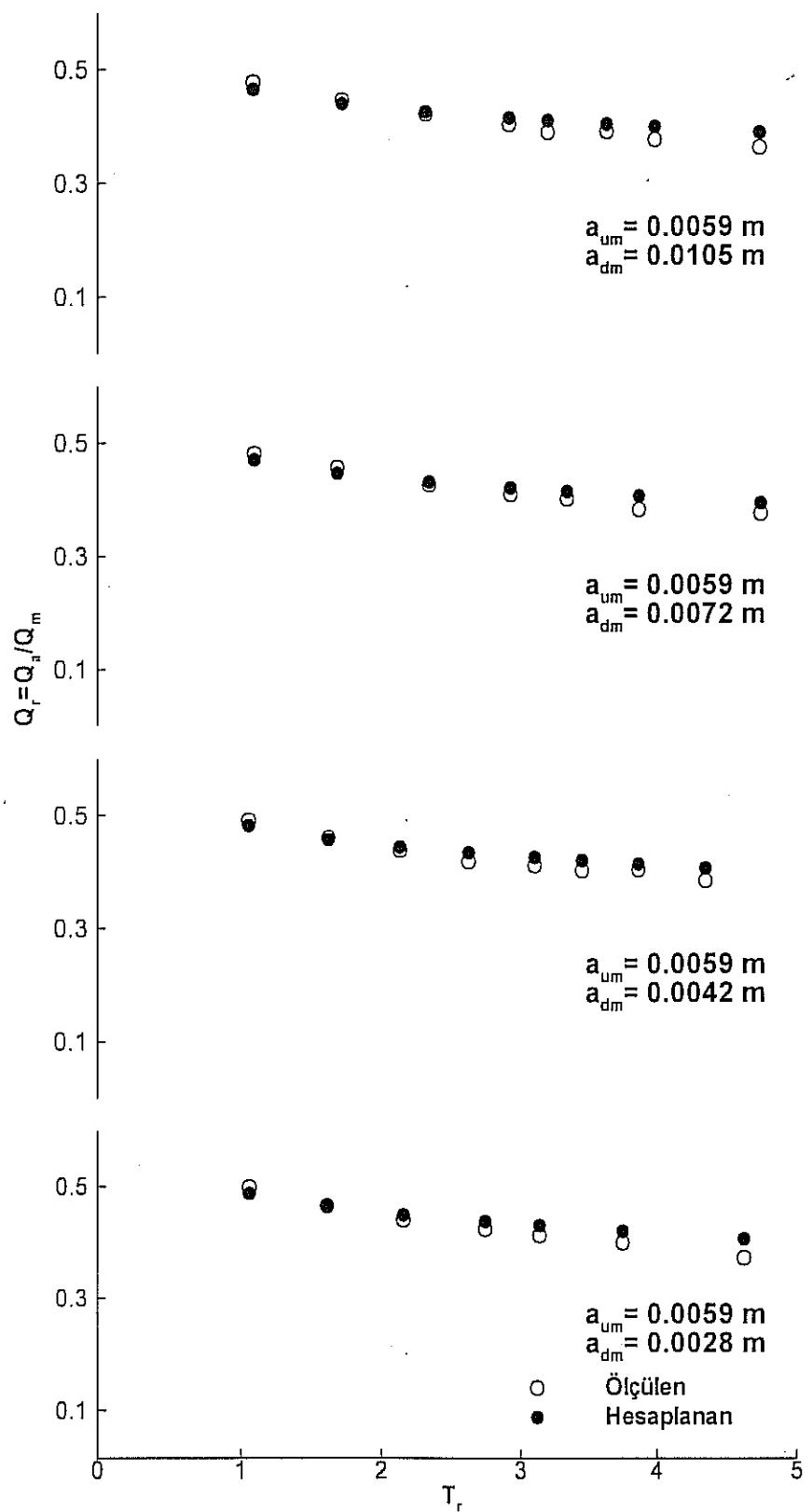
4.5.3 Ölçülen ve hesaplanan hava ihtiyacı arasındaki bağılılığı (Deney B.4)

Deneyler B.2 ve B.3'ten sonra başlangıç debisinin ara değerleri için de hava debisi ihtiyacı ölçülmüştür. Bu bölümde, tüm hava ihtiyacı ölçümü (B.2, B.3, B.4) bir arada toplanarak, ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki bağılılığı incelemiştir. Sonuçlar Figür 4.10'da sunulmuştur. İki veri seti arasındaki bağılılığı 0.99 olarak bulunmuştur. Figürün sağ üst köşesine yakın olan veri gurubu en büyük başlangıç debisinden elde edilmiştir. Genel olarak, ölçülen ve hesaplanan debiler uyum içinde olmakla beraber, %15'lere varan farklılıklar da gözlenmiştir. Özellikle düşük başlangıç debilerinde gözlenen bu farklılığın olası nedenleri aşağıda sıralanmıştır.

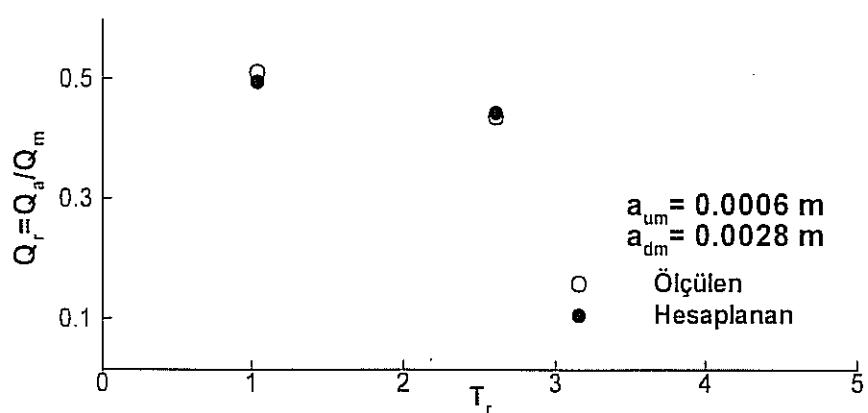
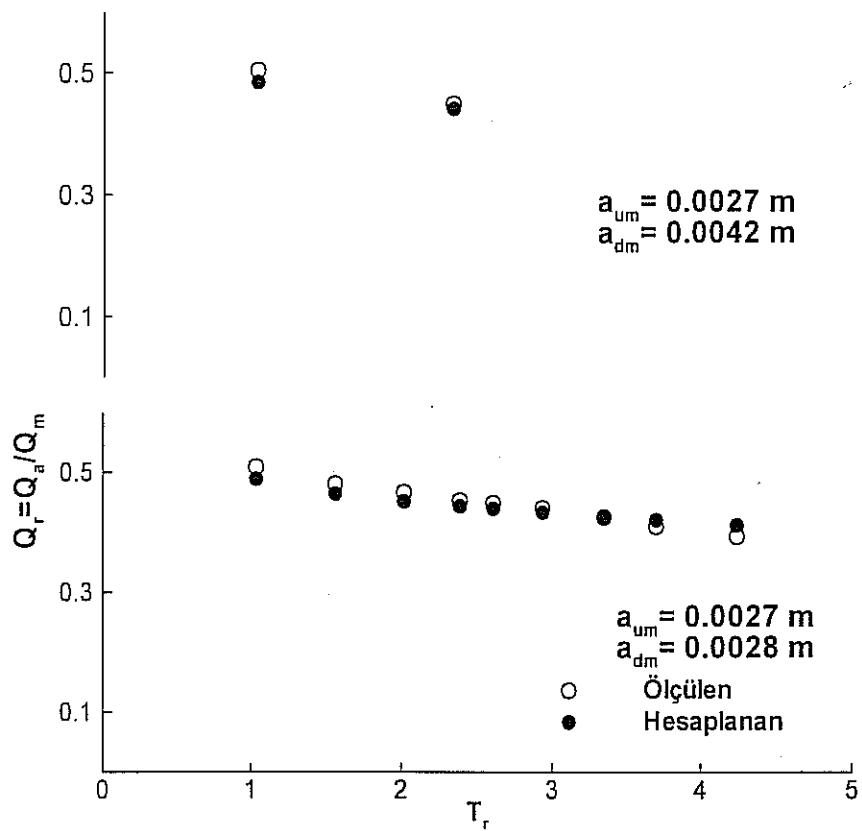
- a) Küçük başlangıç debileri için ölçüm hataları daha belirgindir. Ölçüm hata büyülüğu sabit olduğu halde ölçülen miktarın küçük olması durumunda göreceli hata büyük olacaktır.
- b) Matematik modelin oluşturulmasında yapılan basitleştirici varsayımlar, küçük başlangıç debileri için daha kritiktir.
- c) Türbülans, hava ve suyun karışımı, akım çizgilerinin eğriliği, akım ayrışması ve çevrintiler gibi bazı akım olayları, küçük debilerde davranış farklılıkları gösterirler.



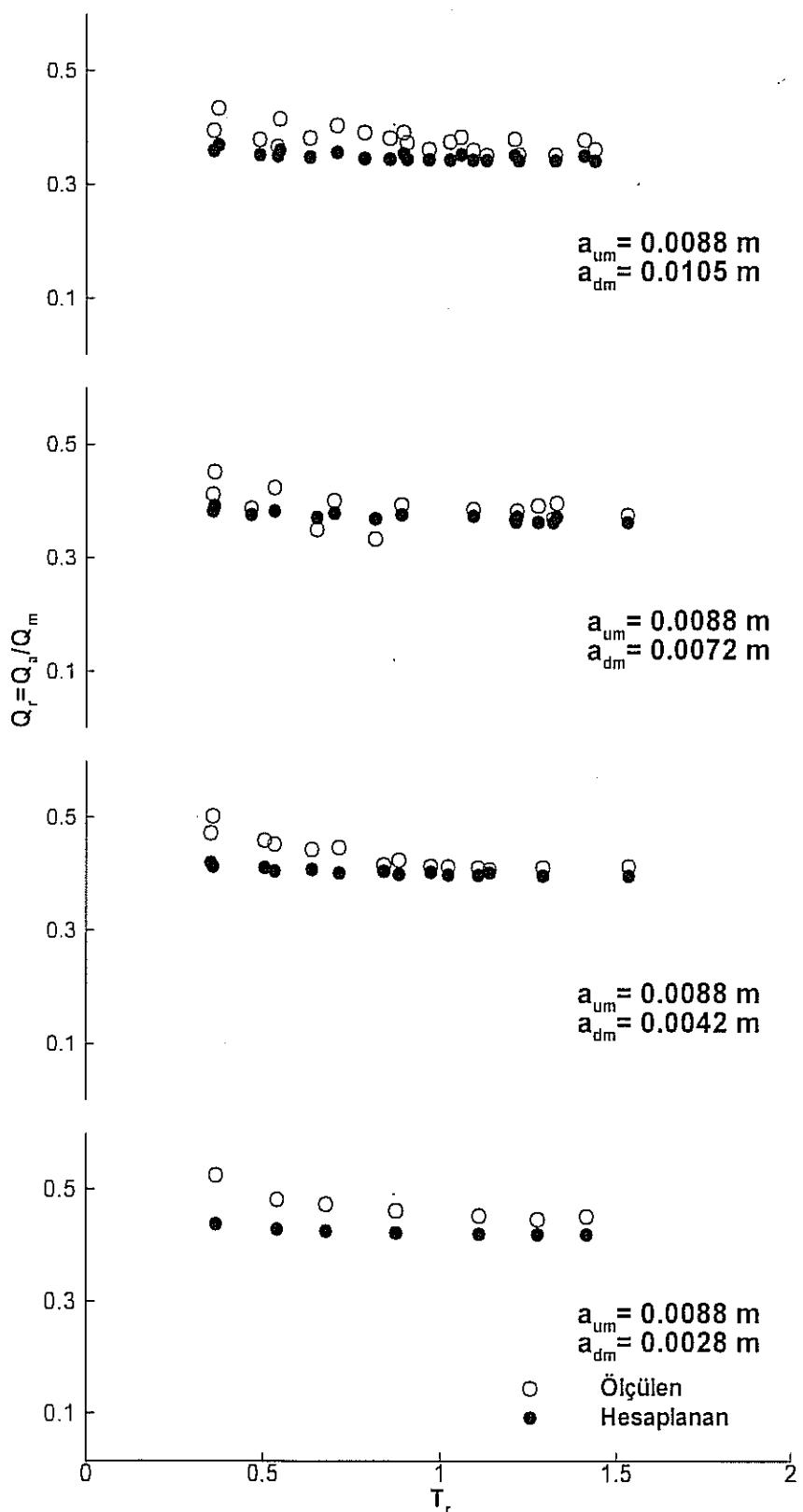
Figür 4.8 Hava ihtiyacı oranları ($Q_m = 0.120 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_r = 0.162$).



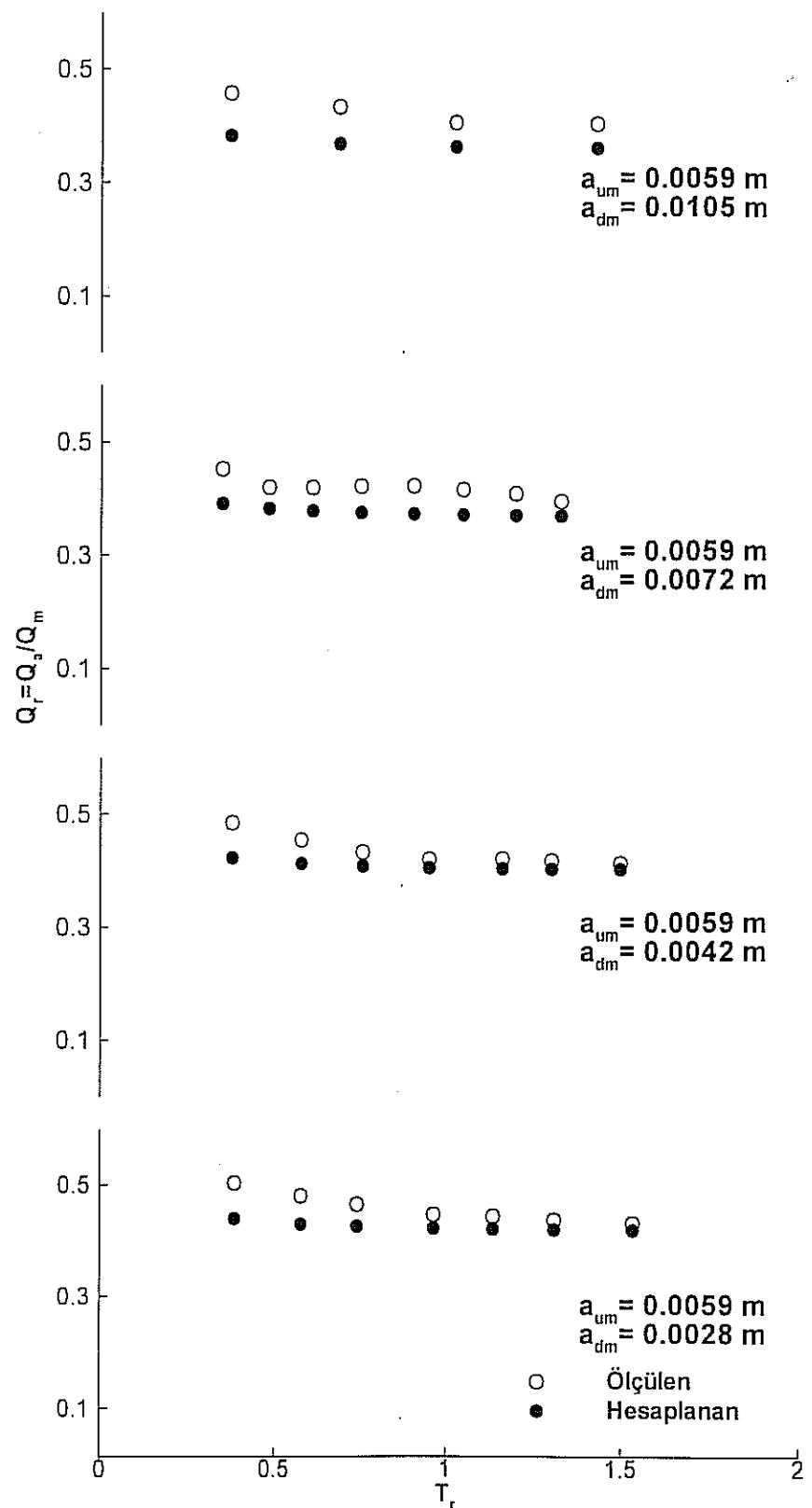
Figür 4.8 Devamı



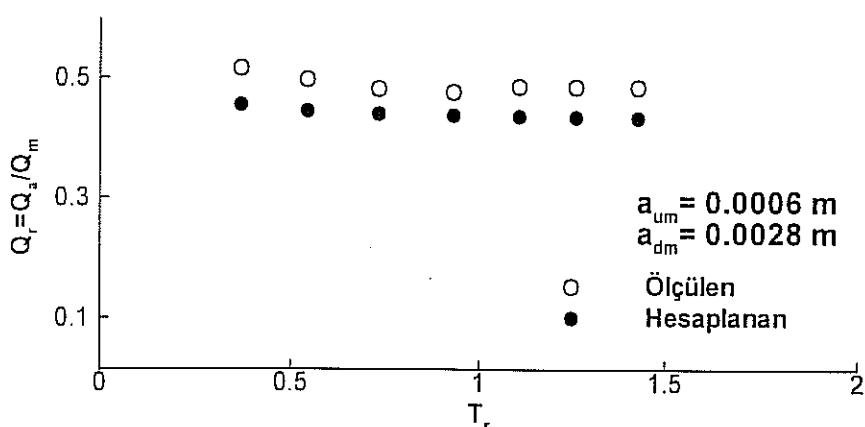
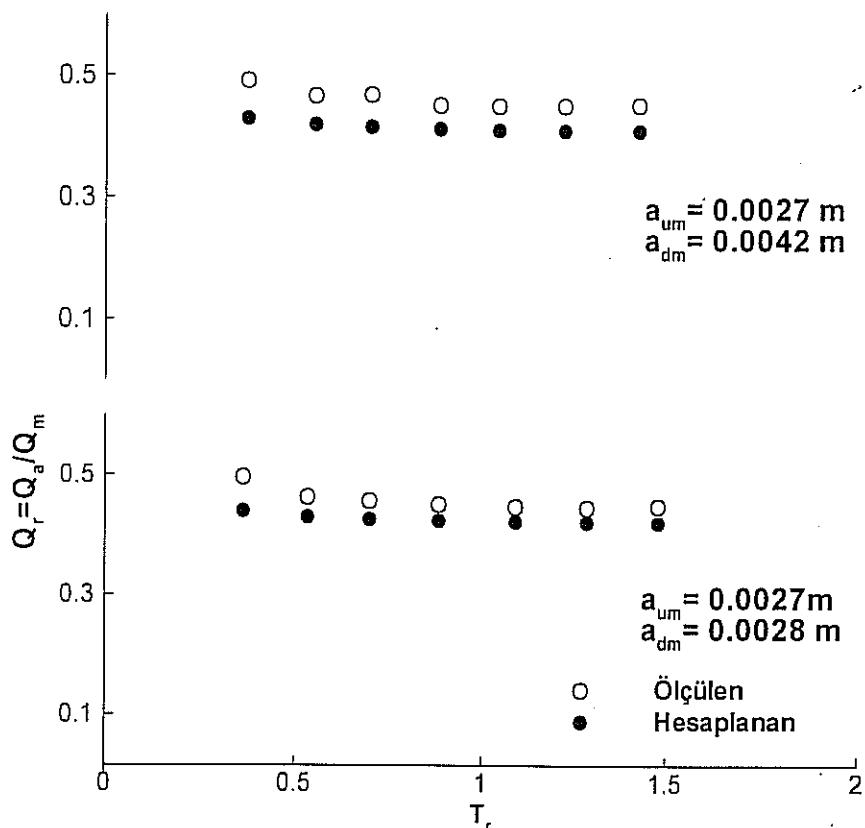
Figür 4.8 Devamı



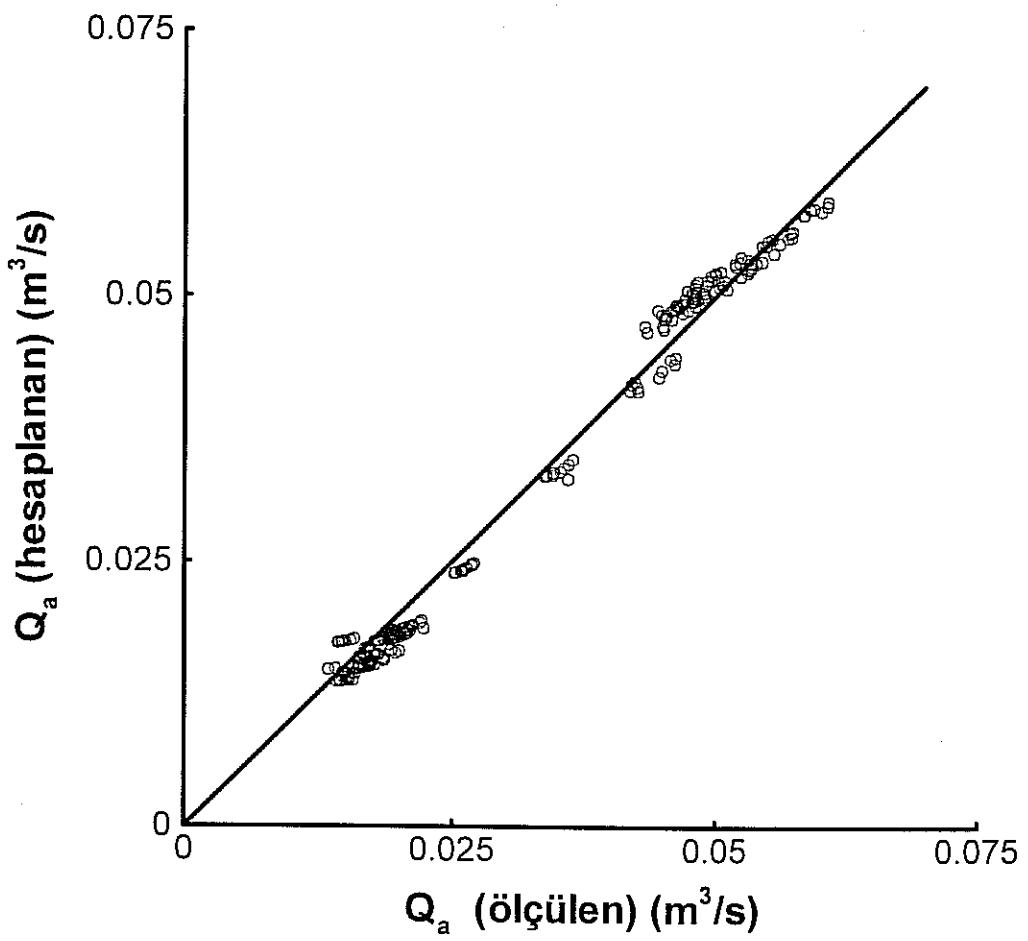
Figür 4.9 Hava ihtiyacı oranları ($Q_m = 0.040 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_r = 0.023$).



Figür 4.9 Devamı



Figür 4.9 Devamı



Figür 4.10 Hesaplanan ve ölçülen hava ihtiyacı arasında bağılılışılık

Prototip ölçeğinde, yukarıda yazılan nedenlerin tümü, yeterince büyük akım debisi ve yüksek Reynolds sayıları nedeniyle giderilmiş olacağından, matematik model hesaplamaları daha güvenilir olacaktır.

5. KAPAK ALT-DUDAK BASINÇ ÖLÇÜMLERİ

5.1 Kapak detayları

Bu bölümde basınç ölçümleri için özel olarak tasarlanmış bir kapak kullanılmıştır. Kapak detayları Figür 5.1 ve Foto 5.1'de gösterilmiştir. Kapak, kapak yuvasının yan duvarlarında bulunan yönlendirici raylar arasında hareket etmektedir. Alt-dudak bölümü ayrılabılır bir parça olarak tasarlanmıştır. Dört farklı açıda dudak parçası üretilmiştir. Deneylerde sadece dudak bölümü değiştirilerek farklı dudak açıllarında basınç dağılımı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dudak üzerinde basınç ölçümü için yerleştirilmiş beş adet piyezometre ucu bulunmaktadır. Basınç ölçüm uçları, birbirinden etkilenmemeleri için, akıma dik yönde (dudak boyunca) farklı konumlarda yerleştirilmiştir. Ölçüm uçlarına bakır borular bağlanmış ve kapak yuvası içinden dışarıya atmosfere çıkışına kadar basınç iletimi bakır borularla sağlanmıştır. Kapak yuvası dışında ise plastik manometre hortumları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan dudak açıları, pratik uygulamada kullanılabilenek açı aralığını kapsamaktadır.

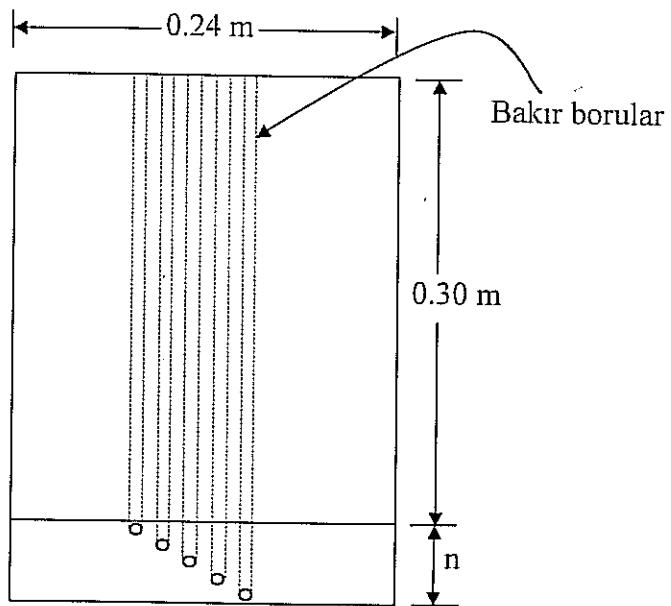
Tablo 5.1 Kapak dudak açıları

Dudak simbolü	n (cm)	Dudak açısı (derece)
A	2	26.5
B	3	36.7
C	4	44.7
D	5	51.6

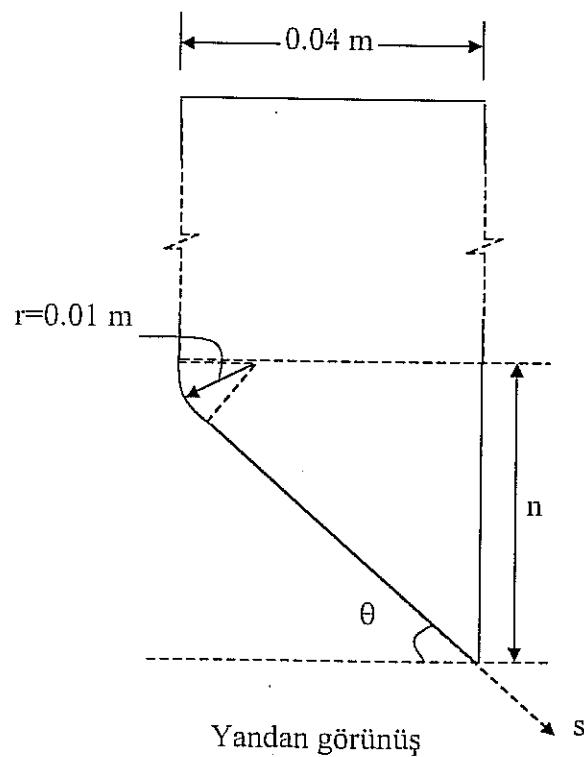
Figür 5.1'de gösterilen dudak detayları ile ilgili sayısal bilgiler Tablo 5.1'de verilmiştir. Dudak kapak birleşimindeki yuvarlama ve uç plaka uygulamaları bu çalışmada değişken olarak dikkate alınmamıştır.

5.2 Basınç ölçümü

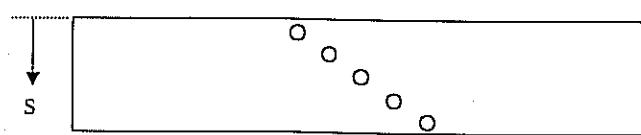
Beş noktadan eş-zamanlı basınç ölçümü yapılmıştır. Kapak dudağı yakınındaki türbülans ve büyük çevrintiler nedeniyle basınç kayıtlarında türbülans salınımıları mevcuttur. Dudakta etkiyen basınç kuvvetinin bulunması için, zamanda ortalama basınç dağılıminin, dudak üzerinde integralının alınması gereklidir. Bir ölçüm



Önden görünüş



Yandan görünüş



Altın görünüş

Figür 5.1 Kapak detayları.

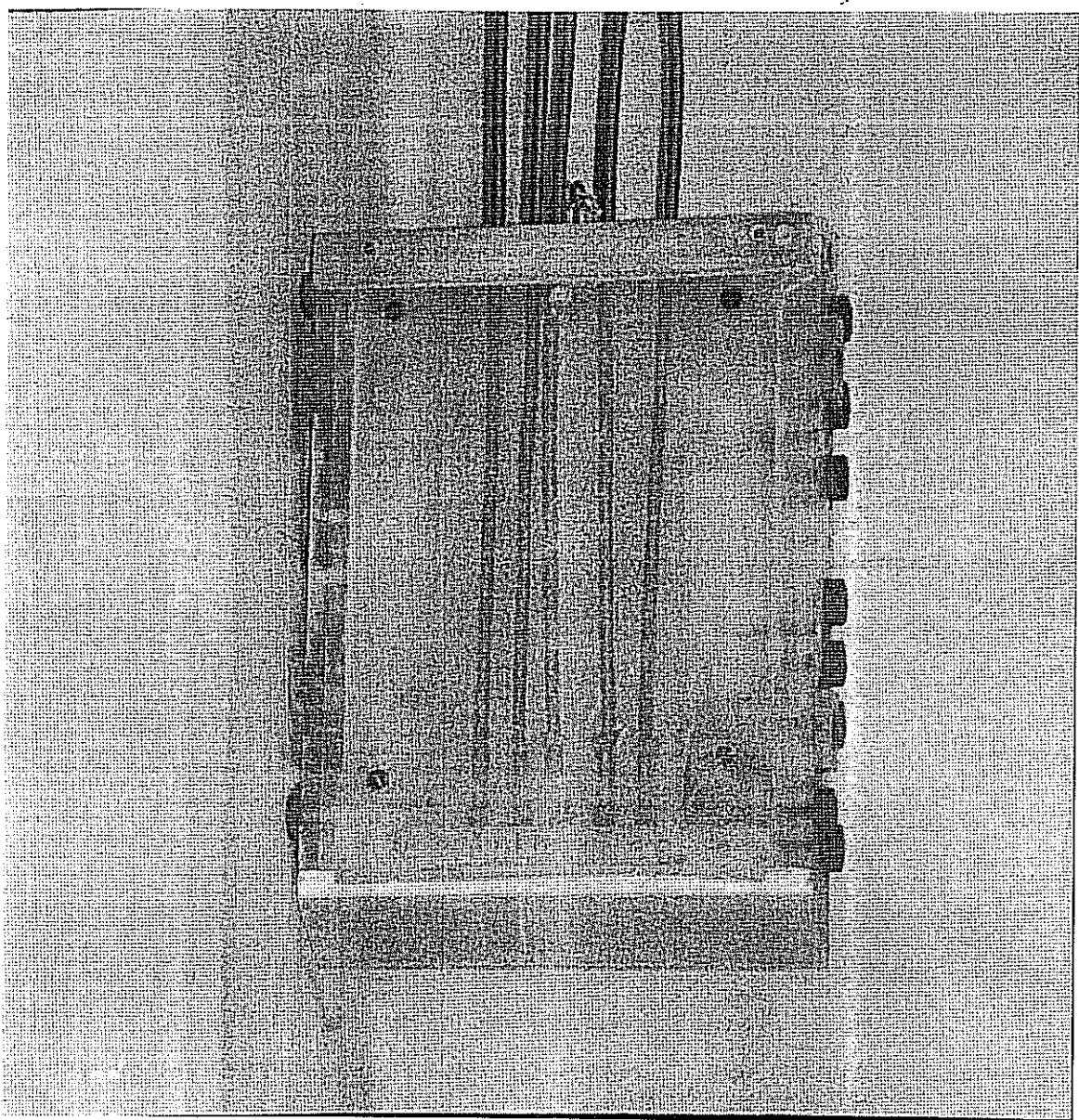
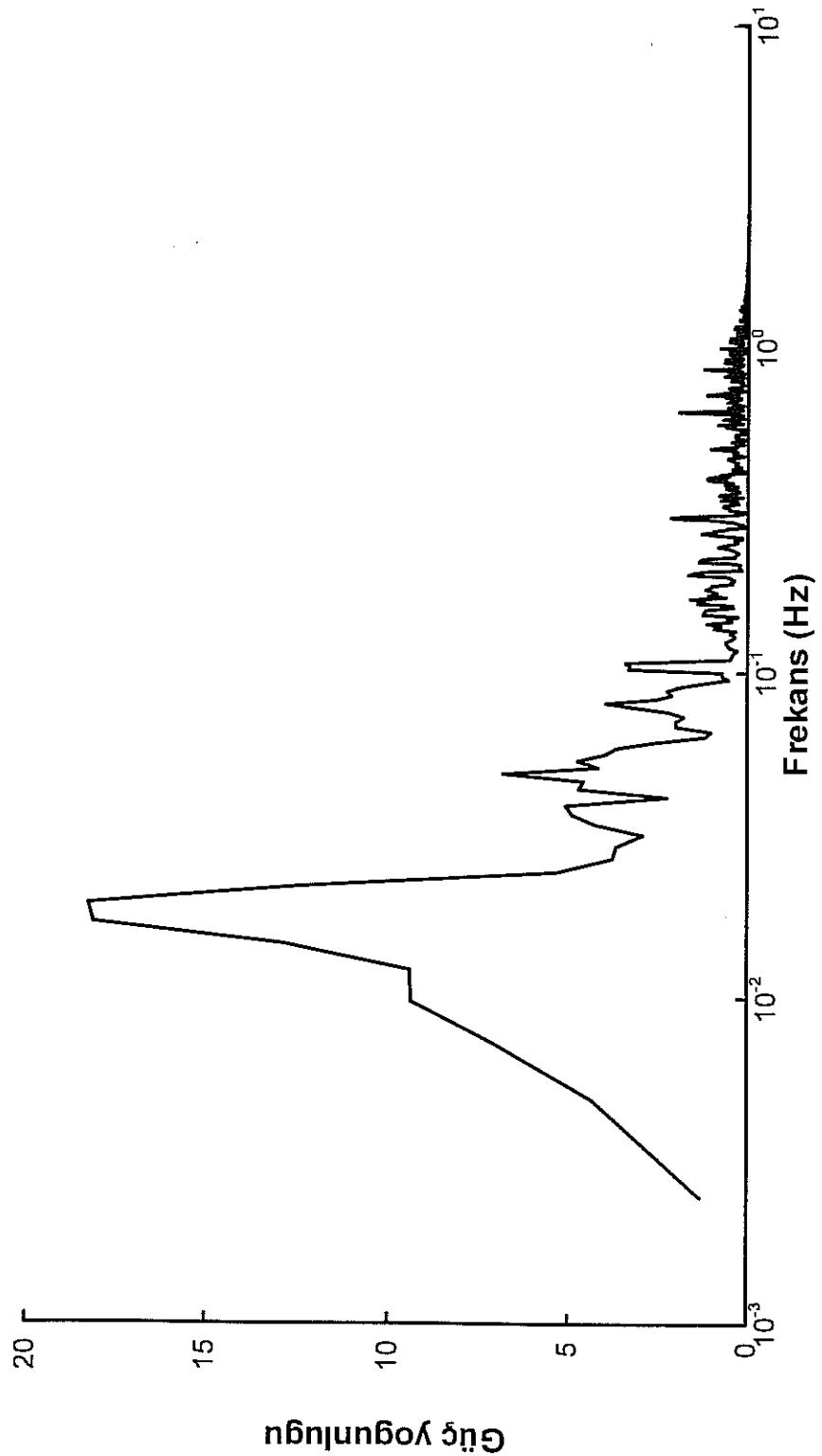


Foto 5.1 Basınç ölçümünde kullanılan kapak.

noktasında, zamanda ortalama basıncın doğru olarak bulunabilmesi için, basınç kaydının yeterli çözünürlükte ve kayıt süresinin de yeterince uzun olması gerekir. Basınç kaydının sayısallaştırılmasında, örnekleme sıklığı ve kayıt süresine karar verebilmek için, bir ölçüm noktasında 100 Hz örnekleme sıklığı ile yaklaşık 40 dakikalık bir kayıt alınmıştır. Bu basınç kaydının spektral analizi yapılmış güç yoğunluğunun frekans üzerinde dağılımı bulunmuştur (Figür 5.2). Güç yoğunluğu dağılımı figüründen, basınç kaydındaki tüm enerjinin 0.003 Hz ve 2 Hz arasında kaldığı görülmektedir. Olası türbülans salınımlarını yeterince detaylı yakalayabilmek bakımından, basınç kayıtlarının sayısallaştırılmasında örnekleme sıklığı 20 Hz olarak belirlenmiştir. Güç dağılımındaki alt limit olan 0.003 Hz ise toplam kayıt süresinin belirlenmesinde dikkate alınmıştır. Frekansın tersi salınım peryodu olduğuna göre, alınan basınç kaydındaki en uzun süreli salınım yaklaşık 333 s sürmektedir. Zamanda ortalama işleminde, yeterli sayıda örnek bulunması bakımından, basınç kayıt süresi 10 dakika olarak belirlenmiştir.

5.2.1 Basınç ölçümünde takip edilen adımlar

- a) Kapak, tünel tavanının üzerinde bir noktaya kaldırılır. Basınç ölçüm tüplerindeki hava temizlenir. Beş basınç ölçüm noktasına ek olarak Rezervuar su seviyesi de altıncı kanaldan kaydedilir.
- b) Kapak tam açık olduğu için türbülans az olduğundan, bu noktada ölçüm uçlarında etkiyen basınç, referans değer olarak, gözle, bir manometre yardımıyla okunur. Aynı basınçlar elektronik olarak da kaydedilir.
- c) Kapak, basınç kaydının yapılacağı konuma getirilir.
- d) Rezervuar su seviyesi ve sistem debisi sabitlenir. Sisteme geçen debi büyük olduğunda, küçük kapak açıklıklarında, kapak mansabındaki su boşalarak sisteme hava girebilir. Kapak dudağı yakınında oluşan çevrinti, hava zerrelerinin basınç ölçüm noktalarına ulaşmasına ve ölçüm tüplerinin içine sızmasına neden olabilir. Bu durumda basınç kayıtları doğru olmayacağından, basınç kayıtları alınırken, piyezometre çizgisinin tünel tavanı seviyesinin altına inmesine izin verilmemiştir. Bu koşul, herhangi bir kapak açıklığında, çalışılabilir en büyük debi için bir sınırlama getirmektedir.
- e) Sistemdeki akımın zamandan bağımsız hale gelmesi için 20 dakika beklenir.
- f) Altı basınç dönüştürücüden eş-zamanlı olarak 10 dakika süreyle kayıt yapılır.



Figür 5.2 Güç yoğunluğu dağılımı

- g) Sistem debisi, debi ölçüm kanalında ölçülür.
- h) Sayısallaştırılan basınç kaydı bilgisayar ortamında saklanır.
- i) Deneyler diğer kapak konumları için tekrarlanır.
- j) Deney serisi diğer dudak açıları için tekrarlanır.

5.2.2 Veri işleme

İlk aşamada, elektronik yükselticinin çıktıları sayısallaştırdıktan sonra voltaj olarak bilgisayar ortamında kayıt edilirler. Kayıtlar üzerinde herhangi bir işlem yapılmadan, basınç dönüştürücülerin kalibrasyon fonksiyonları uygulanarak voltaj değerleri piyezometrik yük birimine dönüştürülür. Daha sonra, yapılacak değerlendirmeye bağlı olarak, deney koşullarından kaynaklanan bazı etkilerin giderilmesi için düzeltmeler yapılacaktır.

5.2.3 Ölçülen debi ve piyezometrik yüklerde uygulanan düzeltmeler

Öncelikle, kalibre edilerek piyezometrik yük birimine dönüştürülmüş kayıtlar, zamanda ortalamaları alınarak türbülans salınımlarından arındırılmıştır. Deneyler sırasında, rezervuar su seviyesi yan savak yardımıyla sabitlenir. Ancak, her deney başlangıcında, rezervuarı tam olarak aynı seviyede sabitlemek pratik açıdan olanaksızdır. Rezervuar su seviyesinin deneyden deneye bir miktar değişimi kaçınılmazdır. Rezervuar yan savak kret kotu 2.3 m dir. Tüm deneylerin 2.3 m rezervuar seviyesinde yapılmaktadır. Her deneyde rezervuar seviyesi de kayıt edildiğinden, deney sırasında rezervuar seviyesinin, hedeflenen değer olan 2.3 m den sapma miktarı bilinmektedir. Ölçülen debi ve piyezometre değerlerinin rezervuar seviyesindeki saptamlardan arındırılması için bir düzeltme yöntemi geliştirilmiştir.

Bu projedeki ilk deneyler sırasında, kuyruk suyu seviyeleri ölçülmüş ve debinin fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.

$$H_4 = 0.139 + 1.95Q_e \quad (5.1)$$

burada Q_e deney sırasında sistemden geçen debinin savaktan ölçülen değeridir. Rezervuar ve kuyruk suyu arasında enerji ilişkisi tüm sistem için toplam bir yük kaybı ifadesi ile yazılabilir.

$$H_{1e} - K_T \frac{Q_e^2}{2gA_t^2} = H_4 \quad (5.2)$$

burada H_{1e} deney sırasında ölçülen rezervuar su seviyesi, K_T tüm sistemin toplam yük kayıp katsayısıdır. H_u Denklem 5.1'den ve K_T Denklem (5.2)'den hesaplanır. Rezervuar savak kotu 2.3 m olduğunda, sistemden geçecek olan debiyi bulmak için Denklem (5.2), Denklem (5.1)'den de faydalananarak yeniden yazılır.

$$2.3 - K_t \frac{Q_c^2}{2gA_t^2} = 0.139 + 1.95Q_c \quad (5.3)$$

burda Q_c referans rezervuar kotu için düzeltilmiş sistem debisidir. Denklem (5.3) Q_c için çözülür. Bundan sonraki adım ise, ölçülen piyezometre değerinin, düzeltilmiş debi için hesaplanmasıdır. Enerji denklemi bu kez, rezervuar ile piyezometre ölçümünün yapıldığı kapak bölgesi arasında yazılır.

$$H_{1e} - K_p \frac{Q_e^2}{2gA_t^2} = h_e + \frac{Q_e^2}{2gA_g^2} \quad (5.4)$$

burda h_e ölçülen piyezometrik yük ve K_p rezervuardan ölçüm noktasına kadar hidrolik yük kayıplarını ifade etmek için kayıp katsayısıdır. Denklem (5.4)'den K_p hesaplanır. Denklem (5.4) bu defa düzeltmiş değerler için yazılır.

$$2.3 - K_p \frac{Q_c^2}{2gA_t^2} = h_c + \frac{Q_c^2}{2gA_g^2} \quad (5.5)$$

Bu son denklemden düzeltmiş h_c değeri hesaplanır. Referans rezervuar seviyesi için yapılan bu düzeltme işlemi tüm piyezometrik ölçümlerin zamanda ortalama değerlerine uygulanır.

5.3 Alt-dudakta aşağı-çekme kuvveti

Aşağı-çekme kuvvetinin bağımlı olduğu temel değişkenler dudak açısı, θ , boyutsuz kapak açıklığı, y , ve sistem debisidir. Aşağı çekme kuvveti yerine boyutsuz bir katsayı ve debi yerine Reynolds sayısı kullanıldığında tüm değişkenler boyutsuz olacaktır. Reynolds sayısı olarak kapak kesiti Reynolds sayısı, ($R_g = U_g D_h / v$) kullanılacaktır. Aslında, yeterince büyük Reynolds sayılarında aşağı-çekme kuvveti Reynolds sayısından bağımsız olmalıdır. Deneylerde, öncelikle bu durum belirlenecek ve daha sonra, aşağı-çekme kuvveti katsayısı θ ve y nin fonksiyonu olarak ifade edilecektir.

5.3.1 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı tanımı

Düzeltilmiş piyezometrik yük dağılımlarından aşağı-çekme kuvvet katsayısı hesaplanır. Piyezometrik yükler kapak dudağının yatay düzlemdeki projeksiyon alanı, A_h , üzerinde entegre edilir ve alana bölünerek dudak üzerindeki ortalama piyezometrik yük bulunur.

$$\bar{h}_L = \frac{\int h_c dA_h}{A_h} \quad (5.6)$$

Literatürde (Naudascher 1991) kapak dudağı için aşağı-çekme kuvvet katsayısı tanımı aşağıdaki denklemde olduğu gibi yazılmıştır.

$$K_B = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_3}{U_c^2 / 2g} \quad (5.7)$$

burada \bar{h}_3 kapak mansabında daralmış kesitte piyezometrik yük ve U_c aynı kesitte ortalama hızdır. Bu iki parametrenin (\bar{h}_3 ve U_c) her ikisi de kapak bölgesi tasarım detaylarına ve akım koşullarına bağlıdır. Bu nedenle, Denklem (5.7) ile verilen aşağı-çekme kuvveti katsayısı ölçüldüğü modeldeki detaylardan etkilenir. Bu çalışmada, ölçümlerin yapıldığı deney düzeneğinin katsayı üzerindeki ikincil etkilerini azaltmak amacıyla, yeni bir katsayı tanımı yapılacaktır.

$$K_L = \frac{h_2^* - \bar{h}_L}{U_g^2 / 2g} \quad (5.8)$$

burada h_2^* kapak bölgesindeki piyezometrik seviye olup, rezervuar seviyesinden alık kayıplarının çıkarılmasıyla elde edilir.

$$h_2^* = H_1 - \Delta h_e - \frac{U_t^2}{2g} \quad (5.9)$$

Kapak yuvasındaki su seviyesi, h_2 , üst-akımdan etkilendiği için h_2^* dan farklıdır. K_L tanımında kullanılan parametreler (h_2^* , U_g) kapak bölgesi tasarım detaylarından tamamen bağımsızdır.

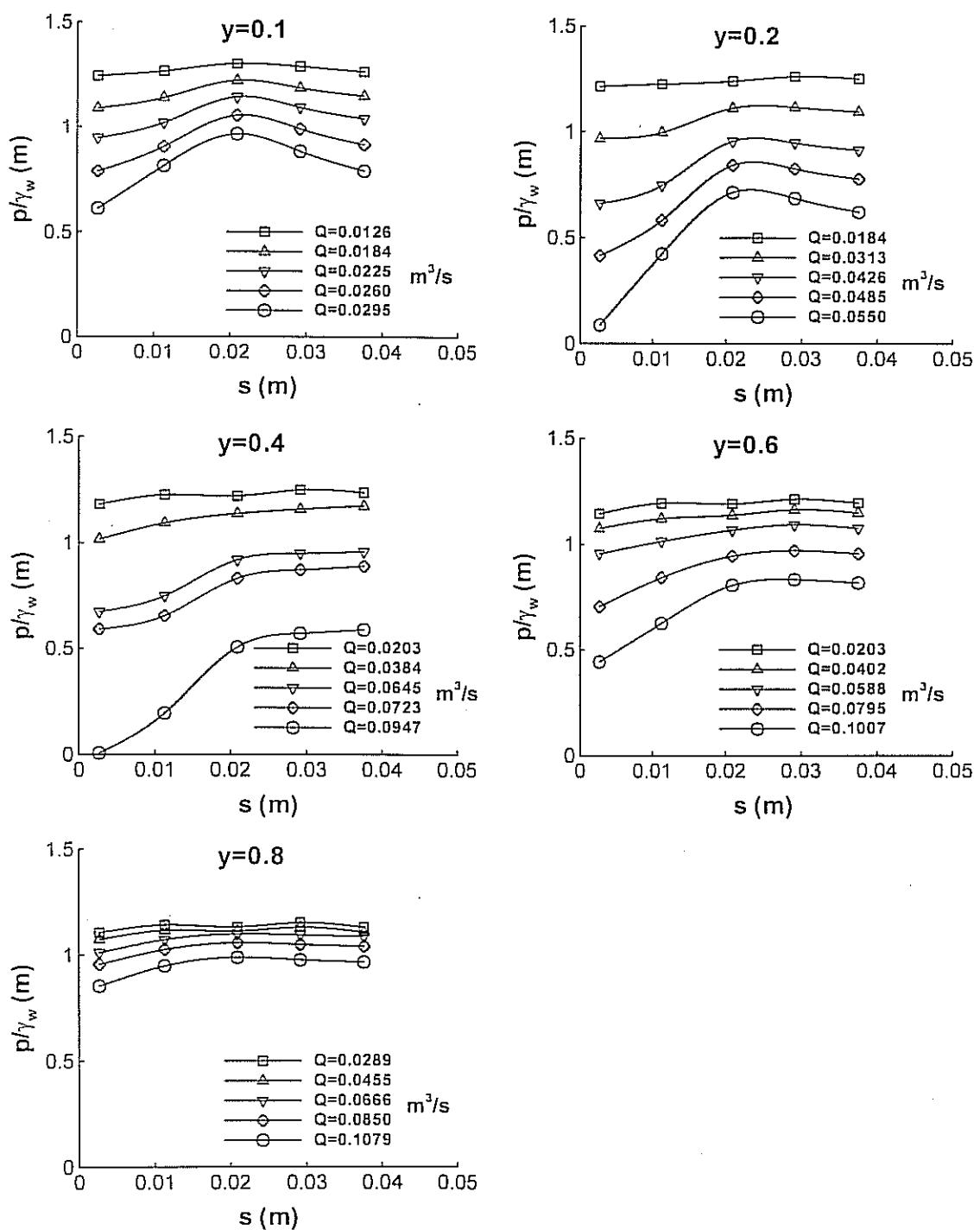
5.3.2 Alt-dudakta basınç dağılımları (Deney C.1)

Aşağı çekme kuvvetinin değişimlerini inceleyebilmek amacıyla, dört farklı dudak açısı ile, kapağın beş farklı açıklık konumunda ($y=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) ve her konum için beş farklı debide basınç dağılımları elde edilmiştir. Kapak dudağında ölçülen basınç dağılımları, eğimli dudak yüzü boyunca (akım yönünde) s

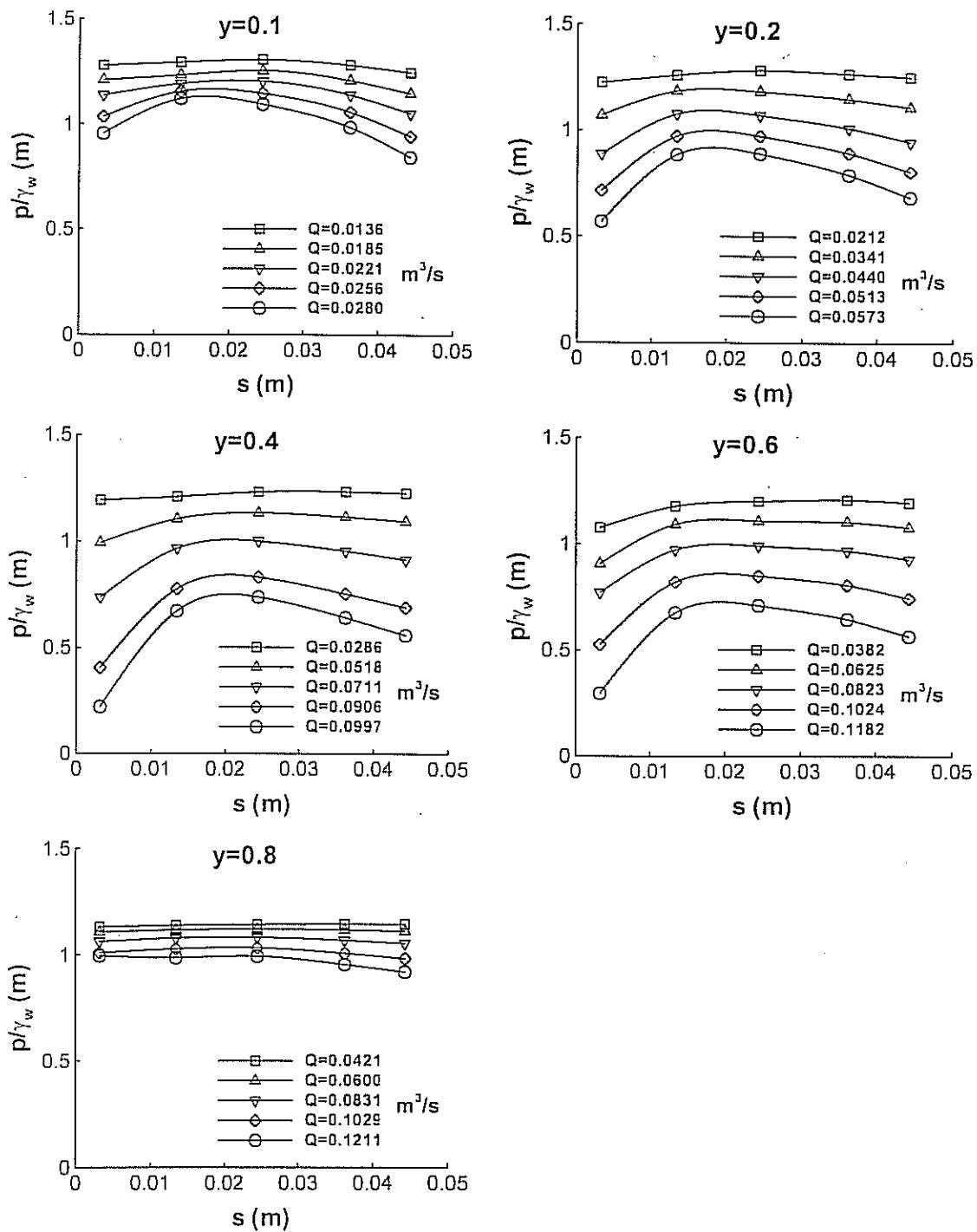
mesafesinin fonksiyonu olarak Figürler 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'da sırasıyla Dudak A, B, C ve D için sunulmuştur. Menba kenarındaki basınç, akım çizgilerinin eğriliği ve bazen de akım ayrışması nedeniyle daha düşüktür. Bu bölgedeki akım çizgilerini görüntülemek amacıyla, ölçüm memelerinden boyalı enjekte ederek fotoğraflar alınmıştır (Foto 5.2). Fotoğraflarda akım ayrışmasını görüntülemek mümkün olmamıştır. Uzun süre gözlendiğinde, anlık olarak akım ayrışması oluşmakta ancak, kalıcı (stabil) olmadığından kısa süre sonra kaybolmaktadır. Bu tür anlık olaylar, basınç kayıtlarında sivri salınımlar olarak görülmektedir.

5.3.3 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı – Reynolds sayısı ilişkisi

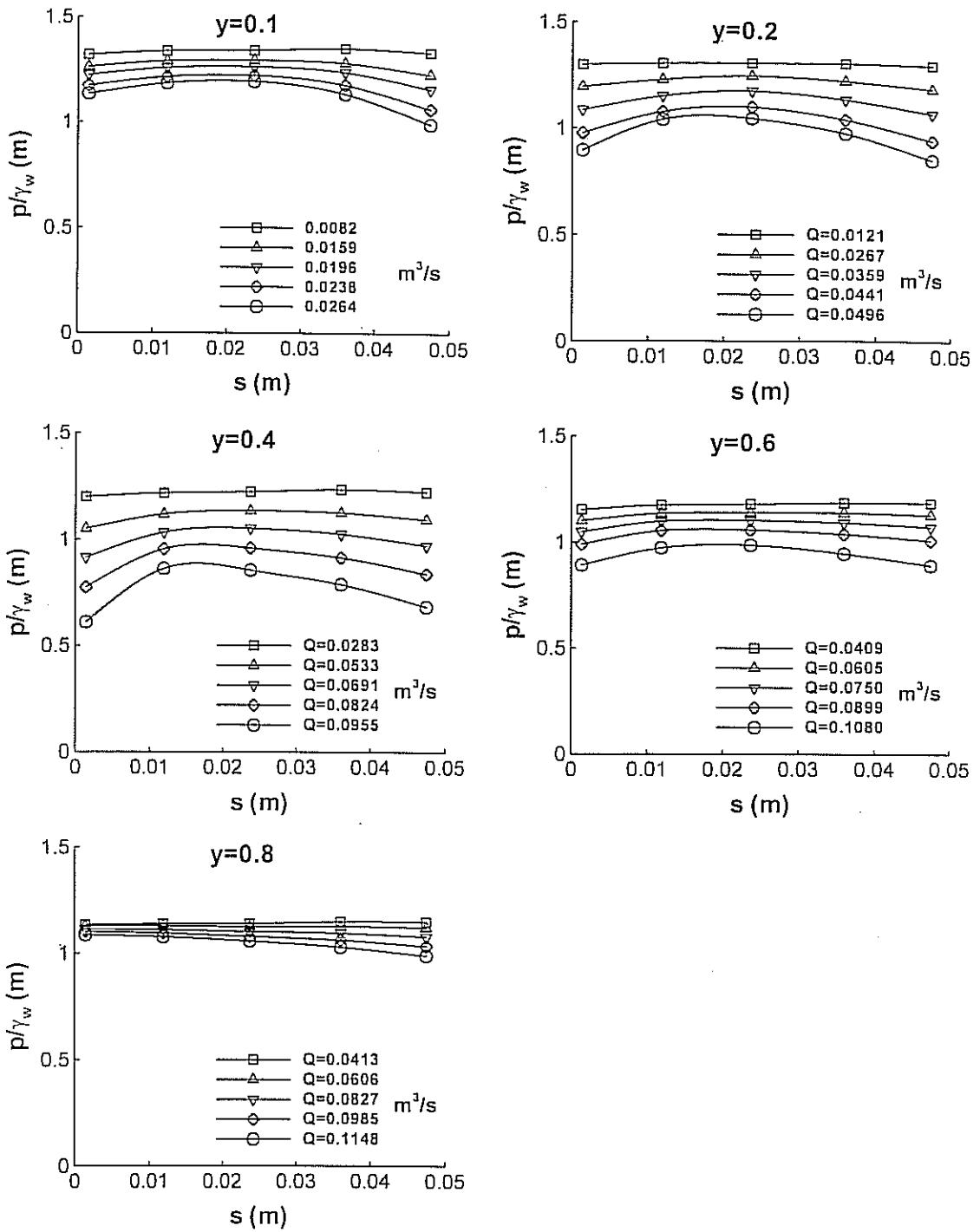
Reynolds sayısının 165000'den büyük olduğu durumlarda, aşağı-çekme katsayısının, Reynolds sayısından bağımsız olduğu rapor edilmiştir (Naudascher 1991). Mevcut modelde de, yapılacak ölçümlerin Reynolds sayısı ile ilişkisini gösterebilmek amacıyla, C.1 serisi deneyleri değerlendirilmiştir. Bu deneylerde, sabit kapak açıklığında türbin vanası yardımıyla sistem debisi değiştirildiğinden, kapağın belirli bir konumunda, K_L sayısının Reynolds sayısı ile değişimi elde edilmiştir. Sonuçlar dört farklı dudak açısı için derlenerek Figürler 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 ve 5.11'de verilmiştir. Küçük kapak açıklıklarında, K_L katsayısının asimtotik değerleri, yaklaşık olarak $R_g=150000$ civarında ulaşılmaktadır. Kapak açıklığı arttıkça, K_L sayısının sabit bir değere asimtotik olarak yakınsaması, daha yüksek Reynolds sayılarında gerçekleşmekte, ulaşılması gereken Reynolds sayısı 400000'lere kadar çıkabilmektedir. Mevcut deney düzeneğinde her kapak açıklığı için bu koşul sağlanabilmektedir. Prototip yapıda, Reynolds sayısının her zaman yeterince büyük olacağı varsayılırsa, K_L sayısının Reynolds sayısından bağımsız ifade edilmesi uygun olacaktır. Bu bölümde ölçülen K_L sayıları incelendiğinde, K_L sayısı ölçümünü, her kapak açıklığı için, sistemin o açıklıkta geçirebileceği en büyük debide yapmak, en güvenli yol olacaktır. Burada en büyük debi, kapağın mansap bölümünün hiç hava almadan, tamamen su ile dolu olması koşulu ile sınırlanır. Bu koşul, basınç ölçüm tüplerine hava kaçmaması için alınan bir önlemdir.



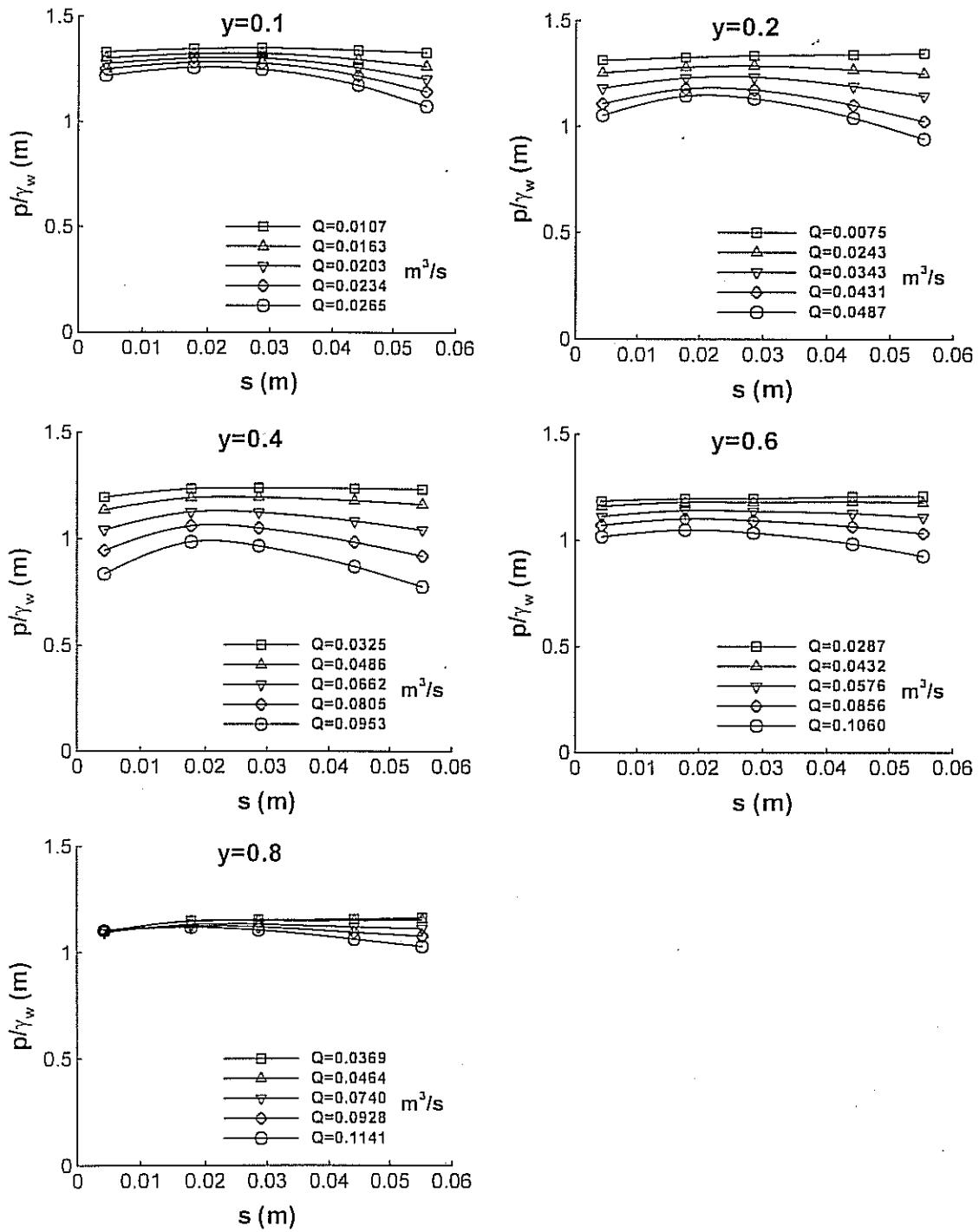
Figür 5.3 Alt-dudakta basınç dağılımları, Dudak A.



Figür 5.4 Alt-dudakta basınç dağılımları, Dudak B.



Figür 5.5 Alt-dudakta basınç dağılımları, Dudak C.



Figür 5.6 Alt-dudakta basınç dağılımları, Dudak D.

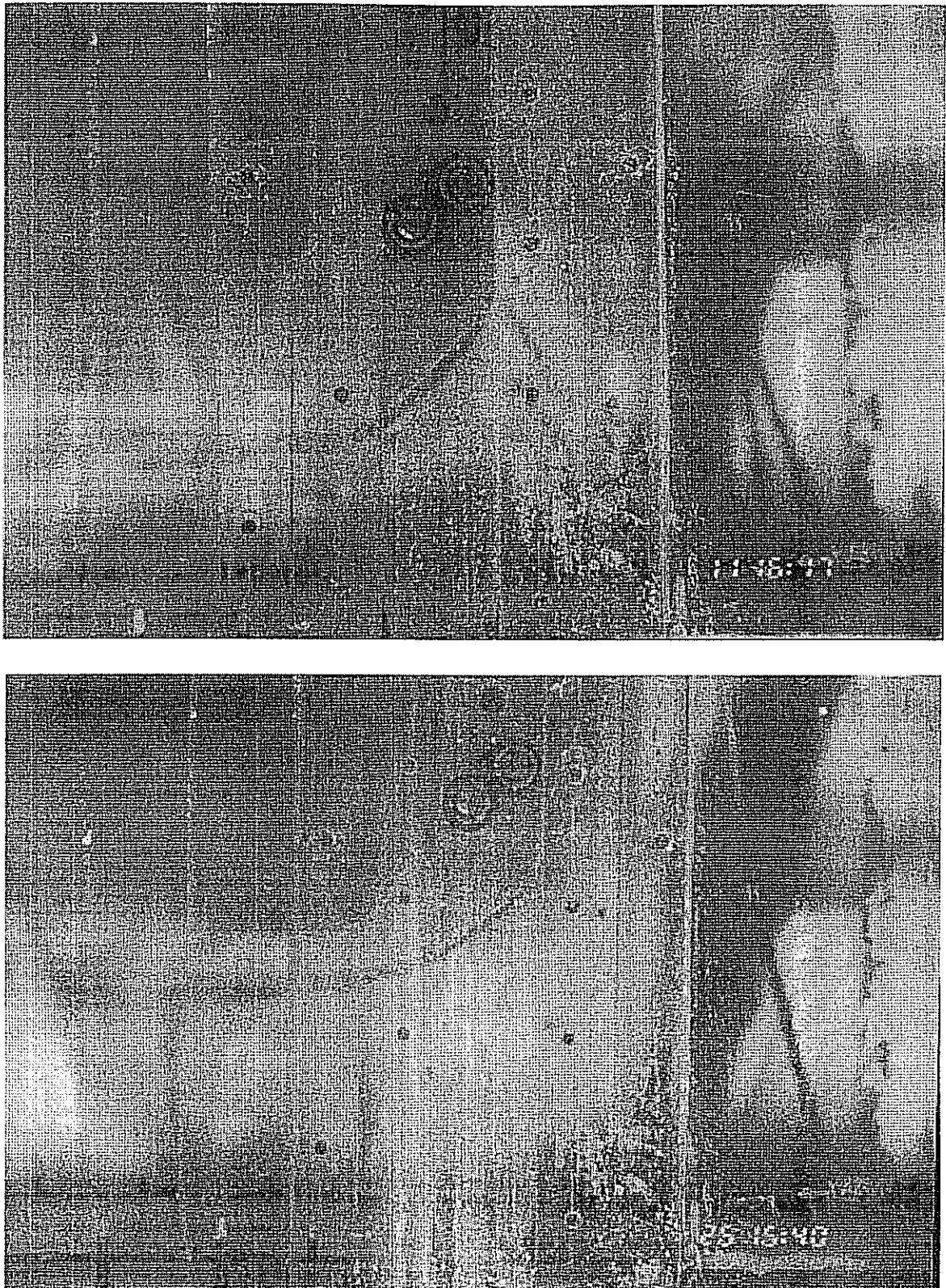
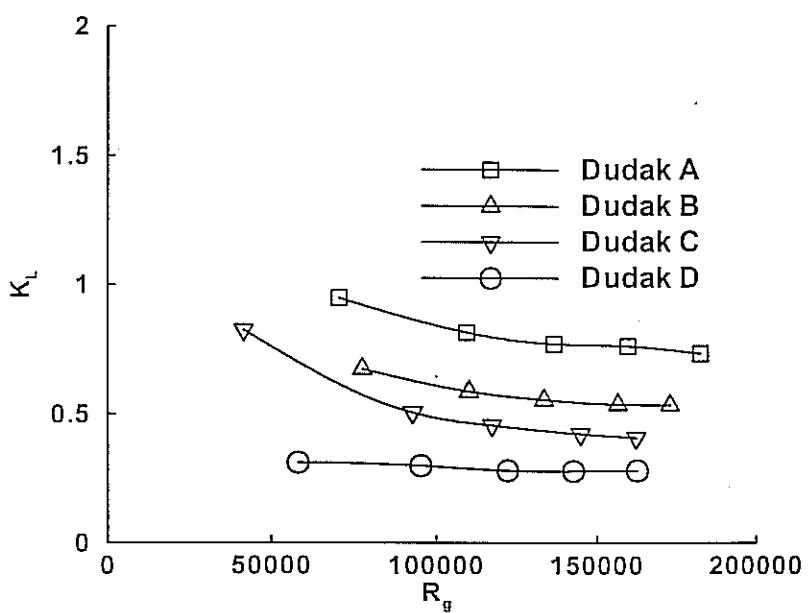
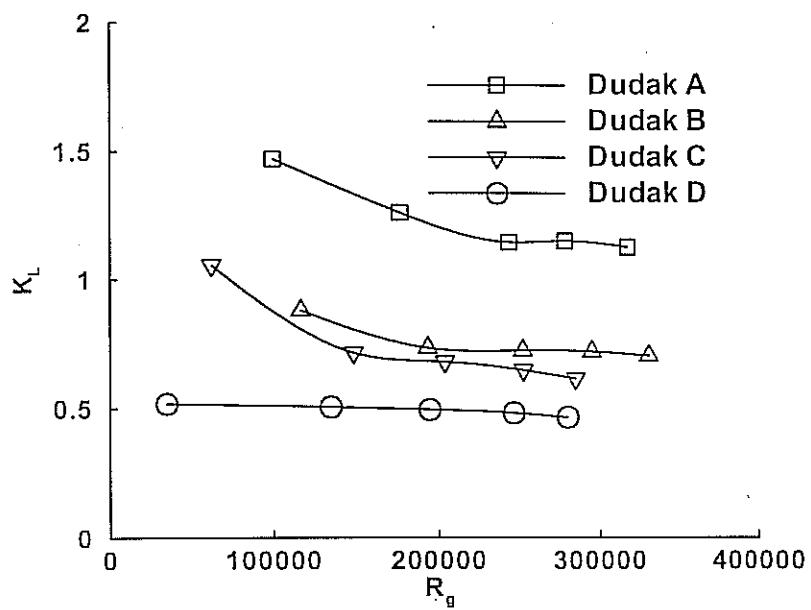


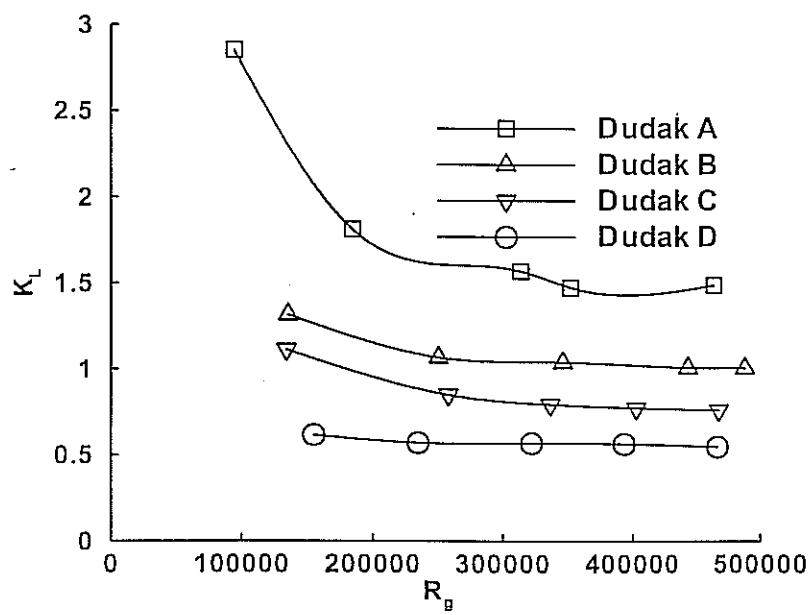
Foto 5.2 Kapak dudağında akım çizgileri.



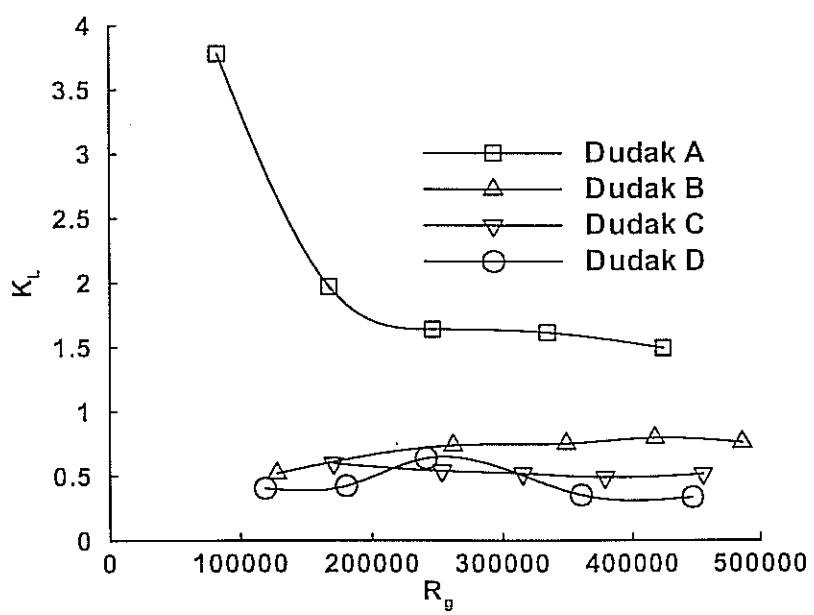
Figür 5.7 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı-R_g ilişkisi, y=0.1



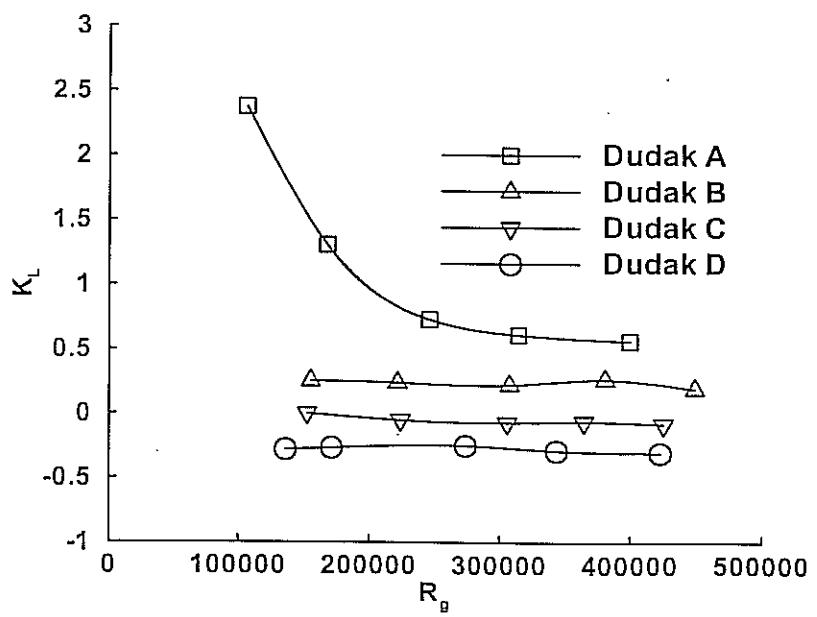
Figür 5.8 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı-R_g ilişkisi, y=0.2



Figür 5.9 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı- R_g ilişkisi, $y=0.4$



Figür 5.10 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı- R_g ilişkisi, $y=0.6$



Figür 5.11 Aşağı-çekme kuvvet katsayısı- R_g ilişkisi, $y=0.8$

5.3.4 Kapak açıklığı ve alt-dudak açısının fonksiyonu olarak aşağı-çekme kuvvet katsayısı (Deney C.2)

Bu çalışmanın en önemli sonuçlarından biri olan K_L katsayısı, iki boyutsuz değişkenin (θ , y) fonksiyonu olarak ifade edilmiştir (Figür 5.12). Figürün her iki ucunda, kapak tam açık ($y=1$) ve kapak tam kapalı ($y=0$) konumlarında, K_L sıfırdır. Bunun nedeni, bu iki konumda, kapak dudağında etkiyen ortalama piyezometrik yükün kapak kesitindeki ortalama piyezometrik yüze eşit olmasıdır. En yüksek aşağı-çekme kuvveti yaklaşık olarak % 30~40 kapak açıklığı civarlarında oluşmaktadır. Azalan dudak açısı, aşağı-çekme kuvvetini artırmaktadır. Kapağın % 90 açıklık civarlarında, aşağı-çekme kuvvet katsayısı negatiftir ve kapak dudağındaki ortalama piyezometrik yükün, kapak kesitindeki ortalama piyezometrik yükten daha büyük olduğuna işaret eder. Bu durumda, aşağı-çekme kuvveti yerine yukarı kaldırma kuvveti oluşur ve kapağın (yeterince ağır olmaması durumunda) kapatılamaması gibi bir sonuçla karşılaşılabilir.

Son olarak, K_L , kapak açıklığının ve dudak açısının sürekli bir fonksiyonu olarak ifade edilecektir. Önce K_L , y nin bağımsız değişken olduğu bir polinom olarak yazılır.

$$K_L = c_1 + c_2 y + c_3 y^2 + \dots + c_n y^{n-1} \quad (5.10)$$

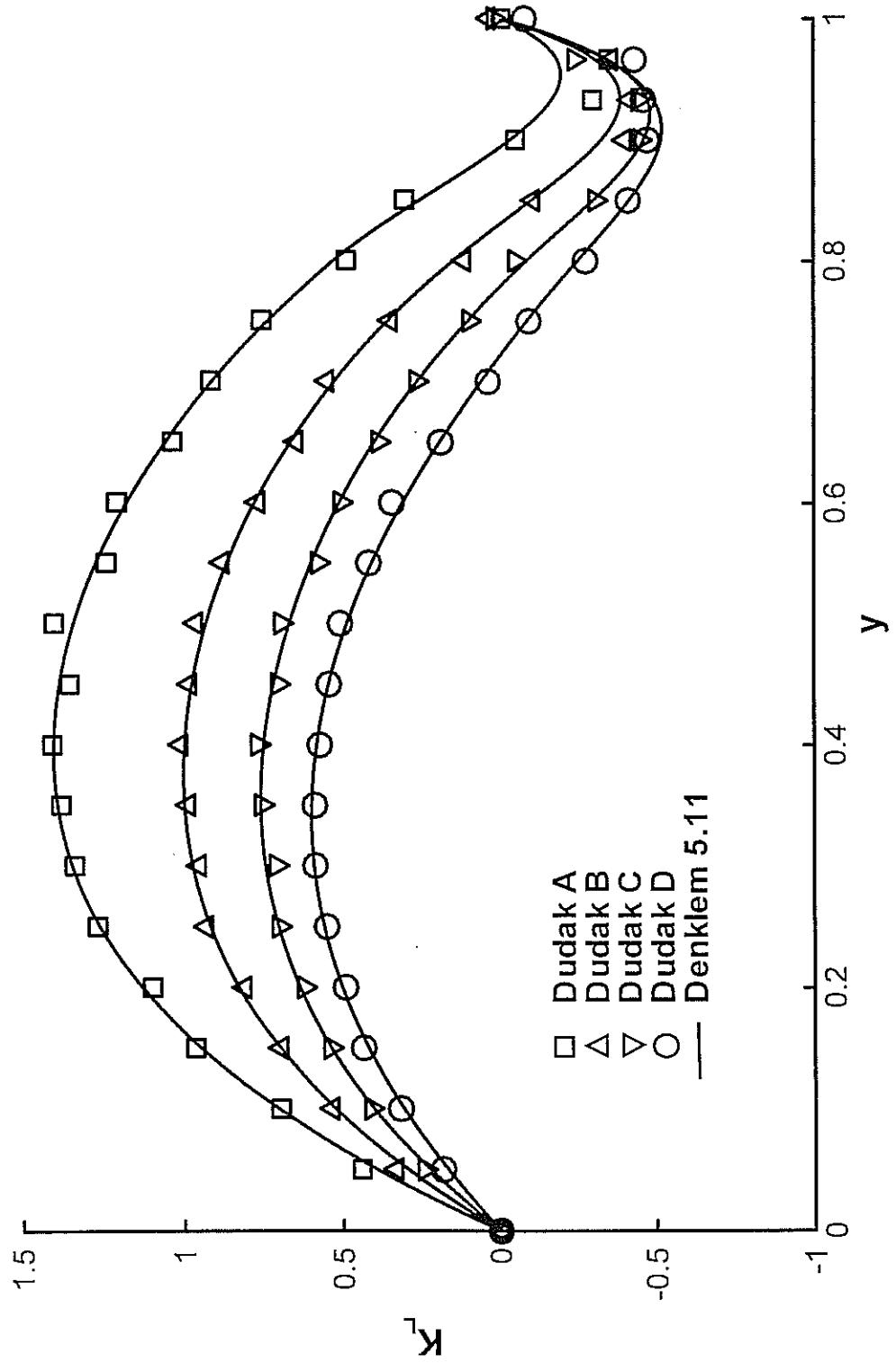
burada c_i , θ nin fonksiyonudur. Figür 5.12'de görüleceği gibi, K_L 'nin eğriliği $y=0.8$ civarında işaret değiştirmektedir. Bu nedenle, K_L fonksiyonu iki parça halinde verilecektir.

$0 < y < 0.8$ için

$$\begin{aligned} K_L = & (14.584 - 0.2296\theta + 0.000355\theta^2)y + (17.111 - 0.3353\theta + 0.01065\theta^2)y^2 \\ & + (-9.0974 + 1.772\theta + 0.030452\theta^2)y^3 + (14.246 - 1.394\theta + 0.0217\theta^2)y^4 \end{aligned} \quad (5.11.a)$$

$0.8 \leq y < 1$ için

$$\begin{aligned} K_L = & (316.9 - 2.124\theta - 0.03056\theta^2) + (-1485.9 + 4.643\theta + 0.22213\theta^2)y \\ & + (2605.9 + 2.708\theta - 0.54872\theta^2)y^2 + (-2006.7 - 12.153\theta + 0.56784\theta^2)y^3 \\ & + (569.89 + 6.926\theta - 0.2107\theta^2)y^4 \end{aligned} \quad (5.11.b)$$



Figür 5.12 Aşağı-çeknne kuvvet katsayısı, K_L

Denklem (5.11), dudak açısının 26° den büyük ve 52° den küçük değerleri için ve kapağın her konumunda ($0 < y < 1$) geçerlidir. Aşağı-çekme kuvveti katsayısı, K_L , denklem (5.11)'den bulunduktan sonra aşağı-çekme kuvveti hesaplanabilir.

5.3.5 Aşağı-çekme kuvveti katsayısı, literatür verileri ile karşılaştırma

Bölüm 5.3.1'de tartışıldığı üzere, bu çalışmada literatürdekinden farklı bir aşağı-çekme kuvveti katsayısı tanımlanmıştır. Elde elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için, burada yapılan basınç ölçümünerinden Naudascher (1991) de verilen tanıma uygun olarak K_B katsayısı da hesaplanmıştır. Sonuçlar Naudascher (1991)'den alınan bazı verilerle birlikte Figür 5.13'te sunulmuştur. Genelde, ölçümler uyumlu görünümekle beraber, her iki çalışmada kullanılan dudak açıları aynı olmadığından, veriler arasındaki uyumu ölçmek mümkün olmamıştır. Naudascher (1991) ölçümülerinde eksik gözüken, kapak tam kapalı ve tam açık konumlarına yakın bölgelerdeki değerler, bu çalışmada daha ayrıntılı olarak ölçülmüştür.

5.3.6 Aşağı-çekme kuvveti hesaplamaları

Verilen bir dudak açısı ve kapak açıklığı için Denklemler (5.11), (2.5), (5.8) ve (5.9)'dan faydalananarak, dudaktaki ortalama piyezometrik yük hesaplanır.

$$\bar{h}_L = H_1 - (1 + K_e) \frac{U_t^2}{2g} - K_L \frac{U_g^2}{2g} \quad (5.12)$$

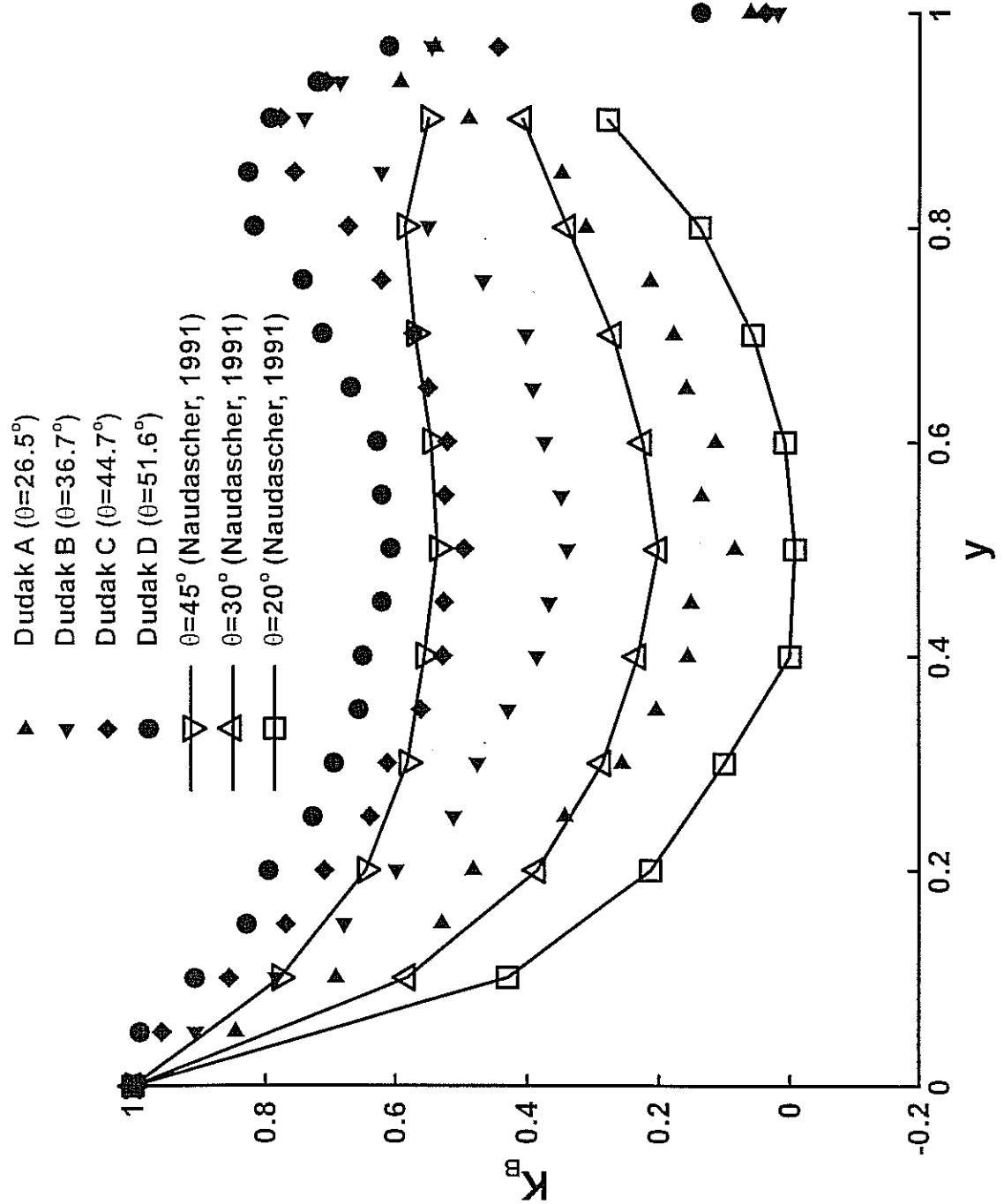
Piyezometrik yükten, kapak dudağındaki aşağı çekme kuvveti hesaplanır.

$$F_{dL} = (\bar{z}_{gL} - \bar{h}_L) \gamma_w A_h \quad (5.13)$$

burada \bar{z}_{gL} kapak dudağının eğimli yüzeyinin alansal ortasının yüksekliği, A_h yatay düzlemede, dudak projeksiyon alanıdır. Kapağın tepe yüzünde etkiyen kuvvet, kapak yuvasındaki su seviyesinden hesaplanır.

$$F_{dT} = (h_2 - \bar{z}_{gT}) \gamma_w A_h \quad (5.14)$$

burada \bar{z}_{gT} kapak tepe yüzünün orta yüksekliğidir. Kapak üzerinde etkiyen toplam



Figür 5.13 Aşağı-çekme kuvvet katsayıısı, K_B , karşılaştırması

aşağı çekme kuvveti, alt dudakta ve tepe yüzünde etkiyen kuvvetlerin toplamıdır.

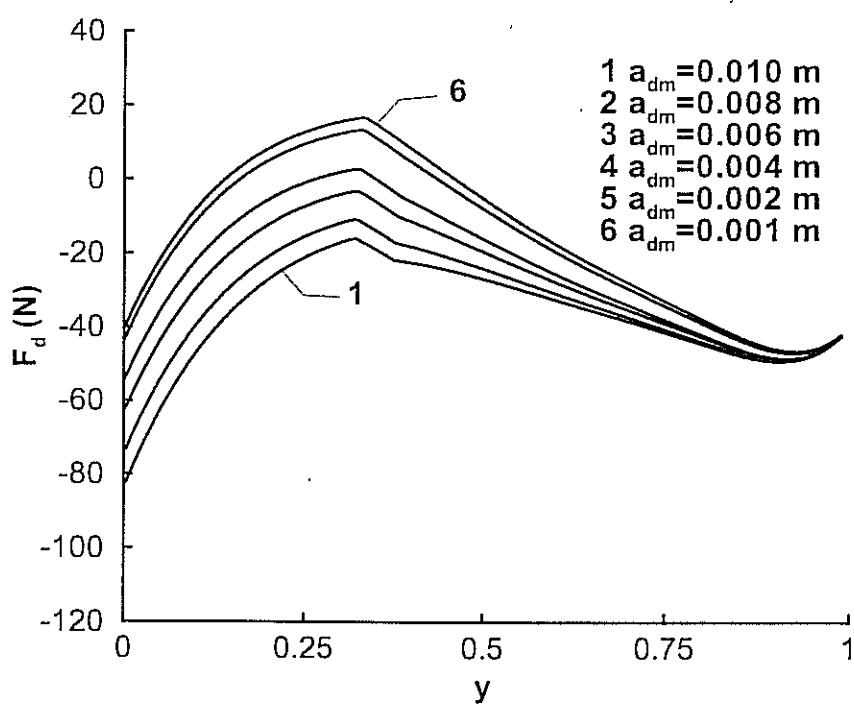
$$F_d = F_{dL} + F_{dT} \quad (5.15)$$

Aşağı-çekme kuvveti hesaplarını örneklemek amacıyla, önceki bölümlerde anlatılan matematik model koşturularak, bazı sızma açıklıkları ve başlangıç debileri için çözümler elde edilmiştir. Kapatma hızı 10 s alınmış olup, mevcut model için acil durumlarda gerçekleştirilen hızlı kapatma durumuna örnek oluşturmaktadır. Dudak açısı, $\theta=45^0$, menba yüzü sızma açıklığı, $a_{um}=0.01$ m olarak seçilmiştir. Hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri Figürler 5.14, 5.15, 5.16 ve 5.17'de sunulmuştur. Her Figürde mansap sızma açıklığının azalan değerleri için ayrı eğriler bulunmaktadır. Figürlerde aşağı yönde kuvvet pozitif, yukarı yönde kuvvet negatiftir. Mansap açıklığı daraldıkça, aşağı-çekme kuvvetindeki artış dikkat çekicidir. Kapak tam açık veya tam kapalı olduğunda, aşağı-çekme kuvveti negatif olup, hidrostatik kaldırma kuvvetine eşit olmalıdır. Ancak, hızlı kapatma durumlarında, kapak mansabındaki hava basıncı negatif olduğundan, hidrostatik kaldırma kuvvetini azaltır.

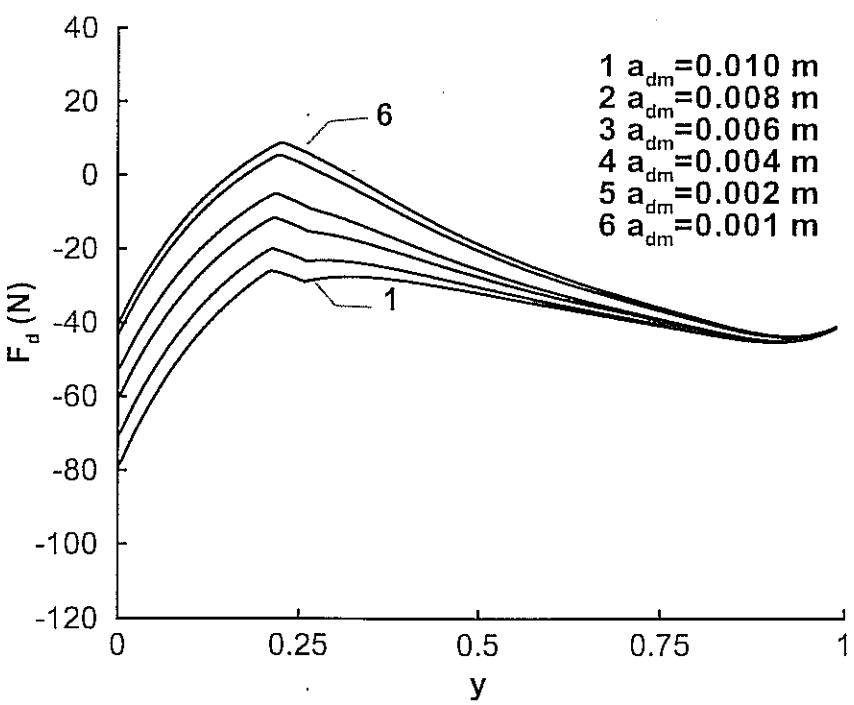
Aşağı-çekme kuvvetinin maksimum değeri, kapağın debi üzerinde yavaşlatıcı etkisinin yoğunlaştığı noktada oluşmaktadır. Büyük başlangıç debilerinde, kapağın frenleme etkisi daha erken başlar ve bu nedenle maksimum aşağı-çekme kuvveti de daha büyük açıklıklarda oluşur. Mansap yüzündeki sızma açıklığının yeterince büyük olduğu durumlarda, kapak yuvasında su yükselmeyeceği için, tüm kapak açıklıklarında, aşağı-çekme kuvveti yerine, daima yukarı-kaldırma kuvveti oluşacaktır. Yukarı-kaldırma kuvvetleri, (kapak ağırlığına bağlı olarak) kapağın güvenle kapanmasını önleyebileceğinden, dikkatle incelenmesi gereken bir durumdur.

5.4 Basınç kayıtları spektral analizleri

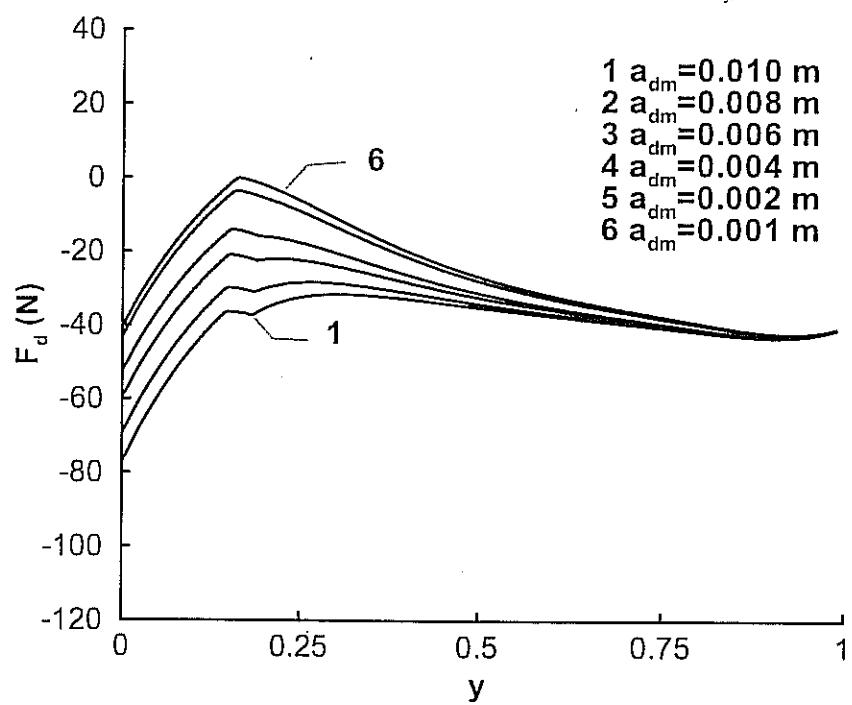
Kapak dudağında kaydedilen basınçlar o bölgenin türbülans karakterini de içinde taşımaktadır. Belirli frekanslardaki güçlü basınç salınımları kapak için yorucu, tahrip edici titreşimler yaratabilir. Hidrolik modeller üzerinden akım nedeniyle oluşabilecek titreşimi tam olarak çalışabilmek zordur. Genellikle, hidrolik modellerde kapakların titreşmesine izin verilmez. Ayrıca, kapak, kütlesi ve malzeme özellikleri bakımından modellenmediği için, titreşim probleminin



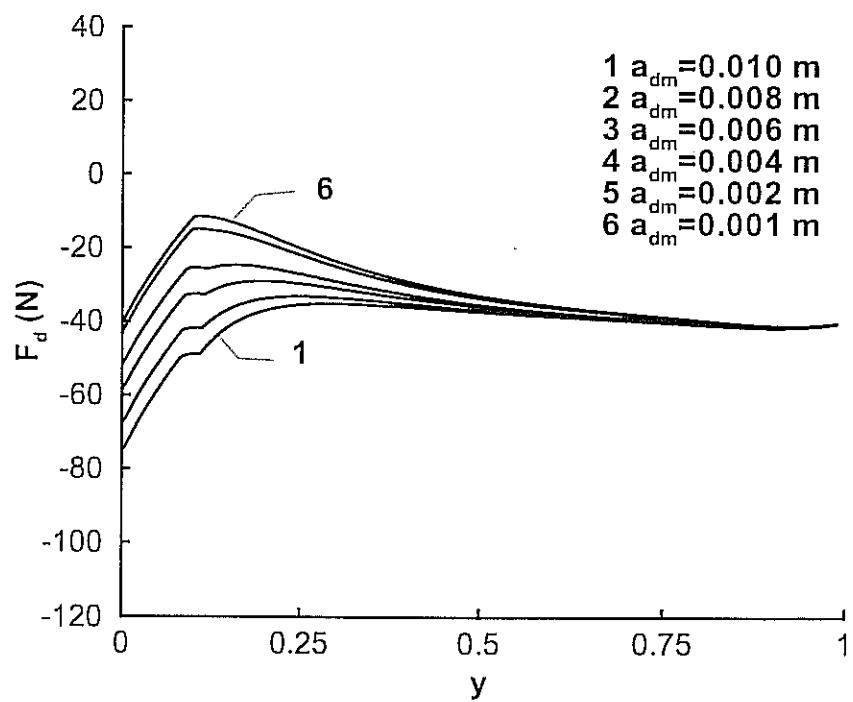
Figür 5.14 Matematik modelden hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri
($\theta = 45^\circ$, $T_c = 10$ s, $a_{um} = 0.01$ m, $Q_m = 0.120 \text{ m}^3/\text{s}$)



Figür 5.15 Matematik modelden hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri
($\theta = 45^\circ$, $T_c = 10$ s, $a_{um} = 0.01$ m, $Q_m = 0.090 \text{ m}^3/\text{s}$)



Figür 5.16 Matematik modelden hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri
($\theta = 45^0$, $T_c = 10 \text{ s}$, $a_{um} = 0.01 \text{ m}$, $Q_m = 0.070 \text{ m}^3/\text{s}$)



Figür 5.17 Matematik modelden hesaplanan aşağı-çekme kuvvetleri
($\theta = 45^0$, $T_c = 10 \text{ s}$, $a_{um} = 0.01 \text{ m}$, $Q_m = 0.050 \text{ m}^3/\text{s}$)

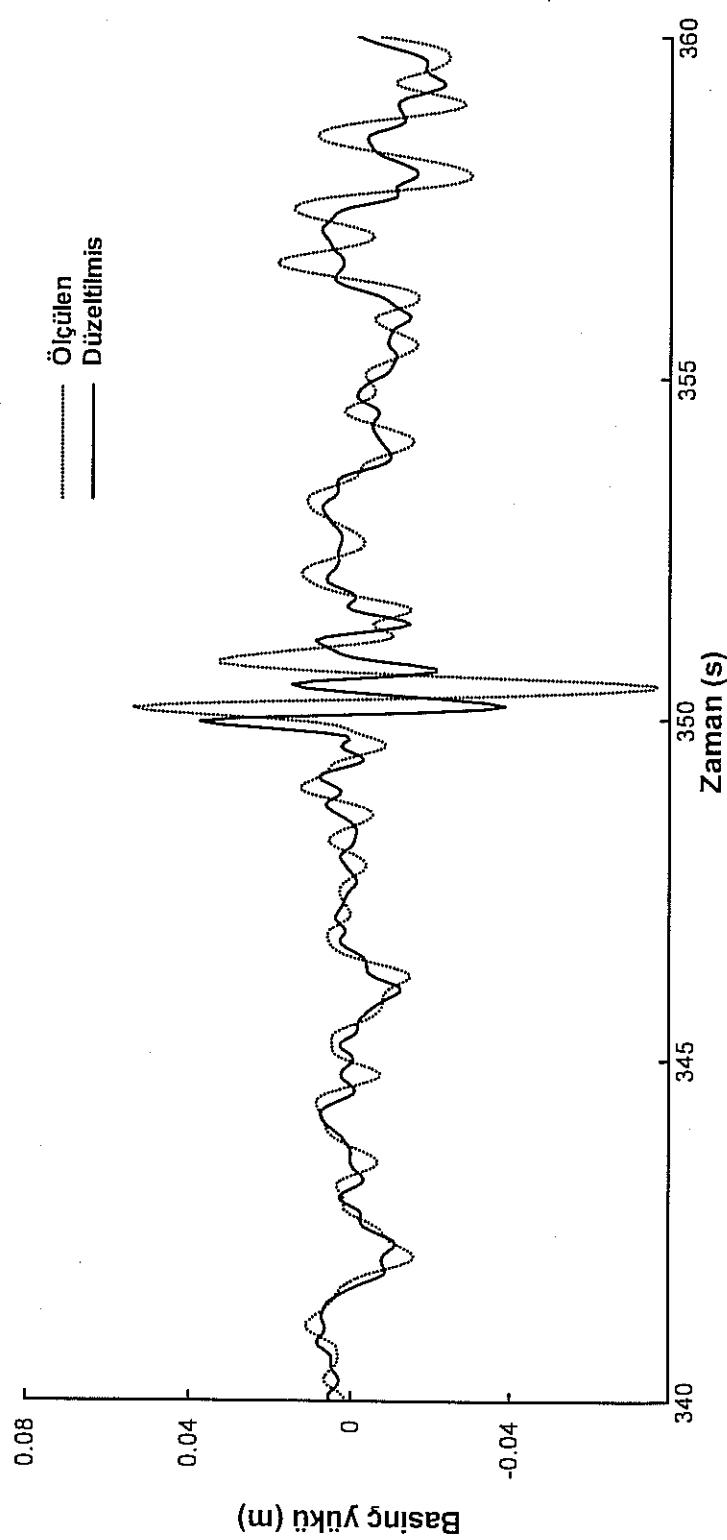
incelenmesine uygun değildir. Bununla beraber, kapak yüzeylerinde etkiyen basınç salınımlarının hakim frekansı ve bu frekanstaki güç yoğunluğu, olası titreşim problemlerinin ilk belirtileridir. Hidrolik modelde, kapak esnemez (rigid) olsada, kapağın kritik noktalarından elde edilen basınç salınımının spektral analizi ve gücün yoğunlaştığı hakim frekansın belirlenmesi elastik modeller için iyi bir ön bilgi kaynağıdır. Titreşim açısından, daha çok kapağın ön ve arka yüzlerindeki basınç salınımıları önemlidir. Bu çalışmanın genel içeriği bakımından, sadece dudak üzerinde basınç kayıtları yapılmıştır ve bu katıtlar spektral analize tabi tutularak incelenecektir.

Kapak dudağı üzerindeki beş noktada yapılan basınç kayıtlarının asıl amacı basınç kuvvetlerini hesaplamak olduğundan, sadece zamanda ortalama değerlerinin bulunması o aşamada yeterli idi. Spektral analiz yapılması durumunda ise, zamana bağımlı basınç salınımının yeterli çözünürlük (resolution) ve doğrulukla (accuracy) ölçülmüş olması gereklidir. Modelde kullanılan kapağın kesit alanı (0.04×0.25 m) ve kullanılan malzeme kalınlığı (0.01 m) dikkate alındığında, standart basınç dönüştürücülerin kapak içine yerleştirilmesi olanaklı değildir. Minyatür tipte, doğrudan basınç ölçüm noktasına yerleştirilebilen basınç dönüştürücüler, özellikle dinamik (zamanda değişen) basınç ölçümünde kullanılırlar. Hidrolik laboratuvarımızda kullanılan genel amaçlı basınç dönüştürücüler, büyülüklükleri nedeniyle ölçüm noktasına yerleştirilemediğinden, ölçüm noktası ile basınç dönüştürücü arasında bakır ve plastik boru bağlantısı yapılarak deneyler gerçekleştirılmıştır. Bu durumda, dinamik basınç salınımı, ölçüm borularının çap, boy ve elastisite gibi özellikleri ve basınç dönüştürücünün, her birim basinci ölçmek için gerekli hacimsel deformasyonu (komplayans) etkisiyle önemli ölçüde değişikliğe uğrarlar. Bu konu laboratuvarımızda yapılan model çalışmalarında sık sık gündeme geldiğinden, kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve ölçümden bağlantı tüpü kullanılması nedeniyle değişikliğe uğramış basınç kayıtlarından, ölçüm noktasındaki gerçek basınç değerlerine ulaşılmasını sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir (Aydın 1998). Bu yöntemde, basınç ölçüm noktası ile basınç dönüştürücü arasındaki akım için differensiyel denklemler sayısal olarak çözülmekte ve ölçülmüş basınç kaydından, ölçüm noktasındaki gerçek basınç salınımı elde edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen dinamik

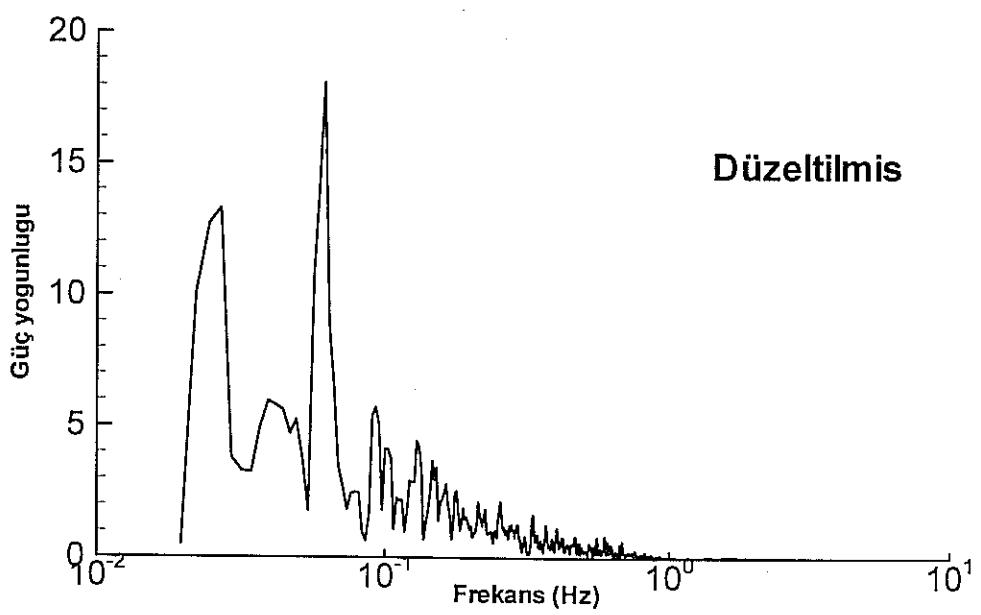
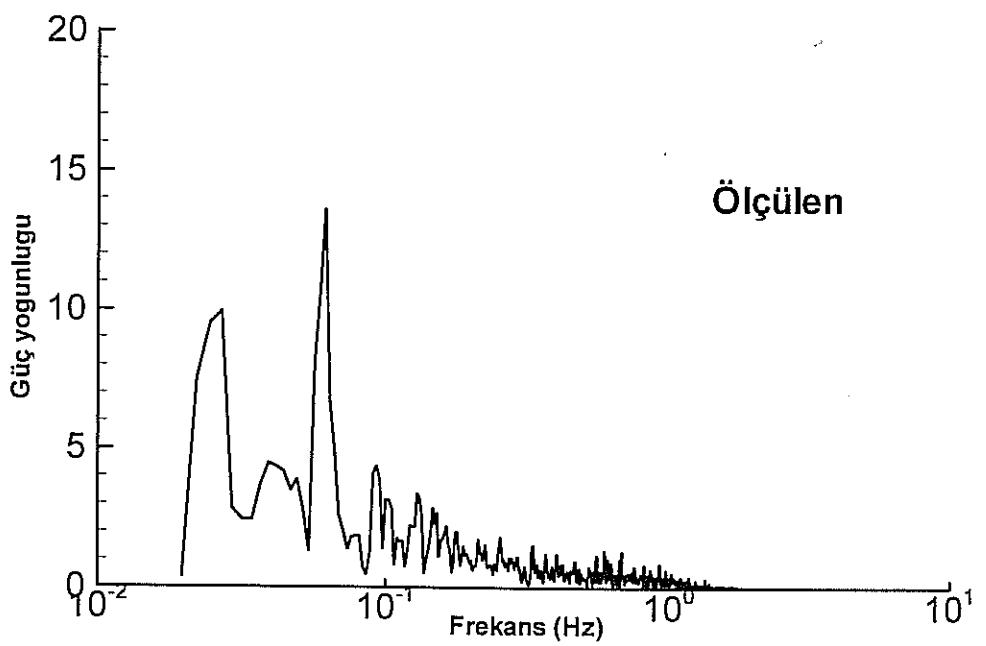
basınç kayıtları spektral analiz öncesi, ölçüm sisteminin sönümleyici veya yükseltici etkilerinden arındırmak için Aydın (1998)'de anlatılan yöntemle işlenmiştir. Ölçüm sisteminin olası etkilerini örnekleme bakımından ölçülmüş ve ölçüm sistemi etkilerinden arındırılmış basınç kayıtları Figür 5.18'de sunulmuştur. Bu iki kayıt için spektral analiz yapılmış ve güç yoğunluğunun frekans üzerindeki dağılımı Figür 5.19'da sunulmuştur. Figürlerden görüleceği gibi, basınç ölçüm sistemi düşük frekanslardaki salınımları biraz sönümlemiştir ve yüksek frekanslardaki salınımları da bir miktar yükselmiştir. Aslında, deneyler öncesinde yapılan ön incelemeler sonucu, türbülans salınımlarının frekansının 2 Hz ve altında olduğu bilinmektedir. Ölçümlerde kullanılan bağlantı tüpü toplam boyu, $L_t = 5.41$ m ve çapı $D_t = 0.005$ m dir. Basınç dönüştürücünün komplayansı ise 5.8×10^{-11} m^3/Pa dır. Bu bilgilerle Aydın (1998)'de verilen yükseltme/sönümleme eğrilerinden, mevcut sistemden elde edilecek ölçümlein minimal bir yükseltme/sönümleme etkisine maruz kalacağı görülmüştür.

Basınç ölçümünde değişkenler, dudak açısı, debi ve kapak açıklığıdır. Beş noktada basınç ölçüldüğü dikkate alınırsa, toplam olarak 1090 noktasal, 10 dakika süreli basınç ölçümü yapılmıştır. Tüm kayıtların spektral analizinin yapılması ve sunumu yer ve zaman bakımından uygun olmadığından, sadece iki ölçüm noktasından elde edilen kayıtlar değerlendirilecektir. Kapak dudağı üzerindeki beş ölçüm noktasından, en mansapta olanı A noktası, ortada olanı ise B noktası olarak adlandırılacak ve bu noktalardaki ölçümlein spektral özellikleri incelenecaktır.

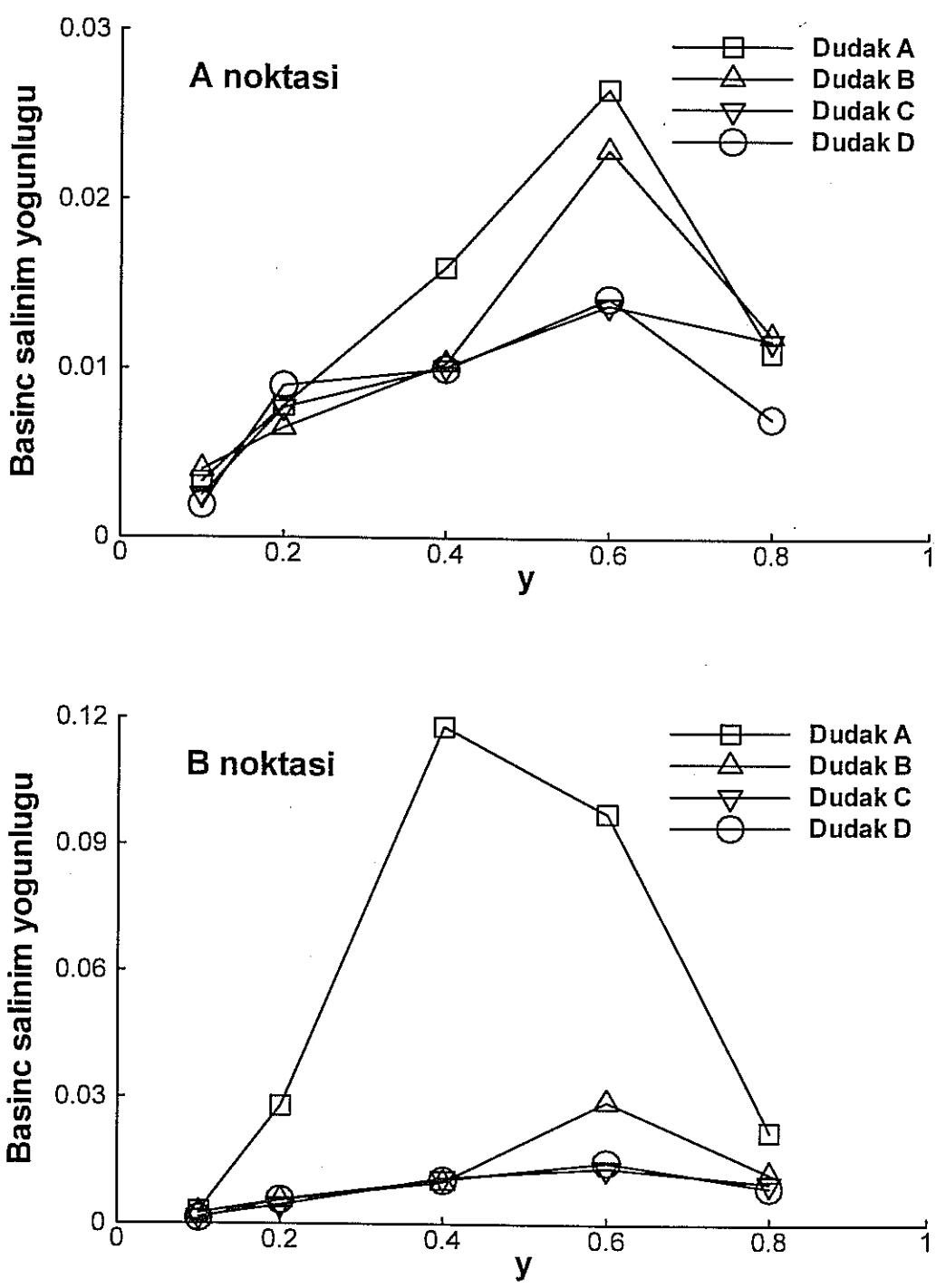
Basınç kayıtlarındaki türbülans salınımlarının ölçüsü olarak r.m.s. (root-mean-square) değerleri hesaplanmış ve kapak altından geçmekte olan akımın ortalama hız yüküne bölünerek basınç salınım yoğunluğu elde edilmiştir. A ve B noktalarında basınç salınım yoğunlukları Figür 5.20'de sunulmuştur. A noktasındaki salınımlar kapağın % 60 açıklığında en yüksek değere ulaşmakta ve her dört dudak açısı için % 3 mertebesini aşmamaktadır. B noktasındaki değerlere bakıldığından, Dudak B, C ve D için durum A noktasına benzerdir. Dudak A'nın B noktasında ise, basınç salınım yoğunluğu yaklaşık dört kat artmaktadır. Dudak A, açısı en küçük (26.5°) olan dudaktır. Küçük dudak açısında akım ayırtması (separation) noktası dudağın mansap ucundan menba yüzüne doğru kaydığını,



Figür 5.18 Ölçülmüş ve bağlantı tüpü etkisi için düzeltilmiş basınç kayıtları



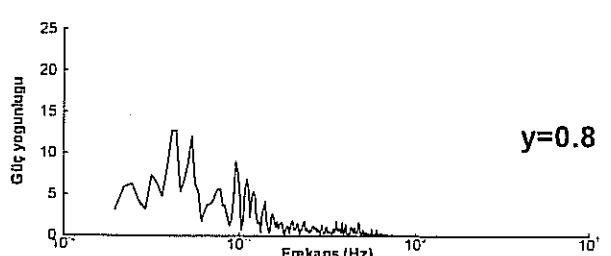
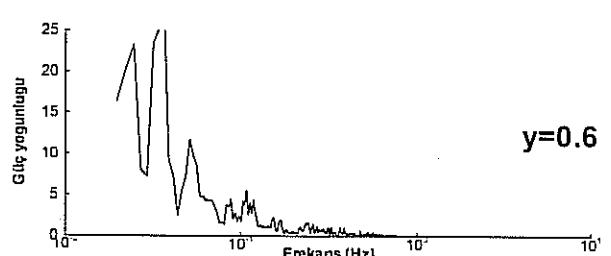
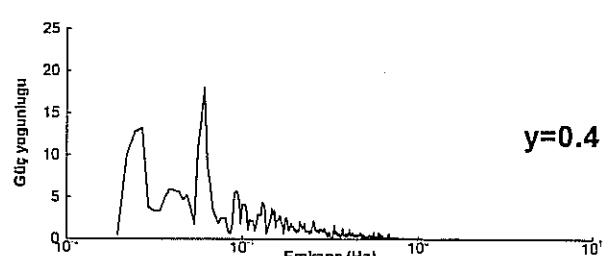
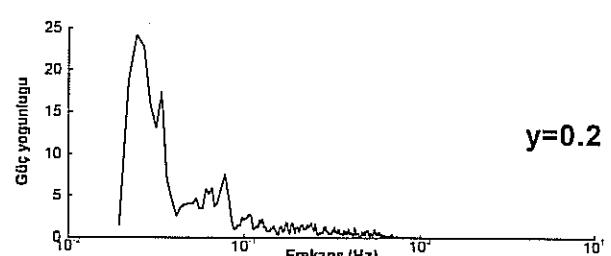
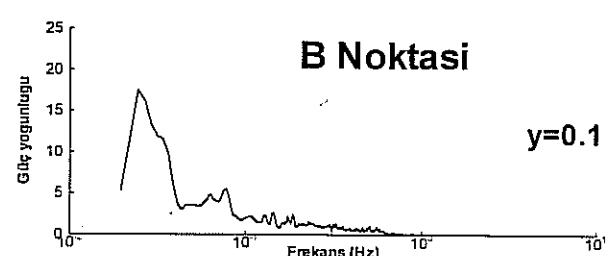
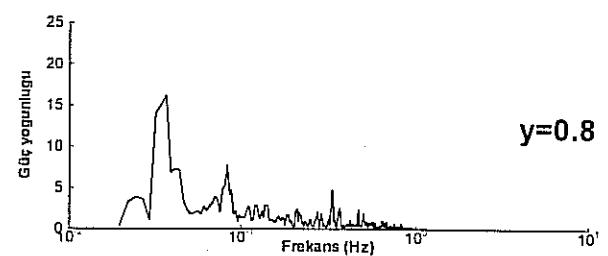
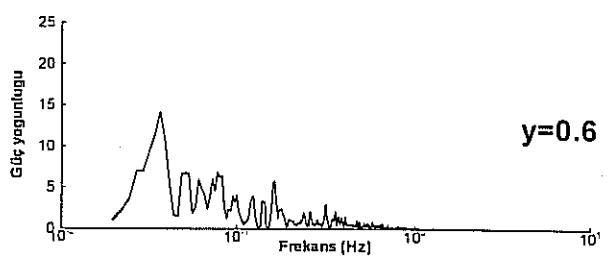
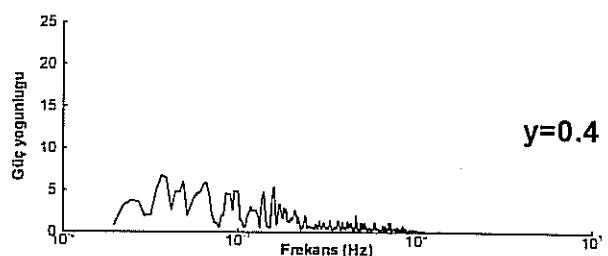
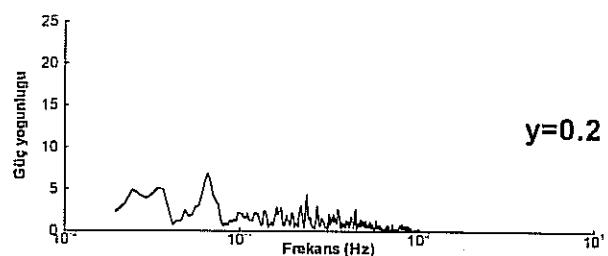
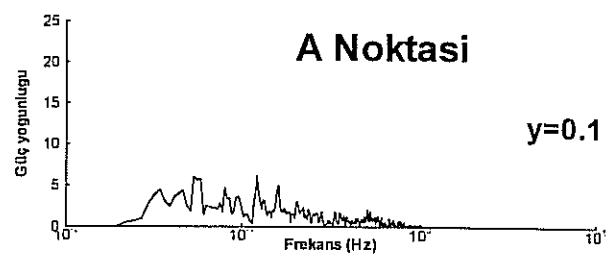
Figür 5.19 Ölçülmüş ve düzeltilmiş basınçların spektral analizleri



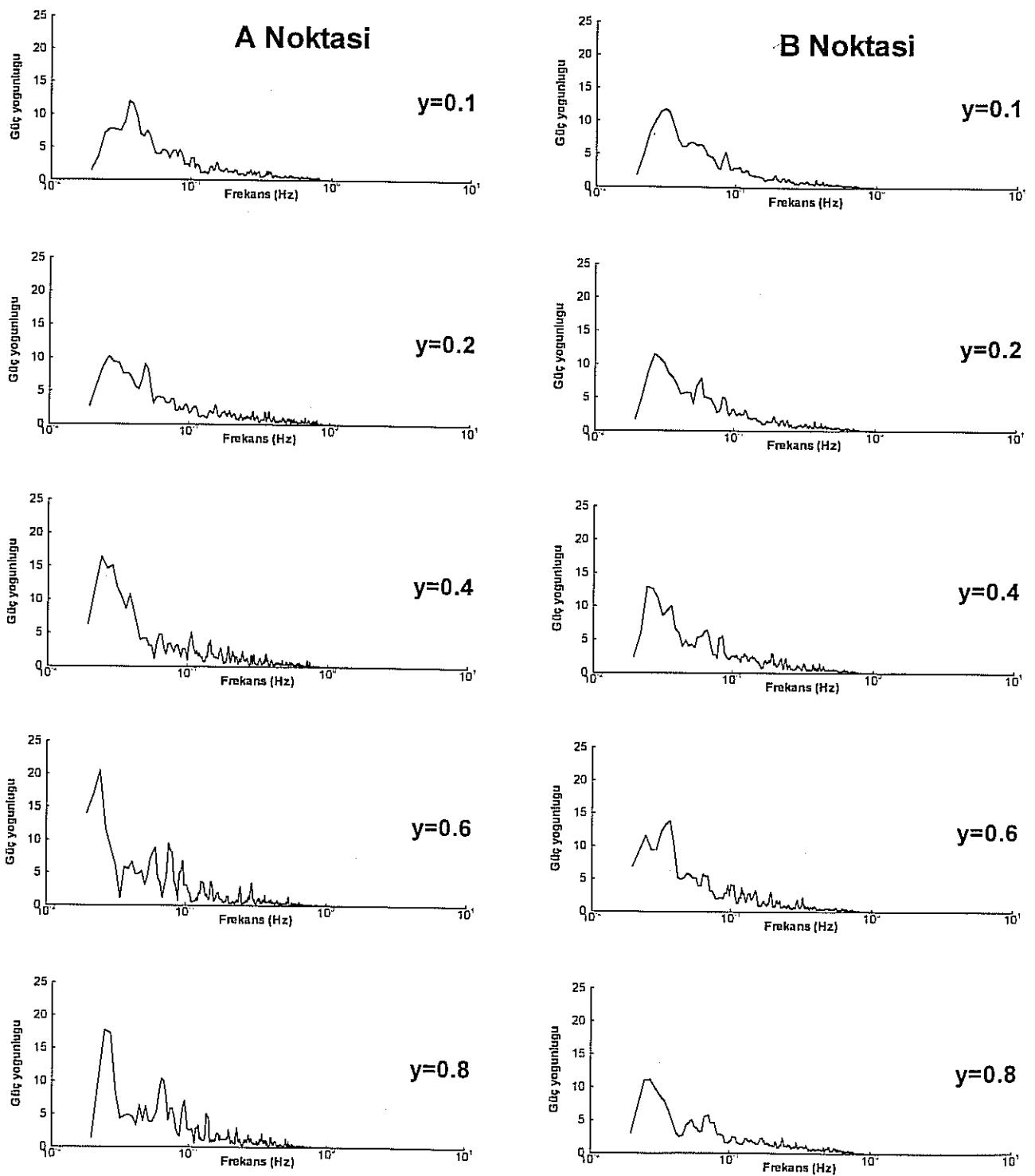
Figür 5.20 Basınç salınım yoğunluğu

dudak yüzünde türbülans artmaktadır. Dudak açısının 35^0 veya daha fazla olmasının dudak yüzündeki türbülans salınımlarını azalttığı görülmektedir.

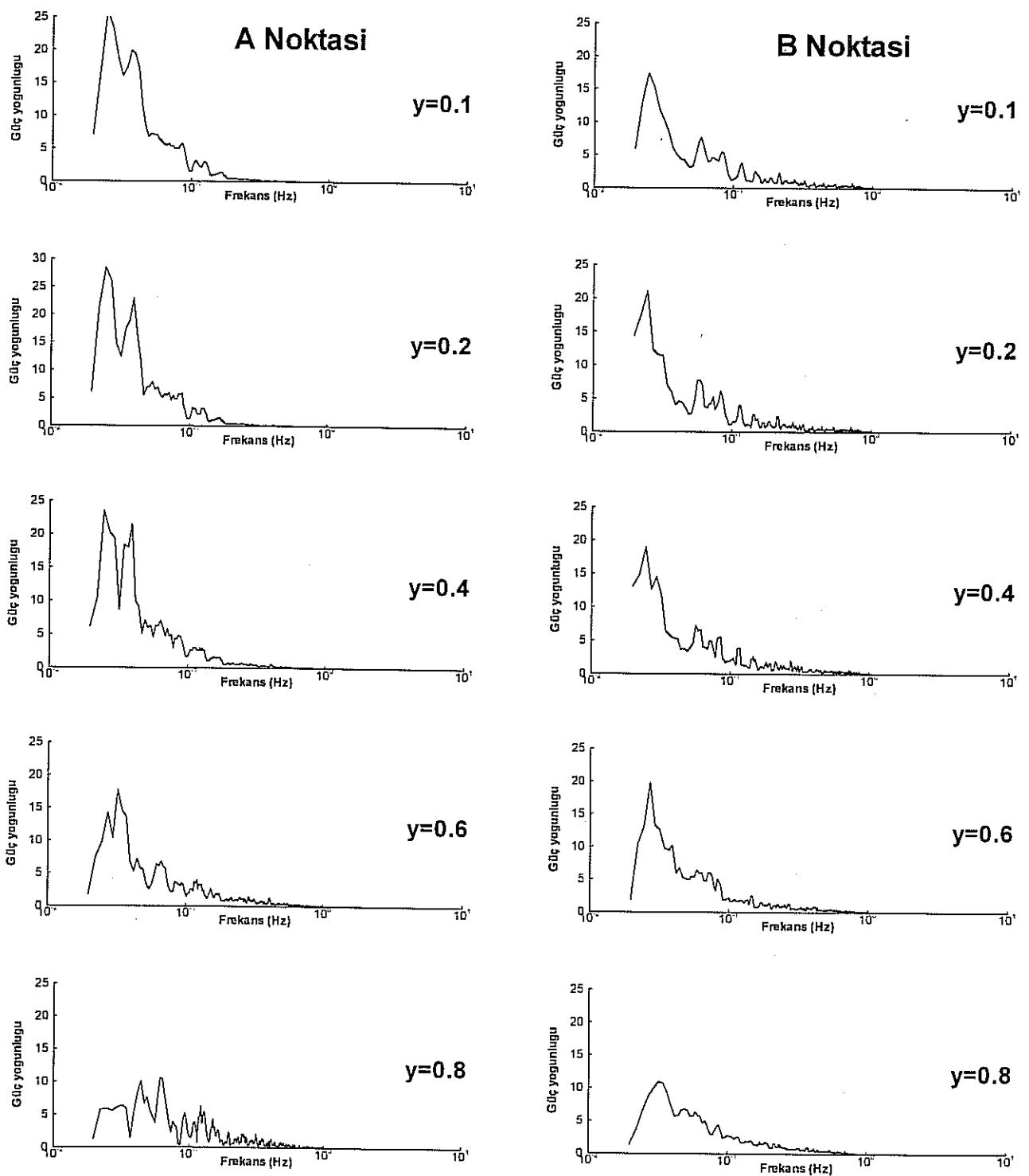
A ve B noktalarındaki basınç kayıtlarının spektral analizi yapılarak güç yoğunluğunun frekans üzerine dağılımları elde edilmiştir. Sonuçlar Dudak A, B, C ve D için sırasıyla Figürler 5.21, 5.22, 5.23 ve 5.24'te sunulmuştur. Bu veriler değerlendirilirken güç yoğunluğu eğrisinin (integrali alındığında) altındaki alanın 1 e eşit olduğu dikkate alınmalıdır. Genelde, güç dağılımının, ortalama akımdaki uzun peryotlu değişimlerden kaynaklandığı görülmektedir. Yüksek frekanslardaki salınımlardan belirgin bir katkı gözlenmemiştir. Kapak açısı artırıldıkça, 1 Hz yakınlarındaki türbülasın da kaybolduğu görülmüştür.



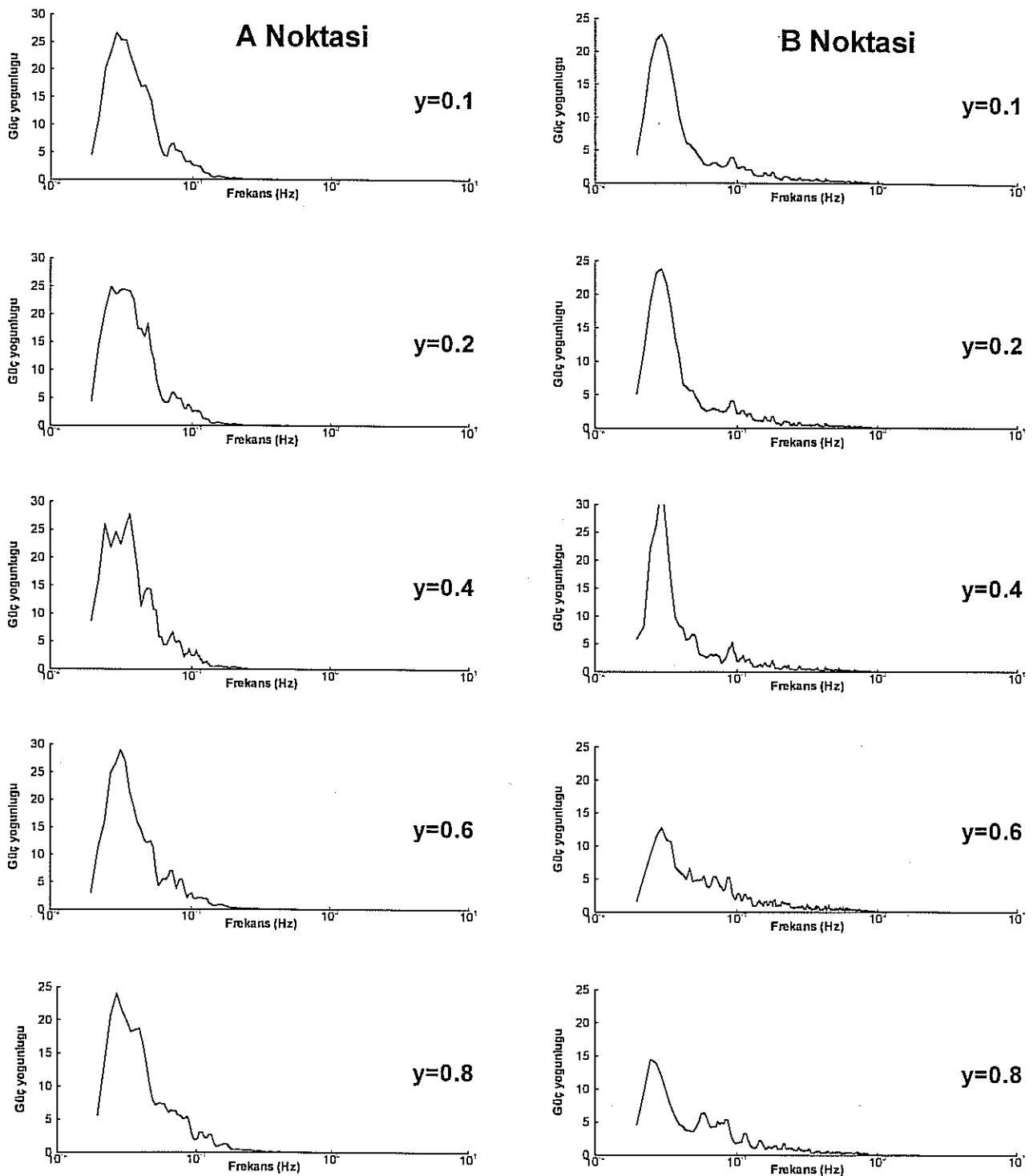
Figür 5.21 Güç yoğunluğu dağılımları Dudak A



Figür 5.22 Güç yoğunluğu dağılımları Dudak B



Figür 5.23 Güç yoğunluğu dağılımları Dudak C



Figür 5.24 Güç yoğunluğu dağılımları Dudak D

6. HİDRODİNAMİK KUVVET ÖLÇÜMLERİ

6.1 Kuvvet ölçüm yöntemi

Hidrodinamik kuvvetler, noktasal basınç değerleri ölçüлerek yüzeyler üzerinde integralinden bulunabilecegi gibi entegral (toplam) miktarlar olarak, doğrudan da ölçülebilir. Bir önceki bölümde, kapak yüzeylerinden elde edilen, noktasal basınç ölçümülerinin integralinden, toplam aşağı-çekme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu bölümde, kapak üzerindeki yüklerin toplamı, elektronik kuvvet-ölçerler kullanılarak ölçülecektir. Böylece, doğrudan ölçülen kuvvetlerle, matematik modelden hesaplanan kuvvetler sabit ve hareketli kapak durumları için karşılaştırılabilir.

6.2 Kuvvet ölçüm düzeneği

Bu çalışmanın başlarından itibaren kapak üzerinde aşağı-çekme kuvvetlerinden söz edilmiştir. Bir önceki bölümde yapılan hesaplarda da görüldüğü gibi, kapak üzerindeki kuvvet, her iki yönde de olabilmektedir. Özellikle, kablo destekli kapakların işletmesi bakımından, kapak üzerindeki (ağırlıklar dahil) net yükün aşağı (kapağı kapatın) yönde olması zorunludur. Bir çok uygulamada, kapağın kapanmasını güvence altına almak için, kapak gövdesi içine beton veya demir ağırlık ilave edildiği bilinmektedir. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği hidrolik modeldeki kapak da (bazı koşullarda) kendi ağırlığı ile kapanmadığı için, kurşun ağırlıklar ilave edilmiştir.

Kapak üzerindeki kuvvetlerin ölçülmesi için, kapak bir bisiklet zinciri ile askıya alınmıştır. Zincir seçilmesinin nedeni, kolayca bir dişli üzerine sarılabilmesi ve daha önemlisi, gerilme kuvvetleri altında esnememesidir. Daha önceki çalışmalarında, çelik tel ve kalın misina denenmiş ve başarılı olmamıştır. Elektrik motorundan zincire ve kapağa güç aktarma işlemi bisiklet vites takımlarından alınan dişlilerle sağlanmıştır. Kapak üzerine sabitlenmiş bir dişinden, U-şeklinde geçen zincirin bir ucu motor-kontrolündeki dişlilere, diğer ucu ise elektronik kuvvet-ölçere bağlıdır. Kuru ortamda kapak hareket ettirilerek, kapak zincir sisteminin ağırlığı, kapak açılığının fonksiyonu olarak ölçülmüştür.

$$F_w = 200.3 - 2.8y \quad (N) \quad (6.1)$$

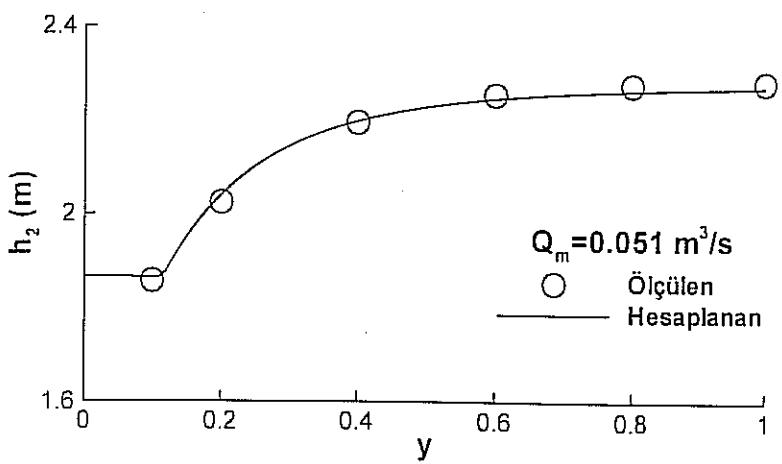
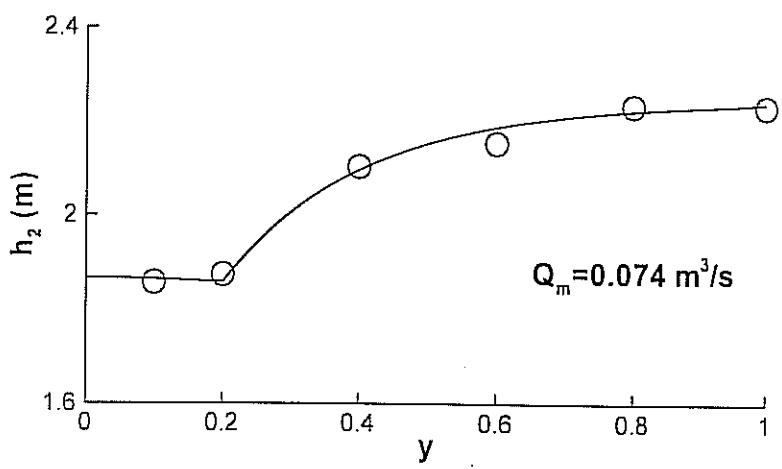
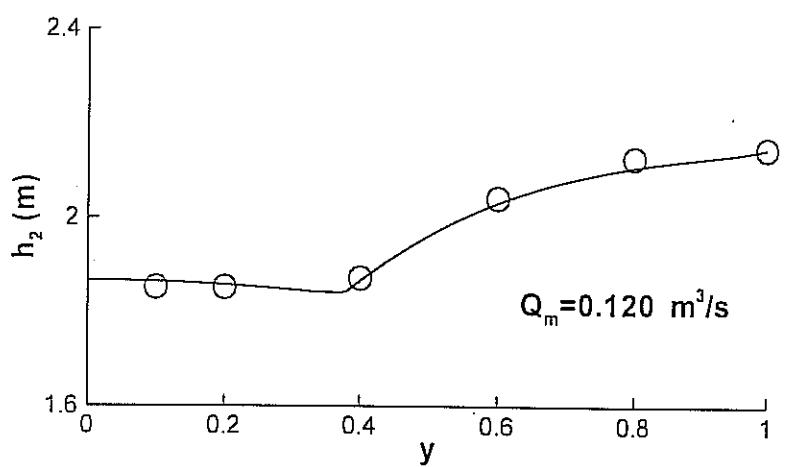
Akim olduğu durumlarda ölçülen kuvvetlerden, kuru ortamda ölçülen kuvvetler çıkarılarak hidrodinamik aşağı-çekme kuvveti elde edilmiştir. Hidrodinamik aşağı-çekme kuvvetinin bu tanımına göre, durgun su içinde yapılan ölçümelerde, kapak ve taşıyıcı sistemin suya batık kısmına etkiyen, suyun kaldırma kuvvetinin negatif değeri ölçülmüş olacaktır.

6.3 Sabit kapak aşağı-çekme kuvveti ölçümüleri (Deney D.1)

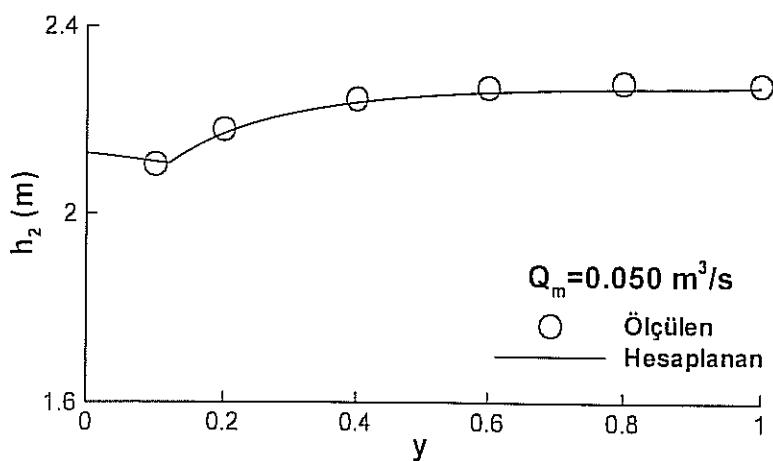
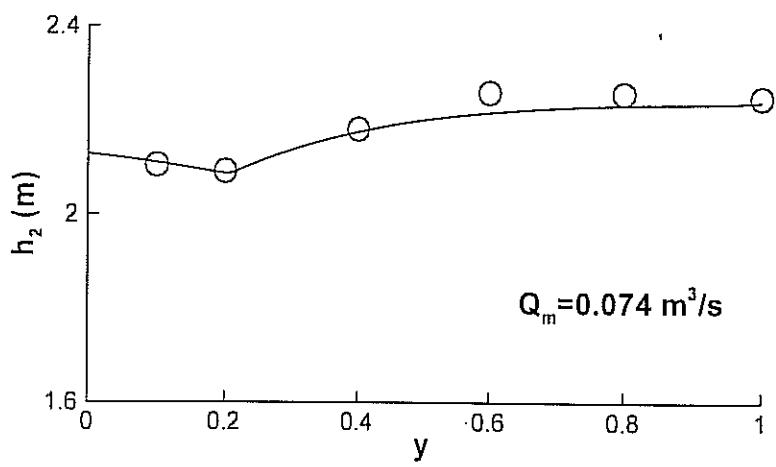
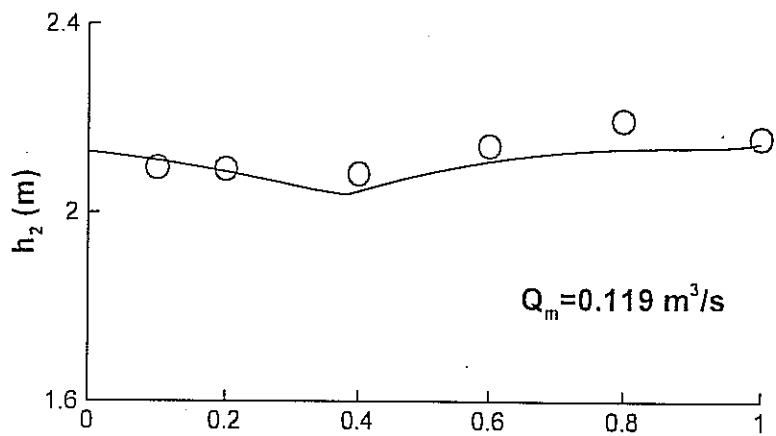
Kapağın sabit konumlarında doğrudan kuvvet ölçümüleri, basınç ölçümünden elde edilen kuvvetlerle karşılaştırılabilmek bakımından, çalışmanın deneysel boyutunu güçlendireceği için önemlidir. Dudak A için, üç farklı sızma açıklığı konfigürasyonunda ($a_{um}=0.0088$ m, $a_{dm}=0.0105$, 0.0042 ve 0.0028 m), üç farklı başlangıç debisi için ($Q_m=0.120$, 0.075 ve 0.050 m³/s) ve altı farklı kapak açıklığında ($y=1.0$, 0.8 , 0.6 , 0.4 , 0.2 ve 0.1) toplam aşağı-çekme kuvvetleri ölçülmüştür. Kuvvet ölçümüleri sırasında, matematik modelin ihtiyaç duyduğu α_u ve α_d parametrelerinin belirlenebilmesi için, kapak yuvasındaki su seviyesi, h_2 , de aynı deney koşullarında ölçülmüştür.

Deneylerden elde edilen h_2 ölçümüleri ile, üç farklı sızma açıklığı konfigürasyonu için α değerlerinin belirlenmesi gereklidir. Önceki bölümlerdeki deneyimlerden faydalananarak, α_u ve α_d için başlangıç değerleri seçilir ve matematik model koşturularak h_2 hesaplanır. Hesaplanan ve ölçülmüş h_2 değerleri karşılaştırılarak, α_u ve α_d için yeni değerler belirlenir ve işlemler yinelenir. Bu şekilde, deneme-yanılma yöntemiyle elde edilen α_u ve α_d değerleri ve bu değerlerle hesaplanan kapak yuvası su seviyeleri, ölçülmüş karşılıkları ile birlikte Figürler 6.1, 6.2 ve 6.3'de sunulmuştur. Genelde, ölçüm ve hesaplamalar arasında tam bir uyum gözlenmektedir. Bazı verilerde noktasal sapmalar görülmektedir. Bu sapmalar ölçüm hatası olarak değerlendirilmelidir. Sabit kapak konumlarında dahi, akım koşullarının oldukça çalkantılı ve zamana bağımlı olması nedeniyle, deneysel ölçümeler hata içermektedir.

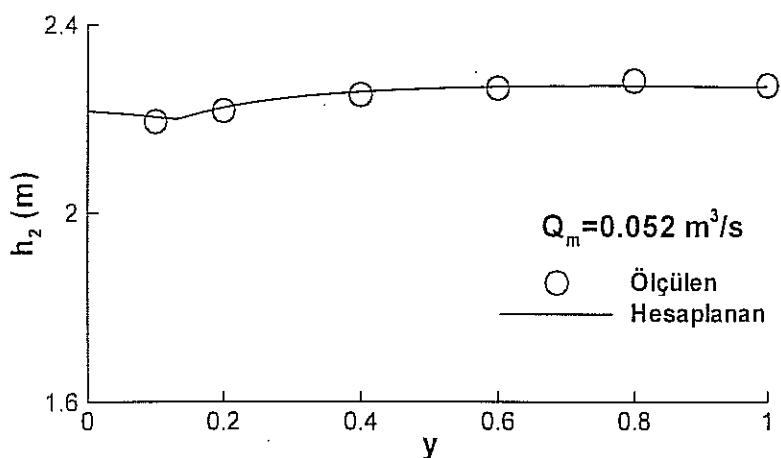
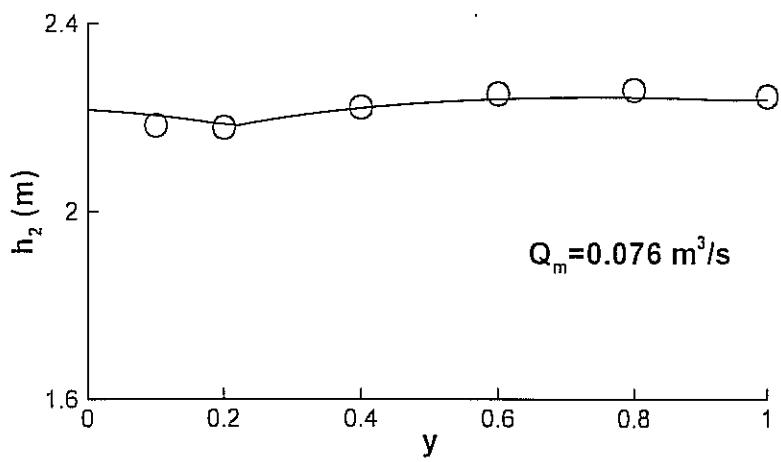
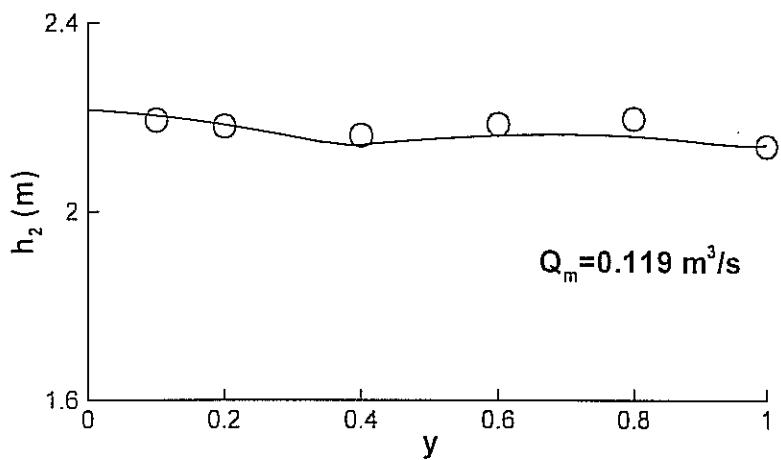
Verilen bir sızma açıklığı konfigürasyonu için seçilen, bir α_u ve α_d seti ile, tüm kapak açıklıkları ($0 < y < 1$) ve farklı başlangıç debileri için, kapak yuvası su



Figür 6.1 Kapak yuvasında su seviyeleri
 $(a_{um} = 0.0088 \text{ m}, a_{ud} = 0.0105 \text{ m}, \alpha_u = 4, \alpha_d = 10)$.



Figür 6.2 Kapak yuvasında su seviyeleri
 $(a_{um} = 0.0088 \text{ m}, a_{ud} = 0.0042 \text{ m}, \alpha_u = 4, \alpha_d = 1)$.



Figür 6.3 Kapak yuvasında su seviyeleri
 $(a_{um} = 0.0088 \text{ m } a_{ud} = 0.0028 \text{ m}, \alpha_u = 4, \alpha_d = 1)$.

seviyesinin doğru olarak hesaplanabilmesi, üst-akım için önerilen modelinin yeterliliğinin bir ölçüsü olarak değerlendirilmelidir.

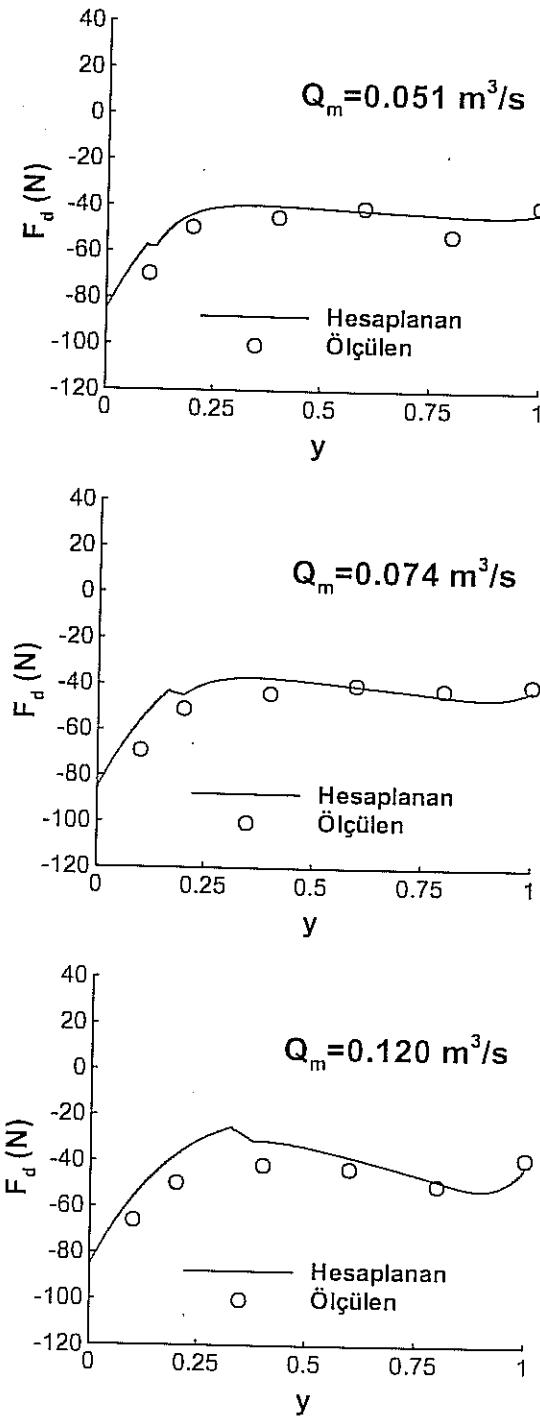
Doğrudan ölçülen hidrodinamik kuvvetlerle, yukarıda bulunan α değerleri kullanılarak matematik modelden hesaplanan hidrodinamik kuvvetler, Figürler 6.4, 6.5 ve 6.6'da sunulmuştur. Figürler incelendiğinde, iki farklı yöntemle elde edilen kuvvetlerin, genel olarak uyum içinde olduğu görülmektedir. İki veri seti arasında sistematik bir farklılaşma yoktur. Bazı noktasal ölçümler, hesaplanan değerlerden sapmaktadır. Bu sapmaların nedeni, kuvvet ölçümü sırasında kapağın yuva içinde konumu ile ilişkilidir. Kapak dikey raylar üzerinde yürüyen tekerlekler tarafından taşınmaktadır. Düşey düzlemede her dört yönden tekerleklerle desteklenmiştir. Yan kanallardaki sızma akımlarının ihmali edilebilecek boyutta küçük olması için, kapak ve yan kanal yüzeyleri arasındaki boşluklar 0,001 m'den daha küçük tutulmaya çalışılmıştır. Bir ölçüm sırasında, kapak farklı yan yüzeylere yaslanabileceği için, olağan sürtünme kuvvetlerinden çok farklı sürtünme kuvvetlerine maruz kalabilir. Sabit kapak için sürtünme kuvvetlerinin yönü bilinmeyeceğinden, herhangi bir düzeltme uygulamak mümkün değildir.

6.4 Kapanma halindeki kapak aşağı-çekme kuvveti ölçümü (Deney D.2)

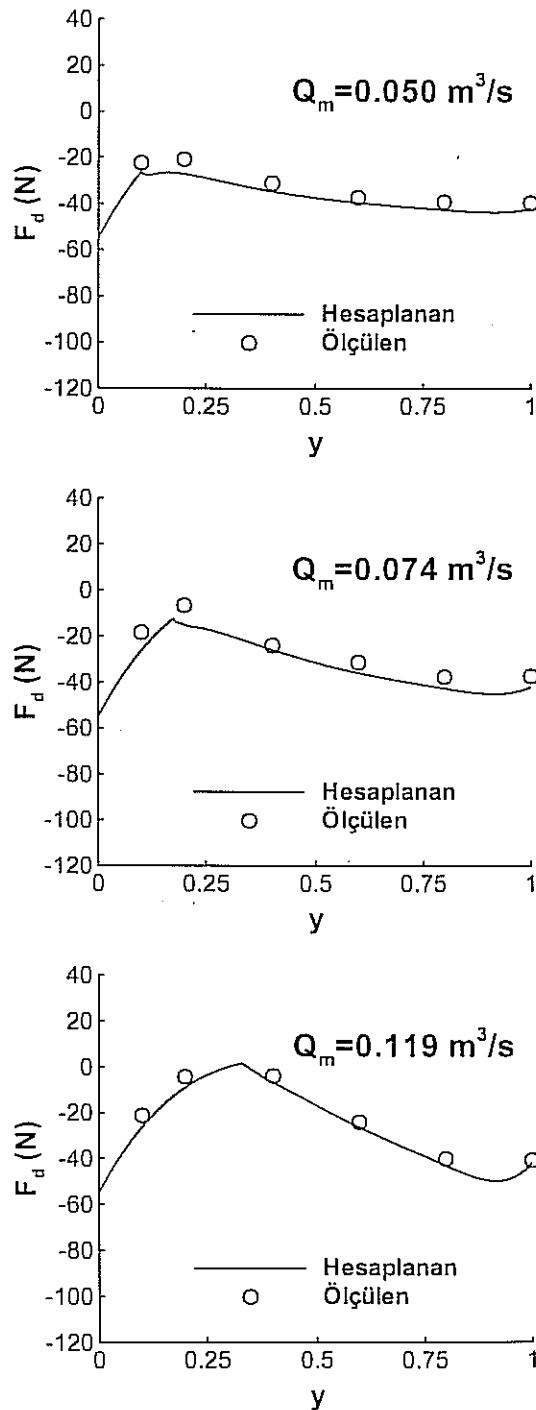
Sabit kapak deneylerinden sonra, aynı sızma açıklıkları ve başlangıç debileri için, kapanmakta olan kapakta etkiyen hidrodinamik yükler beş farklı kapatma hızında ölçülmüştür. Sonuçlar matematik modelden hesaplanan değerlerle karşılaştırılmış olarak Figürler 6.7~6.15'te sunulmuştur. Hareketli kapak durumunda sürtünme kuvvetleri daha küçük olduğu gibi, daima harekete ters yönde olacağı için, ölçülen kuvvete tek yönlü bir etkisi olacaktır. Daha önceki çalışmalarında, kuru ortamda yapılan deneylerle, hareketli kapak sürtünme kuvvetleri, kapak yüzüne dik basınç yükünün fonksiyonu olarak ölçülmüştür.

$$F_f = 0.0019F_n + 0.0162 \quad (N) \quad (6.2)$$

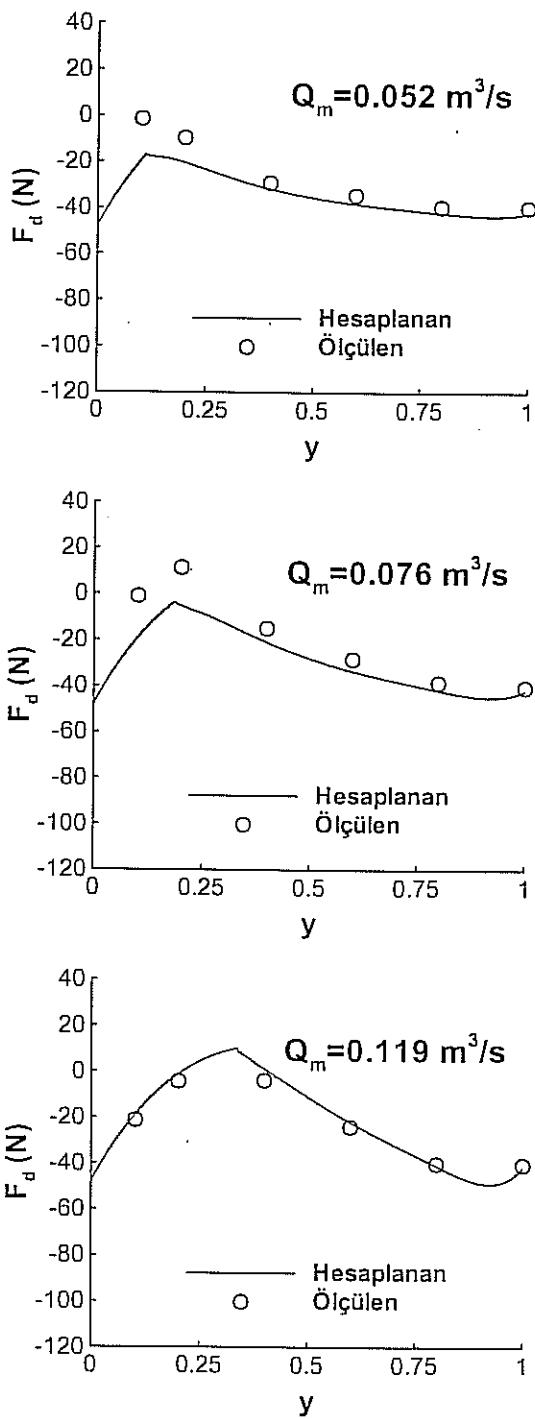
burada F_n kapak yüzüne dik basınç kuvveti, F_f harekete ters yönde sürtünme kuvvetidir. Hareket halindeki kapakta, en kritik kapak açıklıklarında dahi, sürtünme kuvvetleri ölçülen kuvveti etkileyebilecek boyutta değildir. Bu nedenle ölçülen değerlere sürtünme kuvvetlerinden ötürü herhangi bir düzeltme uygulanmamıştır.



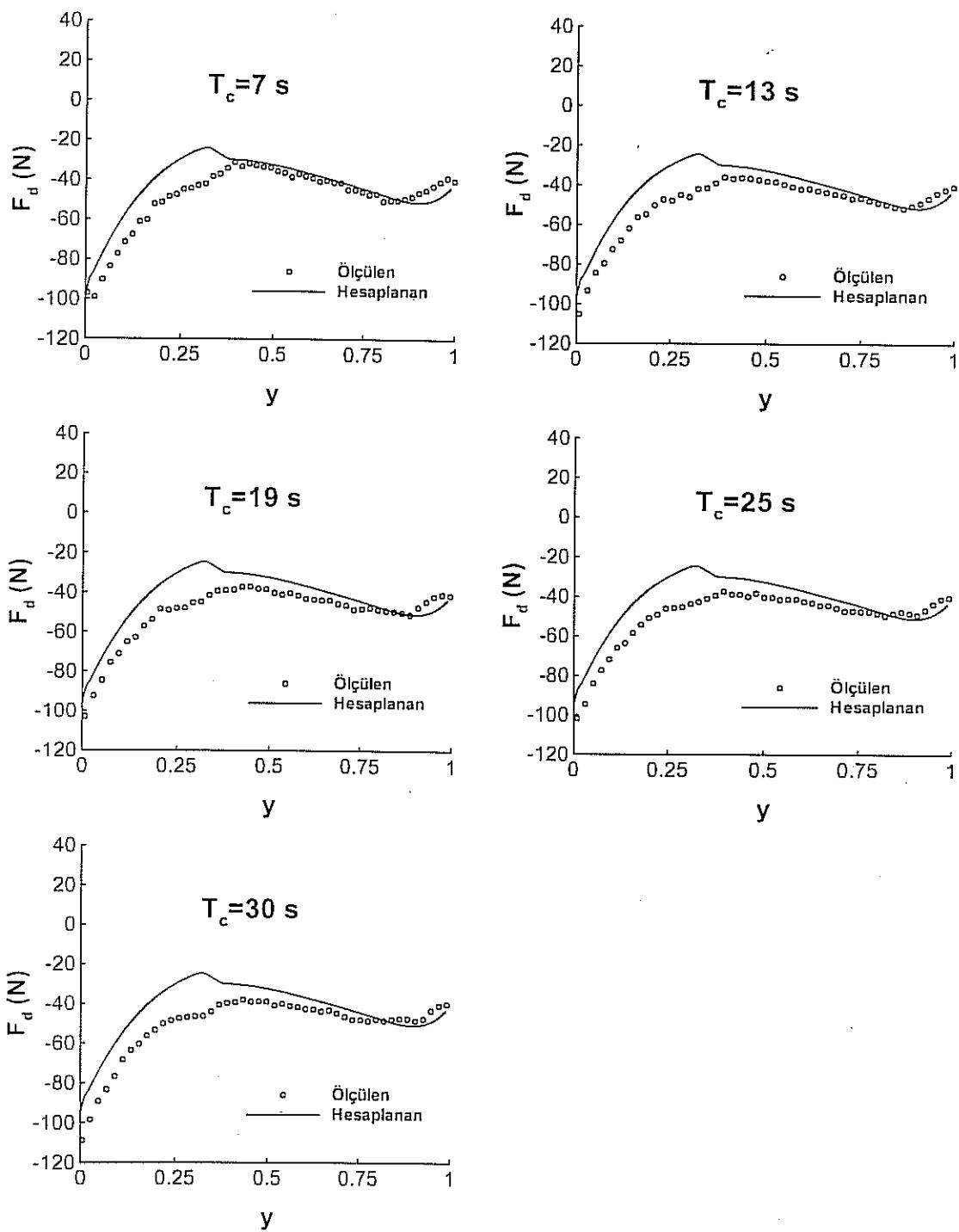
Figür 6.4 Kapak sabit konumda hidrodinamik kuvvet ölçümleri
 $(\theta = 44.7^\circ, a_{um} = 0.0088 \text{ m}, a_{dm} = 0.0105 \text{ m}, \alpha_u = 4, \alpha_d = 10)$



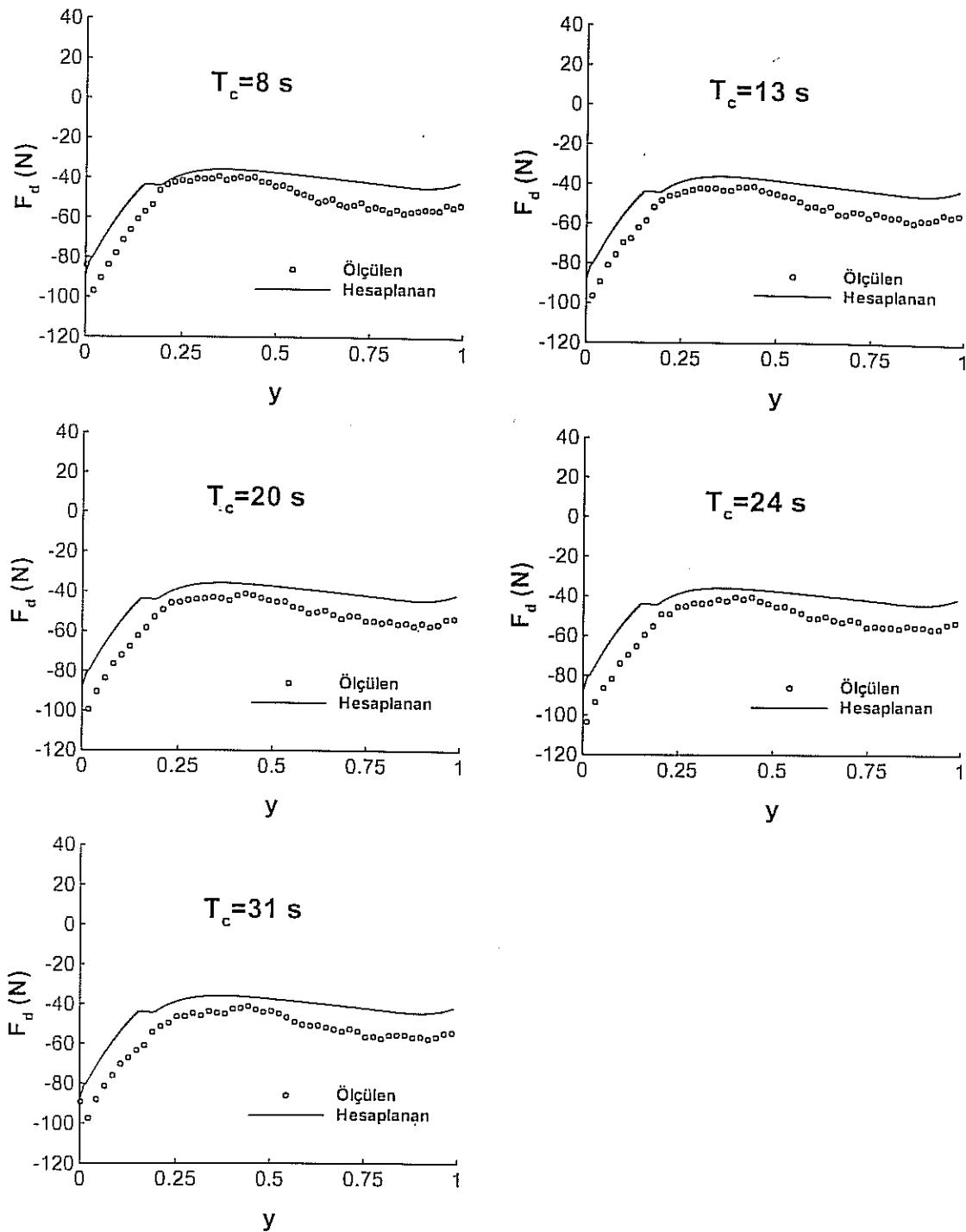
Figür 6.5 Kapak sabit konumda hidrodinamik kuvvet ölçümleri
 $(\theta = 44.7^\circ, a_{um} = 0.0088 \text{ m}, a_{dm} = 0.0042 \text{ m}, \alpha_u = 4, \alpha_d = 1)$



Figür 6.6 Kapak sabit konumda hidrodinamik kuvvet ölçümleri
 $(\theta = 44.7^\circ, a_{um} = 0.0088 \text{ m}, a_{dm} = 0.0028 \text{ m}, \alpha_u = 4, \alpha_d = 1)$

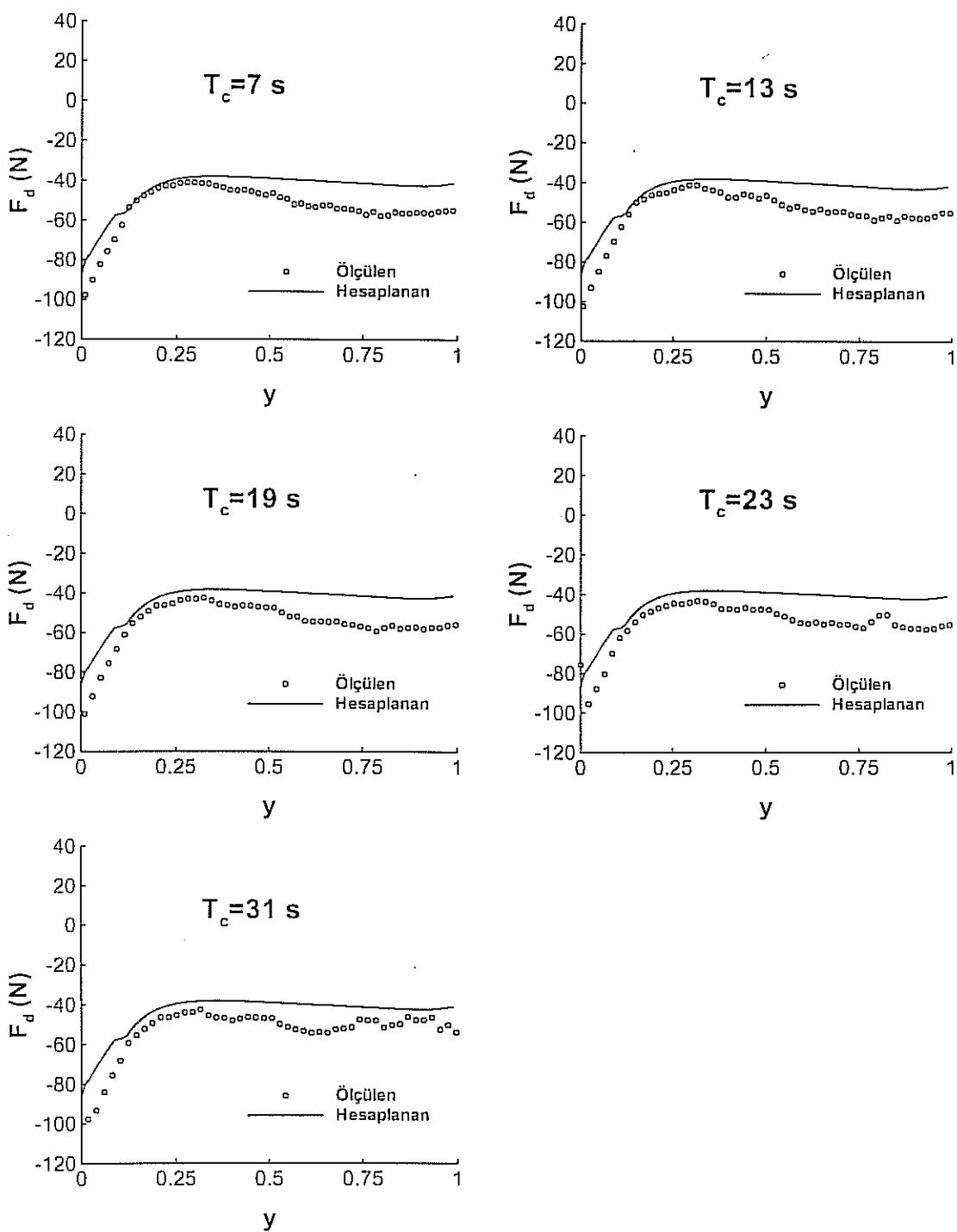


Figür 6.7 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler
 $(\theta=44.7^\circ, a_{um}=0.0088 \text{ m}, a_{dm}=0.0105 \text{ m}, \alpha_u=4, \alpha_d=10, Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s})$



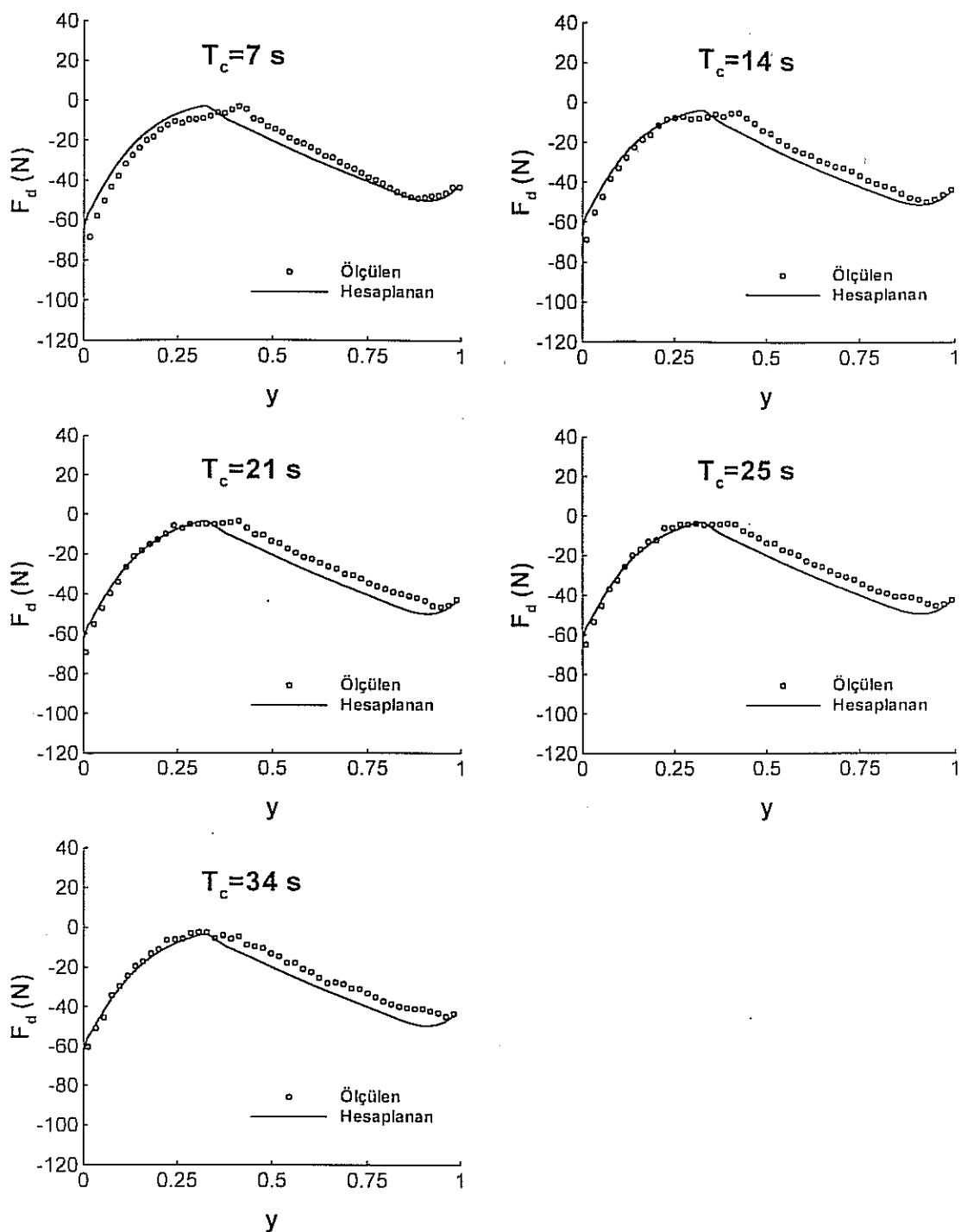
Figür 6.8 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler

$(\theta=44.7^\circ, a_{um}=0,0088\text{ m}, a_{dm}=0,0105\text{ m}, \alpha_u=4, \alpha_d=10, Q_m=0,072\text{ m}^3/\text{s})$

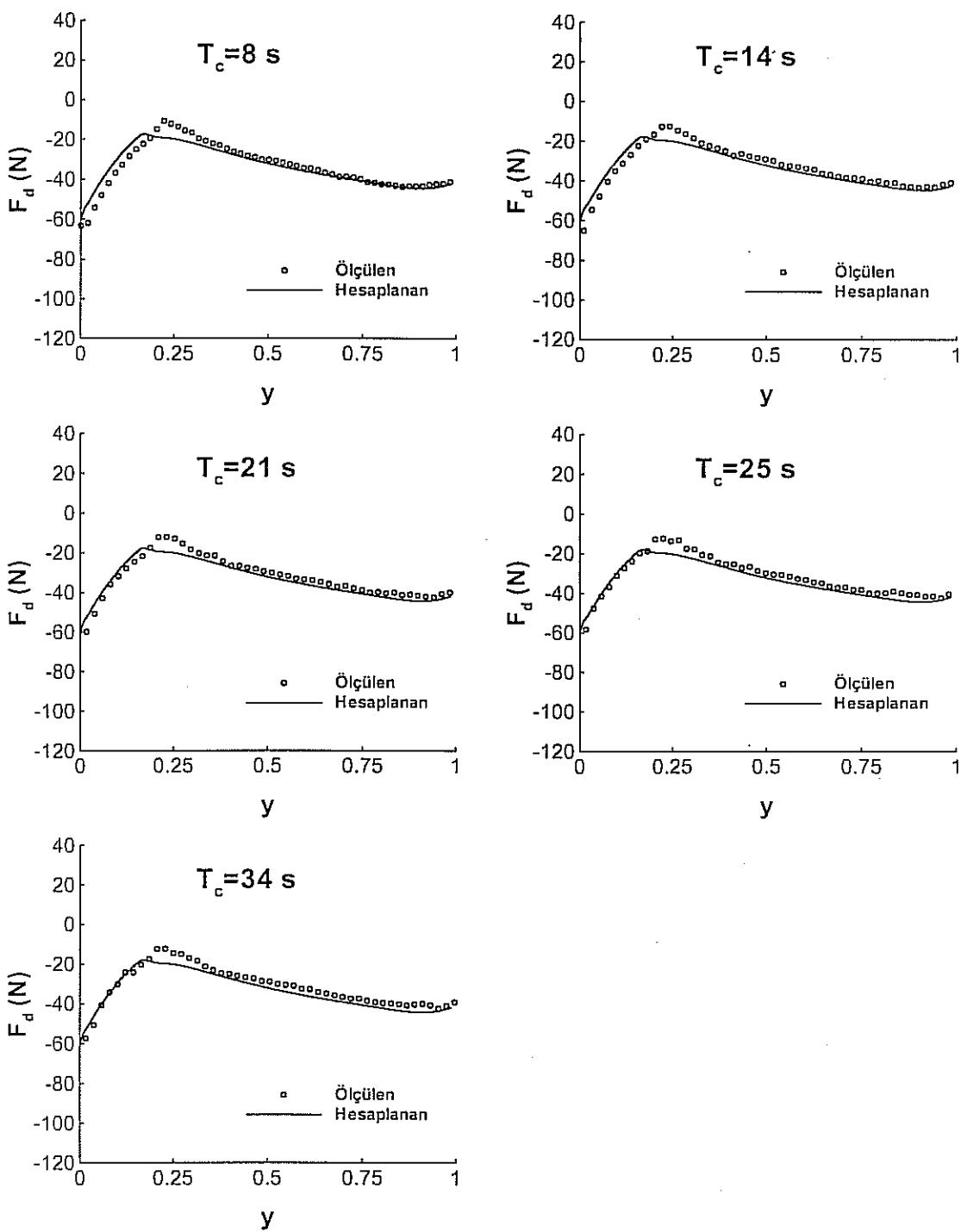


Figür 6.9 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler

($\theta=44.7^\circ$, $a_{um}=0,0088\text{ m}$, $a_{dm}=0,0105\text{ m}$, $\alpha_u=4$, $\alpha_d=10$, $Q_m=0,051\text{ m}^3/\text{s}$)

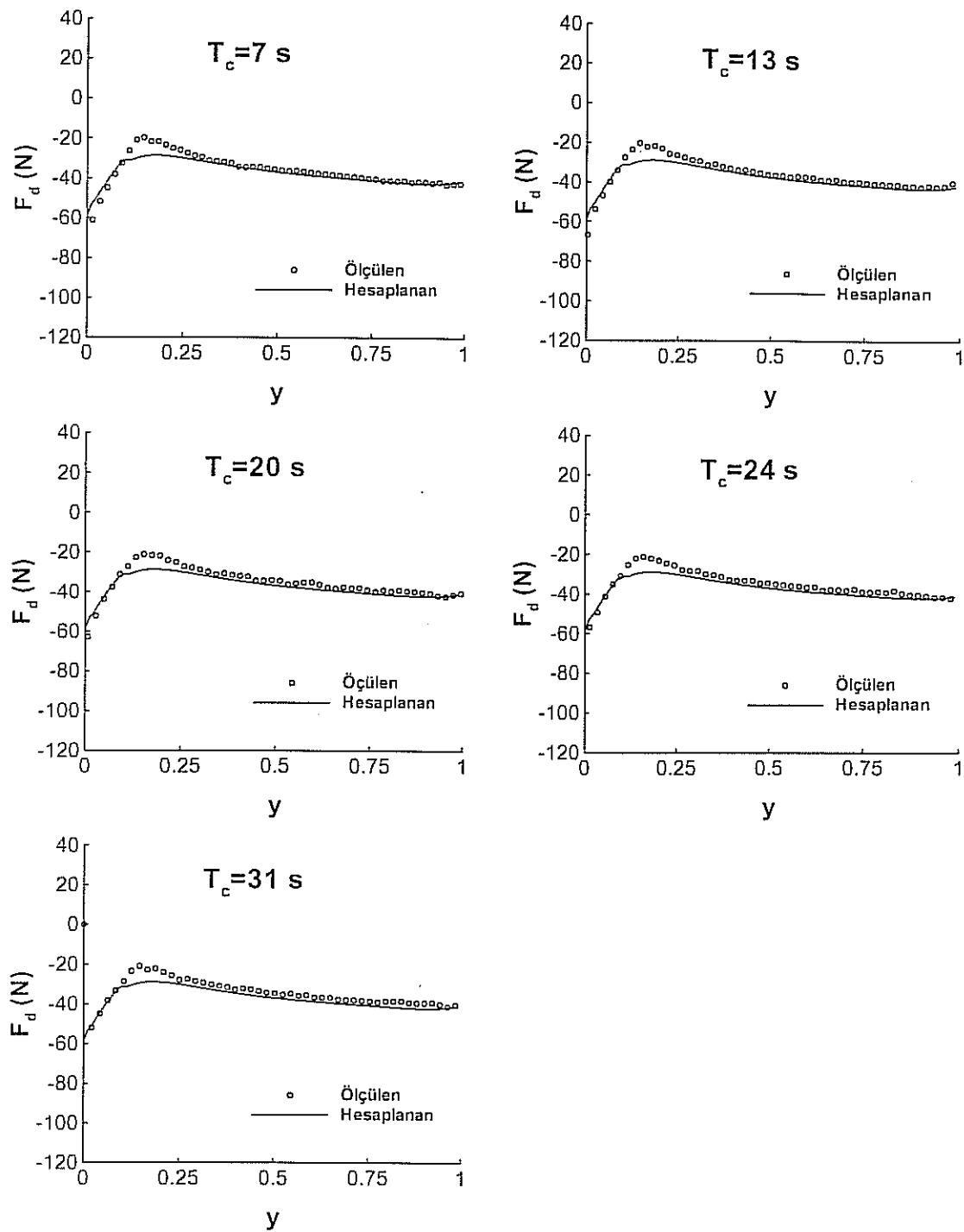


Figür 6.10 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler
 $(\theta=44.7^\circ, a_{um}=0,0088 \text{ m}, a_{dm}=0,0042 \text{ m}, \alpha_u=4, \alpha_d=1, Q_m=0,119 \text{ m}^3/\text{s})$

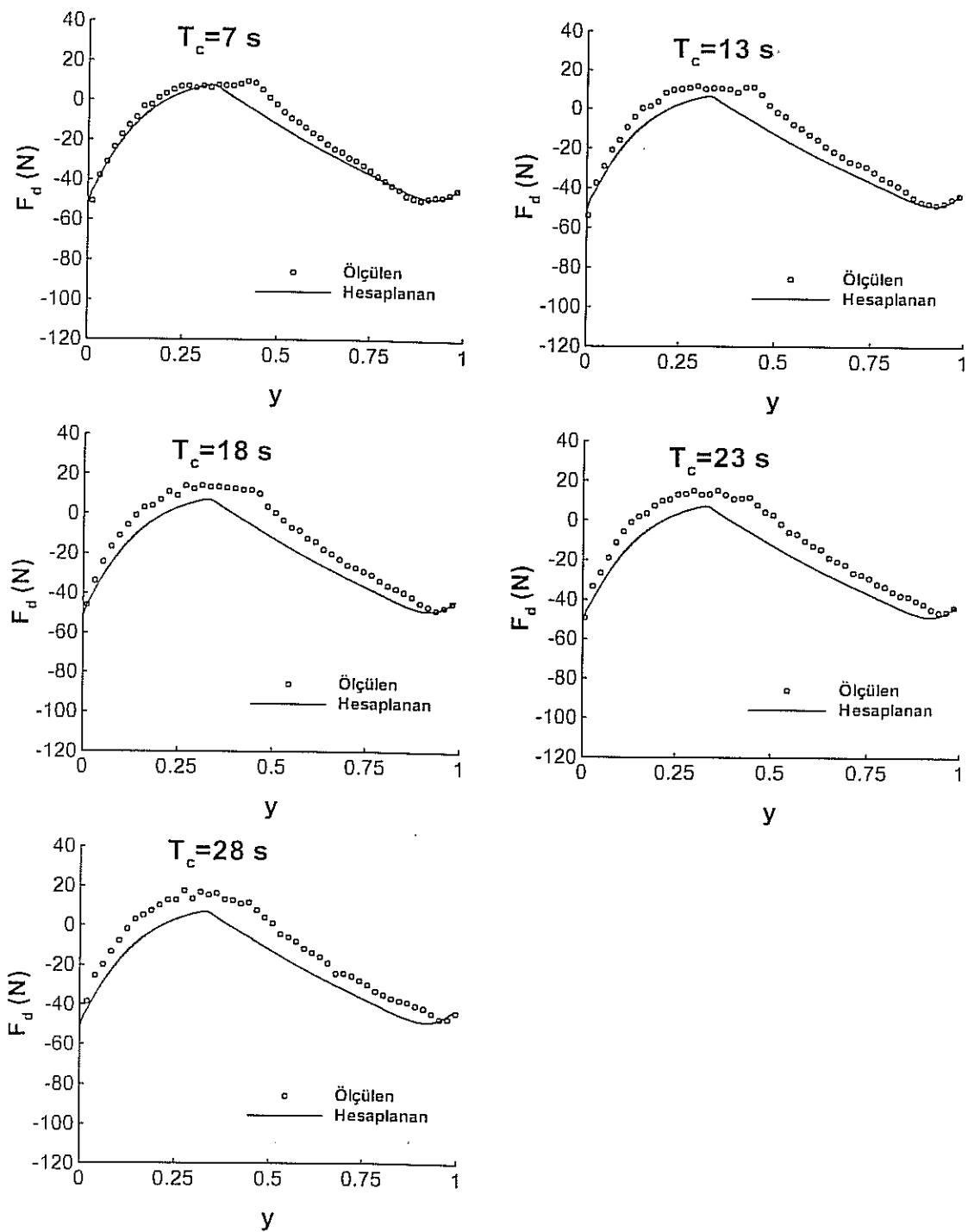


Figür 6.11 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler

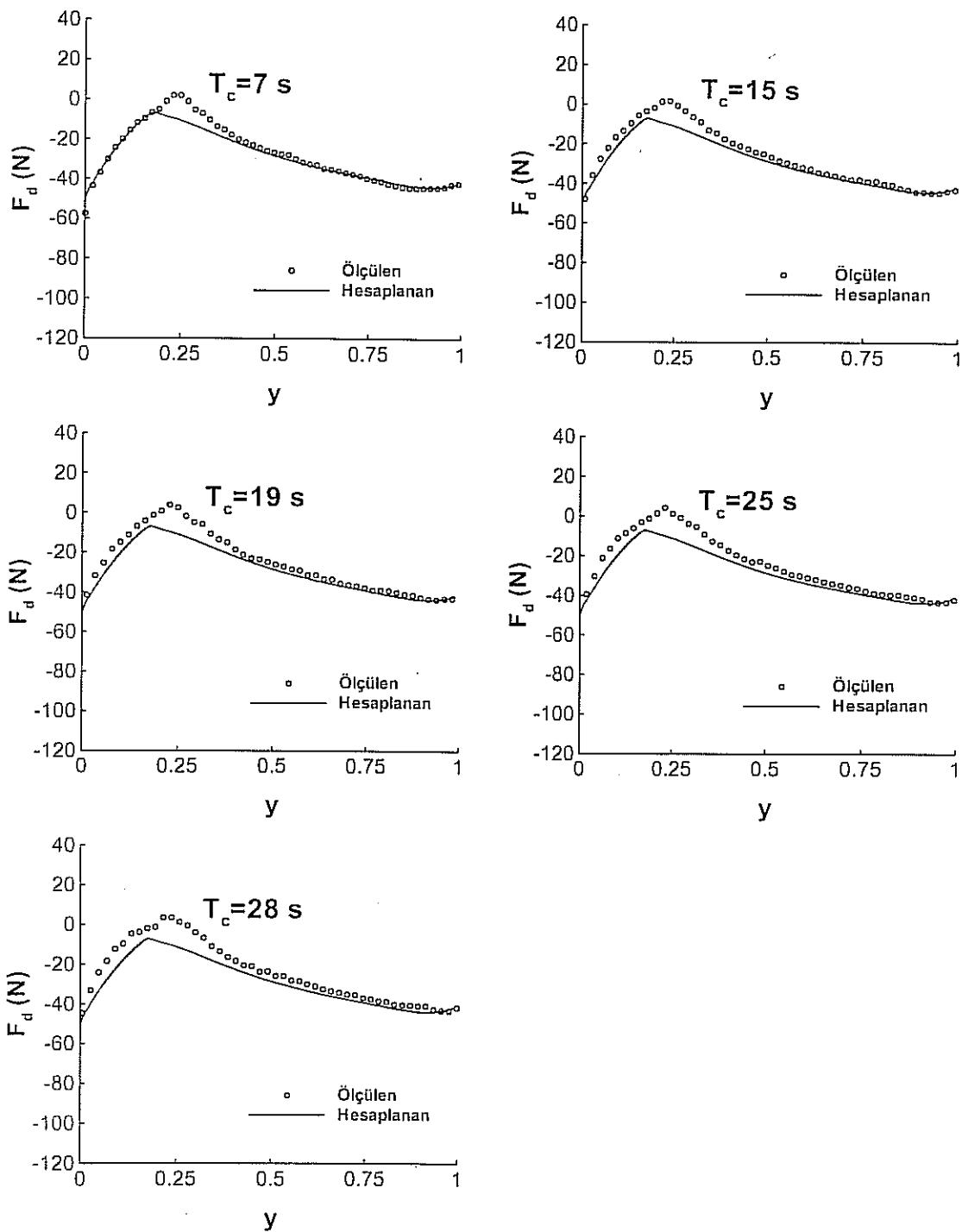
$$(\theta=44.7^\circ, a_{um}=0.0088 \text{ m}, a_{dm}=0.0042 \text{ m}, \alpha_u=4, \alpha_d=1, Q_m=0.074 \text{ m}^3/\text{s})$$



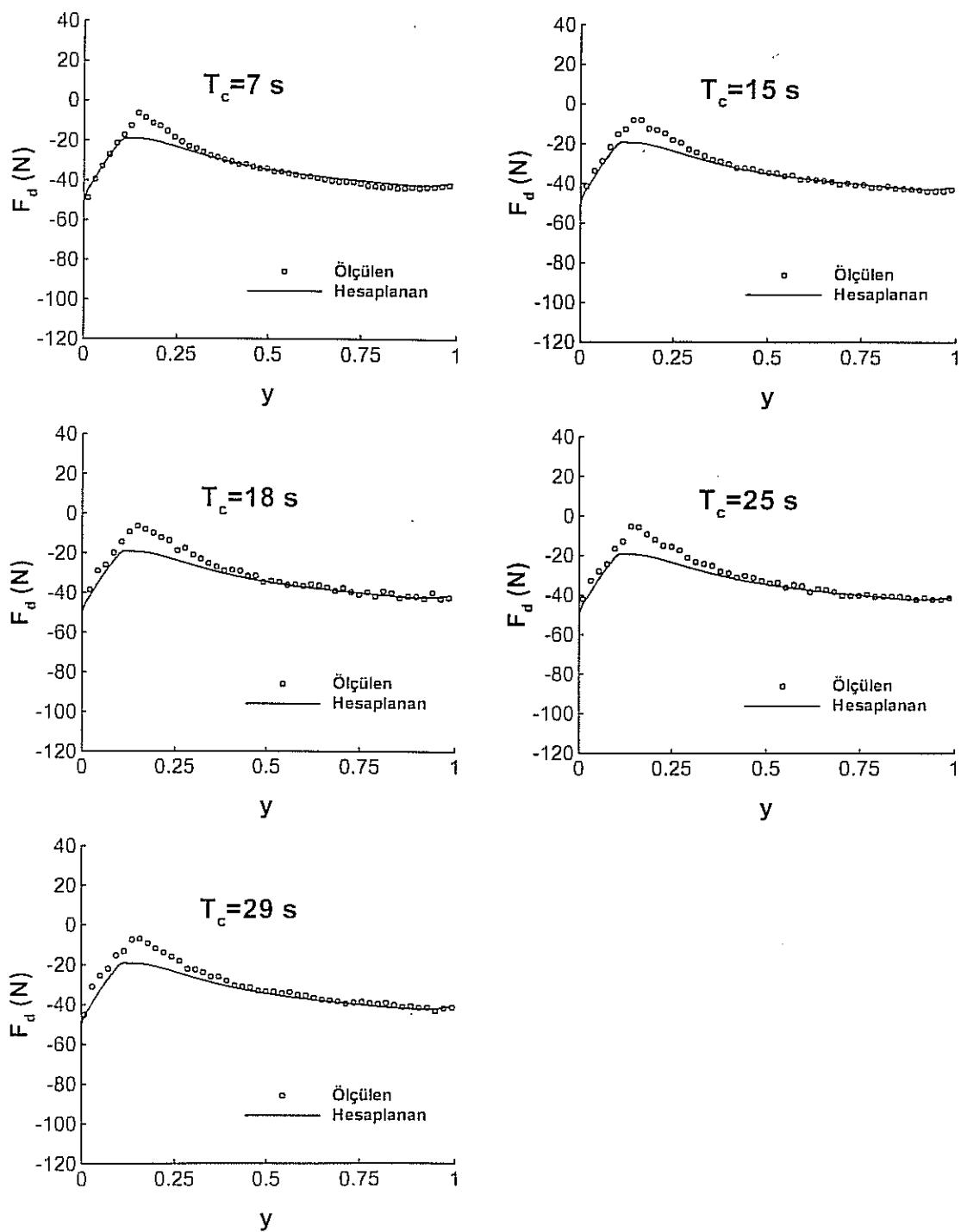
Figür 6.12 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler
 $(\theta=44.7^0, a_{um}=0,0088\text{ m}, a_{dm}=0,0042\text{ m}, \alpha_u=4, \alpha_d=1, Q_m=0,050\text{ m}^3/\text{s})$



Figür 6.13 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler
 $(\theta=44.7^\circ, a_{um}=0.0088 \text{ m}, a_{dm}=0.0028 \text{ m}, \alpha_u=4, \alpha_d=1, Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s})$



Figür 6.14 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler
 $(\theta=44.7^\circ, a_{um}=0,0088 \text{ m}, a_{dm}=0,0028 \text{ m}, \alpha_u=4, \alpha_d=1, Q_m=0,075 \text{ m}^3/\text{s})$



Figür 6.15 Hareketli kapakta hidrodinamik yükler
 $(\theta=44.7^\circ, a_{um}=0,0088 \text{ m}, a_{dm}=0,0028 \text{ m}, \alpha_u=4, \alpha_d=1, Q_m=0,052 \text{ m}^3/\text{s})$

Figürlerde hesaplanan kuvvetler sürekli çizgiyle, ölçülen kuvvetler ise daire sembolü ile gösterilmiştir. Kuvvet ölçümleri elektronik olarak yapıldığından, kapak açıklığının sürekli fonksiyonu olarak da çizilebilir. Görünümü sadeleştirmek bakımından ölçülen değerler seyreltilerek gösterilmiştir. Her figür sayfasında aynı sızma açılığı ve başlangıç debisi ile beş farklı kapatma hızında elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Ardışık olarak sunulan her üç sayfada, aynı sızma koşullarında farklı başlangıç debileri ile çalışılmıştır.

Mansap sızma açılığının en büyük olduğu (Figürler 6.7, 6.8, 6.9, $\alpha_d = 0,0105 \text{ m}$) durumlarda hesaplanan değerler, ölçümlerden genellikle daha büyük, diğer durumlarda ise hesaplanan değerler çoğunlukla ölçümlere iyi uyum sağlamakla birlikte, farklılaşmanın olduğu yerlerde hesaplanan değerler daha küçük kalmaktadır. Bu deneylerde ölçümleri etkileyebilecek önemli zorluklardan biri, kapak kapanırken rezervuar su seviyesinin (H_1) sabit kalmayıp bir miktar yükselmesidir. Rezervuar sınır kuşulu bozulduğundan sistemin davranışları da bir ölçüde değişmektedir.

Diğer önemli bir zorluk ise üst-akımın modellenmesidir. Matematik modeldeki üst-akım formülasyonu tamamıyla bir sızma akımı dikkate alınarak tasarlanmıştır. Deneylerde kullanılan sızma boşlukları ($0.001\sim0.01 \text{ m}$) ise, neredeyse bir prototip yapının sızma boşluklarına yakındır. Modeldeki sızma boşluklarının büyük alınmasının nedeni, pratik olarak ölçülebilecek ve model içinde ayarlanabilecek büyülüklerin seçilmesidir. Hidrolik model ölçegine göre yapılan sızma boşlukları büyük olduğunda ise kapak etrafındaki akım sızma akımı özelliğini bir ölçüde yitirmekte, daha karmaşık, çok boyutlu bir akım oluşturmaktadır. Sızma akımı modellemesinde basınç farkları nedeniyle kapak etrafında sıvı akımları düşünülmüştür. Modelde, büyük sızma boşlukları durumunda, kapak hareket ettiğinde, sadece basınç farklarının oluşturduğu bir akım alanı değil, kapak yuvası içinde hereket eden kapağın tıkanlığı ikinci akım alanı da etkili olmaktadır. Bu nedenlerle, hareketli kapak kuvvet ölçümlerinde deneyel hata oranının daha da büyük olacağı dikkate alınmalıdır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kapanma halindeki hidrolik kapaklarda etkiyen hidrodinamik yüklerin hesaplanması yönelik bir model çalışması gerçekleştirilmiştir. Hidrolik modelden elde edilen ölçümler ve matematik modelin sayısal çözümünden elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- a) Birecik barajı giriş yapıları model çalışmalarından sonra ilk kez uygulanan enerji denklemi yaklaşımının kapsamı, bu çalışmaya genişletilerek geliştirilmiştir. Enerji denklemi uygulamasında, alık bölgesi, kapak bölgesi, hidrolik sıçrama ve cebri boru-türbin vanası için hidrolik yük kayıp katsayıları tanımlanarak, alık-cebri boru sistemi için enerji denklemi yazılır. Enerji denklemi, hidrolik yük ilişkisi olarak yazılabildiği gibi, su ve hava gibi iki akışkan ve ikiden çok aktif akım kesitinin bulunduğu kontrol hacimleri için integral ifadeler kullanılarak güç biriminde de yazılmıştır. Bu yaklaşım, çalışmaya konu olan problem için, literatürdeki ilk örnektir.
- b) Hidrolik yük kayıp katsayılarından faydalananarak, kısmi kapak açıklıkları için debi hesabı ve dolayısıyla alık-cebri boru-türbin vanası sistemi için debi anahtar eğrisi elde edilmesinde sistematik bir yaklaşım sunulmuştur.
- c) Kapak dudağında etkiyen basınç kuvvetlerinin hesabı için boyutsuz aşağı-çekme kuvvet katsayıları tanımlanmıştır. Ölçülen basınç dağılımlarının integralinden elde edilen aşağı-çekme kuvvet katsayısı, dudak açısı ve kapak açıklığının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Bu fonksiyon, tasarlanan bir alık-cebri boru sistemi için uygun aşağı-çekme kuvvetlerini elde etmek bakımından gerekli dudak açısının seçilmesinde pratik bir araç olarak kullanılabilecektir.
- d) Kısımlı açıklıklarda, kapak üzerinden geçen akım için, bir model oluşturulmuş ve idealize edilmiş bir deney düzeneğinde test edilmiştir. Bu model yardımıyla üst-akım debisi yanısıra, kapak yuvasındaki su seviyesi de hesaplanabilmektedir.

- e) Kapak yuvasındaki su seviyesi ve alt-dudaktaki aşağı-çekme kuvvet katsayısı bilindiğinde, kapak üzerindeki hidrodinamik yükler hesaplanabilmektedir. Doğrudan ölçülen ve modelden hesaplanan kuvvetler arasındaki uyum, deneylerin güvenilirliğini ve matematik modelin yeterliliğini ortaya koymaktadır.
- f) Geliştirilen matematik model, hızlı kapatma durumunda, sistemin hava debisi ihtiyacını hesaplayabilmektedir. Deneylerden elde edilen ölçütlerle yapılan karşılaştırmalar, modelin güvenilir sonuçlar ürettiğini kanıtlamıştır. Hava ihtiyacının bilinmesi, alık-cebri boru sisteminin, düşük basınçlara karşı tasarımında, yeterli kapasitede bir havalandırma yapısının boyutlandırılmasına olanak verecektir.
- g) Bu çalışma başlatıldığında, düşey düzlemede iki boyutlu akım alanı için diferansiyel denklemlerin (RANS) sayısal çözümünün yapılması da amaçlanmıştı. Araştırmancın deneysel boyutunda karşılaşılan bazı sorunlar, zamanı süratle tükettiğinden ve sadece sayısal çalışmalara konsantre olacak diğer bir araştırmacı bulunamadığından, sayısal çözüm çalışmaları, bu raporun yazıldığı döneme kadar tamamlanamamıştır. Kapanmakta olan kapak problemi için diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünün, zamana bağlı çok boyutlu bir problem olması, hava ve su karışımı sözkonusu olduğundan, farklı modelleme tekniklerinin geliştirilmesini gerektirmesi, proje süresi içinde bir sonuca ulaşılmasını engellemiştir. Ancak, gelinen bu noktada, bu çalışmada gerçekleştirilen gözlem ve problemin anlaşılmasında kazanılan deneyim birikiminden de faydalansabilecektir. Böylece, diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde gerekli, farklı akım alanlarıyla ilgili modelleme yaklaşımlarının daha gerçekçi ve isabetli olacağı açıktır. Bu kazanımı değerlendirmek bakımından, yarılm kalan RANS sayısal çözümü tamamlanacaktır.
- h) Bu çalışma kapsamındaki deney ve ölçütlerin gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan ekipman ve elektronik ölçüm yetenekleri, bu proje sonucu hidrolik laboratuvarına kazandırılmış altyapı olanakları olarak kalıcı bir katkı sağlayacaktır.

- i) Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, herhangi bir alık-cebri boru hidrolik model çalışması için, model inşaasında uygulanması gereklilik teknik ayrıntılar, ölçülmeli gerekli parametreler, ölçüm yöntemleri, deney koşulları ve deney verilerinin değerlendirilmesi bakımından, izlenmesi gereken bir modelleme yaklaşımı örneklenmiştir.

8. REFERANSLAR

- AYDIN I. (2002), 'Air Demand Behind High Head Gates During Emergency Closure', J. of Hyd. Res., IAHR, (40)1, pp83-93.
- AYDIN I. (1998), 'Evaluation of Fluctuating Pressures Measured with Connection Tubes', J. of Hyd. Eng., ASCE, (124)4, pp413-418.
- DÜNDAR O., TELCİ İ. T., AYDIN İ., (2002), 'Experimental Verification of Integral Equation Method in Computation of Air Demand Behind Leaf Gates', Fifth Int. Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 25-27 September, pp. 1151-1160.
- FALVEY H.T. (1968), "Air vent computations, Morrow Point Dam", Hydraulic lab. Report HYD-584, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- FALVEY H.T. (1980), "Air-water flow in hydraulic structures", US Department of Interior, Water and Power Resources Service, Engineering monograph No.41
- FRIZELL K. W., (1988), "Prototype tests of an emergency gate closure", Proceedings of the Int. Symposium on Model Prototype Correlation of Hydraulic Structures, ASCE, Colorado Springs, Colorado, pp.373-380
- FUENTES R. and GARCIA J.J., (1984), "Influence of the tunnel length on the hydraulic modelling of the air entrainment in the flow downstream of a high head gate", Symposium on Scale Effect in Modeling Hydraulic Structures, IAHR, Esslingen am Neckar, Germany, September 3-6, pp. 4.14.1-4.14.2
- GÜREŞÇİ F., (2001) 'Overflow Through Spacings Around Leaf Gates', Master of Science Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey

JARAMILLO C. A. and VILLEGRAS F.,(1988),"Air demand of high head sluice gates: model-prototype comparison", Proceedings of the Int. Symposium on Model Prototype Correlation of Hydraulic Structures, ASCE, Colorado Springs, Colorado, pp.95-101

NAUDASCHER E., (1984), "Scale effects in gate model tests", Symposium on Scale Effect in Modeling Hydraulic Structures, IAHR, Esslingen am Neckar, Germany, September 3-6, pp. 1.1.1-1.1.14

NAUDASCHER E., (1986), "Prediction and control of downpull on tunnel gates", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.112, No.5, pp.392-416

NAUDASCHER E., (1991), "Hydrodynamic forces", A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands

ORHON M. (1989), 'Air Entrained Flow Characteristics in Partially Filled Closed Conduits', Ph. D. Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.

RABBEN L. and ROUVE G., (1984), "Air demand of high head gates, model-family studies to quantify scale effects", Symposium on Scale Effect in Modeling Hydraulic Structures, IAHR, Esslingen am Neckar, Germany, September 3-6, pp. 4.9.1-4.9.3

SHARMA H. R., (1976), "Air entrainment in high head gated conduits", J. of the Hydraulics Division, ASCE, vol.102, No.11, pp.1629-1646

TELÇİ İ.T., DÜNDAR O., AYDIN İ, (2002), 'Downpull Force on Leaf Gates with Different Lip Angles', Fifth Int. Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 25-27 September, pp. 1161-1170.

de VRIES F.,(1988), "Model study on the emergency closure of a high head wheel gate", Proceedings of the Int. Symposium on Model Prototype Correlation of Hydraulic Structures, ASCE, Colorado Springs, Colorado, pp.325-333

9. EKLER

EK.1

Deney A.1 : Kapak tam açık konumunda türbin vanasının farklı açıklıkları için ölçülen sistem debisi, Q, kapak yuvasında su yüksekliği, h_2 , havalandırma bacاسında su yüksekliği, h_3 ve kuyruk suyu yüksekliği, H_4 .

Q (m ³ /s)	h_2 (m)	h_3 (m)
0.1216	2.146	2.137
0.1190	2.155	2.147
0.1168	2.157	2.150
0.1144	2.165	2.158
0.1096	2.174	2.167
0.1073	2.183	2.176
0.1022	2.191	2.185
0.0987	2.197	2.188
0.0956	2.204	2.198
0.0930	2.208	2.203
0.0892	2.216	2.211
0.0857	2.224	2.217
0.0817	2.229	2.224
0.0776	2.236	2.232
0.0755	2.242	2.236
0.0698	2.249	2.244
0.0626	2.259	2.256
0.0597	2.262	2.259
0.0551	2.267	2.265
0.0520	2.271	2.268
0.0486	2.274	2.271
0.0441	2.279	2.277
0.0414	2.281	2.279
0.0384	2.284	2.280
0.0357	2.286	2.282
0.0333	2.288	2.286
0.0297	2.290	2.289

Q (m ³ /s)	H_4 (m)
0.1250	0.382
0.1235	0.380
0.1135	0.361
0.1129	0.360
0.1123	0.358
0.1118	0.356
0.1099	0.353
0.1085	0.351
0.1072	0.347
0.1071	0.344
0.0955	0.325
0.0948	0.325
0.0854	0.309
0.0848	0.309
0.0784	0.296
0.0771	0.291
0.0751	0.289
0.0681	0.274
0.0650	0.266
0.0637	0.264
0.0514	0.236
0.0434	0.223
0.0416	0.222
0.0364	0.207
0.0267	0.187
0.0210	0.180

Ek.2

Deneysel A.2 : Kısımlı kapak açıklıklarında sistem debisi ve havalandırma bacاسında su yüksekliği, h_3 .

Q_{in} (m^3/s)	0.040	0.040	0.050	0.062	0.083	0.104	0.122
y	Q (m^3/s)	h_3 (m)	Q (m^3/s)	h_3 (m)	Q (m^3/s)	h_3 (m)	Q (m^3/s)
1.00	0.0401	2.141	0.0500	2.184	0.0616	2.225	0.0832
0.90	0.0401	2.025	0.0500	2.100	0.0615	2.175	0.0830
0.80	0.0401	1.933	0.0499	2.033	0.0615	2.130	0.0822
0.70	0.0399	1.817	0.0499	1.942	0.0615	2.079	0.0817
0.60	0.0396	1.661	0.0497	1.800	0.0608	1.970	0.0811
0.50	0.0394	1.416	0.0488	1.638	0.0605	1.831	0.0794
0.45	0.0388	1.316	0.0486	1.502	0.0594	1.752	0.0779
0.40	0.0386	-	0.0483	1.374	0.0590	1.651	0.0764
0.35	0.0374	-	0.0476	1.253	0.0575	1.510	0.0743
0.30	0.0368	-	0.0469	-	0.0550	1.343	0.0709
0.25	0.0365	-	0.0448	-	0.0523	1.197	0.0653
0.20	0.0348	-	0.0416	-	0.0499	-	0.0579
0.15	0.0316	-	0.0370	-	0.0429	-	0.0414
0.10	0.0263	-	0.0298	-	0.0295	-	0.0310
0.05	0.0139	-	0.0153	-	0.0142	-	0.0160

EK.3

Deney A.3 : Kapak tam kapalı konumunda üst-akım debisi, Q_o , menba toplam yükü, H_u , ve kapak yuvası su seviyesi, h_2 .

a_{um} (m)	a_{dm} (m)	Q_o (m^3/s)	H_u (m)	h_2 (m)
0.0006	0.0028	0.0008	2.313	1.462
0.0006	0.0042	0.0008	2.313	Ölçülemedi
0.0006	0.0072	0.0008	2.313	Ölçülemedi
0.0006	0.01005	0.0008	2.313	Ölçülemedi
0.0027	0.0028	0.0014	2.307	1.787
0.0027	0.0042	0.0019	2.323	1.552
0.0027	0.0072	0.0020	2.320	Ölçülemedi
0.0027	0.01005	0.0020	2.320	Ölçülemedi
0.0059	0.0028	0.0023	2.316	2.157
0.0059	0.0042	0.0032	2.319	1.997
0.0059	0.0072	0.0043	2.312	1.737
0.0059	0.01005	0.0044	2.300	1.677
0.0088	0.0028	0.0022	2.317	2.227
0.0088	0.0042	0.0035	2.310	2.109
0.0088	0.0072	0.0050	2.306	1.931
0.0088	0.01005	0.0053	2.304	1.842

EK.4

Deney A.4 : Üst-akım menba yüzü durgunluk fonksiyonu için menba yüzü toplam yükü.

y	H_u (m)	
	$Q_m=0.040 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s}$
1.00	2.2825	2.1360
0.90	2.2875	2.1610
0.80	2.2920	2.2030
0.70	2.2955	2.2330
0.60	2.2925	2.2450
0.50	2.2940	2.2400
0.40	2.2965	2.2580
0.35	2.2980	2.2680
0.30	2.2985	2.2740
0.25	2.3000	2.2870
0.20	2.3035	2.2910
0.15	2.2960	2.2930
0.10	2.2965	2.2995
0.05	2.3000	2.2980

EK.5

Deney A.5 : Havalandırma bacası giriş yük kayıp katsayısı ölçümleri.

$Q(m^3/s)$	$\Delta h_{es}(m)$	K_{es}
0.00019	0.0022	1.1515
0.00022	0.003	1.1621
0.00025	0.0033	0.9442
0.00028	0.0041	0.8752
0.00037	0.007	0.8737
0.00042	0.0098	0.9997
0.00043	0.0113	1.1637
0.00046	0.0126	1.1109
0.00049	0.0138	1.0232
0.00052	0.0158	1.1214
0.00056	0.0172	0.9667
0.00061	0.0205	0.9442
0.00067	0.023	0.8553
0.00076	0.0296	0.8425
0.00089	0.04	0.8005
0.00102	0.0625	1.1533
0.00113	0.068	0.908
0.0004	0.007	0.5893
0.00065	0.022	0.8317
0.00133	0.089	0.7848
0.00154	0.121	0.8139
0.00171	0.14	0.712
0.00104	0.056	0.844
0.00066	0.021	0.7186
0.00061	0.017	0.6407
0.00057	0.019	1.0694
0.00051	0.012	0.6471
0.00048	0.011	0.7279
0.00043	0.009	0.758
0.0004	0.008	0.8014
0.00029	0.004	0.7279
0.00025	0.003	0.7825
0.00021	0.002	0.6157
0.00012	0.0005	0.2407

EK.6

Deneysel B.1, B.2, B.3 ve B.4'ten elde edilen hava ihtiyacı ölçümleri.

No	a_{um} (m)	a_{dm} (m)	Q_m (m^3/s)	T_c (s)	Q_o (m^3/s)	Hesaplanan $Q_a(m^3/s)$	Ölçülen $Q_a(m^3/s)$	Hata (%)
1	0.00881	0.01005	0.11880	8.20	0.00559	0.05615	0.05499	-2.1
2				12.57	0.00552	0.05312	0.05222	-1.7
3				16.90	0.00549	0.05114	0.05066	-0.9
4				20.48	0.00547	0.04911	0.04970	1.2
5				23.31	0.00545	0.04805	0.04905	2.1
6				25.16	0.00544	0.04741	0.04866	2.6
7				28.61	0.00543	0.04529	0.04795	5.9
8	0.00881	0.01005	0.09948	29.39	0.00530	0.04260	0.04108	-3.6
9				28.82	0.00530	0.04185	0.04114	-1.7
10				20.99	0.00531	0.04228	0.04202	-0.6
11				23.26	0.00531	0.04200	0.04173	-0.6
12				25.72	0.00530	0.04252	0.04146	-2.5
13				18.19	0.00532	0.04461	0.04243	-4.9
14				15.00	0.00533	0.04487	0.04303	-4.1
15				12.56	0.00535	0.04610	0.04365	-5.3
16				11.32	0.00536	0.04570	0.04406	-3.6
17				10.81	0.00536	0.04617	0.04426	-4.1
18	0.00881	0.01005	0.07998	30.04	0.00516	0.03595	0.03285	-8.6
19				22.85	0.00517	0.03447	0.03322	-3.6
20				22.38	0.00517	0.03387	0.03324	-1.8
21				24.46	0.00516	0.03365	0.03312	-1.6
22				24.32	0.00516	0.03387	0.03313	-2.2
23				18.36	0.00517	0.03524	0.03355	-4.8
24				15.19	0.00518	0.03556	0.03389	-4.7
25				12.96	0.00518	0.03598	0.03423	-4.9
26				10.74	0.00519	0.03640	0.03471	-4.6
27				19.56	0.00517	0.03457	0.03345	-3.2
28	0.00881	0.01005	0.06105	22.73	0.00505	0.02601	0.02419	-7.0
29				23.45	0.00504	0.02579	0.02417	-6.3
30				26.83	0.00504	0.02530	0.02409	-4.8
31				30.90	0.00504	0.02518	0.02401	-4.7
32				21.81	0.00505	0.02585	0.02422	-6.3
33				19.69	0.00505	0.02589	0.02430	-6.1
34				17.36	0.00505	0.02611	0.02441	-6.5
35				15.59	0.00505	0.02632	0.02452	-6.9
36				12.95	0.00505	0.02681	0.02474	-7.7
37				11.74	0.00506	0.02680	0.02488	-7.2
38				11.06	0.00506	0.02701	0.02497	-7.6
39	0.00881	0.01005	0.04042	32.96	0.00495	0.01463	0.01381	-5.6
40				25.90	0.00495	0.01419	0.01385	-2.4
41				28.02	0.00495	0.01424	0.01384	-2.8
42				30.37	0.00495	0.01422	0.01382	-2.8

Ek. 6. Devamı

43				25.02	0.00495	0.01456	0.01386	-4.8
44				23.51	0.00495	0.01516	0.01387	-8.5
45	0.00881	0.01005	0.04042	22.15	0.00495	0.01461	0.01389	-4.9
46				20.75	0.00495	0.01509	0.01391	-7.8
47				19.67	0.00495	0.01541	0.01392	-9.7
48				18.06	0.00495	0.01579	0.01395	-11.6
49				14.48	0.00495	0.01544	0.01408	-8.8
50	0.00881	0.01005	0.04050	12.33	0.00496	0.01483	0.01418	-4.4
51				11.15	0.00496	0.01533	0.01425	-7.1
52				8.17	0.00496	0.01598	0.01455	-8.9
53				23.18	0.00449	0.04800	0.04980	3.8
54				26.81	0.00447	0.04637	0.04901	5.7
55				30.81	0.00446	0.04522	0.04818	6.5
56				37.35	0.00444	0.04503	0.04684	4.0
57				8.15	0.00461	0.05715	0.05598	-2.1
58	0.00881	0.00721		12.59	0.00455	0.05341	0.05313	-0.5
59				16.82	0.00452	0.05030	0.05158	2.5
60				20.59	0.00450	0.04994	0.05055	1.2
61				23.00	0.00449	0.04894	0.04998	2.1
62				23.56	0.00449	0.04787	0.04985	4.1
63				25.35	0.00448	0.04783	0.04945	3.4
64				28.77	0.00447	0.04622	0.04872	5.4
65				21.33	0.00284	0.04831	0.05116	5.9
66				23.81	0.00284	0.04807	0.05056	5.2
67				26.47	0.00283	0.04808	0.04995	3.9
68				29.28	0.00282	0.04773	0.04932	3.3
69				35.12	0.00281	0.04484	0.04804	7.1
70	0.00881	0.00421		8.01	0.00292	0.05838	0.05741	-1.7
71				12.18	0.00288	0.05452	0.05455	0.1
72				16.57	0.00286	0.05189	0.05283	1.8
73				20.46	0.00285	0.04960	0.05170	4.2
74				22.15	0.00284	0.04961	0.05126	3.3
75				26.17	0.00283	0.04731	0.05030	6.3
76				29.64	0.00282	0.04704	0.04950	5.2
77				8.28	0.00186	0.05907	0.05798	-1.9
78				12.77	0.00183	0.05505	0.05501	-0.1
79				17.37	0.00182	0.05310	0.05325	0.3
80	0.00881	0.00280	0.11920	21.71	0.00181	0.05004	0.05199	3.9
81				29.60	0.00180	0.04781	0.05000	4.6
82				25.87	0.00180	0.04808	0.05092	5.9
83				33.52	0.00179	0.04626	0.04905	6.0
84				8.03	0.00497	0.01854	0.01577	-14.9
85				11.82	0.00496	0.01772	0.01537	-13.3
86				15.41	0.00496	0.01723	0.01521	-11.7
87	0.00881	0.01005	0.04274	19.42	0.00496	0.01672	0.01511	-9.6
88				22.92	0.00496	0.01639	0.01506	-8.1
89				26.24	0.00496	0.01624	0.01502	-7.5
90				30.52	0.00496	0.01617	0.01499	-7.3
91	0.00881	0.00721	0.04050	8.14	0.00408	0.01668	0.01549	-7.1
92				10.62	0.00408	0.01567	0.01523	-2.8
93				14.96	0.00407	0.01415	0.01502	6.1

Ek. 6. Devami

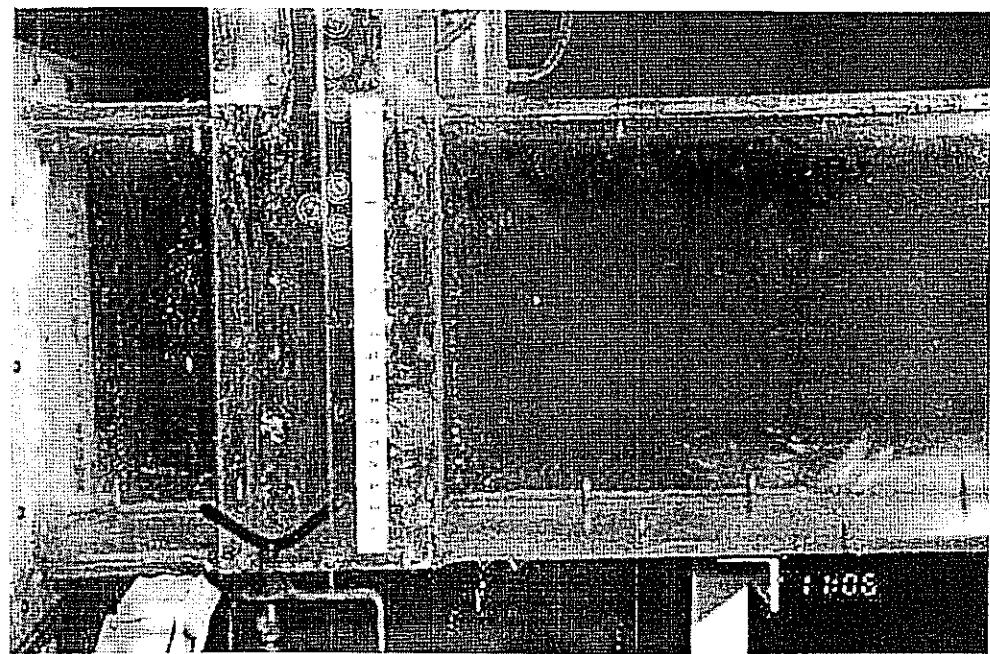
94			0.04050	18.72	0.00407	0.01349	0.01493	10.7
95				28.11	0.00407	0.01478	0.01458	-1.3
96	0.00881	0.00721	0.04001	35.47	0.00407	0.01505	0.01455	-3.3
97				30.52	0.00407	0.01480	0.01457	-1.6
98				29.56	0.00407	0.01573	0.01457	-7.4
99				7.81	0.00409	0.01931	0.01674	-13.3
100				11.52	0.00408	0.01811	0.01634	-9.8
101				15.24	0.00408	0.01711	0.01616	-5.5
102	0.00881	0.00721	0.04274	19.31	0.00408	0.01681	0.01606	-4.5
103				23.68	0.00408	0.01649	0.01600	-3.0
104				26.39	0.00408	0.01641	0.01597	-2.7
105				28.80	0.00408	0.01701	0.01595	-6.2
106				29.99	0.00257	0.01638	0.01582	-3.4
107				35.69	0.00257	0.01645	0.01579	-4.0
108				25.74	0.00257	0.01635	0.01585	-3.1
109	0.00881	0.00421	0.03984	23.73	0.00257	0.01643	0.01586	-3.5
110				20.54	0.00257	0.01688	0.01590	-5.8
111				16.67	0.00257	0.01776	0.01597	-10.1
112				12.37	0.00257	0.01801	0.01611	-10.6
113				8.29	0.00257	0.01999	0.01644	-17.7
114				7.82	0.00257	0.01957	0.01740	-11.1
115				11.24	0.00257	0.01904	0.01703	-10.5
116	0.00881	0.00421	0.04149	14.29	0.00257	0.01835	0.01688	-8.0
117				18.80	0.00257	0.01723	0.01677	-2.7
118				21.70	0.00257	0.01713	0.01672	-2.4
119				25.42	0.00257	0.01690	0.01668	-1.3
120				7.93	0.00164	0.02230	0.01861	-16.6
121				11.71	0.00163	0.02045	0.01821	-11.0
122				14.74	0.00163	0.02009	0.01806	-10.1
123	0.00881	0.00280	0.04249	18.98	0.00163	0.01962	0.01795	-8.5
124				27.62	0.00163	0.01897	0.01784	-6.0
125				24.04	0.00163	0.01925	0.01787	-7.2
126				30.61	0.00163	0.01917	0.01781	-7.1
127				36.80	0.00456	0.04345	0.04656	7.2
128				30.96	0.00458	0.04508	0.04779	6.0
129				28.19	0.00459	0.04686	0.04837	3.2
130	0.00591	0.01005	0.11920	24.83	0.00460	0.04668	0.04911	5.2
131				22.63	0.00461	0.04830	0.04961	2.7
132				17.93	0.00463	0.05040	0.05083	0.8
133				13.24	0.00466	0.05315	0.05245	-1.3
134				8.37	0.00472	0.05696	0.05545	-2.6
135				8.44	0.00408	0.05736	0.05608	-2.2
136				12.99	0.00403	0.05449	0.05325	-2.3
137				18.14	0.00400	0.05089	0.05144	1.1
138	0.00591	0.00721	0.11920	22.71	0.00398	0.04891	0.05025	2.7
139				25.91	0.00397	0.04797	0.04950	3.2
140				30.04	0.00396	0.04575	0.04859	6.2
141				36.85	0.00393	0.04494	0.04712	4.8
142	0.00591	0.00421	0.11920	8.15	0.00277	0.05852	0.05748	-1.8
143				12.51	0.00273	0.05489	0.05456	-0.6
144				16.52	0.00272	0.05234	0.05298	1.2

Ek. 6. Devami

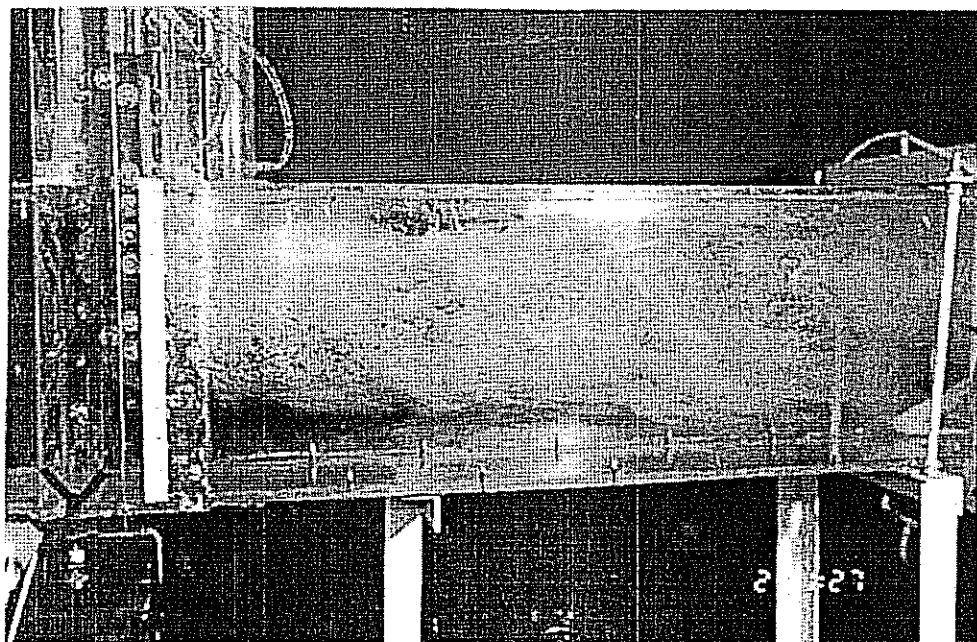
145				20.35	0.00270	0.04995	0.05185	3.8
146				24.08	0.00269	0.04917	0.05089	3.5
147	0.00591	0.00421	0.11920	26.76	0.00268	0.04813	0.05025	4.4
148				29.99	0.00268	0.04831	0.04949	2.4
149				33.79	0.00267	0.04600	0.04861	5.7
150				8.16	0.00182	0.05944	0.05809	-2.3
151				12.38	0.00179	0.05544	0.05520	-0.4
152				16.62	0.00178	0.05247	0.05348	1.9
153	0.00591	0.00280	0.11920	21.16	0.00177	0.05052	0.05212	3.2
154				24.20	0.00176	0.04923	0.05132	4.3
155				28.91	0.00176	0.04769	0.05015	5.2
156				41.67	0.00173	0.04324	0.04703	8.8
157				35.69	0.00174	0.04449	0.04850	9.0
158				7.87	0.00420	0.01969	0.01646	-16.4
159	0.00591	0.01005	0.04308	14.73	0.00419	0.01865	0.01586	-15.0
160				22.00	0.00419	0.01753	0.01568	-10.5
161				30.73	0.00419	0.01744	0.01560	-10.6
162				7.77	0.00362	0.01854	0.01603	-13.5
163				10.82	0.00361	0.01721	0.01568	-8.9
164				13.74	0.00361	0.01720	0.01552	-9.8
165	0.00591	0.00721	0.04099	16.95	0.00361	0.01732	0.01542	-11.0
166				20.39	0.00361	0.01738	0.01535	-11.7
167				23.64	0.00361	0.01713	0.01531	-10.6
168				27.09	0.00361	0.01686	0.01528	-9.4
169				29.98	0.00361	0.01631	0.01526	-6.4
170				8.11	0.00244	0.02076	0.01810	-12.8
171				12.48	0.00244	0.01947	0.01768	-9.2
172				16.37	0.00244	0.01857	0.01753	-5.6
173	0.00591	0.00421	0.04283	20.53	0.00244	0.01807	0.01744	-3.5
174				25.11	0.00244	0.01811	0.01738	-4.0
175				28.12	0.00244	0.01798	0.01735	-3.5
176				32.36	0.00244	0.01777	0.01732	-2.5
177				8.12	0.00160	0.02192	0.01913	-12.7
178				12.23	0.00160	0.02091	0.01871	-10.5
179				15.73	0.00160	0.02027	0.01855	-8.5
180	0.00591	0.00280	0.04351	20.39	0.00160	0.01950	0.01844	-5.5
181				24.03	0.00160	0.01937	0.01838	-5.1
182				27.69	0.00160	0.01910	0.01835	-4.0
183				32.42	0.00160	0.01885	0.01831	-2.9
184	0.00272	0.00421	0.11920	8.00	0.00203	0.06015	0.05781	-3.9
185				18.01	0.00199	0.05350	0.05257	-1.7
186				7.96	0.00154	0.06070	0.05831	-3.9
187				12.01	0.00152	0.05729	0.05537	-3.4
188				15.55	0.00151	0.05560	0.05383	-3.2
189				18.38	0.00151	0.05395	0.05288	-2.0
190	0.00272	0.00280	0.11920	20.07	0.00150	0.05343	0.05238	-2.0
191				22.62	0.00150	0.05246	0.05167	-1.5
192				25.83	0.00149	0.05071	0.05084	0.3
193				28.52	0.00149	0.04890	0.05017	2.6
194				32.70	0.00148	0.04691	0.04914	4.7
195	0.00272	0.00421	0.04283	7.98	0.00179	0.02104	0.01838	-12.7

Ek. 6. Devamı

196				11.85	0.00179	0.01997	0.01795	-10.1
197				15.06	0.00179	0.02005	0.01779	-11.3
198	0.00272	0.00421	0.04283	18.99	0.00179	0.01936	0.01768	-8.7
199				22.38	0.00179	0.01933	0.01762	-8.8
200				26.25	0.00179	0.01934	0.01758	-9.1
201				30.60	0.00179	0.01937	0.01754	-9.5
202				7.80	0.00136	0.02117	0.01877	-11.3
203				11.50	0.00135	0.01976	0.01835	-7.1
204	0.00272	0.00280	0.04266	15.07	0.00135	0.01948	0.01817	-6.7
205				19.05	0.00135	0.01922	0.01806	-6.0
206				23.50	0.00135	0.01906	0.01799	-5.6
207				27.71	0.00135	0.01899	0.01795	-5.5
208				31.87	0.00135	0.01910	0.01791	-6.2
209	0.00058	0.00280	0.11920	7.98	0.00030	0.06078	0.05886	-3.2
210				20.07	0.00029	0.05196	0.05273	1.5
211				7.89	0.00026	0.02210	0.01948	-11.9
212				11.67	0.00026	0.02129	0.01903	-10.6
213	0.00058	0.00280	0.04283	15.73	0.00026	0.02062	0.01883	-8.7
214				19.99	0.00026	0.02039	0.01871	-8.2
215				23.76	0.00026	0.02080	0.01865	-10.3
216				27.07	0.00026	0.02079	0.01861	-10.5
217				30.64	0.00026	0.02079	0.01858	-10.6

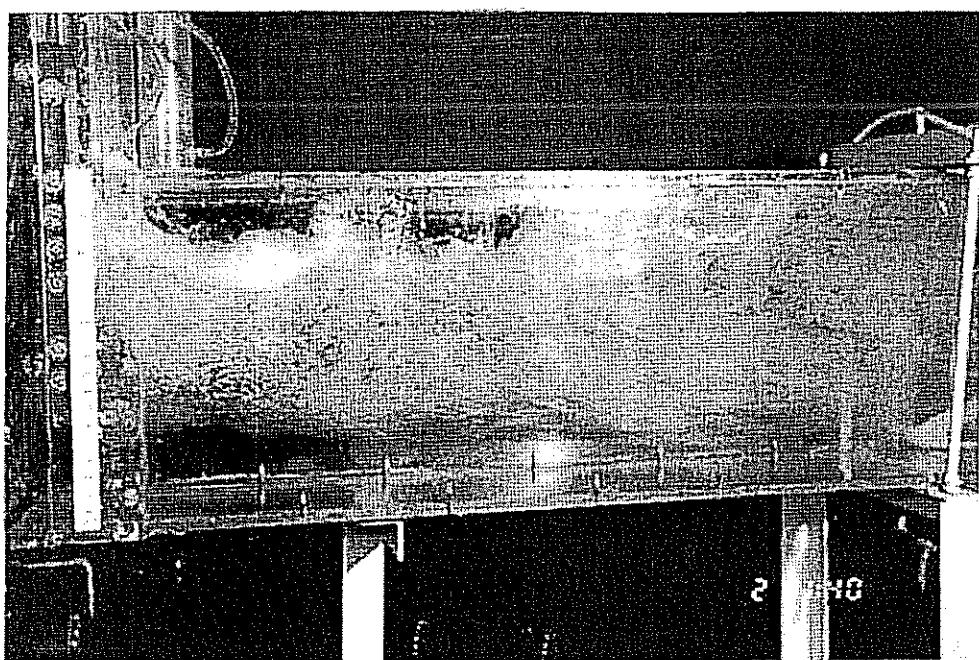


y=0.60

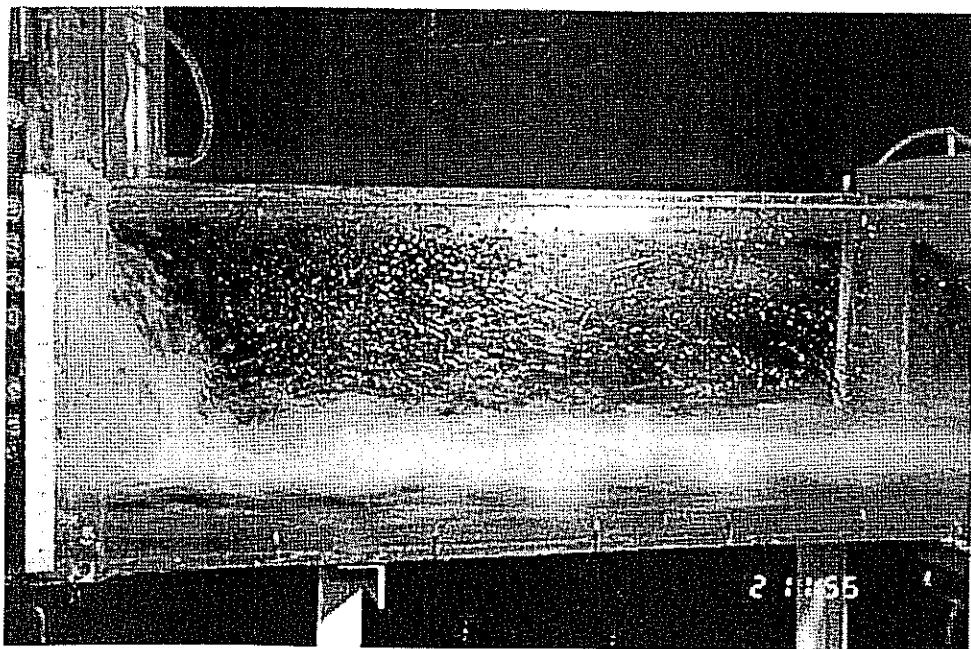


y=0.35

Ek. 7. $Q_m=0.120 \text{ m}^3/\text{s}$ için kapağın farklı açıklıklarında kapak bölgesinde akım koşulları

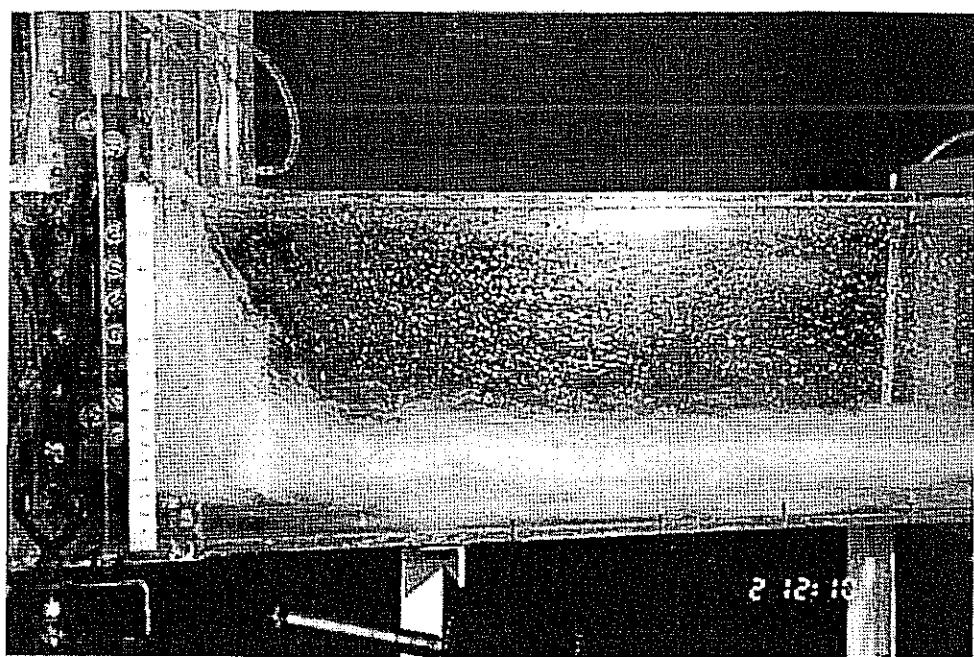


y=0.30

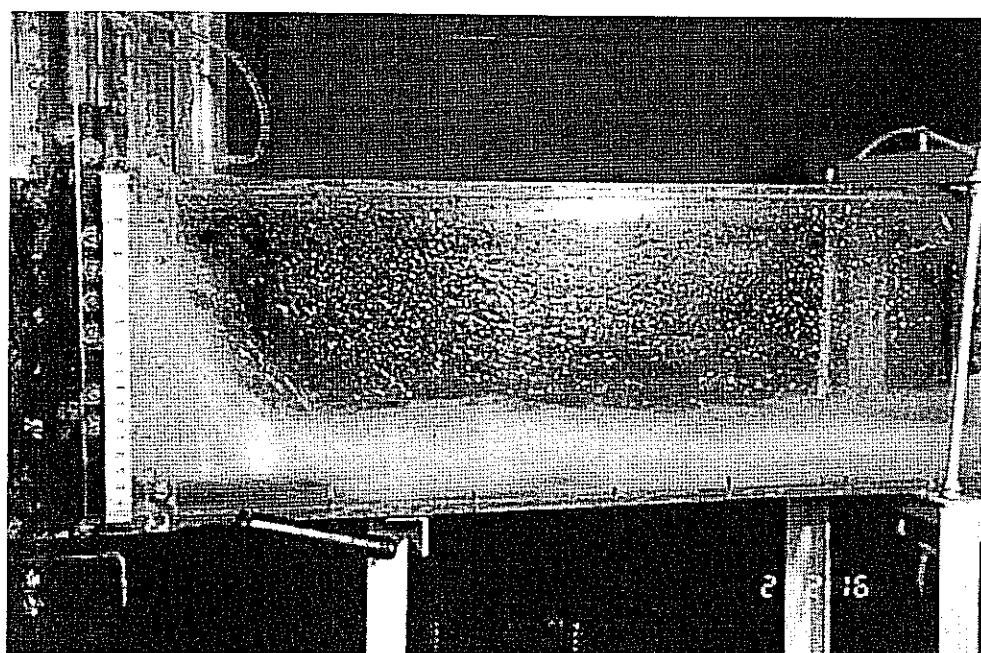


y=0.25

Ek. 7. Devami

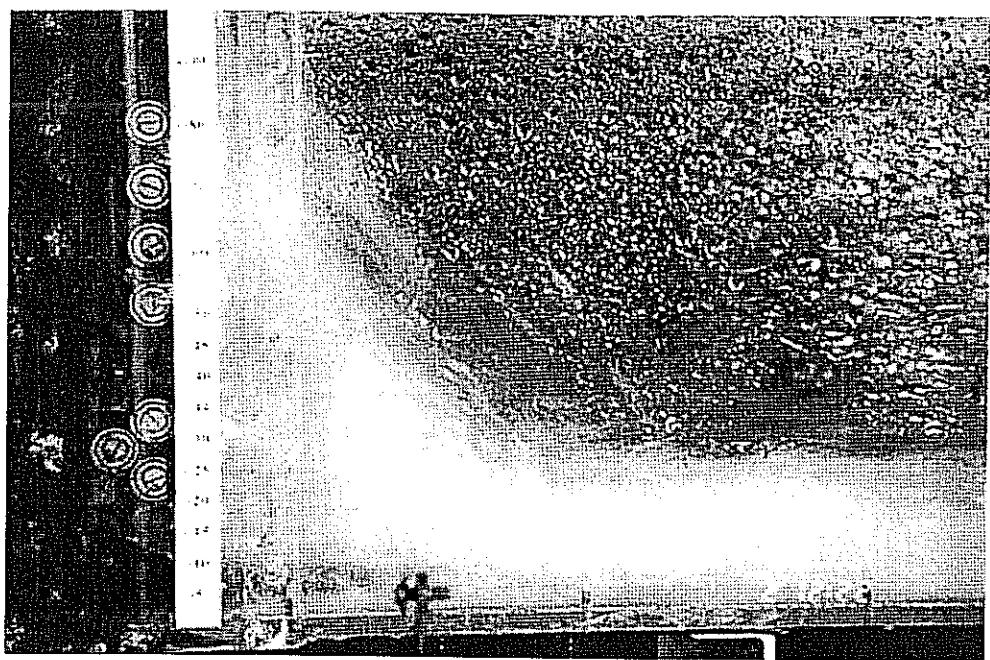


y=0.20

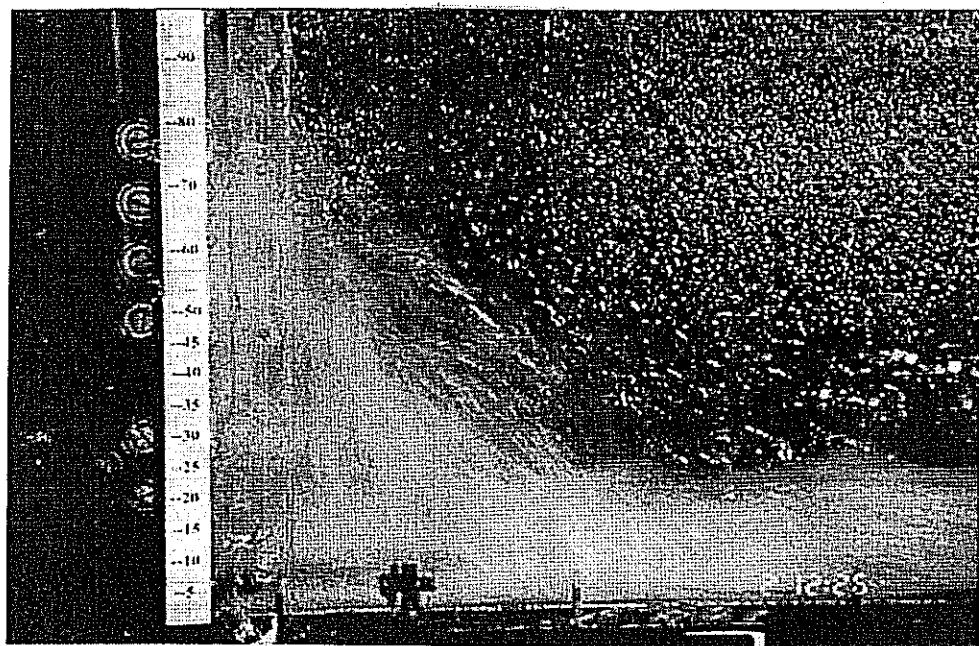


y=0.15

Ek. 7. Devamı

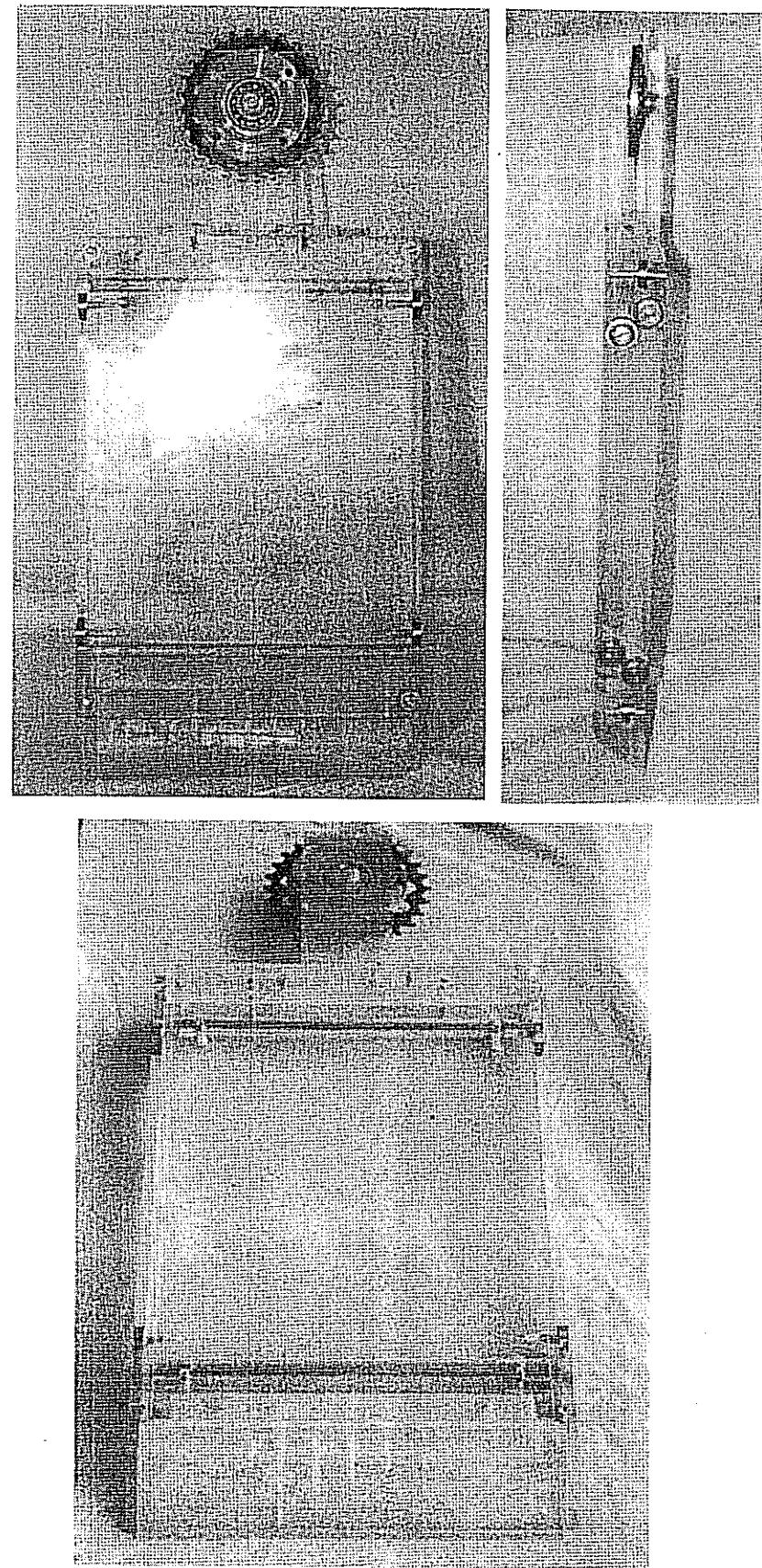


y=0.10



y=0.05

Ek. 7. Devamı



Ek. 8. Kapak fotoğrafları