

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Selahattin KOCAMAN

**BARAJ YIKILMASI PROBLEMİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK
İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2007

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BARAJ YIKILMASI PROBLEMİNİN DENEYSEL VE TEORİK
OLARAK İNCELENMESİ

Selahattin KOCAMAN

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 04/09/2007 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/ Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.

İmza
Yrd.Doç.Dr. Hatice ÇAĞATAY
DANIŞMAN

İmza
Prof.Dr. M. Salih KIRKGÖZ
ÜYE

İmza
Doç.Dr. Galip SEÇKİN
ÜYE

İmza
Yrd.Doç.Dr. Mustafa MAMAK
ÜYE

İmza
Yrd.Doç.Dr. Hasan GÜZEL
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Kod No:

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: MMF 2002 D15

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

DOKTORA TEZİ

BARAJ YIKILMASI PROBLEMİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Selahattin KOCAMAN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Hatice ÇAĞATAY
Yıl : 2007 Sayfa: 286
Jüri : Yrd. Doç. Dr. Hatice ÇAĞATAY
Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ
Doç. Dr. Galip SEÇKİN
Yrd. Doç. Dr. Mustafa MAMAK
Yrd. Doç. Dr. Hasan GÜZEL

Yapılan çalışmada, baraj yıkılması problemi deneysel, teorik ve sayısal olarak ele alınmıştır. Yatay dikdörtgen bir kanalda, iki farklı durgun su seviyesini ayıran düşey bir kapağın ani olarak kaldırılmasıyla elde edilen baraj yıkılması taşkın dalgasının mansap boyunca yayılması, farklı kuyruk suyu derinlikleri için incelenmiştir. Ayrıca, baraj mansabında farklı geometriye sahip taban eşikleri kullanılarak ve daralmalar oluşturularak akarsu yatağındaki ve enkesit genişliğindeki değişimlerin baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılmasına etkileri araştırılmıştır. Deneylerde, su yüzü profilleri ve kanal boyunca istenilen noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri sayısal görüntü işleme teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları, analitik çözüm ve sığ su denklemleri ile Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerinin sayısal çözüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümler için FLOW-3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Baraj Yıkılması, Taşkınlar, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Değişken Akım, Görüntü İşleme

ABSTRACT

Ph. D. THESIS

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF DAM BREAK PROBLEM

Selahattin KOCAMAN

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF ÇUKUROVA

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Hatice ÇAĞATAY
Year : 2007 **Pages:** 286
Jury : Asst. Prof. Dr. Hatice ÇAĞATAY
Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ
Assoc. Prof. Dr. Galip SEÇKİN
Asst. Prof. Dr. Mustafa MAMAK
Asst. Prof. Dr. Hasan GÜZEL

In this study, dam break problem has been handled experimentally, theoretically and numerically. Propagation of flood waves along downstream resulting from dam break which has been generated by instantaneous removal of a barrier between two bodies of water at rest with different levels above a horizontal bed has been examined for different tailwater depths. Besides, variations of bed topography and the channel width effects on dam break flood waves propagation have been studied by using bottom sills and establishing contraction with different geometry in the channel. In experiments, water surface profiles and water depth variations with time along downstream have been determined by using digital image processing techniques. The experimental results have been compared with analytical solutions, numerical solutions of the shallow water equations and Reynolds Averaged Navier Stokes equations. FLOW-3D computational fluid dynamic software has been used for numerical solutions

Key words: Dam-break, Floods, Computational Fluid Dynamics, Unsteady Flow, Image Processing

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında değerli yardımlarını ve desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Hatice ÇAĞATAY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deney düzeneğinin hazırlanması sırasında gösterdikleri yardımlardan dolayı fakültemiz atölye çalışanlarından Sefa MERAL, Feti YAMAN ve Sami GÜVEN'e, deneyleri yaparken desteğinden ötürü teknisyenimiz Ömer KÜTÜK'e yürekten teşekkür ederim.

Tezin hazırlanması sırasında önemli yardımlarını gördüğüm Araş. Gör. Tarık BARAN'a ve değerli fikirlerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Hasan GÜZEL ile Araş. Gör. Dr. Taha TAŞKIRAN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca burada isimlerini sayamadığım bölümümüzdeki tüm araştırma görevlisi dostlarıma şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında manevi desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili eşim Ayşe YAVUZ KOCAMAN ile anne ve babama sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bu doktora çalışmasını maddi yönden destekleyen Çukurova Üniversitesi Araştırma Fonu yöneticilerine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA NO

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
SİMGELER VE KISALTMALAR	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	9
3. MATERYAL ve METOD	29
3.1. Giriş	29
3.2. Navier-Stokes Denklemleri	31
3.3. Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) Denklemleri	35
3.4. Saint-Venant Denklemleri (Sığ Su Denklemleri)	40
3.4.1. Saint-Venant Denklemlerinin Elde Edilmesi	42
3.4.1.1. Süreklilik Denklemi	43
3.4.1.2. Momentum Denklemi	46
3.5. Karakteristikler Yöntemi	54
3.5.1. Başlangıç ve Sınır Şartları	61
3.6. Baraj Yıkılması Probleminin Analitik Çözümleri	63
3.6.1. Kuru Kanalda Baraj Yıkılması Taşkın Dalgasının Yayılması	63
3.6.2. Mansapta Kuyruk Suyu Bulunması Halinde Baraj Yıkılması Taşkın Dalgasının Yayılması (Islak Durum)	69
3.7. FLOW-3D Yazılımı	76
3.7.1. k- ϵ Türbülans Modeli	80
4. GÖRÜNTÜ İŞLEME ve ANALİZİ	83
4.1. Görüntüleme Sistemi	83
4.2. Görüntüleme Sisteminin Bileşenleri	84
4.2.1. Video Kamera	84

4.2.2. Mercekler (Lensler)	88
4.2.3. Aydınlatma	91
4.2.4. Görüntü Yakalama Kartı (Frame Grabber):	92
4.2.5. Bilgisayar	93
4.2.6. Yazılım	94
4.3. Görüntü İşleme ve Analizi	95
4.3.1. Görüntünün Tanımlanması ve Modellenmesi	95
4.3.2. Görüntü İşleme Teknikleri.....	99
4.4. Kalibrasyonlar	102
4.4.1. Görüntünün Açısal Kalibrasyonu	104
4.4.2. Perspektif Kalibrasyon.....	109
4.4.3. Yatay Kalibrasyon (Görüntülerin Yataylanması).....	112
4.4.4. Metrik Kalibrasyon.....	113
4.4.5. Hata Oranı.....	114
4.5. Belirli Noktalardaki Zamana Bağlı Su Seviyesi Değişimlerinin Görüntüleme Tekniği ile Ölçülmesi (Sanal Derinlik Ölçer).....	115
5. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	119
5.1. Deney Düzeni ve Yöntemi	119
5.1.1. Baraj Yıkılması Akımının Oluşturulması.....	121
5.1.2. Ölçüm Sistemi	123
5.1.3. Çalışmaların Özeti	125
5.2. Baraj Yıkılması Problemi için Analitik Çözümlerin Değerlendirilmesi.....	126
5.3. Kuru Kanalda Baraj Yıkılması Problemi	130
5.3.1. Baraj Mansabının Kuru Olması Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlar ile Karşılaştırılması	138
5.4. Islak Kanalda Baraj Yıkılması Problemi.....	145
5.4.1. $\alpha=0.1$ Derinlik Oranı için Taşkın Dalgasının Yayılması.....	146
5.4.1.1. $\alpha=0.1$ Derinlik Oranı için Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlar ile Karşılaştırılması.....	151
5.4.2. $\alpha=0.4$ Derinlik Oranı için Taşkın Dalgasının Yayılması.....	160

5.4.2.1. $\alpha=0.4$ Derinlik Oranı için Elde Edilen Deney Sonuçlarının	
Sayısal Sonuçlar ile Karşılaştırılması.....	166
5.4.3. $\alpha=0.1$, $\alpha=0.2$ ve $\alpha=0.4$ Derinlik Oranları için Elde Edilen Deney	
Sonuçlarının Karşılaştırılması	172
5.5. Kanal Tabanında Meydana Gelen Yerel Değişimlerin Baraj Yıkılması	
Taşkın Dalgasının Yayılmasına Etkisi.....	177
5.5.1. Baraj Mansabında Üçgen Eşik Bulunması	178
5.5.1.1. Üçgen Eşik Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının	
Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması.....	185
5.5.2. Baraj Mansabında Trapez Eşik Bulunması	195
5.5.2.1. Trapez Eşik Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının	
Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması.....	200
5.5.3. Üçgen ve Trapez Eşik için Elde Edilen Deney Sonuçlarının	
Karşılaştırılması	208
5.6. Kanal Genişliğinde Meydana Gelen Yerel Değişimlerin Baraj Yıkılması	
Taşkın Dalgasının Yayılmasına Etkisi.....	214
5.6.1. Baraj Mansabında Üçgen Daralma Durumu.....	215
5.6.1.1. Üçgen Daralma Durumunda Elde Edilen Deney	
Sonuçlarının Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması	222
5.6.2. Baraj Mansabında Trapez-A Daralma Durumu.....	230
5.6.2.1. Trapez-A Daralma Durumunda Elde Edilen Deney	
Sonuçlarının Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması	238
5.6.3. Baraj Mansabında Trapez-B Daralma Durumu.....	247
5.6.3.1. Trapez-B Daralma Durumunda Elde Edilen Deney	
Sonuçlarının Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması	255
5.6.4. Farklı Geometriye Sahip Daralmaların (Üçgen, Trapez-A, Trapez-	
B) Deneysel Olarak Karşılaştırmaları	262
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	272
KAYNAKLAR	279
ÖZGEÇMİŞ	286

SİMGELER VE KISALTMALAR

a	: Türbülans modeline bağlı olan bir sabit
A	: Kesit alanı
β	: Boussinesq katsayısı, hız düzeltme katsayısı
B	: Serbest su yüzeyindeki enkesit genişliği
c	: Sığ su dalga yayılma hızı
c_0	: Rezervuardaki sığ su dalga yayılma hızı
c_2	: Kabarma dalgası arkasındaki dalga yayılma hızı
$C1$	: İleri (pozitif) karakteristik yörüngeler
$C2$	: Geri (negatif) karakteristik yörüngeler
$C+$	: İleri (pozitif) karakteristikleri
$C-$	: Geri (negatif) karakteristik yörüngeler
dV	: Diferansiyel kontrol hacmi
D/Dt	: Maddesel (material) türev
e_{ij}	: Ortalama gerilme-oranı tansörü
f_i	: Bir akışkan hacmi için Reynolds gerilmeleri
F	: Akışkan hacmi oranı
F_G	: Yerçekimi kuvvetleri bileşeni, ağırlık bileşeni
F_p	: Hidrostatik basınç kuvvetleri
$F_{p,yanal}$	: Sağ ve sol kenar duvarlardaki basınç kuvveti bileşeni
F_F	: Sürtünme kuvveti
Fr	: Froude sayısı
F_x	: x doğrultusunda sisteme etki eden dış kuvvetler
ΣF	: Sisteme etkiyen toplam dış kuvvetler
g	: Yerçekimi ivmesi
$G1$	: 1 numaralı gözlemci
$G2$	: 2 numaralı gözlemci
h	: Herhangi bir noktadaki su yüksekliği

h_0	: Rezervuardaki su yüksekliği
h_1	: Kuyruk suyu yüksekliği
h_2	: Kabarma dalgası arkasındaki su yüksekliği
H	: Boyutsuz yükseklik ($=h/h_0$)
I_1	: Enkesitin birinci momenti
I_2	: Enkesitin ikinci momenti, enkesit genişliğindeki değişimi
k	: Türbülans kinetik enerji
k_s	: Engel pürüzlülüğü
L	: Karakteristik uzunluk
m	: Kütle
n	: Manning pürüzlülük katsayısı
N	: Sistem özelliği (kütle, momentum vb.)
p	: Basınç
p'	: Basınç sapıncı
$\bar{p}$	: Ortalama basınç
P	: Islak evre
q	: Birim genişlikteki debi
Q	: Debi
R	: Islak yarıçap
R_e	: Reynolds sayısı
S_0	: Kanal yatağı (tabanı) eğimi
S_f	: Sürtünme (enerji çizgisi) eğimi
t	: Zaman
T	: Boyutsuz zaman ($=t(g/h_0)^{1/2}$)
τ	: Kayma gerilmesi
τ_{ij}	: Gerilme tansörü
τ'_{ij}	: Türbülans (Reynolds, çalkantı gerilmeleri)
τ_T	: Toplam kayma gerilmesi
u	: x doğrultusundaki akım hızı
u'	: x doğrultusundaki çalkantı hızı

$\bar{u}$	: x doğrultusundaki ortalama akım hızı
u_0	: Herhangi bir noktadaki teğetsel hız
u^*	: Kayma hızı
U	: Pozitif dalga önü yayılma hızı, kabarma dalgası önü yayılma hızı
v	: y doğrultusundaki akım hızı
v'	: y doğrultusundaki çalkantı hızı
$\bar{v}$	: y doğrultusundaki ortalama akım hızı
V	: Ortalama akım hızı
V_2	: Kabarma dalgası arkasındaki ortalama akım hızı
V_F	: Her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu hacim
w	: z doğrultusundaki akım hızı
w'	: z doğrultusundaki çalkantı hızı
$\bar{w}$	: z doğrultusundaki ortalama akım hızı
ws_i	: Duvar kayma gerilmesi
x	: Mesafe
X	: Boyutsuz mesafe ($=x/h_0$)
y_0	: Herhangi bir noktadaki u_0 teğetsel hızının engelden olan uzaklığı
ρ	: Akışkan yoğunluğu
ε	: Türbülans sönümlenme oranı (dissipation rate)
μ	: Kinematik viskozite
μ_t	: Türbülans (çalkantı) viskozitesi
μ_{eff}	: Pürüzlü sınırın etkisinden dolayı oluşan etkili viskozite
ν	: Dinamik viskozite
κ	: Von Karman sabiti
η	: Sistemin yoğunluk özelliği; diferansiyelin yüksekliği
fps	: 1 saniyede elde edilen görüntü sayısı (frame per second)
FAVOR	: Engelin temsil edilmesi için alan/hacim oranı (Fractional Area/Volume Obstacle Representation)
K.Y.	: Kontrol yüzeyi
K.H.	: Kontrol hacmi

örn.	: Örnek
LES	: Büyük girdap simülasyonu (Large Eddy Simulation)
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleri
SWE	: Sığ Su Denklemleri (Shallow Water Equations)
VOF	: Akışkan hacmi yöntemi (Volume of Fluid)

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA NO

Çizelge 3.1. Farklı Formdaki Sığ Su Denklemleri (Frazao, 2002)	53
--	----

Şekil 1.1. Baraj yıkılması probleminin şematik gösterimi a) kuru durum b) ıslak durum.....	3
Şekil 1.2. Deney, teori ve sayısal model arasındaki bağlantının şematik gösterimi.....	5
Şekil 3.1. Kütlenin korunumu için kontrol hacmi.....	44
Şekil 3.2. Momentumun korunumu için bir sistem üzerine etkiyen kuvvetler a) boy kesit b) plan c) enkesit	47
Şekil 3.3. x-t düzleminde karakteristikler tarafından belirlenen etkilenme ve bağımlılık bölgeleri (Sturm, 2001).....	58
Şekil 3.4. Akım türüne göre karakteristik eğriler a) kritik altı akım b) kritik üstü akım c) kritik akım	60
Şekil 3.5. Karakteristik denklemlerin başlangıç ve sınır şartları (a) kritik altı akım (b) kritik üstü akım (Jain, 2001).....	62
Şekil 3.6. Kuru kanalda baraj yıkılması problemi (Chanson, 2004a)	64
Şekil 3.7. Islak kanalda baraj yıkılması problemi ($h_1/h_0 < 0.1383$) (Chanson, 2004a).....	70
Şekil 3.8. Pozitif kabarma dalgasının yayılması (a) kanal kenarında oturan bir gözlemciye göre (b) gözlemci kabarma dalgası hızıyla hareket ederse	71
Şekil 3.9. Islak kanalda baraj yıkılması problemi ($h_1/h_0 > 0.1383$) (Chanson, 2004a).....	75
Şekil 3.10. Bir hesaplama hücresine etkiyen değişkenlerin gösterimi.....	76
Şekil 4.1. Görüntüleme sisteminin bileşenleri	84
Şekil 4.2. Matris olarak görüntünün temsil edilmesi	96
Şekil 4.3. Bir f fonksiyonu olarak görüntünün temsil edilmesi	96
Şekil 4.4. Görüntüde meydana gelen açısal bozulmalar a) asıl görüntü b) dış bükey bozulma c) iç bükey bozulma.....	103
Şekil 4.5. Kalibrasyon panosu (Bombeli görünümde).....	105

Şekil 4.6. Kalibrasyon için kullanılan farklı açı ve uzaklıklardaki kalibrasyon panosu görüntüleri.....	106
Şekil 4.7. Kalibrasyon panosunda köşe noktalarının otomatik algoritma ile bulunması	106
Şekil 4.8. Kalibrasyonu yapılan görüntülerin hesaplanan doğrultu ve konumlarının gösterimi a) kamera merkezli b) kalibrasyon panosu merkezli.....	107
Şekil 4.9. Kameranin kalibrasyon sonucu elde edilen kameraya ait geometrik bozulmalar (açısal + teğetsel) ve piksellerin yer değiştirmesi	108
Şekil 4.10. Görüntünün açısal kalibrasyonu a) orijinal görüntü b) kalibre edilmiş görüntü	110
Şekil 4.11. Görüntünün perspektif kalibrasyonu a) perspektif görünüme sahip ham görüntü b) kalibre edilmiş düzlem görüntü	111
Şekil 4.12. Görüntülerin ızgaralar kullanılarak yatay hale getirilmesi	113
Şekil 4.13. İstenilen noktada su seviyelerinin zamanla değişiminin sanal derinlik ölçer ile belirlenmesi	116
Şekil 5.1. Kullanılan deney kanalının ilk hali ve çalışmaya uygun hale getirilmesi.....	120
Şekil 5.2. Kapak mekanizması a) şematik gösterim b) gerçek görüntü	122
Şekil 5.3. Deney kanalı ve kameraların yerleşim planı.....	124
Şekil 5.4. Kuru durum için analitik çözümle elde edilen farklı zamanlardaki su yüzü profilleri.....	127
Şekil 5.5. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için analitik çözüm ile elde edilen farklı zamanlardaki su yüzü profilleri.....	128
Şekil 5.6. $\alpha=0.2$ derinlik oranı için analitik çözüm ile elde edilen farklı zamanlardaki su yüzü profilleri.....	129
Şekil 5.7. Kuru ve farklı derinlik oranlarına sahip ıslak durum için $t=0.8$ s anında analitik çözümle elde edilen su yüzü profilleri	130
Şekil 5.8. Kuru kanalda baraj yıkılması akımının deney düzeneği ve su seviyesinin zamanla değişiminin belirlendiği ölçüm noktaları.....	131

Şekil 5.9. Kuru kanalda baraj yıkılması dalgasının başlangıç aşamalarındaki deney görüntüleri	132
Şekil 5.10. Kuru durum için başlangıç aşamalarında elde edilen deneysel su yüzü profilleri.....	133
Şekil 5.11. Baraj yıkılması dalgasının kuru yatakta yayılması sonucu kanal mansabında belirli noktalarda meydana gelen su seviyesi değişimleri.....	134
Şekil 5.12. $T=60$ anında ölçüm alınan noktalardan elde edilen kanaldaki su yüzeyi eğrisi	135
Şekil 5.13. Kuru durum için deneylerden elde edilen başlangıç aşamalarındaki su yüzü profillerinin analitik çözüm ile karşılaştırılması.....	137
Şekil 5.14. Farklı ağ aralıklarının su yüzü profili üzerindeki etkisi.....	140
Şekil 5.15. Kuru durum için başlangıç aşamalarındaki deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması	141
Şekil 5.16. Kuru durum için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması.....	143
Şekil 5.17. $\alpha=h_1/h_0=0.1$ derinlik oranı için deney kanalı kesiti (ıslak durum).....	146
Şekil 5.18. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için yıkılma başlangıcındaki deney görüntüleri	147
Şekil 5.19. $\alpha=0.1$ ıslak durumu için deneylerden elde edilen başlangıç aşamalarındaki su yüzü profillerinin analitik çözümle karşılaştırılması	149
Şekil 5.20. $\alpha=0.1$ ıslak durumu için mansapta farklı noktalardaki zamana bağlı su seviyesi değişimleri	151
Şekil 5.21. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için $T=0.8$ anında SWE çözümünde momentum yaklaşımlarının etkisi	153
Şekil 5.22. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için $T=0.8$ anında SWE çözümünde momentum yaklaşımlarının etkisi.....	153
Şekil 5.23. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için başlangıç aşamalarındaki sayısal ve deneysel su yüzü profillerinin karşılaştırılması	155

Şekil 5.24. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması	157
Şekil 5.25. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için yıkılma başlangıcındaki deney görüntüleri	161
Şekil 5.26. $\alpha=0.4$ ıslak durumu için deneylerden elde edilen başlangıç aşamalarındaki su yüzü profillerinin analitik çözüm ile karşılaştırılması	163
Şekil 5.27. $\alpha=0.4$ ıslak durumu için mansaptaki farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri	165
Şekil 5.28. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için başlangıç aşamalarındaki deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması.....	167
Şekil 5.29. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması	170
Şekil 5.30. $\alpha=0.1$, $\alpha=0.2$ ve $\alpha=0.4$ derinlik oranları için başlangıç aşamalarındaki deney görüntülerinin karşılaştırılması	173
Şekil 5.31. $\alpha=0.1$ ve $\alpha=0.4$ derinlik oranları için mansap boyunca farklı noktalarda zamana bağlı deneysel su seviyesi değişimleri	176
Şekil 5.32. Baraj mansabında üçgen eşik bulunması durumu için kanal kesiti	179
Şekil 5.33. Mansapta üçgen eşik olması durumunda elde edilen deney görüntüleri.....	180
Şekil 5.34. Mansapta üçgen eşik olması durumunda eşik ile baraj aksı arasında kalan kesitlerde zamana bağlı su seviyesi değişimleri.....	183
Şekil 5.35. Mansapta üçgen eşik olması durumunda eşik civarındaki kesitlerde zamana bağlı su seviyesi değişimleri	184
Şekil 5.36. Mansapta üçgen eşik olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması.....	187
Şekil 5.37. Üçgen eşik durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması	191
Şekil 5.38. Baraj mansabında trapez eşik bulunması durumu için kanal kesiti	195
Şekil 5.39. Mansapta trapez eşik olması durumunda elde edilen deney görüntüleri	197

Şekil 5.40. Mansapta trapez eşik olması durumunda eşik ile baraj aksı arasında kalan noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri	199
Şekil 5.41. Mansapta trapez eşik olması durumunda eşik civarındaki noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri	200
Şekil 5.42. Mansapta trapez eşik olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması.....	202
Şekil 5.43. Trapez eşik durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması	205
Şekil 5.44. Mansapta trapez ve üçgen eşik olması durumunda elde edilen deney görüntülerinin karşılaştırılması.....	209
Şekil 5.45. Mansapta trapez ve üçgen eşik olması durumları için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı deneysel su seviyesi değişimlerini.....	212
Şekil 5.46. Deneylerde kullanılan daralma geometrileri ve boyutları	214
Şekil 5.47. Baraj mansabında üçgen daralma bulunması durumu için kanal planı.....	215
Şekil 5.48. Mansapta üçgen daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri	216
Şekil 5.49. Üçgen daralma durumu için daralma kesiti membasında farklı noktalardaki su seviyelerinin zamanla değişimleri	221
Şekil 5.50. Üçgen daralma durumu için daralma bölgesindeki noktalarda su seviyelerinin zamanla değişimleri.....	221
Şekil 5.51. Mansapta üçgen daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri	224
Şekil 5.52. Üçgen daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması	228
Şekil 5.53. Baraj mansabında trapez-A daralma bulunması durumu için kanal planı.....	231
Şekil 5.54. Mansapta trapez-A daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri	232

Şekil 5.55. Trapez-A daralma durumu için daralma kesiti membasında farklı noktalardaki su seviyelerinin zamanla değişimleri	235
Şekil 5.56. Trapez-A daralma durumu için daralma bölgesindeki farklı noktalarda su seviyelerinin zamanla değişimleri	237
Şekil 5.57. Mansapta trapez-A daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri	239
Şekil 5.58. Trapez-A daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması	243
Şekil 5.59. Baraj mansabında trapez-B daralma bulunması durumu için kanal planı.....	247
Şekil 5.60. Mansapta trapez-B daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri	249
Şekil 5.61. Trapez-B daralma durumu için daralma kesiti membasındaki noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri	252
Şekil 5.62. Trapez-B daralma durumu için daralma bölgesindeki noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri	254
Şekil 5.63. Mansapta trapez-B daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri	256
Şekil 5.64. Trapez-B daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması	260
Şekil 5.65. Mansapta üçgen, trapez-A ve trapez-B daralma olması durumunda elde edilen deney görüntülerinin karşılaştırılması	264
Şekil 5.66. Mansapta farklı geometriye sahip daralma durumları için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı deneysel su seviyesi değişimleri.....	268

1. GİRİŞ

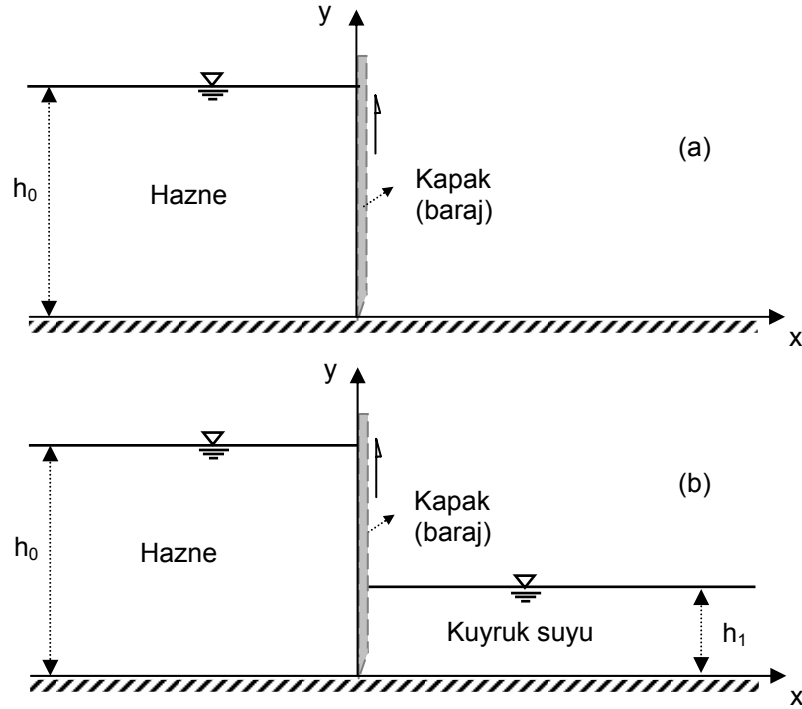
Barajlar akarsu vadisini kapatan ve akışı engelleyerek arkasında su tutan görkemli mühendislik yapılarıdır. Günümüzde dünya çapında ve ülkemizde hidrolik güç, taşkın kontrolü, sulama, içme suyu temini gibi amaçlarla çok sayıda baraj inşa edilmiştir. Bunların birçoğunun mansabında önemli yerleşim birimleri, sanayi merkezleri, tarım alanları, yollar, köprüler vb. bulunmaktadır. İnsanlığa faydalı amaçlar için yapılmış olsalar da barajlar haznelerinde tuttıkları devasa su kütleleri ile bir tehdit kaynağı olabilirler. Oldukça güvenli yapılar olmalarına rağmen geçmişte meydana gelen birçok felaket her barajın yıkılabileceğini ve bir yıkılma riskine sahip olduğunu göstermiştir. Bir barajın yıkılması durumunda rezervuarında depolanmış olan çok büyük miktardaki su, açılan gedikten boşalarak mansapta çok sayıda can kaybına ve önemli maddi hasarlara neden olabilecek bir taşkın yaratabilir. Genellikle baraj yıkılması sonucunda oluşan ani taşkınların büyüklüğü, aşırı yağışlar sonucu oluşan taşkınlara göre çok daha fazladır ve mansapta yaşayan insanların uyarılması, tahliye edilmesi için gereken zaman çok daha kısadır. Bundan dolayı baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının yaratacağı hasarlar çok daha büyük olacaktır. Bununla birlikte, baraj mansabında sel basacak alanların belirlenmesi ve acil durum planlarının hazırlanmasıyla yıkılmanın yaratacağı olası etkiler en aza indirilebilir. Bu nedenle mevcut barajların güvenilirliklerinin değerlendirilmesi ve yeni yapılacak barajların da bu problemin bir parçası olarak düşünülüp baraj yıkılması analizlerinin yapılması gereklidir. Bu tür bir çalışma gerçek baraj yıkılmalarına ait gözlemlerin yanı sıra sayısal ve deneysel modellerden elde edilen bilgiler yardımıyla yapılmaktadır.

Geçmişte bazı felaketlerin meydana gelmesi ve barajların askeri açıdan stratejik bir öneme sahip olması 20 yy da, özellikle de ikinci dünya savaşı sonrası baraj yıkılması modellenmesine duyulan gereksinimi arttırmıştır. Almanya’da bombalama sonucu yıkılan Möhne Kemer Barajı (1943), Fransa’da belirti göstermeksizin ani yıkılan Malpasset Kemer Barajı (1959) ve Amerika’da borulanma sonucu yıkılan Teton Dolgu Barajı (1976) en bilinen yıkılma örnekleridir. Ülkemizde herhangi bir baraj yıkılması hadisesi meydana gelmemekle birlikte Suriye’de

bulunan ve ülkemiz sınırları içerisinde denize dökülen Asi Nehri üzerindeki Zeyzoun Barajı'nın (2002) yıkılması sonucu Hatay ilimizde bazı tarım arazileri sular altında kalarak bu durumdan etkilenmiştir. Ülkemizde de çok sayıda barajın bulunması ve son yıllarda konunun daha iyi anlaşılmasıyla Devlet Su İşleri (DSİ) bünyesinde bir birim kurulmuş ve baraj güvenliği ile ilgili çalışmalar başlatılmıştır.

Her barajın tasarımı kendine özgüdür ve bu nedenle yıkılmanın gelişimi aynı tür barajlar için bile olsa barajdan baraja farklılık göstermektedir. Yapılan çalışmalarda yıkılma mekanizması, dolgu ve beton barajlarda yıkılma olmak üzere genel olarak iki gruba ayrılmaktadır. Dolgu barajlarda zamana bağlı aşamalı bir yıkım söz konusudur. Sıvı zemin etkileşimine dayalı oldukça karmaşık bir problemdir ve henüz tam bir çözümü mevcut değildir. Bu nedenle dolgu barajlarda yıkılma analizi iki aşamalı olarak düşünülmektedir. Öncelikle baraj gövdesi üzerinde meydana gelen bir gedikten çıkan hidrograf ampirik veya parametrik bir yaklaşımla belirlenir. Daha sonra bu hidrograf matematiksel olarak akarsu boyunca ötelenir (Kocaman, 2002; Kocaman ve Özmen-Çağatay, 2002; Bozkuş, 2004). Beton barajlarda ise kısmen veya tamamen ani yıkılma söz konusu olmaktadır. Yapılan çalışmada, sadece ani yıkılmanın dikkate alındığı ideal baraj yıkılması problemi düşünülmüştür. Bu problem, bir kanalda durgun halde bulunan iki farklı su seviyesini ayıran düşey bir kapağın baraj görevini üstlenmesi ve ani olarak kaldırılması sonucunda meydana gelen taşkın dalgasının yayılması şeklinde ele alınmaktadır (Şekil 1.1). Gerçekte barajın yıkılmasının gelişimi ideal durumdan daha yavaş meydana gelecektir. Bununla birlikte ani salıverilme en kötü durumdaki senaryoyu vereceğinden bu problemin temelini oluşturmasının yanında uygulamada kolaylık da sağlamaktadır. Barajın ani olarak yıkılması sonucu, biri mansap yönünde diğeri de memba yönünde ilerleyen ve sırasıyla pozitif ve negatif dalgalar olarak adlandırılan iki farklı dalga meydana gelmektedir. Barajın mansabında kuyruk suyu olup olmamasına göre pozitif dalganın (şok dalgasının) gelişimi farklılık göstermektedir. Literatürde, genellikle mansapta kuyruk suyu olmaması hali 'KURU' (Şekil 1.1a), olması hali ise 'ISLAK' (Şekil 1.1b) durum olarak adlandırılmaktadır. Meydana gelen şok dalgasının hızı ve yüksekliği taşkın kontrol çalışmalarında belirlenmesi gereken kritik parametreler olmaktadır.

Akışkanlar mekaniği açısından bakıldığında ise baraj yıkılma dalgasının yayılması hızlı değişen değişken açık kanal akımı problemidir. Bu özelliklerinden dolayı serbest yüzeyli akımlar için geliştirilen yazılımlarda da başlıca test konusudur.



Şekil 1.1. Baraj yıkılması probleminin şematik gösterimi a) kuru durum b) ıslak durum

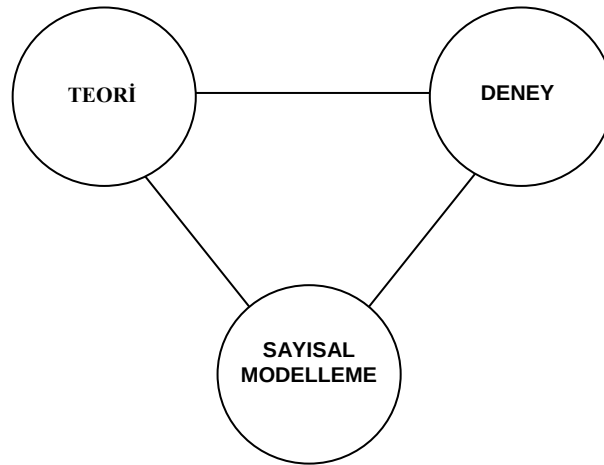
Bir barajın ani olarak yıkılması sonucu oluşan akımlar taşkın olduğu bölgenin topografyasından oldukça etkilenirler. Vadi daralmaları, düzensiz yatak eğimleri, akım güzergahındaki engeller ve kıvrımlar hidrolik sıçramalara, şoklara, dalga yansımalarına ve akımın diğer davranışlarında ani değişimlere neden olurlar. Bunun sonucunda baraj mansabında farklı su derinlikleri ve dalga yayılma hızları meydana gelir.

Bunların yanında baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgaları, yüzeysel akışlardan oluşan taşkın dalgalarıyla (yağış ya da ani kar erimesi) karşılaştırıldığında modellemeyi de güçleştiren farklı özelliklere ve oldukça büyük belirsizliklere sahiptir. Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının pik debi değeri, aynı nehirde en uç hidrolojik şartlar altında akışlardan dolayı oluşan dalgalara göre çok

daha büyüktür ve pik değerin oluşumuna kadar geçen süre son derece kısadır. Bu nedenle şok dalgası olarak adlandırılırlar. Oluşan taşkının izlediği yol akarsu kanalı ve normal taşkın yatağı ile sınırlı kalmaz hemen hemen bütün vadi topografyasını kaplar. Ayrıca bu şok dalgası nedeniyle büyük miktarda enkaz, katı madde ve sediment taşınarak arazide oyulma ve yığılmalara yol açar. Bunun sonucunda baraj mansabında önemli morfolojik değişimler meydana gelebilir.

Tüm bu özelliklerinden dolayı baraj yıkılması problemi açık kanal akımları konusundaki en karmaşık ve zor problemlerden biridir. Bu nedenle mevcut veya yeni yapılacak barajların güvenilirliklerinin değerlendirilmesi için yapılacak baraj yıkılma analizlerinin veya bu konuda yapılacak bilimsel araştırmaların teorik, sayısal ve deneysel çalışmalar olmak üzere birbirini tamamlayıcı üç yaklaşımı dikkate alarak gerçekleştirilmesi gereklidir (Şekil 1.2). Bu bağlantı oldukça önemlidir ve bu üç temel araştırma tekniği ile yapılan çalışmaların birbiri ile doğrulanması gereklidir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte sayısal modellemeler bu bağlantı içerisinde son yıllarda gittikçe artan bir öneme sahiptir.

Baraj yıkılması akımlarını matematiksel olarak ifade etmek için kullanılabilecek en genel denklem 3 boyutlu süreklilik ve momentum denklemlerinden oluşan Navier-Stokes denklemleridir. Navier-Stokes denklemlerinin karmaşıklığı ve zorluğundan dolayı bu denklemler bazı kabuller yapılarak sığ su (shallow water) veya Saint-Venant denklemlerine indirgenebilir. Sığ su denklemlerinde yüzeysel gerilme etkilerinin ihmal edildiği ve viskoziteye sahip, serbest yüzeyli, yerçekimi altında hareket eden akışkan yaklaşımı düşünülür. En önemli kabul, düşey doğrultudaki ivme bileşeninin ihmal edilmesi başka bir ifade ile akımın hidrostatik kabul edilmesidir. Bu denklemlerde, yatay doğrultudaki uzunlukla karşılaştırıldığında su derinliğinin küçük bir orana sahip olduğu düşünülür. Sığ su denklemleri, Navier-Stokes denklemlerine göre birçok eksiklikleri bulunmasına ve daha kaba sonuçlar vermesine rağmen bu denklemlerin sayısal çözümü için çok daha az bilgisayar gücü gerektiğinden, hesaplama bölgesi büyük ölçekli olan tsunami, baraj yıkılması gibi akımların modellenmesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır (Brufau ve Navarro, 2000; Quecedo ve ark., 2005).



Şekil 1.2. Deney, teori ve sayısal model arasındaki bağlantının şematik gösterimi

Saint-Venant denklemleri lineer olmayan, hiperbolik kısmi diferansiyel denklem sistemi oluştururlar. Bu denklemler, kanal geometrisi ve sınır şartlarının karışık olmadığı ve denklemlerin lineer olmayan özelliklerinin ihmal edildiği veya lineer kabul edildiği durumlar hariç analitik çözümler için uygun değildir. İlk olarak Ritter 1892’de sürtünmesiz yatay dikdörtgen bir kanalda baraj yıkılması akımı için Saint-Venant denklemlerini analitik olarak çözmüştür (Vischer ve Hager, 1998; Chanson, 2005). Dressler (1952) Ritter’in dikdörtgen kanallar için verdiği analitik çözümü sürtünmeli ve eğimli kanallar için genişletmiştir. En bilinen analitik çözümlerden biri de karakteristikler yöntemi kullanılarak Stoker (1957) tarafından mansapta kuyruk suyu bulunması durumu için elde edilmiştir. Baraj yıkılması için verilen analitik çözümler olayın matematiğinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Analitik çözüm ile hesaplanan bölge içerisindeki her noktada akıma ait değişkenler kesintisiz belirlenebilmektedir (Chanson, 2005). Fakat bu analitik çözümler doğal arazi topografyasına sahip gerçek arazi koşullarında akımın temsil edilmesi için yeterli değildir. Bu nedenle denklemlerin çözümünde sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bunun yanında sığ su denklemlerine dayanan sayısal yöntemlerin doğruluğunun kanıtlanması genellikle bilinen analitik çözümlerle karşılaştırılarak yapılmaktadır.

Son 10 yılda bilgisayar alanındaki hızlı gelişmeler ve 3 boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayanan ve farklı türbülans modellerini de içeren ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımların yaygınlaşmasıyla, baraj yıkılması problemlerinin çözümünde daha hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. Son yıllarda bilgisayarların hesaplama güçlerinin ve hızlarının artmasıyla problemlerin çözüm süresi oldukça kısalmış bunun yanı sıra üç boyutlu karmaşık problemlerin çözümü olanaklı hale gelmiştir. Günümüzde bilimsel araştırmalarda, sayısal simülasyonlar pahalı ve zaman alan laboratuvar deneylerinin yerine önemli bir alternatif haline gelmiştir. Sayısal yöntemler ile deneysel çalışmalarda doğrudan ölçülemeyen ve gözlenemeyen veya elde edilmesi zor olan parametrelerin tamamı (hız, basınç vb.) oldukça görsel bir şekilde kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı bilgisayar kullanarak yapılan sayısal yöntemler, son yıllarda baraj yıkılması analizleri için temel araçlar olmaktadır ve gittikçe artan bir öneme sahiptirler.

Sayısal yöntemler ile olayı idare eden diferansiyel veya integral formdaki denklemler (Navier-Stokes, Saint-Venant denklemleri) cebrik forma indirgenir. Daha sonra bilinen başlangıç ve sınır şartları kullanılarak bilgisayar aracılığıyla etkili bir biçimde çözülürler. Bu yöntemlerde sadece çözüm bölgesi içerisindeki ayrık noktalarda değerler elde edilebilmektedir. Denklemlerin sayısal çözümü için çok sayıda yöntem mevcuttur. Bu yöntemler, fiziksel problemin ızgaralardan (mesh) oluşan bir çözüm ağı ile temsil edildiği Euler bakış açısına sahip sonlu hacimler yöntemi (Versteeg ve ark., 1996), sonlu farklar yöntemi (Chung, 2002), sonlu elemanlar yöntemi (Zienkiewicz ve Taylor, 2000) gibi ve akışkanın küçük parçacıklarla temsil edildiği Lagrange bakış açısına sahip Lattice-Boltzman (Thürey, 2003) ve Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (Monaghan, 1994; Liu ve Liu, 2003) gibi yöntemler olmak üzere genel olarak iki grupta toplanabilir. Son yıllarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) alanında kullanılan ticari yazılımlarda sonlu hacimler yöntemi ön plana çıkmıştır. Navier-Stokes denklemlerine dayandıklarından dolayı bu yazılımlarda, serbest yüzeyli akımların modellenmesinde su-hava arakesitinin (serbest yüzeyin) belirlenebilmesi için çeşitli yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan en bilineni ve ticari HAD yazılımların neredeyse

tamamında kullanılan akışkan hacmi (Volume of Fluid, VOF) yaklaşımıdır (Hirt ve Nichols,1981). Sonuç olarak denklemlerin çıkarılışında ve sayısal yöntemde kullanılan yaklaşımlardan dolayı, bu yazılımların inşaat mühendisliği alanındaki açık kanal akım problemlerini, özellikle de baraj yıkılma problemini çözebilme yeteneklerinin belirlenmesi gereklidir.

Sayısal yöntemlerin yanında, deneysel çalışmalar da baraj yıkılması araştırmalarının diğer bir önemli parçasıdır. Laboratuvar deneylerinin kontrol edilebilir olması incelenen akımın davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunur. Ayrıca sayısal yaklaşımların doğrulanması için laboratuardan ve araziden alınan deneysel verilere ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, baraj yıkılmaları ile ilgili gerçek arazi verisi elde etmek çok zor olduğundan oldukça düzensiz topografyaya sahip doğal vadilerde kullanılan modellerin gerçeği ne oranda yansıttığı ise ancak laboratuvar deneyleriyle karşılaştırılarak bilinebilir.

Literatüre bakıldığında, baraj yıkılması problemi ile ilgili özellikle karmaşık arazi topografyasında taşkın dalgasının yayılması konusunda çok az sayıda deneysel çalışmanın olduğu görülmektedir (Frazao, 2002). Yapılan çalışmalarda da çoğunlukla memba veya mansap enkesiti üzerindeki belirli noktadaki su seviyelerinin değişimi noktasal olarak ölçülmüş ve sadece birkaç noktada sınırlı bilgiler elde edilmiştir (Bell ve ark., 1992; Bellos ve ark., 1992; Frazao, 2002). Su yüzü profillerinin belirlenmesine yönelik az sayıda çalışmada ise, kanal üzerindeki farklı bölgelerde akıma ait görüntüleri alabilmek için kamera yeri değiştirilerek deneylerin tekrarlanması yoluna gidilmiştir (Lauber ve Hager, 1998; Standsby ve ark., 1998).

Konuyla ilgili sayısal çalışmalara bakıldığında çalışmaların büyük çoğunluğunda sığ su denklemlerinin kullanıldığı görülmektedir (Navarro ve ark., 1999; Navarro ve ark., 2002; Gottardi ve Venutelli, 2004). RANS denklemlerine dayalı çözümlere ise son yıllarda yapılan yeni çalışmalarda rastlanmaktadır (Abdolmaleki ve ark., 2004; Shigematsu ve ark., 2004; Quecedo ve ark., 2005).

Baraj yıkılması probleminin daha iyi anlaşılabilmesi için, yapılan çalışma deneysel, teorik ve sayısal olmak üzere üç temel yaklaşım dikkate alınarak gerçekleştirilecek ve elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılacaktır.

Literatürdeki eksiklikler göz önüne alındığında, bu çalışmanın öncelikli amacı baraj yıkılması sonucu oluşan akımın fiziksel davranışının daha iyi anlaşılabilmesi ve sayısal çalışmaların doğrulanabilmesi için dijital görüntüleme ve görüntü işleme tekniklerini kullanarak güvenilir deneysel veriler elde etmek ve farklı teorilerin baraj yıkılması akımlarını çözebilirliğini belirlemektir.

Tez kapsamında ölçümler üç kamera, görüntü yakalama kartı ve bir bilgisayardan oluşan bir görüntüleme sistemi yardımıyla yapılacaktır. Ölçüm tekniği açısından önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, tek kamera yerine üç kameranın aynı anda kullanılmasıyla eş zamanlı görüntüler elde etmek suretiyle daha doğru ve kapsamlı su yüzü profilleri belirlenecektir. Ayrıca mevcut yöntemlerden farklı ve onlara bir alternatif olarak, kanal boyunca seçilen herhangi bir noktadan elde edilen su seviyesinin zamanla değişimleri ilk kez dijital kameralardan alınan görüntüler yardımıyla belirlenecektir.

Çalışmada, yatay dikdörtgen bir kanalda iki farklı su seviyesini ayıran düşey bir kapağın ani olarak kaldırılmasıyla elde edilecek baraj yıkılması taşkın dalgasının, farklı topografya ve kuyruk suyu koşullarına sahip mansap boyunca yayılması sonucu oluşan su yüzü profilleri ve bir noktadaki su seviyesinin zamanla değişimleri incelenecektir. Bu amaçla özellikle kuru ve farklı kuyruk suyu yüksekliklerine sahip ıslak durumlar için yıkılmanın başlangıç aşamalarında su yüzü profilleri belirlenecektir ve analitik sonuçların deneysel sonuçlarla olan uyumuna bakılacaktır. Daha sonra baraj mansabında farklı geometriye sahip taban eşikleri kullanılarak arazi yatağındaki değişimlerin etkisi araştırılacaktır. Son olarak mansap enkesiti üzerine yerleştirilen farklı geometriye sahip pleksiglas engeller yardımıyla kanal üzerinde daralmalar oluşturularak enkesit şeklinin ve kanal genişliğindeki değişimlerin etkisi incelenecektir.

Elde edilen deneysel veriler öncelikle bilinen analitik çözümlerle ve daha sonra sığ su denklemleri (SWE) ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri olmak üzere iki farklı teorik yaklaşıma ait 2 ve 3 boyutlu sayısal sonuçlarla karşılaştırılacak ve bunların karmaşık topografyaya sahip bir arazi üzerinde baraj yıkılması akımlarının yayılmasını ne kadar hassasiyetle çözebildikleri irdelenecektir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Baraj yıkılması dalgalarını ifade eden denklemler ilk olarak De Saint Venant (1871) tarafından türetilmiştir (Chanson, 2004a). Bir boyutlu akım için süreklilik ve momentum denklemlerinden meydana gelen ve hiperbolik kısmi diferansiyel denklem sistemi oluşturan bu denklemlerde hız dağılımının üniform ve basınç dağılımının hidrostatik olduğu kabul edilmiştir. Bu denklemler detaylı olarak Bölüm 3.4’de anlatılacaktır.

Bir barajın yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgalarının yayılmasının incelenmesi problemi, ilk olarak Ritter (1892) tarafından ele alınmıştır (Vischer ve Hager, 1998; Chanson, 2005). Ritter sürtünmesiz, yatay, dikdörtgen bir kanalda ani baraj yıkılması problemi için karakteristik formdaki Saint Venant denklemlerini kullanarak analitik bir çözüm türetmiştir. Ele alınan problemde baraj mansabının kuru olduğu yani kuyruk suyu bulunmadığı varsayılmış ve rezervuar sonsuz uzunluklu kabul edilmiştir.

Dressler (1952); baraj yıkılması durumunda dikdörtgen bir kanaldaki sürtünme etkisini incelemiştir ve Ritter’in çözümünü genişletmiştir. Dalga önünün yüksekliği ve dalga hızı için pertürbasyon prosedürünü kullanarak bir analitik çözüm türetmiştir. Sürtünme ifadesi için Darcy-Weisbach denklemini kullanmıştır. Sürtünmenin dalga yayılma hızı ile karşılaştırıldığında akım hızı üzerinde daha etkili olduğunu söylemiştir.

Stoker (1957); Ritter’in çözümünü baraj mansabında kuyruk suyu bulunması (ıslak yatak) durumu için genişletmiştir. Baraj yıkılması şok dalgaları için etkili bir teorik çözüm önermiştir. Yatay ve sonsuz uzunluklu sürtünmesiz prizmatik dikdörtgen bir kanal için üç bilinmeyen değişken ve üç ilişkili denklemden oluşan ve su yüzü profillerini belirleyen bir analitik çözüm vermiştir. Analitik çözümler basınç dağılımının hidrostatik ve düşey hız dağılımının üniform olduğu kabulüne dayanmaktadır.

Bell ve ark. (1992); düz ve kavisli yatay bir kanalda ani kapak açılması sonucu baraj yıkılması dalgası oluşturarak kapsamlı bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kanal tabanının pürüzsüz veya çok pürüzlü ve kanal

mansabının farklı derinliklerde kuru veya ıslak olması gibi çeşitli başlangıç koşullarında baraj yıkılması dalgasının yayılmasını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında, 0.30 m genişliğinde, 0.30 m yüksekliğinde, 4.32 m uzunluğunda düz dikdörtgen bir kanalda ve 3.74 m uzunluğunda 180 derece kavise sahip kavisli pleskiglas malzemeden yapılan bir kanal kullanmışlardır. Kanal pürüzlülüğünü, tabana 13 mm kalınlığında tel ızgaralar ve bunların üzerine 0.30 m uzunluğunda, 0.19 m genişlik ile yüksekliğe sahip ahşap malzemeler yerleştirerek oluşturmuşlardır. Membada altı ve mansapta beş noktada, metal çubuklar kullanarak su seviyesinin noktasal değişimlerini ve video kamera kullanarak dalga önünün ilerleyişini izlemişlerdir. Kavisli kanalda dış kısımda dalga önünün iç kısımdan daha hızlı ilerlediğini ve daha yüksek su seviyesine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bellos ve ark. (1992); prizmatik olmayan bir kanalda baraj yıkılması dalgasının yayılmasını incelemişlerdir. Taban eğimi sabit, daralan genişleyen bir kanalda ($x=4.5-16m$) mansapta kuru ve ıslak akım koşulları için bir dizi deney yapmışlardır. Kuru yatak koşulları için 0-0.010 eğimleri arasında 6 farklı eğim durumu da araştırılmıştır. Islak yatak oluşturulması için kanal sonunda bir savak kullanmışlardır. 22 m uzunluğundaki kanalın en dar kısmına bir kapak yerleştirmiş ve rezervuar derinliğini 0.25 m, kuyruk suyu derinliğini 0.101 m olarak almışlardır. Pürüzlülük katsayısını 0.012 olarak hesaplamışlardır. Belirli aralıklarla kanal merkez eksenine üzerine yerleştirilen ve elektrik iletkenliği ile çalışan metal çubuklar ile su seviyelerinin zamanla değişimlerini ölçmüşlerdir. Deney sonuçlarının sayısal çözümlerle uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

Jovanovic ve Djordjevic (1995); bir ve iki boyutlu baraj yıkılması deneyleri gerçekleştirmiş ve sonuçlarını sığ su denklemlerinin MacCormack açık şemasına dayanan sayısal çözümleriyle karşılaştırmışlardır. Bir boyutlu deneylerini, 4.5 m uzunluğunda ve 0.15 m genişliğinde yatay dikdörtgen bir kanalda yapmışlardır. 0.8 m genişliğinde ve 2 m uzunluğunda bir haznede yaptıkları iki boyutlu deneylerinde 0.1m genişliğindeki kapağı kanalın kenarına yerleştirmişlerdir. Ölçüm yapmak için mansapta 4 farklı noktada yerleştirdikleri noktasal seviye ölçerler ve bir yüksek hızlı video kamera kullanmışlardır. Bir boyutlu akım için dalga yayılma hızlarının ve su derinliklerinin belirlenmesinde kullandıkları sayısal yöntemin uygun sonuçlar

verdiğini, iki boyutlu çözümlerde ise kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını ifade etmişlerdir.

Mohapatra ve Bhallamudi (1996), baraj aksındaki kesit değişimlerinin baraj yıkılması akımı üzerindeki etkisini incelemişler ve olayı idare eden iki boyutlu denklem sistemini sayısal olarak çözmüşlerdir. Sayısal modellerini, 4 farklı tasarım üzerinde ıslak ve kuru mansap koşulları için uygulamışlardır. Geçiş bölgesindeki genel fiziksel alanı hesaplamanın yapılacağı dikdörtgen alana dönüştürmek için basit cebrik koordinat dönüşüm tekniği seçmişlerdir. Dönüştürülen denklemlerin çözümü için MacCormack şemasını kullanmışlardır. Yapılan çalışmanın sonuçlarını (akım derinlikleri ve su yükseklikleri) literatürdeki sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırarak iyi neticeler elde etmişlerdir. Ayrıca baraj yıkılması akımları üzerindeki genişleme-daralma etkilerini araştırmışlardır.

Zhao ve ark. (1996), “flux vector splitting (FVS)”, “flux difference splitting (FDS)” ve “Osher” şeması olarak adlandırılan üç yaklaşık Riemann çözücü şema üzerinde çalışmışlardır. Karakteristik teoriye dayanan ve genellikle aerodinamik problemlerinde Euler denklemlerini çözmek için kullanılan bu çözücüler büyük taşkınlar sonucu baraj yıkılması veya akarsuda kapakların aniden açılıp kapanması sonucu oluşan şok dalgaları üzerine uygulamışlardır. Bu çözücüler, iki boyutlu sığ su denklemlerini çözmek amacıyla sonlu hacimler yöntemi içerisinde kullanmışlardır. Üç çözücüyü teorik gelişimlerine, farklı şemalara, şok dalgalarına uygulanabilirliğine göre karşılaştırmışlardır. Ayrıca farklı zaman aralıkları ve ızgara çözünürlüklerinde yöntemlerin hesaplama stabilitelerinin hassaslık analizini yapmışlardır. Aynı zamanda yatak seviyelerindeki değişimlerin sonuçlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Uygulamalarında bir boyutlu ve iki boyutlu baraj yıkılması problemini ve eğimli bir yüzeyde hidrolik sıçrama problemini ele almışlardır. İki boyutlu baraj yıkılması problemi olarak başlangıçtaki su derinliği 10 m olan ve 5m kuyruk suyu yüksekliğine sahip 200×200m bir hesaplama alanı üzerinde uygulama yapmışlardır. Alanın ortasına yerleştirilmiş bir baraj üzerinde 75 m genişliğinde bir gediğin ani açılması suretiyle oluşan dalganın yayılması problemini incelemişlerdir. Sayısal ve analitik çözümleri karşılaştırdıklarında, üç Riemann çözücünün de oldukça iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Bu üç şemanın çözüm sonuçları arasında

çok büyük fark olmasa da aralarında en doğru sonucu verenin Osher şeması, en az doğru olanın ise FVS olduğunu belirtmişlerdir. Fakat en az hesaplama süresi FVS, en fazla hesaplama süresi ise FDS’de görülmektedir. En kararlı olanı FVS, Δx ve Δt değişimine karşı en duyarlı olanı FDS olmaktadır. Araştırmacılar özetle bu üç çözücünün de kritik altı ve kritik üstü akımlardaki hidrolik olayların, yavaş değişen süreksiz akımların, düzenli ve değişken akımların, özellikle de şok dalgalarının modellenmesinde etkili olabileceğini ifade etmişlerdir.

Laigle ve Coussot (1997); çamurlu akımlar için Saint-Venant denklemlerine dayanan sayısal bir yöntem geliştirmişlerdir. Sayısal modelin doğruluğunu belirleyebilmek için bir takım deneysel çalışmalar yapmışlardır. Farklı kanal eğimleri, malzeme hacimleri, balçık konsantrasyonları, başlangıçtaki farklı rezervuar derinlikleri için kanal üzerindeki su yükseklikleri gözlenmiştir. 4m uzunluğunda 0.6 m genişliğinde dikdörtgen bir kanal kullanmışlardır. Ölçümlemleri üç farklı noktada ultrasonik cihazlarla yapmışlardır. Deneylerdeki akım derinliği ve seyahat zamanı ölçümlemlerindeki belirsizliklerin %5 ila %15 arasında olduğunu ifade etmişlerdir. Deney sonuçları ile sayısal model arasında bir yakınlık olduğu görülmüştür.

Lauber ve Hager (1997a); başlangıçta kuru mansap yatağına sahip pürüzsüz dikdörtgen bir kanalda pozitif dalga önünün farklı eğimler altında yayılmasını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Taban eğimi 0, 0.10 ve 0.50 olmak üzere üç farklı eğim durumunu göz önüne almışlardır. Deneysel çalışmaları sonucunda, ölçek etkilerini ihmal ederek iki farklı dalga türü tanımlamışlardır: $T = (g/h_0)^{1/2} t < 2^{1/2}$ zamanları için $V/(gh_0)^{1/2} = 1.05$ hızına sahip olan eğim ve pürüzlülüğünden bağımsız “başlangıç dalgası” ve $T > 2^{1/2}$ zamanları için yüzey pürüzlülüğü ve taban eğimi etkilerinin belirgin olduğu “dinamik dalga”dır. Çalışmalarında teorik sonuçlar ile deneysel sonuçların pozitif dalga önünün belirlenmesinde uygun sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır.

Lauber ve Hager (1997b); 14 m uzunluğunda ve 0.5 m yüksekliğinde yatay pürüzsüz dikdörtgen bir kanalda bir dizi deneysel çalışma yapmışlar ve bunları Ritter’in baraj yıkılması akımı için verdiği klasik analitik çözüm ile karşılaştırmışlardır. Saniyede 50 görüntü veren bir kamera kullanarak ölçümlemleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, deneysel pozitif ve negatif dalga yayılma

hızları ile analitik sonuçlar arasında farklılıklar olduğunu gözlemlemişlerdir. Pozitif dalga önünün yayılma hızının analitik çözümde $2C_0 = 2\sqrt{gh_0}$ iken deneysel sonuçlarda $1.3C_0$ olduğunu, negatif dalga yayılma hızının ise analitik çözümde $-C_0$ iken deneysel sonuçlarda $-1.4C_0$ olduğunu bulmuşlardır. Başka bir ifade ile negatif dalga gerçek durumda analitik çözümden daha hızlı bir şekilde memba yönünde ilerlerken, pozitif dalga önu gerçek durumda mansap yönünde analitik çözümden daha yavaş ilerlemektedir. Ayrıca başlangıçtaki dalga oluşumunda, analitik ve deneysel sonuçlar arasında özellikle akım çizgisi eğriliklerinden dolayı belirgin farklılıklar gözlemişlerdir.

Lauber ve Hager (1998a, 1998b); sırasıyla yatay ve eğimli pürüzsüz dikdörtgen bir kanalda düşey bir kapağın ani olarak kaldırılması sonucu oluşan baraj yıkılması akımının incelenmesi amacıyla kapsamlı deneyler yapmışlardır. Tüm deneylerini kuru mansap durumu için gerçekleştirerek öncelikle yatay, sonrasında $S_0=0.1$ ve $S_0=0.5$ taban eğimlerinde incelemeler yapmışlardır. Başlangıçtaki akım derinliğinin en az 30 cm olması durumunda, baraj yıkılması akımlarının Froude benzerlik kanununa uyduğunu belirtmişlerdir. Kapağın kaldırılma zamanı $1.25(h_0/g)^{1/2}$ den küçük olduğunda baraj yıkılmasının ani yıkılma olduğunu ifade etmişlerdir. Ölçümlerini 14 m uzunluğunda, 0.50 m genişliğinde ve 0.70 m yüksekliğinde dikdörtgen bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Ölçümlerinde yerel akım derinlikleri ve hızlarını veren bir video sistem kullanmışlardır. Çalışmada, akımın her yerde gözlenebilmesi için kamera yerini değiştirerek deneylerini tekrarlamışlardır. Akım derinliği, seçilen enkesitlerdeki ortalama hızlar, debi, pozitif ve negatif dalga önu hızları, enkesitlerdeki maksimum akım derinliği ve maksimum derinliğe ulaşma zamanlarını gözlemlemişlerdir. Deney sonuçlarını, literatürdeki analitik çözümlerle karşılaştırmışlardır. Başlangıç aşamaları dışında, sonuçların uyumlu olduklarını ifade etmişlerdir.

Standby ve ark. (1998); yatay dikdörtgen bir kanalda, farklı yüksekliklerdeki iki su seviyesini ayıran düşey bir kapağın ani olarak kaldırılması sonucu oluşan baraj yıkılma dalgasının, başlangıç aşamalarındaki yayılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Başlangıçtaki memba derinlikleri 10 cm ve 36 cm olmak üzere iki farklı ölçekte sırasıyla 0, 0.1 ve 0.45 mansap/memba derinlik oranları için su yüzü

profillerini belirlemişler ve akımın davranışını incelemişlerdir. Deneylerini 15.24 m uzunluğunda, 0.4 m genişliğinde ve 0.4 m yüksekliğinde yatay dikdörtgen bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Başlangıç aşamalarındaki akımı incelediklerinden kanalın rezervuar kısmı uzun tutularak kapak memba ucundan 9.6 m uzağa yerleştirilmiş ve baraj olarak 3 mm kalınlığında bir metal kapak kullanılmıştır. Su seviyesi ölçümlerini standart bir video kameradan elde ettikleri görüntüler yardımıyla belirlemişlerdir. Kameralar belirli görüş açısına sahip olduklarından deney kanalının tüm görüntüsünü elde edebilmek için kameranın yerini değiştirerek deneyi tekrarlamışlardır. Görüntüsü alınmak istenen bölgelerde, lazer yardımıyla kanal içerisinde bir düzlem oluşturularak bu düzlemdeki akım görüntülenmiştir. Ayrıca kanal içerisinde boyuna doğrultudaki belirli noktalarda, su seviyelerini noktasal ölçerler (resistance probe) kullanarak da ölçmüşler ve video görüntülerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırarak ölçümlerini doğrulamışlardır. Deney sonuçlarını kuru ve ıslak durum için bilinen analitik sonuçlarla karşılaştırmışlar ve özellikle başlangıç aşamalarından sonraki zamanlarda, oldukça uyumlu oldukları sonucuna varmışlardır. Kuru yatak durumunda kapağın kalkmasından hemen sonra, kısa bir süre için yatay bir jet oluşumundan söz etmişlerdir. Islak durumda ise arka arkaya dalga kırılmalarını içeren düşey bir jet (mushroom-like) oluşumdan bahsetmişler ve bu durumu ilk kez tanımlamışlardır.

Aureli ve ark. (1999); bir boyutlu sıg su denklemlerine dayanan MacCormack sayısal şemasını doğrulamak amacıyla baraj aksında ve mansap ucunda trapez geometriye sahip bir eşik bulunması durumları için bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarını 1 m genişliğinde, 0.5 m yüksekliğinde ve 7 m uzunluğunda bir kanalda yapmışlardır. Kanal boyunca dört farklı noktada aldıkları video görüntülerden su seviyesi değişimlerini belirlemişlerdir. Hız ölçümleri için akustik Doppler hız ölçer kullanmışlardır. Sayısal sonuçların, karmaşık geometrinin neden olduğu güçlü yansımaları uygun biçimde yansıttığını gözlemlemişlerdir.

Blaser ve Hager (1999); pürüzlü bir tabana sahip dikdörtgen bir kanalda baraj yıkılması dalga önünün yayılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Yataydan %50 eğime kadar üç farklı taban eğiminde çalışmışlardır. Başlangıçta kuru mansap yatağı

olması durumu için deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarını, Dressler (1952) tarafından yatay pürüzlü kanallar için geliştirilen analitik çözümlerle karşılaştırmışlardır. İlave olarak, Lauber'in (1997) pürüzsüz bir kanalda pozitif dalga önünün yayılması için verdiği ifadeyi pürüzlü yüzeyler için genişletmişlerdir.

Liem ve Köngeter (1999); yüksek hızlı dijital ölçüm sistemi kullanarak dikdörtgen bir kanalda bir dizi deney gerçekleştirmişler ve parçacık görüntülemeli hız tekniğinin (PIV), hızlı değişen bir yapıya sahip baraj yıkılması akımına uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Deneylerini 14 m uzunluğunda, 0.5 m genişliğinde bir kanalda yapmışlar, 5 m uzunluğa ve 0.5 m su yüksekliğine sahip bir hazne kullanmışlardır. Yıkılmanın başlangıç aşamalarında dalga önü yakınındaki akım hızlarını, dalga önünün yayılma hızını ve su seviyelerinin değişimini gözlemlemişlerdir. Baraj yıkılması akımlarının hızlı değişen bir yapıya sahip olmaları ve yüksek hava girişimine maruz kalmalarından dolayı, akım hakkında daha detaylı bilgiler verebilen PIV ölçümlerinde aşılması gereken temel zorluğun, havalanmanın neden olduğu güçlü yansımaları, su içerisinde akımı izlemek için kullanılan parçacıklara ait bilgilerden ayıklamak olduğu sonucuna varmışlardır.

Mohapatra ve ark. (1999); baraj yıkılması akımını düşey düzlemde iki boyutlu denklemleri kullanarak nümerik olarak incelemişlerdir. Sayısal yöntem olarak GENSMAC Navier Stokes Çözücü ve akışkan hacmi (Volume of Fluid) yaklaşımının birleşimi bir yöntem kullanmışlardır. Mansapta ıslak ve kuru yatak koşulları için baraj aksındaki akım derinliğinin zamanla değişimini ve basınç dağılımının değişimini araştırmışlardır. Su yüzü profili ve dalga hızlarını da hesaplamışlardır. Baraj yıkıldıktan hemen sonraki ($t=1s$) hidrostatik olmayan basınç dağılımının, daha uzun zaman sürelerindeki sonuçlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Nümerik sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Kuyruk suyu (ıslak yatak) bulunması durumunda, baraj yıkılmasından hemen sonra hakim olan hidrostatik olmayan basınç koşullarının daha uzun zaman sürelerindeki sonuçlar üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir. Islak yatak koşullarında hidrostatik duruma ulaşma süresinin kuru yatak koşullarına göre daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir. Baraj aksındaki akım derinliğinin sabit bir değere

ulaşmasının mansap/memba derinlik oranının ($r=h_1/h_0$) düşmesiyle arttığını söylemişlerdir.

Zoppou ve Roberts (1999); baraj yıkılması sonucu ortaya çıkan taşkın yayılmasının belirlenebilmesi için bir bilgisayar modeli geliştirmişlerdir. İki boyutlu dalga denklemlerini çözmek için kesirli adım (fractional step) yöntemini kullanmışlardır. Homojen denklemlerin çözümü ise birinci derece yaklaşık Riemann çözücülü sonlu hacimler yöntemi ile yapılmıştır. Adi diferansiyel denklemin çözümü için Euler'in yöntemi kullanılmıştır. Kompleks geometrilerin daha iyi tanımlanabilmesi için modelde üçgen ağ (mesh) kullanmışlardır. Modelin hassaslığının belirlenmesi analitik çözümlerin yanı sıra literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak sağlanmıştır. Islak ve kuru mansap koşullarının incelenmesinde, modelin güçlü ve etkili sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Geliştirilen modelin, engellerin ve kompleks geometrilerin etrafındaki akımların modellenmesinde, dik yatak eğimleri ile sürtünme etkisi içeren durumlarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Wu ve ark. (1999); baraj yıkılması şok dalgaları için trapez enkesit durumunda teorik bir çözüm geliştirmişlerdir. Stoker'in (1957) geliştirdiği 3 denkleme dayanan çözümü tek bir cebrik denklem ile ifade etmişlerdir. Bu denklemde şok dalgasının akım hızı, akım derinliği, süreksizlik hızı (şok dalgasının yayılma hızı) gibi hidrolik parametreler, başlangıçtaki mansap derinliğinin memba derinliğine oranı ile bulunabilmektedir. Dikdörtgen kanal için aşağıdaki ifadeyi vermişlerdir:

$$\left(\frac{h_2}{h_0}\right)^3 - 9\left(\frac{h_2}{h_0}\right)^2\left(\frac{h_1}{h_0}\right) + 16\left(\frac{h_2}{h_0}\right)^{3/2}\left(\frac{h_1}{h_0}\right) - \left(\frac{h_2}{h_0}\right)\left(\frac{h_1}{h_0}\right)\left(\frac{h_1}{h_0} + 8\right) + \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^3 = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{h}{h_0} = \frac{1}{9}\left(2 - \frac{x}{t\sqrt{gh_0}}\right)^2 \quad (2.2)$$

Bu denklemden şok dalgasının derinliğinin sadece başlangıçtaki mansap derinliğinin memba derinliğine oranına bağlı olduğu görülmektedir. Denklem 2.2’de verilen ifade Ritter’in çözümüne eşittir.

Aureli ve ark. (2000); McCormack şemasına dayanan sayısal bir model geliştirerek bu modelin uygunluğunu literatürdeki deneysel sonuçlar (Chervet ve Dalleves, 1970 ile Bellos ve ark., 1992) ve kendi gerçekleştirdikleri bir boyutlu deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Literatürdeki kanal daralmaları, düzensiz kanal taban eğimleri, farklı kuyruk suyu derinlikleri durumlarındaki deney sonuçlarını analiz etmişlerdir. Kendi deneylerini 7m uzunluğunda, 1m genişliğinde ve 0.5m yüksekliğinde bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde $n=0.01$ ve $n=0.025$ pürüzlülük değerleri düşünülmüş ve izotropik pürüzlülük sağlamak amacıyla kanal tabanı $200/m^2$ yoğunluklu naylon tırnaklarla kaplanmıştır. Kanal üzerindeki bir kapağın ani olarak kaldırılması ile baraj yıkılması olayını modellemişlerdir. Testlerini kuyruk suyunun olmaması ve farklı derinliklerde olması durumları için tekrarlamışlardır. Ayrıca kanal taban eğiminin farklı değerleri ve ters eğim durumu için deneyler yapılmıştır. Derinlik ölçümleri kanaldaki akımın video kaydedicilerle izlenmesiyle belirlenmiştir. Hız ölçümleri akustik Doppler hız metre ile yapılmıştır. Saint-Venant denklemlerinde yapılan kabuller (hidrostatik basınç dağılımı, üniform hız dağılımı, küçük taban eğimi ve eğrilikleri) deneysel konfigürasyonlarla yerel olarak bozulsan da deney sonuçlarının sayısal sonuçlarla oldukça iyi uyum sağladığını göstermişlerdir. Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki uyumun sadece, baraj aksında büyük su yüzü eğrilikleri varsa bozulduğunu ifade etmişlerdir.

Khan ve ark. (2000); baraj yıkılması kabarma dalgaları (surges) üzerinde yüzen katı maddelerin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerini 0.411m genişliğinde, 0.265m yüksekliğinde ve 28 m uzunluğunda şeffaf bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Katı madde olarak 0.92 özgül ağırlığa sahip hekzahedron plastik parçacıklar kullanmışlardır. Farklı mansap/memba derinlik oranları ve farklı konsantrasyonların, kabarma dalgalarının hızları ve maksimum yükseklikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Genel olarak dalga hızını; mansap/memba derinliği oranı, kapağın membasında parçacık konsantrasyonunun su kütlesine oranı

ve memba derinliği ile parçacık boyutu arasındaki oranın bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir. Dalga yüksekliğini ise başlangıçta küçük mansap derinlikler için derinlik ve konsantrasyon oranlarının fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir. Başlangıçtaki yüksek derinliklerde ise dalga yüksekliğinin sadece derinlik oranlarının bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Üç parametrenin etkisini incelemişlerdir. Bu parametreler derinlikler oranı (h_1/h_0), konsantrasyonlar oranı (C_w/ph_0) ve uzunluklar oranıdır (L/h_0). Kabarma dalgasının hızı ve yüksekliğinin enkazın şekline de bağlı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Nsom ve ark. (2000); eğimli bir kanaldaki baraj yıkılması problemini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarını 5 m uzunluğunda, 0.30 m genişliğinde ve 0.08 m yüksekliğinde şeffaf dikdörtgen bir kanalda, farklı taban eğimlerinde gerçekleştirmişler ve sıvı olarak farklı Newtonien akışkanlar kullanmışlardır. Başlangıçta kanal tabanı yatay alınmış ve 3'er derece arttırılarak 12°'ye kadar olan eğimler kullanılmıştır. Seçilen istasyonlardaki yükseklikler ultrasonik cihazlarla ölçülürken dalga önünün ve yüksekliğinin gelişimi video fotoğraflarla belirlenmiştir. Teorik çalışmalarında bir boyutlu Navier Stokes denklemlerini kullanmışlardır. Dalga önünden uzak kısımlarda, akımın kinematik dalga teorisi ile tanımlanabileceğini belirtmişlerdir. Yatak eğimindeki değişikliğin dalga önünün gelişimi üzerinde çok fazla bir etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır.

Zoppou ve Roberts (2000); iki boyutlu baraj yıkılması probleminin sayısal çözümü için yeni bir model tanımlamışlardır. Modellerinde; kartezyen ızgara (grid) üzerinde sığ su denklemlerinin çözümü için Van Leer tipi kısıtlayıcı ikinci derece yaklaşık Riemann çözücü kullanmışlardır. Denklemlerde akıma gelen sürtünme etkisini ve kanal taban eğimini içeren kaynak terimlerini dikkate almışlardır. Ayrıca baraj mansabının kuru ve ıslak olması durumlarını da incelemişlerdir. Modellerinin geçerliliğini bir dizi varsayımlara dayanan örnekler kullanarak literatürde yapılmış çalışmalarla karşılaştırmak suretiyle gerçekleştirmişlerdir. Bir boyutlu problem olarak 2000 m uzunluğunda yatay, sürtünmesiz bir kanalın ortasına yerleştirilmiş bir barajın ani olarak yıkılması problemini ele almışlardır. Mema derinliğini 10 m ve mansap derinliğini 0.1 m olarak seçmişlerdir. Sayısal sonuçlar, Stoker'in analitik sonuçları ile karşılaştırıldığında uyum içinde olduğu görülmüştür. İki boyutlu baraj

yıkılması problemi olarak başlangıçtaki su derinliği 10 m olan ve 5 m, 0.1 m ve sıfır kuyruk suyu derinliklerinde, 200×200 m bir hesaplama alanı üzerinde uygulama yapmışlardır. Alanın ortasında yerleştirilmiş bir baraj üzerinde 75 m genişliğinde bir gedğin ani açılması suretiyle oluşan dalganın yayılması problemini incelemişlerdir. Modellerinin konservatif, hassas, stabil ve güçlü olduğunu göstermişlerdir. Yöntemlerinin, dik yatak eğimleri ile sürtünme direncini de içeren kompleks geometrilere ve kuru-ıslak yatak durumlarında etkili sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Wang ve ark. (2000); baraj yıkılması problemlerinde kullanılan bir boyutlu Saint-Venant denklemleri ve iki boyutlu sıg su denklemlerinin çözümü için sonlu farklar yöntemine dayanan melez tipi ikinci derece toplam değışim azalması (Total Variation Diminishing, TVD) şeması geliştirmişlerdir. Bu şema seçilen optimum kısıtlayıcının kullanıldığı birinci derece “upwind şema” ve ikinci derece “Lax Wendroff” şemasının birleşimine dayanmaktadır. Islak yatak koşullarında bir boyutlu baraj yıkılması probleminin çözülmesi için Saint-Venant denklemlerine farklı kısıtlayıcılarla bu şema uygulanmıştır ve sonuçlar ayrı ayrı Stoker’in teorik çözümüyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda farklı kısıtlayıcılarda şemanın sayısal performansında farklılıklar gözlenmiştir. Çalışma sonucunda optimum kısıtlayıcıyı belirlemişlerdir. Sunulan şemayı “operator splitting” tekniğı kullanılarak iki boyutlu denklemler için genişleterek ıslak ve kuru yatak koşullarına uygulamışlar ve sonuçlarını daha önce literatürde yayınlanmış sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Sonuçların uyum içerisinde olduğunu ifade etmişlerdir. İki boyutlu akım özelliklerinin, ıslak yatakta kuru yatağa göre daha belirgin olduğu fakat dalga yayılma hızlarının daha büyük olduğu sonucunu çıkarmışlardır. Sayısal simülasyonlarında, bir boyutlu tek (bore) dalgaların yayılması, yansması, etkileşimi ve iki boyutlu tek dalgalarının yayılması ile mansapta bulunan dikdörtgen bir engele çarpması sonucu yansması ve kırılması gibi bir dizi baraj yıkılması problemini ele almışlardır. Farklı taban eğimleri, farklı sürtünme, farklı kuyruk suyu/rezervuar derinlik oranlarının etkisini incelemişlerdir. Yöntemlerinin tek dalga ve kabarma dalgalarının analizi için güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Tseng ve ark. (2001); hızlı değişen bir boyutlu açık kanal akımlarını tanımlamak için iki tane yüksek çözünürlüklü “shock-capturing” şema geliştirmişlerdir. Bu şemalarda değişken sınır koşullarını ikinci derece hassaslıkta karakteristikler yöntemi ile belirlemişlerdir. Kanal taban eğimi ve sürtünme etkilerini içermesi için “Strang-tipi splitting operatör” kullanmışlardır. Bu şemaların güvenilirliğini analitik sonuçlarla ve düzenli, değişken akım problemlerine ait mevcut deney sonuçlarıyla karşılaştırarak yapmışlardır. Sayısal çalışmalarında, üç düzenli üç de değişken akım (baraj yıkılması) problemini ele almışlardır. İlk olarak 1000 m uzunluğunda yatay, dikdörtgen ve sürtünmesiz bir kanalda, farklı kuyruk suyu ve rezervuar derinliklerinde ideal baraj yıkılması problemini incelemişlerdir. Daha sonra şemaları US Army Engineer Waterways Experimental Station (WES)’da (1960) yapılan prizmatik bir kanaldaki baraj yıkılması deney sonuçları ve Bellos ve ark. (1992)’nin prizmatik olmayan bir kanalda gerçekleştirdikleri baraj yıkılması deney sonuçları ile karşılaştırma yapmışlardır. Tseng ve ark. (2001), bu şemaların sonuçlarının şiddetli şok içeren ve çoklu süreksizliğe sahip açık kanal akımlarında güçlü stabilite ve yüksek hassasiyet gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca dinamik taşkın öteleme ve düzenli akım öteleme (steady routing) sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Düzenli akım ötelemesinde, taşkın süresince su derinliklerinin beklenenin altında çıkabileceğini belirterek bu yöntemin hidrolik yapıların ve akarsuların planlanmasında güvensiz olabileceğini ifade etmişlerdir.

Frazao ve ark (2002); kanal tabanında üçgen bir eşik olması durumunda baraj yıkılması akımının yayılmasını ve davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerini 5.6 m uzunluğunda ve 0.5 m genişliğinde cam duvarlara sahip yatay dikdörtgen bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarını sıg su denklemlerinin sayısal çözümü ile karşılaştırmışlardır. Denklemlerin çözümünde, Roe tipi sonlu hacim şemasına dayanan ve kanal tabanının eğimli olması durumu için geliştirdikleri sayısal yöntemi kullanmışlardır. Kanal üzerinde, farklı noktalarda deney tekrarlamak suretiyle yüksek hızlı video kameradan elde ettikleri görüntüleri birleştirerek su yüzü profillerini belirlemişlerdir. Üçgen engel artan ve azalan eğime sahip olduğundan, bu engelin eğimli yüzeylerde baraj yıkılması akımının sayısal olarak çözülmesi esnasında karşılaşılan zorlukları anlamak amacıyla oldukça uygun

bir örnek olduğunu ifade etmişlerdir. Geliştirilen sayısal şemanın engel olması durumunda akımın temel özelliklerini yansıttığı ve deney sonuçları ile uyum içerisinde olduğu sonucuna varmışlardır.

Frazao ve Zech (2002); başlangıçta kuru ve 90° bir dirseğe sahip bir kanalda baraj yıkılması akımını deneysel olarak incelemişlerdir. Ölçülen su seviyeleri ve hız değerlerini sonlu hacim şemalarıyla hesaplanan bir ve iki boyutlu sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Ayrıca düz kısımlarda bir boyutlu ve dirseklerde yerel iki boyutlu modelin kullanıldığı melez bir model geliştirmişlerdir. Ölçümlerde yüksek hızlı dijital kameralar (200 resim/sn) kullanmışlardır. Hız ölçümlerinde Voronoi parçacık izlemeli hız (Particle-Tracking-Velocity, PTV) tekniğini kullanmışlardır. Bu yöntemde yaklaşık 10 mm büyüklüğündeki tahta yüzücülerin izlenmesiyle akım hızı hesaplanmıştır. İki boyutlu yaklaşım su seviyelerinin belirlenmesinde, seyahat süresinde ve dirsekten yansıyan akımın iki boyutlu özellikleri hakkında iyi sonuçlar verirken bir boyutlu yaklaşımın özellikle akım doğrultusunda ani değişimlerin olduğu süreksiz kısımlarda yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. Melez yaklaşımda ise dirsek bölgesinin kabaca tanımlanmasına rağmen, dirsekten suyun yansımasını ve memba yönündeki kabarma dalgasının ilerleyişini iyi temsil ettiğini ifade etmişlerdir.

Nsom (2002); yüksek viskoziteye sahip saydam akışkanlar üzerinde baraj yıkılması problemini deneysel olarak incelemiştir. Deneylerini 5 m uzunluğunda 0.30 m genişliğinde ve 0.08 m yüksekliğinde pürüzsüz yatay bir kanalda gerçekleştirmiştir. Baraj yıkılması dalgasına ait su yüzü profilinin yanısıra dalganın ön kısmının şeklini ve gelişimini incelemiştir. Akım gelişimi üzerinde akışkan viskozitesinin, rezervuar uzunluğunun ve akım rejimlerinin etkisi olduğunu göstermiştir. Ölçümlerini ultra hızlı video kameralarla (baraj aksı yakınında 1000 resim/sn diğer yerlerde 25 resim/sn) gerçekleştirmiştir. Akımın oldukça hızlı olduğu ve baraj yıkılmasını izleyen ilk anlarda gelişen ataletli rejim ve daha sonraki evrede etkili olan viskoz rejim olmak üzere iki ayrı akım rejimi tanımlamıştır. Ataletli rejimde baraj mansabındaki serbest su yüzeyi maksimum değere ani olarak yükselmekte ve daha sonra yavaşça azalmaktadır.

Valiani ve ark. (2002); 1959 yılında Fransa'da meydana gelen Malpasset baraj yıkılması olayında elde edilen kapsamlı gözlem değerlerini ve deneysel model

sonuçlarını, geliştirdikleri Godunov tipi şemaya dayanan iki boyutlu sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlar ve modellerinin hassaslığını, stabilitesini, güvenilirliğini incelemişlerdir. Saint-Venant denklemlerinin ayrıklaştırılması için sonlu hacimler yöntemini kullanmışlardır. Sayısal modellerinde yer ve zaman için ikinci derece hassaslıkta çözüm elde etmişlerdir. Sürtünme eğimi ile ilişkili kaynak terimlerinin sayısal davranışı için yarı kapalı (semi-implicit) teknik kullanırlarken, taban eğimi ile ilişkili kaynak terimlerinin davranışı için yeni bir açık (explicit) yöntem geliştirip test etmişlerdir. Modelin geçerliliğini test etmek için öncelikle bir boyutlu analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Daha sonra iki boyutlu sonuçların karşılaştırılmasını Fennema ve Chaudhry'nin (1990) yaptıkları sayısal çalışmaların sonuçları ile karşılaştırarak yöntemlerinin hassaslığını, stabilitesini ve uyumluluğunu desteklemişlerdir. Son olarak Malpasset baraj yıkılmasının sayısal model sonuçlarını gerçek arazi ve laboratuvar sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Gözlenmiş su seviyeleri ile model sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir.

Bukreev ve ark. (2003); kuru ve ıslak durum için baraj yıkılması dalgasını deneysel olarak incelemişler ve elde ettikleri verileri sığ su denklemlerinin sayısal çözümleri ile karşılaştırmışlardır. Ölçüm aracı olarak belirli noktalara yerleştirilmiş dalga ölçerler ve video kamera kullanmışlardır. Kuru durumda özellikle başlangıç aşamalarında sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu, sadece deneylerde sürtünmeden dolayı dalga önünün bir miktar geriden geldiği ve yüzey geometrisinin dış bükey olduğundan söz etmişlerdir. Islak yatakta sığ su denklemleri ile dalga yayılmasının hızını ve yükseklikleri doğru bir biçimde belirleyebilmesine karşın yüzeyde meydana gelen dalgalanmaların, bu denklemlerle tanımlanamadığını ifade etmişlerdir.

Frazao ve ark. (2003); ani genişlemenin olduğu bir kanalda baraj yıkılması akımlarının yayılmasını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Ani genişleme ile akımda çevrintilerin oluşmasını ve türbülans etkilerinin dikkate alınmasını amaçlamışlardır. Deneylerinde birkaç ölçüm tekniği kullanmışlardır. Belirli yerlerde su seviyesini ölçmek için noktasal su seviyesi cihazları, su yüzü profilleri için kanal cam duvarlarından elde edilen video görüntüleri kullanmışlar, yüzey hızlarını ise yüzen plastik parçacıkların dijital görüntüleme yöntemleri ile izlenmesiyle

bulmuşlardır. Türbülans gerilme terimlerini içeren sıg su denklemlerini çözmek için Roe tipi sonlu hacim şeması geliştirmişlerdir. Deneysel sonuçları geliştirdikleri sayısal yöntem ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak baraj yıkılması akımları için türbülans gerilmelerinin hassas olarak modellenmesinin gerekip gerekmediği sorusuna tam bir cevap verememişlerdir.

Shige-eda ve Akiyama (2003); iki boyutlu taşkın akımlarının davranışını ve yapılar üzerine uyguladıkları hidrodinamik kuvvetleri deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Sayısal yöntem olarak sonlu hacimler yöntemini kullanmışlardır. Deneylerini yatay bir kanalda, kuru taşkın yatağı üzerinde yapıların bulunması ve bulunmaması durumları için tekrarlamışlardır. Yapılara gelen hidrodinamik kuvvetin yanısıra taşkın dalgası önünün durumunu, derinlikleri ve su yüzeyi hızlarının zamanla değişimini gözlemlemişlerdir. Derinlik ölçümleri dijital kameralarla (VTR), su yüzeyi hızları da yüzey üzerinde yüzdürülen köpük parçacıkların izlenmesiyle (PTV) belirlenmiştir. Ortalama hızlar yüzey hızlarının 0.90 ile çarpılması suretiyle elde edilmiştir. İki boyutlu taşkın akımları için deneysel ve sayısal sonuçların uyum içerisinde olduklarını belirtmişlerdir.

Zoppou ve Roberts (2003); baraj yıkılması problemini idare eden denklemleri çözmek için kullanılan 20 açık (explicit) nümerik şemanın performansını incelemişlerdir. Bu şemalardan elde edilen sonuçları baraj mansabının sonlu derinlikli ve kuru olması durumundaki analitik çözümlerle karşılaştırmışlardır. Nümerik şemaların çoğunun kritik altı akımlarda hassas sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Şemaların problemlerdeki performansını kritik altı ve kritik üstü akımlar arasında geçiş durumu olan baraj yıkılması akımları için karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmalı çalışma sonucunda, akımda süreksizliklere sahip baraj yıkılması problemlerinin çözümü için etkili, hassas, güçlü ve uygun çeşitli nümerik şemaların olduğunu ifade etmişlerdir. En hassas şemanın ikinci derece “flux corrected transport” şeması olduğunu söylemişlerdir.

Aureli ve ark. (2004); bir kapağın ani olarak kaldırılması sonucu oluşan hızlı değişen değişken akımın geniş bir kanalda yayılmasını, mansapta engel olması ve olmaması durumları için iki farklı deney yaparak araştırmışlardır. Deneylerinde kullandıkları su içerisine boya katarak su kalınlığının değişmesiyle birlikte kanal

üstünden alınan görüntülerde renk yoğunluğunun artmasını sağlamışlardır. İncelenen bölgede, pleksiglas malzemeden yapılmış deney tabanından arka plan aydınlatması yaparak su derinliğinin dağılımını belirginleştirmişler ve bu bölgenin çekilen görüntülerindeki renk tonlarını, önceden yapılan kalibrasyonlardan türetilen dönüşüm fonksiyonları yardımıyla su derinliklerine dönüştürmüşlerdir. Elde ettikleri deney sonuçlarını kendi yazdıkları 2 boyutlu sonlu hacimler yöntemine dayanan sayısal yöntemle karşılaştırmışlardır. 2 boyutlu sayısal çözümlerinin, küçük ölçekte bazı farklılıklar olmasına rağmen akımın temel karakteristiklerinin temsil edilmesinde uygun sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır.

Chanson (2004b); 25 m uzunluğunda başlangıçta kuru olan basamaklı bir kanalda baraj yıkılmasının yayılmasını ve yayılma sırasındaki hava girişimini incelemiştir. Anlık hava kabarcıklarının büyüklüğünü, sayısını ve hızlarını belirleyen yeni bir deneysel teknik geliştirmiştir. Değişken hava-su akım özelliklerini sıralanmış iletken noktasal ölçüm aletleriyle gerçekleştirmiştir. Dalga önünün uç kısmında güçlü hava girişiminin olduğunu gözlemlemiştir. Akım bölgesi içinde yaptığı anlık hız ölçümlerinde değişken türbülanslı bir sınır tabakası belirlemiştir.

Chanson (2004c); basamaklı bir kanalda yayılan baraj yıkılma dalgasında meydana gelen enerji kayıplarını incelemiştir. Deneylerinde 24 m uzunluğunda ve 0.14 m yüksekliğinde basamaklı bir kanal kullanmıştır. Kanalı yandan ve üstten gören iki video kamera kullanarak ölçümlerini gerçekleştirmiştir. Dalga yayılmasının klasik teoride belirlenenenden daha hızlı meydana geldiğini gözlemlemiştir. Düzenli akım durumuyla karşılaştırıldığında taşkın dalgasının yayılmasının daha az enerji kaybına sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Frazaio ve Zech (2004); baraj mansabında bulunan bir engelin baraj yıkılma dalgası üzerindeki etkilerini geniş bir haznede deneysel olarak incelemiştir. Bir binayı temsil eden bir dikdörtgen engeli barajın hemen mansabına akım doğrultusuna ve kapak eksenine asimetric bir biçimde yerleştirmişlerdir. Akım özelliklerini daha iyi belirlemek için birkaç ölçüm yöntemini kullanmışlardır. Su seviyesinin değişimlerini beş farklı noktada noktasal su seviyesi ölçerler yardımıyla elde etmişlerdir. Her bir ölçüm noktasındaki hızları, akustik Doppler hız ölçer ile belirlemişlerdir. Akımın yüzey hızlarını ise dijital görüntüleme teknikleri kullanarak

hesaplamışlardır. Akım gözlemlerinde dalganın yapıya güçlü bir biçimde çarpmasından sonra akımın binayı geçmek için doğrultusunu değiştirmeye çalıştığını ve bunun sonucunda hidrolik sıçrama oluşumlarının meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Yapı arkasında da bir çevrinti bölgesi gözlemişlerdir. Engele yakın yerlerde akımda engel olmaması durumuna göre önemli yerel değişiklikler olduğunu, engel etkisinin yapıdan uzaklaştıkça azaldığını ifade etmişlerdir. Yüzey hızlarının belirlenmesinde dijital görüntülemenin en iyi seçenek olduğunu bildirmişlerdir.

Janosi ve ark (2004); uzun dikdörtgen bir kanalda, küçük sonlu bir hacme sahip bir rezervuardan suyun ani salıverilmesi sonucu oluşan baraj yıkılması akımlarında türbülans etkisini araştırmışlardır. Deneylerini 10 m'lik bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Hazne mesafesinin kısa (38 cm) ve mansap mesafesi uzun (955 cm) kanal koşullarında 11-25 cm arası su yükseklikleri için deneyler yapmışlardır. Ölçümlerini CCD video kameralardan elde edilen görüntüler yardımıyla yapmışlardır. Deneylerde akışkan olarak normal su ve yüksek konsantrasyonda polietilen-oksit (PEO) çözeltisi kullanmışlardır. Baraj yıkılması akımının temel karakteristiklerinin, dalga önünün kuru veya bir su tabakası üzerinde yayılmasına bağlı olarak oldukça farklı olacağını ifade etmişlerdir. Kuru yatak koşullarında akımın daha hızlı olduğunu fakat daha sonra sürtünmenin akımı frenlemesinin daha güçlü olduğunu belirtmişlerdir. Çözeltiye sahip akışkan kullanıldığında türbülans itki azalmasının (turbulence drag reduction) kuru yatak deneylerinde işe yaradığını ve çözeltinin etkisinin mansapta ince bir su tabakası olması durumunda bile ihmal edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Shigematsu ve ark. (2004); baraj yıkılmasının başlangıç aşamalarını Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Türbülans modeli olarak $k-\epsilon$ yöntemini kullanmışlardır. Sayısal sonuçlarını Standsby (1998) ve 90 cm uzunluğa, 29.5 cm genişliğe sahip dikdörtgen bir kanalda kendi yaptıkları deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Baraj yıkılması gibi etkili hız değişimlerinin olduğu karmaşık akımların tanımlanmasında $k-\epsilon$ türbülans yaklaşımının uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Analitik çözümle karşılaştırıldığında kuru durum için pozitif dalga önünün daha yavaş hareket ettiğini, negatif dalganın ise daha hızlı ilerlediğini belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlarla

karşılaştırıldığında su seviyeleri ve dalga önü ilerleme hızlarının oldukça uyumlu olduklarını ifade etmişlerdir. Sayısal değerlendirmelerinde kuru yatakta dalga yayıldığı zaman taban yüzeyinden dolayı oluşan türbülansın etkili olduğunu, ıslak durumda ise dalga sıçramasının ve kırılmasının neden olduğu türbülansın baskın olduğu sonucuna varmışlardır. Sayısal sonuçların tam olarak doğrulanabilmesi için detaylı hız ölçümlerine ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir.

Bukreev (2005); dikdörtgen bir kanal tabanına yerleştirilen dikdörtgen bir eşik üzerindeki bir kapağın ani olarak kaldırılmasıyla, kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan akımın davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Deneylerinde farklı genişlikte ve yükseklikte eşikler kullanmıştır. Deneylerini 7.2 m uzunluğunda 20 cm genişliğinde ve 24 cm yüksekliğinde camdan yapılmış bir kanalda gerçekleştirmiştir. Kapak 1.5 cm kalınlığındaki kapak taban eşiğinin ortasına yerleştirilmiştir. Su yüzeyi seviyelerini ölçmek için dalga ölçerler ve video kameradan elde edilen görüntülerden yararlanmıştır. Eşik üzerinde bir yerde kritik akım koşulları ($4h_0/9$) oluştuğundan eşik üzerindeki su yükünü kullanarak akım debisinin bulunabileceğini ifade etmiştir.

Bukreev ve Gusev (2005); baraj yıkılması dalgasının oluşumunun kuru ve ıslak durum için başlangıç aşamalarını deneysel olarak incelemişlerdir. 20 cm genişliğinde yatay dikdörtgen kanalda deneylerini yapmışlar ve 1 cm kalınlıklı pleksiglas bir kapağın ani olarak kaldırılmasıyla baraj yıkılması akımını oluşturmuşlardır. Haznedeki suyu mürekkep ile boyayarak belirgin hale getirmişlerdir. Su seviyesinin değişimini göstermek için video görüntülerinden yararlanmışlar ve baraj yıkılma dalgasının boyuna doğrultudaki yer değiştirmesini belirlemek için dalga metreler kullanmışlardır. Pozitif dalga önünün teorik çözümlerden daha yavaş ve negatif dalganın ise daha hızlı hareket ettiğini gözlemlemişlerdir. Kuru durumda dalga önü geometrisinin teoridekinin tersine dış bükey olduğunu ifade etmişlerdir. Sığ su denklemlerinin çıkarılışında, akımın çevrintisiz olduğu kabulünün aksine, deneysel çalışmalarında baraj yıkılması akımının başlangıç aşamalarında belirgin çevrintiler gözlemlemişlerdir.

Eaket ve ark. (2005); değişken açık kanal akımlarının ölçümünde üç boyutlu yüzey görüntüsü elde edilebilmesine olanak tanıyan video stereoskopi yönteminin uygulanabileceğini göstermişlerdir. Deneysel çalışmalarında 2.31 m genişliğine ve

4.75 m uzunluğuna sahip dikdörtgen bir kanalda hazneyi ikiye ayıran bir duvarın ortasında bulunan bir kapağın ani olarak kaldırılması sonucu oluşan baraj yıkılması akımına ait üç boyutlu su yüzü profillerini ve yüzey hızlarını elde etmişlerdir. Deney tankı üzerinde aynı doğrultuda yerleştirilmiş ve senkronize çalışan 3 kameradan akıma ait stereogörüntüler elde etmişlerdir. Görüntülerde referans noktaları oluşturması için su yüzeyi üzerinde yüzen plastik parçacıklar kullanmışlardır. Daha sonra parçacıkların 3 boyutlu koordinatlarını kamera pozisyonlarının ve her bir kameradan elde edilen stereo görüntülerde bu parçacıkların yerlerinin eşleştirilmeleri ile hesaplamışlardır. Parçacık hızlarını ise arka arkaya hesaplanan görüntülerin analiziyle belirlemişlerdir. Bu ölçüm tekniği ile baraj yıkılması akımlarına ait su yüzeylerinin üç boyutlu olarak belirlenebileceği, ancak istenilen seviyede hassasiyet elde edebilmek için yüksek hızlı ve yüksek çözünürlüğe sahip kameraların kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Quecedo ve ark. (2005); baraj yıkılması probleminin sayısal çözümü için sığ su ve Navier-Stokes denklemlerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak karşılaştırmışlardır. Navier-Stokes denkleminde serbest yüzeyin yerinin belirlenmesi amacıyla sabitlenmiş seviye (level set) yönteminden yararlanmışlardır. Sığ su denklemlerinin çözümünde ise iki adımlı Taylor-Galerkin yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında kuru, ıslak ve mansapta bir engel bulunması durumunda baraj yıkılmasını, dalga önünün yayılmasını, oluşan su yüzü profillerini, başlangıçtaki basınç değişimlerini incelemişlerdir. Karşılaştırma sonucunda kuru yatak durumu için sığ su yaklaşımı ile elde edilen çözümde dalga önünün daha hızlı ilerlediğini ve barajdan uzak bölgelerde su derinliğinin değişiminin belirlenmesinde uygun sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Islak yatak durumunda ise Navier-Stokes ve sığ su yaklaşımlarının yakın sonuçlar verdiğini söylemişlerdir. Yüzey eğriliğinin fazla olduğu yerlerde sığ su yaklaşımında sapmalar olduğunu ve bu nedenle yapılara gelen basıncın hesaplanması gibi bazı durumlarda bu yaklaşımın kullanılmaması gerektiğini ifade etmişlerdir. Sığ su yaklaşımının bir takım eksiklikleri olmasına rağmen hesaplama gücü açısından bakıldığında çözüm bölgesinin büyük olduğu durumlarda en iyi seçenek olarak ortaya çıktığını ve Navier-Stokes yaklaşımının

akımın 3 boyutlu yapısı hakkında detaylı bilgi istenilen yerel hesaplamalarda tercih edilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Leal ve ark. (2006); sürtünme ve atalet kuvvetlerinin baraj yıkılma dalgası önünün yayılma hızı üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla literatürde bulunan sabit veya hareketli akarsu yatağı (beş farklı yatak malzemesi için), kuru veya ıslak mansap koşulları, yatay veya eğimli taban koşulları gibi farklı başlangıç koşullarına sahip çok sayıda deneysel çalışmadan yararlanmışlardır. Deneysel sonuçlarını, bilinen analitik çözümlerle ve sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sayısal çalışmalarında sediment taşınım terimlerini de içeren ve sığ su yaklaşımına dayanan bir model kullanmışlardır. Dalga yayılma hızının başlıca; sürtünme katsayısı, sediment ataleti, başlangıçtaki mansap su derinliği ve başlangıçtaki memba ile mansap yatak yükseklikleri arasındaki farktan etkilendiği sonucuna varmışlardır. Sürtünme katsayısının; yatak malzemesinin türü, sabit ve hareketli olmasından etkilendiğini belirtmişlerdir. Kuru mansap yatağı için sürtünme katsayısının dalga yayılma hızının genliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Deneysel çalışmalarla karşılaştırıldığında, sürtünme etkilerini içeren analitik sonuçların yayılma hızlarının belirlenmesinde geniş zaman aralığı için uygun sonuçlar vermediğini, sayısal çözümlerin ise analitik çözümlere göre daha iyi sonuç vermesine rağmen yine de çok iyi uyum sağlamadığını ve ilave deneysel çalışmalara (özellikle de mansap uzunluğu fazla olan) ihtiyaç duyulduğu sonucuna varmışlardır. Islak mansap yatağı durumunda başlangıçtaki mansap derinliğinin memba derinliğine oranının arttıkça dalga yayılma hızının belirgin biçimde azaldığını gözlemlemişlerdir. Sürtünme etkilerinin ihmal edilmediği ıslak yatak durumunda küçük batmışlık değeri haricinde, elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların Stoker (1957) analitik çözümüyle uyum içerisinde olduklarını göstermişlerdir. Memba ve mansap yatak yükseklikleri arasındaki fark arttıkça dalga yayılma hızının arttığını belirtmişlerdir.

3. MATERYAL ve METOD

3.1. Giriş

Son yıllarda bilgisayarların çözüm yeteneklerinin ve yeni sayısal yaklaşımların gelişmesiyle birlikte, sayısal modellerin kullanımı baraj yıkılması taşkın kontrol çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Sayısal yöntemler ile olayı idare eden diferansiyel veya integral formdaki matematiksel denklemler cebrik denklemlere dönüştürülerek bilgisayar yardımıyla çözülürler. Bu nedenle baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının mansap boyunca yayılmasını modellemek için yapılan çalışmalarda öncelikle kullanılacak matematiksel denklemlerin seçimi gereklidir. Daha sonra bu denklemlerin çözümü için doğruluğu kanıtlanmış uygun sayısal yöntem belirlenmelidir.

Baraj yıkılması taşkın dalgasının arazi topografyası üzerinde yayılması 3 boyutlu, zamana bağlı, sıkışmayan, serbest yüzeyli bir akışkanlar dinamiği problemidir. Aynı bir çalışma konusu olan erozyon ve yığılma etkileri ihmal edildiğinde bu tür bir akımı en iyi temsil eden denklem 3 boyutlu Navier-Stokes denklemleridir. Bunun dışında kullanılabilecek diğer bir denklem takımı da Navier-Stokes denklemlerinin basit kabuller yapılarak indirgenmesiyle elde edilebilen Saint-Venant veya sığ su denklemleridir. Sığ su denklemlerinde akım derinliğinin yatay uzunluğa göre oldukça küçük olduğu varsayılır. Ayrıca düşey doğrultudaki ivme bileşeninin ihmal edildiği dolayısıyla akımın hidrostatik olduğu kabul edilir. Navier-Stokes denklemleri ile daha hassas çözümler elde edilebilmesine rağmen bu denklemlerin sayısal çözümünde, su-hava arakesitine sahip açık kanal akımlarında serbest yüzeyin belirlenmesi ve türbülans etkilerinin dikkate alınması gibi problemler bulunmaktadır.

Serbest yüzeyli akımlarda, serbest yüzeye ait sınırların hareketinden dolayı bu noktaların yerlerinin belirlenmesi zordur. Sınırın pozisyonu sadece başlangıç zaman adımıyla bilinmektedir. Daha sonraki zaman adımlarında serbest yüzey pozisyonunun çözümün bir parçası olarak belirlenmesi gereklidir. Akışkanla birlikte hareket eden kütsüz parçacıkların izlenmesi esasına dayanan işaretleyici ve hücre

(MAC-Marker and Cell) (Harlow ve Welch, 1965), çözüm ağı içerisindeki bir hücrenin ne kadarının su ile dolu olduğunu ifade eden akışkan hacmi (VOF-Volume of Fluid) (Hirt ve Nichols, 1981) ve iki akışkan ara yüzeyini sıfır olarak sabitleyen gösterge fonksiyonu kullanan sabitlenmiş seviye (Level Set) (Sethian, 1999; Osher, ve Fedkiw, 2002) yöntemi serbest su yüzeyi sınırını belirlemek için kullanılan yöntemlerdir. Lattice-Boltzman (Thürey, 2003) ve Yumuşatılmış Parçacık Hidrodinamiği (SPH-Smoothed Particle Hydrodynamics) (Monaghan,1994; Liu ve Liu, 2003) gibi Lagrange bakış açısına sahip akışkanın parçacıklarla temsil edildiği yöntemlerde, su yüzeyinin belirlenmesi için ayrı bir yaklaşım kullanmaya gerek olmamaktadır. Günümüzde serbest yüzeyli akımların modellenmesinde farklı yöntemler kullanılmakla birlikte bunlar içerisinde en bilineni ve ticari paket programlarda dahil olmak üzere en yaygın olarak kullanılanı akışkan hacmi (VOF) yöntemidir.

Gerçekte baraj yıkılması akımları oldukça düzensiz bir topografyada yayıldığından, akım güzergahındaki daralmalar, taban eğimindeki değişimler, engeller hidrolik sıçramalara, yansımalara ve akım davranışında ani değişimlere neden olur. Bu da akımın oldukça yüksek ivme bileşenlerine sahip olduğu anlamına gelir. Başka bir ifade ile karmaşık arazi koşullarında yayılan baraj yıkılması akımları oldukça türbülanslı bir yapıya sahiptir. Bu nedenle baraj yıkılması akımlarının modellenmesi sırasında türbülans etkilerinin dikkate alınması gereklidir.

Türbülanslı akışların sayısal olarak çözülmesindeki en büyük sorun yüksek bilgisayar kapasitesi ve gücüne ihtiyaç duyulmasıdır. Türbülansın çok küçük ölçek ve zaman aralığında meydana gelmesi nedeniyle, zamana bağlı Navier-Stokes denklemlerinin sayısal olarak tam çözümünün gerçekleştirildiği DNS (Direkt Nümerik Simülasyon) yönteminde çok küçük ağ aralıkları kullanılması gerektiğinden günümüzde dahi bu yöntem ancak çok basit geometri ve akış tipleri için, düşük Reynolds sayılarında uygulanabilmektedir. LES (Büyük Girdap Simülasyonu-Large Eddy Simulation) bir model olarak bazı problemler için DNS'ye yakın sonuçlar verse de, uygulanması için yine yüksek bilgisayar donanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla nispeten daha ekonomik bir çözüm olan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) temelli türbülans modelleri günümüzde hala geçerliliklerini

sürdürmektedirler. Bu nedenle daha hızlı çözüm elde edebilmek için Navier-Stokes denklemleri yerine akıma ait hız, basınç gibi özelliklerin zamansal ortalama değerleri ile ifade edildiği Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Denklemlerin çözümünde ortalama akım üzerindeki türbülans çalkantılarının etkileri farklı türbülans modelleri aracılığıyla hesaplanabilmektedir. Bu modellerden $k-\varepsilon$ en çok bilinen ve kullanılan, doğruluğu kanıtlanmış türbülans modellerinden biridir (Wilcox, 2000).

Türbülans etkilerine ilave olarak, baraj yıkılması analizinde hesaplama yapılacak alanın ve zamanın büyük ölçekte olması RANS denklemlerinin çözümü için bilgisayar gücü gereksinimini oldukça arttırmaktadır. Özellikle, üç boyutlu problemler günümüzdeki hızlı ve bellek kapasitesi yüksek bilgisayarlar yardımıyla yeni yeni çözülebilmektedir. Tek bilgisayarın yeterli olmadığı durumlarda birden fazla bilgisayarın paralel çalıştırıldığı hızlı sistemler kullanılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bir takım basitleştirmelerin yapılmasıyla elde edilen sığ su denklemleri (SWE) bir takım eksiklikleri olmasına rağmen özellikle büyük ölçekli problemlerin çözüm sürelerinin kısa olmasından dolayı günümüzde halen en yaygın kullanılan denklemlerdir (Quecedo ve ark., 2005).

Bu bölümde öncelikle Navier-Stokes ve RANS denklemleri anlatılacaktır. Daha sonra Saint-Venant denklemleri süreklilik ve momentum korunumu yasalarının bir kontrol hacmine uygulanmasıyla elde edilecektir. Baraj yıkılması problemin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla yatay dikdörtgen bir kanalda, kuru ve ıslak mansap koşulları için bilinen analitik çözümler, karakteristikler yöntemi kullanılarak elde edilecektir.

3.2. Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri süreklilik ve hareket denklemlerinden oluşan akışkanlar mekaniğinin temel denklemleridir. Newton'un ikinci kanununun sonsuz küçük bir kontrol hacmine uygulanmasıyla Newtonien bir akışkan için aşağıdaki Navier-Stokes denklemleri türetilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} \quad (3.2)$$

Burada $\mathbf{V}$ hız vektörünü, ρ yoğunluğu, τ gerilme tansörünü, $\mathbf{g}$ kütle sel kuvvetleri (yerçekimi), t zamanı, p basıncı göstermektedir. Denklem (3.1) kütle nin korunumunu, denklem (3.2) momentumun korunumunu temsil etmektedir. Su sıkışmaz kabul edildiğinden yoğunluk sabittir. Bu nedenle

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3.3)$$

Böylelikle süreklilik ve momentum denklemi aşağıdaki forma indirgenir.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemler ayrıca tansör formatında aşağıdaki gibi ifade edilebilirler:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.6)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.7)$$

Burada üç boyutlu akımlar için $i,j=1,2,3$ değerlerini alır ve sırasıyla x,y,z doğrultularındaki akım bileşenlerini temsil etmektedir. Yapılan çalışmada akışkan

sıkışmaz ve Newtonien kabul edildiğinden gerilme tansörü, dinamik viskozite katsayısı μ ve şekil değiştirme hızları ile orantılıdır:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.8)$$

Bu ifade denklem (3.7)'de yerine konulursa momentum denklemi aşağıdaki biçimi alır.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \quad (3.9)$$

Süreklilik ve momentum denklemleri kartezyen koordinatlarda daha açık biçimde yazılırsa Navier-Stokes denklemleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.10)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.13)$$

Bu ifadelerde etki eden tek kütleli kuvvet yerçekimi kuvvetidir. Dolayısıyla ifadelerdeki g_x ve g_y terimleri sıfıra eşittir.

Bu denklem sistemine bakıldığında bilinmeyenler basınç p ve hız vektörünün üç bileşeni u, v, w olmak üzere dört adettir. Bununla birlikte sistemde bir süreklilik ve üç adet lineer momentum denklemi olmak üzere toplam dört adet denklem bulunmaktadır. Görüldüğü gibi sistemin bilinmeyen sayısı denklem sayısına eşittir. Buna karşın sıkışmayan, sabit viskoziteli akışkanlar için geçerli olan bu denklem sisteminin genel bir çözümü yoktur. Ancak uygun başlangıç ve sınır şartları altında sayısal yöntemler ile çözülebilirler. Bunun için yoğunluk, viskozite ve kütleli kuvvetlerin (yerçekimi) bilinmesi gereklidir.

Sonuç olarak denklem (3.11), (3.12) ve (3.13)'ten oluşan hareket denklemleri aşağıdaki gibi kapalı formda da yazılabilir.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'ün fiziksel anlamı: Yoğunluk $\times$ ivme = birim hacim başına basınç kuvveti + birim hacim başına viskoz kuvvet + birim hacim başına kütleli (yerçekimi) kuvveti şeklindedir.

Navier-Stokes denklemlerinde viskozite içeren terimler ihmal edildiğinde, aşağıdaki Euler denklemleri elde edilir.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \rho g \quad (3.15)$$

Bu denklemlerde viskozite terimlerinin bulunmamasının yanında sınır koşulları da farklılıklar gösterir. Viskoz bir akışkanın katı bir sınırdaki hız vektörü sıfırdır. Bu da akışkanın katı madde sınırını ne geçebileceği ne de bu sınır üzerinde kayabileceği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte viskoz olmayan (inviscid) bir akışkan, katı madde sınırını geçememekte fakat bu sınır üzerinde kayabilmektedir.

3.3. Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) Denklemleri

Gerçek akışkanların hareketinde, akımın durumu Reynolds sayısına bağlı olarak laminar veya türbülanslı olabilmektedir.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3.16)$$

Burada “V” ortalama hızı, “L” ise karakteristik boyutu göstermektedir. Reynolds sayısının büyümesi akımın çalkantıya karşı duyarlılığını gösterir ve açık kanal akımlarında laminar akımdan türbülanslı akıma geçiş için kritik Reynolds sayısı 500 olmaktadır. Birçok mühendislik problemi gibi baraj yıkılması akımı da oldukça türbülanslı bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte çok karmaşık olan türbülanslı akımın yapısı matematiksel olarak tam çözülememiştir.

Türbülanslı akım alanında herhangi bir noktada hız ve basınç gibi akım büyüklüklerinin şiddeti ve yönü zamana bağlı olarak gelişigüzel değişebilmektedir. Buna göre hız ve basıncın herhangi bir andaki değeri ortalama ve anlık sapmaların toplamı şeklinde yazılabilir:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w', \quad p = \bar{p} + p' \quad (3.17)$$

Burada $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$, $\bar{p}$ hız ve basınca ait ortalama değerleri, u' , v' , w' ve p' ise bunlara ait anlık sapmaları temsil etmektedir.

Denklem (3.17)'de verilen u , v , w değerleri denklem (3.10)'da verilen süreklilik denkleminde yerine yazılacak olursa;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} + u') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} + w') = 0 \quad (3.18)$$

bir Δt intervali için süreklilik denkleminin ortalaması alınır;

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.19)$$

ifadesi bulunur. Denklem (3.19)'daki ifade (3.18)'den çıkarılırsa;

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (3.20)$$

denklemini elde edilir ki ortalama hız bileşenleri ve türbülans hız sapınçlarının aynı süreklilik denklemini sağladığı görülmektedir.

Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri

Navier-Stokes denklemlerinin x bileşeni ele alınıp denklem (3.17)'deki ifadeler denklem (3.11)'de yerine koyulursa;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial y} + (\bar{w} + w') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{\partial(\bar{p} + p')}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (3.21)$$

formülü elde edilir. Denklem (3.21)'de her bir terimin zamana göre ortalaması alınırsa $u'=0$ olur. Böylece x doğrultusu için;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (3.22)$$

denklemini elde edilir. Çalkantı ifadeleri eşitliğin sağ tarafına alınır

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (3.23)
\end{aligned}$$

(3.23) denklemi y ve z doğrultuları içinde benzer şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (3.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (3.25)
\end{aligned}$$

Elde edilen bu RANS denklemleri tansör notasyonu ile aşağıdaki biçimde gösterilebilir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.26)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{\partial (\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.27)$$

(3.27) denklemi, denklem (3.9)'da verilen Navier-Stokes denklemleri ile karşılaştırıldığında ilave olarak $\partial(\overline{\rho u_i' u_j'})/\partial x_j$ ifadesini içerdiği görülmektedir. Bu ifade türbülansın dolaylı oluşan çalkantı (türbülans) gerilmelerini ya da literatürdeki

ismiyle Reynolds gerilmelerini temsil etmektedir. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri olarak bilinen bu denklemlerde akım büyüklükleri (hız, basınç) ortalama değerler ile ifade edilmektedir.

Laminer akım durumunda Navier-Stokes denklemlerinde dört bilinmeyen ve dört denklem olmasına karşılık türbülanslı akım denklemlerinde (RANS) u', v', w' terimlerinin eklenmesiyle bilinmeyen sayısının artması yeni denklemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yeni denklemler türbülans modelleriyle elde edilir. Denklem sayısının bilinmeyen sayısına eşitlenmesine kapatma (closure) işlemi denilmektedir. Kapatma işleminin nasıl yapılacağı konusunda henüz bir fikir birliği oluşmadığından değişik türbülans modelleri kullanılmaktadır.

Bu denklemlerdeki türbülans gerilme terimleri, μ ile ölçülen moleküler viskoziteye benzer şekilde μ_t katsayısı ile ölçülen ve türbülans (eddy) viskozitesi olarak adlandırılan yeni bir viskoziteden kaynaklanmış gibi düşünülebilirler. Bu amaçla $\tau'_{ij} = -\rho(\overline{u_i' u_j'})$ türbülans gerilmelerini (Reynolds gerilmeleri) ve denklem (3.8)'deki τ_{ij} laminer viskozite gerilmelerini göstermek üzere, denklem (3.27) gerilmeler cinsinden yeniden yazılacak olursa

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.28)$$

eşitliği elde edilir. Gerilme ifadeleri $\partial/\partial x_i$ parantezine alınırsa

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij} + \tau'_{ij})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.29)$$

denklemini ortaya çıkar. Görüldüğü gibi RANS denklemlerinde toplam gerilme laminer ve türbülans gerilmelerinin toplamı şeklinde yazılabilir ($\tau_T = \tau + \tau'$). Genellikle ele alınan türbülans modellerinde Reynolds gerilmeleri, τ'_{ij} , için denklemlerdeki diğer terimlerin bir fonksiyonu olarak ele alınan ampirik ifadeler

kullanılmaktadır. Bu modellerden Boussinesq hipotezi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu hipoteze göre Reynolds gerilmeleri viskoz gerilmelere benzer biçimde ortalama hız gradyanlarıyla ilişkilendirilir:

$$\tau'_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.30)$$

burada μ_t türbülans viskozitesini göstermektedir ve dinamik viskozite μ gibi akışkanın fiziksel bir özelliği olmayıp, akımdaki hız çalkantılarına bağlıdır. Başka bir ifade ile aynı akışkan için farklı akım koşullarında değişik değerler almaktadır. Dolayısıyla zamana bağlı RANS denklemlerinin çözülebilmesi için μ_t türbülans viskozitesi değerinin hesaplanması gereklidir. Bu da farklı türbülans modelleri yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

Türbülanslı akışlar, kontrol hacmindeki cidarların (duvarların) varlığından önemli ölçüde etkilenirler. Bir cidar bölgesinde (viskoz alt tabaka) toplam kayma gerilmesi neredeyse sabittir ve toplam kayma gerilmesi cidar kayma gerilmesine eşittir. Toplam kayma gerilmesi, τ_T , sadece cidar yakınında ince bir bölgede sabittir ve cıdardan uzaklaştıkça azalır. Cidar üzerinde ortalama hız bileşenleri ve bunlara ait çalkantı hızları sıfır değerini alırlar. Ayrıca çalkantı hızları cidar yakınında da son derece küçüktürler. Bu nedenle cidara yaklaştıkça türbülans kayma gerilmesi ortadan kaybolur ve viskoz kayma gerilmesi cidar kayma gerilmesine eşit olur. Bu bölgede akım, laminar akım karakterini gösterdiğinden, laminar ya da viskoz alt tabaka olarak adlandırılır. Akım, bu tabakanın üzerinde türbülans karakterini gösterir ve çalkantılar görülür. Laminer viskozite ile birlikte türbülans viskozitesi de etkisini gösterir ve viskoz alt tabakadan uzaklaştıkça etkisini artırır. Dolayısıyla cıdardan uzaklaştıkça viskoz kayma gerilmesi düşerken türbülans kayma gerilmesi yükselir. Belli bir yükseklikten sonra viskoz gerilmesi türbülans gerilmesi ile karşılaştırıldığında çok küçük bir değerde kalacağı için ihmal edilebilir. Bu nedenle cidara yakın bölgelerin sayısal olarak yeterli hassasiyette çözümlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun için bu bölgede ağ aralıklarının oldukça sık seçilmesi gereklidir fakat özellikle üç

boyutlu ve büyük ölçekli problemlerde bu durum bilgisayar gücüne duyulan gereksinimi arttırır. Diğer bir alternatif de cidar bölgesindeki akım için hız dağılımı bilinen bir duvar fonksiyonu (wall function) kullanmaktır.

Sonuç olarak türbülanslı akımda hareket denklemleri, sınır tabakası içinde veya dışında, denklem sayısından daha fazla sayıda bilinmeyen (Reynolds gerilmeleri) içerdiği için denklemlerin çözümü ancak Reynolds gerilmelerinin bir başka yoldan bulunup bu denklemlere yerleştirilmeleri ile mümkündür. Reynolds gerilmelerinin elde edilmesi için Boussinesq, Prandtl ve Von Karman'ın geliştirmiş olduğu ve çok az hesaplama gerektiren basit ampirik kanunların yanında, sayısal yöntemler yardımıyla günümüzde daha karmaşık türbülans modelleri kullanılmaktadır (Örs, 1994).

Yapılan çalışmada, baraj yıkılması akımlarının 2 ve 3 boyutlu modellemesi için RANS denklemleri kullanılmıştır. Kapatma işlemi amacıyla yaygın bir kullanıma sahip olan ve doğruluğu denenmiş modellerden biri olan $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır (Shigematsu ve ark., 2004). Bu modelin detayları Bölüm 3.7.1'de verilecektir.

3.4. Saint-Venant Denklemleri (Sığ Su Denklemleri)

Baraj yıkılması akımlarının üç boyutlu RANS denklemleri ile çözümü mümkün olmakla birlikte problemin büyük ölçekli olmasından dolayı bilgisayar yardımıyla çözümü uzun zaman almakta ve pratik olmamaktadır. Bu nedenle akım derinliğinin uzunluğuna göre oldukça küçük olduğu ve sığ olarak adlandırılan problemlerde bazı basitleştirmeler yaparak elde edilen denklemleri çözmek oldukça kullanışlı olmaktadır. Sığ olarak tanımlanabilecek okyanuslardaki gelgitler, sığ sahillerde dalga kırılması, akarsulardaki taşkınlar, kabarma dalgaları ve baraj yıkılması gibi yerçekimi etkisi altında hareket eden değişken açık kanal akımı problemlerinin çözümünde sığ su veya Saint-Venant denklemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Sığ su denklemleri Navier-Stokes denklemlerinin indirgenmesiyle ya da kütle ve momentumun korunumu ifadelerinin bir kontrol hacmine uygulanmasıyla elde edilebilmektedir. Denklemlerde değişkenler derinlik ortalamalı

ifade edildiğinden bilinmeyenler yükseklik ve hızdır. Dolayısıyla sığ su denklemlerinin sayısal çözümü ile su seviyeleri doğrudan hesaplanabilmektedir ve RANS denklemlerinde olduğu gibi serbest yüzeyin belirlenmesi için genellikle ayrı bir yöntem gereklidir.

Denklemlerin türetilmesi sırasında aşağıda sıralanan temel kabuller yapılmaktadır:

- Düşey yöndeki ivmeler ihmal edilir. Dolayısıyla tüm noktalarda hidrostatik basınç etkilidir, akım çizgileri paraleldir.
- Yatay hız bileşeni üniformdur, hız sadece akarsuyun boyuna doğrultusunda değişir.
- Akarsu yatağının boyuna eksen düz bir çizgidir.
- Akarsu yatağının taban eğimi küçüktür. Dolayısıyla su derinliği h , düşey eksen üzerinde ölçülebilir.
- Akarsu yatağı sabittir. Oyulma ve yığılma meydana gelmez.
- Serbest yüzeyli üniform akım için kullanılan sürtünme katsayısı, değişken akımlara da uygulanabilir. Manning denklemi ile sürtünme etkileri tanımlanabilir.
- Akım sıkıştırılmaz olup, her noktasında yoğunluğu sabittir.

Yapılan bu kabuller doğadaki akım davranışı düşünüldüğünde çok gerçekçi değildir. Bununla birlikte çok hassas olmasa da sığ su denklemleri kullanılarak yapılan modellemelerde hızlı ve tatmin edici sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak incelenen probleme göre bu kabullerin ihmal edilip edilemeyeceğinin bilinmesi de önem taşımaktadır. Örneğin, hidrolik sıçramaların olduğu bir bölgede, düşey ivme bileşenleri ihmal edilemeyeceğinden bu denklemleri kullanarak gerçekleştirilen bir çözüm sağlıklı olmayacaktır. Akım çizgileri aşırı eğriliklere sahipse başka bir ifade ile düşey ivmeden dolayı basınç dağılımı hidrostatik değilse bu durumda akımın matematiksel çözümünde diğer bir alternatif olarak Boussinesq denklemleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, düşey akım hızının derinlik boyunca kanal tabanında sıfırdan başlayarak su yüzeyinde maksimum değeri alacak şekilde değiştiği kabul edilmektedir (Chaudhry, 1993). Sığ su denklemleri yavaş değişen akımları

Boussinesq denklemleri ise hızlı değişen akımları daha iyi temsil etmektedir. Baraj yıkılması akımı, hızlı değişen değişken akım problemi olmasına rağmen sadece yıkılmanın başlangıç aşamasında hidrostatik olmayan basınç dağılımı meydana geldiği fakat sonraki zamanlarda bu dağılımın hidrostatik olduğu kabul edilmektedir (Mohapatra ve ark., 1999; Quecedo ve ark., 2005). Bu nedenle baraj yıkılması problemlerinin Saint-Venant denklemlerine dayanan sayısal çözümlerinde hızlı ve yeterli hassasiyette sonuçlar elde edilebilmesinden dolayı günümüzde halen oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bundan sonraki bölümde, öncelikle genel olması bakımından, düzensiz enkesite sahip bir kanal için Saint-Venant denklemleri elde edilecek ve literatürde sıkça karşılaşılan formları da gösterilecektir. Genel denklemler daha sonra kolaylıkla basit dikdörtgen bir kanala uygun hale dönüştürülebilmekte veya iki boyutlu hale genişletilebilmektedir.

3.4.1. Saint-Venant Denklemlerinin Elde Edilmesi

Akışkanlar mekaniğindeki temel kanunların bir kontrol hacmine uygulanması ile ortaya çıkan denklemler integral veya diferansiyel formda olabilir. Seçilen sonlu büyüklükteki bir kontrol hacmine uygulanması sonucu elde edilen integral formdaki denklemlerde akım özelliklerinin bu hacimdeki noktasal değişimleri hakkında bilgi vermemektedir. Akım özellikleri hakkında daha detaylı bilgi edinilmek isteniyorsa temel kanunların uygun bir koordinat sistemindeki diferansiyel boyutlu bir kontrol hacmine (KH) uygulanması gereklidir. Bu şekilde akımı idare eden denklemler diferansiyel denklem formunda elde edilir (KIRKGÖZ ve ark., 2003).

Akımın herhangi bir N sistem özelliği için (kütle, momentum, enerji gibi) gerekli olan integral formdaki denklemler dönüşüm (transformation) denklemi yardımıyla bulunabilir.

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{KH} \eta \rho dV + \oint_{KY} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (3.31)$$

bu denklem, akımın N sistem özelliğinin birim zamandaki değişiminin, kontrol yüzeyinden (K.Y.) birim zamanda net olarak çıkan N ile kontrol hacmindeki (K.H.) N'nin birim zamandaki değişiminin toplamına eşit olduğunu ifade etmektedir.

Denklemde N; kütle, momentum, enerji gibi akımın herhangi bir sistem özelliğini, η ise bu özelliğin birim kütleye gelen değerini yani sistemin yoğunluk özelliğini göstermektedir (KIRKGÖZ ve ark., 2003).

3.4.1.1. Süreklilik Denklemi

Kütlenin korunumu, bir sistem içindeki m kütlelerinin zamanla değişmediğini ifade etmektedir.

$$m = \int_S dm = \int_S \rho dV = \text{sabit} \quad (3.32)$$

veya birim zamandaki değişimi:

$$\frac{Dm}{Dt} = 0 \quad (3.33)$$

olmaktadır. Bu durumda sistem özelliği $N=m$ 'dir ve yoğunluk özelliği $\eta=N/m$ olduğunda $\eta=1$ 'dir. Burada D/Dt maddesel (material) türevi göstermektedir.

Kütlenin korunumu eşitliğini elde etmek için, denklem (3.31)'de verilen dönüşüm denkleminde $N=m$ ve $\eta=1$ değerleri yerine koyulduğunda, değişken, sıkışan akımlar için integral formdaki süreklilik denklemi elde edilir:

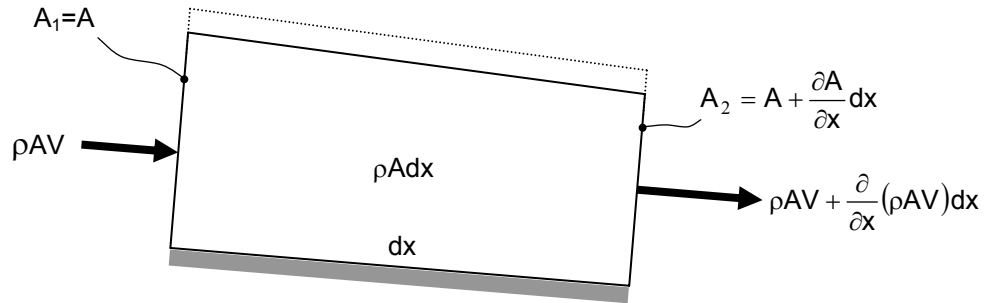
$$\frac{Dm}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{KH} \rho dV + \iint_{KY} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.34)$$

t anında KH
kütlesinin birim
zamandaki
değişimi

t anında KY den
birim zamanda
çıkan net kütle

bu denkleme göre; bir t anındaki sistem kütlesinin birim zamandaki değişimi, kontrol yüzeyinden net olarak çıkan kütle ile kontrol hacmi kütlesinin birim zamandaki değişimi toplamına eşit olmaktadır.

Süreklilik denklemini diferansiyel formda elde etmek için integral formdaki denklem Şekil 3.1'deki gibi bir akım alanı içerisindeki diferansiyel bir kontrol hacmine uygulanabilir. Serbest yüzeyli değişken akımlarda, K.H.'ni belirleyen anlık akım çizgileri zamanla yer değiştirebilir. Bu nedenle kesit alanları da zamanla değişebilmektedir.



Şekil 3.1. Kütlenin korunumu için kontrol hacmi

Bu durumda kontrol yüzeyinden çıkan net kütle

$$\iint_{KY} \rho u dA = \iint_{A_2} \rho u dA - \iint_{A_1} \rho u dA \quad (3.35)$$

$$= \left(\rho AV + \frac{\partial}{\partial x} (\rho AV) dx \right) - (\rho AV) \quad (3.36)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} (\rho AV) dx \quad (3.37)$$

Burada u yerel hızın x bileşeni, V ise ortalama akım hızıdır. Kontrol hacim kütlesinin birim zamandaki değişimi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{KH} \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} (\rho A dx) \quad (3.38)$$

olmaktadır. Denklem (3.37) ve (3.38)'deki değerler (3.34) denkleminde yerine koyulursa

$$\frac{Dm}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho A dx) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho Q dx) = 0 \quad (3.39)$$

ifadesi elde edilir. Akım sıkışmayan kabul edildiğinden ρ sabittir. Bu denklem ρdx 'e bölünürse aşağıdaki süreklilik (kütle korunum) denklemi bulunur:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.40)$$

Kısmi türevleri herhangi bir çarpım katsayısı içermeyen bu ifade genel değişkenlerle yazıldığı için korunumlu (konservatif) biçim olarak adlandırılır. Süreklilik denkleminin korunumsuz (nonconservative) biçimi $dQ = VdA + AdV$ olduğu düşünülerek (3.40) denkleminin genişletilmesiyle elde edilebilir:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.41)$$

Enkesit alanındaki değişim $dA = Bdh$ şeklinde alınarak denklem biraz daha genişletilirse süreklilik denkleminin diğer bir korunumsuz biçimi elde edilebilir:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A}{B} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.42)$$

Burada B serbest yüzeydeki enkesit genişliği ve dh su derinliği değişimidir. Dikdörtgen bir kanal için süreklilik denklemi ise $A/B=h$ olduğundan aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.43)$$

3.4.1.2. Momentum Denklemi

Momentum denklemi bir sistem içindeki x bileşeni için Newton'un ikinci kanunun yazılmasıyla bulunabilir.

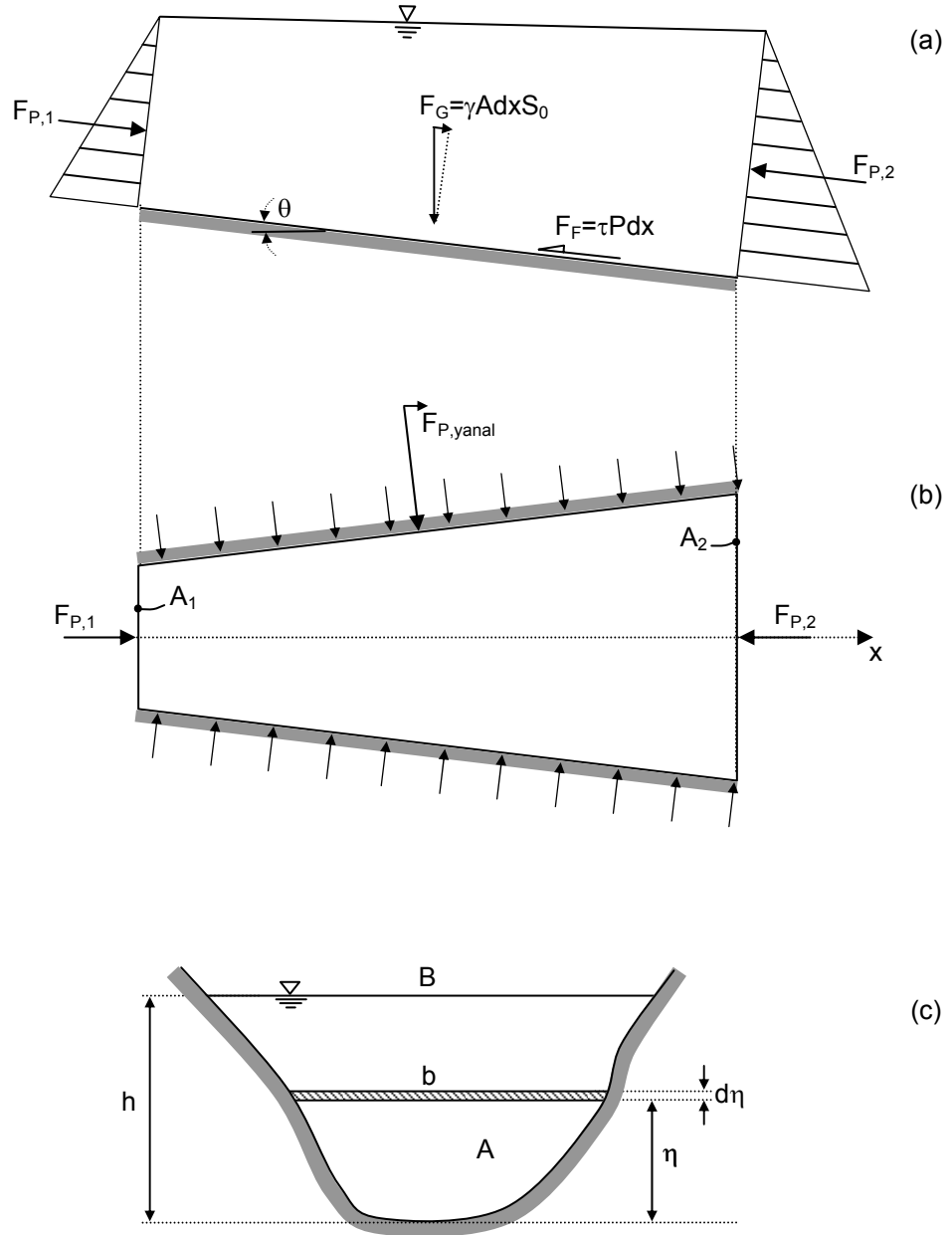
$$\Sigma F_x = \frac{D(mV_x)}{Dt} = \frac{D(\mu u)}{Dt} \quad (3.44)$$

Burada u, hızın x doğrultusundaki bileşenidir. Bu ifadeden anlaşılacağı gibi sistem momentumunun bir t anında birim zamandaki değişiminin dış kuvvetlerin bileşkesine eşit olduğu göz önünde tutulur. Sisteme etki eden dış kuvvetler enkesitlere etkiyen basınç kuvvetleri, eğer x doğrultusunda kanal genişliği değişiyorsa kanal yan duvarları üzerindeki basınç kuvveti bileşenleri, kontrol hacminin ağırlığı (yerçekimi kuvveti) ve akışkan hareketine zıt yönde sürtünme kuvvetidir (Şekil 3.2).

Kontrol hacim yaklaşımıyla elde edilen ve (3.31) denklemi ile verilen dönüşüm denklemi sistem momentumunun x bileşeni için uygulanırsa $N=\mu u$ ve $\eta=N/m=\mu u/m=u$ olur ve momentumun birim zamandaki değişimi için elde edilen denklem

$$\frac{D(\mu u)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{KH} \rho u dV + \iint_{KH} \rho u^2 dA \quad (3.45)$$

t anında KH deki momentumun birim zamandaki değişimi	t anında KY den birim zamanda net olarak çıkan momentum
--	--



Şekil 3.2. Momentumun korunumu için bir sistem üzerine etkiyen kuvvetler a) boy kesit b) plan c) enkesit

haline gelir. Aynı ifade biraz daha açılırsa ve Şekil 3.1'deki gibi sonsuz küçük bir dx uzunluğuna sahip bir kontrol hacmi düşünülürse $dV = dx dA$ yazılabilir.

$$\frac{D(\mu)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{KH} \rho dV + \iint_{A2} \rho u^2 dA - \iint_{A1} \rho u^2 dA \quad (3.46)$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho dx \iint_A u dA \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\iint_A \rho u^2 dA \right] dx \quad (3.47)$$

$$= \rho dx \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\beta V^2 A)}{\partial x} \right] \quad (3.48)$$

Burada V boyuna doğrultudaki ortalama hız, β Boussinesq katsayısıdır ve hız dağılımının üniform olmamasından dolayıdır ve aşağıdaki ilişki ile belirlenir.

$$\iint_A \rho u^2 dA = \beta V^2 A = \beta \frac{Q^2}{A} \quad (3.49)$$

Enkesitteki hız dağılımının üniform olduğu kabul edilirse $\beta = 1$ olarak alınır ve (3.48) denklemi aşağıdaki hali alır.

$$\frac{D(\mu)}{Dt} = \rho dx \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (V^2 A)}{\partial x} \right] \quad (3.50)$$

Diğer yandan sisteme etkiyen dış kuvvetler sırasıyla:

- Sistem en genel hal düşünüldüğü için enkesit düzensiz geometriye sahiptir. Bu nedenle herhangi bir enkesitteki basınç kuvveti

$$F_p = \rho g I_1 \quad (3.51)$$

ifadesi ile bulunabilir. Burada I_1 enkesitin birinci momenti olarak adlandırılır ve aşağıdaki ifade ile bulunur (Şekil 3.2):

$$I_1 = \int_0^h (h - \eta)b(\eta)d\eta \quad (3.52)$$

Bu durumda sistemin her iki kenarındaki (1 ve 2 enkesiti) hidrostatik basınç kuvvetleri arasındaki fark

$$F_p = -\Delta(\rho g I_1) = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho g I_1)dx \quad (3.53)$$

- Eğer kanal genişliği mesafeyle birlikte değişiyorsa sağ ve sol kenar duvarlardaki basınç kuvveti bileşeni ortaya çıkar:

$$F_{p,yanal} = \rho g I_2 dx \quad (3.54)$$

Burada I_2 enkesit genişliğindeki değişimi ifade eder ve enkesit düzlemi üzerinde yanal yüzeyin izdüşümü alınarak hesaplanır:

$$I_2 = \int_0^h (z - \eta) \left(\frac{\partial b(\eta)}{\partial x} dx \right) d\eta \quad (3.55)$$

- Yerçekimi kuvvetlerinin boyuna (akım doğrultusundaki) bileşeni

$$F_G = \rho g A dx S_0 \quad (3.56)$$

burada $S_0 = \partial z / \partial x$ 'dir ve kanal yatağı (tabanı) eğimini göstermektedir.

- Sürtünme kuvvetleri akıntıya karşı yönde etki eder

$$F_F = -\tau P dx \quad (3.57)$$

Burada P enkesite ait ıslak çevredir ve τ da bu çevre boyunca etki eden kayma gerilmesidir:

$$\tau = \gamma \frac{A}{P} S_f = \rho g R S_f \quad (3.58)$$

Bu ifadede $R = A/P$ hidrolik yarıçaptır ve sürtünme (enerji çizgisi) eğimi S_f Manning denklemi kullanılarak hesaplanabilir.

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (3.59)$$

böylece sürtünme kuvveti bileşeni

$$F_F = \rho g A S_f dx \quad (3.60)$$

olarak hesaplanabilir. Son olarak sisteme etki eden dış kuvvetleri gösteren (3.53), (3.54), (3.56) ve (3.60) denklemleri ile momentumun değişimi ve çıkan net momentum miktarlarını gösteren (3.50) denklemi birleştirilip ρdx ifadesine bölünmesiyle momentum denklemi (3.44) aşağıdaki genel hali alır:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V^2 A + g I_1) = g A (S_0 - S_f) + g I_2 \quad (3.61)$$

Leibnitz teoremi kullanılarak denklem (3.52)'deki I_1 integralinin yersel türevi alındığında I_1 ve I_2 arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir (Frazao, 2002; Chanson, 2004a).

$$\frac{\partial}{\partial x}(gI_1) = A \frac{\partial h}{\partial x} dx + gI_2 \quad (3.62)$$

Bu eşitlik denklem (3.61)'deki momentum denklemine yerleştirilirse aşağıda görülen daha bilinen formdaki momentum denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (3.63)$$

Bu denklem prizmatik ve prizmatik olmayan kanallarda geçerlidir. Kanalda bir genişleme veya daralma olması durumunda enkesit alanındaki değişimin neden olduğu basınç kuvveti katkısı, akım doğrultusundaki kanal kıyısındaki basınç kuvveti bileşeniyle tamamen dengelenir (Chanson, 2004a).

Süreklilik denkleminde olduğu gibi momentum denkleminin korunumsuz (nonconservative) bir formu (3.63) denkleminde $Q = VA$ dönüşümü yapılarak elde edilebilir.

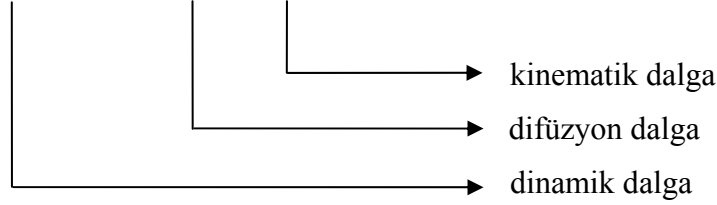
$$\frac{\partial(VA)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V^2 A) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (3.64)$$

Eşitliğin her iki tarafı A 'ya bölünür ve düzenlenirse

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{A} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial V}{\partial x} \right) = g(S_0 - S_f) \quad (3.65)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte (3.41) denklemine göre, süreklilik denklemini veren parantez içindeki ifade sıfıra eşittir. Böylelikle aşağıdaki korunumsuz momentum denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (3.66)$$



Denklem (3.66)'daki momentum denklemi terimlerinin fiziksel anlamı soldan başlayarak sırasıyla yersel ivme, konvektif ivme, basınç kuvveti ağırlık ve sürtünme kuvveti olarak ifade edilebilir.

Çalışılacak probleme ve sıg su denklemlerini çözmek için kullanılacak sayısal yönteme (numerical scheme) göre farklı denklem formları kullanılabilir. Denklemler yukarıda bahsedildiği gibi korunumlu veya korunumsuz formda olabilir. Ayrıca düzensiz şekle sahip doğal akarsular, prizmatik veya prizmatik olmayan kanallar için yazılan denklemler de enkesit geometrisine bağlı olarak farklı olmaktadır. Çizelge 3.1'de literatürde sıklıkla karşılaşılan Saint-Venant denklem formları verilmiştir.

Ayrıca korunumlu (konservatif) formdaki denklemler literatürde sıklıkla karşılaşılan aşağıdaki vektör formda da bir bütün olarak gösterilebilmektedir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U) \quad (3.67)$$

Düzensiz bir enkesite sahip kanal durumunda;

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, \quad F(U) = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q \\ \Sigma \end{pmatrix}, \quad S(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{pmatrix} \quad (3.68)$$

Dikdörtgen prizmatik bir kanal durumunda ise;

$$U = \begin{pmatrix} h \\ q \end{pmatrix}, \quad F(U) = \begin{pmatrix} q \\ \frac{q^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q \\ \sigma \end{pmatrix}, \quad S(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_0 - S_f) \end{pmatrix} \quad (3.69)$$

Çizelge 3.1. Farklı Formdaki Sığ Su Denklemleri (Frazao, 2002)

Formülasyon türü	Süreklilik ve momentum denklemleri
Düzensiz enkesitler üzerinde korunumlu formülasyon (A,Q) A = enkesit alanı Q = debi I_1 = enkesit birinci momenti I_2 = enkesit genişliğinin mesafeyle değişimi	$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(S_0 - S_f) + gI_2$
Düzensiz enkesitlerde korunumsuz formülasyon (A,V,Q) $V=Q/A$ enkesitteki ortalama hız	$\frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial V}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f)$
Dikdörtgen bir kanalda korunumsuz formülasyon (h,V)	$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f)$
Dikdörtgen prizmatik bir kanalda korunumlu formülasyon (h,q) $h=A/B$ =su derinliği $q=Q/B$ = birim genişlikteki debi	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} + g \frac{\partial h^2}{2} \right) = gh(S_0 - S_f)$

3.5. Karakteristikler Yöntemi

Süreklilik ve hareket denklemlerinden oluşan Saint-Venant denklemleri lineer olmayan hiperbolik kısmi diferansiyel denklem sistemi oluşturmaktadır. Bu denklemler, akım hızı V ile akım derinliği h , bağımlı değişkenlerinden oluşmaktadır ve x - t uzayında çözülmesi gereklidir. Ancak denklemlerdeki lineer olmayan terimlerden dolayı bu denklemlerin kapalı bir çözümü yoktur. Bu yüzden sayısal yöntemlerle çözülürler. Bununla birlikte bazı basit durumlardaki prizmatik kanallar için baraj yıkılması akımlarının analitik çözümleri elde edilebilmektedir ve bunun için karakteristikler yöntemi kullanılabilir.

Karakteristikler yöntemi kısmi diferansiyel denklem sistemlerini çözmek için kullanılan matematiksel bir yöntemdir. Bu yöntemle bir çift kısmi diferansiyel denklem takımı, x - t düzleminde iki karakteristik eğri ile temsil edilebilen dört adi diferansiyel denklem takımına dönüştürülür. Karakteristikler yöntemi geçmişte değişken akımların sayısal çözümünde kullanılmakla birlikte günümüzde yerini daha gelişmiş ve etkili sayısal yöntemlere bırakmıştır. Ancak bu yöntem ile bazı önemli problemlere ait analitik çözümlerin elde edilebilmesinin yanı sıra halen bazı açık sonlu fark yöntemlerinde sınır şartlarının da belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca karakteristik denklemler başlangıç ve sınır şartlarının gerekliliğini, çözümlerin ilerleyişini ve olayın fiziksel olarak daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Denklemlerin karakteristik formda elde edilmesi, karakteristik formun temel matematiksel anlamına dayanarak matris analizinin gerçekleştirilmesi veya süreklilik ve hareket denklemlerinin lineer kombinasyonunun alınarak terimlerin yeniden düzenlenmesi olmak üzere iki farklı yöntemle olabilir. Burada daha basit ve anlaşılabilir olmasından dolayı ikinci yaklaşım gösterilecektir.

Dikdörtgen enkesite sahip bir kanal için diferansiyel formda Saint-Venant denklemleri:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.70)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (3.71)$$

Öncelikle bu denklemler dalga yayılma hızı cinsinden yazılacaktır. Dikdörtgen bir kanalda dalga yayılma hızı $c = \sqrt{gh}$ tır. Burada g yerçekimi ivmesi, h su derinliğidir.

$$c = \sqrt{gh} \text{ ise } c^2 = gh \quad (3.72)$$

c dalga yayılma hızının karesinin zamana ve yere göre diferansiyeli sırasıyla:

$$\frac{\partial}{\partial t}(c^2) = 2c \frac{\partial c}{\partial t} \approx g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.73)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(c^2) = 2c \frac{\partial c}{\partial x} \approx g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.74)$$

ifadeleri şeklindedir. Denklem (3.73) ve (3.74)'den elde edilen $\partial h / \partial x$ ve $\partial h / \partial t$ ifadeleri Saint-Venant denklemlerinde yerine koyulursa

$$2 \frac{\partial c}{\partial t} + 2V \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.75)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + 2c \frac{\partial c}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (3.76)$$

(3.75) ve (3.76) denklemleri toplanırsa

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V + c) \frac{\partial V}{\partial x} + 2 \frac{\partial c}{\partial t} + 2(V + c) \frac{\partial c}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (3.77)$$

(3.75) denklemi (3.76) denkleminde çıkarılırsa

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V - c) \frac{\partial V}{\partial x} - 2 \frac{\partial c}{\partial t} - 2(V - c) \frac{\partial c}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (3.78)$$

(3.77) ve (3.78) denklemlerinde t türevleri ve x türevleri ortak paranteze alınırsa

$$\frac{\partial(V + 2c)}{\partial t} + (V + c) \frac{\partial(V + 2c)}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (3.79)$$

$$\frac{\partial(V - 2c)}{\partial t} + (V - c) \frac{\partial(V - 2c)}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (3.80)$$

(3.79) denklemi (V+2c) ve (3.80) denklemi (V-2c) parantezine alınırsa

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + (V + c) \frac{\partial}{\partial x} \right] (V + 2c) = g(S_0 - S_f) \quad (3.81)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + (V - c) \frac{\partial}{\partial x} \right] (V - 2c) = g(S_0 - S_f) \quad (3.82)$$

ifadeleri elde edilir. Bu aşamada toplam türev kuralını hatırlamak gereklidir. Eğer basit bir f fonksiyonu yere ve zamana bağlı olarak değişiyorsa toplam türev:

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.83)$$

şeklinde verilir. Denklem (3.81) ve (3.82) toplam türev kuralına göre $f = V \mp 2c$ ve $dx/dt = V \mp c$ olmak üzere yeniden düzenlenirse aşağıdaki dört denklem elde edilir:

$$\frac{D}{Dt} (V + 2c) = g(S_0 - S_f) \quad C1 \text{ (ileri karakteristikler) üzerinde} \quad (3.84)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + c \quad C1 \text{ (ileri karakteristikler)} \quad (3.85)$$

$$\frac{D}{Dt}(V - 2c) = g(S_0 - S_f) \quad C2 \text{ (geri karakteristikler) üzerinde} \quad (3.86)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - c \quad C2 \text{ (geri karakteristikler)} \quad (3.87)$$

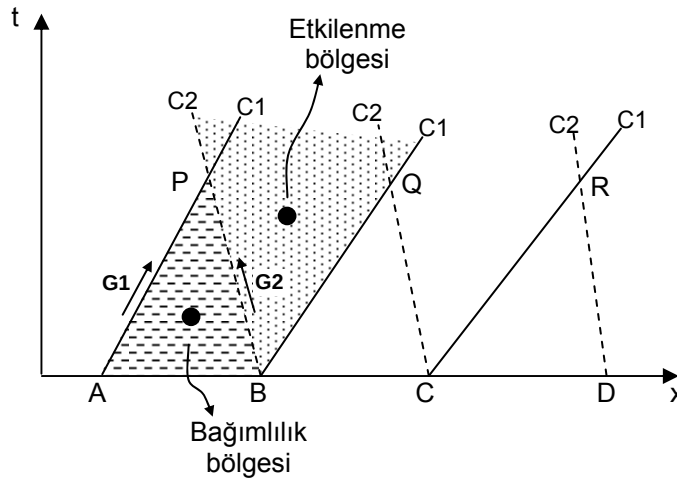
(3.84), (3.85), (3.86) ve (3.87) denklemlerinden oluşan dört denklemlilik bu sistem (3.70) ve (3.71) denklem sistemine eşdeğerdir. Bu denklemlerle, diferansiyel formdaki Saint-Venant denklemleri karakteristik denklem sistemiyle temsil edilmiş olmaktadır.

Şekil 3.3'e bakıldığında C1 ileri karakteristikleri üzerinde (denklem (3.85)) seyahat eden bir gözlemci için, denklem (3.84) her noktada geçerlidir. Benzer biçimde, C2 geri karakteristikleri üzerinde (denklem (3.87)) ilerleyen bir gözlemci için denklem (3.86) her yerde geçerlidir. Bu yörüngeler karakteristik doğrultular veya sisteme ait "karakteristikler" olarak adlandırılır. İleri karakteristik yörüngeler: C1, pozitif, C+; geri karakteristik yörüngeler: C2, negatif, C- olarak adlandırılır veya gösterilirler.

Şekil 3.3'de A noktasından harekete başlayan bir gözlemci (G1), C1 karakteristiğini izleyerek P noktasına ulaştığında burada B noktasından başlayan ve C2 karakteristiğini izleyen ikinci gözlemci (G2) ile karşılaşır. A ve B noktalarından yola çıktıklarında başlangıçta farklı hız ve derinlik değerine sahip olmalarına ve farklı güzergahları izlemelerine rağmen P noktasında her iki gözlemcide aynı hız ve derinlik değerini görmelidir. (3.85) ve (3.87) denklemlerinden belirlenen x_P noktası ve t_P anında P noktasındaki derinlik h_P ve hız V_P değerlerinin çözümü (3.84) ve (3.86) denklemlerinin bir arada çözümünden elde edilir. Aslında x-t düzlemi üzerinde sayısız karakteristik vardır. Bu işlem bilinen başlangıç değerlerine sahip x eksenini üzerinden harekete başlayan her bir C1 ve C2 karakteristiğinin ilk kez kesiştikleri tüm P noktalarındaki derinlik ve hız değerlerini belirlemek için tekrarlanabilir. Buradan elde edilen sonuçlar bir sonraki zaman adımındaki başlangıç

koşullarını oluştururlar. Bu işleme x-t düzlemi üzerinde çözümü istenen tüm noktalardaki derinlik ve hızlar belirleninceye kadar devam edilir. Çözümün tamamlanabilmesi için ayrıca sınır koşullarının bilinmesi gereklidir.

Şekil 3.3’de P noktasındaki bir çözüm A ve B aralığındaki başlangıç koşullarına bağlıdır. Bu nedenle ABP bölgesi bağımlılık bölgesi (domain of dependence) olarak adlandırılır. Bunun yanında x ekseninde bir tek B noktası BPQ bölgesini etkileyen başlangıç koşullarına sahiptir. B noktasından başlayan bir rahatsızlık C1 ve C2 karakteristikleri boyunca yayılır ve BPQ bölgesindeki akım koşullarını etkiler. Bu bölge B noktasındaki rahatsızlığın “etki bölgesi” (zone of influence) olarak adlandırılır.



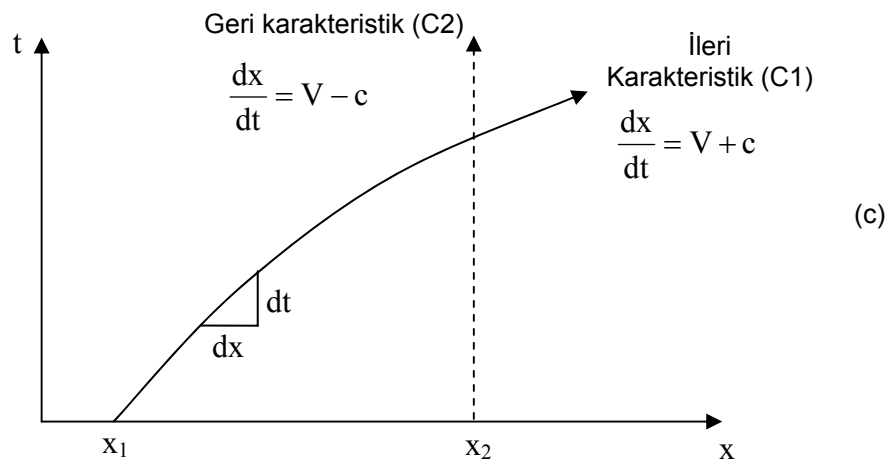
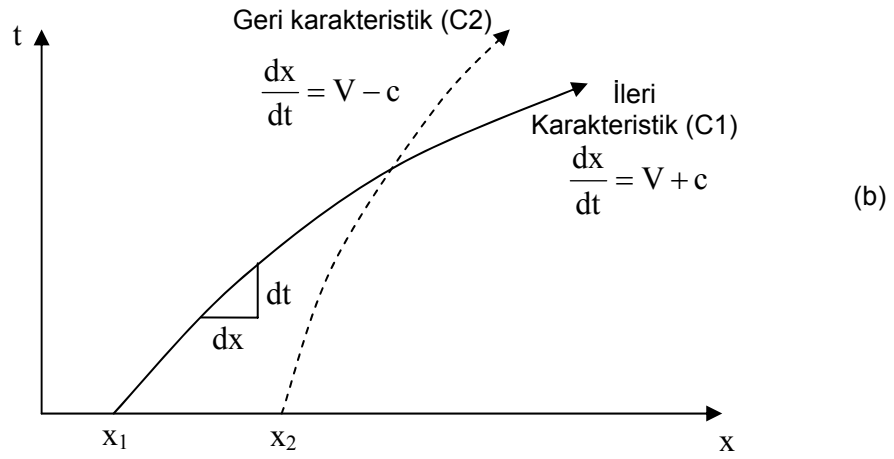
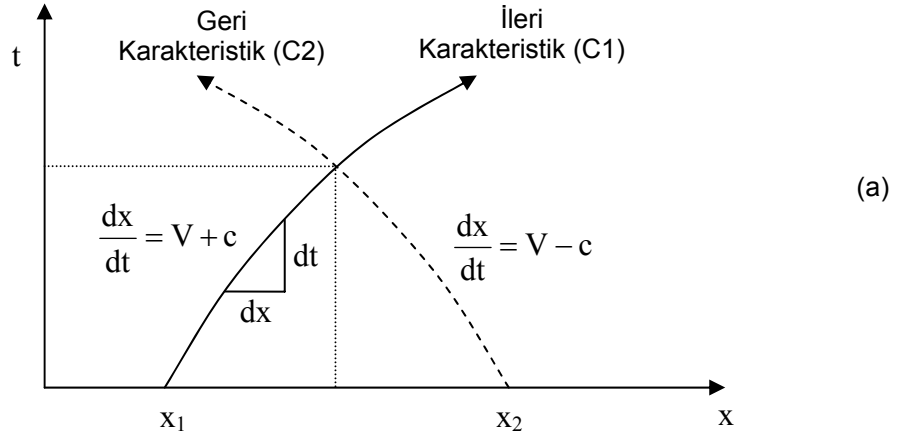
Şekil 3.3. x-t düzleminde karakteristikler tarafından belirlenen etkilenme ve bağımlılık bölgeleri (Sturm, 2001)

Karakteristikler, V akım hızına sahip bir kanalda küçük bir rahatsızlık sonucu oluşan dalganın $V \mp c$ hızlarıyla yayılan izleridir. Bu izler akım rejiminden etkilenirler. Akımın rejimini Froude sayısı belirler ve akım hızının dalga yayılma hızına oranı ile aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} = \frac{V}{c} = \frac{\text{Akım hızı}}{\text{Sığ su dalgası yayılma hızı}} \quad (3.88)$$

İleri (C1) ve geri (C2) karakteristikleri (x,t) düzleminde sırasıyla kritik altı, kritik üstü ve kritik akım için Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Kritik altı akım $Fr < 1$ şeklinde tanımlanır. Dolayısıyla $V < c$ olduğundan C1 ve C2 karakteristiği için dx/dt değeri sırasıyla pozitif ve negatif olacaktır. Kritik üstü akımda $Fr > 1$ olduğundan $V > c$ 'dir. Sonuç olarak her iki karakteristik için dx/dt değeri pozitiftir. Kritik akımda ise $Fr = 1$ değerini alır ve $V = c$ dir. Dolayısıyla C1 karakteristiği pozitif değer alırken C2 karakteristiği sıfır değerini alır.

Şekil 3.4a 'da görüldüğü gibi kritik altı akım için A ve B noktası sırasıyla P noktasının memba ve mansabındadır. Bu durumda P noktasındaki akım koşulları memba ve mansap akım koşullarının her ikisinden etkilenir. Kritik üstü akım için Şekil 3.4b'de görüldüğü gibi A ve B noktalarının her ikisi P noktasının membasındadır ve P noktasındaki akım koşulları mansap koşullarından etkilenmez ve sadece membadaki akım koşullarına bağlıdır.



Şekil 3.4. Akım türüne göre karakteristik eğriler a) kritik altı akım b) kritik üstü akım c) kritik akım

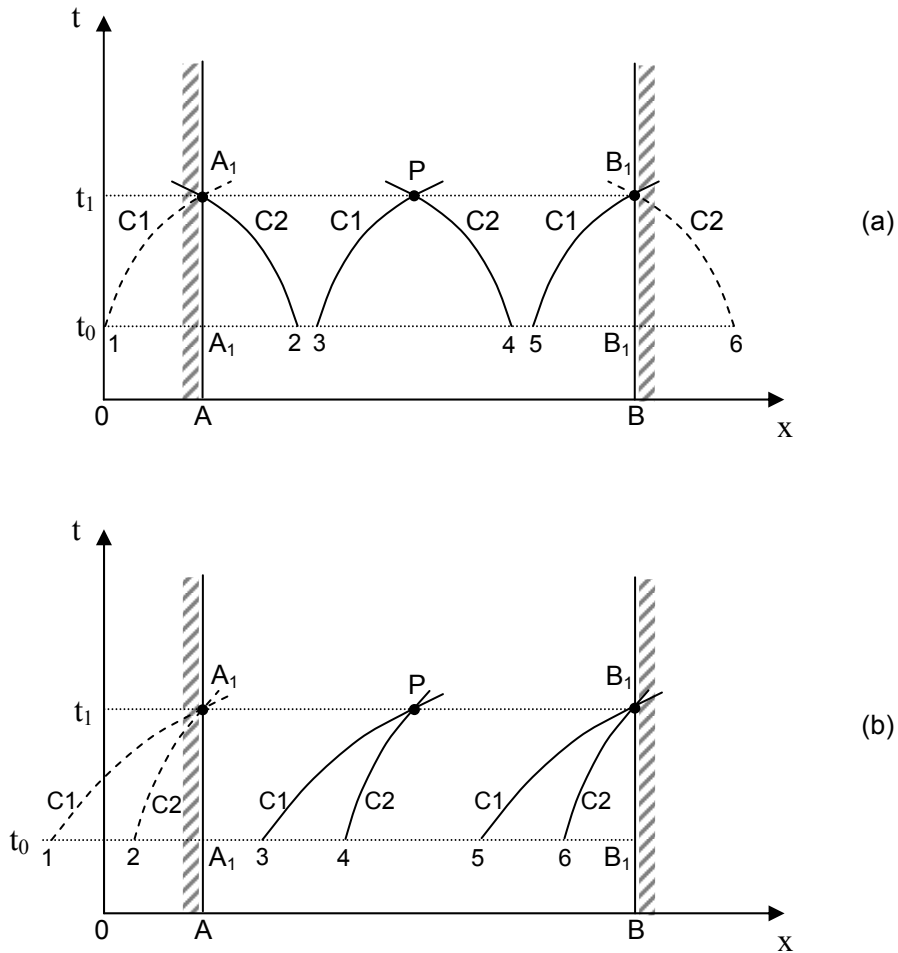
3.5.1. Başlangıç ve Sınır Şartları

Karakteristik doğrultularda dalga yayılmasını inceleyebilmek için başlangıç ve sınır koşullarının her ikisinin de dikkatli bir biçimde belirlenmesi gerekir. Bir değişken akım probleminin çözülebilmesi için gereken başlangıç ve sınır şartlarının sayısı ve yerlerinin belirlenmesi için Şekil 3.5a ve Şekil 3.5b’de görülen AB uzunluğundaki bir kanal mesafesi düşünölsün. Aynı zamanda $t=t_1$ anında bu aralıktaki A_1 , P ve B_1 noktalarındaki akım koşullarının belirlenmesi istenilsin. A_1 ve B_1 noktaları sırasıyla memba ve mansap kesitlerinde, P noktası da AB aralığının içinde bir noktada bulunsun. Bu noktaların her biri için bağımlılık bölgeleri kritik altı akım için Şekil 3.5a’da ve kritik üstü akım için Şekil 3.5b’de gösterilebilir. $t=t_1>t_0$ anında P noktası için bağımlılık bölgesi 3 ve 4 noktaları arasında yer alır. P noktasındaki akım koşulları t_1 anında (3.84) ve (3.86) denklemlerinin V ve h için çözümleriyle belirlenebilir. Fakat çözüm için t_0 anında 3 ve 4 noktalarında verilen V ve h değerlerine ihtiyaç duyulur. Diğer bir ifadeyle hesaplama başlangıcında V ve h terimlerinde iki adet başlangıç koşulu AB aralığı içerisinde bilinmelidir.

Şekil 3.5a’daki A_1 ve B_1 noktaları için bağımlılık bölgesinin bir kısmı ve Şekil 3.5b’de A_1 noktası için bağımlılık bölgesinin tamamı kanal mesafesinin dışında kalır. Bu nedenle, bu noktalardaki akım koşulları sadece AB mesafesi içindeki akım koşullarıyla belirlenemez. Şekil 3.5a’daki kritik altı akım durumunda A_1 ve B_1 noktaları için sadece karakteristiklerin biri hesaplama bölgesi içindedir. Sonuç olarak bu noktalarda denklem (3.84) ya da denklem (3.86)’dan sadece biri kullanılabilir. Kritik altı akımda bu noktalardaki iki bilinmeyen, sadece eğer kanal mesafesinin memba ve mansap kesitlerinin her ikisinde sınır şartları olarak adlandırılan V veya h değerleri veya V ve h arasındaki bir ilişki biliniyorsa belirlenebilir. Kritik üstü akım durumunda Şekil 3.5b’deki A_1 noktası için her iki karakteristikte çözüm bölgesinin dışında kalır ve denklem (3.84) ve (3.86) denklemlerinin hiçbirini kullanılamaz. Sonuç olarak V ve h terimlerinde iki sınır şartı AB aralığının memba kesitinde bilinmelidir. Şekil 3.5b’deki B_1 noktası için her iki karakteristik de çözüm bölgesi içindedir. B_1 noktasındaki akım koşulları denklem (3.84) ve (3.86)’dan elde edilebilir. Aynı durum

P noktası için de geçerlidir. Kritik üstü akım durumunda kanal mesafesinin mansap kesitinde sınır şartları gerekli değildir (Jain, 2001).

Genel bir kural; başlangıç ve sınır şartlarının sayısı, $t=t_0$ anında x ekseninden giren karakteristiklerin veya tüm zamanlar için $x=A$ ve $x=B$ sınırından giren karakteristiklerin sayısı ile eşit olmalıdır (Sturm, 2001).



Şekil 3.5. Karakteristik denklemlerin başlangıç ve sınır şartları (a) kritik altı akım (b) kritik üstü akım (Jain, 2001)

3.6. Baraj Yıkılması Probleminin Analitik Çözümleri

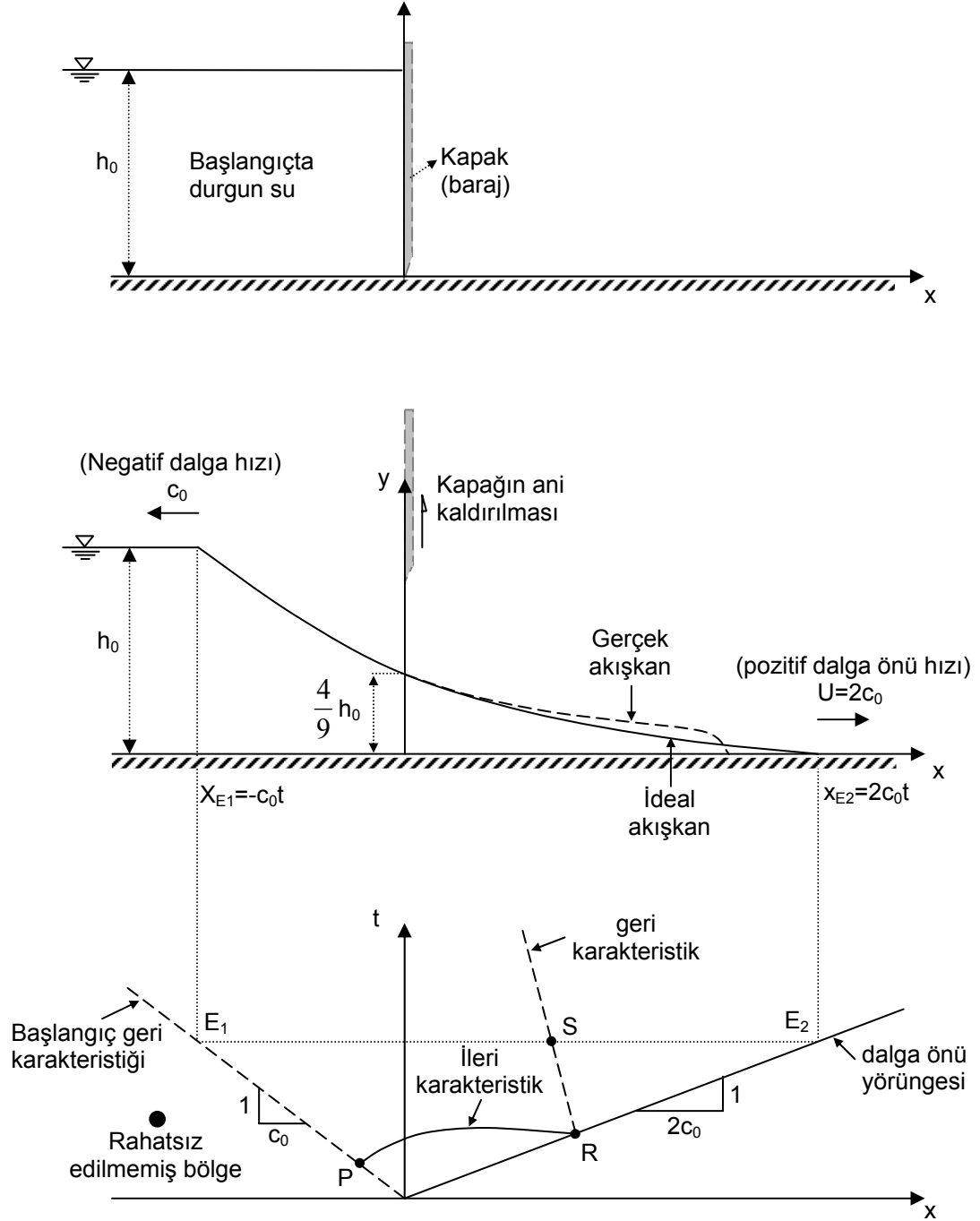
3.6.1. Kuru Kanalda Baraj Yıkılması Taşkın Dalgasının Yayılması

Dalga profilini tamamen çözebilmek için karakteristikler yöntemi kullanılabilir. Kuru kanalda baraj yıkılması problemi ilk olarak 1892 yılında Ritter tarafından düşünülmüştür (Henderson 1966).

Baraj yıkılması, düşey bir kapağın ani olarak kaldırılmasıyla idealize edilebilir (Şekil 3.6). Kapağın kaldırılmasından sonra memba yönünde negatif dalga yayılırken mansap yönünde ise pozitif dalga ilerler. Akışkan hareketinin başladığı ilk anlarda önemli ölçüde düşey ivme bileşeni var olmasına rağmen bu ivme karakteristikler yönteminde hesaba katılmaz ve basınç dağılımının hidrostatik olduğu kabul edilir.

Kuru yatay bir kanalda ideal baraj yıkılması basit dalga olarak düşünülebilir. Basit dalga (simple wave), başlangıçta sabit derinlik ve hıza sahip, yerçekimi ve sürtünme kuvvetlerinin ihmal edildiği ($S_0=S_f=0$) ve suyun en az bir doğrultuda sonsuza yayıldığı dalga olarak tanımlanır. Ağırlık ve sürtünme kuvvetlerinin ihmal edilmesi çok gerçekçi olmamasına rağmen, basit dalga kabulü karakteristik düzlemde değişken akım problemlerinin çözümünün gösterilmesi ve analitik çözümlerin elde edilebilmesi açısından oldukça faydalıdır. Bu kabulle Saint-Venant denklem sisteminde, dinamik denklem kinematik denklem halini alır.

Yatay, sürtünmesiz bir kanalda $g(S_0 - S_f) = 0$ olacağından Denklem (3.84) ve (3.85)'de dikdörtgen bir kanal için verilen karakteristik denklemlerde eşitliğin sağ tarafı sıfır olur. Bu durumda olayı idare eden karakteristik denklemler aşağıdaki hali alır:



Şekil 3.6. Kuru kanalda baraj yıkılması problemi (Chanson, 2004a)

$$\frac{D}{Dt}(V + 2c) = 0 \quad \text{C1 (İleri karakteristikler) üzerinde} \quad (3.89)$$

$$\frac{D}{Dt}(V - 2c) = 0 \quad \text{C2 (Geri karakteristikler) üzerinde} \quad (3.90)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + c \quad \text{C1 (İleri karakteristikler)} \quad (3.91)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - c \quad \text{C2 (Geri karakteristikler)} \quad (3.92)$$

Eşitliğin sağ tarafı sıfır olduğunda denklem (3.89) ve (3.90) ifadelerinin integrali alındığında $(V \mp 2c)$ ifadesi sabit olacaktır.

$$\text{C1 üzerinde : } V + 2c = \text{sabit} \quad (3.93)$$

$$\text{C1: } \frac{dx}{dt} = V + c \quad (3.94)$$

$$\text{C2 üzerinde: } V - 2c = \text{sabit} \quad (3.95)$$

$$\text{C2: } \frac{dx}{dt} = V - c \quad (3.96)$$

Bu durumda $V+c$ hızıyla hareket eden bir gözlemci için $(V+2c)$ ileri karakteristik boyunca sabittir. Benzer biçimde $V+c$ hızıyla hareket eden bir gözlemci için $(V-2c)$ geri karakteristik boyunca sabittir. Burada $(V+2c)$ ve $(V-2c)$ sabitleri “Riemann değişmezleri” olarak adlandırılırlar. Genelde bu sabit değerler her bir karakteristik için farklı olmaktadır.

Her bir ileri karakteristik üzerinde, $(V+2c)$ yörünge boyunca sabitken yörünge eğimi $1/(V+c)$ dir. Teorem olarak; bir basit dalga problemi ($S_0=S_f=0$) için C1 veya C2 karakteristikleri ailesinin herhangi bir eğrisi bir doğru çizgi ise o karakteristik yörünge ailesinin doğru çizgi olduğu söylenebilir (Henderson, 1966).

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi ani baraj yıkılması, bilinen bir h_0 su derinliğine sahip ve durgun halde bulunan bir haznede memba yönünde yayılan negatif bir dalga

yaratır. Negatif dalgaya ait başlangıç karakteristiği (x,t) düzleminde $dx/dt=V_0-c_0$ 'dır. Su durgun halde olduğunda başlangıç hızı $V_0=0$ 'dır. Bu durumda başlangıç karakteristiğinin ters eğimi $dx/dt=-c_0$ olacaktır. Dikdörtgen bir kanalda dalga yayılma hızı $c_0 = \sqrt{gh_0}$ 'dır.

İleri karakteristikler, $t>0$ için başlangıç geri karakteristiğinden başlayarak ve baraj yıkılması dalga önünün uç kısmının izlediği yörüngeyi kesecek şekilde çizilebilir (Şekil 3.6'da P-R yörüngesi). P-R ileri karakteristik eğrisi üzerinde $V+2c$ sabit değerini almaktadır. Dolayısıyla P ve R noktaları arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$V_P+2c_P=V_R+2c_R \quad (3.97)$$

P noktası aynı zamanda geri karakteristik üzerinde olduğundan bu noktada $V_P=V_0=0$ ve $c_P=c_0$ 'dır.

$$V_R+2c_R = V_0+2c_0 \quad (3.98)$$

$$V_R+2c_R = 2c_0 \quad (3.99)$$

İleri karakteristik üzerinde genel bir ifade olarak

$$V+2c = 2c_0 \quad (3.100)$$

yazılabilir. Baraj yıkılması dalga önünün uç kısmında su derinliği sıfırdır, bu yüzden $c_R=c_0=0$ 'dır ve baraj yıkılması dalga önünün yayılma hızı $V_R=U$ ile gösterilirse:

$$U = 2c_0 = 2\sqrt{gh_0} \quad (3.101)$$

olarak bulunur. Baraj yıkılması dalga önünün izlediği yörüngeden başlayarak çizilecek herhangi geri karakteristikler düşünüldüğünde (Şekil 3.6'da R-S

yörüngesi), başlangıç geri karakteristiği bir doğru çizgi olduğu için tüm C2 karakteristikleri de birer doğru çizgi olacaktır. Böylelikle geri karakteristiklerin ters eğimleri sabit olacaktır.

$$\frac{dx}{dt} = V - c = \text{sabit} \quad (3.102)$$

Denklem (3.99) kullanılarak $V+2c=2c_0$ ise $V=2c_0-2c$ 'dir. Bu ifade denklem (3.102)'de yerine koyulursa

$$\frac{dx}{dt} = V - c = 2c_0 - 3c \quad (3.103)$$

elde edilir. Bu ifadenin integrasyonu ile $t=\text{sabit}$ yatay çizgisi (E_1-E_2 doğrusu) ile C2 karakteristiklerinin kesişim yerindeki su yüzü profilini veren ifade elde edilebilir. (Şekil 3.6'da S Noktası). Herhangi bir zamanda negatif dalga ve dalga önünün uç kısımları arasındaki su yüzü profili bir paraboldür (Şekil 3.6).

$$\frac{x}{t} = 2\sqrt{gh_0} - 3\sqrt{gh} \longrightarrow -c_0 \leq \frac{x}{t} \leq +2c_0 \quad (3.104)$$

$c = \sqrt{gh}$ olmak üzere, bu eşitlik yardımıyla $x-t$ düzlemi üzerinde herhangi bir noktadaki dalga yayılma hızı, su yüzü profili ve akım hızını veren aşağıdaki eşitlikler bulunabilir.

$$c = \frac{1}{3} \left(2c_0 - \frac{x}{t} \right) \quad -\sqrt{gh_0} \leq \frac{x}{t} \leq +2\sqrt{gh_0} \quad (3.105)$$

$$h = \frac{1}{9g} \left(2c_0 - \frac{x}{t} \right)^2 \quad -c_0 t \leq x \leq +2c_0 t \quad (3.106)$$

$$V = \frac{2}{3} \left(c_0 - \frac{x}{t} \right) \quad -c_0 t \leq x \leq +2c_0 t \quad (3.107)$$

Kuru bir kanalda baraj yıkılması dalgası için sınır şartları, (x,t) düzleminde düşey eksen üzerinde değildir. Negatif dalganın memba ucunda sınır koşulu $h=h_0$ 'dır. Bu ayrıca (x,t) düzleminde başlangıç geri karakteristiğidir (Şekil 3.6). Mansap sınır şartı baraj yıkılması dalgasının ilerleyen ucunda su derinliğinin sıfır ($h=0$) olduğu yerdedir. Bu durumda negatif dalga, $x = -c_0 t$ kadar memba yönünde yol alırken pozitif dalga önü $x = 2c_0 t$ kadar mansap doğrultusunda ilerler. Bu ifadeler $h=0$ ve $h=h_0$ sınır şartlarının denklem (3.104)'de yerine koyulmasıyla elde edilebilirler.

Orijinde ($x=0$) denklem (3.104) sabit bir su derinliğini vermektedir.

$$h(x=0) = \frac{4}{9} h_0 \quad (3.108)$$

Benzer şekilde orijindeki akım hızı denklem (3.107)'den elde edilebilir.

$$V(x=0) = \frac{2}{3} \sqrt{gh_0} \quad (3.109)$$

Baraj yıkılmasından sonra, orijinde akım derinliği ve hız değerlerinin her ikisi de sabittir. Bu hız ve derinlik değeri ile Froude sayısı hesaplandığında baraj aksında kritik akım koşullarının meydana geldiği görülebilir.

$$Fr = \frac{V(x=0)}{\sqrt{gh(x=0)}} = \frac{\frac{2}{3} \sqrt{gh_0}}{\sqrt{g \frac{4}{9} h_0}} = 1 \quad (3.110)$$

Elde edilen bu sonuçların sadece Saint-Venant denklemlerinin kabulleri dahilinde geçerli olduğunun unutulmaması gerekmektedir.

3.6.2. Mansapta Kuyruk Suyu Bulunması Halinde Baraj Yıkılması Taşkın Dalgasının Yayılması (Islak Durum)

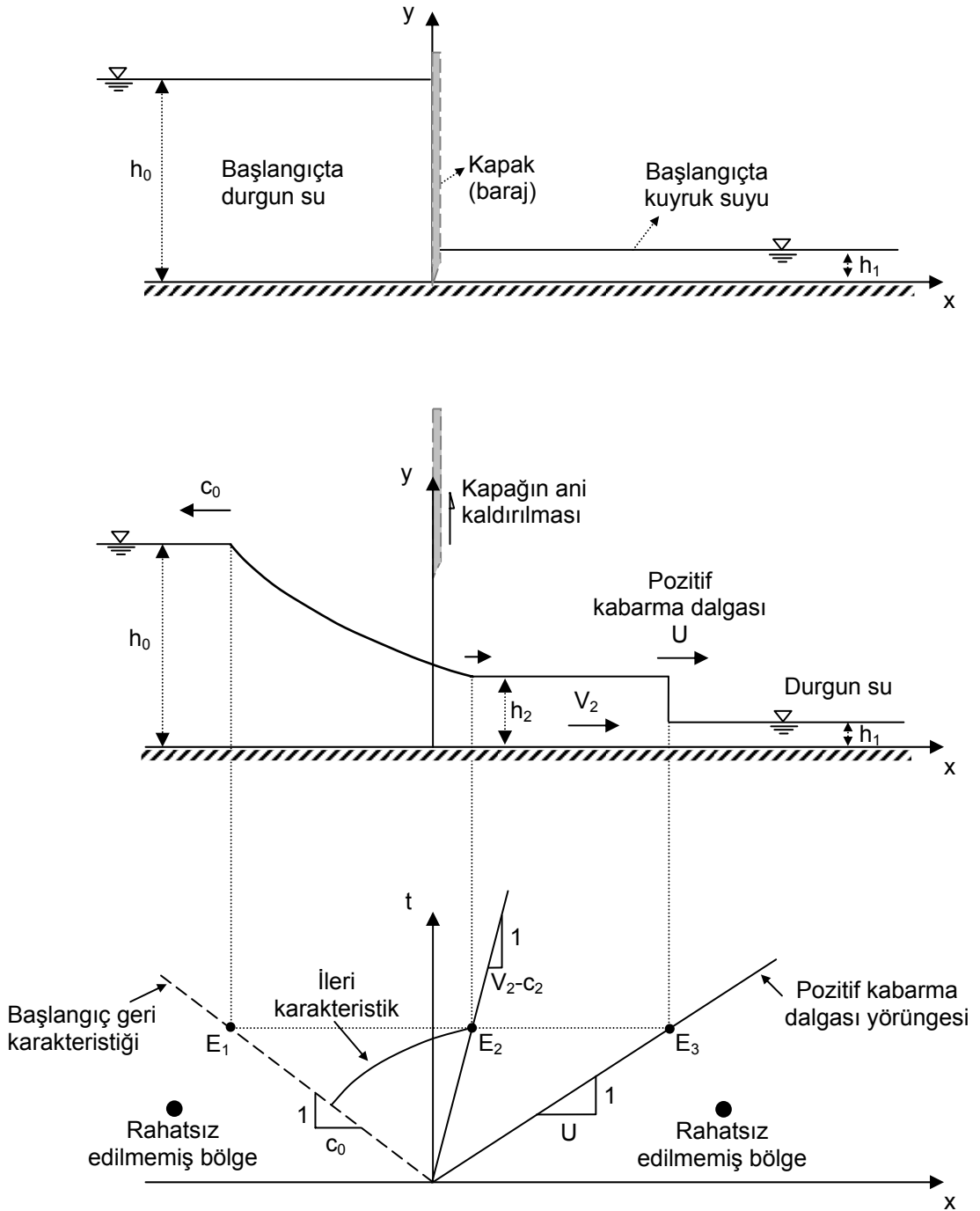
Barajlar, akarsular üzerine inşa edildiklerinden mansaplarında kuyruk suyu bulunması ve yıkılma sonrası oluşan taşkın dalgasının ıslak bir akarsu yatağı üzerinde yayılması, gerçekte karşılaşılabilecek bir durumdur. Böyle bir durumda baraj yıkılması dalgası mansapta pozitif bir kabarma dalgası (surge) oluşumuna neden olacaktır (Şekil 3.7). Bundan dolayı ıslak yatak üzerinde baraj yıkılması dalgası yayılması problemi başlangıçta kuru yatak olması durumundan oldukça farklıdır ve problemin analitik çözümü için karakteristikler yöntemi tek başına yeterli değildir. Denklem (3.89)-(3.92)'de verilen karakteristik denklemlere ilave olarak pozitif kabarma dalgası önü için süreklilik ve momentum denklemlerine ihtiyaç duyulur. Bu denklemler kütle korunumu ve impuls momentum ifadelerinin Şekil 3.8'de görülen baraj yıkılması sonucu oluşan pozitif kabarma dalgasına ait bir kontrol hacmine uygulanmasıyla elde edilebilir. Şekil 3.8a'da görüldüğü gibi kabarma dalgası kanal kenarında duran bir gözlemciye göre U hızıyla hareket etmektedir ve dalga ön yüzeyi kararsızdır (değişken akımdır). Ancak gözlemci dalga ile birlikte hareket ederse bu durumda Şekil 3.8b'de görüldüğü gibi hareket kararlı (düzenli) bir hal alır (Yüksel, 2005). Bu durumda kabarma dalgası önü için süreklilik denklemi ($Q=VA$):

$$h_1 U = h_2 (U - V_2) \quad (3.111)$$

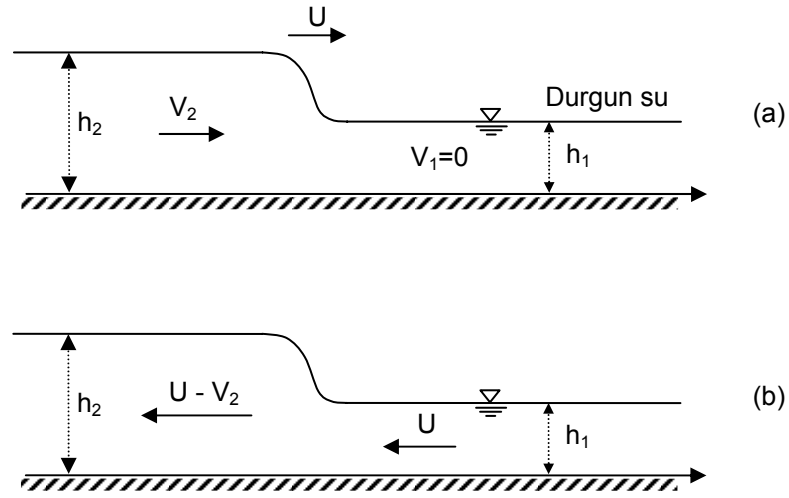
impuls momentum denklemi ise

$$\rho Q V_{\text{cikan}} - \rho Q V_{\text{giren}} = \sum F \quad (3.112)$$

olduğundan Q ifadeleri süreklilik denkleminde alınır ve hız değerleri yerine yazılırsa



Şekil 3.7. Islak kanalda baraj yıkılması problemi ($h_1/h_0 < 0.1383$) (Chanson, 2004a)



Şekil 3.8. Pozitif kabarma dalgasının yayılması (a) kanal kenarında oturan bir gözlemciye göre (b) gözlemci kabarma dalgası hızıyla hareket ederse

$$\rho h_2 (U - V_2)(U - V_2) - \rho h_1 U U = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 - \frac{1}{2} \gamma h_2^2 \quad (3.113)$$

denklem düzenlenirse

$$h_2 (U - V_2)^2 - h_1 U^2 = \frac{1}{2} g h_1^2 - \frac{1}{2} g h_2^2 \quad (3.114)$$

halini alır. Denklem (3.111)'de verilen süreklilik denkleminde V_2 ifadesi yalnız bırakılır ve denklem (3.114)'de yerine yazılarak denklem yeniden düzenlenirse, dikdörtgen kesitli kanallar için kabarma dalgası ön yüzeyinin yayılma hızını veren aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$U = \sqrt{\frac{g}{2} \frac{h_2}{h_1} (h_2 + h_1)} \quad (3.115)$$

Karakteristik denklemler tekrar yazılacak olursa

$$\frac{D}{Dt}(V \mp 2c) = 0 \quad \text{Karakteristik denklemler} \quad (3.116)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \mp c \quad \text{Karakteristik eğriler} \quad (3.117)$$

Kuru yatak durumunda olduğu gibi baraj yıkıldıktan hemen sonra, durgun halde bulunan ve bilinen bir h_0 derinliğine sahip bir haznede memba yönünde negatif bir dalga yayılır (Şekil 3.7). (x,t) düzlemi içinde, $V_0=0$ olduğunda başlangıç negatif karakteristikleri, $dx/dt=-c_0$ ters eğimine sahiptir. Önceki bölümde bahsedildiği gibi başlangıç geri karakteristiği bir doğru olduğundan tüm C2 karakteristikleri de doğru çizgiler olacaktır.

$t>0$ için başlangıç geri karakteristiğinden başlayarak çizilen ileri karakteristikler mansap su seviyesini ($h=h_1$) kesemez. Çünkü bu durumda hız bir süreksizlik içerecektir. Mansaptaki kuyruk suyu durgun olduğundan hız sıfırdır ($V_1=0$) fakat ileri karakteristikler üzerinde aşağıdaki ifade geçerli olmaktadır.

$$V+2c=V_0+2c_0=2c_0 \quad (3.118)$$

Böyle bir süreksizlik sadece Şekil 3.7’de görüldüğü gibi bir pozitif kabarma dalgası olması durumunda ortaya çıkmaktadır (Chanson, 2004a).

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi ıslak durum için su yüzü profili, kısım kısım ele alınabilir. Öncelikle su yüzeyi negatif dalgaın ilerleyen ucunun (E1 noktası) membasında yataydır. E1 ve E2 noktası arasında ise serbest yüzey profili (su yüzü) bir parabolüdür. Bu parabolün denklemi kuru yatak durumunda olduğu gibi geri karakteristiklerin eğiminin denklem (3.118) yardımıyla belirlenip integralinin alınmasıyla elde edilebilir.

$$\frac{dx}{dt} = V - c = 2c_0 - 3c \quad (3.119)$$

$$\frac{x}{t} = 2\sqrt{gh_0} - 3\sqrt{gh} \quad x_{E1} \leq x \leq x_{E2} \quad (3.120)$$

E2 noktası ve pozitif kabarma dalgasının ilerleyen ucu E3 arasında su yüzü yataydır. Buradaki akım derinliği h_2 ve hız V_2 , (3.111) ve (3.115) denklemleri ve bunun yanında başlangıç negatif karakteristiklerinden gelen (başlayan) ve E2 noktasına uzanan C1 ileri karakteristikleri koşulu:

$$V_2 + 2\sqrt{gh_2} = 2\sqrt{gh_0} \quad (3.121)$$

yardımıyla elde edilebilir. Denklem (3.111), (3.115) ve (3.121) numaralı üç denklemden oluşan üç bilinmeyenli (V_2 , h_2 , U) bir denklem sistemi oluştururlar. Bu denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle bilinmeyenler bulunabilir. Daha sonra bu bilinmeyenler yardımıyla kabarma dalgasının sınırları olan E2 ve E3 noktalarının yeri ve negatif dalgaın sınırı E1, sırasıyla aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$x_{E3} = Ut \quad (3.122)$$

$$x_{E2} = (V_2 - c_2)t \quad (3.123)$$

$$x_{E1} = c_0 t \quad (3.124)$$

Denklemlerin çözümü için sayısal yöntemler kullanılabileceği gibi grafik veya ampirik bağıntılar yardımıyla da bu bilinmeyenler (V_2 , h_2 , U) hesaplanabilir. Aşağıdaki ampirik yaklaşım ile h_2 değeri kolaylıkla bulunabilmektedir (Chanson, 2004a).

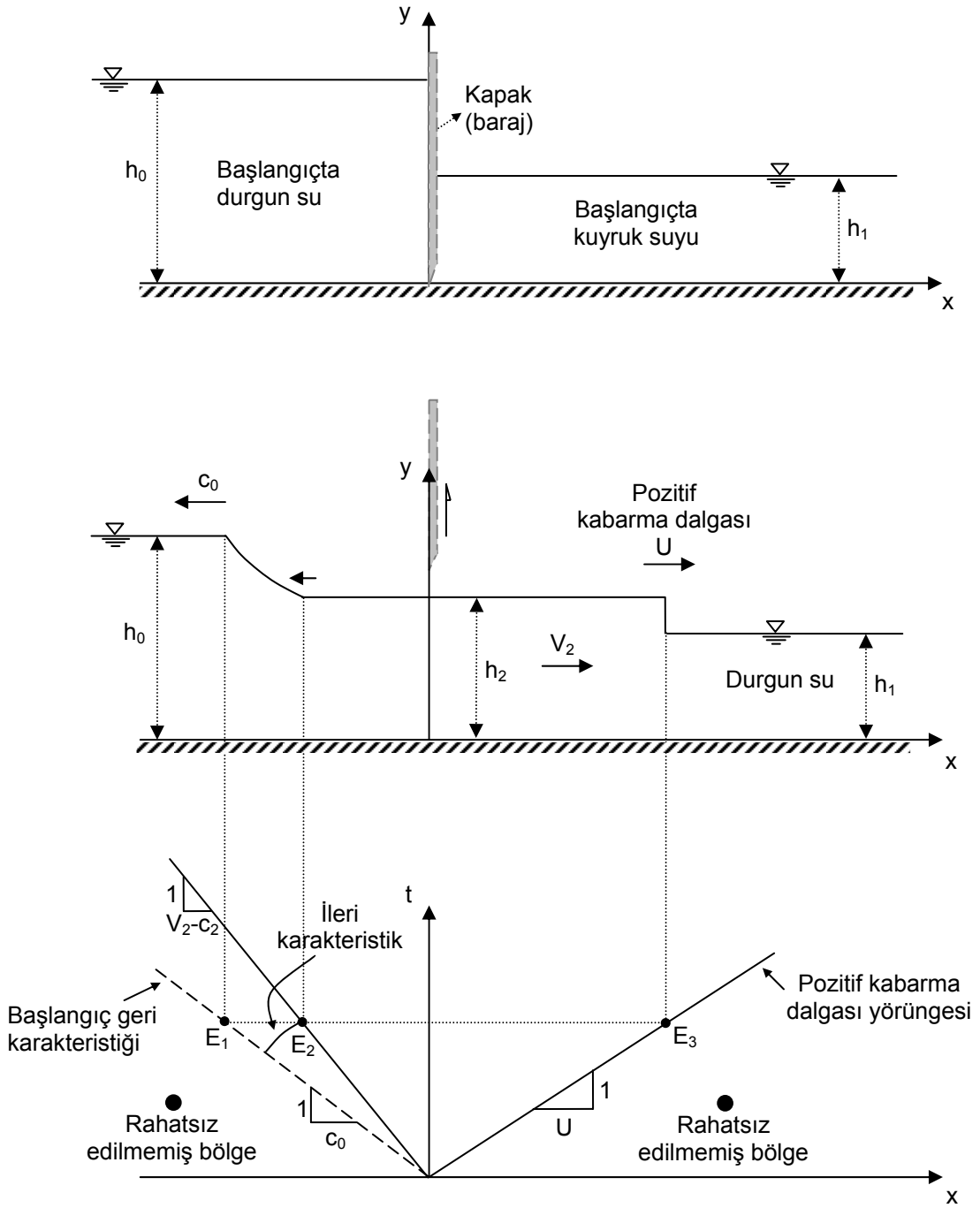
$$\frac{h_2}{h_0} = 0.9319671 \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^{0.371396} \quad (3.125)$$

Daha sonra diğer bilinmeyenler denklem (3.115) ve denklem (3.121) yardımıyla kolaylıkla belirlenebilir.

Islak yatak üzerinde baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılması incelendiğinde, kuyruk suyu derinliğine bağlı olarak E2 noktasının baraj aksının (orijin) memba veya mansabında kalabildiği iki farklı durum söz konusu olmaktadır. Bu iki durum arasında E2 noktasının orijinde kaldığı limit durum:

$$\frac{h_1}{h_0} = 0.1383 \quad (3.126)$$

olmaktadır. $h_1/h_0 < 0.1383$ olması halinde Şekil 3.7’de görüldüğü gibi E2 noktası baraj mansabında kalmaktadır ve mansap yönünde ilerlemektedir (Tip I). $h_1/h_0 > 0.1383$ olması halinde ise Şekil 3.9’daki akım durumu oluşur ve E2 noktası her zaman baraj aksının membasında kalır (Tip II). Limit durumun elde edilmesi hakkında detaylı bilgi Chanson (2004a) tarafından verilmiştir.

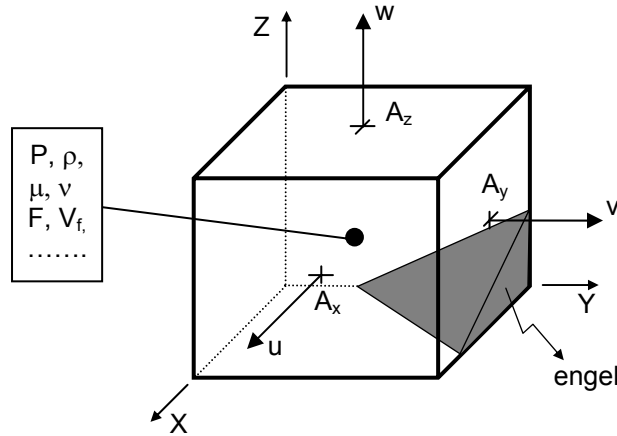


Şekil 3.9. Islak kanalda baraj yıkılması problemi ($h_1/h_0 > 0.1383$) (Chanson, 2004a)

3.7. FLOW-3D Yazılımı

Tez kapsamındaki sayısal uygulamalar, ticari FLOW-3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım en genel haldeki süreklilik, momentum ve enerji temel kanunlarına dayandığından hemen her tür akışkanlar mekaniği problemlerine uygulanabilmektedir. Bununla birlikte, yazılım özellikle serbest yüzeyli (açık kanal) akım problemlerinin çözümünde oldukça başarılıdır ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

Üç boyutlu süreklilik ve hareket (RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemlerinden oluşan diferansiyel denklem sisteminin çözümü için sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır. Hesaplamalar, dikdörtgen hücrelerden oluşan üniform olmayan bir çözüm ağı üzerinde yapılmaktadır. Akışkana ait basınç, yoğunluk, viskozite gibi skaler büyüklükler kontrol hacminin (hücre) merkezinde yer alırken sadece hızlar (u, v, w) kontrol hacminin yüzeyinde hesaba katılmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Bir hesaplama hücresine etkiyen değişkenlerin gösterimi

Problem geometrisi, benzer yazılımların aksine çözüm ağı üzerinde bazı hücrelerin engellerle kapatılmasıyla elde edilmektedir. FAVOR (fractional area/volume obstacle representation) adı verilen bu yöntemde kontrol hacmi içerisinde bulunan bir engelin kontrol hacminin ne kadarını kapladığı (volume

fraction) ve bu engelin kontrol hacminin her bir yüzeyinde ne kadar alanı kapattığı hesaplanarak bu iki değer oranlanır. Bu yöntem aslında engelleri tanımlamak için kullanılan bir boşluk tekniğidir. Kontrol hacmi tamamen engel ile dolu ise bu değer sıfır, tamamen boş ise 1 değerini alır. Eğer bir hücre kısmen engel ile dolu ise bu değer hücrede kapladığı hacim yüzdesine bağlı olarak sıfır ile 1 arasında bir değer alır. Bu durum aslında her bir hücredeki yüzeylerin akıma açık olduğu alanları dolayısıyla bu hücrede ne kadar akışkan bulunduğunu ifade etmektedir. Bu yöntem ile karmaşık şekle sahip sınırlarda kaba ağ aralıkları kullanılsa bile engel geometrisi iyi tanımlanabilmektedir ve sınırlarda sayısal çözüm hassasiyeti artmaktadır. Ayrıca problemlerde arazinin geometrisi CAD yazılımları ile oluşturulup çözüm ağı içerisine rahatlıkla yerleştirilebilmektedir. Bu da oldukça düzensiz topografyaya sahip akarsu, baraj gölü, dolusavak gibi açık kanal problemlerinin kolaylıkla 3 boyutlu modellerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Modelleme sırasında, daha küçük ağ aralıklarının kullanılması, çözüm alanı içerisindeki engel sınırlarının daha yumuşak (düzgün) tanımlanmasını sağlamaktadır.

Su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesi için yazılımda akışkan hacmi (VOF: Volume of Fluid) yöntemi kullanılmaktadır (Hirt ve Nichols, 1981). VOF yöntemi ile, FAVOR yöntemine benzer biçimde hücrelerin boş, tam veya kısmen suyla dolu olduğu belirlenir. Bu yöntemde hesaplama alanı üzerinde bir akışkan hacmi (F) tanımlanır. Şayet bir hücre tamamen akışkan ile dolu ise 1 değeri, tamamen boş ise sıfır değeri ve kısmen dolu ise hücrede kapladığı yüzde değerini alır. Serbest yüzey, bir eğime sahip ise bir hücredeki yüzeyin yerini ve eğimini belirlemek için kendisini çevreleyen hücreleri dikkate alan bir algoritma kullanılmaktadır. VOF yöntemi ile serbest yüzeyin izlenmesi üç kısımdan oluşur. Öncelikle serbest yüzeyin yeri bulunur. Daha sonra bu yüzey, su ve hava arasında keskin bir arakesit olarak belirlenir. Son olarak bu arakesite sınır şartları uygulanır. Arakesit üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmaktadır. Akışkan hacmi fonksiyonu F'nin değişimi aşağıdaki diferansiyel denklem ile verilmektedir.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (3.127)$$

bu denklem ile F değeri akışkan ile birlikte hareket etmektedir.

İçerisinde engel bulunan 3 boyutlu bir serbest yüzey probleminin FLOW-3D yazılımı ile çözümünde, çözüm ağı içerisindeki herhangi bir hücrede beş farklı durumdan biri söz konusu olabilir: Bunlar; hücre tamamen katı, kısmen katı veya sıvı, tamamen sıvı, kısmen sıvı ile dolu ve tamamen boş olabilir.

Bu yazılım; iki denklemlili k-ε, Prandtl karışma boyu, türbülans enerji, RNG (Renormalized Group) ve LES (Large-Eddy Simulation) gibi farklı türbülans yaklaşımlarını içerisinde barındırmaktadır.

Çözüm ağı sınırlarında; simetri, duvar, bağlayıcı (continuative), periyodik, basınç, hız, çıkan akım (outflow) gibi farklı sınır şartları uygulanabilmektedir.

Yazılımda üç boyutlu (3B) süreklilik ve hareket denklemleri eş zamanlı olarak çözülebilmektedir. Sıkışmayan akım için kullanılan kartezyen koordinatlardaki süreklilik ve hareket denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (3.128)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (3.129)$$

burada u_i i doğrultusundaki akım hızını, P basıncı, A_i i doğrultusunda her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu alanı, V_F her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu hacmi, g_i kütleli kuvvetleri, f_i herhangi bir türbülans modeli için Reynolds gerilmelerini ifade etmektedir.

Bir akışkan hacmi için Reynolds gerilmeleri f_i aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$f_i = \frac{1}{\rho V_F} \left[ws_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (A_j \tau_{ij}) \right] \quad (3.130)$$

Burada ws_i duvar kayma gerilmesi, τ_{ij} ise gerilme hızı tansörünü göstermektedir.

Duvar kayma gerilmeleri ise

$$\tau_{ii} = -2\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad \text{ve} \quad \tau_{ij} = -\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3.131)$$

burada μ_T türbülans etkilerini ifade eden ve çalkantı gerilmelerini de içeren toplam dinamik viskozitedir ($\mu_T = \mu + \mu_t$).

Duvar sınır koşulları, seçilen türbülans modeline (turbulence closure scheme) göre farklı değerlendirilmektedir. Taşınımlı türbülans kapatma şemalarının çözümünde (k- ϵ gibi) sınır tabakası içerisindeki hız dağılımını veren bir duvar fonksiyonundan yararlanılmaktadır. Yazılımda kayma hızı (u_*)'ı çözmek için pürüzlü ve pürüzsüz bir duvar yüzeyi için genelleştirilmiş olan aşağıdaki logaritmik duvar fonksiyonu kullanılmaktadır (Flow Science, INC., 2007):

$$u_0 = u_* \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\rho u_* y_0}{\mu + \rho a u_* k_s} \right) + 5 \right] \quad (3.132)$$

burada κ Von Karman sabiti, a türbülans modeline bağlı olan bir sabit (k- ϵ modeli için 0.247), k_s engel pürüzlülüğü, y_0 herhangi bir noktadaki (u_0) teğetsel hızının engelden olan uzaklığıdır. Denklem (3.132)'deki parantez içindeki ifadenin paydası, pürüzlü sınırın etkisinden dolayı oluşan etkili viskozitedir ($\mu_{eff} = \mu + \rho a u_* k_s$). Eğer hücre laminer alt tabakaysa ($R_* = \rho u_* y_0 / \mu \leq 5$), kayma hızının çözümü için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$u_* = \sqrt{\frac{\mu u_0}{\rho y_0}} \quad (3.133)$$

Kayma hızı (u_*) için elde edilen çözüm, türbülans taşınım denklemlerinde (denklem (3.142)) sınır şartı olarak kullanılır. Pürüzlülük etkileri daha sonra toplam dinamik viskozite (μ_T) ve doğrudan duvar kayma gerilmesi ws_i , aracılığıyla çözüme dahil edilir.

$$ws_i = \sum_j \frac{2\rho |u_{*i}| u_{*i}}{\Delta x_j} \quad (3.134)$$

Laminer akımlar ve taşınımsız türbülans kapatma şemaları (LES modeli) için duvar kayma gerilmesi (ws_i):

$$ws_i = \frac{(\mu + \rho a u_0 k_s) u_0}{y_0} \quad (3.135)$$

ifadesi ile verilmektedir. Hesaplanan duvar kayma gerilmesi (ws_i), daha sonra doğrudan denklem (3.130) aracılığıyla momentum denkleminin çözümüne dahil edilmektedir.

3.7.1. k-ε Türbülans Modeli

FLOW-3D mevcut birkaç farklı türbülans kapatma (closure) şeması içermektedir. Bunlar: bir denklemlilik türbülans enerji (k), iki denklemlilik (k-ε), “Renormalization Group” (RNG), “Large Eddy Simulation” (LES) ve Prandtl karışma boyu modelidir. Bu çalışmada, farklı türbülans modellerinin duyarlılığı araştırılmadığından, literatürde bu konuda en yaygın şekilde tercih edilen ve en çok doğrulanmış olan k-ε türbülans modeli kullanılmıştır (Wilcox, 2000; Shigematsu ve ark., 2004). Bu model özellikle yüksek Reynolds sayısına sahip akışlarda daha uygun

sonuçlar vermektedir ve sınır tabakası dışında geçerlidir. Bu modelde kinetik enerji, “k” ve sönümlenme oranı (dissipation rate), “ε” için ayrı taşınım denklemi yazılır.

Genellikle iki denklemlilik olarak bilinen k-ε modelinde Reynolds gerilmesini verecek çevri (türbülans) viskozitesi

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.136)$$

ifadesi ile elde edilir. Türbülans kinetik enerji, k ve sönümlenme oranı, ε, için kapatma denklemleri aşağıdaki eşitlikler ile verilir:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.137)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3.138)$$

Kapatma katsayıları ve yardımcı ilişkiler aşağıda toplu olarak verilmiştir.

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad \text{ve} \quad \ell = \frac{C_\mu k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.139)$$

burada Reynolds gerilme tansörü, τ_{ij} ve ortalama gerilme-oran tansörü, e_{ij} , sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\tau_{ij} = 2\nu_t e_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.140)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.141)$$

denklem (3.142)'de k ve ε için verilen sınır koşulları, denklem (3.132) ve (3.133)'de verilen logaritmik duvar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}}, \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa y_0} \quad (3.142)$$

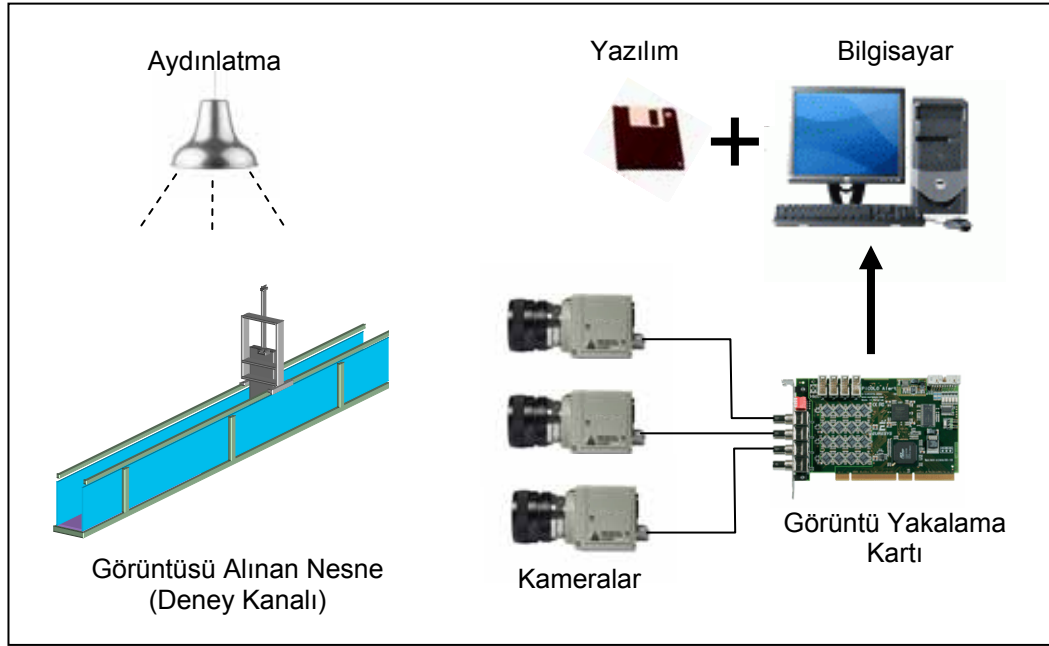
4. GÖRÜNTÜ İŞLEME ve ANALİZİ

4.1. Görüntüleme Sistemi

Görüntü işleme, video kamera, fotoğraf makinesi, tarayıcı gibi aygıtlardan elde edilen sayısal (dijital) görüntülerin bilgisayar yazılımlarıyla işlenmesi ve analizi olarak tanımlanabilir. Literatürde farklı tanımlamalar yapılmakla birlikte, görüntü yakalama ve analizini gerçekleştirmek için kullanılan yazılım ve donanım birimleri kombinasyonu da görüntü işleme sistemi (GİS) olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemle görüntüsü alınan nesneye ait renk, yansıma ve ışık geçirgenliği gibi optik; uzunluk, genişlik, çap, açı, çevre ve alan gibi geometrik özellikler ile göreceli ve mutlak konum gibi yerleşim özellikleri bilgisayar ortamında kolaylıkla incelenebilir. Bu nedenle son yıllarda bilgisayar ve elektronik alanındaki hızlı gelişmeler sonucunda görüntü işleme sistemlerin ekonomik ve yaygın kullanımını mümkün kılan yazılım ve donanımların gelişmesiyle bu sistemler hemen her alanda kullanılmaktadır. Bunlara havacılık, tıp, biyoloji, akışkanlar mekaniği gibi birçok farklı alan örnek olarak verilebilir.

İhtiyaca göre değişmekle birlikte bir görüntüleme sistemi, sağlıklı bir görüntünün elde edilmesinde her biri önemli birer role sahip birkaç temel bileşenden oluşur. Bir dijital kamera sistemi düşünüldüğünde gerekli olan bileşenler bir veya birden çok dijital kamera ve mercek (lens), görüntü yakalama kartı (frame grabber), ışıklandırma ile bilgisayar donanım ve yazılımıdır (Şekil 4.1). Kamera ve görüntü yakalama kartı daha sonra yazılım kullanarak işlenecek olan görüntüleri yakalarken ışık ve optik (mercek) elde edilen görüntünün etkinliğinin artırılmasına ve hassas bir görüntü alınmasına da yardımcı olurlar.

Bir görüntüleme sistemi seçilen her bir parçanın kalitesi oranında başarı sağlayacaktır. Seçimde yapılacak herhangi bir hata özellikle optik ve görüntüleme açısından sistemin başarısının büyük oranda azalmasına neden olacaktır.



Şekil 4.1. Görüntüleme sisteminin bileşenleri

4.2. Görüntüleme Sisteminin Bileşenleri

4.2.1. Video Kamera

Kameralar, bir lens tarafından yakalanan görünür alanı üzerinde bulunan görüntü algılayıcısı (sensör) aracılığıyla elektronik sinyale dönüştüren aygıtlardır. Önceleri tüp kameralar kullanılırken günümüzde bunların yerini entegre devrelere veya çiplere sahip kameralar almıştır. Bugün hemen her kamerada CCD veya CMOS adı verilen görüntü algılayıcıları kullanılmaktadır. Bu algılayıcılar ışığa karşı hassas cihazlardır. Temel görevleri mercekler tarafından üzerlerine düşen (odaklanan) görüntüyü yada daha net bir ifadeyle ışığı elektronik sinyallere dönüştürmek ve işlenmek üzere makinenin üzerindeki işlemcilere göndermektir. İşlemci üzerinde işlenen sinyaller bilgisayarın anlayabileceği resimler haline dönüştürülürler.

Günümüzde elektronik alanındaki hızlı gelişmeler ve maliyetlerdeki düşüşlerden dolayı kameraların günlük yaşamda ve bilimsel alanlarda kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Basit web kameralarından gelişmiş endüstriyel ve bilimsel kameralara kadar çok geniş fiyat aralığına ve çok farklı özelliklere sahip olan farklı

amaçlar için üretilen çeşitli kameralar bulunmaktadır. Bundan dolayı kamera seçimi uygulama gereksinimlerine ve maliyete göre yapılmalıdır. Örneğin, bir akışkan hareketine ait hız vektörlerinin belirlendiği parçacık görüntülemeli hız (PIV-Particle Image Velocimetry) uygulamalarında hassas ölçümler yapabilmek için yüksek çözünürlüğe sahip kameralar kullanmak gerekirken; dalga çarpması gibi hızlı meydana gelen akışkan olaylarında, istenilen detayların izlenebilmesi için yüksek hızlı bir kameraya ihtiyaç duyulur. Bu nedenle bilimsel amaçlı kullanımlarda kameralara ait bazı özelliklerin bilinmesi kamera seçiminde doğru tercihlerin yapılabilmesi ve bu kameralarla yapılacak ölçümlerden sağlıklı bilgiler elde edilmesi ve yorumlanması açısından önemlidir. Sırasıyla bu özelliklere değinilecektir.

Sensörler kamera seçimi yapılırken dikkate alınması gereken önemli parçalardan biridir. Her ne kadar tek başlarına tercih belirleyici bir etken olmasa da görüntü kalitesi üzerinde önemli etkileri vardır. CCD (Charged Coupled Device) ve CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) olmak üzere iki tip sensör kullanılmaktadır. CCD sensörler CMOS sensörlere göre biraz daha iyi olmasından dolayı günümüz kameralarının büyük çoğunluğunda CCD algılayıcılar bulunmaktadır. Ayrıca CCD sensörler ışığa karşı daha duyarlıdır ve daha az gürültü oluşturur. Bu yüzden CCD sensörler karanlık ortamlarda daha iyi görüntü verirler. Bunun yanında CMOS sensörler daha ekonomik ve oldukça küçük ebatla üretilebilmektedir. Sensörler önemli bir etken olsa da seçim yapabilmek için tek başına yeterli değildir. Profesyonel kameralarda 3 CCD bulunmaktadır. 3 CCD, görüntü üretiminde temel olan üç rengi (kırmızı, yeşil, mavi) tek tek algılamaktadır ve daha kaliteli görüntü elde edilebilmektedir.

Video kameralarda kullanılan görüntü algılayıcıları 1, 2/3, 1/3 ve 1/4 inç olmak üzere farklı boyutadırlar. Köşegenler arası mesafeyi ifade eden bu ölçüler, algılayıcıların genel olarak kullanılabilir olan büyüklüklerini göstermektedir. Kullanılacak merceklerin bu boyutlara uygun olması gerekmektedir. Sensörün alanı büyüdükçe çözünürlük ve ışık algılaması artmaktadır. 1 inç (2.54 cm) algılayıcı en yüksek ışık algılama ve çözünürlüğe sahiptir. Bu algılayıcıda 2 milyondan fazla piksel bulunmaktadır ve bunlar sadece özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Daha düşük boyutlarda çözünürlük ve ışık hassasiyeti düşecektir. Gelişen üretim

teknolojisi sayesinde görüntü niteliği her geçen yıl yükselmekte ve daha küçük formatlarda yüksek görüntüler elde etmek mümkün olmaktadır.

Bir video kameradan elde edilecek sayısal görüntülerin kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden biri kamera çözünürlüğüdür. Bir kameranın çözünürlüğü, üzerindeki görüntü algılayıcısının kaç tane görüntü hücresine (piksel) sahip olduğu ve kaç piksellik görüntü üretebildiğinin göstergesidir. Algılayıcılar üzerinde yatay ve dikey sıralı ışığa duyarlı kapasitörler vardır ve her kapasitör bir piksel kaydeder. Böylelikle kaydedilen piksellerin sayısı kameranın dolayısıyla elde edilen görüntünün çözünürlüğünü verir. Aynı boyutta iki algılayıcı, üzerinde bulundurduğu kapasitör sayısının farklılığı nedeniyle farklı çözünürlükte görüntü verir. Kapasitör boyutlarının küçülmesi ile aynı alanda daha fazla piksel kaydı yapılabilmesine rağmen küçük kapasitörlerin daha çok enerji harcaması ve ısınmasından dolayı bu algılayıcılardan elde edilen görüntülerde kirlilik sorunu ortaya çıkabilmektedir. Sayısal görüntülerde piksel en küçük görüntü birimidir, bu terim aynı zamanda görüntünün boyutlarını belirtmek için kullanılmaktadır. Sayısal görüntüler yatay ve dikey sıralanmış piksellerden oluşmaktadır. Bir sayısal görüntüyü oluşturan yatay ve dikey piksel sayısı birbiriyle çarpılarak, o görüntünün kaç piksel büyüklüğünde veya başka bir ifade ile kaç piksel çözünürlüğe sahip olduğu hesaplanır.

Kullanılan video kaynağına bağlı olarak kamera çözünürlüğü 256x256 dan 4096x4096 ve daha yüksek değerler alabilir. Piksel sayısının (çözünürlük) artması daha net ve kaliteli görüntü anlamına gelir. Ayrıca bu sayı ne kadar çok olursa görüntü kalite kaybı olmadan o kadar çok büyütülebilir ve daha hassas metrik ölçümler yapılabilir. Bununla birlikte yüksek çözünürlüğe sahip kameraların fiyatları oldukça fazladır. Ayrıca çözünürlük resim boyutunu doğrudan etkilediğinden bilgisayarda görüntülerin saklanması için gerekli sabit disk gereksinimini arttıracaktır. Bu nedenle birçok uygulamada sadece gereken çözünürlük kullanılır.

Pikseller genellikle küçük karelerden oluşmaktadır. Fakat bazı kameralar ve görüntü yakalama kartları video sinyallerini kare piksele dönüştürmezler. Bu durumda dikdörtgen pikseller oluşur. Bu nedenle kameralarda ürettikleri pikselin şeklini tanımlayan ve bir pikselin genişliğinin yüksekliğine oranını gösteren görünüş oranının (aspect ratio) bilinmesi gereklidir. Bu oran özellikle görüntüler üzerinde

metrik ölçümler yapılacaksa örneğin bir bölgenin alanı hesaplanacaksa oldukça önemli olmaktadır. Eğer görünüş oranı 1:1 (kare) değilse görüntü işleme veya kalibrasyon esnasında zorluk yaşanacaktır.

Video kameralarda bir çekim ve kayıt formatı bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanlar PAL (Avrupa ve ülkemizde) ve NTSC (Amerika)'dır. PAL formatındaki bir kamera 768x576 çözünürlüğe sahiptir ve saniyede 25 görüntü kaydedebilir. NTSC görüntüde ise 640x480 çözünürlüğe sahiptir ve saniyede 30 görüntü elde edilebilir. PAL kameralarda daha düşük görüntü hızında daha yüksek çözünürlüğe sahip görüntü elde edilirken NTSC kameralarda daha yüksek çekim hızı ve daha düşük çözünürlükte görüntüler yakalanır.

Video kameraları fotoğraf makinelerinden ayıran en önemli fark, aralıksız görüntü kaydedebilmeleridir. Genellikle kameraların çekim hızı saniyede yakaladıkları görüntü sayısı (fps: frame per second) ile belirlenir. İnsan beyninin görüntüleri akıcı bir şekilde görebilmesi için saniyede 15 görüntü yeterlidir. Bu değer altındaki değerlerde, görüntünün takıldığı hissi ortaya çıkar. Standart bir kamera saniyede 25 görüntü (25fps) kaydetmektedir. Bununla birlikte günümüzde bazı çok özel uygulamalarda kullanılan ve saniyede 100000 çekim yapabilen kameralar mevcuttur fakat bu kameralar oldukça yüksek fiyatlara sahiptir. 500 ve 1000 fps hızlarında uygulamalara sahip dijital kameralar daha yaygın kullanılmaktadır. Bu kameraların kendilerine özgü donanımları ve yazılımları olmaktadır. Maliyetleri 10 bin doların üzerindedir. Bu kameralarla çok kısa süreli çekimler yapılabilir.

Kameralarla görüntünün elde edilmesi sırasında özellikle hareketli nesnelerin izlenmesinde görüntü kalitesini etkileyen iki farklı çekim tekniği kullanılmaktadır. Bunlar karışık (interlaced) ve aşamalı (progressive) taramadır. Her iki teknikten hangisini kullanan kameranın seçileceği uygulamaya, video sistemin kullanım amacına bağlı olarak hareketli veya hareketsiz görüntünün elde edilmesine göre değişmektedir. Tarama tekniklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için PAL formatına sahip bir kamera düşünülürse bu kamera 576 satır sayısına sahiptir ve saniyede 25 kare (frame) görüntü elde edilir. Karışık taramada öncelikle 576 satırın 1/50 sn'lik zaman diliminde tek sayılı satırları (1,3,5,...) taranır ve sonraki 1/50 sn'lik zaman

için çift satırlar (2,4,6,...) taranır. Daha sonra bu satırlar 1/25 sn'lik zaman dilimlerinde birleştirilirler. Bu durumda 1 sn de elde edilen 25 kare görüntü aslında 50 yarım kare görüntüden meydana gelmektedir. Bu yarım kare görüntüler alan (field) olarak adlandırılmaktadır. Tek ve çift satırların taranması sırasında 1/50 sn'lik bir zaman farkı olacağından karışık taramada, çok hareketli görüntülerde bozulmalar ve katmanlı görüntüler meydana gelir. Çünkü aynı anda tüm satırların sadece yarısı hareketli nesneyi izlerken diğer yarısı yeniden taranmayı beklemektedir. Aşamalı (progressive) taramada ise tüm satırlar (1,2,3,...) aynı anda taranır ve 1/50 saniyede tam bir görüntü elde edilir. Bu nedenle aşamalı tarama karışık taramaya göre saniyede iki kat fazla kare görüntüleyerek aynı zaman içerisinde daha zengin ve belirgin görüntüler sağlar. Bu taramayı kullanan kameralar özellikle hareketli nesnelerin çekiminde, titreşimsiz ve daha akıcı bir görüntü sunarlar fakat fiyatları daha yüksektir.

Yapılan çalışmada, 3 adet JVC c920e marka renkli kamera kullanılmıştır. Kullanılan kameraların temel özellikleri:

- Sinyal sistemi : PAL
- Görüntü hızı : 25 fps (saniyede 25 görüntü)
- Görüntü sensörü : 1/3 inç CCD
- Etkili piksel sayısı : 440.000 piksel (752 yatay x 586 dikey)
- Yatay çözünürlük : 540 TVL
- Tarama şekli : 2:1 karışık (interlaced)
- Işık hassasiyeti : 0.7 lüks
- Lens montaj tipi : C / CS

4.2.2. Mercekler (Lensler)

Mercekler, bir görüntüleme sisteminin tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Merceklerin temel işlevi bir alandan yansıyan ışığı toplamak ve kameranin algılayıcısı (CCD sensör) üzerine net, berrak bir görüntü odaklamaktır.

Günümüzde, el kameralarında mercekler kamera gövdesi üzerinde sabit halde bulunurken, endüstriyel kameralarda mercek ve kamera ayrı parçalardır. Kameraya takılıp çıkartılabilmekte ve ihtiyaca göre değiştirilebilmektedir.

Mercekler, görüntüleyicide oluşacak olan resmin boyutunu, şeklini ve netliğini doğrudan etkilediğinden mercek seçimi oldukça önemlidir. Bir kameranın görüntüleyebileceği alan; kamera algılayıcısının büyüklüğü, merceğin odak uzaklığı ve cismin mercekten olan uzaklığına bağlıdır. İstenilen bir görüş alanı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir.

$$f = b(D / B) \quad (4.1)$$

burada b algılayıcı genişliği, D görüntüsü istenilen nesneye olan mesafe, B görüntülenecek alanın genişliğidir. Eğer, görüş alanı uygun değilse görüş alanını arttırmak veya azaltmak için farklı bir mercek (örneğin geniş açılı mercek, telefoto mercek, vb.) kullanılması gerekebilir. Odak uzaklığı, kamera algılayıcısı ile mercek arasındaki mesafedir ve bu değer mercekler üzerinde milimetre cinsinden yazılmaktadır. Odak uzaklığı arttıkça lensin görüş açısı daralır. Başka bir ifade ile bu değer büyüdükçe, görüntüsü alınan nesne daha yakın görünür. Değer küçüldükçe, çevre daha geniş bir açıyla görülebilir. Geniş açılı bir mercek kısa bir odak uzaklığına sahiptir, bir telefoto mercek ise uzun bir odak uzaklığına sahiptir. Geniş açılı merceklerde görüntü bombeli olurken telefoto merceklerde daha düz bir görüntü elde edilir.

Genellikle mercekler odak uzaklığına göre sabit odaklı, değişken odaklı ve zoom (yakınlaştırma) mercekler olmak üzere üç türe ayrılır. Odak uzaklığı sabit merceklerde, optik olarak büyütme/küçültme mümkün değildir. Değişken odaklı merceklerde, odak uzaklığını değiştirerek yakınlaştırma yapabilmek mümkündür. Zoom merceklerde ise odak uzaklığı değiştirilmeden yakınlaştırma yapılabilir.

Bir merceğin başarısı temel olarak iki önemli unsura bağlıdır. Bunlar odak uzaklığı ve algılayıcıya ulaşan ışık miktarıdır. Odak uzaklığı, kameranın görüş açısını belirlerken ışık miktarı iris tarafından ayarlanır. Merceklerin iris özelliği, kameranın ışık değişimlerine bağlı olarak aldığı görüntü kalitesini belirler. Işık

şiddetinin sabit veya değişken olmasına göre elle ayarlanabilir (manuel) veya otomatik iris mercekler kullanılmaktadır. Bu sayede kameranın her zaman aynı oranda ışığı, görüntü toplama ünitesine alması sağlanacaktır. Merceklerdeki irisin çalışma prensibi insan gözündeki irisle benzer şekildedir. Ortamdaki ışık miktarı arttıkça göze gelen ışığı normal seviyede tutmak için gözler kısılır, azaldıkça daha fazla ışık almak için açılır.

Bir merceğin ışık toplama kapasitesi, mercek açılışı ile odak uzaklığı arasındaki ilişkiye bağlıdır. f simgesiyle gösterilen ve genel olarak "F- Stop" adıyla bilinen bu ilişki merceklerin kenarında ya da önünde basılıdır. Daha büyük f sayısına sahip mercekler görüntü sensörüne daha az ışık iletirler. Daha düşük f numarasına sahip mercekler görüntü sensörüne daha çok ışık ilettiklerinden, düşük aydınlatmalı ortamlarda daha iyi kalitede görüntü alınmasına olanak sağlarlar.

Mercekler, sensör (algılayıcı) ölçülerine göre üretilirler. Bir merceğin bir kamerada kullanılabilmesi için ölçüsünün kameradaki CCD algılayıcısının büyüklüğüne eşit veya büyük olması gereklidir. 1/2 inç formatındaki bir lens, 1/2 ve 1/3 inç bir kamerada kullanılabilir, fakat 1/3 inç formatındaki bir lens sadece 1/3 inç kamerada kullanılabilir.

Mercek seçiminde diğer bir ölçüt de merceğin kameraya montaj (mount) tipidir. Mercekler montaj tipine göre C ve CS montaj tipi olmak üzere ikiye ayrılırlar. C-montaj bir lens C tipi bir yuvaya sahip bir kamerada veya CS yuvaya sahip bir kameraya 5 mm'lik adaptör takılarak kullanılabilir. CS-montaj bir lens CS yuvaya sahip bir kameralarda kullanılabilir ama C yuvalı bir kamerada kullanılamaz. Son yıllarda üretilen tüm kameralar her iki montaj tipine sahip merceklerin takılabileceği şekilde üretilmektedir.

Yapılan çalışmada TOKINA TVR2314 marka değişken odaklı geniş açılı bir mercek kullanılmıştır. Kullanılan merceğin temel özellikleri:

- Odak uzaklığı : 2,3-6 mm
- Görüntü formatı : 1/3 inç
- Montaj tipi : CS
- İris oranı : F1:1.4-kapalı
- Görüş açısı : 114.75° - 48.15° (yatay) ve 86.25° - 36.09° (düşey)

4.2.3. Aydınlatma

Bir görüntü sistemi tasarlariken, genellikle kameranın özellikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ancak incelenmek istenen nesne yeterli ve dikkatli şekilde aydınlatılmadığı takdirde alınan görüntü ile istenilen sonuca ulaşamaz. Bu önemli gereksinimler genellikle ihmal edilir veya gereken özen çoğu kez gösterilmez. Kameralar bir görüntüdeki çarparak yansıyan ışığı gördüklerinden resim kalitesinin iyi olması için ortamın ışıklandırması, ister doğal ister yapay ışık ya da her ikisi birden yeterli düzeyde olmalıdır. Kötü ışıklandırma ya da yanlış optik elemanlar kullanıldığında, en iyi şekilde tasarlanmış bir görüntü sistemi dahi kapasitesinin çok altında bir başarı gösterecektir. Doğru seçilmiş ışıklandırma ve optik elemanlar en iyi görüntü ve en hassas sonuçlar verecektir. Nesnenin gerektiği şekilde aydınlatılması mümkün olan en iyi görüntünün yakalanabilmesi için ön koşuldur. İncelenmek istenen nesnenin geometrisi aydınlatma tercihlerinin yönlendirilmesindeki en önemli faktördür.

Görüntü işleme için kullanılması tasarlanan kamera tipi, ışık kaynağının da nasıl düzenleneceğini belirler. Bir kameranın ışık hassasiyeti, algılayıcısı üzerine düşen ışık miktarının ne kadarının algıladığını gösterir ve lüks (lux) olarak ifade edilir. Bu değer ne kadar küçükse kameranın ışığa o kadar hassasiyeti vardır anlamına gelir ve az ışık alan ortamlarda daha iyi sonuç alınabileceğini gösterir.

Elde edilen görüntüde kirlilik yaşanmaması için bir aydınlatma sistemi kameranın görüş alanındaki birimlere mümkün olduğunca düzenli ve homojen ışık vermelidir. Aynı zamanda aydınlatma sırasında gölgelerin ve yansımaların kontrol edilebilmesi gereklidir. Değişik geometrili alanlar için farklı yoğunlukla aydınlatma yapabilen birçok özel tasarım ışık sistemi bulunmaktadır. Genelde en çok kullanılan ışık tipleri flüoresan, LED ve yüksek yoğunluklu ışık ve lazerlerdir.

Aydınlatma sisteminin dizayn edilmesinde bazı noktalara dikkat edilmesi performans açısından önemlidir. Örneğin, görüntülenecek nesne üzerindeki parlak yansımalar CCD (Charge Couple Device) kamerada körleşmeye (blooming) sebep olmaktadır. Nokta kaynak gibi bazı ışıklandırma sistemleri ise nesne üzerinde gölgeler oluşturarak bir kameranın detayları görmesini zorlaştırabilirler. Bu nedenle

özel uygulamalar hariç nokta aydınlatmalar kullanılmamaktadır. Bu şekilde elde edilmiş görüntülerin işlenmesi sırasında bir takım sorunlarla karşılaşılabilir ve istenilen detaylara ulaşılamayabilir. Dağınık ışık kaynakları, aydınlatmayı geniş bir alana yayarak ve cismi pek çok açıdan aydınlatarak istenmeyen yansıma ve gölgeleri önlerler.

Yapılan çalışmada, laboratuvar ortamında deney kanalı üzerinde bulunan flüoresan lambalarla aydınlatma sağlanmıştır ve gün ışığından da yararlanılmıştır. Kanal arka yüzeyi kaplama ile kaplandığından laboratuvar içerisindeki nesnelerin bu yüzey üzerinde yansımaması sağlanmış ve dış ortamdan gelen ışıkların bu yüzeyde körleşme yapmaması için kameraların arka kısmı beyaz perdeler ile kapatılmıştır.

4.2.4. Görüntü Yakalama Kartı (Frame Grabber):

Bir görüntüleme sisteminde, görüntü yakalama kartları kilit bir role sahiptir. Bu elektronik kartlar, analog veya dijital bir kameradan gelen görüntü sinyallerini, mümkün olan en az kayıp ve bozulmayla sayısal veriye çevirerek bilgisayar hafızasına aktarılmasını sağlarlar. Video yakalama kartlarından (video capture card) farklı olarak bu kartlar kameradan gelen görüntü sinyallerini bilgisayar ortamına doğrudan resim olarak aktarabilirler. Ayrıca bu kartlar programlanabilir veya kendi yazılımlarıyla kontrol edilebilirler. Bu özelliklerinden dolayı görüntü yakalama kartları; makine görme, otomatik ürün tanıma, akışkanlar mekaniğinde parçacık görüntülemeli hız (PIV) tekniği gibi görüntü işleme yöntemlerinin eş zamanlı uygulandığı sistemlerin vazgeçilmez parçalarıdır. Çeşitli kamera türlerini desteklemek için farklı konfigürasyona sahip olabilirler ancak genellikle her kart belirli kamera türlerini destekleyecek şekilde üretilmektedir. Görüntü yakalama kartları bilgisayarlar içerisine yerleştirilirler ve farklı veri yollarını (bus) kullanan tipleri mevcuttur. En çok PCI veri yolu kullanılmakla birlikte IEEE1394 (FireWire) ve USB gibi yeni nesil veri yollarını kullanan kartlar da bulunmaktadır.

Bu kartların seçiminde; karta uygun kameraların bilinmesi, kartın birden fazla kamerayı destekleyip desteklemediği, çekim hızı, çözünürlük gibi kamera özellikleriyle kart özelliklerinin uyumlu olması, kartın kayıpsız görüntü

aktarabilmesi için istenilen veri iletim hızına sahip olması gibi konulara dikkat edilmelidir. Ayrıca kendi yazılımlarının bulunup bulunmadığı veya başka paket yazılımlarla desteklenip desteklenmediği araştırılmalıdır. Aksi takdirde görüntülerin bilgisayar ortamına aktarılması konusunda ciddi sıkıntılar yaşanacaktır. Bu yazılımların dışarıdan temin edilmesi sistemin kurulum maliyetini oldukça arttıracaktır.

Bu tez kapsamında 3 kamera ile eş zamanlı görüntü alınarak su yüzü profillerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle yapılan çalışmada 4 kameradan eş zamanlı görüntü yakalama kapasitesine sahip EURESYS firmasına ait Picolo Alert görüntü yakalama kartı kullanılmıştır. Farklı PCI veri yolu hızlarını kullanabilen bu kart saniyede 200 Mb veri iletim kapasitesine sahiptir. Picolo Alert kartı ile karışık tarama (interlaced scan) kullanan PAL formatında dört kamera ile görüntü karesi (frame) olarak saniyede 100 (100fps) ve alan (field) olarak saniyede 200 yarım görüntü karesi eş zamanlı olarak kaydedilebilmektedir.

4.2.5. Bilgisayar

Bir görüntüleme sisteminin en önemli üyesi bilgisayarlardır. Sistemin kontrolü, kameradan gelen sayısal görüntülerin işlenerek kaydedilmesi, kaydedilen bu görüntülerin değerlendirilmesi bilgisayarlar yardımıyla yapılabilmektedir. Bu işlemlerin eksiksiz yerine getirilebilmesi için bilgisayarların yüksek hız ve depolama kapasiteli donanım birimlerine sahip olmaları gerekmektedir. Bilgisayar üzerinde kartın takılabileceği uygun PCI veya diğer veri yollarına ait yuvalar bulunmalıdır.

Görüntü yakalama kartından gelen görüntü sinyallerinin bilgisayar ortamına kayıpsız aktarılabilmesi için bilgisayarın başta işlemcisi olmak üzere veri yollarının, bellek (RAM) ve sabit diskinin (hard disk) yeterince hızlı olması zorunludur. Standart bir kamera görüntüsü sabit disk üzerinde sıkıştırılmamış halde 1 sn de ortalama 30 Mb yer kaplamaktadır. Günümüzde kullanılan bazı görüntü sıkıştırma teknikleriyle (jpeg, divx, mpeg2, mpeg4) bu miktar oldukça azaltılabilmekle beraber görüntü işleme uygulamalarında hassas sonuçlar istendiğinden, bazı kayıpların olduğu sıkıştırılmış görüntüler yerine orijinal görüntülerin kullanılması

gerekmektedir. Ayrıca birçok görüntü yakalama kartı, görüntüleri sıkıştırmadan bilgisayara aktarmaktadır. Birden fazla kameranın kullanıldığı veya uzun süreli çekimlerde görüntülerin kaydedilebilmesi için daha çok yere ihtiyaç duyulacaktır. Tüm bunlar bilgisayarlarda yüksek kapasiteli sabit disk ihtiyacını ortaya koymaktadır. Ayrıca görüntü işleme aşamasında da çok sayıda görüntü ile çalışılacağından ve görüntüler üzerinde yeniden boyutlandırma, renklendirme, kalibrasyon, filtreleme vb. işlemlerin daha çabuk yapılabilmesi için hızlı, yüksek kapasiteli işlemci ve belleklere (RAM) gereksinim vardır.

Bu çalışmada standart PCI yuvalarına sahip Pentium-4 3.2 GHz işlemcili, 2 GB RAM ve 120 GB sabit diske sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Ayrıca 160 GB harici bir sabit diskten yedekleme birimi olarak yararlanılmıştır.

4.2.6. Yazılım

Yazılım ve donanımlar, bilgisayara dayalı sistemlerin ayrılmaz iki önemli parçasıdır. Donanımlar yazılımsız işlevsel olarak çalıştırılmazlar, yazılımlar da donanım olmaksızın kullanılamazlar. Bu nedenle yazılımlar bir görüntüleme sisteminin kalbini oluşturur. Bir yazılım beklentilere (tam anlamıyla) cevap verebilmesinin yanında kolay kullanılabilir ve görsel bir ara yüze sahip olmalıdır. Görüntü işlemede temel adımlar, öncelikle görüntünün elde edilmesi (image acquisition) ve daha sonra görüntünün işlenmesidir (image processing). Bu amaçla kullanılacak yazılımlar, kamera veya görüntü yakalama kartından gelen görüntüleri hatasız olarak bilgisayara kaydedilebilmeli ve bazı temel görüntü işleme fonksiyonlarını (kenar tanıma, eşikleme, renk filtreleme, uzunluk ölçme vb.) içlerinde barındırmalıdır. Ayrıca iyi bir yazılım kullanıcının kodlar (macro) ekleyerek yazılımın fonksiyonlarından yararlanmasına olanak tanımalıdır.

Bu çalışmada, görüntülerin kaydedilmesi, kalibrasyonlarının yapılması, işlenmesi ve metrik okumaların yapılması amacıyla farklı yazılımlardan yararlanılmıştır. Ayrıca su seviyesinin zamana karşı noktasal değişimlerinin belirlenmesi amacıyla görüntü işleme yazılımı içerisinde bir kod yazılmıştır. Görüntülerin bilgisayar ortamına kaydedilmesi amacıyla “Streampix” adlı yazılım

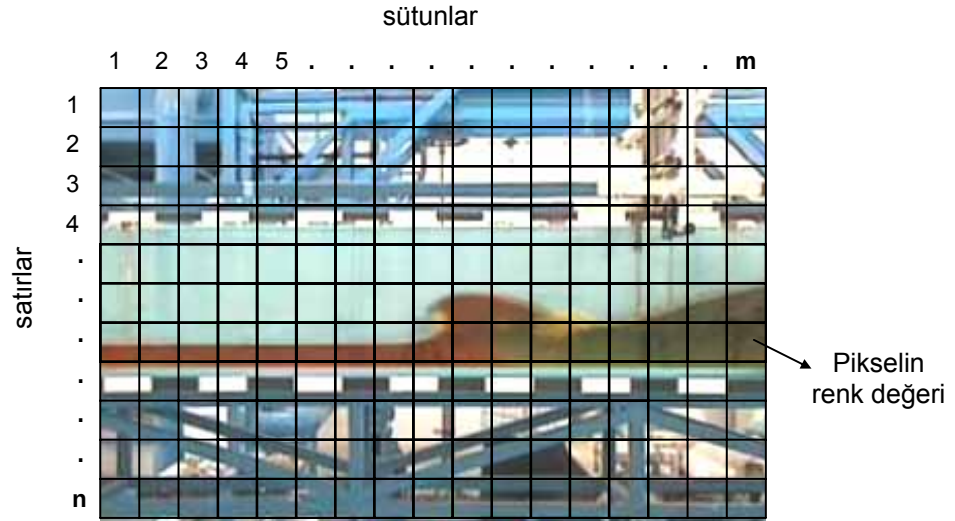
kullanılmıştır. Bu yazılımla 3 kameradan alınan görüntüler bir kayıp olmaksızın eş zamanlı olarak doğrudan bilgisayar sabit diskine veya RAM (bellek) üzerine kaydedilebilmektedir. Saniyede 625 Mb görüntü kaydı yapılabilmektedir ve kaydedilen her görüntü üzerinde kayıt süreleri tam olarak gösterilebilmektedir. Benzer amaçla “Streams 5” veya “Video Savant” adlı yazılımlar da kullanılabilmektedir. Elde edilen görüntülerin işlenmesi ve metrik olarak uzunluklarının hesaplanması genel amaçlı “Image pro plus” ve “Imagej” yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mercek kalibrasyonları ise “Camera Calibration Toolbox for Matlab” adlı Matlab yazılımında hazırlanmış bilgisayar kodu yardımıyla yapılmıştır. Ayrıca görüntülerin video haline getirilmesi veya video görüntülerden resimlerin elde edilebilmesi, toplu halde görüntü işlemlerinin (batch processing) yapılabilmesi amacıyla bazı basit yardımcı programlardan da yararlanılmıştır.

4.3. Görüntü İşleme ve Analizi

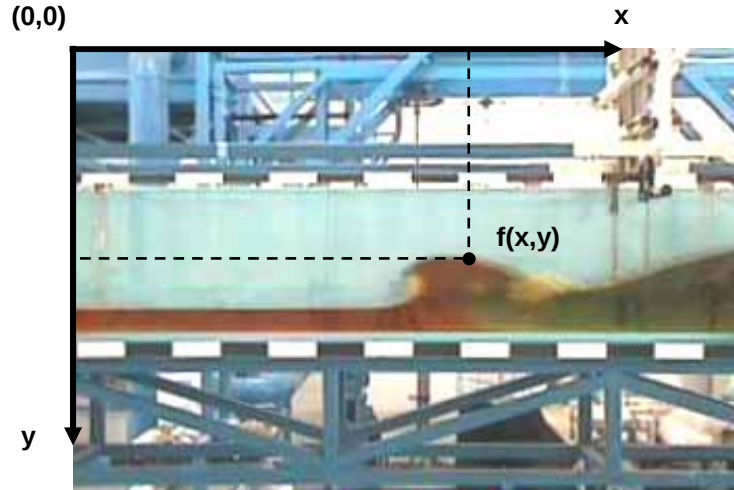
4.3.1. Görüntünün Tanımlanması ve Modellenmesi

Sayısal görüntüler, her biri birer renk değeri içeren çok sayıda küçük hücrenin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Bir görüntünün temel yapıtaşı olan bu hücreler piksel olarak adlandırılırlar ve genellikle kare şeklindedirler (Şekil 4.2). Dolayısıyla bir görüntü piksellerin oluşturduğu satır ve sütunlardan meydana gelen bir matris olarak düşünülebilir. Bu matris içerisinde herhangi bir pikselin iki temel özelliği söz konusudur. Bunlardan ilki pikselin görüntü matrisinde sahip olduğu matris koordinatı ve diğeri de aldığı gri renk seviyesi (ışık hassasiyeti) değeridir. Bu özellikleriyle görüntü aslında matematiksel olarak iki boyutlu bir $f(x,y)$ fonksiyonunu tanımlamaktadır (Şekil 4.3). Buradaki x ve y değişkeni bir renk numarası ile temsil edilen pikselin koordinatıdır ve tam sayı değerini alırlar. $f(x,y)$ fonksiyonunun değeri ise (x,y) noktasındaki pikselin ışıklılık (intensity) değerini başka bir ifade ile bir renk numarası ile temsil edilen gri renk seviyesini göstermektedir. Ekranın sol üst köşesindeki piksel, koordinat sisteminin varsayılan (default) başlangıç noktasıdır. Bu pikselin koordinatları $(0,0)$ 'dır. Ekranın yatay yönü x , dikey yönü ise y koordinatını gösterir. x koordinatı sağa doğru, y koordinatı ise

aşağı doğru gidildikçe artmaktadır (Şekil 4.3). Başlangıç koordinatları daha sonra istenilirse basit enterpolasyonlar kullanılarak değiştirilebilmektedir. 768x576 çözünürlüğe sahip bir kamera düşünülürse, bu durumda elde edilen görüntüdeki x değeri en çok 767, y değeri ise 575 piksel olabilmektedir.



Şekil 4.2. Matris olarak görüntünün temsil edilmesi



Şekil 4.3. Bir f fonksiyonu olarak görüntünün temsil edilmesi

Görüntüdeki bir pikselin koordinatı dışındaki diğer bir özelliği de gri renk seviyesidir. Örneğin Siyah-Beyaz resim sadece iki gri değerden oluşan bir resimdir. Bu tür bir görüntüde her bir piksel ya siyah ya da beyaz olarak oluşur. Burada sembolik olarak beyaz pikseller 1, siyah pikseller 0 değeri ile gösterilebilir. Gerçekte renksiz bir resim gri tonlu renklere sahiptir. Gri tonlu görüntülerde; görüntü farklı gri ton değerlerinden oluşur. Gri değer aralıkları: $G=\{0,1,2,3,\dots,255\}$ şeklinde ifade edilir. Bu, bir gri tonlu görüntüde 256 tane farklı gri ton değeri daha doğrusu gri değer bulunabildiği anlamına gelmektedir. 0 gri değeri kural olarak siyah renge, 255 gri değeri ise beyaza karşılık gelir. Bu değerler arasında ise farklı gri tonlar oluşur.

Donanım sınırlamalarından dolayı gri seviyesi sayısı çoğunlukla 2'nin kuvvetleri ile belirlenmektedir. En sık kullanılan 8-bit (2^8) olmakla birlikte bazı uygulamalarda 16-bit'de kullanılmaktadır. Burada 256 gri değer bir byte olarak tanımlanabilir (1 Byte=8 Bit ve $2^8=256$). Eğer bir görüntü 64 gri düzey ile gösterilirse 256 gri renk düzeyine göre görüntüde daha az renk olduğundan daha kötü görüntü elde edilecektir.

Renkli görüntüler, bilgisayar ekranlarında 24 bit'lik veri olarak görüntülenmektedir. Görüntüleme aynı nesneye ait R (Red-Kırmızı), G (Green-Yeşil), B (Blue-Mavi) olarak kodlanmış (filtrelenmiş) üç adet gri düzeyli görüntünün üst üste ekrana iletilmesi ile renkli görüntüler oluşmaktadır. Elektromanyetik spektrumda 0,4-0,5 μm dalga boyu mavi renge; 0,5-0,6 μm dalga boyu yeşil renge; 0,6-0,7 μm dalga boyu kırmızı renge karşılık gelir. Bu dalga boylarında elde edilen üç gri düzeyli görüntü bilgisayar ekranında sırası ile kırmızı-yeşil-mavi kombinasyonunda üst üste düşürülecek olursa renkli görüntü elde edilir. (Matematiksel olarak bu üç renk için ayrı ayrı matrisler düşünülebilir.)

Renkli görüntü kavramı, orijinal görüntüdeki gri değerlerin sırasıyla kırmızı, yeşil, mavi filtrelerden geçirilmesi; başka bir ifade ile gri değerlerin kırmızı, yeşil, mavinin tonları şeklinde ifade edilip üst üste çakıştırılması ve oluşan renk karışımından da doğal renklerin elde edilmesi biçiminde açıklanabilir. Burada renk sırası değiştirilirse (mavi-yeşil-kırmızı veya yeşil-kırmızı-mavi), görüntüdeki renklerde değişecektir. Bunun nedeni sayısal görüntüdeki renk numarasına karşılık yeni bir rengin atanmış olmasıdır.

Renkli görüntüler, bilgisayarlarda gri düzeyli görüntülere göre üç kat daha fazla yer kaplarlar. Bununla birlikte renk, kullanıcının görüntüleri daha etkili kullanılabilmesini sağlayan bir araçtır. Görüntü işlemede renkler bir yada birkaç renk uzayında sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmalar insan gözünün görüntüyü daha iyi yorumlayabilmesi veya renklerin ekranda daha kaliteli görüntülenebilmesi gibi amaçlara göre yapılır. Bunlardan bazıları RGB (Red-Green-Blue, Kırmızı-Yeşil-Mavi) uzayı ve HSV (Hue Saturation Value-Renk Doyma Değeri) uzayı ve HSI (Hue Saturation Intensity- Renk Doyma Yoğunluğu) uzayıdır. Burada sadece RGB uzayından kısaca bahsedilecektir.

Bir görüntünün bilgisayarda görüntülenmesi için genellikle RGB renkleri kullanılır. Herhangi bir renk bu üç rengin belirli yoğunluklarda karıştırılması ile elde edilir. RGB uzayı koordinat eksenleri kırmızı, yeşil ve mavi olan 3-boyutlu bir uzay olarak ele alınabilir. Oluşturulmak istenen herhangi bir renk, bu üç ana rengin koordinatları (R,G,B) cinsinden gösterilebilir. Burada sıfıra (orijin) yakın değerler koyu renk 255'e yakın değerler ise açık renkleri tanımlar. (0,0,0) noktası siyaha, (255,255,255) noktası ise beyaza karşılık gelir. R,G,B değerleri birbirlerine eşit verilirse gri tonlar elde edilir. 255 gri seviye için yaklaşık 16 Milyon renk (255x255x255) oluşturulabilir.

Sonuç olarak bir görüntüdeki rengi değiştirebilmek için ilk parametre rengin paletteki sıra numarası (RGB sırası) ve ikinci parametre de rengi oluşturmak için kullanılacak R,G,B değerlerinin karışım oranıdır.

Sayısal bir görüntünün kalitesini en çok etkileyen özellikler

- görüntüdeki renk sayısı,
- görüntüdeki piksel sayısı başka bir ifade ile çözünürlüğüdür.

Bir görüntüdeki renk sayısı ne kadar fazla ise, görüntüde o kadar çok detay var demektir ve bu da görüntünün daha duyarlı bilgi içermesi anlamına gelir. Renk sayısı azaldıkça görüntüdeki detay sayısı azalmakta, buna bağlı olarak görüntü kalitesi düşmektedir. İnsan gözü en iyi şartlar altında en çok 256 farklı renk tonunu algılamaktadır. Bu nedenle insanın bakışı için görüntüde en çok 256 renk kullanmak yeterli olmaktadır. Ancak, bilgisayarlar 16 milyon ve daha fazla sayıda renk tonlarını

oluşturabilmekte ve algılayabilmektedir. Dolayısıyla, görüntü işleme çalışmalarında daha çok renk kullanılarak daha etkili sonuçlar elde edilebilir (Doğan ve ark., 1999)

Görüntünün piksel olarak boyutu, görüntünün genişlik ve yüksekliğinin kaç tane pikselden oluştuğunu ifade eder ve çözünürlük olarak adlandırılır. Görüntü boyutu sayısallaştırma esnasında kamera sensörü üzerinde belirlenir. Piksel sayısının fazla olması görüntüde daha çok ayrıntı olduğu anlamına gelir. Dolayısıyla çözünürlük görüntü kalitesini artırmaktadır. Bir görüntü büyütüldükçe görüntüde ayrıntıları yorumlama olanağı gittikçe yok olur ve sonunda piksel görüntüsüne ulaşılır. Yüksek çözünürlüğe sahip bir görüntüde daha çok ayrıntı olduğundan görüntünün büyütülmesi görüntü kalitesini pek etkilemez. Ayrıntılara ihtiyaç duyulan ve hassas metrik ölçümlerin yapılması gereken görüntü uygulamalarında, yüksek çözünürlüklü görüntülere ihtiyaç duyulur. Bununla birlikte görüntünün çözünürlüğü arttıkça bilgisayar ortamında görüntünün kapladığı yer diğer bir deyişle dosya boyutu artmaktadır.

4.3.2. Görüntü İşleme Teknikleri

Dijital bir resim haline getirilmiş olan gerçek yaşamdaki görüntülerin, bir girdi resim olarak işlenerek, o resmin özelliklerinin ve görüntüsünün değiştirilmesi sonucunda yeni bir resmin oluşturulması görüntü işleme olarak tanımlanabilir. Başka bir ifade ile sayısal görüntüler elde edildikten sonra, bilgisayar ortamında bunları arka plan gürültüsünden (noise), aydınlatma sistemi tarafından oluşan istenmeyen yansımalarından kurtulmak için çeşitli filtrelemeler yapılabilir veya görüntü kalitesini artırmak, görüntü alma sistemi (lens, kamera) tarafından oluşan geometrik değişimleri, bozulmaları düzeltmek için görüntü onarımı uygulanabilir. Sayısal görüntüler üzerinde uygulanan bu tür işlemlerin hepsine genel olarak sayısal görüntü işleme (digital image processing) adı verilmektedir. Görüntü işleme uygulamaları çok çeşitlidir: Görüntü iyileştirme (image enhancement), görüntü süzgeçleme ve onarma (image filtering and restoration), görüntü sıkıştırma (image compression) görüntüdeki cisimlerin algılanması (pattern recognition), görüntüdeki cisimlerin özelliklerinin çıkarılması (feature extraction), görüntüdeki cisimlerin sınırlarının

belirlenmesi (edge detection, line tracing), vb. daha birçok görüntü işleme uygulaması vardır.

Görüntü iyileştirme (Image Enhancement), görüntünün görsel yorumlama ve anlaşılmasını artırmak için yapılır. Örneğin, görüntüdeki bulanıklığın giderilmesi veya keskinleştirilmesi, kenarların belirginleştirilmesi, görüntüdeki zıtlığın veya parlaklığın artırılması veya gürültünün kaldırılması gibi uygulamalardır. Bu gruptaki teknikler nokta işlemleri olarak da bilinir. Her piksel değeri bazı matematiksel işlemlerin uygulanmasıyla bir önceki piksel'in değerine bağlı olan yeni bir piksel ile yer değiştirir. En önemli nokta, işlemleri eşikleme (thresholding), bölümleme (segmentation), kontrast germe veya iyileştirme (contrast stretching and enhancement) ve histogram eşitleme olarak sıralanabilir.

Histogram, bir görüntüdeki yansıma değerlerinin grafik gösterimidir. Grafikte yansıma değerleri (0–255) x ekseninde ve bu değerlerin görüntüde tekrar etme sıklığı ise y ekseninde gösterilmektedir. Bir görüntünün, belirli dağılıma sahip yansıma değerleri üzerinde işlemler yapılarak görüntüde istenilen özellikler belirgin hale getirilebilir.

Eşikleme (Threshold) tekniği ile değişik gri ton seviyelerine sahip bir resim ikili sayı (binary) haline yani; 0 siyah, 1 beyaz rengi göstermek üzere resim 0 ve 1'lerden oluşan bir matris haline getirilir. Eşikleme yaparken bir eşik değeri belirlenir ve bu değerin üstündeki değerler için çıkış görüntüsündeki ilgili piksele 1, altındaki değerler içinde 0 değeri atanır.

Bölümleme (segmentation) işlemiyle bir görüntüdeki istenilen renkler (veya gri seviyeler) görsel olarak belirlenebilir ve daha sonra bu renkler gerekirse netleştirilebilir veya tüm görüntüden ayrıştırılabilir. Bölümleme ile görüntüdeki farklı parçalar veya nesneler birbirlerinden ayrılabilir ve bunlar arka plandaki gürültülerden temizlenebilir. Bölümleme algoritmaları, bir görüntüdeki parçaların veya nesnelerin gruplandırılması, sınıflandırılması için kullanılır. Bölümleme aslında bir görüntüdeki çizgileri, daireleri veya arabalar, binalar, yollar gibi belirli şekillerin ele alınıp incelenmesi için yapılan bir gruplandırma işlemidir.

Kontrast iyileştirme ile görüntünün genel parlaklık ve kontrast ayarlarının yanında kırmızı, mavi ve yeşil renklere ait kontrast ayarlamaları da yapılabilir.

Görüntüde farklı renklere ait parlaklık, kontrast ayarlamalarıyla bir pikseldeki renk değerleri (düzeyleri) değiştirilerek görüntü ve renkler belirginleştirilebilir, aynı zamanda renk sınırları keskinleştirilebilir.

Görüntünün tamiri (Restoration) için geliştirilen algoritmalar ile bilinen bir nedenden dolayı zarar görmüş olan görüntüde, düzeltme işlemlerinin yapılabilmesi amaçlanır. Bunlara örnek olarak hareketten dolayı oluşan bulanıklığın giderilmesi, optik (mercek) bozulmaların kaldırılması verilebilir.

Görüntü sıkıştırma ise sayısal bir görüntüyü saklamak için ihtiyaç duyulan bellek miktarını azaltmak amacıyla yapılan görüntü işleme teknikleridir. görüntüyü sıkıştırma ihtiyacı, bazı algılayıcılardan veri elde ederken yüksek hacimli verilerin, sınırlı iletim hızlarıyla gönderilmesi zorunluluğundan dolayı ortaya çıkmıştır. Veriler sıkıştırılırken uygulama amacı dışında kalan verilerin atılması da mümkündür. Ancak görüntüde önemli bilgi kayıplarına yol açmamak gerekir.

Bu görüntü işlemlerinden filtreler oldukça önemlidir. Görüntülerin analiz edilmeden önce bazı filtrelerden geçirilmesi gereklidir. Filtreler görüntü zenginleştirme amacı ile de uygulanan, adından da anlaşılacağı gibi görüntüde belirli ayrıntıların ayıklanması veya daha belirgin hale getirilmesi gibi işlemleri gerçekleştiren algoritmalarlardır. Özellikle, resimleri sayısal olarak kaydeden cihazların görüntüyü hatalı bir şekilde elde etmeleri ve aydınlatma gibi çevre koşullarının yetersizliğinden kaynaklanan birçok kayıp ya da sorun görüntü işleme filtreleri kullanılarak en aza indirilebilmektedir. Farklı amaçlar için farklı filtreleme algoritmaları vardır. Bunlara kenar keskinleştirme, kenar yakalama, görüntü yumuşatma ve bunun gibi daha birçok amaçla kullanılan filtreler örnek verilebilir.

Filtreleme teknikleri frekans ya da uzaysal (spatial) ortamda gerçekleştirilir. Uzaysal ortam görüntüdeki pikseller topluluğunu ifade eder ve uzaysal ortam metotları ise doğrudan bu pikseller üzerinde yapılan işlemleri belirtmektedir. Görüntü işleme için frekans ortamında yapılan filtreleme Fourier Dönüşümü kullanılarak yapılmaktadır.

Alçak geçiren bir filtre (low pass filter) büyük, benzer tonda homojen alanları belirginleştirmek ve çok küçük detayları azaltarak sadeleştirmek üzere kullanılır. Yüksek geçiren filtreler (high pass filters) ise küçük detayları

keskinleştirmek ve mümkün olduğu kadar çok detayı ortaya çıkarmak için kullanılır. Doğrusal filtreler veya kenar sağlama filtreleri, yolları ve alan sınırları gibi çizgisel yapıları vurgulamak için kullanılmaktadırlar.

Sonuç olarak, görüntüyü oluşturan pikseller konumları ve gri değerleri ile tanımlanabilmektedir. Bu görüntü Şekil 4.2'deki gibi $m \times n$ boyutunda bir matris formuna sahiptir. Aslında birer matematiksel işlem olan filtreler ve diğer görüntü işleme algoritmaları görüntü matrisi üzerinde amaca yönelik olarak işleme sokulur. Bu işlem sonucunda yeni görüntü matrisi değerleri dolayısıyla istenilen yeni görüntü elde edilir.

4.4. Kalibrasyonlar

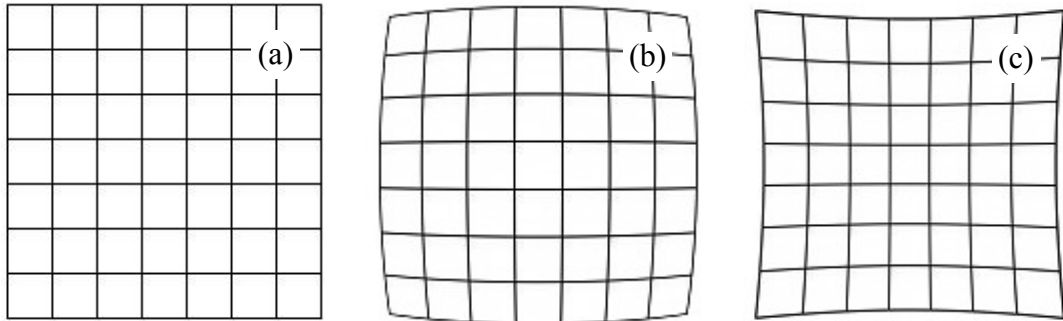
Optik elemanlı elektronik bir görüntüleme sistemi olan dijital kamera, sadece düşük veya yüksek çözünürlüklü olması nedeniyle değil aynı zamanda mercek bozulması (lens distortion), algılayıcı (sensör) düzleminin deformasyonu ve elektronik transfer hataları gibi görüntülerin metrik kalitesini etkileyen bir takım sistematik bozulmalardan etkilenmektedir. Sonuçta görüntüleri metrik anlamda kullanılabilir hale getirmek için, söz konusu sistematik hataların belirlenmesi, modellenmesi ve düzeltilmesi gerekmektedir. Bu işlem kalibrasyon olarak adlandırılmaktadır. Dijital kameralar ile elde edilen sayısal görüntülerdeki bozulmalar, bilgisayarlar yardımıyla mevcut algoritma ve yazılımlarla düzeltilebilmektedir (Karşı ve Ayhan, 2005).

Optik bozulmalar kamera elemanlarının (mercekler vb.) fiziksel yapısından kaynaklanırlar ve görüntü düzleminde görüntü noktasının konumunda meydana gelen değişikliklerle ilgilidir, fakat bunun renk özellikleriyle ilgisi yoktur. Bu nedenle görüntülerin genel amaçlı kullanımlarında sorun yaratmayan bu bozulmalar, görüntüler üzerinden metrik ölçümlerin yapılması gerektiğinde oldukça önem kazanmakta ve bunların düzeltilmeleri zorunlu olmaktadır. Kameralardan elde edilen görüntülerde başlıca iki bozulma türü ile karşılaşılır. Bunlar;

- açısız bozulma (radial distortion)
- teğetsel bozulma (tangential distortion)'dır.

Açısal bozulmalar, her mercek sisteminde mutlaka bulunur ve bir görüntüdeki noktaların gerçek yerlerinin açısal olarak farklı konumda görünmesine neden olur. Bu tür bozulmalar Şekil 4.4’de görüldüğü gibi merkezden uzak veya yakın olarak açısal bozulmaya uğramış olmalarına göre dış bükey (barrel distortion) ve iç bükey (pincushion distortion) bozulma olarak adlandırılabilirler. Açısal bozulma için simetri noktası görüntünün merkez noktası olmayabilir, fakat genellikle bu nokta orijin olarak kabul edilir.

Gelişmiş lenslerde, genellikle bir mercek yerine birden çok mercek kullanılır ve bu merceklerin her birinin odak noktalarının aynı doğru üzerinde olması gerekir. Mercek sistemindeki elemanların görüntü eksenlerinin çakışmamasından kaynaklanan bozulmaya da teğetsel bozulma (tangential distortion) adı verilir. Mercekler arasındaki doğrultudan sapma, görüntüde geometrik yer değiştirmeye neden olacaktır. Bu tür bozulmalar her zaman açısal bozulmada bir asimetriye sebep olurlar.



Şekil 4.4. Görüntüde meydana gelen açısal bozulmalar a) asıl görüntü b) dış bükey bozulma c) iç bükey bozulma

Arzu edilmeyen görüntü bozulmalarından kaçınmak için düzlem görüntü veren fakat oldukça yüksek fiyatlara sahip kaliteli lensler bulunmaktadır. Bununla birlikte mercek sisteminde kullanılan cam malzemenin kusursuz bir şekilde homojen olarak dağıtılması ya da birden fazla merceğe sahip lenslerde bunların aynı eksen üzerine hatasız yerleştirilmesi mümkün olmadığından, bu bozulmalar az veya çok

her mercek sisteminde bulunmaktadır. Bundan dolayı dijital kameraların, duyarlı ölçümlerde kullanılabilmesi için mutlaka kalibrasyonlarının yapılması gereklidir.

Kamera kalibrasyonu, kamera sisteminin düzlem geometriye sahip görüntü elde edebilmesi için kendisini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin bilgisayar yardımıyla bulunması olarak tanımlanabilir. Bu parametrelerden optik sistemi ve sensörlerin iç konumlarını tanımlayan parametrelere “iç yöneltme” (intrinsic parameters), sensör (kamera) sisteminin nesne uzayına göre konumunu ve doğrultusunu belirleyen parametrelere ise “dış yöneltme” parametreleri (extrinsic parameters) adı verilir. Kalibrasyon işlemi ile koordinatları bilinen noktalardan alınan görüntüler üzerinde eşleştirmeler yapılarak kameraya ait iç ve dış yöneltme parametreleri bulunur. Daha sonra bu parametreler kullanılarak görüntülerdeki geometrik bozulmalar ortadan kaldırılır. Görüntülerin düzeltilebilmesi için iç yöneltme parametrelerinin (odak uzaklığı, çarpıklık, düzeltme katsayısı, merkez noktası...) bilinmesi yeterlidir.

4.4.1. Görüntünün Açısal Kalibrasyonu

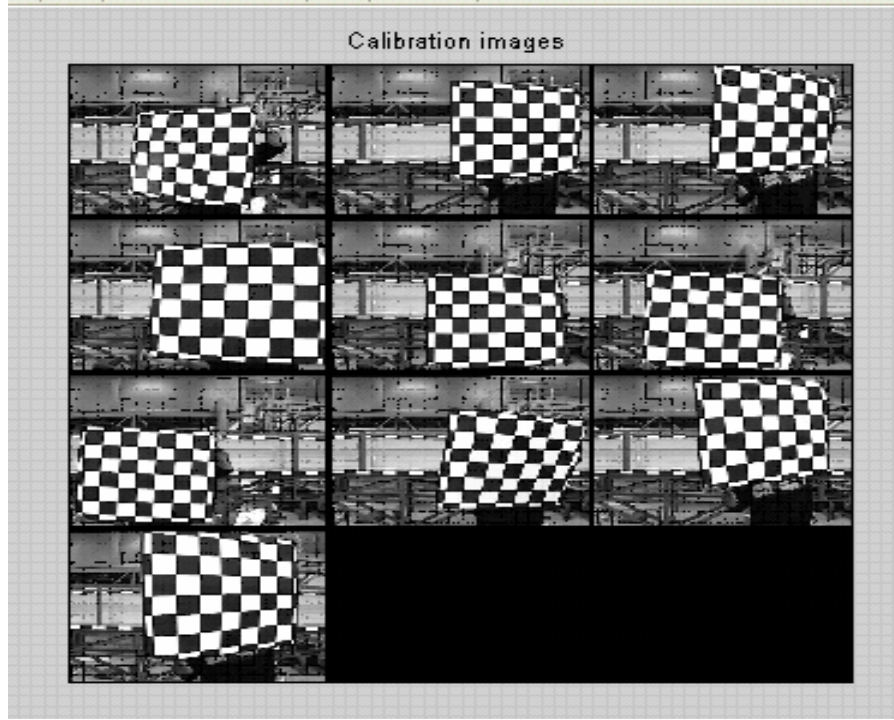
Yapılan çalışmada kamera üzerinde geniş açılı bir mercek kullanıldığından elde edilen görüntüler Şekil 4.5’de görüldüğü gibi bombeli (dış bükey) olmaktadır. Görüntüler üzerinden metrik okumaların yapılabilmesi için bu durumun ortadan kaldırılması ve resimlerin düzlem hale getirilmesi gereklidir. Bu işlem için “Camera Calibration Toolbox for Matlab” adlı yazılım kullanılmıştır. Bu yazılım ile kameralara ait kalibrasyon parametreleri hassas bir şekilde hesaplanarak kameralardan elde edilen diğer tüm görüntüler kolaylıkla düzeltilebilmektedir. Yazılım yardımıyla kalibrasyon parametrelerinin bulunabilmesi için koordinatları ve boyutları bilinen bir panoya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla Şekil 4.5’de görülen düşeyde 7 ve yatayda 6 adet olmak üzere 10x10 cm’lik karelerden oluşan dama tahtası görünümünde bir kalibrasyon panosundan yararlanılmıştır. Kalibrasyon panosunun farklı açılardan çekilen görüntüleri üzerinde koordinatları bilinen köşe noktalarının eşleştirilmesi ile kalibrasyon parametreleri hesaplanmaktadır. Çalışma kapsamında 3 kamera kullanılmış ve her bir kamera için ayrı kalibrasyon yapılmıştır.



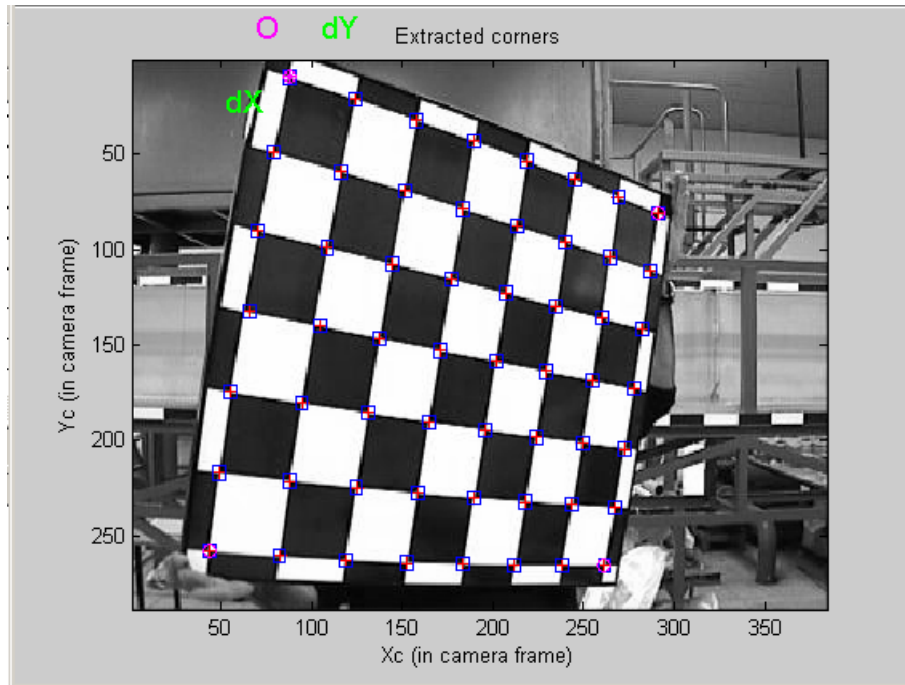
Şekil 4.5. Kalibrasyon panosu (Bombeli görünümde)

Kalibrasyon işlemi için öncelikle kalibrasyon panosu her bir kamera önünde gezdirilerek farklı açı ve uzaklıklarda çekilen 25 adet görüntü seçilmiştir (Şekil 4.6). Daha sonra her görüntüde panonun sınırları belirlenerek bu sınırlar içerisinde kalan kare boyutları (10x10) girilmiş ve bunun sonucu 56 köşe noktası otomatik olarak yazılım tarafından saptanmıştır (Şekil 4.7). Otomatik algoritmada bazı köşe noktalarının yeri tam olarak belirlenemediğinden bu hatalı noktalar daha sonra el ile tek tek kontrol edilerek düzeltilmiştir. Bu işlem her bir kamera için toplamda 25 adet resim için tekrarlanmıştır. Köşe noktalarının hassas olarak belirlenmesinden sonra yazılım kameraya ait kalibrasyon parametrelerini kolaylıkla hesaplamaktadır.

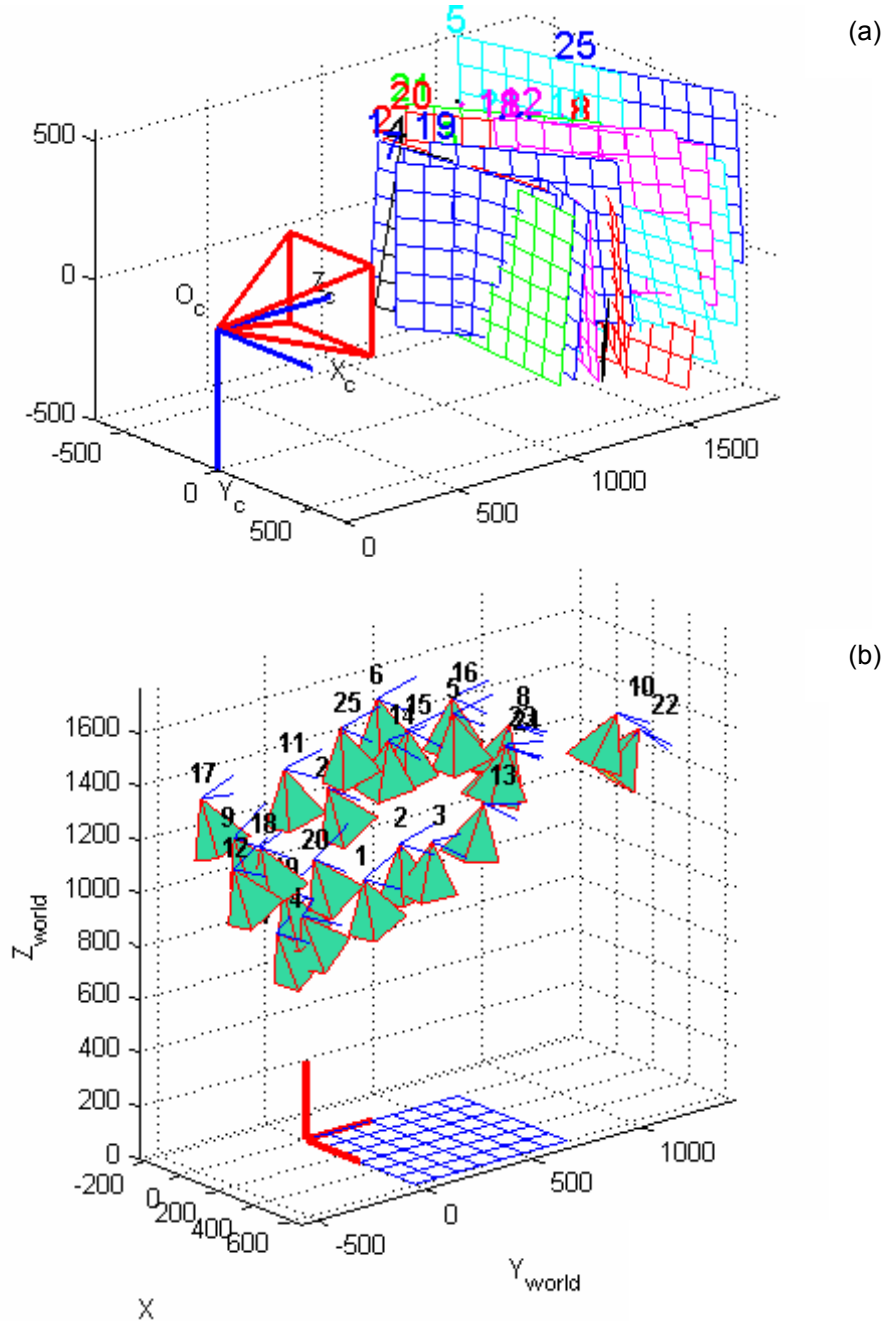
Şekil 4.8’de bir kamera için hesaplanan dış yöneltme parametreleri 3-boyutlu grafik olarak görülmektedir. Şekil 4.8a’da kalibrasyonun yapılabilmesi için kamera önünde gezdirilen pano görüntülerinin hesaplama sonucu elde edilen doğrultu ve konumları, koordinat merkezi kameranın kendisi olacak şekilde gösterilmiştir. Sivri kenarı koordinat merkezi olan piramit, kameranın etkili görüş açısını temsil etmektedir. Grafiklerde, koordinatlar milimetre cinsinden verilmiştir. Şekil 4.8b’de ise aynı sonuçlar için kalibrasyon panosu referans alınarak piramitlerle temsil edilen her bir kameranın doğrultu ve konumları gösterilmiştir. Koordinat merkezi olarak bu kez panonun sol üst kenarı alınmıştır.



Şekil 4.6. Kalibrasyon için kullanılan farklı açı ve uzaklıklardaki kalibrasyon panosu görüntüleri

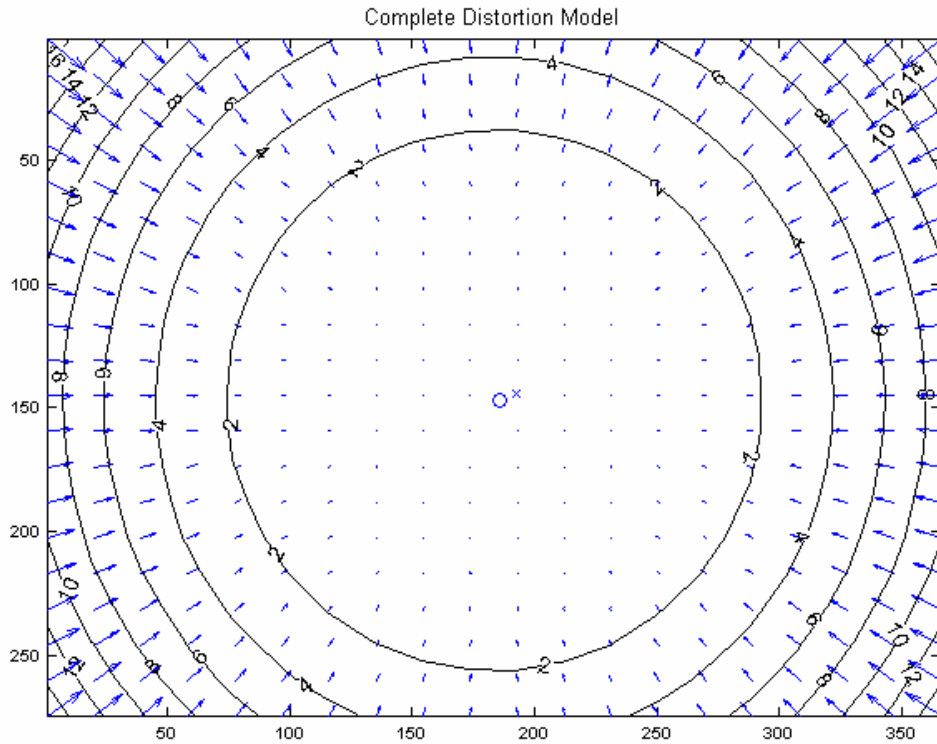


Şekil 4.7. Kalibrasyon panosunda köşe noktalarının otomatik algoritma ile bulunması



Şekil 4.8. Kalibrasyonu yapılan görüntülerin hesaplanan doğrultu ve konumlarının gösterimi a) kamera merkezli b) kalibrasyon panosu merkezli

Şekil 4.9’da kalibrasyonu yapılan kameradaki tüm geometrik bozulmaların (açısal + teğetsel) görüntüdeki her bir piksel üzerindeki etkisi görülmektedir. Görüntüdeki oklar mercek bozulmasının her bir pikselde neden olduğu etkili yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Yatay ve düşey eksen görüntüdeki piksel sayısını göstermektedir. Şekildeki daireler piksellerdeki yer değiştirmeleri ifade etmektedir. Sol üst köşede (orijine yakın bölgede) yaklaşık 16 piksellik yer değiştirme görülmektedir. Kalibrasyon sonucunda sensör düzlemindeki çarpıklık katsayısı sıfır çıkmıştır. Buda sensör düzleminde bir bozulmanın olmadığını ve x-y düzlemi arasındaki açının dik olduğunu göstermektedir. Şekil 4.9’da görüntü ortasındaki çarpı işareti görüntünün merkezini, küçük daire ise odak merkezinin yerini göstermektedir. Görüldüğü gibi görüntü merkezi ile kalibrasyon merkezi çok yakın olmalarına rağmen aynı değildir ve odak noktasında çok az miktarda sapma vardır.



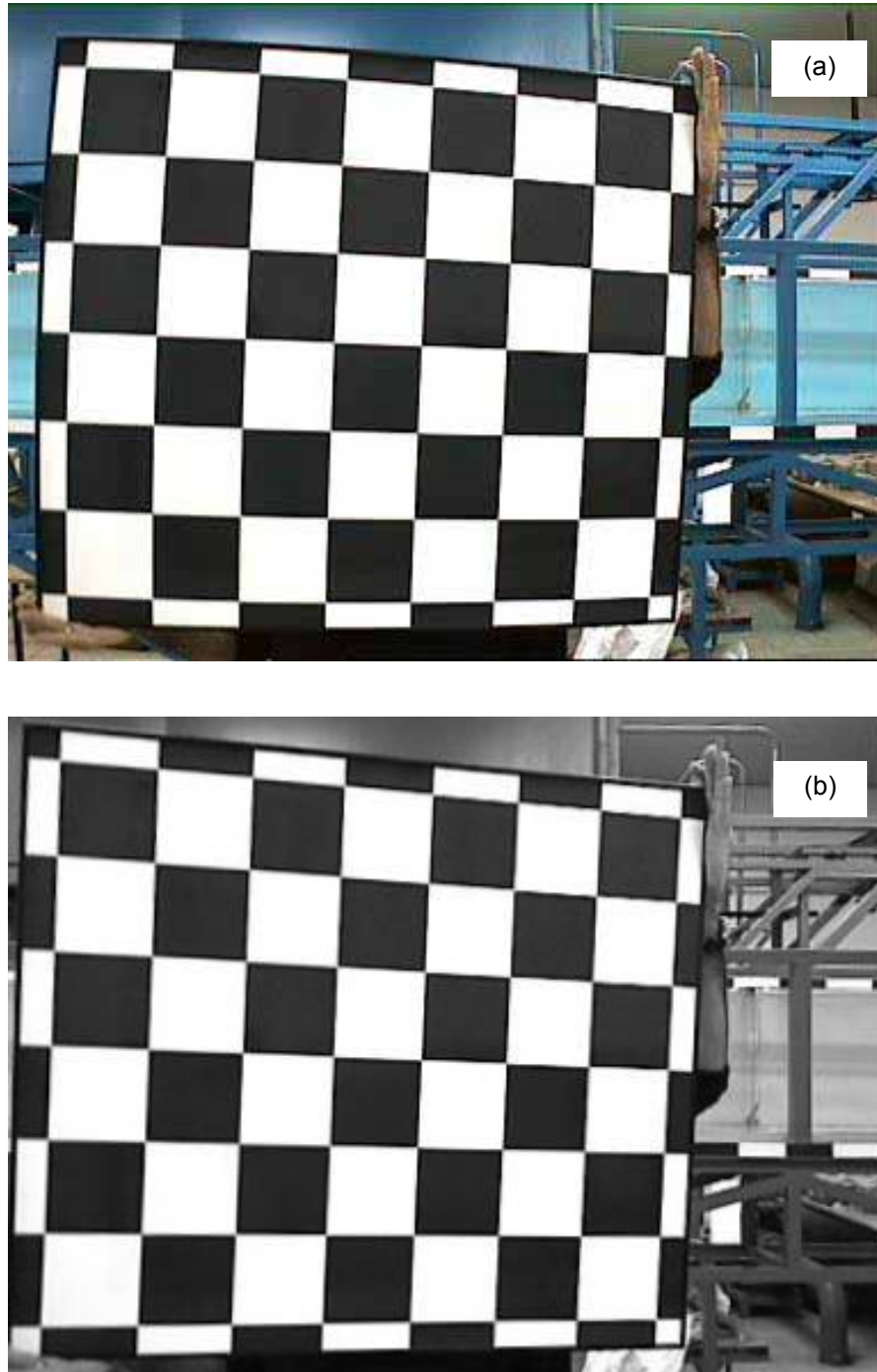
Şekil 4.9. Kameranın kalibrasyon sonucu elde edilen kameraya ait geometrik bozulmalar (açısal + teğetsel) ve piksellerin yer değiştirmesi

Bir kameraya ait kalibrasyon parametreleri (iç parametreler) hesaplandıktan sonra o kameradan elde edilmiş olan tüm görüntüler yazılım ile kolaylıkla düzeltilebilmektedir. Şekil 4.10a'da bombeli görünüme sahip olan kalibrasyon panosunun ham görüntüsü kalibrasyon işlemi sonucunda Şekil 4.10b'de görülen ve metrik okumaların yapılabileceği düzlem görüntü haline getirilmiştir. Bununla birlikte görüntünün kalibrasyonu yapıldıktan sonra kenarlarda meydana gelen eğriliklerin görülmemesi için elde edilen yeni görüntü kenarlarından kırılmaktadır. Fakat görüntünün çözünürlüğü sabit kalmaktadır. Bundan dolayı görüntüdeki nesnelerin büyüdüğü izlenimi ortaya çıkmaktadır.

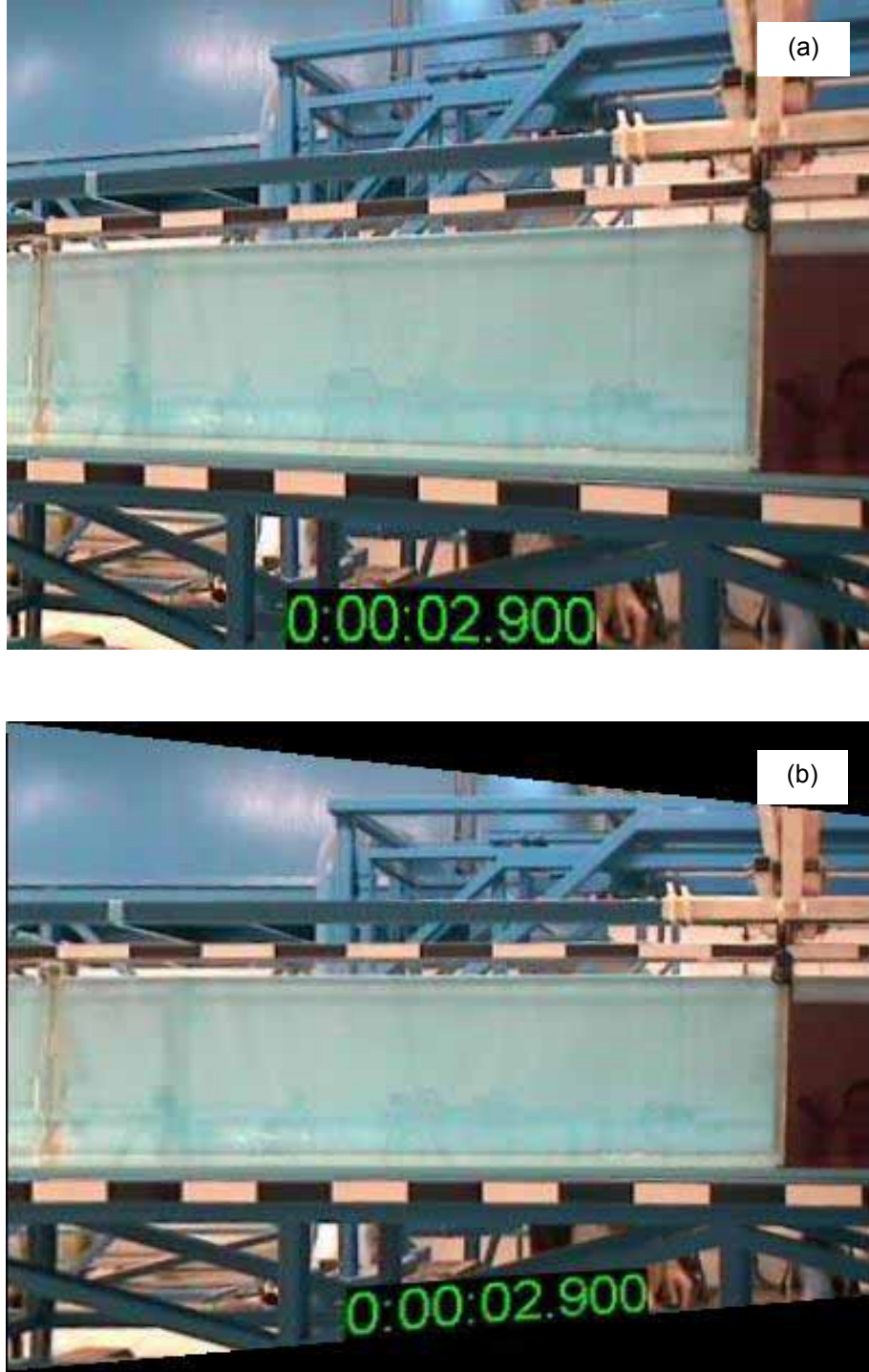
Lens (mercek) odak uzaklığı değiştirilmediği sürece bir kamera için hesaplanan kalibrasyon parametreleri o kameradan elde edilen tüm görüntülerin düzeltilmesi için kullanılabilir. Her bir deneyde ortalama 15 s süresince çekim yapıldığı düşünülürse bu sürede bir kameradan elde edilen yaklaşık 750 ($=15 \times 50$ fps) adet resim video görüntülerden ayrıştırılarak kalibre edilmiştir. Yapılan çalışmada, üç kamera kullanıldığından deneylerden elde edilen çok sayıda görüntünün kalibrasyonu için önemli ölçüde bilgisayar gücünden yararlanılmıştır.

4.4.2. Perspektif Kalibrasyon

Kameraların kanal düzlemine dik olmaması veya başka bir ifade ile kameranın kanala belirli bir açı ile bakması durumunda perspektif bir görüntü oluşur (Şekil 4.11). Bu durumda kanal yüksekliği her yerde aynı olmasına rağmen, bu yükseklik yakın kısımlarda daha büyük uzak kısımlarda ise daha küçük görünmektedir. Bu durumun düzeltilebilmesi için perspektif kalibrasyona ihtiyaç vardır. Bu işlem için görüntüde boyutları bilinen bir düzleme veya bir düzlem üzerinde dikdörtgen oluşturacak koordinatları bilinen 4 noktaya ihtiyaç vardır. Şekil 4.11a'ya bakılırsa bu görüntüde şayet kanal yüksekliği ve kanal üzerindeki düşey demir çubuklar arasındaki mesafe bilirse görüntü Şekil 4.11b'de görüldüğü gibi düzlem hale getirilebilir.



Şekil 4.10. Görüntünün açısal kalibrasyonu a) orijinal görüntü b) kalibre edilmiş görüntü



Şekil 4.11. Görüntünün perspektif kalibrasyonu a) perspektif görünümüne sahip ham görüntü b) kalibre edilmiş düzlem görüntü

Kamera, kanal düzlemine dik olarak baksa da şayet kanal içerisinde bir daralma söz konusu ise daralma düzlemi elde edilen görüntüde perspektif görünecektir. Bu düzlem üzerindeki bir değişim incelenmesi gerektiğinde yine bu kalibrasyona ihtiyaç duyulur. Bu tez kapsamında kanal içerisinde farklı geometriye sahip daralmaların neden olduğu su seviyesi değişimleri de incelendiğinden bu noktalarda ya da düzlemde yapılan ölçümlerde öncelikle bu kalibrasyon yapılmıştır.

4.4.3. Yatay Kalibrasyon (Görüntülerin Yataylanması)

Yapılan çalışmada, yatay dikdörtgen bir kanalda meydana gelen değişken akım durumu için su seviyesi ölçümleri video kameralardan elde edilecek görüntüler üzerinden gerçekleştirilecektir. Bu nedenle öncelikle deney kanalı yatay hale getirilmiştir. Üç kamera görüntüsünün birleştirilebilmesi ve ölçümlerin hassas bir biçimde yapılabilmesi için görüntülerin yatay (düzlemde olması) durması gereklidir. Bunun için öncelikle kameralar üzerine küçük su terazileri yerleştirilerek yatay görüntü elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak kamera düzlemindeki küçük bir hata nesnenin görüntüsünde daha büyük olarak kendini göstereceğinden düzgün görüntü elde edilmesi su terazileri ile çok hassas olarak yapılamamaktadır. Bu nedenle görüntüler alındıktan sonra bu görüntüler bilgisayar ortamında döndürülerek yatay hale getirilmiştir. Bir görüntünün yazılım kullanarak tam olarak yatay hale getirilebilmesi için görüntü içerisinde yatay bir referans çizgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu referans çizgisi deney kanalının kendisi alınabilir. Ancak kanalın kendisi de bir eğrilige sahip olabilir. Bu nedenle sağlıklı ve hassas bir referans çizgisi oluşturmak için deney kanalı gıda boyalı su ile doldurularak bir su terazisi elde edilmiştir (Şekil 4.12). Durgun haldeki su seviyesi daima yatay olacağından bu yüzey, referans çizgisi olarak alınmış ve kameralardan alınan görüntüler yardımı ile her bir kameranın yatay düzlemle yaptıkları dönme açısı belirlenmiştir. Daha sonra kameralardan alınan görüntüler, her bir kamera için bilinen dönme açıları kullanılarak yazılım ile yatay hale getirilmiştir.



Şekil 4.12. Görüntülerin ızgaralar kullanılarak yatay hale getirilmesi

4.4.4. Metrik Kalibrasyon

Sayısal görüntüler piksellerden oluşmaktadır. Aynı çözünürlüğe sahip sayısal bir görüntü büyük ölçekli bir harita olabileceği gibi bir mikroskop görüntüsü de olabilir. Bir görüntüdeki nesneler piksellerle ifade edildiğinden görüntüdeki nesnelerin gerçekteki büyüklüklerinin belirlenebilmesi için piksel değerlerinin metrik değerlere dönüştürülmesi bir başka deyişle metrik kalibrasyonlarının yapılması gereklidir. Bunun için görüntü üzerinde büyüklüğü bilinen bir referans uzunluğa ihtiyaç vardır (Örneğin harita ölçeği). Bu uzunluğun gerçek değeri bilindiğinde görüntü üzerinden metrik olarak uzunluk, çap, alan, açı gibi büyüklükler kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Görüntüden bu referans uzunluğun kaç piksele eşit olduğu bulunur ve piksel/uzunluk oranı hesaplanır. Bu işlem aslında basit bir doğru orantıdır. Örnek olarak görüntü üzerindeki 10 cm uzunluğundaki bir referans çizgisi 20 piksel ile ifade edilirse bu oran $10/20 = 0.5$ cm/piksel'dir. Bu oran ile görüntüdeki piksel koordinatları metrik koordinatlara çevrilebilir. Görüntü üzerindeki herhangi iki piksel arasındaki mesafe arada kalan piksel sayısının bu oran ile çarpılması ile

hesaplanabilir. Birçok görüntü işleme yazılımı ile bu işlem kolaylıkla yapılabilir. Yapılan çalışmada, kanal cam yüzeyi üzerine yapıştırılan ve her biri 10 cm uzunluğundaki siyah beyaz bantlar bu işlem için kullanılmıştır (Şekil 4.12). Buradan belirlenen kalibrasyon değeri, kanaldaki bilinen durgun su yüksekliğinin görüntü üzerinden okunması ile kontrol edilmiştir. Bu bantlardaki siyah beyaz kesişme noktaları, farklı kameralara ait görüntüler birleştirilirken referans noktaları olarak da kullanılmıştır.

Bir görüntüdeki koordinat merkezi varsayılan olarak görüntünün sol üst köşesidir (Şekil 4.3). Ancak bu nokta istenilirse görüntü üzerindeki herhangi bir noktaya (baraj aksı) kolaylıkla taşınabilir. Deneylerde kapağın kalkmadan önceki topuk noktası orijin olarak alınmış ve x ekseni kanal tabanı, y ekseni kapak düzlemi üzerinde seçilmiştir. Yapılan çalışmada, görüntüler üzerindeki okumalar koordinat merkezi sol üst köşe olacak şekilde piksel olarak alınmıştır. Daha sonra bu görüntülerin metrik hale getirilmesi ve koordinat merkezinin baraj aksına taşınması Ms Excel yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. Eksenlerin istenilen bir koordinat merkezine taşınmasında şu yaklaşım kullanılmıştır: Görüntüdeki herhangi bir noktanın koordinatı (x,y) ise bu noktanın orijini (a,b) ve eksenleri tam ters yönde olan yeni bir eksen takımına göre koordinatı $(a-x, b-y)$ olmaktadır. Çalışmada, görüntülerden piksel koordinatları ve kalibrasyon oranı belirlenmiş diğer tüm işlemler MS Excel yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

4.4.5. Hata Oranı

Yapılan çalışmada, deney kanalı farklı seviyelerde farklı renkte boyalı su ile doldurularak durgun haldeki su yükseklikleri çıplak gözle milimetrik cetvel kullanarak ölçülmüş ve daha sonra bu ölçümler görüntülerden elde edilen su yükseklikleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda görüntülerden alınan su seviyesi okumalarında hata oranı $\pm 1-2$ mm civarında bulunmuştur.

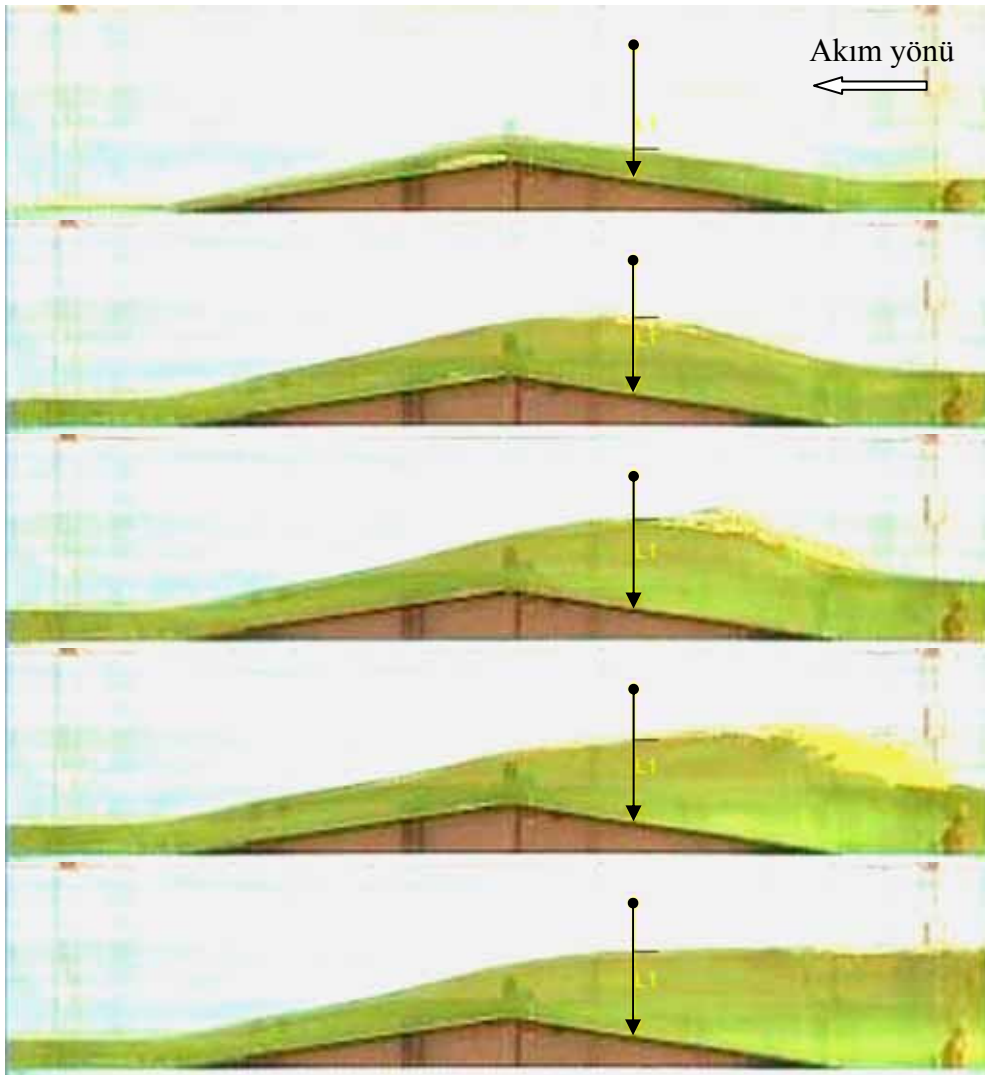
Kameralardan düşük çözünürlüğe sahip görüntüler elde edildiğinden ölçüm hassasiyetini arttırabilmek için görüntüler bilgisayar ortamında yeniden boyutlandırılmış ve çözünürlükleri arttırılmıştır. Bu işlem yapılırken boyutlandırma

sonucu elde edilen yeni görüntüler eski piksel değerlerinin enterpolasyonu sonucu bulunmaktadır. Çözünürlük arttırıldığında, görüntülerin büyütülmesi ile nesnelerin tanımlanmasında görüntüde daha az bozulma olmakta ve detaylar kaybolmamaktadır. Bunun yanında renk değişimlerinin olduğu sınırlarda enterpolasyondan dolayı keskin bir geçiş olmamakta, renk sınırlarının tam olarak belirgin olmadığı yumuşak geçiş görülmekte ve bir miktar bulanıklaşma meydana gelmektedir. Serbest su yüzeyinin olduğu sınırlarda da ortaya çıkan bu bulanıklaşmayı ve yumuşak geçişi ortadan kaldırmak amacıyla durgun su ile yapılan gözlemler ve ölçümler dikkate alınarak ve serbest yüzeyin olduğu gerçek sınırını keskinleştiren uygun filtre oranları ve renk kontrast değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu değerler yardımıyla çekilmiş olan diğer görüntüler düzeltilip renk sınırları belirginleştirilmiştir. Sonrasında kalibrasyonu yapılmış belirgin su yüzeyi sınırlarının görüntüdeki koordinatları hassas olarak belirlenmiştir.

4.5. Belirli Noktalardaki Zamana Bağlı Su Seviyesi Değişimlerinin Görüntüleme Tekniği ile Ölçülmesi (Sanal Derinlik Ölçer)

Baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılması sırasında kanal boyunca farklı noktalarda su seviyelerinin zamanla değişimleri literatürde ilk kez dijital video görüntüler kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla çalışmada kullanılan görüntü işleme yazılımı içerisinde hazır bulunan filtre ve kenar tanıma fonksiyonlarından yararlanılarak bir kod geliştirilmiştir. Temel mantık olarak görüntü üzerinde su seviyesi değişiminin belirlenmesi istenilen noktada çizilen düşey bir çizgi sanal bir derinlik ölçer gibi düşünülmüş ve bu çizgi üzerinde renk değişimlerinin olduğu yeri tespit eden bir kenar tanıma fonksiyonu sayesinde serbest su yüzeyinin (x,y) koordinatı belirlenmiştir. Benzer biçimde belirli zaman aralığına sahip video görüntülerin arka arkaya oynatılmasıyla her bir görüntüde çizgi üzerindeki serbest yüzey koordinatı ardışık olarak belirlenmiş ve bilinen kalibrasyon değerleriyle bu koordinatlar metrik hale dönüştürülerek deney kanalının istenilen noktasında su seviyesinin zamanla değişimi (h-t grafikleri) elde edilmiştir.

Şekil 4.13’de baraj yıkılması taşkın dalgasının mansapta bulunan üçgen eşik üzerinden aşması durumunda, eşiğin memba yüzeyi üzerinde meydana gelen su seviyesi değişiminin sanal ölçer ile belirlenmesi görülmektedir. Görüntülerde serbest yüzeyin yerinin hassas olarak belirlenebilmesi için su içerisine gıda boyası katılarak renklendirilmiş, görüntülerin uygun filtrelerden geçirilmesi ve renk kontrast ayarlarının yapılmasıyla su-hava arakesitinin olduğu serbest su yüzeyi belirginleştirilmiştir.



Şekil 4.13. İstenilen noktada su seviyelerinin zamanla değişiminin sanal derinlik ölçer ile belirlenmesi

Sanal derinlik ölçer ile serbest su yüzeyinin belirlenmesindeki temel mantık, çizilen ok doğrultusunda bulunan komşu piksellerin renkleri diğer bir ifade ile gri ton değerleri arasında meydana gelen ani değişimlerin sayısal görüntüde kenar olarak değerlendirilmesidir. Serbest su yüzeyinde farklı gri ton özellikleri gösteren iki komşu piksel arasında bir geçişin var olmasından dolayı bu geçiş noktası kenar belirleme (edge detection) işlemi ile kenar olarak işaretlenmektedir. Kenar tespiti için yerel olarak uygulanan türev operatörleri kullanılmaktadır. Görüntü üzerinde düşey bir okun çizilmesi ile bu ok üzerindeki komşu pikseller karşılaştırılarak yoğunluk değişimleri tespit edilmektedir. Elde edilen değişimlerin önceden belirlenmiş bir eşik değeri ile karşılaştırılması ile önemli bir değişimin olup olmadığı belirlenmekte ve bu tespite göre çizgi üzerinde bir kenar olup olmadığına karar verilmektedir. Ancak herhangi bir gri seviye geçiş bölgesinin kenar olarak işaretlenmesi için iki komşu piksel arasındaki gri seviye farkının belirli bir eşik değerinden fazla olması gerekmektedir. Aksi halde resimdeki en ufak gri seviye değişimi bile kenar olarak işaretlenmekte ve çizgi üzerinde serbest su yüzeyinin yeri ile birlikte bir çok nokta kenar olarak tanımlanmaktadır. Bu durumdan kaçınmak için anlamlı kenarları (serbest su yüzeyi) etkilemeden filtreler kullanılarak görüntüdeki kirliliğin mümkün olduğunca bastırılması ve kenarların keskinleştirilmesi gerekmektedir.

Belirli noktalardaki su seviyelerinin zamanla değişimlerinin görüntüleme teknikleri ile belirlenmesi, kanal içerisine yerleştirilen metal çubuklarla yapılan ve elektrik iletkenliğine dayanan ölçüm tekniklerine göre bir çok üstünlüğe sahip olmaktadır. Geliştirilen yöntemde değişken akıma ait görüntü bir kez alındıktan sonra akımın boyuna doğrultusundaki istenilen her noktada deney tekrarlanmasına gerek kalmaksızın su seviyesi değişimi belirlenebilmektedir. Diğer yöntemlerde yüksek maliyete sahip ve belirli aralıklarla, sınırlı sayıda kullanılan metal çubuklarla yapılan ölçümlerde farklı noktalardaki su seviyesi değişimi istendiğinde deney tekrarlanması yoluna gidilmektedir. Ayrıca kanal içerisine yerleştirilen metal çubuklar akımı rahatsız edebilmektedir. Görüntüleme tekniğinde ise kanal cam yüzeyinde veya lazer gibi aydınlatma sistemi ile kanal içerisinde bir aydınlatma düzlemi oluşturulursa kanal genişliğinin her noktasında akım rahatsız edilmeden su seviyesi değişimleri belirlenebilmektedir. Yöntemin diğer bir üstünlüğü de su

seviyesi değişiminin sadece düşey doğrultuda değil, görüntü üzerinde istenilen her düzlemde ölçülebilmesidir. Diğer yandan metal çubuklar ile belirlenemeyen kanal tabanında katı madde hareketi, farklı yoğunluğa sahip birden fazla akışkanın (örn. su-yağ) arakesitinde zamanla meydana gelen değişimler geliştirilen yöntem ile kolaylıkla belirlenebilmektedir. Bununla birlikte elde edilen verilerin hassaslığı görüntünün çözünürlüğüne, izlenecek nesneye olan mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca elde edilen veri sayısı da kamera hızı diğer bir deyişle bir saniyede elde edilen görüntü sayısına (örn. 25 fps) bağlı olmaktadır. Yapılan çalışmada, su seviyesi değişimleri belirlenirken 0.020 s zaman aralığına sahip görüntüler kullanılmıştır.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. Deney Düzeni ve Yöntemi

Baraj yıkılması akımının incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bulunan dikdörtgen enkesite sahip bir kanalda gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1). Kanal 9 m uzunluğunda 0.34 m yüksekliğinde, 0.30 m genişliğinde olup istenildiğinde eğimi değiştirilebilmektedir. Yapılan çalışmalarda eğim etkisi incelenmediğinden deney kanalı sadece yatay durumda kullanılmıştır. Kanal tabanı ve kenarlarının tamamı 0.09 m kalınlığında camdan yapılmıştır. Kanal üzerinde cam duvarları desteklemek amacıyla yaklaşık 1.5 m de bir yerleştirilmiş 3 cm kalınlığında metal çubuklar bulunmaktadır (Şekil 5.1). Dolayısıyla akım 150x34 cm'lik net görüş alanlarında izlenmiştir. Deney kanalı bu hali ile tez kapsamında çalışmaya uygun olmadığından baraj yıkılması akımının oluşturulabilmesi ve ölçümlerin görüntüleme sistemi ile gerçekleştirilebilmesi için kanal üzerinde bir takım düzenlemeler ve değişiklikler yapılmıştır (Şekil 5.1b). Bu amaçla öncelikle baraj yıkılması probleminin modellenebilmesi için kanal içerisine yerleştirilen bir kapağın ani olarak kalkmasını sağlayacak bir kapak mekanizması imal edilmiştir. Deney kanalı arkasındaki nesnelerin çekilen görüntüde kirliliğe neden olmaması ve akıma odaklı daha net bir görüntü sağlamak amacıyla kanalın arkada kalan cam yüzeyi açık mavi renkte kaplama kağıtları ile kapatılmıştır. Yine daha net bir görüntü sağlamak amacıyla kanalın arka yüzeyinin kaplanmasından ve ortamdaki aydınlatmadan dolayı çevredeki nesnelerin kanal üzerinde oluşan yansımalarını ve laboratuvar ortamındaki düzensiz ışık kaynaklarından dolayı cam yüzeyi üzerinde meydana gelen körleşmeleri azaltmak için kameraların arka kısmı kanal uzunluğu boyunca beyaz perde ile kapatılmıştır. Görüntülerin kalibrasyonlarının yapılabilmesi, farklı kamera görüntülerinin birleştirilebilmesi, görüntülerde akımın izlenmesini kolaylaştırmak gibi amaçlar için kanal ön cam yüzeyi üzerine 10 cm'lik siyah beyaz bantlardan oluşan eşeller yapıştırılmıştır. Ayrıca kameraların yerleştirileceği ayaklar imal edilmiştir (Şekil 5.1b).

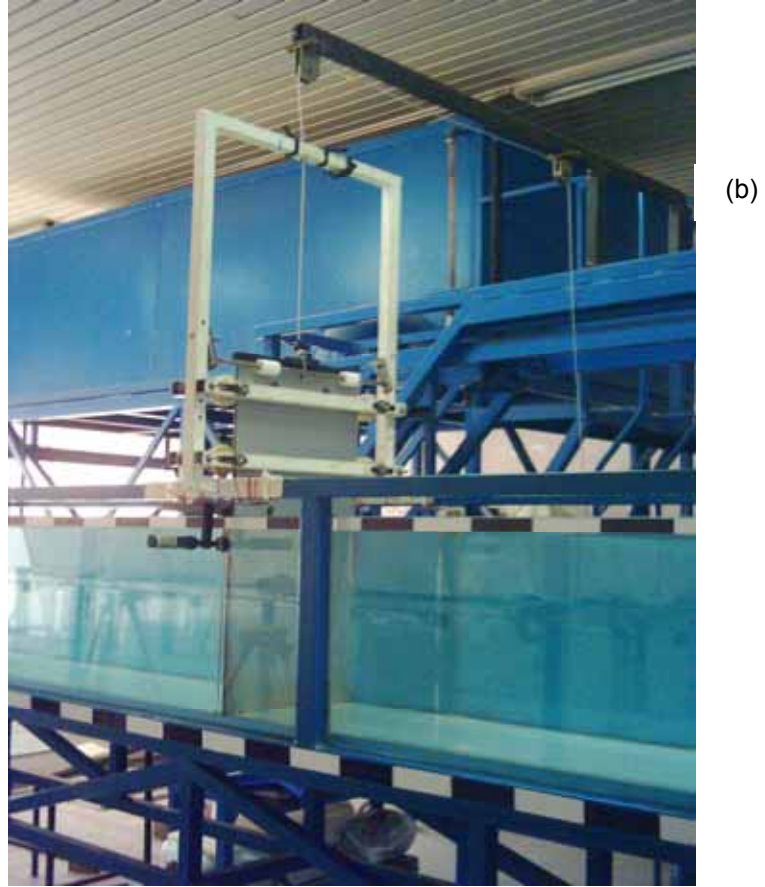
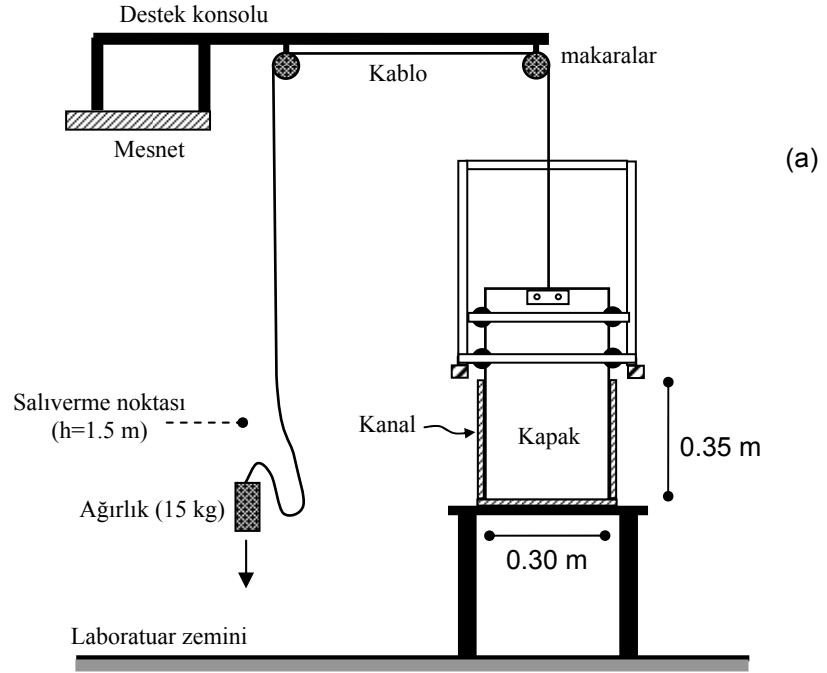


Şekil 5.1. Kullanılan deney kanalının ilk hali ve çalışmaya uygun hale getirilmesi

5.1.1. Baraj Yıkılması Akımının Oluşturulması

Baraj yıkılması akımı, her iki yanında farklı durgun su derinliğine sahip olan ve barajı temsil eden bir kapağın düşey doğrultuda ani olarak kaldırılmasıyla elde edilmiştir. Kapağın ani olarak kaldırabilmesi için Şekil 5.2’de görülen mekanik olarak elle kontrol edilebilen makaralı bir düzenek imal edilmiştir. Kapak olarak 4 mm kalınlığında ve dış yüzeyi alüminyum iç yüzeyi sert plastikten yapılan dış cephe kaplama malzemesi seçilmiştir. Bu malzeme, hafif fakat dayanıklı, kolayca işlenebilir ve yüzeyinin pürüzsüz olmasından dolayı tercih edilmiştir. Düşey doğrultuda hareketi sağlamak için kanalın üstüne monte edilmiş ve kapağı her iki kenarında sıkıştıran ve eğilmesine engel olmak ve düşey doğrultuda hareketi sağlamak için 4 adet makaranın bulunduğu bir çerçeve yapılmıştır. Kapağın boyuna doğrultuda eğilmesini önlemek için levha 2 adet L profille güçlendirilmiştir. Ayrıca üst ön ve alt arka yüzeyinde sıkıştırılmıştır. Kapak doğrudan kanal içerisine yerleştirildiğinden kapak ile cam yüzey arasında sızma problemi ortaya çıkmıştır. Meydana gelen sızmaları önlemek amacıyla gres yağı kullanılmıştır. Gres yağı boşlukları doldurması ve sızmayı tamamen engellemesinin yanında kapak kalktıktan sonrada meydana gelen akımı da rahatsız etmemektedir. Baraj kapağının üst kısmı çelik halat ile tutturulmuş ve diğer ucuna yaklaşık 15 kg ağırlığında bir kum torbası yerleştirilmiştir. İki adet makara ile bir makara sistemi oluşturulmuştur. Kum torbasının yaklaşık 1.5 m yükseklikten serbest bırakılmasıyla ipin diğer ucundaki kapağın ani olarak kalkması sağlanmıştır (Şekil 5.2a). Kapağın ani olarak kalkması sırasında üst kısma lastik kaplamak suretiyle çarpma anında kanalda oluşabilecek titreşimler minimuma indirilmeye çalışılmıştır.

Kapağın kalkma hızı kaydedilen görüntüler yardımıyla yaklaşık 0.06 ve 0.08s aralığında bulunmuştur. Lauber ve Hager (1998a) kapağın kaldırılma zamanı $1.25(h_0/g)^{1/2}$ den küçük olduğunda baraj yıkılmasının ani yıkılma olduğunu ifade etmişlerdir. Deneylerde 25 cm hazne yüksekliğinin kullanıldığı dikkate alınırsa verilen formül ile kapağın kalkma zamanı için sınır değer 0.2 s bulunur. Bu sonuçla karşılaştırıldığında, yapılan deneylerde kapağın oldukça hızlı kaldırıldığı görülmektedir.



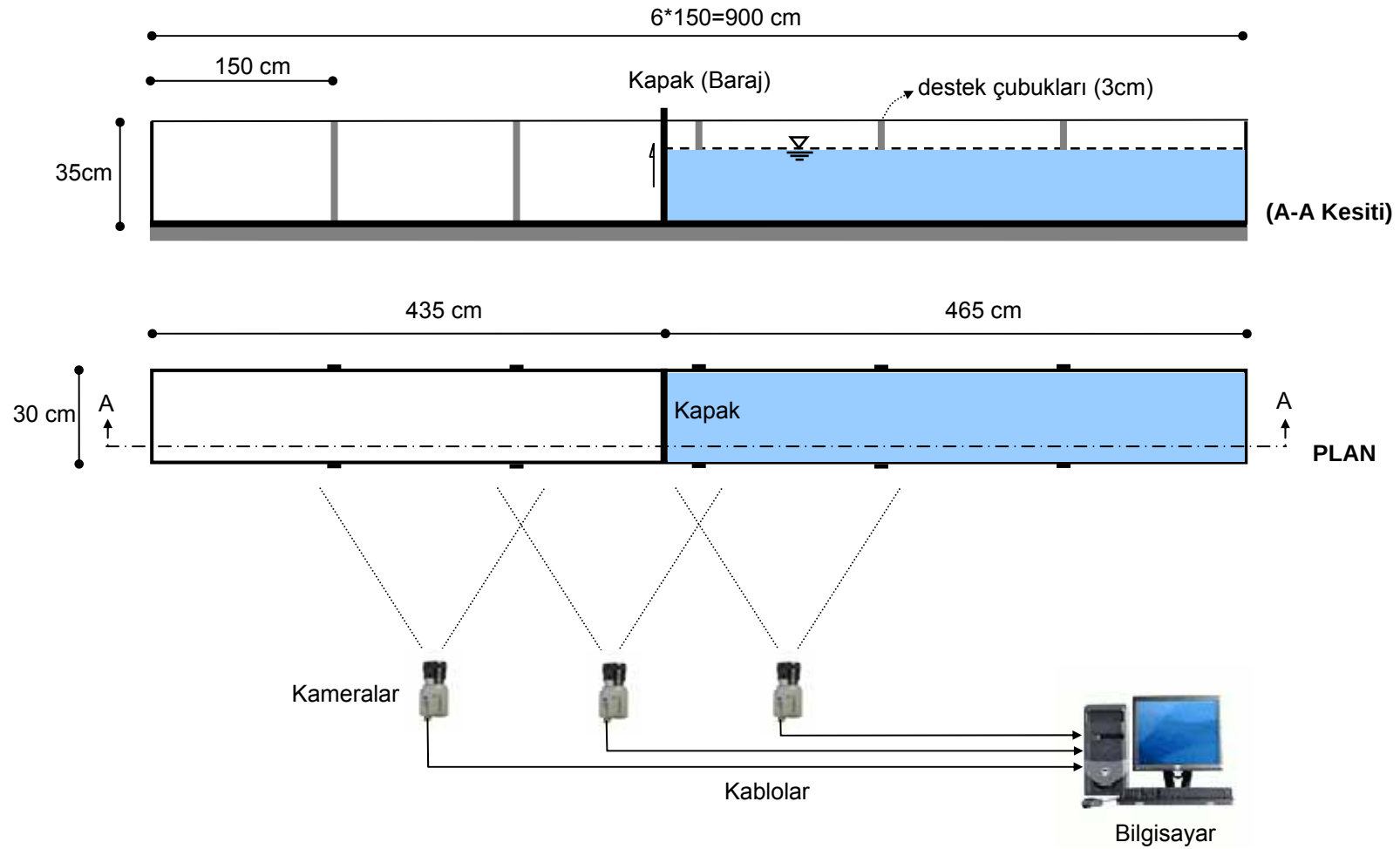
Şekil 5.2. Kapak mekanizması a) şematik gösterim b) gerçek görüntü

Kapak memba sınırından 4.65 m ve mansap sınırından 4.35 m uzaklıkta yerleştirilmiştir (Şekil 5.3). Kapağın kalkması sonucu oluşan baraj yıkılması akımının video kameralarla daha iyi izlenebilmesi ve serbest yüzeyin belirgin olması için suya gıda boyası katılarak renklendirilmiştir. Kuyruk suyu bulunması halinde ise kapağın memba ve mansabındaki su farklı renkte boyanarak akımın davranışının ve dalganın gelişiminin daha iyi anlaşılabilmesi amaçlanmıştır. Rezervuar her sefer hortumla yeniden doldurulmuştur ve deneylere başlamadan suyun durgunlaşması beklenmiştir.

5.1.2. Ölçüm Sistemi

Kapağın ani olarak kalkması sonucu oluşturulan baraj yıkılması dalgasının gelişimini incelemek amacıyla tez kapsamında video kameralar kullanılmıştır. Yapılan çalışmada ölçüm tekniği açısından diğer çalışmalardan farklı olarak üç kamera ve bir görüntü yakalama kartından oluşan bir görüntüleme sisteminden yararlanılmıştır. Kameralardan alınan görüntüler bilgisayar içerisine yerleştirilen görüntü yakalama kartı sayesinde eş zamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Kameralar birbirlerinin görüş açısını kesecek şekilde belirli aralıklarla yerleştirilmiştir (Şekil 5.3). Bu sayede üç kameradan alınan aynı zamanlı görüntüler, ortak kesişim noktaları dikkate alınarak birleştirilmiş ve akıma ait kesintisiz görüntüler (panoramik görüntü) elde edilebilmiştir. Daha sonra bu görüntüler üzerinden kanal boyunca oluşan değişken akıma ait su yüzü profilleri ve zamana bağlı noktasal su seviyesi değişimleri belirlenmiştir. Noktasal su seviyesi değişimleri belirlenirken birleştirilmiş görüntülerden yararlanıldığı gibi kameraların birbirinden bağımsız görüntüleri de bu amaçla kullanılmıştır.

Zamana bağlı noktasal su seviyesi değişimleri geliştirilen yazılım (kod) sayesinde literatürde ilk kez otomatik olarak video görüntüler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde değişken akıma ait görüntü bir kez alındıktan sonra deney tekrarlanmasına gerek kalmaksızın akımın boyuna doğrultusundaki istenilen her noktada su seviyesi ölçülebilmektedir.



Şekil 5.3. Deney kanalı ve kameraların yerleşim planı

Geliştirilen bu yaklaşım sayesinde metal çubuklarla yapılan ve elektrik iletkenliğine dayanan diğer noktasal su seviyesi ölçüm yöntemlerine göre sağladığı avantajlarla birlikte görüntüleme yöntemi, su derinliği değişiminin belirlenmesinde oldukça iyi bir alternatif olarak bu çalışmada kullanılmıştır.

Görüntü çözünürlüğü ve kameranın görüntüsü alınan nesneye olan uzaklığı, elde edilen ölçüm hassasiyetini doğrudan etkilemekle birlikte bu çalışmada yüksek çözünürlüklü olmayan kameralarla ve uzak mesafeden yapılan çekimlerle elde edilen görüntüler, görüntü işleme tekniklerinden faydalanılarak etkili bir biçimde kullanılmıştır. Çalışmada kaydedilen görüntülerin çözünürlüğü 768*576 ve 384*288, çekim hızları 25 fps (kare-frame) ve 50 fps (alan-field)'dir. Saniyede 50 görüntü alındığından noktasal ölçümlerde veri (zaman) aralığı 0.020 olmaktadır. Bir başka ifade ile çalışmada 0.020 saniye aralıkla elde edilen görüntüler kullanılmıştır. Noktasal su seviyesi değişimlerinin incelenmesinde h-t (derinlik-zaman) grafikleri çizilirken deneyden deneye değişmekle birlikte ortalama 15 sn çekim süresine sahip video görüntülerden yararlanılmıştır.

5.1.3. Çalışmaların Özeti

Baraj yıkılması problemini deneysel ve sayısal olarak ele alan bu çalışmada yatay dikdörtgen bir kanalda iki su seviyesini ayıran düşey bir kapağın ani olarak kaldırılmasıyla elde edilen baraj yıkılması taşkın dalgasının, farklı topografya ve kuyruk suyu koşullarına sahip mansap boyunca yayılması sırasında oluşan su yüzü profilleri (x-h) ve bir noktadaki su seviyesinin zamanla değişimleri (x-t) incelenmiştir. Deneylerde, rezervuar derinliği olarak deney kanalının boyutları dikkate alınarak $h_0=25$ cm seçilmiştir.

Tez kapsamında öncelikle kuru ($h_0=25$ cm) ve farklı kuyruk suyu yüksekliklerine (h_1) ($\alpha=h_1/h_0=0.1, 0.2, 0.4$) sahip ıslak durumlar için yıkılmanın başlangıç aşamalarında su yüzü profilleri belirlenmiştir. Stoker (1957) tarafından kuru ve ıslak durum için verilen analitik çözümlerin deneysel sonuçlarla olan uyumuna bakılmıştır. Deneysel sonuçlar daha sonra FLOW-3D ticari yazılımı

kullanılarak sığ su ve RANS denklemlerine dayanan sayısal çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Daha sonra mansapta üçgen ve trapez olmak üzere iki farklı geometriye sahip taban eşikleri kullanılarak arazi yatağındaki değişimlerin etkisine bakılmıştır. Elde edilen deneysel veriler kendi içerisinde, 2-boyutlu RANS ve 1-boyutlu sığ su denklemleri (SWE) ile karşılaştırılarak irdelenmiştir.

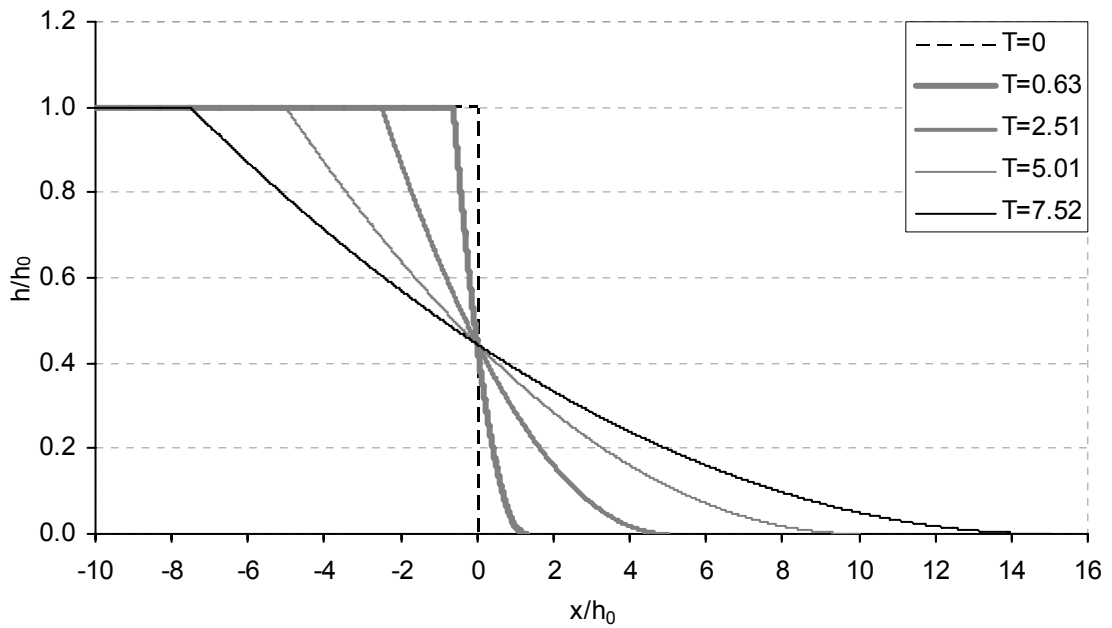
Son olarak mansap enkesiti üzerine yerleştirilen üçgen, trapez-A ve trapez-B olmak üzere üç farklı geometriye sahip pleksiglas engeller yardımıyla kanal üzerinde daralmalar oluşturularak enkesit şeklinin ve kanal genişliğindeki değişimlerin etkisi 3-Boyutlu RANS denklemleri ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

Çalışmada, noktasal su seviyesi değişimlerinin video görüntülerden belirlenmesi amacıyla geliştirilen yaklaşım RANS denklemleri ile karşılaştırılarak ölçüm sisteminin hassasiyeti de irdelenmiştir.

5.2. Baraj Yıkılması Problemi için Analitik Çözümlerin Değerlendirilmesi

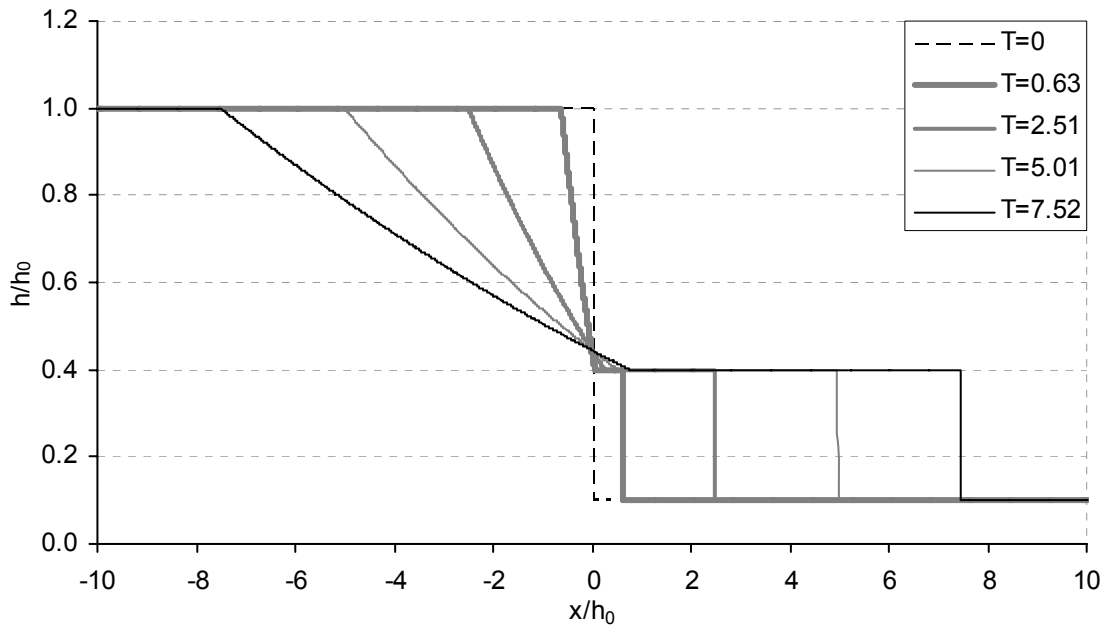
Baraj yıkılması probleminin çözümü için kullanılan denklemlerin karmaşık olmasından dolayı sadece belirli kabuller altında bazı basit geometrik durumlar için elde edilmiş analitik çözümler mevcuttur. Bu analitik çözümler doğal arazi topografyasına sahip gerçek arazi koşullarında baraj yıkılması akımının temsil edilmesi için yeterli değildir. Analitik çözümler, problemin matematiğinin daha iyi anlaşılabilmesine ve geliştirilen sayısal yöntemlerin doğrulanmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca analitik çözüm ile hesaplanan bölge içerisindeki her noktada akıma ait değişkenler kesintisiz belirlenebilmektedir. Yapılan çalışmada, yatay dikdörtgen bir kanal için mansapta kuyruk suyu olmaması durumu (KURU) için Ritter (1892) tarafından verilen ve mansapta kuyruk suyu bulunması durumu (ISLAK) için Stoker (1957) tarafından verilen analitik çözüm kullanılmıştır. Kuru ve ıslak durum için bilinen analitik çözümler MS Excel yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Islak durum için süreklilik, momentum ve karakteristik denklemlerinin bir arada çözülmesi gerektiğinden bu işlem için MS Excel içerisinde bir makro yazılmıştır.

Şekil 5.4’de $h_0=25$ cm rezervuar derinliği için farklı zamanlarda elde edilen su yüzü profilleri boyutsuz olarak görülmektedir. Grafiklerde su yükseklikleri (h) ve mesafeler (x) başlangıçtaki rezervuar derinliği h_0 ’a bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Zaman (t) ise $(g/h_0)^{1/2}$ ifadesi ile çarpılarak boyutsuz hale getirilmiştir. Şekile bakıldığında memba yönünde pozitif dalganın ve mansap yönünde de negatif dalganın yayıldığı görülmektedir. Dalga yayılma hızlarına bakıldığında herhangi bir t anındaki pozitif dalganın negatif dalgadan iki kat daha hızlı olduğu gözlenmektedir. Elde edilen analitik çözümlerde su yüzü profilleri paraboliktir. Baraj aksında su seviyesi $h=4/9h_0$ derinliğinde sabit kalmaktadır. Baraj aksında kritik akım meydana gelmektedir (denklem (3.110)). Dolayısıyla membada kritik altı mansapta ise kritik üstü akım koşulları oluşmaktadır.

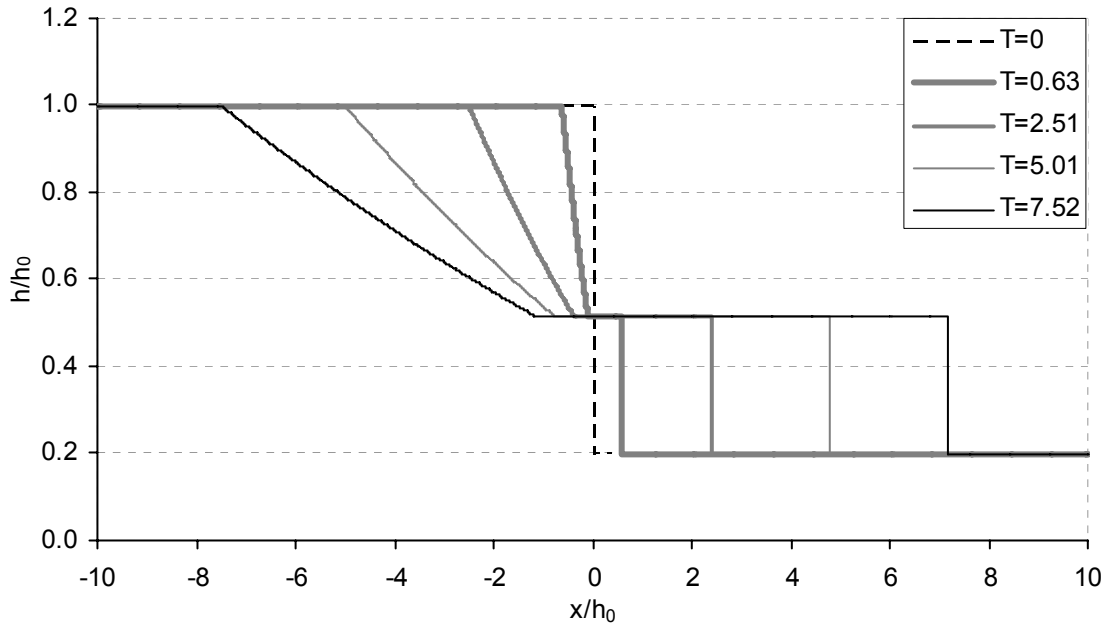


Şekil 5.4. Kuru durum için analitik çözümle elde edilen farklı zamanlardaki su yüzü profilleri

Islak durum için farklı mansap/memba derinlikleri oranına ($\alpha=h_1/h_0$) sahip analitik çözüm sonuçları Şekil 5.5’de $\alpha=0.1$ ve Şekil 5.6’da $\alpha=0.2$ derinlik oranı için verilmiştir. Kuru yatak ile karşılaştırıldığında ıslak durum için elde edilen su yüzü profilleri oldukça farklıdır. Islak durumda mansap yönünde ilerleyen bir kabarma dalgası oluşumu meydana gelmekte ve kabarma dalgası önünün süresiz olduğu görülmektedir. Su yüzü profili parabolik ve yatay olan iki farklı kısımdan oluşmaktadır. Kabarma dalgası kuyruk suyu derinliğinden daha yüksektir ve yatay bir çizgi ile ifade edilmiştir. Kabarma dalgası önünün ve memba doğrultusunda ilerleyen negatif dalgaın yayılma hızlarının hemen hemen eşit olduğu görülmektedir. İki farklı α derinlik oranı için Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da görülen su yüzü profilleri karşılaştırılırsa; $\alpha=0.1$ olması durumunda kabarma dalgasının başladığı noktanın (parabolik ve yatay kısmın birleşim noktası) mansap yönünde ilerlediği (Tip I) ve $\alpha=0.2$ durumu için bu noktanın memba yönünde hareket ettiği (Tip II) gözlenmektedir. Bu durum Bölüm 3.6.2’de Denklem 3.126 ile $\alpha=0.1383$ limit durumu için tanımlanmıştır.



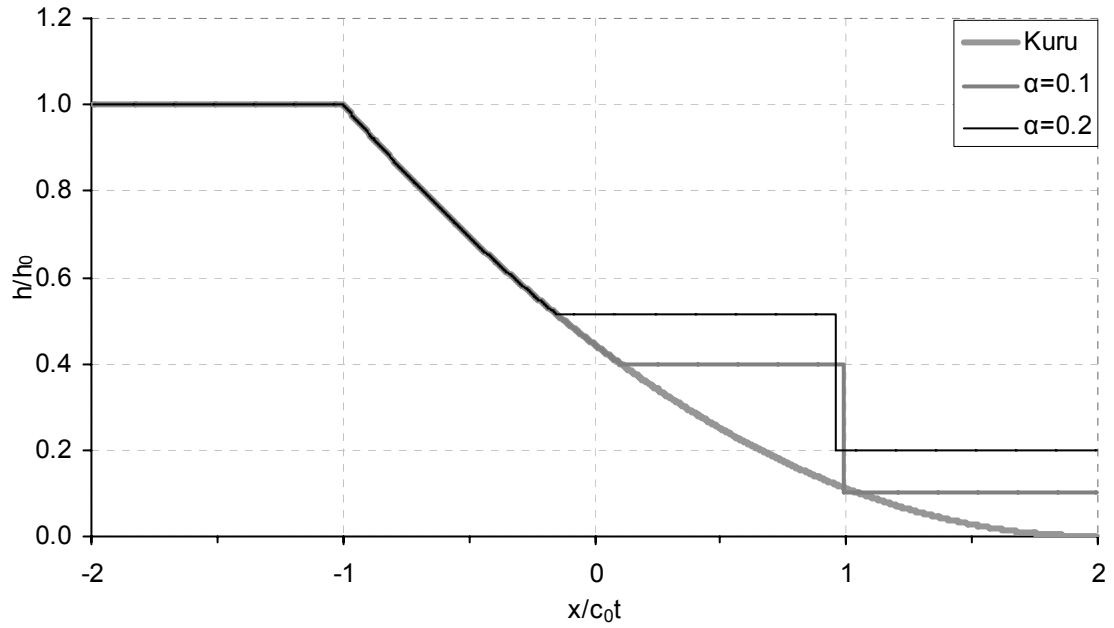
Şekil 5.5. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için analitik çözüm ile elde edilen farklı zamanlardaki su yüzü profilleri



Şekil 5.6. $\alpha=0.2$ derinlik oranı için analitik çözüm ile elde edilen farklı zamanlardaki su yüzü profilleri

Şekil 5.5'e bakılırsa kabarma dalgası önünün arka kısmına göre daha hızlı hareket ettiği görülmektedir. Ayrıca baraj aksında su derinliği $h=4/9h_0$ değerinde sabit kalmaktadır. Buna karşın Şekil 5.6'da $\alpha=0.2$ durumu için baraj aksındaki su derinliği kabarma dalgası derinliğine ($h=h_2$) eşit olmaktadır.

Şekil 5.7'de kuru ve farklı derinlik oranlarına sahip ıslak durum için $t=0.8s$ anında analitik çözümlerden elde edilen su yüzü profilleri bir arada verilmiştir. Yükseklikler (h) h_0 'a ve mesafeler (x) c_0t 'ye bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Grafiğe bakıldığında kuru durumdaki pozitif dalga yayılma hızının $2c_0$ ve farklı derinliklerdeki kabarma dalgası önünün ilerleme hızının da yaklaşık c_0t olduğu görülmektedir. Kuyruk suyu derinliği arttığında ($\alpha=0.2$) kabarma dalgası önünün çok az daha geride kaldığı görülmektedir. Negatif dalga yayılma hızları ise her üç durumda da c_0 olmaktadır. Yine şekilden $\alpha=0.2$ oranı için kabarma dalgasının başlangıç kısmının membada ve $\alpha=0.1$ oranı için mansapta kaldığı görülmektedir.

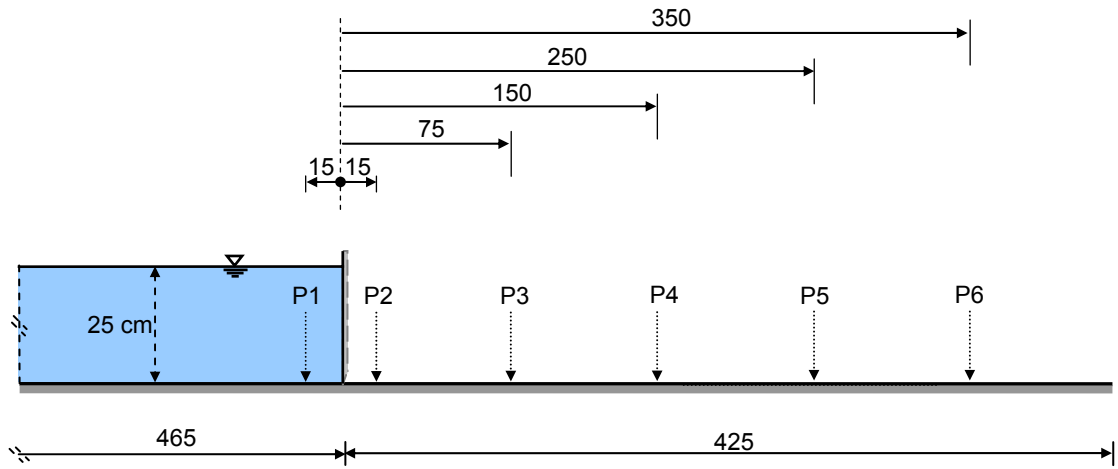


Şekil 5.7. Kuru ve farklı derinlik oranlarına sahip ıslak durum için $t=0.8$ s anında analitik çözümle elde edilen su yüzü profilleri

5.3. Kuru Kanalda Baraj Yıkılması Problemi

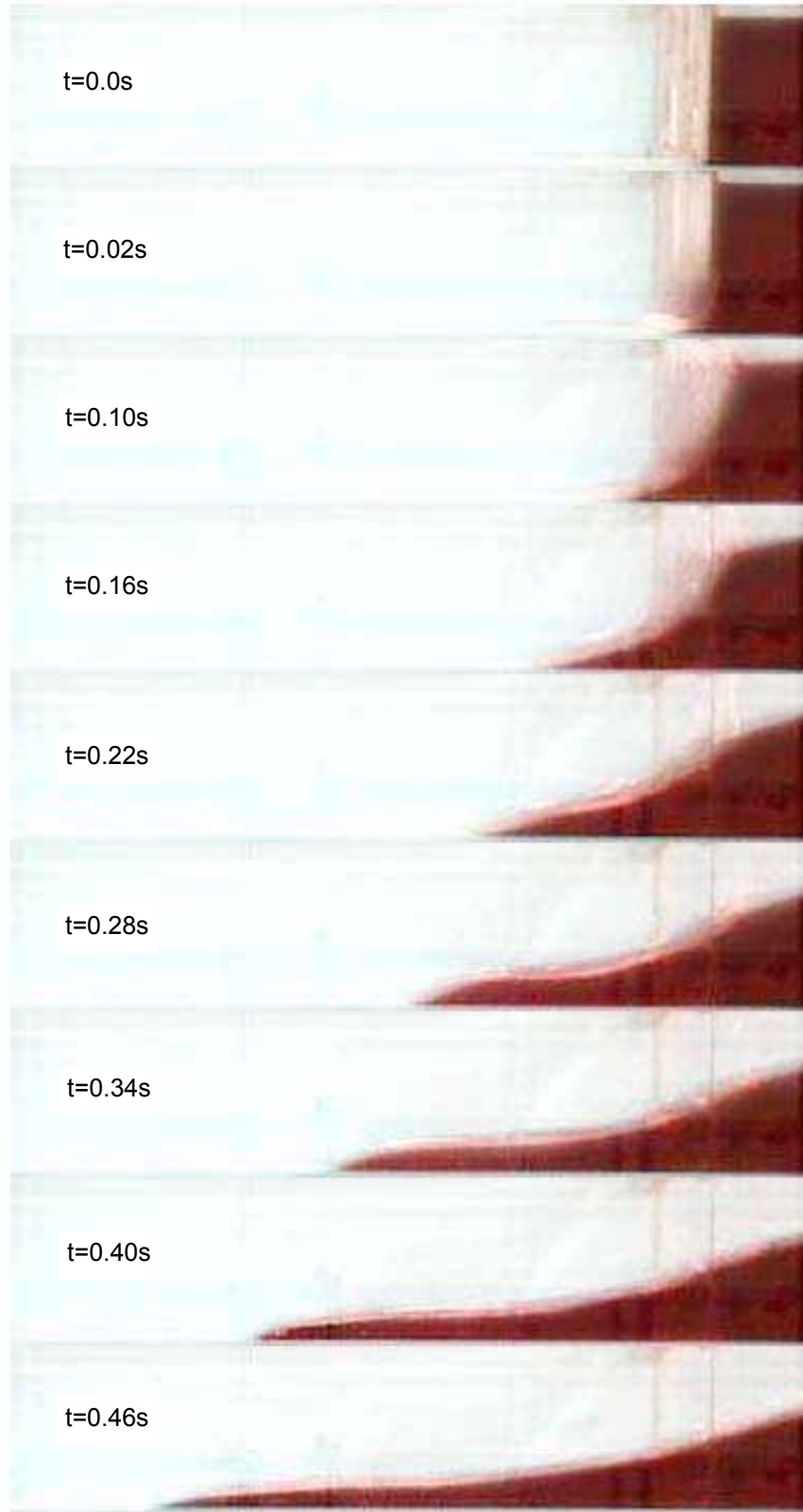
Yapılan deneysel çalışmalarda, ilk olarak baraj yıkılması dalgasının kuru bir mansap yatağında yayılması ele alınmıştır. Başlangıçta 25 cm yüksekliğinde ve 465 cm uzunluğundaki bir rezervuara sahip bir kanalın ucundaki kapağın ani olarak kaldırılmasıyla oluşan başlangıç anlarındaki su yüzü profillerinin ve Şekil 5.8’de görüldüğü gibi biri membada (P1) ve diğerleri mansap boyunca 5 farklı noktada (P2-P6) su seviyesinin zamanla değişimleri belirlenmiştir. İlk iki nokta baraj aksının hemen membada ve mansabında seçilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar birbirleriyle, analitik ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kanal tabanı x eksen ve kapağın bulunduğu düzlem y eksen olmak üzere kapağın topuk noktası orijin olarak seçilmiştir. Mansaba doğru x pozitif membada yönünde negatif olarak alınmıştır. Deney başlamadan önce sızmalar gres yağı kullanılarak kontrol edilmiş mansap kısmı tamamen kuru hale getirilmiştir. Kanal duvarları ve tabanı cam malzemeden yapıldığı için pürüzlülüğün oldukça düşük olduğu kabul edilmiştir.



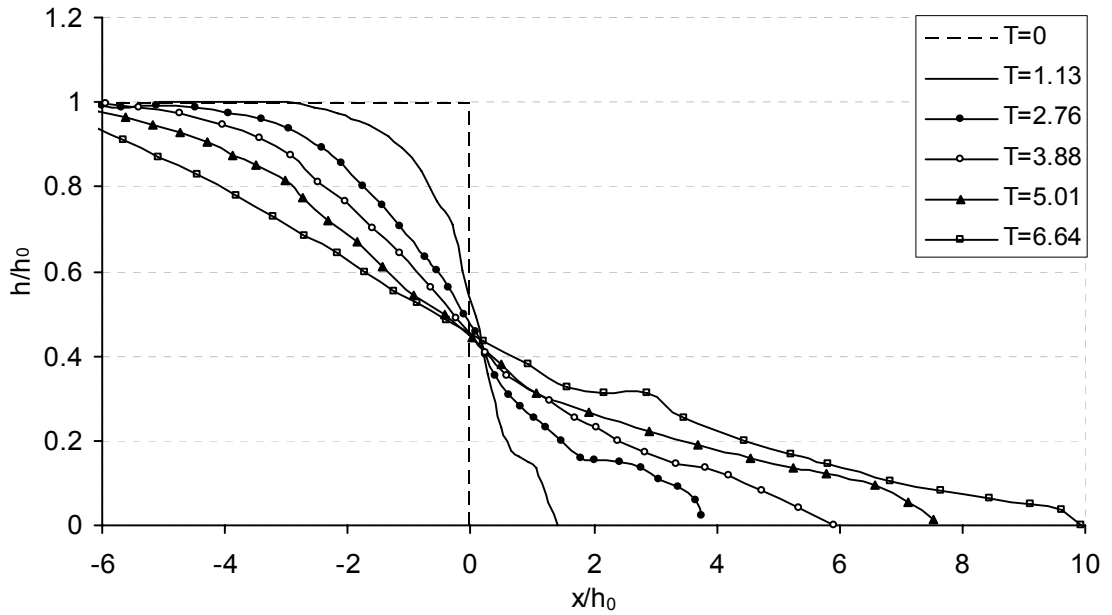
Şekil 5.8. Kuru kanalda baraj yıkılması akımının deney düzeneği ve su seviyesinin zamanla değişiminin belirlendiği ölçüm noktaları

Şekil 5.9’da baraj yıkılması dalgasının başlangıç aşamalarına ait görüntüler görülmektedir. Akışkanın davranışının ve serbest yüzeyin daha net izlenebilmesi için su içerisine koyu renkte gıda boyası katılmıştır. Şekilden görüleceği gibi $t=0.1s$ anında kapak çoktan kalkmıştır ve Lauber ve Hager (1997) önerdikleri sürenin ($h=25$ cm için $t=0.2$) çok altında kalkmaktadır ve oluşturulan yıkılma ani kabul edilebilir. Kapağın kalkmaya başlamasıyla birlikte yerçekimi etkisi ile akışkan kapak altından harekete başlamaktadır. Mansap yönünde pozitif dalga ilerlerken memba yönünde de negatif dalganın oluşumu görülmektedir. Başlangıçta ($t=0.10-0.16s$) su yüzü analitik çözümde olduğu gibi parabolik olmaktadır. İlerleyen zamanlarda ($t>0.22s$) dalga önü şekil değiştirerek tümsek görünümü almaktadır. Bunun nedeni yüzey pürüzlülüğü ile açıklanabilir. Dalga önü ilerlerken pürüzlülük değeri küçük bir değere sahip olsa da dalga önünü yavaşlatmakta ve dalga önünün bir miktar kabarmasına neden olmaktadır. Bu durum dalganın başlangıçtaki yayılması süresince yüzey pürüzlülüğünün etkisinin küçük olduğunu, ilerleyen zamanlarda dalga önüne yakın bölgelerde pürüzlülüğün belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca yıkılma başlangıcında (örn. $t=0.16$ s) yüzey eğriliğinin fazla olması bu aşamada hidrostatik olmayan basınç dağılımının söz konusu olduğunu göstermektedir.



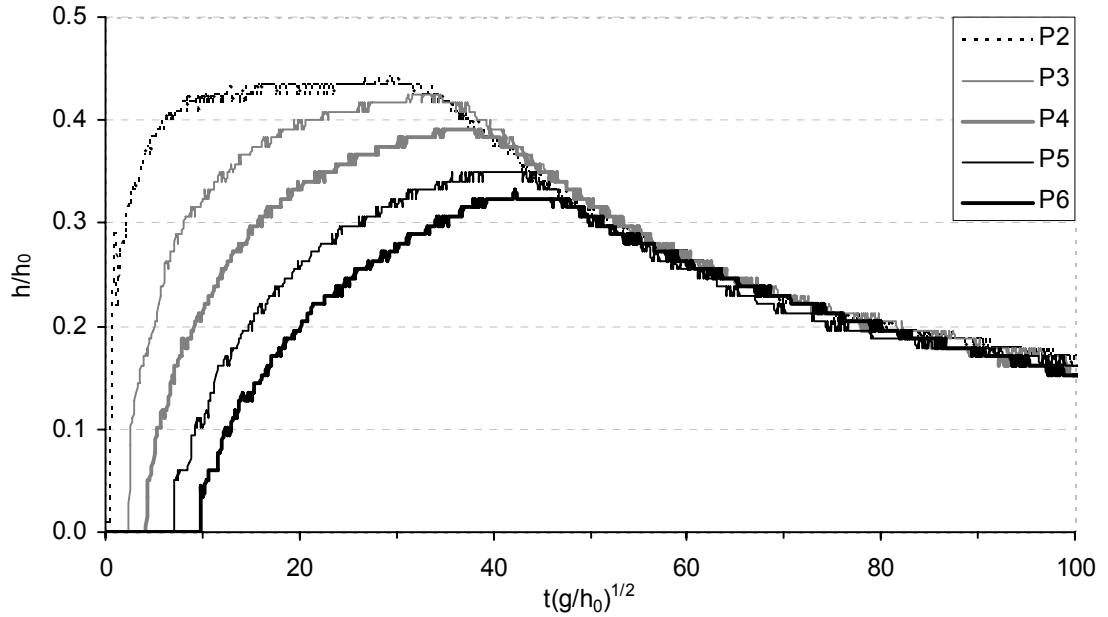
Şekil 5.9. Kuru kanalda baraj yıkılması dalgasının başlangıç aşamalarındaki deney görüntüleri

Şekil 5.10’da farklı zamanlardaki deney görüntülerinden elde edilen boyutsuz su yüzü profilleri ($h(x)$) bir arada verilmiştir. Grafikte yükseklik ve mesafeler başlangıç rezervuar derinliği h_0 ’a bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Kapak kalktıktan oldukça kısa bir süre sonra baraj aksındaki su seviyesi analitik çözümde olduğu gibi $h/h_0=4/9$ olmaktadır ve tüm profillerde su seviyesi yaklaşık bu nokta üzerinde sabit kalmaktadır. Su yüzü profilleri baraj aksındaki bu nokta üzerinde dönüyor gibi görünmektedirler. Su yüzü profilinde her iki dalga ucu bir eğime sahipken profilin arada kalan kısımları zaman ilerledikçe düzleşmektedir.



Şekil 5.10. Kuru durum için başlangıç aşamalarında elde edilen deneysel su yüzü profilleri

Şekil 5.11’de mansapta belirli noktalardaki su seviyelerinin zamanla değişimlerini gösteren eğriler görülmektedir. Şekil 5.8’de noktasal su seviyesi ölçümü yapılan bu noktaların baraj aksından olan uzaklıkları verilmiştir. Grafiklerde boyutsuz zaman büyüklüğü (T), zaman ekseninin $(g/h_0)^{1/2}$ terimi ile çarpılması, boyutsuz su yüksekliği (H) ise su yüksekliklerinin rezervuardaki başlangıç su yüksekliği h_0 ’a bölünmesiyle elde edilmiştir. Kanal mansabındaki herhangi bir x mesafesinde akım derinliği h , pozitif dalga önünün ulaşmasıyla birlikte gittikçe artan bir şekilde yükselerek bir maksimum noktaya gelmekte ve daha sonra yavaşça

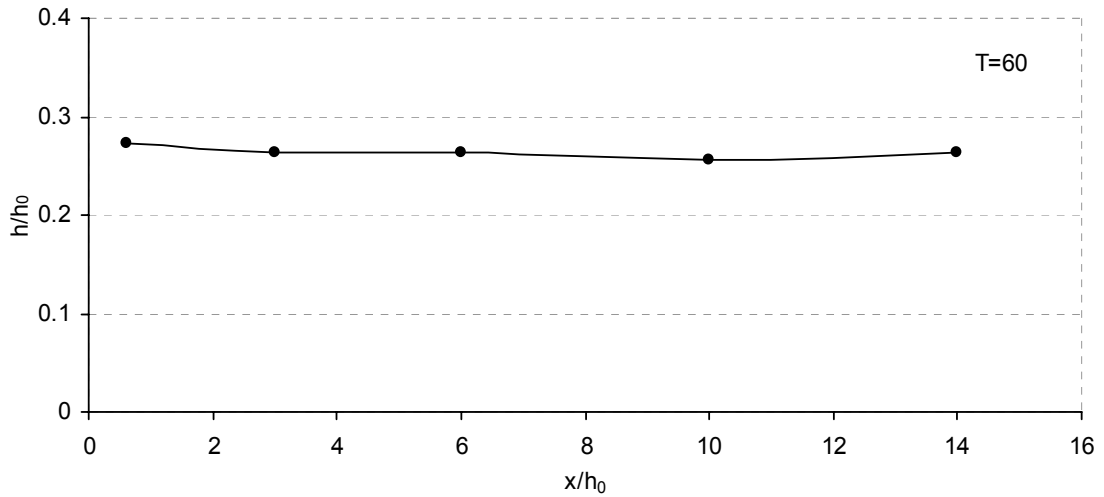


Şekil 5.11. Baraj yıkılması dalgasının kuru yatakta yayılması sonucu kanal mansabında belirli noktalarda meydana gelen su seviyesi değişimleri

rezervuar tam boşalana kadar düşmektedir. Eğrilerde su seviyesi yükselmekte iken birden belirgin bir düşüşe geçmektedir. Su seviyesindeki azalmanın ani olarak başlaması rezervuarın sonlu bir uzunluğa sahip olması ile açıklanabilir. Negatif dalga kanal sonuna ulaştığında su seviyesi birden azalmaya başlamaktadır. Bu etki mansaptaki ölçüm alınan noktalarda bir süre sonra hissedilmeye başlamaktadır. Dolayısıyla uzak noktalarda düşmenin başladığı nokta daha geç olacaktır. Dikkat edilirse P2 noktasındaki düşüş P6 noktasından daha erken olmaktadır. Şayet rezervuar sonsuz uzunluklu olsa idi eğrilerde bir azalma olmayacak sonsuza doğru gidildikçe su seviyesi $h/h_0=4/9$ yatay çizgisine asimptot olacaktı. Baraj aksına en yakın P2 noktasında su seviyesinin yükselmesinden sonra yaklaşık yatay kaldığı kısımda asimptota yaklaşma bir miktar görülmektedir. Baraj aksına yakın noktalarda bu asimptot noktasına su seviyesi daha hızlı yaklaşacak uzak noktalarda ise su seviyesindeki yükselme daha geç ve yavaş bir şekilde meydana gelecektir. Dolayısıyla su seviyesinde azalmanın başladığı noktanın rezervuar uzunluğuna bağlı olduğu söylenebilir. Buradan rezervuar uzunluğu ile meydana gelecek maksimum derinlikler arasında bir ilişki olduğu sonucu çıkarılabilir. Başka bir ifade ile rezervuar

uzunluğu mansapta herhangi bir kesitte meydana gelen maksimum akım derinliğini etkilemektedir. Ayrıca mansapta herhangi bir kesit değişimi, engel vb. yoksa meydana gelen maksimum derinliklerin $h/h_0=4/9$ 'un altında kalacağı söylenebilir.

Şekil 5.11'de baraj aksına yakın kesitlerde yükselme eğrisinin daha dik uzak kesitlerde ise daha düşük eğime sahip olduğu görülmektedir. Barajdan uzaklaştıkça su seviyesinin maksimum değere ulaşması daha uzun zaman almakta baraja yakın yerlerde ise daha hızlı olmaktadır. Alçalma eğrilerine bakıldığında bu eğrilerin birbiri ile paralellik gösterdiği gözlenmektedir. Alçalma eğrisi parabolik dolayısıyla gittikçe azalan bir oranda su seviyesi düşmektedir. P6 eğrisinde azalmanın başladığı $(t(g/h_0)^{1/2}=50)$ andan sonra ölçüm alınan tüm noktalarda su seviyeleri yaklaşık birbirine eşit olmaktadır. Diğer bir deyişle kanaldaki su yüzeyi yaklaşık yatay bir çizgi olacaktır. Bu durum $T=60$ anında ölçüm alınan noktalardaki su seviyesi değerleri kullanılarak su yüzeyi eğrisinin çizildiği Şekil 5.12'de açıkça görülmektedir. Sonuç olarak sonlu uzunluklu bir rezervuarda su seviyesi alçalmaya başladıktan belirli bir t zaman sonra kanaldaki su yüzeyi yaklaşık yatay bir çizgi olmaktadır.

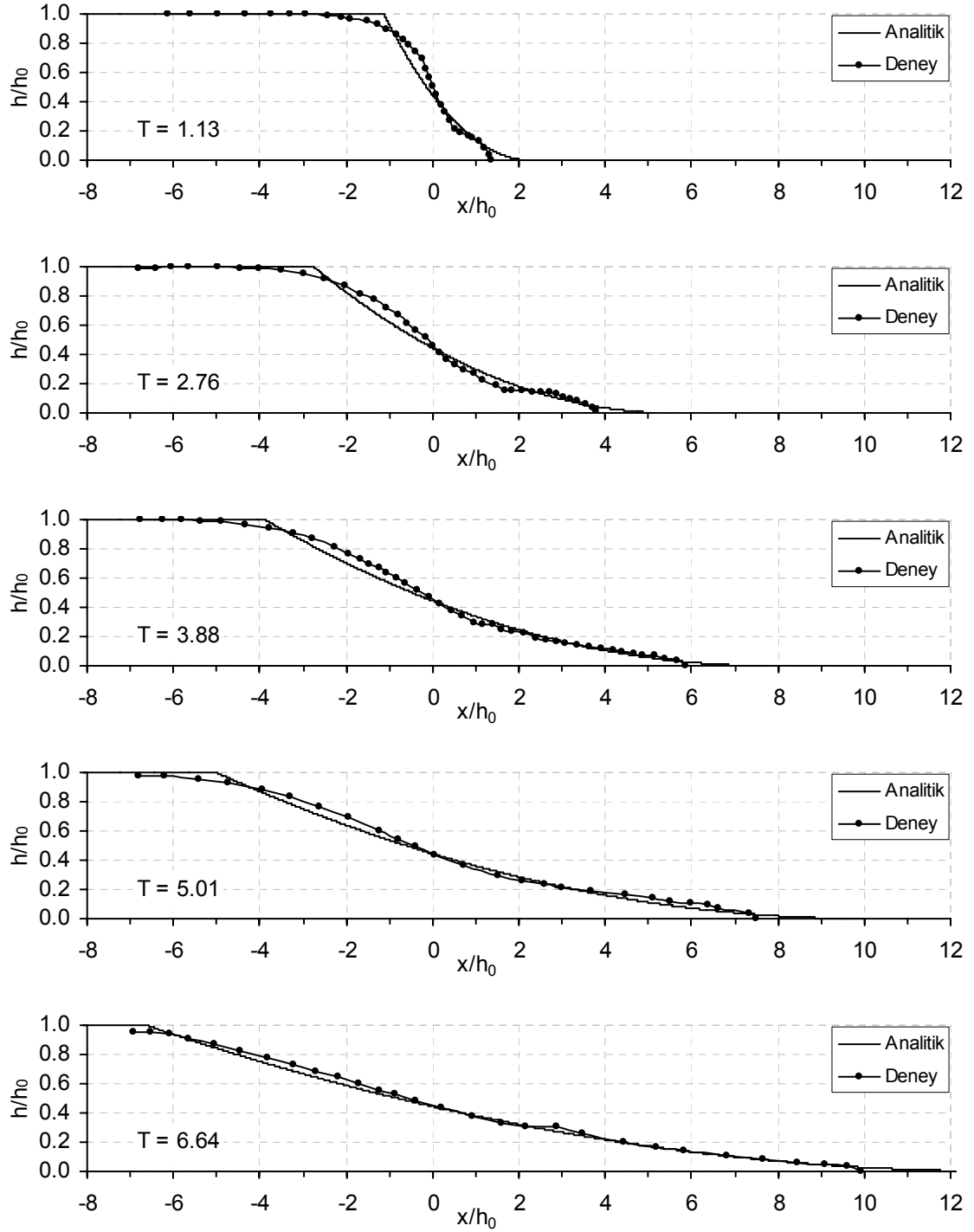


Şekil 5.12. $T=60$ anında ölçüm alınan noktalardan elde edilen kanaldaki su yüzeyi eğrisi

Şekil 5.11'e bakıldığında maksimum derinliğin baraj aksına yakın noktalarda meydana geldiği mansaba doğru ilerledikçe oluşan maksimum değerlerin azaldığı görülmektedir. Bir başka ifade ile mansap boyunca meydana gelen maksimum derinlikler x mesafesi ile azalmaktadır. Benzer şekilde baraja yakın kesitlerde maksimuma ulaşma zamanı daha kısa olmakta mansaptaki uzak noktalarda ise maksimum yüksekliğe ulaşma zamanı daha uzun süre almaktadır.

Bu sonuçlarla mansapta meydana gelecek maksimum derinliğin rezervuar uzunluğu ve x mesafesinin bir fonksiyonu olacağı söylenebilir. Bunun dışında yapılan çalışmada ele alınmayan rezervuar yüksekliği değişiminin de oluşacak maksimum su yüksekliklerini etkileyeceği açıktır.

Deneylerden elde edilen başlangıç aşamalarındaki su yüzü profilleri, Ritter'in (1892) baraj yıkılması için verdiği analitik çözüm ile Şekil 5.13'de karşılaştırılmıştır. Başlangıç aşamalarında ($T=1.13-2.76$) serbest yüzey profilleri analitik çözüm ile çok uyumlu olmamaktadır fakat ilerleyen zamanlarda ($T=6.64$) daha yakın sonuç verdiği görülmektedir. Bununla birlikte pozitif ve negatif dalga uçlarında deney ve analitik çözüm arasında sapma görülmektedir. Analitik çözümde serbest yüzey parabolik iken deneysel sonuçlarda dalga uçları dış bükey görünüme sahiptir. Analitik çözümde pozitif dalga önünün deneysel çözüme göre daha ilerde olduğu buna karşın negatif dalga önünün ise deneysel sonuçların gerisinde kaldığı görülmektedir. Buradan deney sonuçlarında pozitif dalga yayılma hızının Ritter'in (1892) verdiği $(2\sqrt{gh_0})$ değerinden daha yavaş olduğu, negatif dalganın ise memba yönünde $(\sqrt{gh_0})$ değerinden daha hızlı ilerlediği ortaya çıkmaktadır. Bu durum, analitik çözümün ideal akım için geçerli olması ve deneysel çalışmada pozitif dalga ucunun kanal tabanı pürüzlülüğünden etkilenmesi ile açıklanabilir. Ayrıca gerçek durumda, başlangıçta negatif dalga memba yönünde ilerlerken ağırlık kuvvetlerinin etkisi ile aşağı doğru da hareket etmektedir. İlave olarak baraj aksındaki su derinliği incelendiğinde deneysel ve analitik sonuçların $h/h_0=4/9$ değerinde sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.13. Kuru durum için deneylerden elde edilen başlangıç aşamalarındaki su yüzü profillerinin analitik çözüm ile karşılaştırılması

5.3.1. Baraj Mansabının Kuru Olması Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlar ile Karşılaştırılması

Kuru kanalda, baraj yıkılması dalgasının yayılmasını sayısal olarak karşılaştırmak amacıyla iki farklı teoriye dayanan sığ su denklemleri (**SWE**-Shallow Water Equations) ve Reynold Ortalamalı Navier-Stokes (**RANS**-Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleri kullanılmıştır. Denklemlerin çözümü için FLOW-3D programından yararlanılmıştır. Sayısal sonuçlar, başlangıç aşamalarındaki su yüzü profilleri ve Şekil 5.8’de baraj aksından uzaklıkları verilen biri membada ve diğerleri mansap boyunca farklı mesafelerde olmak üzere toplam altı noktada su seviyesinin zamanla değişimleri ile karşılaştırılmıştır.

Sayısal çalışmada, deney kanalının boyutları dikkate alınarak RANS denklemlerinin çözümünde 8.90 m uzunluğunda ve 0.30 m yüksekliğinde bir çözüm alanı modellenmiştir. Serbest yüzeyin modellenmesinde akışkan hacmi (VOF-Volume of Fluid) yaklaşımı kullanıldığından çözüm bölgesi içerisinde 0.25 m yüksekliğinde 4.65 m uzunluğunda bir su bölgesi tanımlanmıştır. Baraj aksı orijin olarak belirlenmiş ve mansap doğrultusu pozitif yön seçilmiştir. Suyun yoğunluğu 1 kg/m³ ve yerçekimi ivmesi, z eksenini düşey yön kabul edilerek -9.81 m/sn² olarak alınmıştır. Kanal yüzeylerinin pürüzsüz olduğu kabul edilmiştir. Akım türbülanslı bir yapıya sahip olduğundan türbülans modeli olarak serbest yüzeyli akımlarda test edilmiş (Shigematsu ve ark., 2004) bir yöntem olan k-ε türbülans yaklaşımı kullanılmıştır.

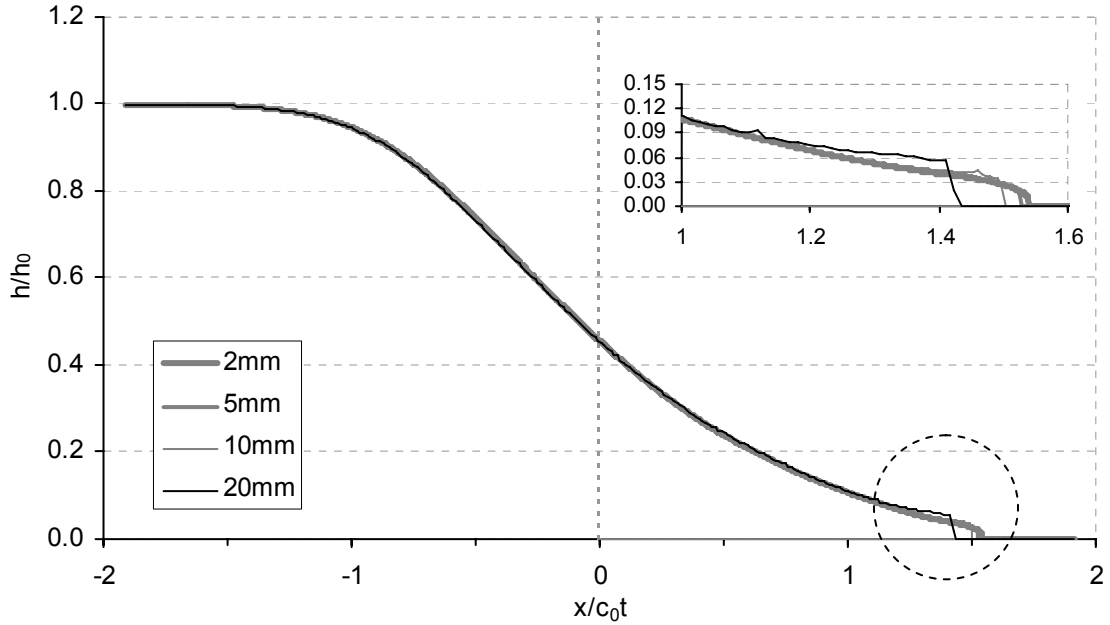
Memba sınır şartı (x_{min}) rezervuara herhangi bir akım girişi olmadığından ve rezervuar sabit uzunluklu olduğundan duvar (wall) olarak alınmıştır. Mansap sınır şartı (x_{maks}) ise akım herhangi bir kısıtlamaya maruz kalmadan serbestçe çözüm bölgesi dışına çıktığı için çıkan akım (outflow) olarak belirlenmiştir. Çözüm bölgesinin üst sınırı (z_{maks}) simetri olarak alınmıştır. Bu şekilde de serbest su yüzeyinde atmosfer basıncı etkili olabilmektedir. Serbest yüzey VOF ile tanımlandığından su-hava arakesiti üzerinde sınır şartı olarak sıfır kayma gerilmesi ve sabit atmosfer basıncı yazılım tarafından uygulanmaktadır. Kanal yan yüzeyleri ise simetri eksenini olarak seçilerek akım iki boyutlu modellenmiştir. Kanal tabanı

(z_{min}) ise duvar (wall) olarak alınmıştır. RANS denklemlerinin çözümünde $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanıldığından duvar fonksiyonu olarak yazılım Bölüm 3.7’de verilen hız dağılımını kullanmaktadır. Duvar üzerinde kayma olmama koşulu (no slip condition) uygulanmıştır. Dolayısıyla duvar yüzeyi üzerinde yatay ve düşey hız büyüklükleri sıfır olmaktadır. SWE denklemlerinin çözümünde ise türbülans modelleri kullanılmamaktadır.

Sayısal çalışmalarda, çözüm bölgesinde seçilen ağ aralıkları (mesh) sayısal sonuçlar üzerinde oldukça etkili olabilmektedir. Bu nedenle uygun ağ aralığının belirlenmesi amacıyla farklı büyüklüklerde ağ aralıkları kullanılarak bir ön çalışma yapılmış ve serbest yüzey profilini nasıl etkilediği anlaşılmaya çalışılmıştır. Şekil 5.14’de 2, 5, 10, 20 mm arasında 4 farklı ağ aralığı kullanılarak elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekilden ağ aralığı büyüklüğünün sadece dalga önü üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ağ aralığı küçüldükçe dalga önü daha ileride olmaktadır. 2, 5 ve 10 mm ağ aralıklarında belirlenen dalga önünün yerleri birbirlerine yakın durmaktadır. Ağ aralıklarının küçük seçilmesi çözülmesi gereken bilinmeyen sayısını arttırdığından bilgisayarın çözüm süresinin ve çıktı dosyası boyutunun artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden yapılan çalışmada ağ aralıkları 0.01 m olarak belirlenmiştir. FLOW-3D yazılımı ile hesaplamalar sadece dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm ağı üzerinde yapılmaktadır. Bu çalışmada RANS modelinde x ve z doğrultularında 0.01 m büyüklüğünde üniform ağ aralıkları kullanılmıştır. Bir başka deyişle çözüm ağı karelerden oluşmuştur. SWE modelinde ise x doğrultusunda 0.005 m ağ aralığı kullanılırken genel bir kural olarak tanımlanan akışkan hacmi ayırım çizgisinin altında kalacak şekilde z doğrultusu iki hücreye bölünmektedir. Bu sayede VOF yöntemi sıg su denklemlerine uygulanabilmektedir. Bu nedenle SWE modeli için 8.90x0.50 m’lik bir hesaplama bölgesi düşünülmüş ve başlangıçtaki rezervuar derinliği 0.25 m olduğu için z eksenini 0.30 cm noktasından ikiye bölünmüştür.

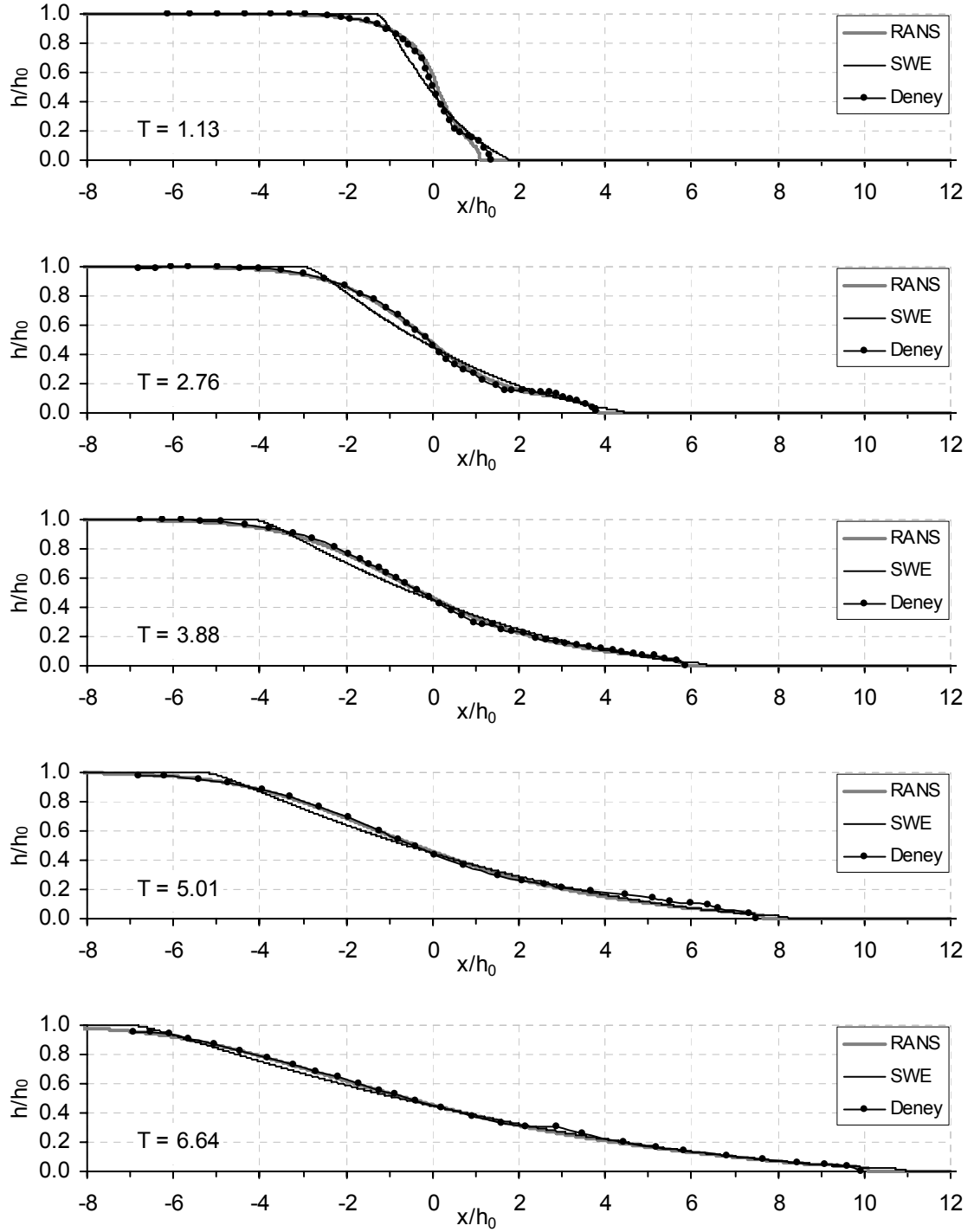
RANS modelinde 85632 hücreden oluşan 16 s’lik çözüm yaklaşık 11.25 dakika sürerken SWE modelinde 26730 hücreden oluşan daha sık ağ aralıklarına sahip 16 s’lik çözüm yaklaşık 4.9 dakika sürmektedir. Görüldüğü gibi SWE denklemlerinin çözümü ağ aralıkları sık seçilmesine rağmen çözüm bölgesi RANS

modeline göre daha az hücreden oluşmakta ve çözüm süresi çok daha kısa olmaktadır.



Şekil 5.14. Farklı ağ aralıklarının su yüzü profili üzerindeki etkisi

Başlangıç aşamalarındaki su yüzü profillerini karşılaştırmak amacıyla Şekil 5.15'e bakıldığında genel olarak RANS ile deney sonuçlarının oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. SWE ile elde edilen sonuçlar özellikle başlangıç aşamalarında ($T=1.13$) deneyler ile çok uyumlu görülmemekte fakat ilerleyen zamanlarda ($T=6.64$) su yüzü profilinin genel durumunu daha iyi yansıtmaktadır. Bununla birlikte pozitif ve negatif dalga uçlarında sapmalar bulunmaktadır. Mansap bölgesinde ($x/h_0 > 0$) hesaplanan dalga önü, SWE denklemlerinde deney ve RANS sonuçlarına göre daha hızlı ilerlemektedir. Diğer yandan rezervuardaki ($x/h_0 < 0$) negatif dalga ucu SWE sonuçlarında daha yavaş hareket etmektedir. Genel olarak SWE ile elde edilen su yüzeyi eğrisinin parabol görünümünde olduğu söylenebilir. Bunun en büyük nedeni SWE denklemlerinde düşey ivme bileşenlerinin ihmal edilmesi ve akımın hidrostatik kabul edilmesi olarak açıklanabilir. İlave olarak baraj aksında ($x/h_0 = 0$) su derinliği başlangıçta ($T=1.13$) deneysel ve RANS sonuçlarında

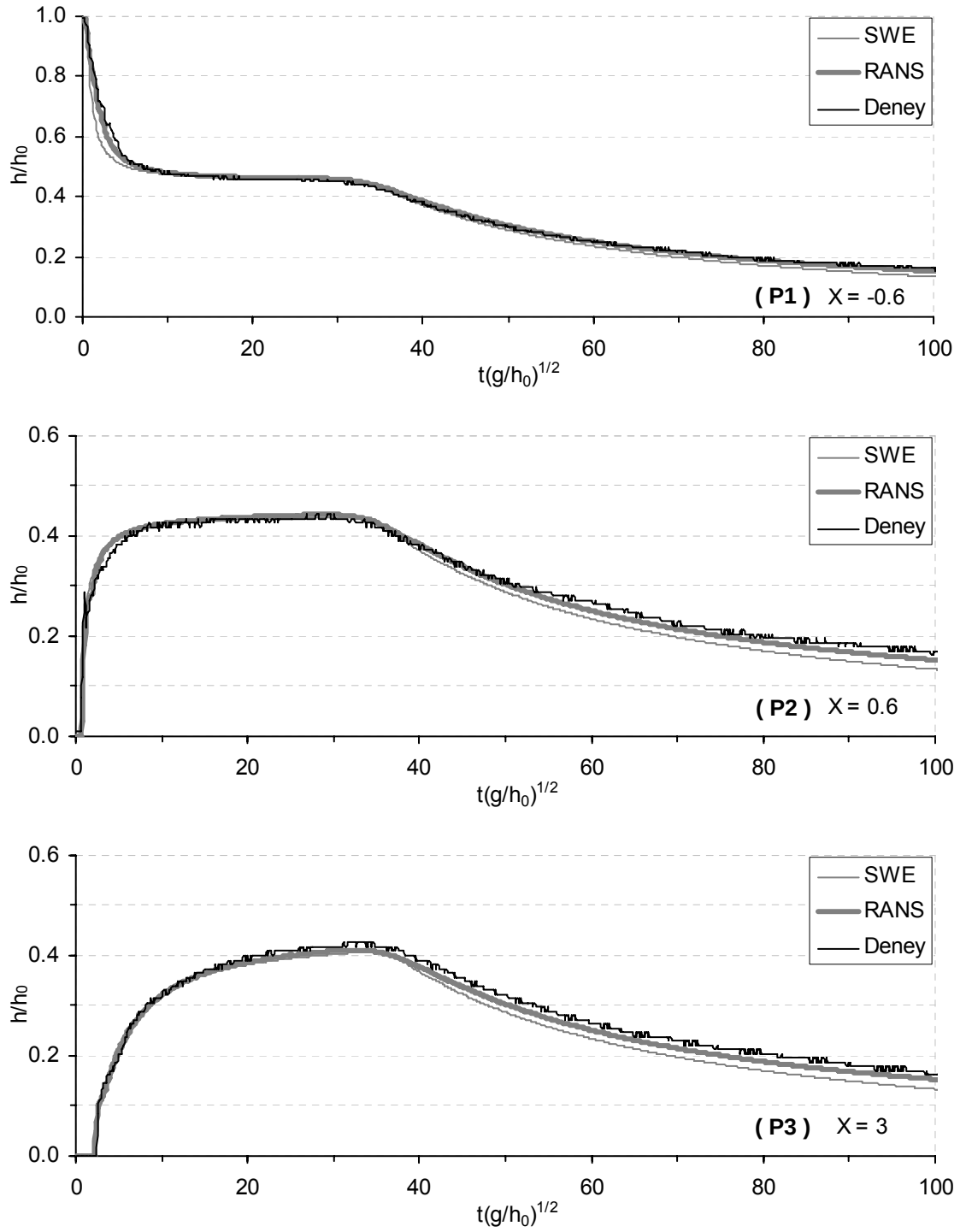


Şekil 5.15. Kuru durum için başlangıç aşamalarındaki deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması

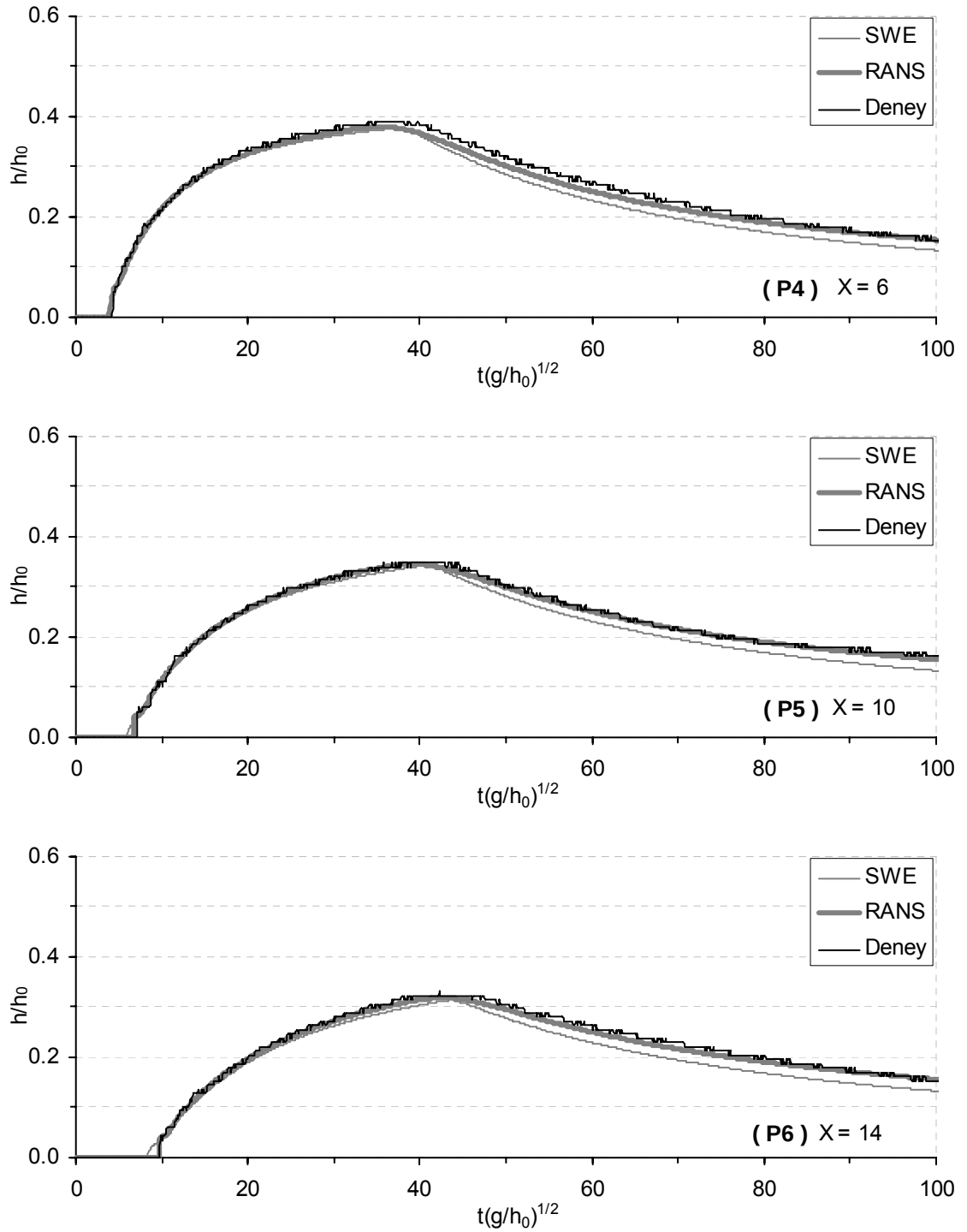
daha yüksek iken ilerleyen zamanlarda ($T>3.88$) bu fark ortadan kalkmakta ve her üç sonuçta birbiriyle oldukça uyumlu olmaktadır.

Şekil 5.16, farklı kesitlerde deneysel ve sayısal olarak elde edilen zamana bağlı su seviyesi değişimlerini göstermektedir. Ölçüm alınan noktaların baraj aksından uzaklıkları Şekil 5.8’de verilmiştir. Deney sonuçları elde edilirken 0.020s (50fps) aralıklarına sahip 16s süresince çekilmiş video görüntülerden yararlanılmıştır. $X=x/h_0=-0.6$ (P1) ve $x/h_0=0.6$ (P2) baraj kesitinin hemen memba ve mansabındaki ölçüm alınan noktalar. Dikkat edilirse başlangıçta barajın hemen memba kısmında ($x/h_0=-0.6$) ani bir düşüş olmakta ve daha sonra su seviyesi yaklaşık $h/h_0=0.46$ yüksekliğinde bir süre sabit kalmakta ve son olarak birden düşüşe geçmektedir. Barajın hemen mansabında ($x/h_0=0.6$) ise önce su seviyesi hızlı bir şekilde yükselmekte, sonrasında membadakine benzer biçimde bir süre ortalama $h/h_0=0.43$ seviyesinde yatay kalmakta ve sonrasında ani bir şekilde düşmektedir. Baraja yakın memba ve mansap kesitlerinde su seviyesinin yaklaşık yatay kaldığı değerler baraj aksındaki $h/h_0=4/9=0.44$ seviyesi civarındadır. Mansaptaki kesitlerde ise su seviyesi yükselmekte iken aniden düşüşe geçmektedir. Ölçüm alınan kesitlerde su seviyesini gösteren eğrilerdeki ani düşüşün nedeni rezervuarın sonlu bir uzunluğa sahip olması ile açıklanabilir.

Şekil 5.16’da görülen grafiklere bakıldığında, memba ve mansaptaki su seviyesinin değişim sürecinde her iki sayısal model sonuçlarının deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Sadece membadaki $x/h_0=-0.6$ noktasında rezervuardaki su seviyesinin ani azalması sırasında SWE sonuçları deney sonuçlarına göre bir miktar aşağıda kalmaktadır. Bunun nedeni deney ve RANS denklemlerden elde edilen profillerin tümsek görünüme sahip olması SWE profilinin ise parabolik görünüme sahip olması ve daha aşağıda kalması ile açıklanabilir. Genel olarak mansapta farklı noktalardaki kesitlerin seviye eğrileri yükselmekte iken deney ve sayısal sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Alçalma eğrilerinde ise deney sonuçlarında, RANS ve SWE’ye göre su seviyesinin biraz daha yüksek olduğu zamanla yavaşça artan bir sapma görülmektedir. Bu farkın nedeni deney sonuçlarında sürtünme ve viskoziteden dolayı enerji kayıplarının olmasıdır. SWE denklemlerinde yüzey pürüzlülüğü, türbülans vb. enerji kayıpları ihmal edildiğinden



Şekil 5.16a. Kuru durum için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



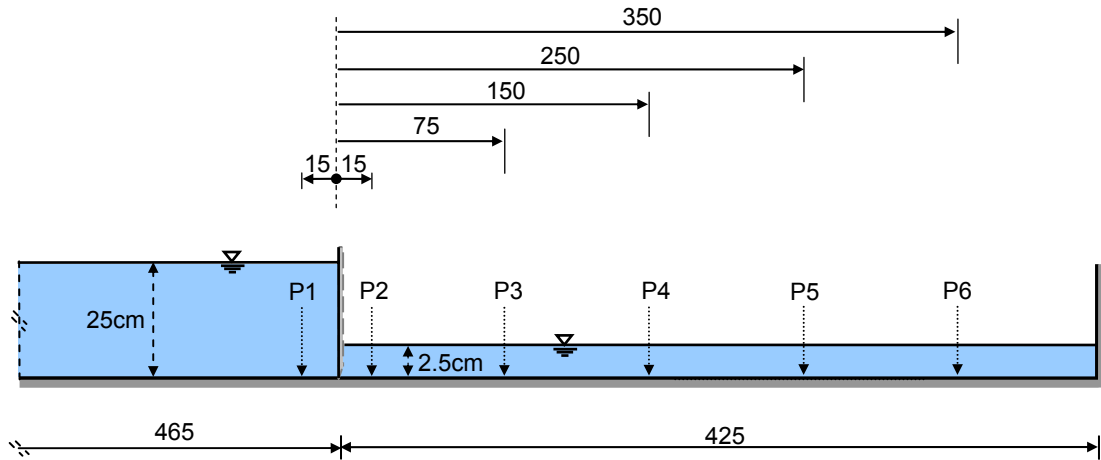
Şekil 5.16b. Kuru durum için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması

zaman ilerledikçe deney ve SWE arasındaki yükseklik farkı artmaktadır. RANS denklemlerinde ise yüzey pürüzlülüğü ihmal edilmiş olmakla birlikte türbülans ve viskozite etkisinden dolayı deney sonuçlarına göre daha az olsa da enerji kayıpları meydana gelmektedir. Enerji kayıpları akım hızının azalmasına ve su seviyesinin artmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı aynı sürede deney sonuçları, RANS ve SWE denklemlerine göre daha yüksek su seviyesine sahip olmaktadır.

Bu sonuçlar ile SWE ve RANS denklemleri karşılaştırıldığında, baraj yıkılması akımının kuru bir kanalda yayılması sırasında su yüzü profilini RANS denklemleri oldukça iyi, SWE denklemleri ise yeterli yaklaşıklıkta belirleyebilmektedir. Sığ su yaklaşımında (SWE) yapılan hidrostatik basınç dağılımı kabulü baraj aksı yakınında ve yıkılmanın başlangıç aşamalarında geçerli olmamaktadır. Bunun yanında SWE denklemlerinin bilgisayar ile sayısal çözümü RANS denklemlerine göre çok daha kısa sürmektedir. Ayrıca bu sonuçlar video görüntülerden yararlanılarak zamana bağlı noktasal su seviyesi değişimlerinin hassas bir şekilde bulunabileceğini de göstermektedir.

5.4. Islak Kanalda Baraj Yıkılması Problemi

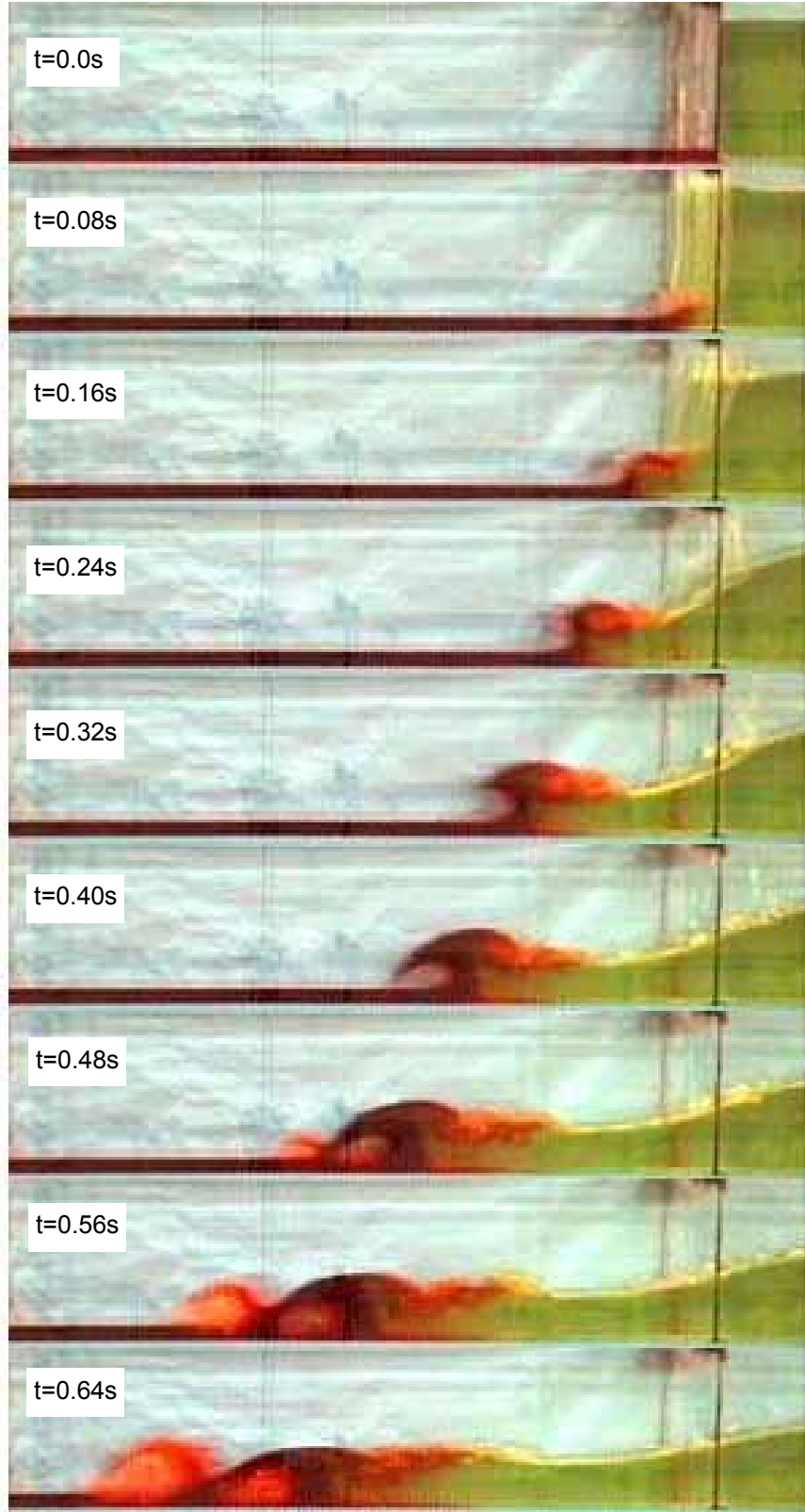
Yapılan çalışmada üç farklı kuyruk suyu yüksekliği/rezervuar yüksekliği oranına ($\alpha=h_1/h_0$) sahip ıslak durum için Şekil 5.17’de boyutları verilen kanalda deneyler yapılmıştır. $\alpha=h_1/h_0=0.1, 0.2$ ve 0.3 derinlik oranları kullanılmıştır. Kapak memba ucundan 4.65m ve mansap ucundan 4.35m uzakta yerleştirilmiştir. Rezervuar yüksekliği $h_0=0.25$ m alınmıştır. Deneylerde, başlangıç anlarındaki su yüzü profilleri ile Şekil 5.17’de görülen ve kuru durumla aynı uzaklıklarda seçilen biri membada (P1) diğerleri mansap boyunca 5 farklı noktada (P2-P6) su seviyesinin zamanla değişimleri belirlenmiştir. Kuru durumdan farklı olarak mansapta kuyruk suyu derinliği oluşturabilmek ve taşkın dalgasının yansımaları sağlayarak karmaşık akım koşulları elde edebilmek amacıyla mansap ucu düşey bir kapak ile kapatılmıştır. Deneylerde, akımın davranışının daha iyi izlenebilmesi amacıyla memba ve mansaptaki akışkan farklı renkte gıda boyası kullanarak boyanmıştır. Problemde akım iki boyutludur ve yüzeysel gerilmeler ihmal edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar birbirleriyle, analitik ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.17. $\alpha=h_1/h_0=0.1$ derinlik oranı için deney kanalı kesiti (ıslak durum)

5.4.1. $\alpha=0.1$ Derinlik Oranı için Taşkın Dalgasının Yayılması

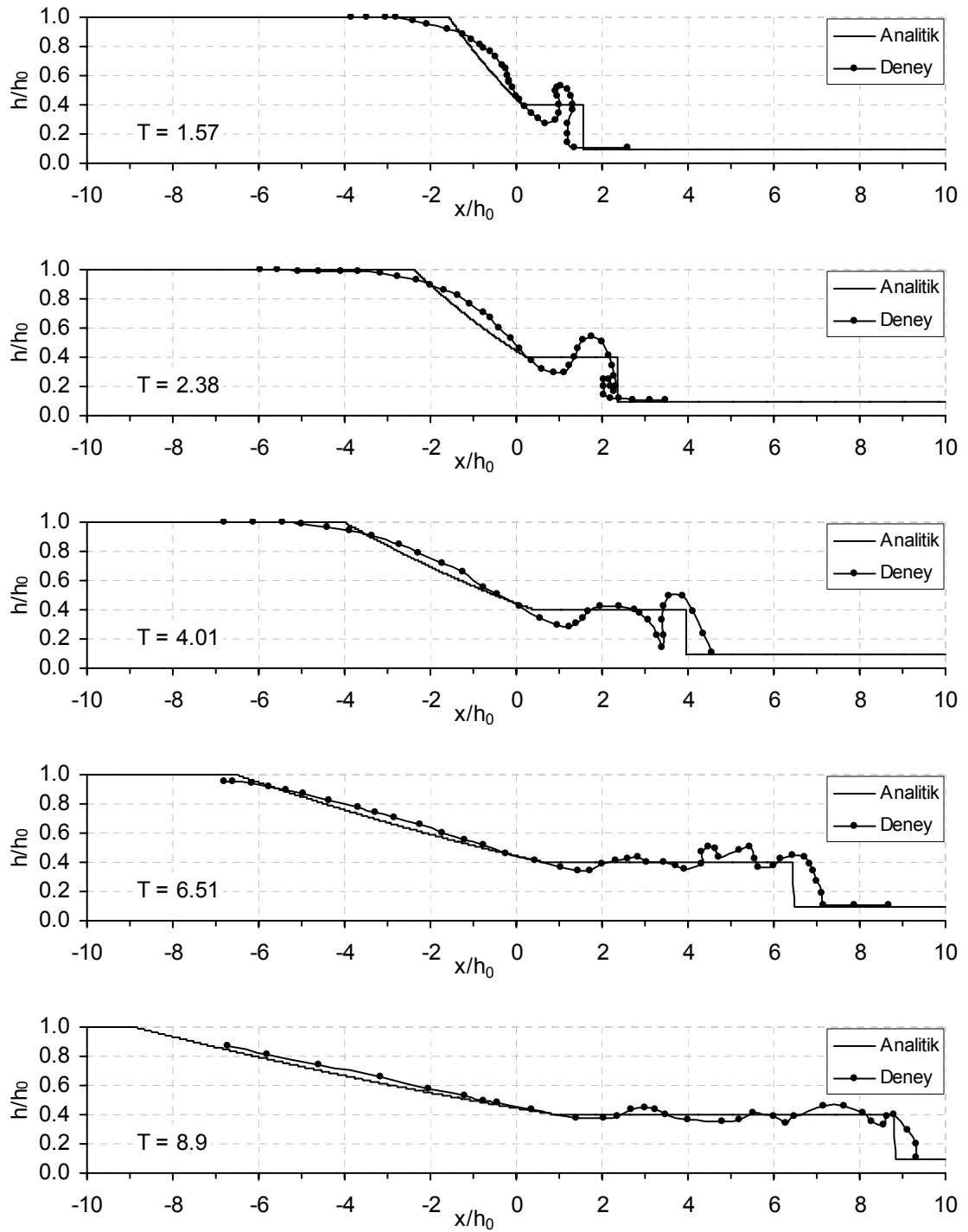
Şekil 5.18’de $\alpha=0.1$ derinlik oranı için düşey kapağın ani olarak kaldırılması sonucu elde edilen başlangıç anlarındaki dalga yayılmasına ait deney görüntüleri verilmiştir. Membadaki su açık renkte mansaptaki su koyu renkte boyanarak kapak kalktıktan sonraki akımın davranışı daha detaylı olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Kapak $t=0.08$ saniyeden daha kısa bir sürede kalkmıştır. Mansapta kuyruk suyu olması durumunda Şekil 5.18’de görüldüğü gibi kuru durumdan oldukça farklı bir akışkan davranışı ortaya çıkmaktadır. Kapağın kalkmaya başlamasıyla birlikte membadaki su, yerçekimi kuvveti etkisiyle kanal tabanından harekete geçerek mansaptaki suyu sürüklemeye başlar. Buna karşın durgun durumdaki kuyruk suyu bu hızlı yer değiştirmeye karşı bir direnç gösterir bunun sonucu olarak dalga kırılması ve jet oluşumu söz konusu olur. Dalga kırılması ile hava sıkışarak akışkan içerisine karışır ve oldukça türbülanslı bir akım meydana gelir. Dalganın kinetik enerjisi genellikle arka arkaya iki üç sıçrama sağlayacak kadar yeterlidir. Daha sonra düzgün bir kabarma dalgası oluşumu meydana gelir ve dalga bu şekilde yayılır. Bu durum Şekil 5.30’da ($T=1.66$) görülmektedir. İlerleyen dalga önü civarında dalga kırılmalarının bir sonucu olarak köpük oluşumu meydana gelir ve bu olay dalga önünde türbülans oluşumunu artırır.



Şekil 5.18. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için yıkılma başlangıcındaki deney görüntüleri

Şekil 5.18’de hareketin kanal tabanından başka bir ifade ile kapağın altından başlamasının nedeni bu noktada membadaki suyun hidrostatik basıncının en fazla olmasındandır. Diğer yandan durgun haldeki kuyruk suyu akımı engelleme eğilimindedir. Hareket eden dalga önünün durgun su ile çarpışmayla birlikte akımı yukarı doğru harekete zorlayan bir jet oluşmaktadır.

Şekil 5.19’da $\alpha=0.1$ ıslak durumu için başlangıç anlarındaki deneylerden elde edilen su yüzü profilleri Stoker (1957) tarafından verilen analitik çözüm ile karşılaştırılmıştır. Yıkılmanın başladığı ilk anlarda ($T=1.57-4.01$) analitik çözüm ile deney sonuçları çok iyi uyuşmamaktadır. İlerleyen zamanlarda ise ($T=6.51-8.09$) arka arkaya meydana gelen dalga kırılmaları sonlanıp tek dalga (bore) oluşumu meydana geldikten sonra analitik sonuçlar, deney sonuçlarında su yüzeyinde görülen küçük eğrilikler dışında birbiri ile uyumlu olmaktadır. Başlangıç anlarında analitik çözümdeki farklılığın nedeni analitik çözümün akımın hidrostatik olduğu kabulüyle elde edilmesi ve düşey doğrultudaki hareketlerin ihmal edilmesi ile açıklanabilir. Çünkü yıkılmanın başladığı anlarda düşey doğrultudaki değişimlerde hidrostatik olmayan basınç dağılımı söz konusudur. Bu nedenle analitik çözümde dalga kırılması davranışı elde edilememekte ve dalga önü gibi sıçramaların olduğu kısımlarda yüzey profilinde süreksizlikler meydana gelmektedir. Kuru durumda olduğu gibi ıslak durumda da negatif dalga analitik çözümde deney sonuçlarının gerisinde kalmakta ve daha yavaş hareket etmektedir. Pozitif dalga önü incelendiğinde deney sonuçlarının daha ileride olduğu görülmektedir. Bununla birlikte deney görüntülerinden elde edilen su yüzü profilleri, ölçümün kolay olmasından dolayı dalga önünde su-hava karışımının olduğu kısımda üst sınır dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu nedenle dalga önündeki köpüklü kısım ihmal edilirse analitik çözümde kabarma dalgası yayılma hızının doğru ifade edildiği düşünülebilir. Analitik çözümde kabarma dalgası arkasında su seviyesinin yatay olarak ilerlemesi deneysel sonuçlarda da gözlenmiştir. İlave olarak kabarma dalgası arkası da mansap yönünde ilerlemektedir. Dolayısıyla analitik çözümde verilmiş olan $\alpha=h_1/h_0<0.1383$ (Tip I) durumu deneysel profillerde de söz konusudur. Baraj aksındaki su derinliği de başlangıç anları dışında $h/h_0=4/9$ civarında olmaktadır. Kabarma dalgası derinliği ortalama $h/h_0=0.30$ olmaktadır.

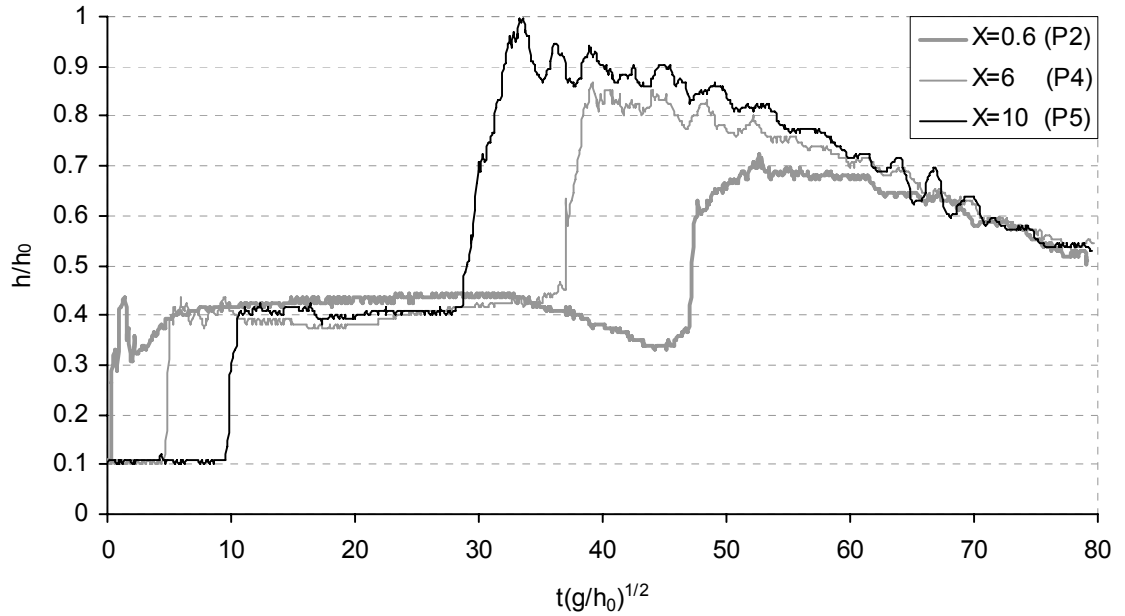


Şekil 5.19. $\alpha=0.1$ ıslak durumu için deneylerden elde edilen başlangıç aşamalarındaki su yüzü profillerinin analitik çözümle karşılaştırılması

Bu sonuçlarla başlangıç anları dışında $\alpha=0.1$ ıslak durumu için analitik çözümün akım davranışını temsil edebildiği söylenebilir.

Şekil 5.20’de $\alpha=0.1$ ıslak durumu için mansapta farklı noktalarda video görüntülerden elde edilen su seviyesinin zamanla değişimleri görülmektedir. Ölçüm alınan noktaların kapaktan olan uzaklıkları Şekil 5.17’de verilmiştir. Grafikte zaman büyüklükleri $(g/h_0)^{1/2}$ ile çarpılarak, yükseklikler ise h_0 ’a bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 5.20’ye bakıldığında ölçüm alınan noktalarda mansaptaki su seviyeleri $h/h_0=0.1$ seviyesinde iken kapağın kalkmasıyla birlikte harekete başlayan dalganın kesitlere ulaşmasıyla su seviyelerinde ani bir yükselme olmaktadır. Daha sonra mansaptaki su seviyeleri bir süre yatay kalmaktadır. Dolayısıyla mansap boyunca kanaldaki su derinliklerinin yaklaşık eşit olduğu söylenebilir. Grafiklerdeki ikinci ani yükselme kanalın mansap ucu düşey bir kapak ile kapatıldığından mansap doğrultusunda ilerleyen kabarma dalgası bu kapağa çarptıktan sonra geri yansımakta ve ölçüm alınan noktalarda daha derin bir kabarma dalgası gözlenmektedir. Kabarma dalgası duvardan yansıdıktan sonra özellikle de mansap ucundaki kapağa yakın yerlerde su yüzeyinde küçük salınımlar meydana gelmektedir. Rezervuara giren bir akım söz konusu olmadığından ve rezervuarın sonlu bir hacme sahip olmasından dolayı mansaptaki bir kontrol hacminin kütlesi zamanla azalacaktır. Bu nedenle ikinci ani yükselmeden sonra su seviyesi yavaşça düşmektedir. Burada sadece baraja en yakın kesit olan $X=0.6$ (P1) noktasında su seviyesi bir süre sabit kaldıktan sonra önce düşüşe geçmekte sonra yükselmektedir. Bunun nedeni rezervuarın sonlu bir büyüklüğe sahip olmasıdır. Negatif dalganın rezervuarın sonuna ulaşmasıyla birlikte kanalda su seviyesi düşüşe geçmektedir. Kanal boyutlarından dolayı bu durum sadece baraja en yakın kesitte hissedilmiştir. Ayrıca şekilden görüleceği gibi baraja yakın kesitlerde su seviyesi daha erken yükselmekte yansıyan dalgalar ise mansap ucuna yakın kesitlerde daha erken hissedilmektedir. Taşkın dalgasının $X=0.6$ kesitinden $X=10$ kesitine ulaşma zamanı $t\sqrt{g/h_0}=9.5$ iken yansıyan dalganın $X=10$ kesitinden $X=0.6$ kesitine ulaşma zaman $t\sqrt{g/h_0}=18.8$ ’tir. Buradan taşkın dalgasının duvardan yansımayla birlikte dalganın enerjisinin kırıldığı ve akım hızının yaklaşık %50 azaldığı sonucu çıkarılabilir. İlave

olarak dalga duvardan yansıdıktan sonra mansapta meydana gelen su yüzü profili bir süre ters eğime sahip olmaktadır. Bu durum $T=55$ anında ölçüm noktalarından alınan su yükseklikleri ile mansaptaki su yüzü profili çizilirse görülebilir.



Şekil 5.20. $\alpha=0.1$ ıslak durumu için mansapta farklı noktalardaki zamana bağlı su seviyesi değişimleri

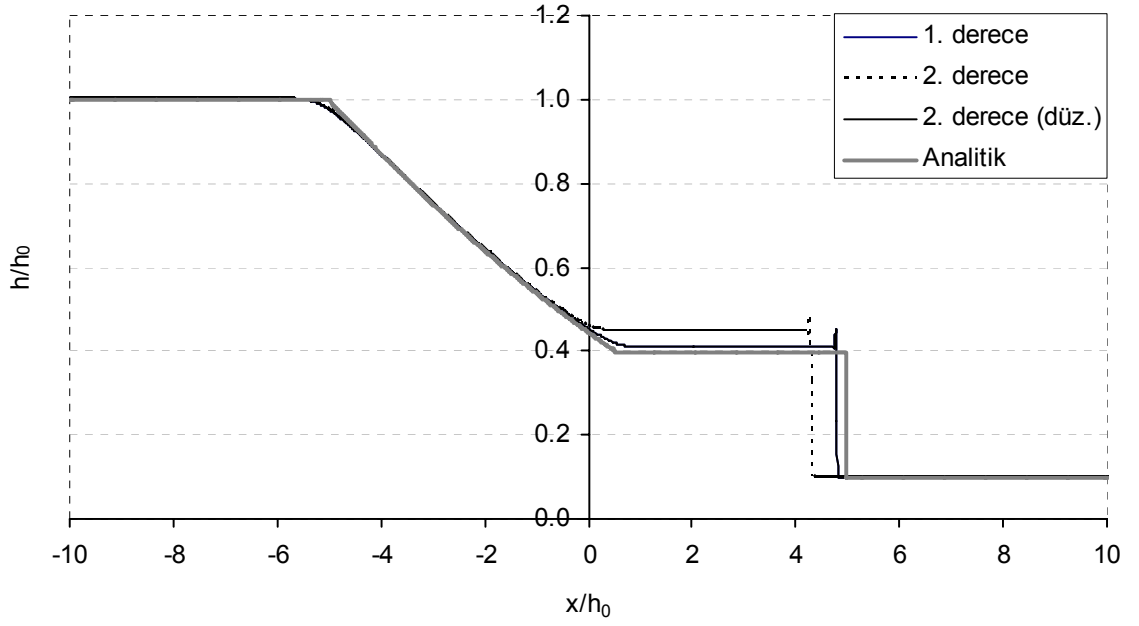
5.4.1.1. $\alpha=0.1$ Derinlik Oranı için Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlar ile Karşılaştırılması

Baraj mansabında kuyruk suyu bulunması (ISLAK) durumunda elde edilen deney sonuçları sığ su denklemleri (SWE-Shallow Water Equations) ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS-Reynolds Avaraged Navier-Stokes) denklemlerine dayanan sayısal model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Denklemlerin çözümü için FLOW-3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modeller Şekil 5.17’de verilen kanal boyutları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Kuru durumdan farklı olarak ıslak durumda yapılan deneylerde, mansapta kuyruk suyu bulunmaktadır ve kanalın mansap ucu düşey bir kapak ile kapatılmıştır. Bu nedenle sayısal model oluşturulurken başlangıç şartı olarak baraj aksı koordinat merkezi kabul edildiğinde membada 4.65 m uzunluğunda ve 0.25 m yüksekliğinde bir

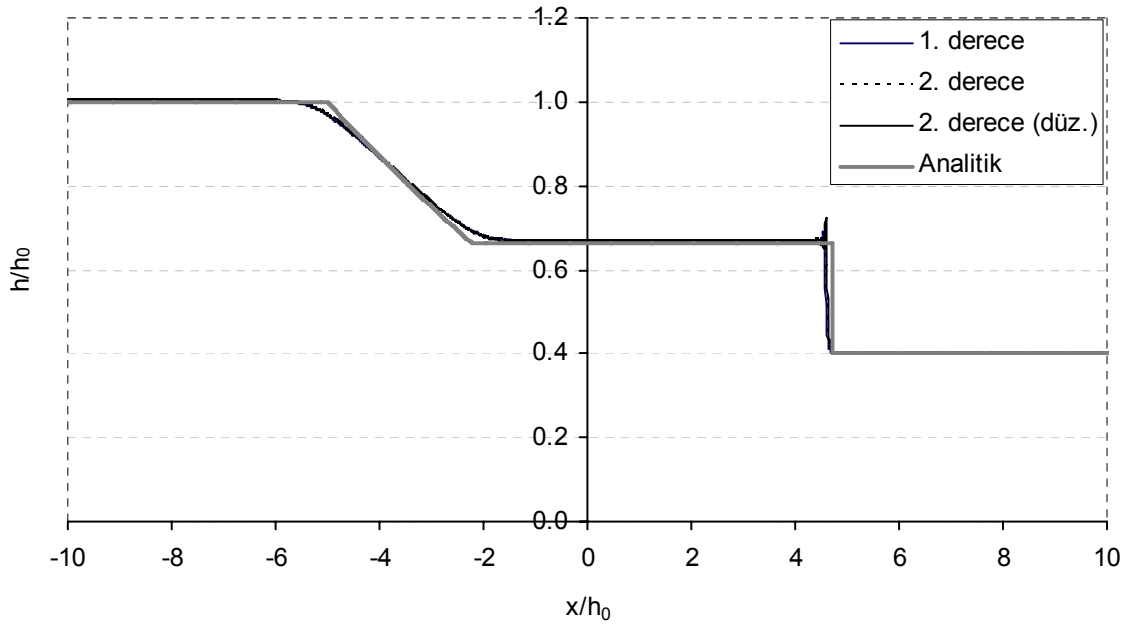
akışkan hacmi (VOF) tanımlanmıştır. İlave olarak mansapta kuyruk suyu bulunduğu baraj mansabında 4.25 m uzunluğunda ve 0.025 m yüksekliğinde kuyruk suyunu temsil eden ayrı bir akışkan hacmi tanımlanmıştır. Diğer yandan kanalın mansap ucu (x_{maks}) düşey bir kapak ile kapalı olduğundan buradaki sınır şartı duvar (wall) olarak belirlenmiştir. Diğer sınır şartları kuru durumda olduğu gibi memba ucu (x_{min}) ve kanal tabanı (z_{min}) duvar, kanal üst sınırı (z_{maks}) simetri eksenini olarak seçilmiştir. RANS denklemlerinin çözümünde k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Sığ su denklemlerinin çözümünde ise herhangi bir türbülans modeli kullanılmamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü her iki modelde ihmal edilmiştir. RANS denklemlerinin 2-boyutlu çözümünde 8.90x0.30 m boyutlarında bir hesaplama bölgesi düşünülerek x ve z doğrultularındaki ağ aralıkları 0.005 m olarak alınmıştır. Sığ su (SWE) modelinde ise x doğrultusunda 0.005 m ağ aralığı kullanılırken z doğrultusunda yazılım sadece z ekseninin ikiye bölünmesine izin vermektedir. Bu nedenle sığ su modelinde 8.90x0.50 m bir çözüm bölgesi kullanılmış ve z eksenini 0.30 m yüksekliğinde bir ayırım çizgisine sahip olacak şekilde ikiye bölünmüştür.

RANS denklemlerinin 331452 hücreden oluşan 16 s'lik çözümü yaklaşık 130 dakika sürerken sığ su denklemlerinin 26730 hücreden oluşan çözümü 3.4 dakika sürmektedir. Dikkat edilirse aynı problemin sığ su denklemleri ile çözümünde daha az sayıda hücre kullanılmakta ve bunun sonucu olarak çözüm süresi çok daha kısa olmaktadır.

FLOW-3D ile sığ su denklemleri ile modelleme yapılırken yüksek hidrolik sıçramaların, dalga kırılmalarının olduğu durumda momentum denkleminde ikinci derece yerine ikinci derece düzeltilmiş yaklaşımın kullanılması gerekmektedir. Aksi halde elde edilen su yükseklikleri, olduğundan daha yüksek çıkmakta ve kabarma dalgası önü daha yavaş ilerlemektedir. Şekil 5.21'de $\alpha=0.1$ için $T=t(g/h_0)^{1/2}=0.8$ anında elde edilen su yüzü eğrisinin analitik çözümle karşılaştırmasında bu durum görülebilmektedir. Şekil 5.22'de ise düşük hidrolik sıçramanın (dalga önü) olduğu $\alpha=0.4$ derinlik oranı için ikinci derece yaklaşımda herhangi bir düzeltmeye gerek olmadığı görülmektedir. Yapılan çalışmada, aşağıdaki karşılaştırmalar neticesinde momentum denkleminde ikinci derece düzeltilmiş yaklaşım kullanılmıştır.

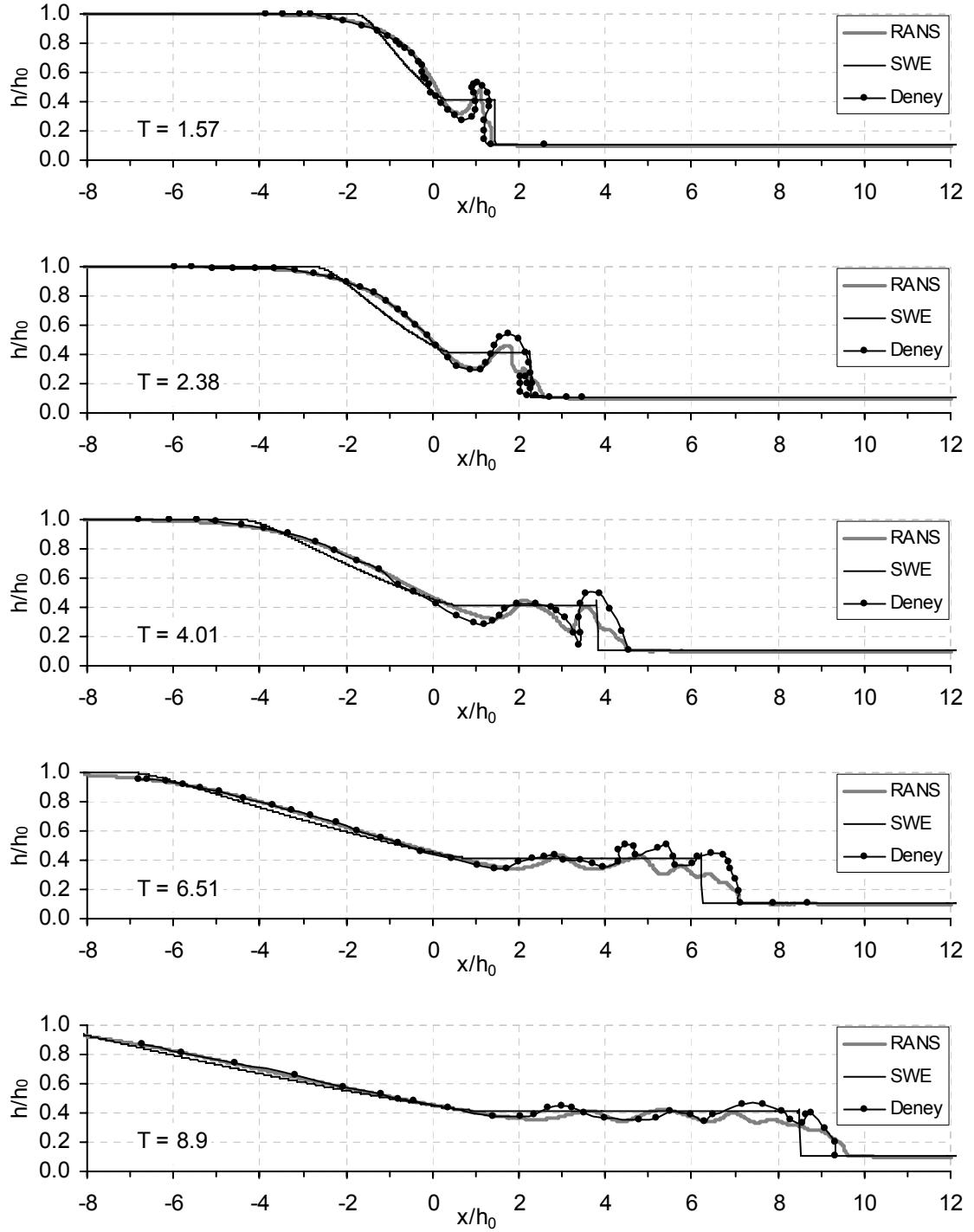


Şekil 5.21. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için $T=0.8$ anında SWE çözümünde momentum yaklaşımlarının etkisi



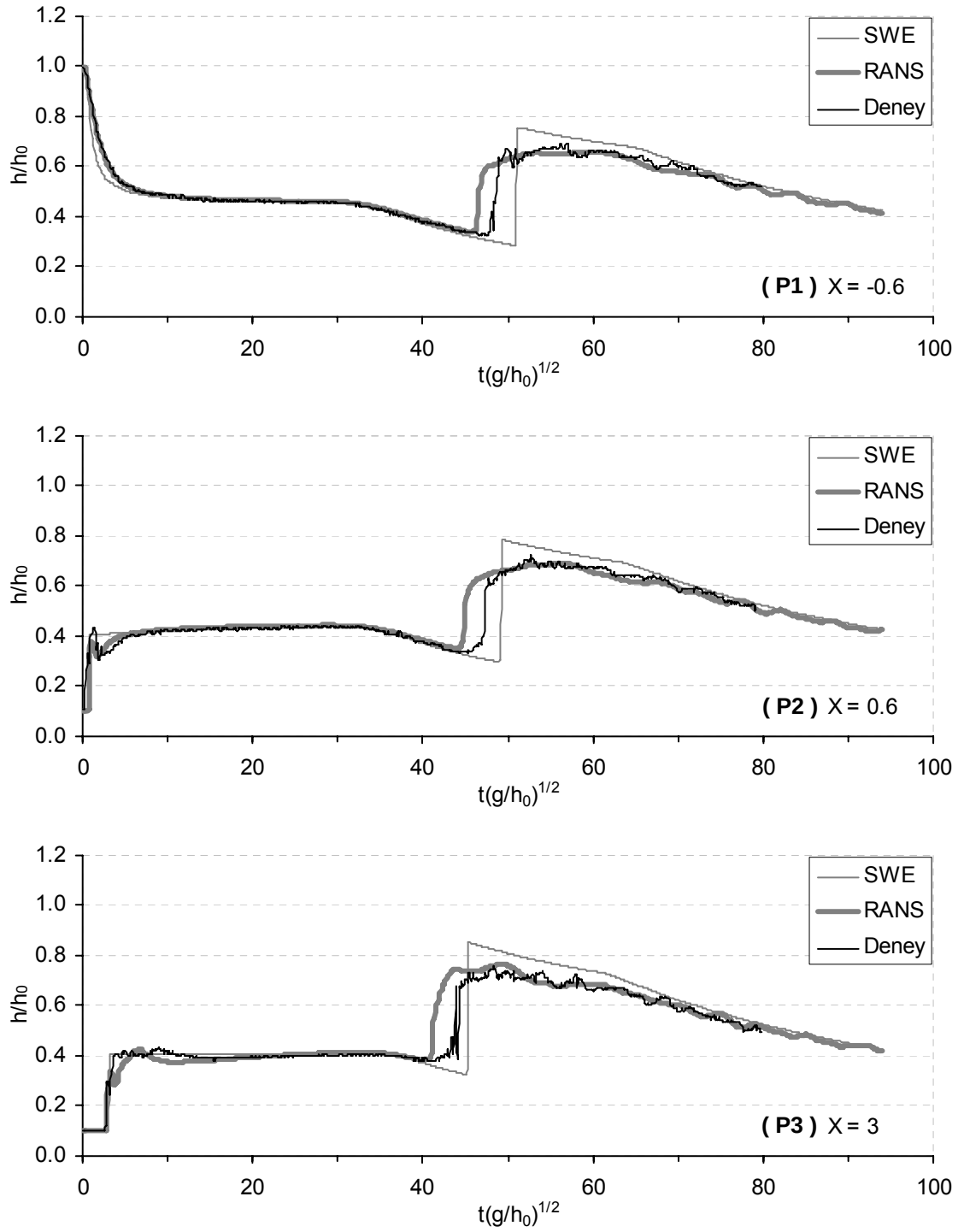
Şekil 5.22. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için $T=0.8$ anında SWE çözümünde momentum yaklaşımlarının etkisi

Şekil 5.23 $\alpha=0.1$ derinlik oranı için ıslak durumda elde edilen sayısal ve deneysel su yüzü profillerinin başlangıç aşamalarındaki karşılaştırmasını göstermektedir. Grafiklere bakıldığında RANS ve deney sonuçları arasında özellikle membada kalan su yüzü profilini ve negatif dalga yayılma hızlarının oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. Bununla birlikte kabarma dalgası önü yayılma hızının da çok iyi belirlenebildiği görülmektedir. Kabarma dalgası önü civarında su yükseklikleri deney sonuçlarından biraz daha düşük çıkmasına karşın mansapta oluşan su yüzü profillerini başlangıç aşamalarında iyi yansıttığı söylenebilir. SWE çözümlerinde ise negatif dalganın deney sonuçlarının biraz gerisinde kaldığı ($T=1.57-4.01$) dolayısıyla negatif dalga yayılma hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Mansap doğrultusunda ilerleyen kabarma dalgası önü de benzer şekilde dalga kırıldıktan sonra ($T=6.51-8.90$) deney sonuçlarının gerisinde kalmaktadır. Su yüzü profillerine bakıldığında başlangıç aşamalarında membadaki kısımda deney sonuçları ile SWE sonuçları arasında bir miktar sapma olduğu ilerleyen zamanlarda bu farkın ortadan kalktığı görülmektedir. Mansap kısmında ise başlangıç profillerinin deney sonuçlarından oldukça farklı olduğu fakat dalga kırıldıktan sonra oluşan su seviyelerini yeterince iyi temsil ettiği görülmektedir. Başlangıç aşamalarındaki bu farklılığın en büyük sebebi SWE çözümünde akımda düşey doğrultudaki bileşenlerin ihmal edilmesidir. Bu nedenle dalga kırılması davranışı ifade edilememektedir.

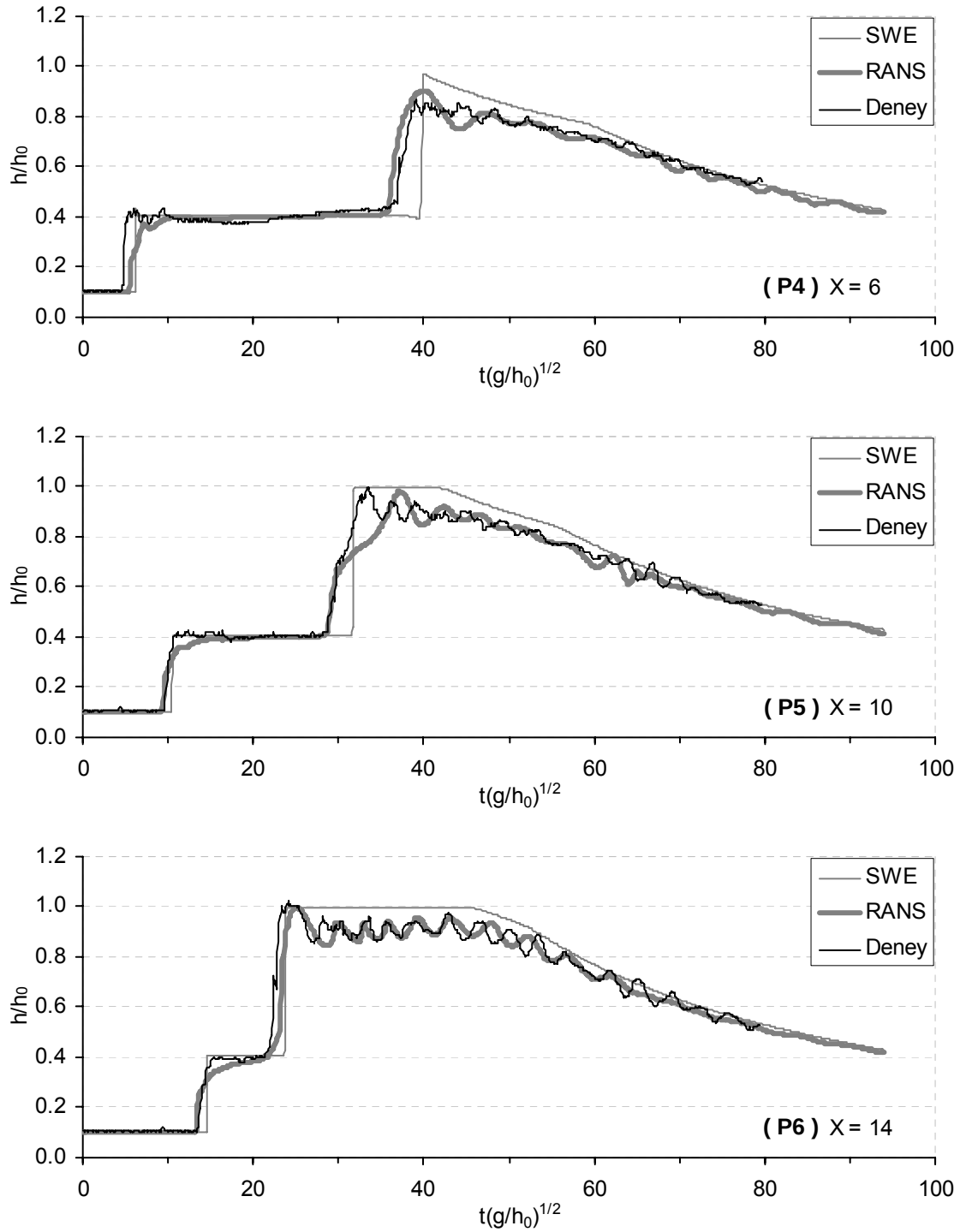


Şekil 5.23. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için başlangıç aşamalarındaki sayısal ve deneysel su yüzü profillerinin karşılaştırılması

Şekil 5.24’de $\alpha=0.1$ derinlik oranı için deney kanalı üzerinde farklı noktalarda video görüntülerden elde edilen zamana bağlı su seviyesi değişimleri görülmektedir. Grafiklerde x eksenı boyutsuz zamanı ($T=t(g/h_0)^{1/2}$) ve y eksenı de boyutsuz su yüksekliklerini ($H=h/h_0$) vermektedir. Baraj aksından olan uzaklıklar ise boyutsuz $X=x/h_0$ büyüklüğü ile ifade edilmiştir. Ölçüm alınan noktaların baraj aksından uzaklıkları Şekil 5.17’de gösterilmektedir. Şekil 5.24’e bakılırsa burada $X=-0.6$ (P1) ve $X=0.6$ (P2) sırasıyla barajın hemen memba ve mansabındaki su seviyesi değişimini göstermektedir. Membadaki (P1) su seviyesi kapağın kalkmasıyla birlikte hızlı bir azalma gözlenirken mansaptaki $X=0.6$ (P2) noktasında hızlı bir yükselme meydana gelmiştir. Sonrasında baraj yakınındaki su seviyeleri membada yaklaşık $h/h_0=0.46$, mansapta $h/h_0=0.43$ seviyesinde bir süre sabit kaldığı görülmektedir. Sonrasında membada $T=33$ mansapta $T=34$ anında su seviyelerinde bir azalma gözlenmekte ve membada yaklaşık $T=48$ ve $T=46$ anında su seviyesi tekrar hızlı bir biçimde yükselmektedir. Deney sonuçlarında azalma sadece membaya yakın kesitlerde gözlenmiştir. Rezervuarın sonlu bir büyüklüğe sahip olmasından dolayı negatif dalga memba ucuna ulaştıktan bir süre sonra kesitlerdeki su seviyelerinde hızlı bir azalma gözlenecektir. Membaya yakın kesitlerde bu azalma daha erken uzak kesitlerde daha geç başlayacaktır. Buna karşın mansap ucu düşey bir kapak ile kapatıldığından bu yüzeyden yansıyan kabarma dalgası mansap ucuna yakın kesitlerde daha erken hissedilecek, membaya yakın kesitlere ise daha geç ulaşacaktır. Bu nedenle mansaptaki kesitlerde rezervuarın uzunluğundan dolayı su seviyesinde azalma meydana gelmeden önce yansıyan dalgalar bu kesitlere ulaştığından deney sonuçlarında azalma sadece membaya yakın kesitlerde (P1-P2)) gözlenmektedir. Bunun dışında su seviyesindeki azalma sadece $X=3$ (P3) kesitinde SWE çözümde gözlenmektedir. Bunun nedeni SWE çözümünde kabarma dalgası önü hızının ve yansıyan dalga önü hızının deney ve RANS çözümüne göre daha az olması dolayısıyla daha yavaş hareket etmesi ile açıklanabilir. SWE çözümünde yansıyan dalga önü $X=3$ (P3) kesitine ulaşınca kadar su seviyesi düşüşe geçmiştir. Dikkat edilirse mansaptaki membaya en yakın kesitte (P2) su seviyesi eğrisindeki ilk taşkın dalgasının ve yansıyan dalganın geçişi (iki ani yükselme) arasındaki zaman farkı en fazla, mansap ucuna en yakın kesitte ise bu fark en azdır.



Şekil 5.24a. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 5.24b. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması

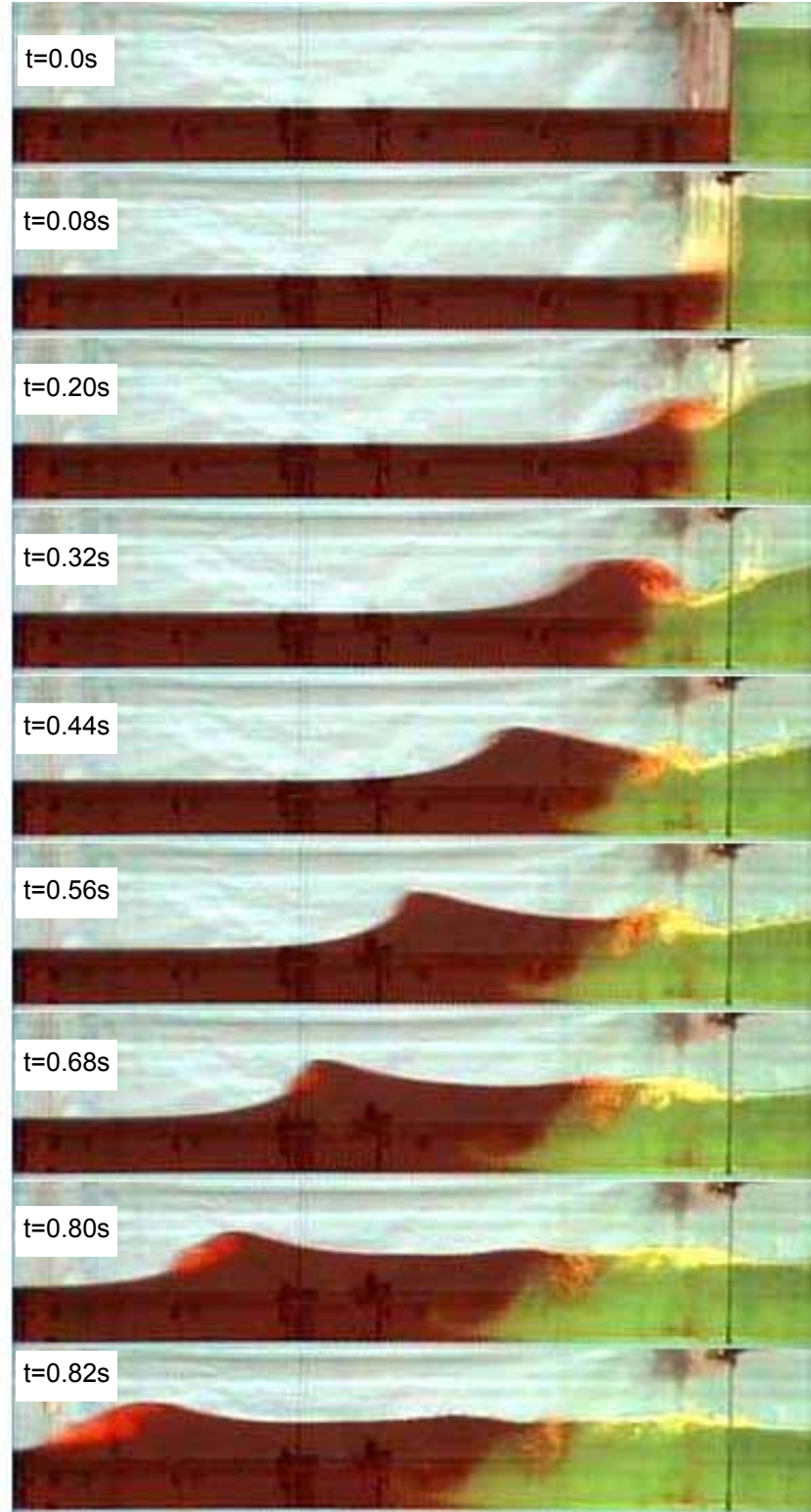
Mansaptaki diğer tüm kesitlerde (P3-P6) ise $h/h_0=0.40$ seviyesinde sabit kalmaktadır. Bu da kabarma dalgası arkasında su yüzü profilinin yatay olduğunu göstermektedir. Ayrıca deney ve RANS çözümünde dalga duvara çarpmasından sonra yansıyan dalgada azalma eğrisi üzerinde mansap ucuna yakın kesitlerde su yüzeyinde salınımların olduğu yansıyan dalga memba ucuna doğru ilerledikçe bu salınımların sönümlendiği gözlenmektedir.

Genel olarak RANS sonuçları ile deney sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu, RANS çözümünün yansıyan dalgadaki salınımları bile (P6, $X=14$) oldukça iyi yansıttığı görülmektedir. Sadece P1, P2 ve P3 noktalarında yansıyan dalga önünün RANS çözümünde çok az daha hızlı ilerlediği görülmektedir. Bu farkın nedeni deney sonuçları elde edilirken video görüntülerde serbest su yüzeyin belirginleştirilmesi amacıyla kullanılan görüntü filtrelerinin uygulanması sonucunda dalga önü boyutları bir miktar küçülmektedir. Bu durum dalga önünün hava kabarcıklarından dolayı daha parlak görünüme sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşın yansıyan dalga dikkate alınmadığında, su seviyelerinin belirlenmesinde SWE çözümünün oldukça iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ancak yansıyan dalgada dalga önü daha yavaş hareket etmekte ve su seviyesi olduğundan daha fazla olmaktadır. Ayrıca çarpma sonrası su yüzeyinde meydana gelen salınımlar, SWE denklemlerinde akım hidrostatik kabul edildiği ve düşey ivme bileşenleri ihmal edildiği için gözlenmemektedir. Dalga önünün olduğu noktada su seviyesindeki ani yükselmeler SWE denkleminde süreksizlik olarak algılanmaktadır. Bu nedenle şekillerden SWE çözümlerindeki geçişlere bakılırsa geçişlerin dikey olduğu görülebilir. Bu özelliklerine karşın su seviyesinin yansıyan dalgada yüksek çıkması SWE denklemlerinin daha emniyetli yönde kaldığı anlamına gelebilir. Ancak dalga önünün daha yavaş hareket etmesinden dolayı uyarı zamanı olması gerekenden daha geç olacaktır.

Bu bilgilerle RANS denklemlerinin deney sonuçlarını tüm zamanlarda oldukça iyi yansıttığı, SWE denklemlerinin ise akımda güçlü yansımalar olduğunda deney sonuçlarından uzaklaştığı bunun dışında yeterli yaklaşıklıkta su seviyelerini belirleyebileceği sonucu çıkarılabilir.

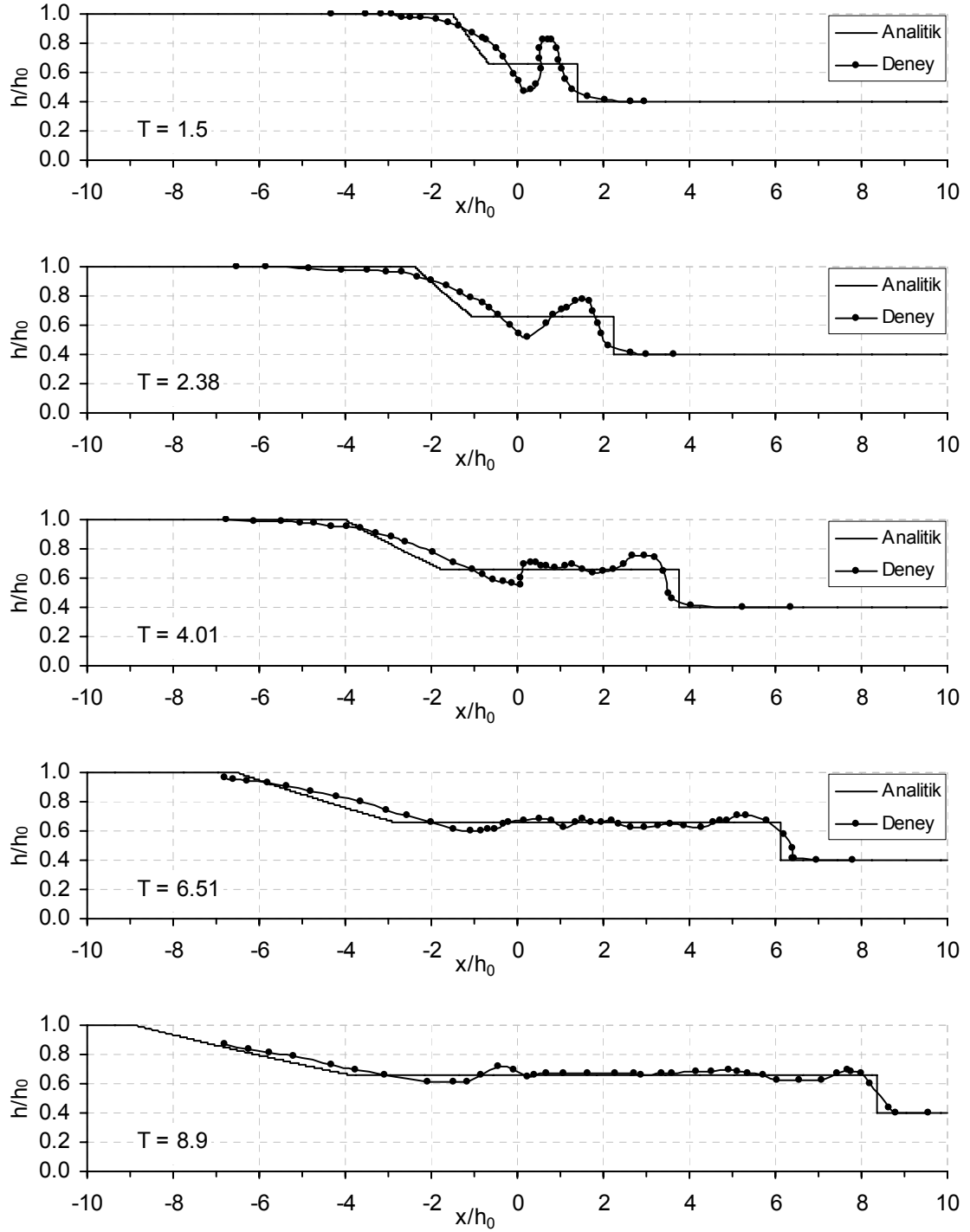
5.4.2. $\alpha=0.4$ Derinlik Oranı için Taşkın Dalgasının Yayılması

Şekil 5.25’de $\alpha=h_1/h_0=0.4$ derinlik oranı için düşey kapağın ani olarak kaldırılması sonucu elde edilen başlangıç anlarındaki dalga yayılmasına ait deney görüntüleri verilmiştir. Deney Şekil 5.17’de görülen kanalda gerçekleştirilmiştir. Memba su derinliği 0.25 m mansap su derinliği 0.1 m olarak alınmıştır. Membadaki su açık renkte mansaptaki su koyu renkte boyanmıştır. Şekilden görüleceği gibi kapak $t=0.08$ saniyeden daha kısa bir sürede kalkmıştır. Kapağın kalkmaya başlamasıyla birlikte yerçekimi etkisi ile ilk olarak kanal tabanından harekete başlayan membadaki su kendisine direnen mansaptaki suyu sürüklemektedir. $\alpha=0.1$ ıslak durumuna göre mansaptaki kuyruk suyu derinliğinin daha fazla olmasından dolayı mansaptaki durgun su kendisini itmeye çalışan ve düşey doğrultuda harekete zorlayan membadaki su kütlesine daha büyük bir basınç kuvveti ile karşı koymaktadır. Bunun sonucunda bu kez tam bir dalga kırılması söz konusu olmamaktadır. Dolayısıyla dalga önünde daha az hava girişi meydana gelmektedir. Ayrıca dalganın başlangıçtaki enerjisinin daha düşük olması sebebiyle arka arkaya dalga kırılmaları olmamakta, sadece dalga ucunda küçük bir kırılma oluşmakta ve bu şekilde kabarma dalgası oluşumuyla yoluna devam etmektedir. Dalga önünde, $\alpha=0.1$ ıslak durumuna göre daha küçük türbülanslı bir bölge vardır.



Şekil 5.25. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için yıkılma başlangıcındaki deney görüntüleri

Şekil 5.26’da $\alpha=0.4$ ıslak durumu için başlangıç anlarındaki deneylerden elde edilen su yüzü profillerinin Stoker (1957) tarafından verilen analitik çözüm ile karşılaştırması görülmektedir. Yıkılmanın başladığı ilk anlarda ($T=1.57-4.01$) analitik çözüm ile deney sonuçları çok iyi uyuşmamaktadır. İlerleyen zamanlarda ise ($T=6.51-8.09$) kabarma dalgası oluşumu meydana geldikten sonra analitik çözüm ile deney sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum görülmektedir. Kapak kalktıktan hemen sonra yüzey eğriliklerinin fazla olması ve analitik çözümdeki akımın hidrostatik kabul edilmesinden dolayı başlangıç aşamalarında iki çözüm arasında farklılıklar görülmektedir. $\alpha=0.1$ ıslak durumunda olduğu gibi analitik çözümde negatif dalganın yayılma hızı gerçekte olduğundan daha yavaş hareket etmektedir. Kabarma dalgası önünün yayılma hızı incelenirse, analitik çözümle deney sonuçları yakınsamaktadır. Analitik çözümde gözlenen kabarma dalgası arkasında su seviyesinin sabit kalması, deneysel sonuçlarda da gözlenmiştir. Ayrıca kabarma dalgasının arka ucu mansapta kalmakta ve analitik çözümde verilmiş olan $\alpha=0.4>0.183$ (Tip II) durumu deneysel profillerde de gözlenmektedir. Baraj aksındaki su derinliği ise $h/h_0=4/9$ değerinden daha fazla olmaktadır. Kabarma dalgasının geçmesiyle birlikte mansaptaki su yüksekliği $h/h_0= 0.24$ artmıştır. Dolayısıyla $\alpha=0.1$ durumunda meydana gelen $h/h_0= 0.30$ ’luk artış dikkate alındığında, mansaptaki su derinliğinin artması ile meydana gelen kabarma dalgası yüksekliğinin azaldığı söylenebilir. Bu sonuçlarla başlangıç anları dışında $\alpha=0.4$ ıslak durumu için analitik çözümün akım davranışını temsil edebildiği söylenebilir.

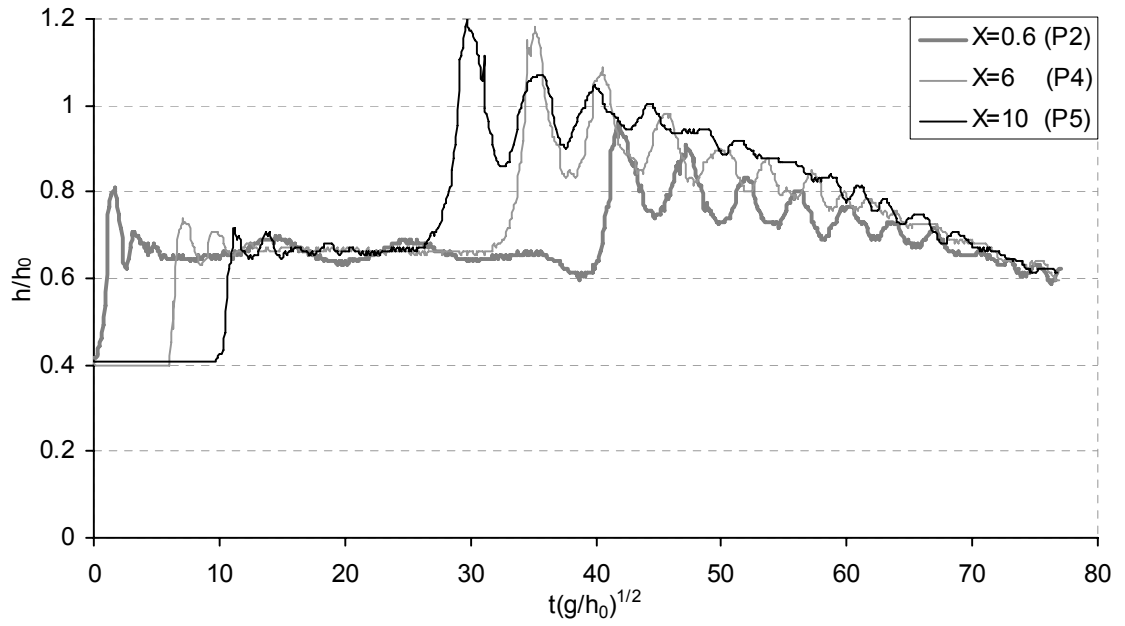


Şekil 5.26. $\alpha=0.4$ ıslak durumu için deneylerden elde edilen başlangıç aşamalarındaki su yüzü profillerinin analitik çözüm ile karşılaştırılması

Şekil 5.27’de mansapta farklı noktalarda video görüntülerinden elde edilen zamana göre su seviyesi değişimleri görülmektedir. Grafiklerde x eksenini boyutsuz zamanı ($T=t(g/h_0)^{1/2}$), y eksenini ise kanalda meydana gelen boyutsuz su yüksekliklerini (h/h_0) göstermektedir. Ölçüm alınan noktaların kapaktan olan uzaklıkları Şekil 5.17’de verilmiştir. $T=t(g/h_0)^{1/2}=80$ süresince okumalar alınmıştır. Şekil 5.27’ye bakıldığında ölçüm alınan noktalarda mansaptaki su seviyeleri $h/h_0=0.4$ seviyesinde iken kapağın kalkmasıyla harekete başlayan dalganın kesitlerden geçmesiyle birlikte su seviyelerinde ani bir yükselme ve alçalma olmaktadır. Baraj aksına en yakın $x=0.6$ (P2) kesitindeki su seviyesi değişimine bakılırsa dalganın geçişinden sonra $\alpha=0.1$ durumundan farklı olarak su yüzeyinde belirgin dalgalanmaların olduğu görülmektedir. $X=10$ (P5) kesitine bakıldığında bu dalgalanmaların baraj kesitinden uzaklaştıkça azaldığı gözlenmektedir. Bununla birlikte kabarma dalgasının, mansap ucundaki kapağa çarpıp yansımasıyla birlikte su yüzeyinde daha kısa dalga boyuna fakat daha büyük genliğe sahip dalgalanmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu salınımların genlikleri zamanla birlikte azalmaktadır. Bir başka ifade ile kabarma dalgasının duvara çarpmasıyla birlikte gittikçe azalan genliğe sahip bir dalga treni meydana gelmektedir. Bunun yanında yansıyan dalgaların genlikleri mansap ucundan ($X=10$) membaya doğru ($X=0.6$) gittikçe azalmaktadır. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da dalganın duvara çarpmasıyla birlikte meydana gelen su yüksekliklerinin $h/h_0=1$ değerini aşmış olmasıdır. $X=10$ kesitine bakıldığında yansıyan maksimum dalga yüksekliği $h/h_0=1.2$ olmaktadır.

Taşkın dalgasının $X=0.6$ kesitinden $X=10$ kesitine ulaşma zamanı $t\sqrt{g/h_0}=9.7$ iken yansıyan dalganın $X=10$ kesitinden $X=0.6$ kesitine ulaşma zamanı ise $t\sqrt{g/h_0}=13.5$ ’tur. Buradan taşkın dalgasının duvardan yansımayla birlikte enerjisinin kırıldığı ve akım hızının yaklaşık %28 azaldığı sonucu çıkarılabilir. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için bu değer %50 bulunmuştu. Buradan kuyruk suyu derinliğinin artmasıyla oluşan kabarma dalgasının yayılması ve yansıması ile enerjisinin daha az kırıldığı sonucu çıkarılabilir. Ayrıca dalga yansıdıktan sonra meydana gelen su yüzü profili ters eğime sahip bir yüzey üzerinde dalgalı görünümündedir. Bu durum örneğin

$t\sqrt{g/h_0}=50$ anında kesitlerdeki su yüksekliklerinin okunmasıyla görülebilir. Bu anda $X=0.6$ kesitindeki dalga yüksekliği ve salınımlar en fazla iken $X=10$ kesitinde dalga yüksekliği ve salınımlar azalmıştır.

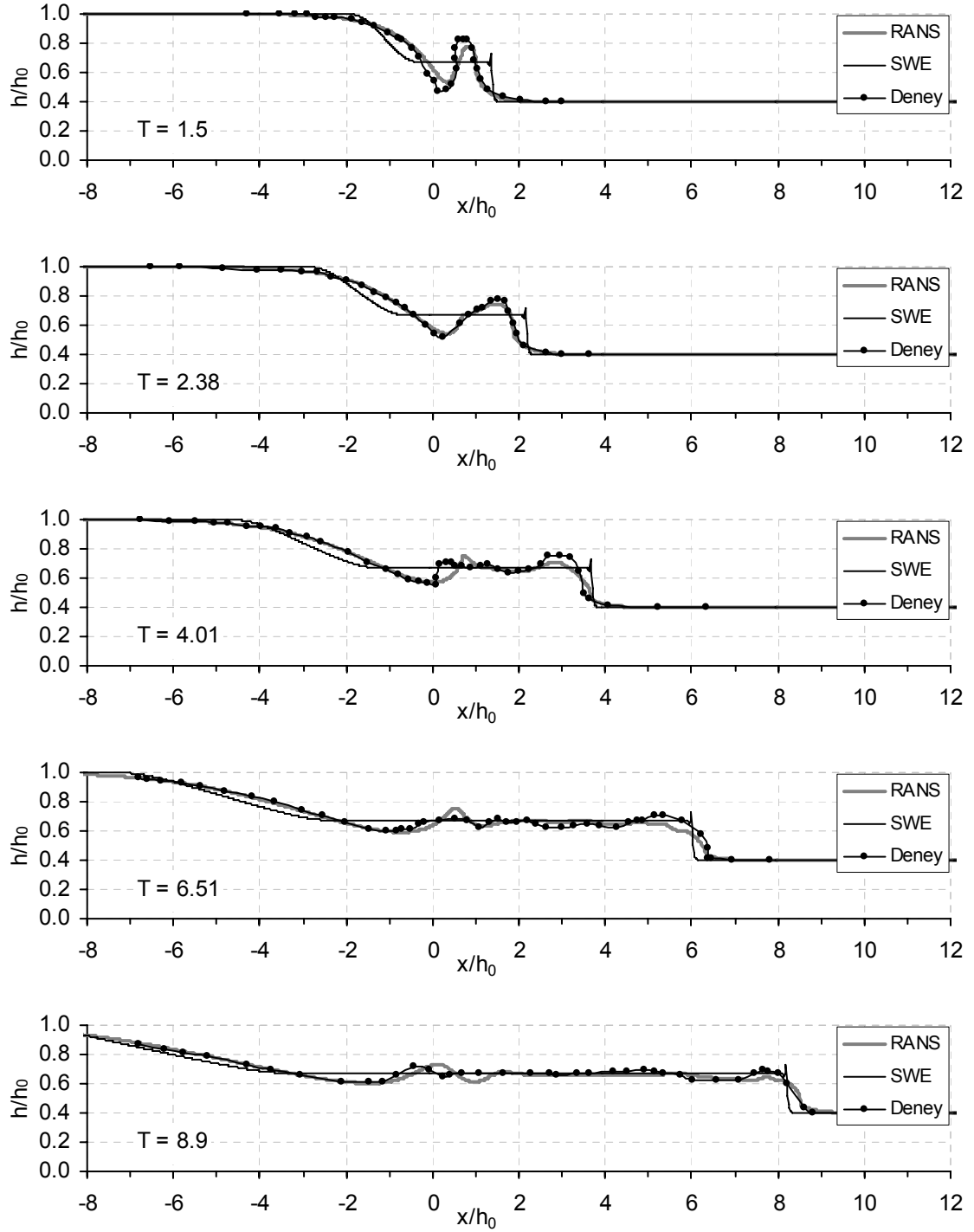


Şekil 5.27. $\alpha=0.4$ ıslak durumu için mansaptaki farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri

5.4.2.1. $\alpha=0.4$ Derinlik Oranı için Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlar ile Karşılaştırılması

Kuyruk suyu derinliğinin arttığı $\alpha=0.4$ derinlik oranı için elde edilen deney sonuçları sıg su denklemleri (SWE-Shallow Water Equations) ve Reynold ortalama Navier-Stokes (RANS-Reynolds Avaraged Navier-Stokes) denklemlerine dayanan sayısal model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal modeller oluşturulurken kuyruk suyu derinliği dışında problemin sınır şartları, ağ aralıkları ve diğer tüm parametreleri Bölüm 5.4.1.1’de verilen $\alpha=0.1$ derinlik oranı ile aynı alınmıştır. Sadece başlangıç şartı olarak baraj mansabındaki kuyruk suyunu tanımlayan akışkan hacmi yüksekliği 0.1 m olarak değiştirilmiştir.

Şekil 5.28, $\alpha=0.4$ derinlik oranı için ıslak durumda elde edilen sayısal ve deneysel su yüzü profillerinin başlangıç aşamalarındaki karşılaştırmasını göstermektedir. Burada x eksen boyutsuz mesafeyi ($X=x/h_0$), y eksen ise kanalda meydana gelen boyutsuz su yüksekliklerini ($H=h/h_0$) ifade etmektedir. Zaman büyüklüğü ise $T=t/(g/h_0)^{1/2}$ boyutsuz büyüklüğü ile verilmiştir. Grafiklere bakıldığında RANS denklemleri ile memba ve mansaptaki su yüzü profillerinin tüm zamanlar için oldukça iyi belirlenebildiği görülmektedir. SWE denklemlerinin ise negatif dalganın ve kabarma dalgası önünün yerini yeterli yaklaşıklıkta belirleyebilmesine karşın başlangıç aşamalarında ($T=1.5-4.01$) su yüzü profillerini doğru bir biçimde yansıtmadığı söylenebilir. İlerleyen zamanlarda ($T=6.51-8.9$) ise su yüzü profilinin belirlenmesinde uygun sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi başlangıç aşamalarında su yüzeyindeki eğriliklerin fazla olmasından dolayı SWE denklemlerinde akımın hidrostatik olduğu ve düşey doğrultudaki bileşenlerin ihmal edilmesi kabulü yıkılmanın ilk anlarında geçerli değildir. Bu nedenle su yüzü profilleri yıkılmanın başlangıç aşamalarında SWE denklemleri kullanarak doğru bir biçimde belirlenmemektedir.



Şekil 5.28. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için başlangıç aşamalarındaki deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması

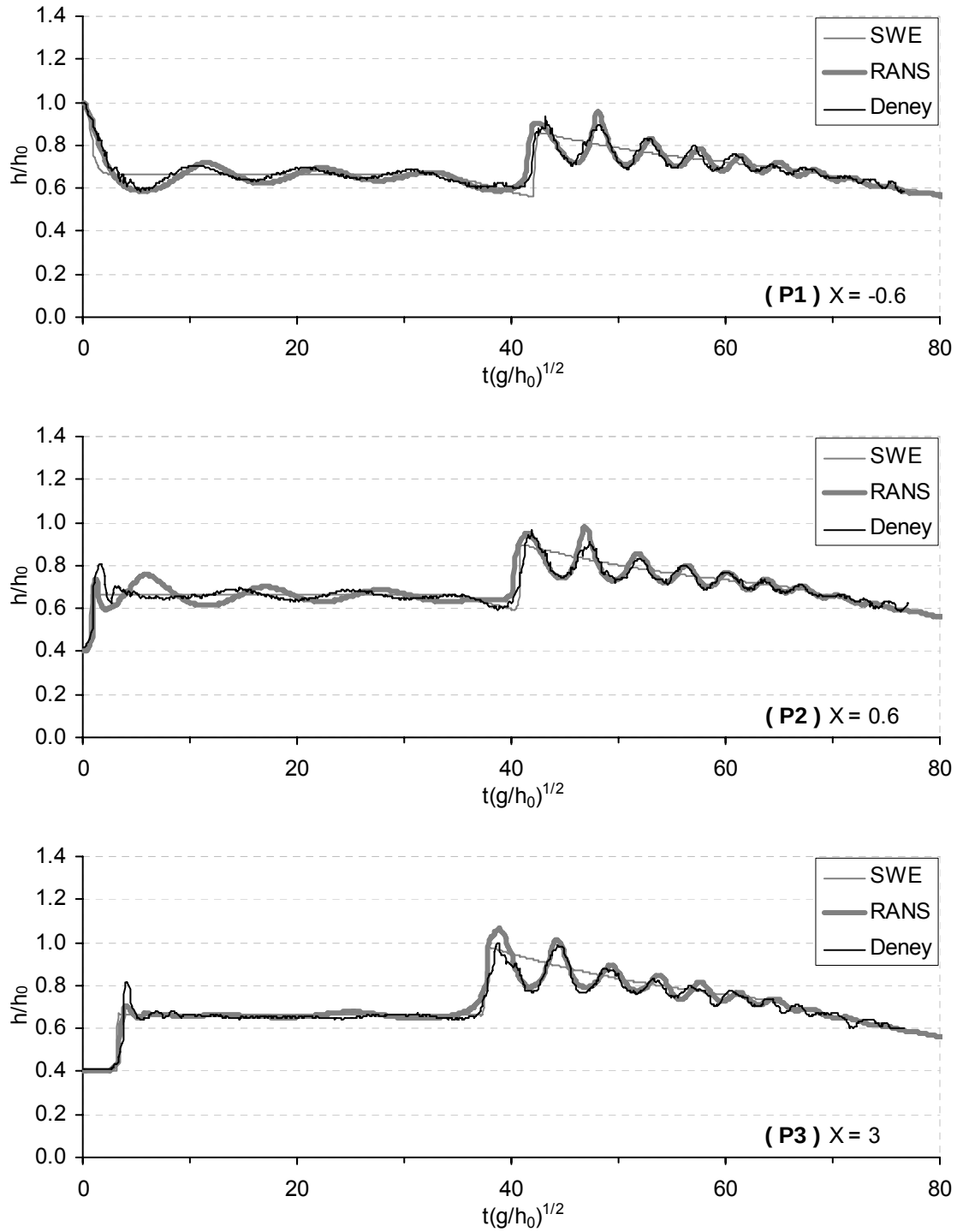
Şekil 5.29’da $\alpha=0.4$ derinlik oranı için deney kanalı üzerinde farklı noktalarda video görüntülerden ve farklı sayısal modellerden elde edilen zamana göre su seviyesi değişimleri görülmektedir. Ölçüm alınan noktaların baraj aksından uzaklıkları Şekil 5.17’de gösterilmiştir. $X=-0.6$ (P1) ve $X=0.6$ (P2) sırasıyla barajın hemen memba ve mansabındaki su seviyesi değişimini göstermektedir. Kesitlerdeki su seviyesi değişimlerine genel olarak bakıldığında mambadaki $X=-0.6$ noktasında su seviyesinde kapağın kalkmasıyla birlikte hızlı bir azalma gözlenirken mansaptaki $X=0.6$ (P2) noktasında hızlı bir yükselme olmaktadır. Sonrasında bu kesitlerde su yüzeyinde belirgin salınımlar meydana gelmektedir. Sırasıyla mansaptaki diğer kesitlere ($X=3-14$) bakıldığında salınımların sadece baraj kesiti civarında meydana geldiği görülmektedir. Mansaptaki diğer kesitlerde su seviyesi $h/h_0=0.65$ yüksekliğinde sabit kalmaktadır. Bu da kabarma dalgası arkasında su yüzü profilinin yatay olduğunu göstermektedir.

Kabarma dalgasının mansap ucundaki duvara çarpıp yansmasıyla birlikte su yüzeyinde salınımlar meydana gelmektedir. Yansıma sonucunda gittikçe azalan bir genliğe sahip dalga treni oluşmaktadır. Yansıyan dalganın kesitlere ulaşmasıyla birlikte örneğin mambadaki $X=-0.6$ kesiti dikkate alınırsa $T=40$ anında yansıyan dalga önünün bu kesite ulaşmasıyla kesitten gittikçe azalan genliğe sahip bir dalga treninin geçtiği görülmektedir. Bu davranış kanal boyunca ölçüm alınan tüm kesitlerde gözlenmektedir. Dikkat edilirse mansap ucuna en yakın kesitte ($X=14$) kabarma dalgası önünün bu kesite ulaşmasıyla yansıyan dalganın kesite geri dönme süresi en kısadır. Ayrıca bu kesitteki yansıyan dalga önünün deney sonucundan elde edilen yüksekliğine bakıldığında $h/h_0=1.13$ iken memba yönünde ilerleyip $X=10$ kesitine ulaştığında yüksekliği $h/h_0=1.2$ ’ye yükselmektedir. Yani dalga memba yönünde hareket ederken dikleşmektedir. Bu davranış $X=6$ kesitindeki RANS sonucunda da görülmektedir. Bunun nedeni yansıyan dalganın memba yönünde ilerlerken mansap doğrultusunda ilerleyen kabarma dalgası ile çarpışması ve bu dalga üzerinde yükselmesi ile açıklanabilir.

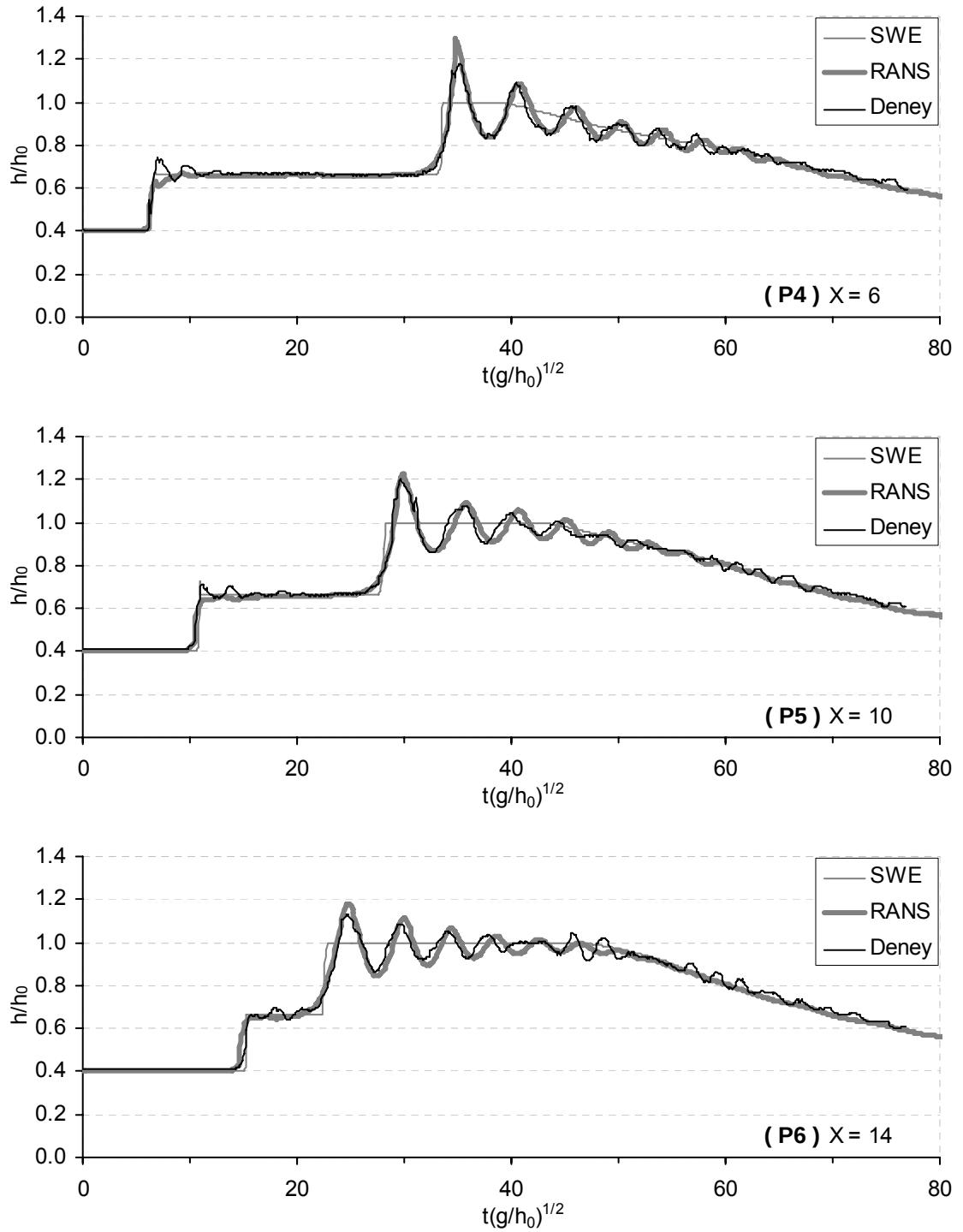
Şekil 5.29’da görülen su seviyesi değişimleri sayısal açıdan incelendiğinde RANS denklemlerinin çözümünden elde edilen sonuçların deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. RANS denklemleri ile kabarma dalgasının

yayılma hızı, su yüzeyinde meydana gelen salınımlar, dalganın duvara çarpıp yansımından dolayı oluşan dalgalanmalar tüm kesitlerde etkili bir biçimde çözülebilmektedir. Sadece mansaptaki kesitlerde kabarma dalgası önü geçtiği anda deney sonuçları bir miktar daha yüksek çıkmaktadır. Bunun dışında yansıyan dalgada ilk dalganın yüksekliği deneysel sonuçlara göre RANS ile elde edilen sonuçlarda çok az daha büyük çıkmaktadır. SWE denklemleri ile elde edilen çözümlerde su yüzü profilleri yaklaşık doğru çizgiler ile ifade edilmektedir. Su yüzeyinde meydana gelen dalgalanmalar, salınımlar düşey doğrultudaki hız bileşenlerinin bu yöntemde ihmal edilmesinden dolayı modellenememektedir. Bu nedenle baraj aksına yakın kesitler ($X=-0.6$ ve $X=0.6$) dışında mansaptaki kesitlerde su yüksekliklerinin ve dalga yayılma hızlarının doğru belirlenebildiği görülmektedir. Buna karşın $X=-0.6$ ve $X=0.6$ kesitlerinde su yüzeyinde gözlenen salınımlar ile taşkın dalgasının duvara çarpıp yansması sonucu su yüzeyinde meydana gelen ve tüm kesitlerde gözlenen dalgalanmalar, SWE denklemlerinde tam olarak belirlenememektedir. Bu durumda hesaplanan su yükseklikleri deneyde ölçülen maksimum yüksekliklerin altında kalmaktadır. Grafiklere dikkatli bakılırsa SWE ile elde edilen su yüksekliklerinin RANS ve deney sonuçlarında gözlenen salınımların orta noktalarını izlediği görülebilir. Bir başka ifade ile SWE ile hesaplanan yükseklikler gerçek yüksekliklerin ortalama çizgisi veya eğilim çizgisi gibi davranmaktadır. Dalga önlerinin geçtiği, sıçramaların olduğu yerlerde SWE sonuçlarında akımda süreksizlikler gözlenmektedir. Bir başka ifade ile dalga önleri düşey doğru çizgiler şeklinde ifade edilmektedir.

Şekil 5.29'da $\alpha=0.4$ derinlik oranı için SWE ile bulunan yükseklikler Şekil 5.24'da $\alpha=0.1$ derinlik oranı için elde edilen yüksekliklerle karşılaştırıldığında; kuyruk suyu derinliğinin artmasıyla özellikle dalganın düşey duvardan yansması sonucu oluşan düşük sıçramaların ve dalga kırılmalarının meydana gelmesi durumunda su yüzü profillerinin SWE ile daha doğru belirlenebildiği sonucu ortaya çıkmaktadır.



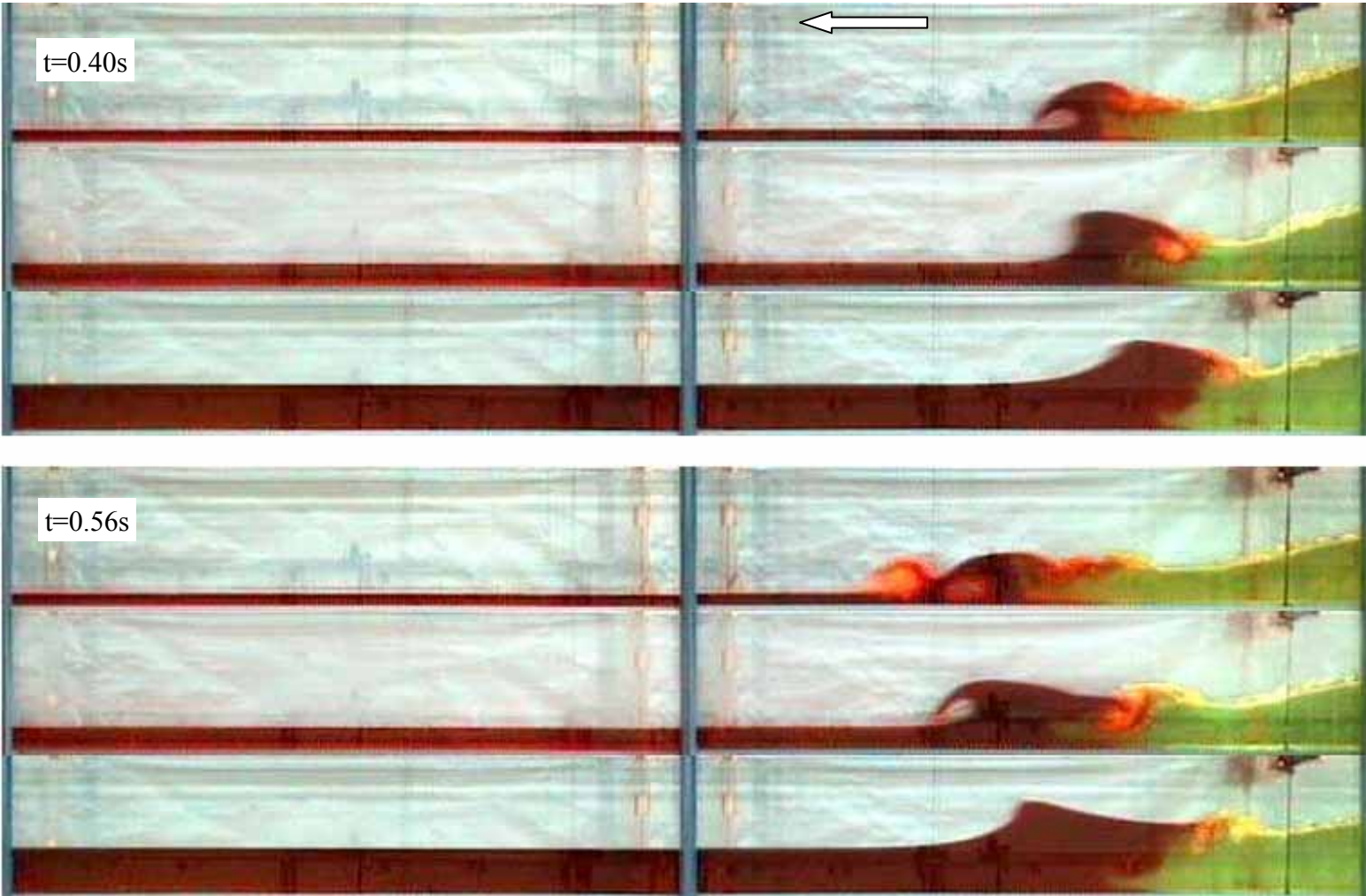
Şekil 5.29a. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



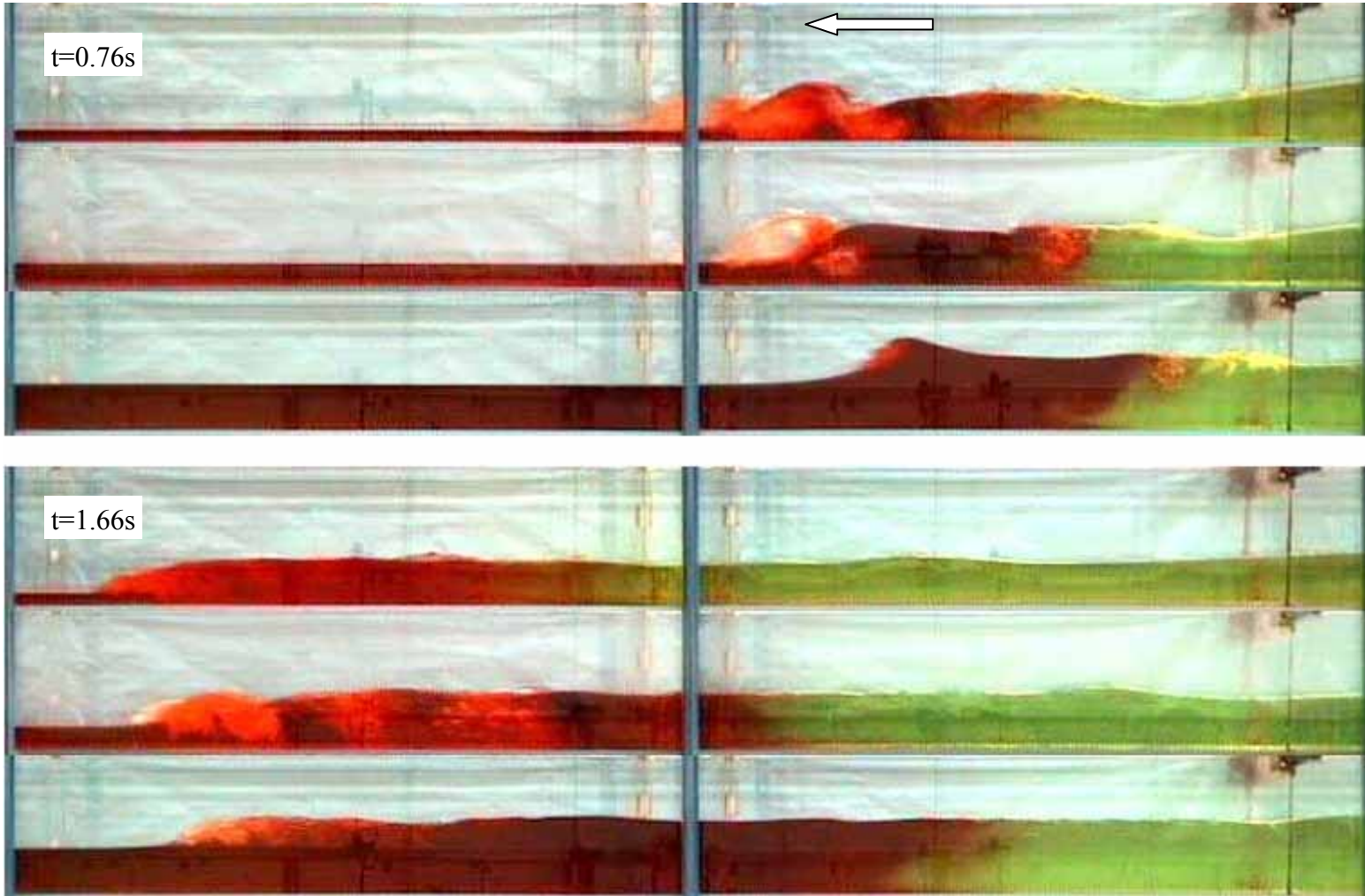
Şekil 5.29b. $\alpha=0.4$ derinlik oranı için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması

5.4.3. $\alpha=0.1$, $\alpha=0.2$ ve $\alpha=0.4$ Derinlik Oranları için Elde Edilen Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 5.30'da $\alpha=h_1/h_0=0.1$, $\alpha=0.2$ ve $\alpha=0.4$ derinlik oranları için başlangıç aşamalarındaki deney görüntüleri görülmektedir. Membadaki su derinliği $h_0=25$ cm olarak alınmıştır. Dolayısıyla mansaptaki kuyruk suyu derinlikleri sırasıyla 2.5, 5 ve 10 cm olmaktadır. Membadaki su açık renkte mansaptaki su koyu renkte boyanarak akımın davranışı dahi iyi anlaşılmaya çalışılmıştır. Kapak kalktıktan sonra membadaki akım yerçekimi kuvvetinin etkisiyle mansaptaki suyu sürüklemektedir. $\alpha=0.1$ derinlik oranı için kuyruk suyu derinliği en az olduğundan membadaki suya karşı fazla direnç gösterememektedir. Benzer biçimde derinlik oranı $\alpha=0.4$ olduğunda mansaptaki durgun su daha fazla direnç gösterecektir. Bu nedenle başlangıçtaki $t=0.4$ s anında $\alpha=0.1$ derinlik oranı için dalga önü daha hızlı ilerlemektedir. Bunu sırasıyla $\alpha=0.2$ ve $\alpha=0.4$ derinlik oranındaki taşkın dalgası izlemektedir. $T=0.4$ anında $\alpha=0.1$ derinlik oranı için dalga kırılmak üzere iken $\alpha=0.2$ derinlik oranı için dalga henüz kırılmaya başlamıştır, $\alpha=0.4$ derinlik oranı için herhangi bir kırılma söz konusu değildir. $t=0.56$ s anında $\alpha=0.1$ derinlik oranı için dalga kırılmış ve ikinci dalga oluşumu başlamışken $\alpha=0.2$ derinlik oranında dalga kırılmak üzeredir, $\alpha=0.4$ derinlik oranı için dalga bir miktar dikleşmesine rağmen kırılma olmamıştır. $t=0.76$ s anında $\alpha=0.1$ derinlik oranı için ikinci dalga kırılmış, $\alpha=0.2$ derinlik oranı için ikinci kırılma başlamış ve $\alpha=0.4$ derinlik oranında ise dalga tepesinde küçük bir kırılma meydana gelmesine rağmen tam bir kırılma söz konusu olmamaktadır. İlerleyen zamanlarda ($t=1.66$ s) her üç durumda da kabarma dalgası oluşmakta ve kabarma dalgası arkasında sabit (yatay) su derinliği meydana gelmektedir. Bu sürede de $\alpha=0.1$ derinlik oranı için kabarma dalgası önü en ileridedir. $\alpha=0.4$ derinlik oranı durumunda ise kabarma dalgası en geride kalmaktadır. Dolayısıyla derinlik arttıkça kabarma dalgası hızının azaldığı sonucu çıkarılabilir. Ayrıca kabarma dalgası önünde türbülans oluşumu arka arkaya meydana gelen dalga kırılmalarından dolayı $\alpha=0.1$ derinlik oranı için en fazladır. Bunun sonucu olarak da hava girişiminin en fazla $\alpha=0.1$ derinlik oranı için meydana geldiği söylenebilir.



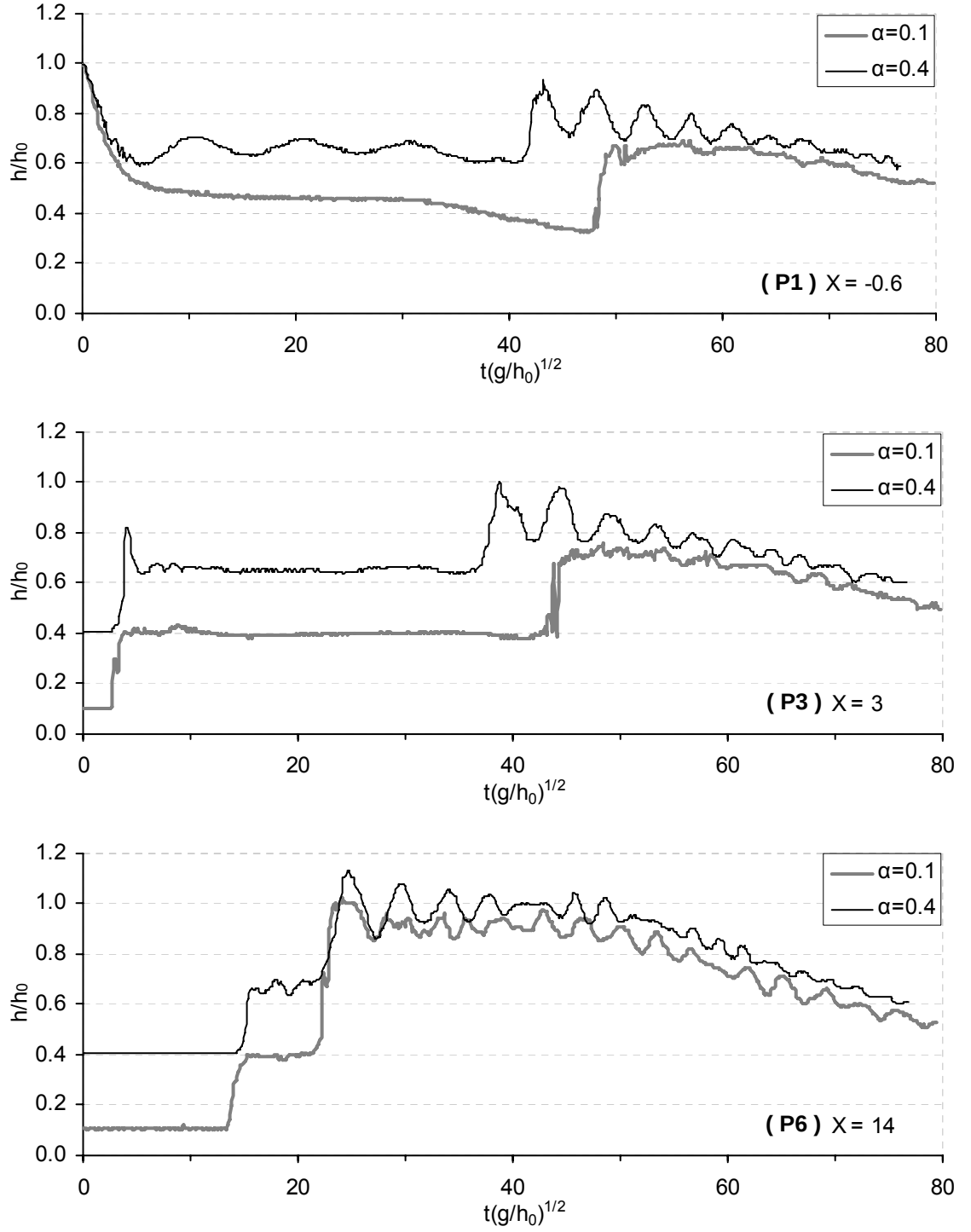
Şekil 5.30a. $\alpha=0.1$, $\alpha=0.2$ ve $\alpha=0.4$ derinlik oranları için başlangıç aşamalarındaki deney görüntülerinin karşılaştırılması



Şekil 5.30b. $\alpha=0.1$, $\alpha=0.2$ ve $\alpha=0.4$ derinlik oranları için başlangıç aşamalarındaki deney görüntülerinin karşılaştırılması

Ayrıca Şekil 5.30'da $t=1.66$ s anındaki görüntülerde görüldüğü gibi $\alpha=0.1$ derinlik oranı için dalga önündeki hava kabarcıklarının olduğu kısımdaki çalkantıların miktarı az olup kuyruk suyu derinliği boyunca hissedilirken, $\alpha=0.2$ derinlik oranı için çalkantı miktarı biraz daha artarak kanal tabanına yakın kısımlarda, $\alpha=0.4$ derinlik oranı durumunda ise çalkantılar durgun su yüzeyine yakın kısımlarda hissedilmektedir. Bu bilgilerden $\alpha=0.1$ derinlik oranı için meydana gelen dalga kırılmalarından ve suyun kanal tabanına yakın olmasından dolayı enerji kaybının daha fazla olacağı bu oran arttıkça enerji kaybının daha az olacağı söylenebilir. Ancak bu konuda kesin bir kanıya varmak için daha detaylı çalışma yapılması gerekmektedir. İlave olarak $t=1.66$ s anında açık renkli akıma bakılırsa membadaki suyun $\alpha=0.1$ derinlik oranı için daha ileriye taşındığı görülmektedir.

Şekil 5.31'de $\alpha=0.1$ ve $\alpha=0.4$ derinlik oranları için memba ve mansaptaki video görüntülerinden elde edilen farklı noktalardaki zamana göre su seviyesi değişimleri görülmektedir. Ölçüm noktaları Şekil 5.17'de verilmiştir. Burada $X=x/h_0=-0.6$ (P1) membadaki, $X=3$ (P3) ve $X=14$ (P6) mansaptaki su seviyesi değişimlerini göstermektedir. Membadaki ($X=-0.6$) su seviyesi değişimi incelendiğinde derinlik oranının artmasıyla birlikte boyutsuz zamanın ilk yarısında su yüzeyinde salınımların meydana geldiği görülmektedir. Mansapta ise derinlik oranının artmasıyla özellikle $X=3$ kesitinde aynı zaman aralığında su yüzeyinde herhangi bir salınım söz konusu olmamaktadır. Bu kesitlerde kabarma dalgası önünün kesitlere ulaşma zamanına bakıldığında $\alpha=0.1$ derinlik oranı için kabarma dalgası yayılma hızının çok az daha ileride olduğu görülmektedir. İlerleyen kabarma dalgasının mansap kesiti sonundaki kapağa çarpıp yansımasıyla birlikte her iki derinlik oranı için su yüzeyinde dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu durum mansap ucuna en yakın $X=14$ kesitinde açıkça görülmektedir. Yansıyan dalgalar memba yönünde ilerleyerek $X=3$ kesitine ulaştığında $\alpha=0.1$ derinlik oranı için yüzeydeki bu dalgalanmaların ortadan kaybolduğu, $\alpha=0.4$ derinlik oranı durumunda ise dalgalanmaların devam ettiği ve $X=-0.6$ kesitine ulaştığında bu dalga treninin daha düzenli bir görünüm aldığı görülmektedir.



Şekil 5.31. $\alpha=0.1$ ve $\alpha=0.4$ derinlik oranları için mansap boyunca farklı noktalarda zamana bağlı deneysel su seviyesi değişimleri

Dikkat edilmesi gereken önemli bir noktada $X=14$ kesitinde yansıyan dalga önü $T=22$ anında yaklaşık aynı hızda iken yansıyan dalgalar $X=3$ kesitine ulaştığında $\alpha=0.1$ derinlik oranı için dalga önü oldukça geride kalmaktadır. Şekil 5.31'e bakıldığında $X=3$ kesitine $\alpha=0.4$ derinlik oranı için yansıyan dalga önü yaklaşık $T=37$ anında ulaştığında $\alpha=0.1$ derinlik oranı için dalga önü $T=43$ anında ulaşmaktadır. $X=-0.6$ kesitine ulaşıldığında dalga önleri arasındaki fark biraz daha artmaktadır. Bununla birlikte $\alpha=0.1$ derinlik oranı için dalga önünün gecikmesinden dolayı yansıyan dalga $X=-0.6$ kesitine ulaşınca kadar bu kesitte su seviyesinde azalma başlamıştır.

Bu bilgilerle kabarma dalgasının mansap ucundaki kapağa çarpmasıyla birlikte $\alpha=0.1$ derinlik oranı durumunda gelen ve yansıyan dalganın çarpışması, akım derinliği boyunca etkiyen hava girişimi, türbülans, çalkantı gibi nedenlerden dolayı önemli enerji kayıplarının meydana geldiği, derinliğin artmasıyla bu enerji kayıplarının azaldığı sonucu çıkarılabilir. Akım derinliğinin fazla olması ve kabarma dalgasının dalgalı bir görünüme sahip olması (undular bore) durumunda dalganın yansmasıyla hava girişimi, türbülans gibi etkiler baskın olmadığından enerji kaybının daha az olacağı söylenebilir. Önceki çalışmalara bakıldığında, kabarma dalgasının düşey bir duvardan yansması konusu ele alınmadığından bu deney sonuçları ile kabarma dalgası hakkında daha detaylı bilgi edinilmiş ve sayısal sonuçların karşılaştırılabilmesi için özgün deney verileri elde edilmiştir.

5.5. Kanal Tabanında Meydana Gelen Yerel Değişimlerin Baraj Yıkılması Taşkın Dalgasının Yayılmasına Etkisi

Gerçekte baraj yıkılması taşkın dalgasının arazi topografyası üzerinde yayılması problemi karmaşık 3-boyutlu bir olaydır. Barajın mansabında çeşitli geometriye sahip engeller, daralmalar, arazi yatağında ve eğiminde yerel değişimler sıklıkla bulunmaktadır. Bu konuda gerçek arazi verisi bulunmamasından dolayı kontrol edilebilir laboratuvar koşullarında basit geometriye sahip kanal tabanı

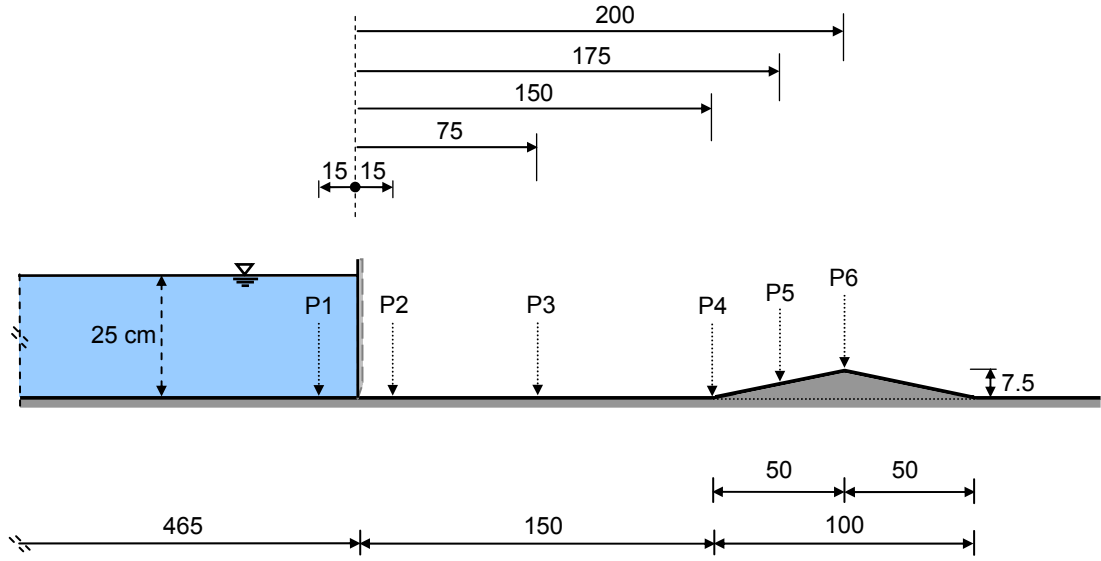
değişimlerin incelenmesi, baraj yıkılması akımı davranışının daha iyi anlaşılabilmesi ve sayısal modellerin doğrulanabilmesi için oldukça önemli olmaktadır.

Yapılan çalışmada, kanal tabanındaki değişimlerin mansapta meydana gelecek su yüzü profillerine ve su seviyesi değişimlerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla kanal tabanında üçgen ve trapez olmak üzere iki farklı geometriye sahip eşik kullanılmıştır.

5.5.1. Baraj Mansabında Üçgen Eşik Bulunması

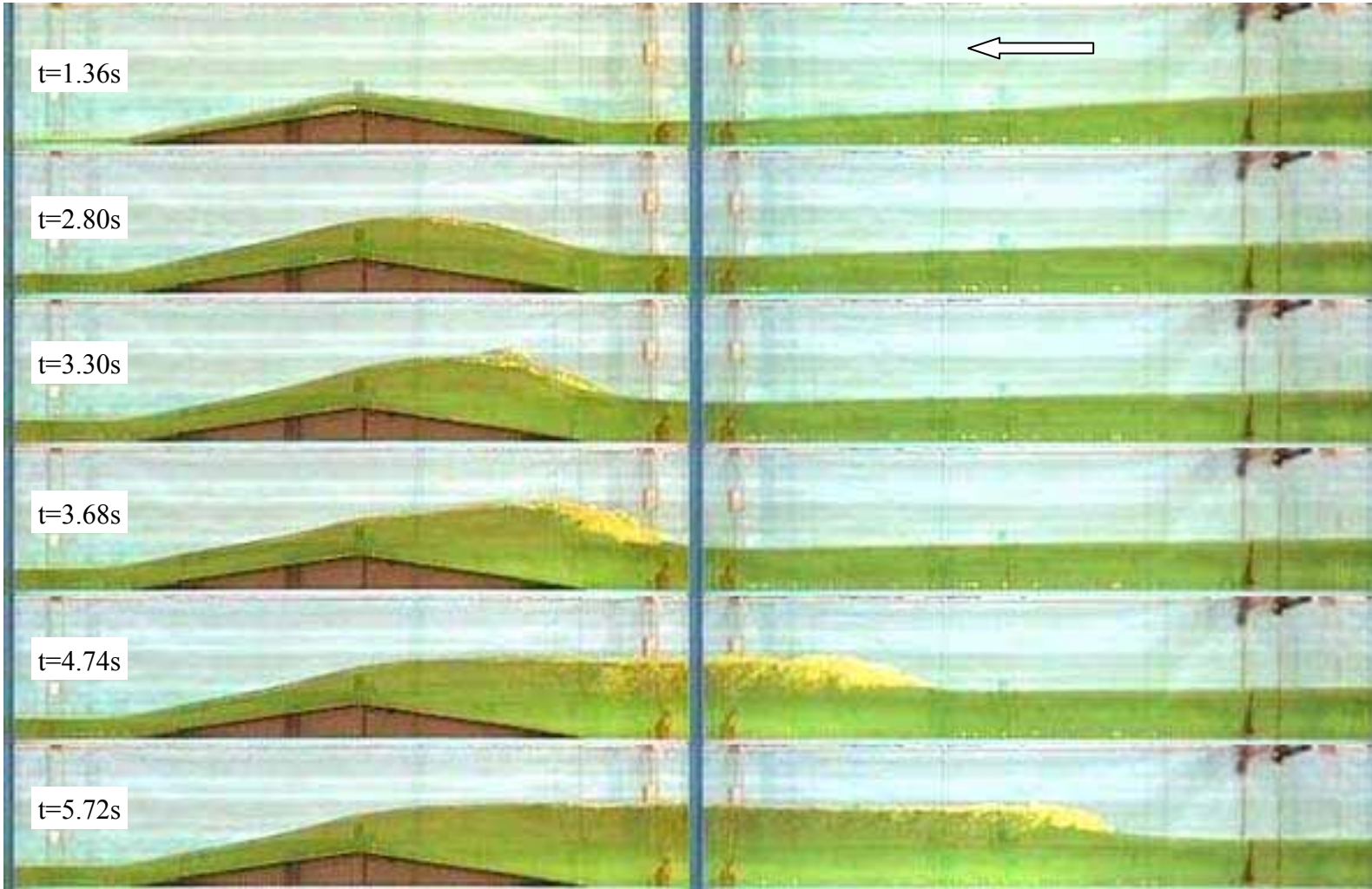
Deneyler, kesiti Şekil 5.32’de görülen yatay dikdörtgen kanalda gerçekleştirilmiştir. Barajın 150 cm mansabında uzunluğu 100 cm, yüksekliği 7.5 cm olan ikizkenar üçgen eşik yerleştirilmiştir. Üçgen eşik 4mm kalınlığında alüminyum duvar cephe kaplama malzemesinden yapılmış ve eğilmemesi için alttan güçlendirilmiştir. Eşiğin yüzeyi oldukça pürüzsüzdür. Kapak memba ucundan 465 cm uzakta yerleştirilmiştir. Memba derinliği 25 cm olarak alınmış ve sadece mansabın kuru olması durumu irdelenmiştir. Kanal mansap ucuna herhangi bir duvar yerleştirilmemiş mansap doğrultusunda ilerleyen akım kanaldan serbestçe uzaklaştırılmıştır. Şekilde baraj aksından uzaklıkları verilen biri membada, 5 tanesi de mansapta olmak üzere toplam altı noktada video görüntülerinden zamana bağlı su seviyesi değişimleri incelenmiştir. Mansaptaki noktalardan üç tanesi kritik olması düşünülen engelin hemen başladığı yerde, engelin yükselen kısmının ortasında ve üçgenin tepe noktasında seçilmiştir.

Üçgen eşik hem yükselen hem de alçalan bir eğime sahip olmasından dolayı akımın farklı eğimlerdeki davranışının test edilmesi açısından iyi bir örnektir. Sayısal çalışmada, dikdörtgen ağlar kullanıldığından üçgen eşiğin tanımlanmasıyla hücreler tamamen engel ile kapatılamayacak ve basamaklı bir görünüm olacaktır. Bu nedenle sayısal simülasyonun test edilmesi açısından da önemlidir.



Şekil 5.32. Baraj mansabında üçgen eşik bulunması durumu için kanal kesiti

Şekil 5.33’de iki video kamera görüntüsünün birleştirilmesiyle elde edilmiş olan görüntülerde, kapağın ani olarak kalkmasıyla birlikte kuru kanalda ilerleyen taşkın dalgasının üçgen eşik üzerinden aşarken gösterdiği davranış görülmektedir. Taşkın dalgası eşiğe ulaşır ulaşmaz akımın bir kısmı engeli aşarken, bir kısmı da eşikten yansımakta ve memba yönünde hareket eden bir negatif kabarma dalgası oluşmaktadır. Buradaki kabarma dalgası memba yönünde hareket eden hidrolik sıçrama gibi düşünülebilir. Taşkın dalgası engeli geçerken yukarı doğru eğimde yavaşlamakta tepeyi aştıktan sonra aşağı eğimde ise akım hızlanmaktadır. Dikkat edilirse ilk dalganın geçmesiyle eşğin memba yüzeyi üzerinde su seviyesi zamanla yükselmekte negatif dalganın oluşmasıyla birlikte eşik savak gibi davranmaktadır. Bir süre sonra eşik üzerinde kritik akım koşulları oluşur. Eşğin mansabında kritik üstü, membasında kritik altı ve yansıyan negatif kabarma dalgası önünün membasında ise tekrar kritik üstü akımın olduğu kanalda değişken ve karmaşık bir akım ortamı bulunmaktadır. Ayrıca şekilde görülmemekle birlikte kanalın memba ucu kapalı olduğundan negatif kabarma dalgası memba ucundaki duvara çarparak tekrar yansımakta ve mansap yönünde harekete geçmektedir.



Şekil 5.33. Mansapta üçgen eşik olması durumunda elde edilen deney görüntüleri

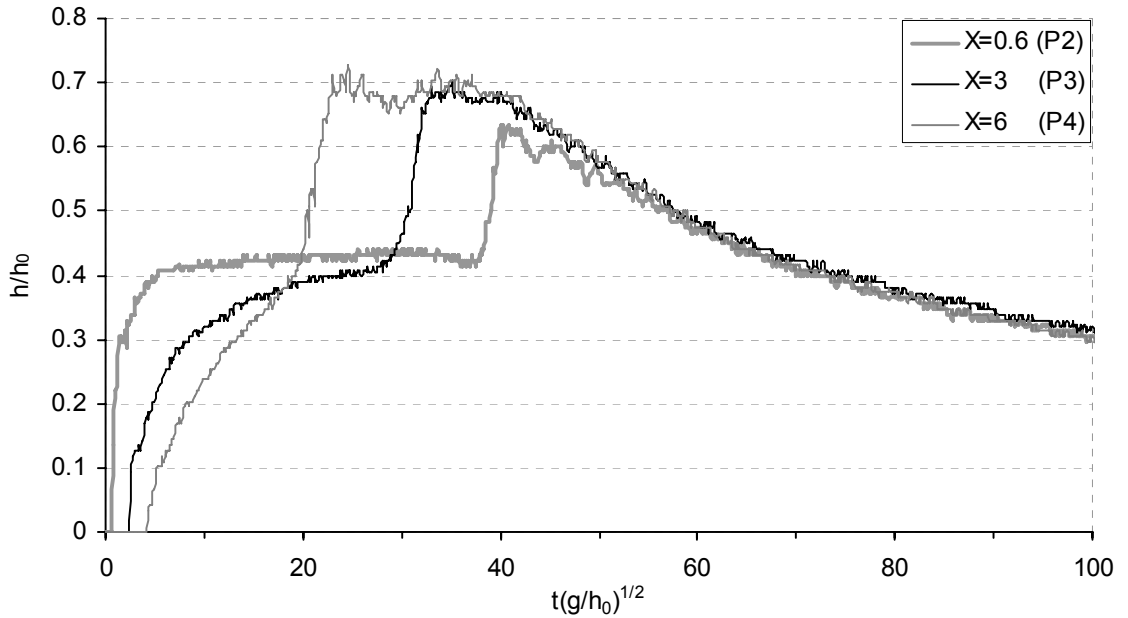
Baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılması sırasında su seviyesi ve akımın debisi kanal boyunca zamana ve yere göre değiştiği için mansap kesiti üzerinde bulunan bir eşiğin su yüzeyi ve akımın davranışı üzerindeki etkisinin açıklaması düzenli akım durumuna göre daha zor ve karmaşıktır. Açık kanal akımlarında her kesitin bir debi taşıma kapasitesi bir başka ifade ile akım iletim kapasitesi vardır. Belirli bir Q debisinin kanal içerisinde akıtılabilmesi için akımın özgül enerjisinin ($E=h+Q^2/2gA^2$) en azından kritik yükseklik ile bulunabilen minimum bir enerjiye ($E_{\min}=1.5h_{kr}=1.5(q^2/g)^{1/3}$) sahip olması gereklidir. Bununla birlikte bir kesitten belirli bir Q debisi aynı E özgül enerji değeri için biri sel diğeri nehir rejimde olmak üzere iki farklı derinlikten akabilmektedir. Bu durum düzenli akım için özgül enerji-derinlik eğrisi ile belirlenebilmektedir (Sümer ve ark.,1983). Debi değeri arttıkça gerekli minimum enerjide artmaktadır. Dolayısıyla her bir debi değeri için özgül enerji derinlik ilişkisinde ayrı bir eğri elde edilir. Baraj yıkılması akımında, kapağın kalkmasıyla birlikte mansaptaki bir kesitte akımın debisi başlangıçta artmakta ve daha sonra rezervuardaki suyun azalmasıyla birlikte düşüşe geçmektedir. Baraj yıkılması akımı için debi değeri anlık değiştiği için özgül enerji-derinlik ilişkisinde sonsuz sayıda eğrinin çizilmesi gereklidir.

Kapağın hızlı bir şekilde kaldırılmasından sonra kapağın bulunduğu yer bir kontrol kesiti gibi davranmaktadır. Diğer bir deyişle, bu kesitte kritik akım meydana gelmektedir. Dolayısıyla membada kalan akım kritik altı (nehir rejimi) iken mansap doğrultusunda ilerleyen pozitif taşkın dalgasının oluşturduğu akım kritik üstüdür yani mansaptaki akım sel rejimindedir. Kritik üstü akımın eşik üzerinden geçebilmesi için enerjisinin minimum enerjiye eşit veya daha büyük olması gereklidir. Enerji kayıpları ihmal edilirse akımın eşik üzerindeki minimum enerji yüksekliği engelsiz durumdaki minimum enerji yüksekliğine eşik yüksekliğinin eklenmesiyle bulunabilir. Bu toplam yüksekliğin, akımın anlık özgül enerji yüksekliğini aşması durumunda eşik üzerindeki su seviyesinin yükselmesi gerekecektir. Akım değişken olduğundan minimum enerji ve özgül enerji yükseklikleri de anlık değişmektedir. Bu nedenle su yüzeyinin değişimi iki değer arasındaki anlık değerlere bağlı olarak değişecektir. Şekil 5.33’de görüldüğü gibi başlangıçta ($T=1.36$) debi değeri küçük olduğu için akım eşik üzerinde kolaylıkla fazla değişime uğramadan geçebilmiştir.

Ancak zamanla debinin artmasıyla birlikte aşılması gereken minimum enerji de yükselecektir. Diğer yandan akımın kesitten geçebilmesi için enerjisini de yükseltmesi gerekecektir. Akım yukarı çıkarken hızı azaldığı ve sel rejimindeki akımlar memba kontrollü olduğundan dolayı bu ancak su seviyesinin yükselmesi ile mümkündür. Ancak gelen akım sel rejiminde olduğu için kısa sürede su seviyesini yükseltebilmesi sadece akımın nehir rejimine geçmesi ile mümkün olmaktadır. Sel rejiminden nehir rejimine geçiş su seviyesinin bir süreksizliğe sahip olmasıyla diğer bir deyişle hidrolik sıçrama ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle akım debisinin de zamanla artmasından dolayı eşik üzerindeki su seviyesi yükselmekte ($T=1.36-3.30$) bir süre sonra eşik üzerinde sel rejimindeki akımın nehir rejimine geçmesinden dolayı hidrolik sıçrama meydana gelmektedir. Bu geçiş Şekil 5.33’de $T=2.80-3.60$ arasındaki görüntülerde görülmektedir. Hidrolik sıçramanın oluşmasıyla birlikte nehir rejimindeki akım hızı sel rejimindeki akım hızından daha düşük olduğu için enerji kaybı azalacak ve dolayısıyla hidrolik sıçrama ile tepe noktası arasında akımın geçebilmesi için gerekli enerji seviyesi minimum enerji değerine yükselecektir. Daha sonra oluşan hidrolik sıçrama gelen akım debisinin zamanla azalmasından dolayı kabarma dalgası şeklinde memba yönünde ilerlemektedir. Üçgen eşik savak gibi davrandığından tepe noktası bir kontrol kesiti oluşturmaktadır. Bundan dolayı eşik mansabında tekrar sel rejimine geçiş söz konusudur. Bu yorum yapılırken eşik civarında enerji kayıplarının çok küçük olduğu düşünülmüştür.

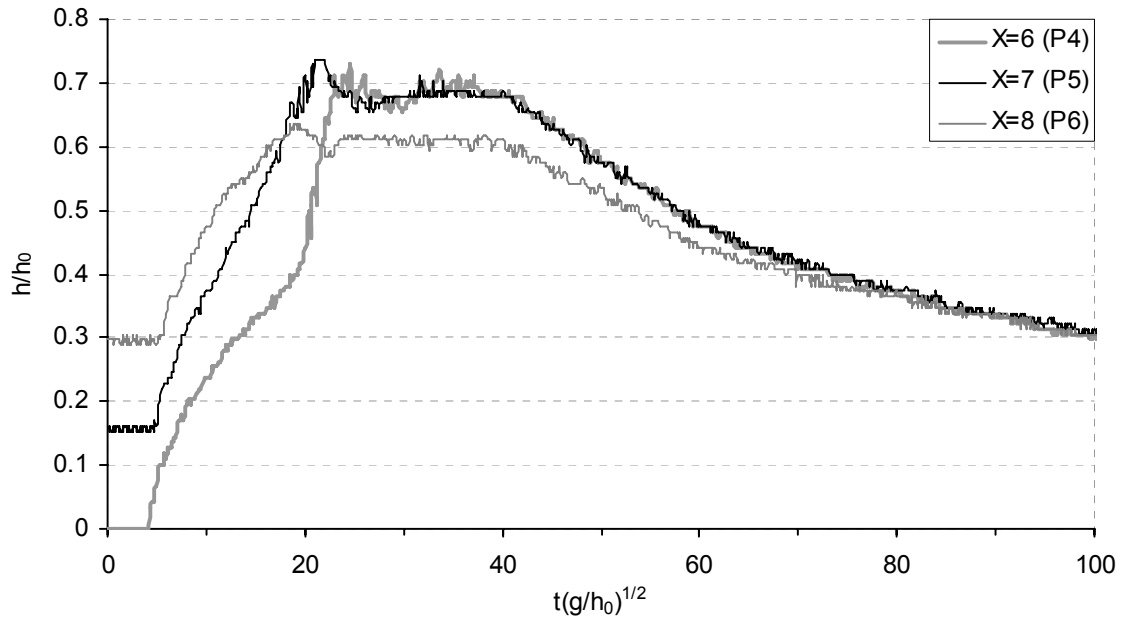
Şekil 5.34’de mansap üzerinde üçgen eşik bulunması durumunda baraj kesiti ile üçgen eşik arasında kalan ölçüm noktalarındaki zamana bağlı su seviyesi değişimleri görülmektedir. Burada P2 noktası barajın hemen mansabında P4 noktası eşğin başladığı nokta ve P3 noktası da bu iki noktanın yaklaşık ortasında bir yerde seçilmiştir (Şekil 5.32). Grafikteki eğrilere bakılırsa P2 noktasında su seviyesinin kapağın kalkmasıyla birlikte çok hızlı yükseldiği ve daha sonra su seviyesindeki yükselmenin çok yavaş olduğu (yaklaşık sabit kabul edilebilir) eşik üzerinden yansıyan dalganın ulaşmasıyla birlikte su seviyesinin tekrar ani bir şekilde yükseldiği ve yansıyan kabarma dalgasının geçişiyle birlikte düşüşe geçtiği görülmektedir. Eşik ile baraj aksı arasında kalan P3 noktasında su seviyesi P2 noktasında göre daha ilerde olduğu için pozitif dalga önünün ulaşmasıyla su seviyesi daha yavaş bir biçimde

yükselmektedir. P2 noktasına benzer biçimde yansıyan dalganın P3 noktasına ulaşmasıyla birlikte su seviyesinde hızlı bir artış olmaktadır. Bu noktada oluşan maksimum su yüksekliği P2 noktasına göre daha fazla olmaktadır. Eşiğin başladığı P4 noktasında ise ilk dalganın geçişi ile birlikte maksimum su seviyesine ulaşma zamanı daha kısadır. Dikkat edilirse bu noktadaki yükselme eğrisi diğerlerine göre daha diktir ve daha düzgün bir eğri oluşturur. Bunun nedeni P4 noktasının eşiğin hemen yakınında olması ve eşikten dolayı su seviyesindeki hızlı yükselmenin ve negatif kabarma dalgası oluşumunun bu bölgede olması ve hemen hissedilmesidir. Diğerlerinden farklı olarak P4 noktasında maksimum su seviyesi bir süre yaklaşık sabit kalmakta ve daha sonra düşüşe geçmektedir. Şekil 5.34'e genel olarak bakılırsa eşik arkasında meydana gelen maksimum yüksekliklerin eşik civarında (P3-P4) en fazla olduğu ($h/h_0=0.7$), memba yönünde ilerledikçe azaldığı (P2 noktasında $h/h_0=0.63$) görülmektedir. Ayrıca su seviyesi alçalmaya başladıktan sonra eşik arkasındaki su seviyesi yaklaşık yatay olmaktadır. $T>50$ anında her üç ölçüm noktasında su seviyesi okumasının alınmasıyla bu durum görülebilir.



Şekil 5.34. Mansapta üçgen eşik olması durumunda eşik ile baraj aksı arasında kalan kesitlerde zamana bağlı su seviyesi değişimleri

Şekil 5.35 mansap üzerinde üçgen eşik bulunması durumunda eşik üzerinde seçilen ölçüm noktalarındaki su seviyesi değişimlerini göstermektedir. Burada P4 noktası eşiğin başladığı nokta, P6 eşiğin tepe noktası, P5 ise bu iki nokta arasından eşiğin artan eğime sahip kısmının ortasında seçilmiştir (Şekil 5.32). P5 noktasında elde edilen eğriye dikkat edilirse eşikten dolayı su seviyesindeki hızlı yükselmenin yaklaşık bu noktada gerçekleşmesinden dolayı eğrinin yükselme kısmının yaklaşık bir doğru olduğu yani yükselmenin lineer olduğu söylenebilir. Şekilden maksimum su seviyesinin ($h/h_0=0.74$) P5 noktasında olduğu görülmektedir. Buradan kanal boyunca eşik arkasındaki maksimum su seviyesinin, eşiğin başladığı nokta ile tepe noktası arasında bir yerde oluştuğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 5.35. Mansapta üçgen eşik olması durumunda eşik civarındaki kesitlerde zamana bağlı su seviyesi değişimleri

Kabarma dalgası oluşumundan sonra Şekil 5.35'de görüldüğü gibi P4 ve P5 eğrileri çakışmaktadır (su seviyesinin sabit kaldığı ve alçaldığı kısımlar). Bu da iki noktanın birbirine yakın olması ve eşik arkasındaki su yüzeyinin yaklaşık yatay olması ile açıklanabilir. Eşik arkasında su seviyesinin hızlı yükselmesi ve negatif kabarma dalgasının oluşumuyla birlikte eşik membasında kritik altı eşik mansabında

kritik üstü akım meydana geldiğinden eşik tepe noktası (P6) kontrol kesiti gibi davranmaktadır. Diğer bir ifade ile nehir rejiminden sel rejimine geçişte akım kritik yükseklikten geçmektedir. Dolayısıyla P6 noktasındaki su seviyesi değişimini gösteren eğri kabarma dalgası oluşumundan sonraki aşamada ($T > 20$) tepe noktasındaki kritik yüksekliğin (h_{kr}) zamanla değişimi gibi düşünülebilir. Dikkat edilirse akım rejimi değişirken hızı arttığından su seviyesi azalmaktadır. Bu nedenle P6 noktasındaki su yüksekliği eşik üzerindeki noktalardan (P4-P5) daha alçakta olmaktadır. Bu noktada oluşan maksimum su yüksekliği $h/h_0 = 0.63$ olmaktadır.

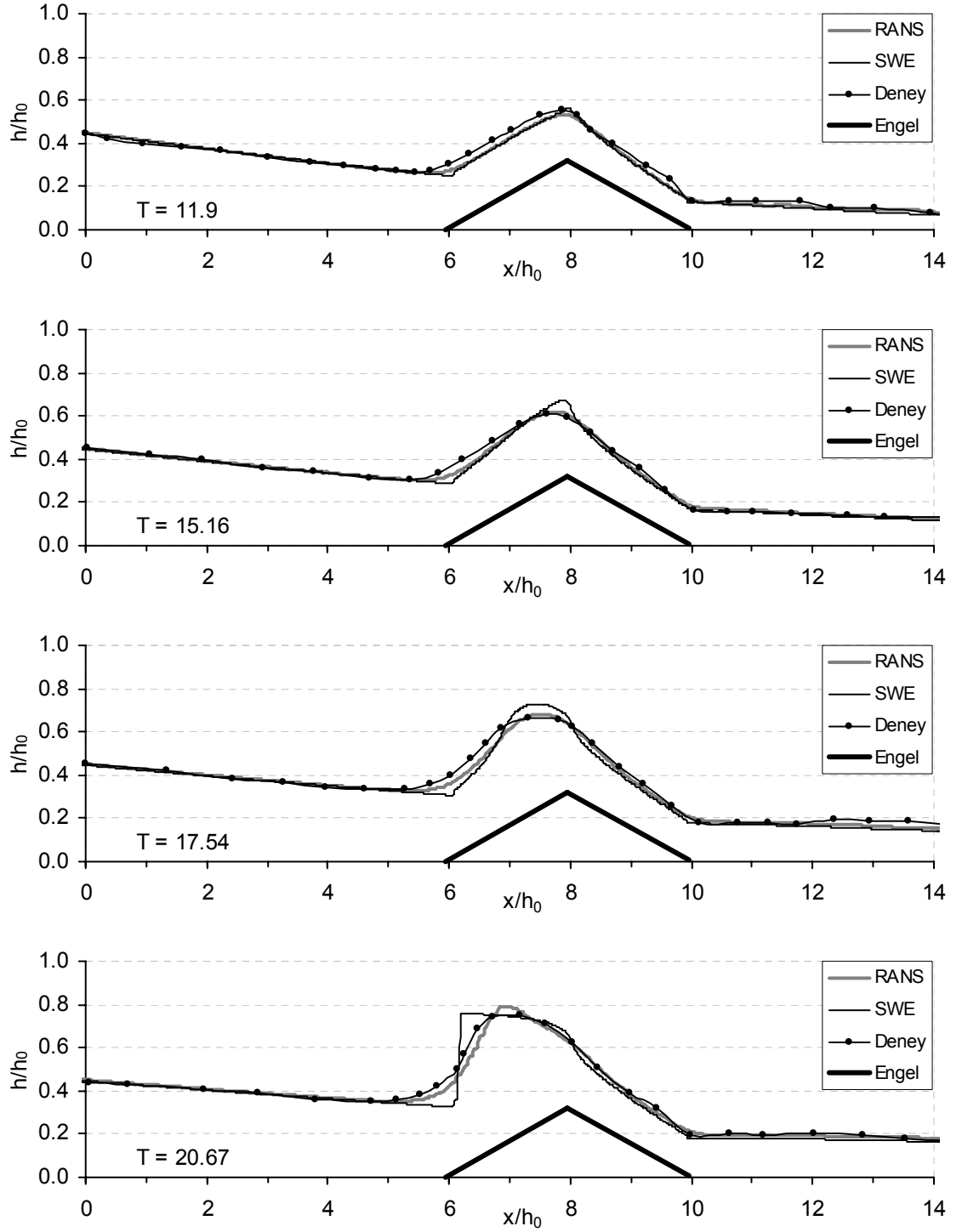
5.5.1.1. Üçgen Eşik Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması

Baraj mansabında üçgen eşik bulunması durumu için elde edilen deney sonuçları sığ su denklemleri (SWE-Shallow Water Equations) ve Reynold Ortalamalı Navier-Stokes (RANS-Reynolds Avaraged Navier-Stokes) denklemlerine dayanan sayısal model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal modeller oluşturulurken Şekil 5.32’de verilen deney kanalı boyutları dikkate alınmıştır. Şekilde gösterilmeyen barajın mansabında kalan kanal uzunluğu 4.25 m’dir. Baraj aksından 1.50 m uzağa yerleştirilen engel geometrisi FLOW-3D yazılımı içerisinde oluşturulmuştur. Engel yüzeyinde ve kanal duvarlarında pürüzlülük ihmal edilmiştir. Başlangıç şartı olarak rezervuarda 4.65 m uzunluğunda ve 0.25 m yüksekliğinde bir akışkan hacmi tanımlanmıştır. Baraj mansabının başlangıçta kuru olduğu kabul edilmiştir. RANS ve SWE modellerinde problemin sınır şartları olarak kanalın memba ucu (x_{min}) ve tabanı (z_{min}) duvar (wall), çözüm bölgesinin üst sınırı (z_{maks}) simetri, akım kanaldan serbestçe uzaklaştırıldığından kanalın mansap ucu (x_{maks}) çıkan akım (outflow) seçilmiştir. Serbest yüzeyin tanımlanmasında VOF yaklaşımı kullanıldığından serbest yüzeyde sabit atmosfer basıncı ve sıfır kayma gerilmesi etkili olmaktadır. RANS denklemlerinin çözümünde türbülans modeli olarak k- ϵ seçilmiştir. RANS modeli için 8.90x0.30 m’lik bir hesaplama bölgesi kullanılmış ve ağ aralıkları x ve z doğrultularında 0.005 m olarak alınmıştır. SWE modeli için 8.90x0.50 m boyutlarında bir hesaplama bölgesi kullanılmıştır. Ağ aralıkları x

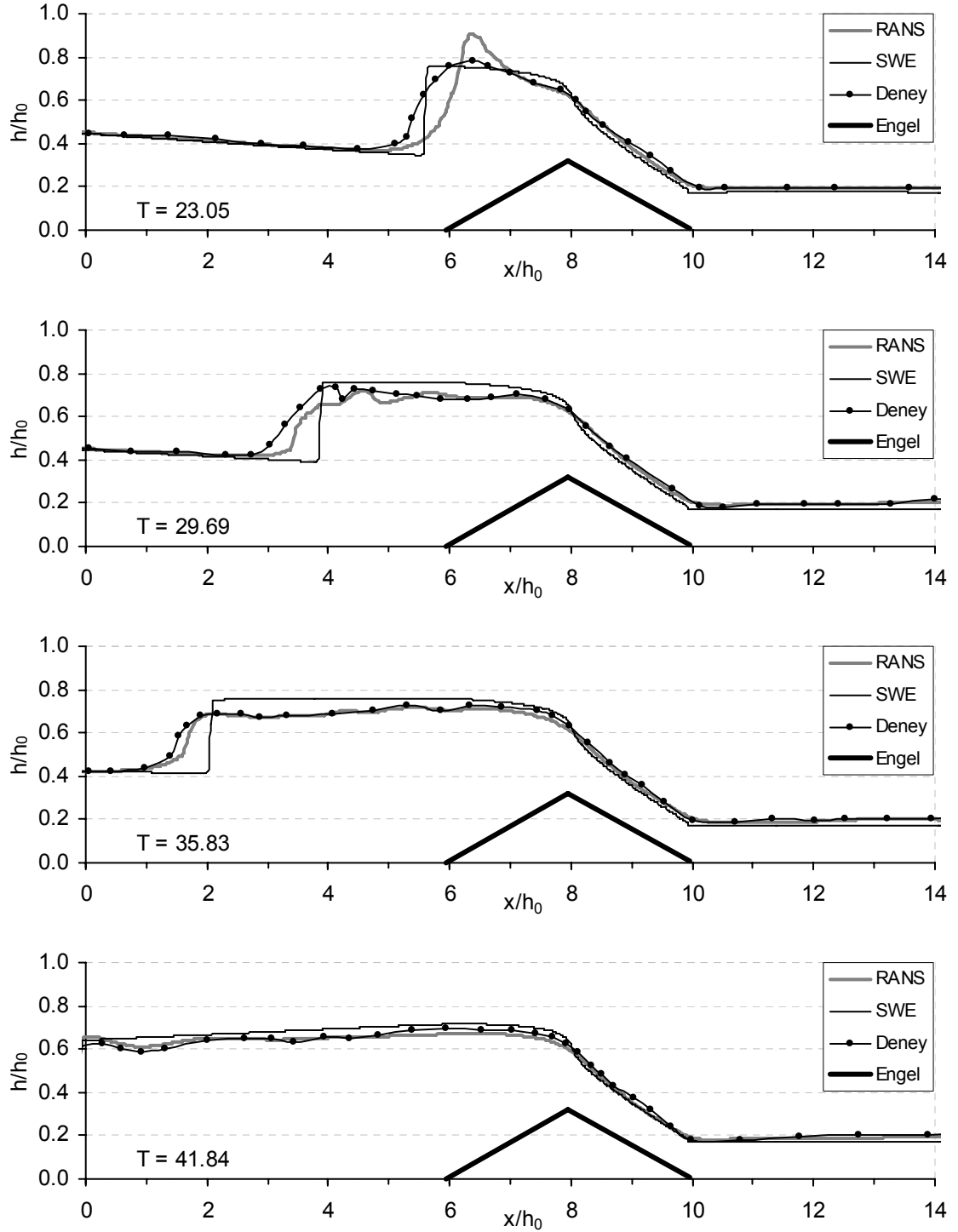
doğrultusunda 0.005 alınırken z eksenini $z=0.30$ m yüksekliğinde bir ayırım çizgisi ile iki hücreye ayrılmıştır.

RANS modelinde 88308 hücreden oluşan hesaplama alanının 20 s'lik çözümü yaklaşık 35 dakika sürmüştür. SWE modelinde ise 10704 hücreden oluşan hesaplama alanının 20 s'lik çözümü yaklaşık 1.4 dakika sürmüştür. Hesaplama bölgesindeki hücre sayısına bağlı olarak SWE modelinin çözümünde bilinmeyen sayısının RANS denklemlerine göre daha az olmasından dolayı çözüm süresi de çok daha kısa olmaktadır.

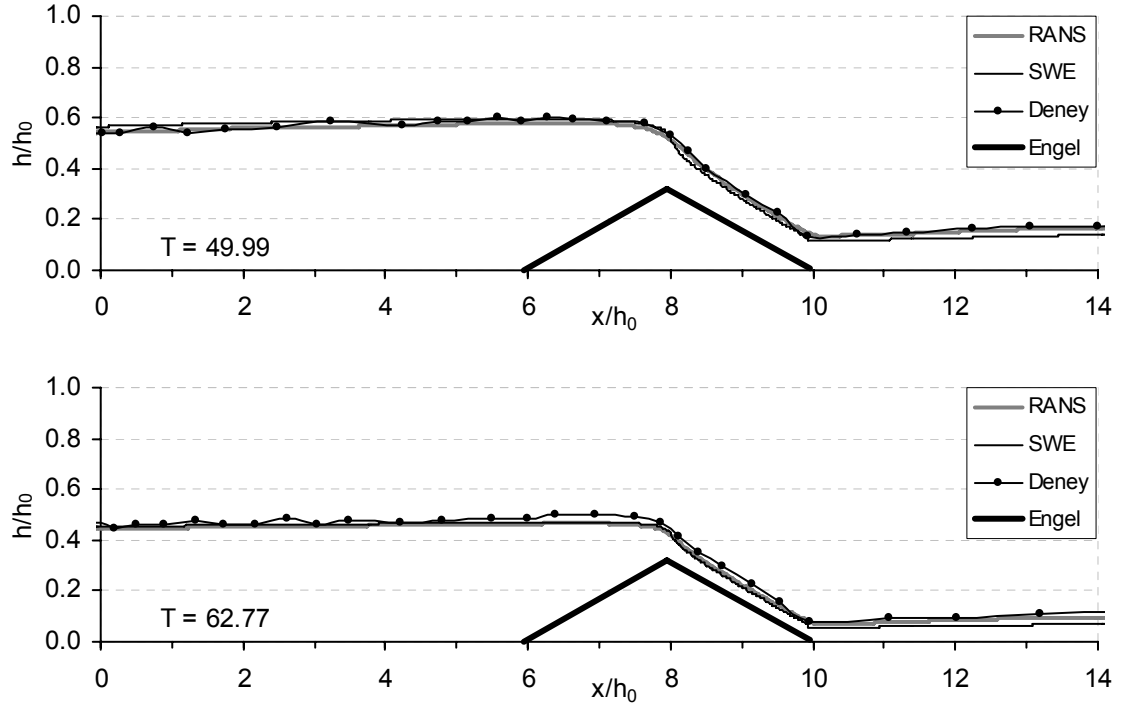
Şekil 5.36'da yayılan taşkın dalgasının üçgen eşik üzerinden aşması sırasında farklı zamanlardaki su yüzü profillerinin RANS ve SWE yöntemlerine dayanan sayısal çözümlerle karşılaştırması görülmektedir. Başlangıçta su yüzü profilleri her üç durumda benzerlik göstermektedir. Taşkın dalgasının eşik üzerinden aşmasıyla birlikte sayısal sonuçlarda da eşik memba yüzeyi üzerinde su seviyesi yükselmekte ve daha sonra memba yönünde yayılan bir kabarma dalgası oluşmaktadır. Bununla birlikte başlangıçta ($T=11.9$) su yüzü profilleri her iki sayısal yöntemde oldukça yakın olmaktadır. Zaman ilerledikçe ($T=15.16-17.54$) su seviyesi yükselirken memba yüzeyi üzerindeki su yüzü profili SWE sonuçlarında daha dik olmaktadır. Daha sonra $T=20.67$ anında SWE çözümünde dalga kırılmasının bir sonucu olarak profilin yansıyan dalga önü kısmında bir süreksizlik ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada birbiri ile uyumlu görünen deney sonuçlarında ve RANS çözümünde eşik memba yüzeyindeki su seviyesi yükselmeye devam etmektedir. Dolayısıyla SWE çözümünde kırılmanın daha erken meydana geldiği söylenebilir. Sonrasında SWE'de ($T=20.67-35.83$) yansıyan dalga önündeki bu süreksizlik memba yönünde hareket etmektedir. Dikkat edilirse $T=29.69-35.83$ zamanlarında eşik arkasındaki su yüzeyi SWE çözümünde sabit kalmaktadır. İlerleyen aşamalarda ($T>41.84$) su yüzeyi eşik üzerinde maksimum olacak şekilde memba yönünde azalan bir eğime sahip olmaktadır. $T=23.05$ anında RANS çözümünde eşik arkasındaki su yüzeyinin dikleştiği ve yansıyan dalga önünün deneysel sonuçlara göre biraz geride kaldığı görülmektedir. $T=29.63$ anında bu durumun ortadan kalktığı görülmektedir. Bunun nedeni deneylerde su yüzeyinde hidrolik sıçramanın aşamalı olarak ortaya çıkması ve memba yönünde taşma (spilling) şeklinde dalga kırılması oluşmasına karşın RANS



Şekil 5.36a. Mansapta üçgen eşik olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.36b. Mansapta üçgen eşik olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.36c. Mansapta üçgen eşik olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması

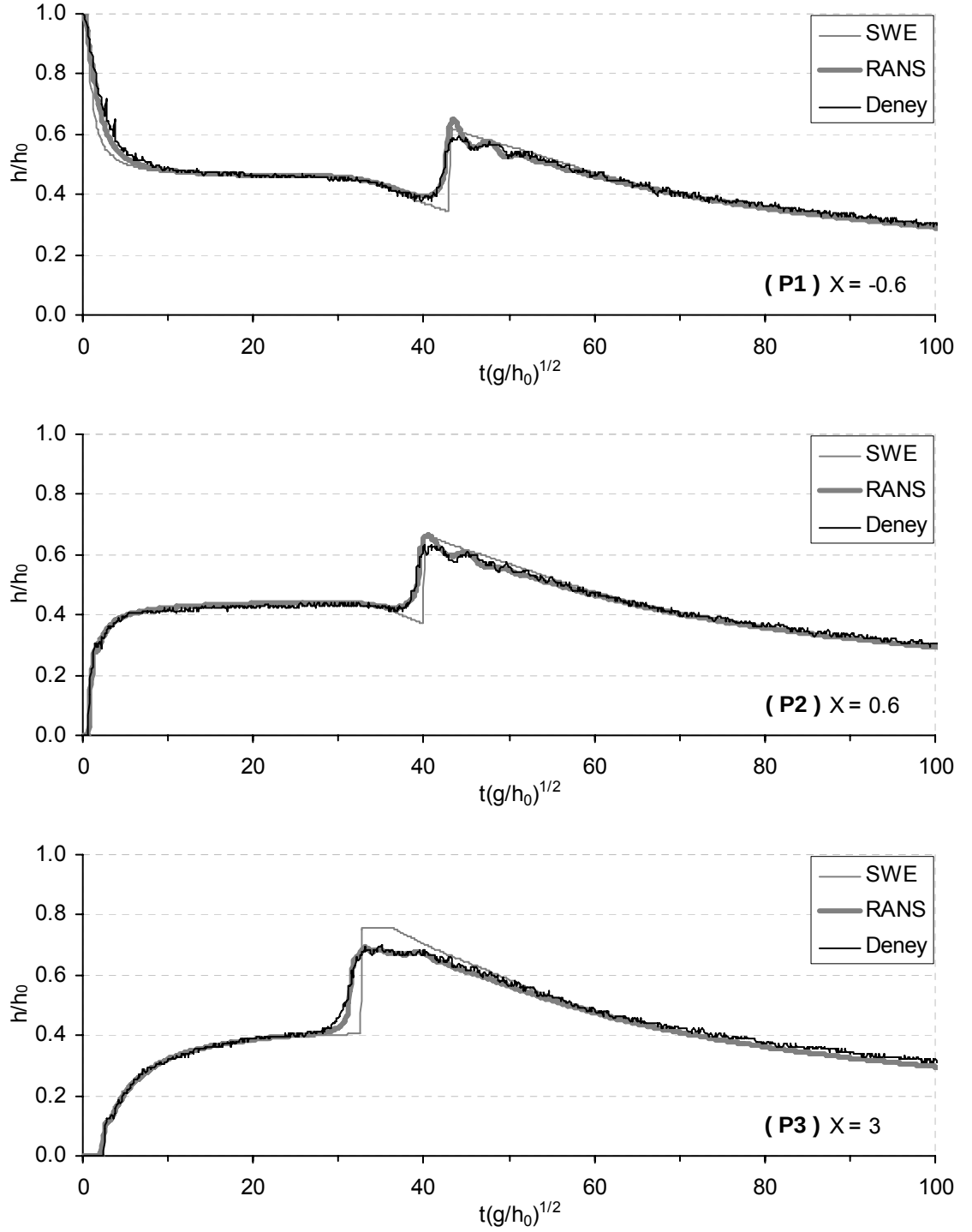
çözümünde taşkın dalgasının eşikten yansımasıyla sıçrama tipi (plunging) dalga kırılması meydana gelmesidir. Yansıyan dalga kırıldıktan sonra ($T > 29.69$) RANS çözümü deney sonuçları ile oldukça uyumlu görülmektedir. Deney ve RANS çözümünde $T = 29.69$ anında kabarma dalgasına ait su yüzeyi profiline bakılırsa bu aşamada kabarma dalgası önü civarındaki su yüksekliğinin eşik üzerindeki su yüksekliğine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Sonraki aşamalarda ($T > 35.83$) su yüzeyi eşik üzerinde maksimum olacak şekilde memba yönünde azalmaktadır.

$T = 29.69 - 35.83$ anlarında görüldüğü gibi yansıyan dalga önü SWE denklemlerinde biraz daha geride kalmaktadır dolayısıyla memba yönünde daha yavaş ilerlemektedir. Eşik üzerinde yansıyan dalga kırıldığında kabarma dalgası önü SWE sonuçlarında biraz geride kalmaktadır ($T = 29.69 - 35.83$). Yine bu sürelerde eşik membasında oluşan maksimum su derinlikleri SWE denklemlerinde en fazla olmaktadır. Deney ve RANS sonuçlarının ise oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. Eşiğin mansap yüzeyi üzerindeki ($8 < x/h_0 < 10$) sonuçlar uyumlu olmakla birlikte genel olarak deney sonuçlarında yüzey profili RANS ve SWE

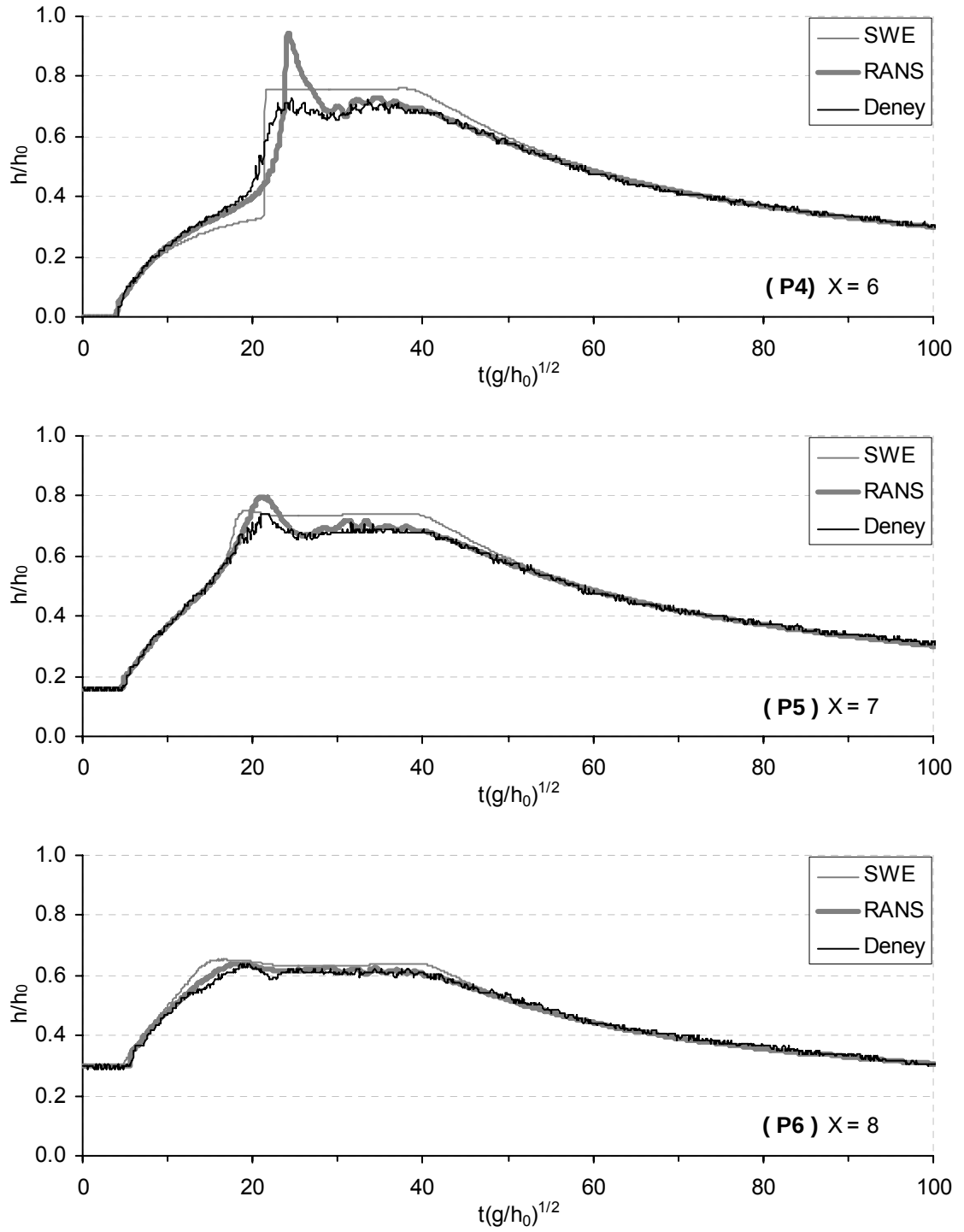
sonuçlarına göre biraz daha yüksek çıkmaktadır. Eşik mansabında da ($10 < x/h_0 < 14$) benzer durum söz konusudur. Eşiğin membasında kalan ve yansıyan dalga önünün henüz ulaşmadığı kısımlarda ise ($0 < x/h_0 < \text{yansıyan dalga önü}$) her iki sayısal yöntemin sonuçları ile deney sonuçlarının oldukça uyum sağladığı söylenebilir.

Genel olarak sayısal sonuçlar karşılaştırılırsa, RANS denklemlerinin başlangıçta eşiğin arkasında dalga kırılması oluşumu dışında maksimum su yüksekliklerinin ve yansıyan kabarma dalgası önü hızının belirlenmesinde oldukça iyi sonuç verdiği söylenebilir. SWE çözümünde eşik arkasında okunan maksimum su yükseklikleri daha fazla olmaktadır. Buna karşın yansıyan kabarma dalgası önü hızı daha yavaş olmaktadır. SWE ile elde edilen maksimum dalga önü yüksekliklerinin fazla olması, çözümde emniyetli yönde kalınmasını sağlamaktadır.

Şekil 5.37’de mansapta üçgen eşik bulunması durumu için kanal boyunca farklı noktalarda video görüntülerinden elde edilen zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin sayısal çözümlerle karşılaştırması görülmektedir. Grafiklerde su yükseklikleri h_0 başlangıç rezervuar derinliğine bölünerek, zaman eksenine ise $(g/h_0)^{1/2}$ ile çarpılarak boyutsuzlaştırılmıştır. Baraj aksından olan mesafeler ise $X=x/h_0$ boyutsuz büyüklüğü ile ifade edilmiştir. Deney sonuçlarında 0.02 s aralıklarla 16 s ($T=100$) süresince kaydedilmiş görüntülerden yararlanılmıştır. Dolayısıyla deneysel veriler $16/0.02=800$ görüntü kullanılarak her bir görüntü üzerinde seçilen bir noktada su yüksekliğine ait koordinatın otomatik olarak belirlenmesiyle bulunmuştur. Burada P1 ($X=-0.6$) ve P2 ($X=0.6$) sırasıyla baraj kesitinin hemen memba ve mansabında seçilen noktaları göstermektedir. Dikkat edilirse kapağın ani olarak kalkmasıyla birlikte P1 noktasında su seviyesinde hızlı bir düşüş ve P2 noktasında hızlı bir yükselme görülmektedir. P3 ($X=3$) noktasında ise taşkın dalgasının ulaşmasıyla birlikte su seviyesindeki artış daha yavaş olmaktadır. Yaklaşık olarak $T=40$ anında eşik üzerinden yansıyan dalganın P1 ve P2 noktalarına ulaşmasına kadar bu noktalarda su seviyelerindeki değişim çok az olmaktadır. Yansıyan negatif dalganın P1 ve P2 noktalarından geçişi ile birlikte su seviyesinde düşüş başlamıştır. Baraj aksındaki noktalardan farklı olarak, yansıyan dalganın P3 noktasına ulaştığı yaklaşık $T=20$ anından sonra su seviyesi bir süre sabit kalmakta daha sonra düşüşe geçmektedir.



Şekil 5.37a. Üçgen eşik durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



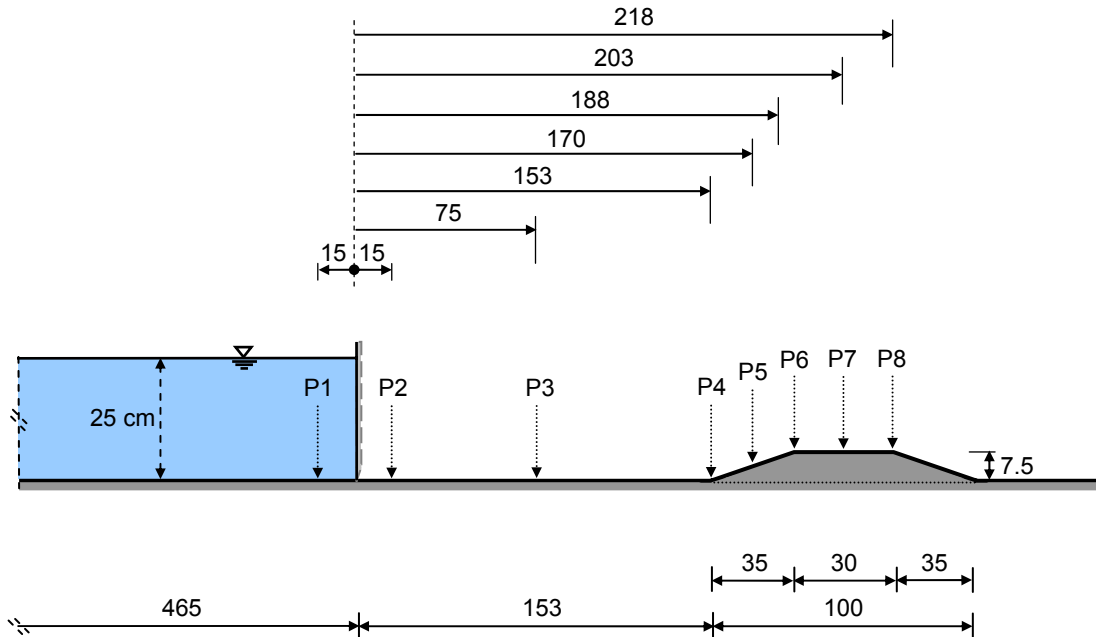
Şekil 5.37b. Üçgen eşik durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması

Aynı durum P4 (X=6), P5 (X=7) ve P6 (X=8) noktalarında da görülmektedir. Bu durum rezervuarın belirli bir uzunluğa sahip olması ve mansaptaki üçgen eşiğin varlığından kaynaklanmaktadır. Gelen akım debisi başlangıçta arttığından eşik üzerinden tamamı aşamamaktadır. Dolayısıyla eşik arkasındaki su seviyesi kabarmakta ve memba yönünde hareket eden bir kabarma dalgası oluşmaktadır. Kabarma dalgası arkasında hidrolik sıçramayla akım nehir rejimine geçtiğinden ve akım eşik üzerinden serbestçe mansaba aktığından su yüzeyi yaklaşık yatay olmaktadır. Bu aşamada gelen akım debisi artarken eşikten aşan akım debisi de artmaktadır. Gelen akım ve savaktan aşan (çıkan) akım bir süre dengede kaldığından su seviyesi eşike yakın kesitlerde sabit kalmaktadır. Kabarma dalgası memba yönünde hareket ettiğinden eşik civarındaki kesitlerde bu denge daha uzun süre hissedilmekte dolayısıyla bu kesitlerde su seviyesi daha uzun süre sabit kalmaktadır. Memba yönünde ilerledikçe su yüksekliğinin sabit kalma süresi azalmaktadır. Yansıyan dalga baraj aksındaki noktalara ulaşana kadar rezervuarın belirli bir uzunluğa sahip olmasından dolayı gelen akım debisi düşüşe geçmektedir. Gelen akım ile çıkan akım arasındaki denge, çıkan akım lehine bozulduğundan kesitlerdeki su seviyesi hızla azalmaktadır. Eğrilere dikkat edilirse tüm grafiklerde yaklaşık T=40 anında su seviyesinin azalmaya başladığı görülmektedir. Bu aşamadan sonra yansıyan dalga memba yönünde ilerlerken derinliği de azalmaktadır. Yansıyan kabarma dalgası baraj aksındaki noktalara ulaştığında su yüksekliği azalmakta olduğundan P1 ve P2 noktasından geçişi ile birlikte akım derinliği bir süre sabit kalmaksızın inişe geçmektedir. Diğer yandan baraja yakın noktalarda (P2) kapağın kaldırılmasıyla birlikte ilk dalganın geçişi ile yansıyan dalganın tekrar bu noktaya dönüşü arasındaki süre daha uzun olmaktadır. Dikkat edilirse P2 noktasında bu süre yaklaşık T=40 iken P3 noktasında yaklaşık T=20 olmaktadır. P5 noktasında ise eşik arkasındaki hızlı yükselme bu nokta civarında olduğu için iki dalga arasında zaman farkı olmamakta ve su seviyesindeki artış lineer bir biçimde durmaksızın maksimum su seviyesine kadar yükselmektedir. Ayrıca kesitlerde meydana gelen maksimum derinliklere bakılırsa eşike yakın kesitlerde daha yüksek baraj aksına doğru gidildikçe daha düşük maksimum su seviyelerinin olduğu görülmektedir.

Şekil 5.37'ye sayısal çözüm açısından bakıldığında baraj aksı civarındaki P1 ve P2 noktalarında RANS ve SWE ile elde edilen çözümlerin deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte P1 noktasında haznedeki su yüksekliğinin azalması sırasında SWE çözümünde su yüksekliği daha az olmaktadır. Bunun nedeni SWE çözümünde su yüzü profilinin çukur, deney ve RANS çözümünde ise tümsek bir görünüme sahip olmasından dolayıdır. Ayrıca kabarma dalgası önünde elde edilen maksimum yükseklikler her iki sayısal çözümde de deney sonuçlarının üzerinde çıkmaktadır. Bunun dışında yansıyan dalganın yayılma hızı her iki çözümde uyumlu olmakla birlikte SWE çözümünde bir miktar daha yavaş olmaktadır. P3 (X=3) noktasında RANS çözümü ile deney sonuçlarından elde edilen su yükseklikleri üst üste çakışmaktadır. Bunun yanında yansıyan kabarma dalgasının bu noktadan geçişi ile birlikte elde edilen maksimum su yüksekliği SWE çözümünde daha fazla olmaktadır ve yansıyan dalga daha yavaş bir hızda memba yönünde hareket etmektedir. SWE çözümünün alçalma eğrisinin ise oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Eşiğin başladığı P4 noktasında RANS çözümünde yansıyan kabarma dalgasının geçişi sırasında çok hızlı ve dik bir yükselme görülmektedir. Bunun nedeni SWE çözümünde tam bir dalga kırılması olayının meydana gelmesi ve kırılma öncesi kırılan dalga önünün dik bir şekil almasıdır. Bu durum çözüm sırasında ağ aralıklarının küçük seçilmesiyle bir miktar azaltılabilmektedir. Dalganın kırılma anı dışında su yükseklikleri RANS denklemleri ile oldukça iyi bir şekilde belirlenebilmektedir. P6 noktasındaki SWE çözümünde ise ilk dalganın geçişi ile birlikte su seviyesi daha az yükselmekte yansıyan dalganın oluşumu ile birlikte su seviyesinde ani bir yükselme gözlenmektedir. Yansıyan kabarma dalgası bu noktadan geçtikten sonraki akım derinliği SWE çözümünde deney sonuçlarına göre daha yüksek çıkmaktadır. Alçalma eğrisinde ise sonuçlar arasında iyi bir uyum görülmektedir. Eşik üzerindeki P5 ve P6 noktalarında da yükselme ve alçalma eğrileri için her iki sayısal çözüm uyumlu olmakla birlikte bu noktalardaki kabarma dalgası derinliği SWE çözümünde daha yüksek çıkmaktadır. RANS denklemleri kullanılarak elde edilen su yükseklikleri ise eğrinin genelinde oldukça uyumlu olmaktadır. Sonuç olarak mansapta bir eşiğin bulunması durumunda kanalda oluşan maksimum su yüksekliğinin önemli ölçüde arttığı söylenebilir.

5.5.2. Baraj Mansabında Trapez Eşik Bulunması

Yapılan çalışmada farklı taban geometrilerinin etkisini araştırmak amacıyla mansapta üçgen eşik bulunması durumu ile birlikte trapez geometriye sahip bir engel için benzer incelemeler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.38’de deney kanalının kesiti ve ölçüm alınan noktaların yerleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi baraj aksından 150 cm uzaklıkta taban genişliği 100 cm, üst genişliği 30 cm ve yüksekliği 7.5 cm olan trapez bir eşik yerleştirilmiştir. Mansapta üçgen eşik bulunması durumu ile karşılaştırma yapabilmek için trapez eşiğin taban genişliği, eşik yüksekliği ve baraj aksından olan uzaklığı üçgen eşik ile aynı seçilmiştir. Benzer şekilde trapez eşik 0.4 cm kalınlığında alüminyum malzemenin bükülmesi ile imal edilmiş ve üzerinden su aştığında eğilmemesi için alttan güçlendirilmiştir. Kanalın mansap ucu açık bırakılarak akımın serbestçe uzaklaşması sağlanmıştır.

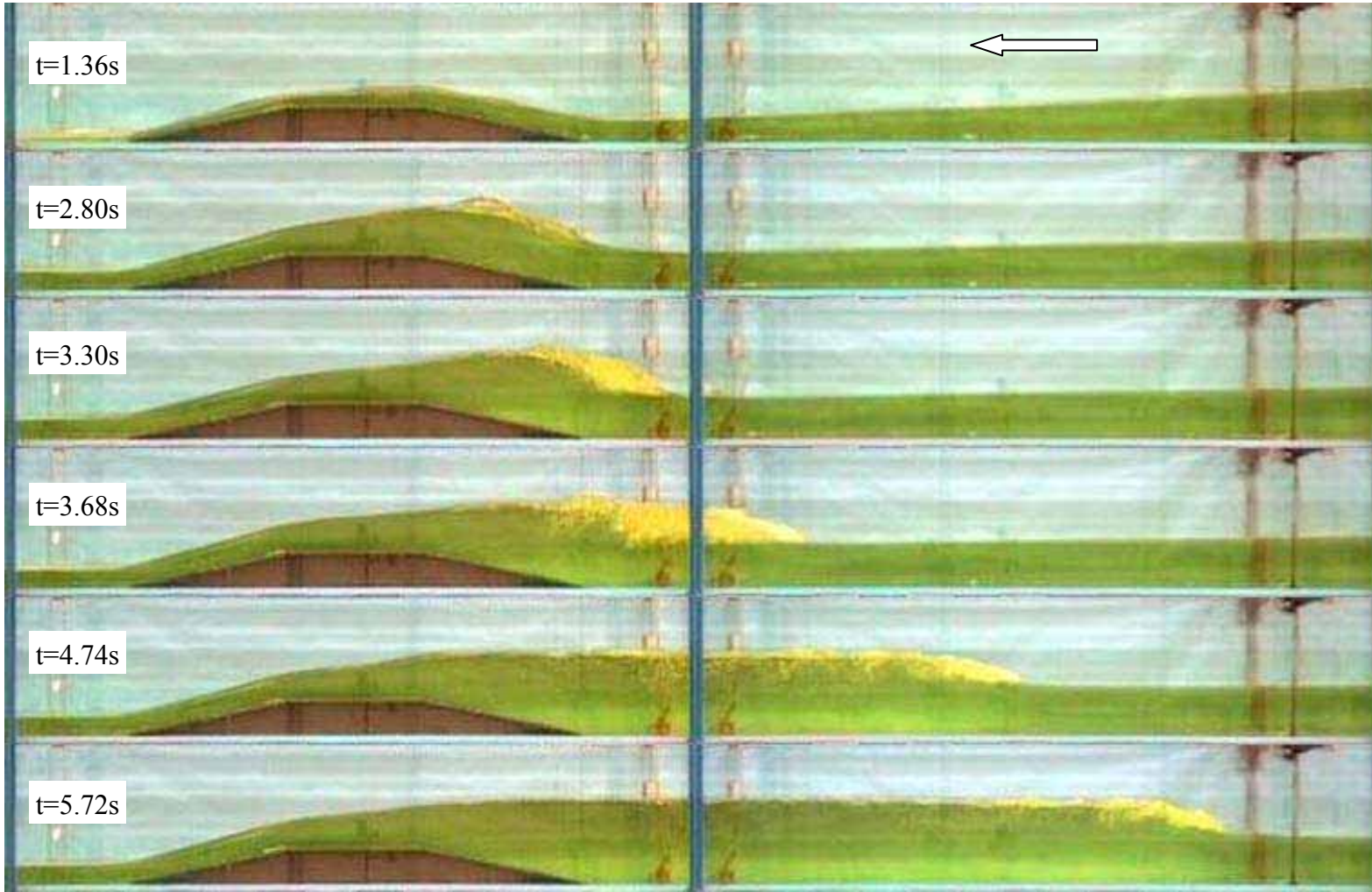


Şekil 5.38. Baraj mansabında trapez eşik bulunması durumu için kanal kesiti

Rezervuardaki su derinliği 25 cm olarak alınmış ve baraj yıkılması akımı memba ucundan 465 cm uzaklığa yerleştirilen bir kapağın ani olarak kaldırılması ile oluşturulmuştur. Biri membada (P1) diğerleri mansapta (P2-P8) olmak üzere toplam 8 noktada zamana bağlı su seviyesi değişimleri video görüntüleri yardımıyla

belirlenmiştir. Mansaptaki ölçüm noktalarından 5 tanesi (P4-P8) trapez eşik üzerinde kritik olduğu düşünülen noktalarda seçilmiştir.

Şekil 5.39’da mansapta trapez eşik bulunması durumu için iki kamera görüntüsünün birleştirilmesi ile elde edilen farklı zamanlardaki taşkın dalgasının yayılmasına ait deney görüntüleri verilmiştir. Üçgen eşik durumunda olduğu gibi kapağın kalkmasıyla birlikte mansap yönünde ilerleyen taşkın dalgası trapez eşik ile karşılaştığında akımın bir kısmı eşiği aşarken bir kısmı da eşiğin memba yüzeyi üzerinde yükselerek taşkın gelidiği yöne doğru yansımaktadır. Sonrasında yansıyan bu kabarma dalgası memba yönünde ilerlemektedir. Taşkın dalgası eşiği aşarken yukarı eğimde akım yavaşlamakta, yatay kısımda sabit kalmakta, aşağı eğimde ise hızlanmaktadır. Bununla birlikte mansap doğrultusunda yayılan baraj yıkılması taşkın dalgası sel rejimindedir ve debi değeri gittikçe artmaktadır. Artan bu debi değerinin eşik üzerinden akıtılabilmesi için özgül enerjisinin eşik üzerindeki minimum enerjiden büyük olması gerekmektedir. Ancak akım değişken olduğundan debi değerinin artmasıyla eşik üzerindeki aşılması gereken minimum enerji yüksekliği de artmaktadır. Akım hızlı değiştiği için gelen sel rejimindeki akımın eşiği aynı oranda kısa sürede aşabilmesi için su yüksekliğini arttırması gereklidir. Bu da akımın sel rejiminden nehir rejimine geçişi ile mümkün olabilmektedir. Bu geçiş ancak hidrolik sıçrama ile mümkün olabilmektedir. Şekil 5.39’a bakıldığında $T=2.80$ anında enerjisini minimum enerjiye yükseltebilmek için su seviyesinin yükseldiği ve hidrolik sıçramanın başladığı görülmektedir. Bu hidrolik sıçrama kabarma dalgası şeklinde memba yönünde ilerlemektedir. Başlangıçta ($T=3.30-3.68$) gelen akım yansıyan dalga girişimi daha şiddetli olduğundan hidrolik sıçramanın olduğu bölgede daha fazla hava girişimi meydana gelmektedir. İlerleyen zamanlarda ($T=4.74-5.72$) rezervuardaki suyun azalmaya başlamasıyla birlikte gelen akım şiddeti azalmakta ve memba yönüne doğru gidildikçe hidrolik sıçramanın büyüklüğü dolayısıyla hava girişimi azalmaktadır. Eşik üzerinde hidrolik sıçramanın oluşmasıyla birlikte kanal boyunca gelen akımın sel rejiminde, sıçrama arkasındaki akımın nehir rejiminde ve eşiği aşan akımın tekrar sel rejiminde olduğu karmaşık bir akım durumu meydana gelmektedir.



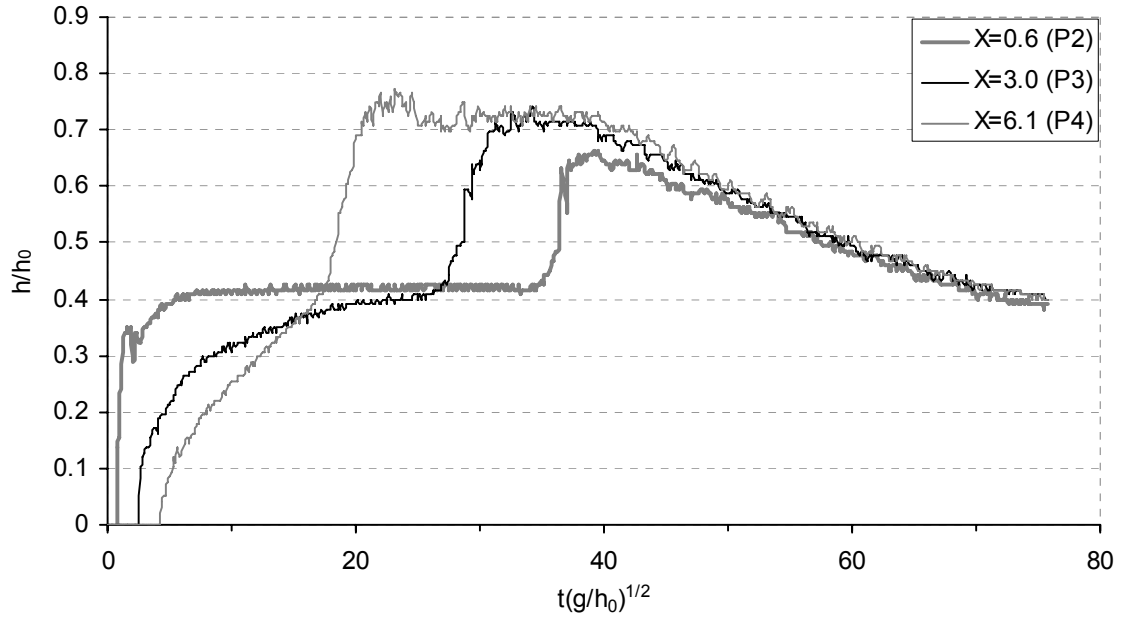
Şekil 5.39. Mansapta trapez eşik olması durumunda elde edilen deney görüntüleri

Eşik üzerinde akım tekrar nehir rejiminden sel rejimine geçtiğinden eşik üzerinde bir noktada kritik yükseklik oluşmaktadır. Akım değişken olduğundan kritik yüksekliğin olduğu yer tam olarak bilinmemekle birlikte eşğin orta noktasına yakın bir yerde olmalıdır.

Şekil 5.40'da mansapta trapez eşik olması durumunda eşik ile baraj aksı arasında kalan noktalarda video görüntülerden elde edilen su seviyesi değişimleri bir arada verilmiştir. Grafikler 0.02 s aralıklı 12 s ($T=75$) boyunca çekilmiş video görüntülerden elde edilmiştir. Dikkat edilirse maksimum su yüksekliğinin ($h/h_0=0.77$) eşğin başladığı P4 ($X=6.1$) noktasında olduğu ve baraja en yakın P2 kesitinde ise oluşan maksimum yüksekliğin ($h/h_0=0.66$) en az olduğu görülmektedir. Buradan maksimum derinliklerin eşik yakınında olduğu memba yönünde ilerledikçe oluşan maksimum derinliklerin azaldığı sonucu çıkarılabilir. Bununla birlikte eşğe yakın kesitlerde su seviyesi daha uzun süre sabit kalma eğilimindedir. P2 noktasında yansıyan dalganın geçişi ile birlikte su seviyesi sabit kalmaksızın azalmaya başlamaktadır. Tüm bu davranışların sebebi rezervuarın belirli bir uzunluğa sahip olması ile açıklanabilir. Rezervuardaki negatif dalganın memba ucuna ulaşmasıyla birlikte su seviyesinde hızlı bir azalma meydana gelmekte ve bu durum diğer kesitlerde bir süre sonra hissedilmektedir. Dikkat edilirse her üç noktada su seviyesi yaklaşık $T=40$ civarında düşüşe geçmektedir. P2 noktası ele alınırsa eşikten yansıyan kabarma dalgası bu noktaya ulaştığında kanaldaki su seviyesi düşüşe geçtiğinden P2 noktasındaki su seviyesi daha fazla yükselmeden azalmaya başlamaktadır. Dolayısıyla P2 noktasındaki maksimum su yüksekliği diğer kesitlere göre daha düşük olmaktadır. Bu bilgilerle rezervuar uzunluğunun eşik membasında oluşacak maksimum su seviyelerini etkileyeceği sonucu çıkarılabilir.

Diğer yandan P2 noktasında kapak açıldıktan sonra su seviyesi hızlı bir şekilde yükselmekte daha sonra sabit kalmaktadır. Yansıyan dalganın P2 noktasına ulaşmasıyla ($T=35$) birlikte kesitte maksimum su yüksekliği meydana gelmektedir. P3 kesitinde su seviyesindeki ilk yükselme daha yavaş olmakta fakat yansıyan dalganın gelişi ile birlikte maksimum seviyeye ulaşma ($T=27$) P2 noktasına göre daha erken olmaktadır. Eşğin başladığı P4 noktasında ise su seviyesindeki ilk yükselme P3 noktasına göre daha hızlı olmakta ve yansıyan dalganın ulaşması ile

($T=17.5$) maksimum su yüksekliğinin elde edilmesi çok daha kısa sürede meydana gelmektedir. Buradan eşığe yakın kesitlerde maksimum su yüksekliğine ulaşma zamanının daha kısa olduğu sonucuna varılabilir.

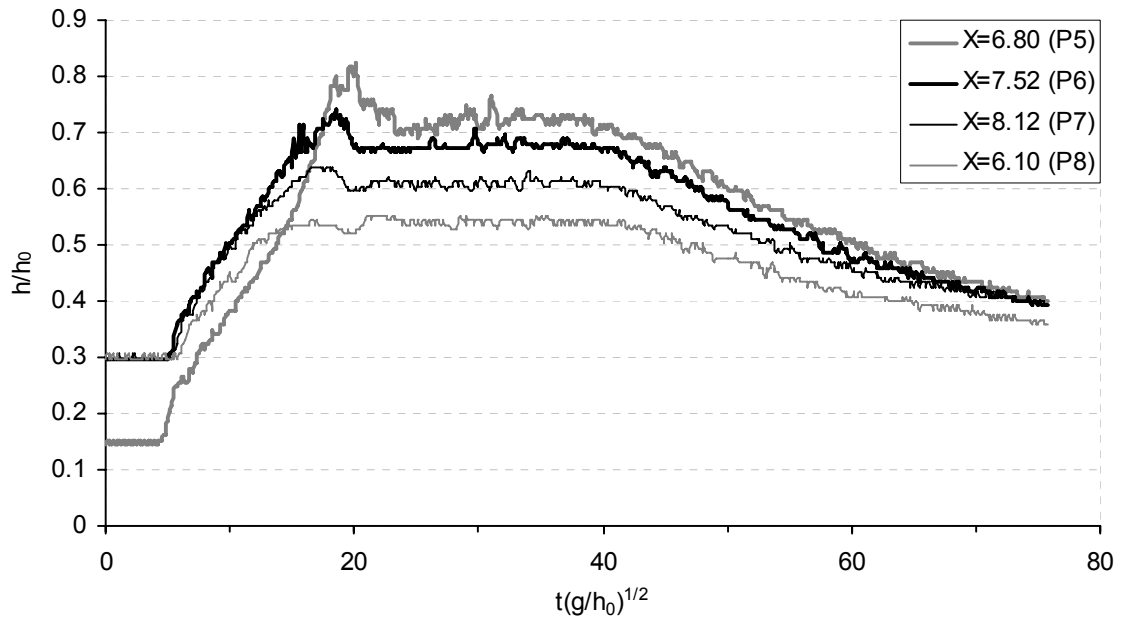


Şekil 5.40. Mansapta trapez eşik olması durumunda eşik ile baraj aksı arasında kalan noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri

Diğer bir gözlemden başlangıçtaki pozitif dalganın kesitlere ulaşma süresi (P2'den P4'e) oldukça kısa iken eşikten yansıyan dalganın (P4'den P2'ye) kesitlere ulaşma süresi daha uzundur. Bir başka ifade ile yansıyan dalga pozitif taşkın dalgasına göre daha yavaş hızla hareket etmektedir.

Şekil 5.41'de mansapta trapez eşik olması durumunda eşik ile baraj aksı arasında kalan noktalarda video görüntülerden elde edilen su seviyesi değişimleri görülmektedir. Ölçüm alınan noktalarda maksimum su seviyesi ($h/h_0=0.82$) P5 noktasında meydana gelmektedir. Bu yükseklik kanal boyunca okunan en yüksek değerdir. Dolayısıyla kanal boyunca oluşan maksimum yüksekliğin trapez eşik yükselen kısmı üzerinde bir yerde meydana geldiği söylenebilir. Trapez eşik yüksekliğinin değişmediği P6, P7 ve P8 noktalarında su seviyesi değişimini gösteren eğriler bir biri ile paralellik göstermektedir. Akım eşik üzerinde nehir rejiminden sel

rejimine geçtiğinden P6 noktasındaki maksimum su seviyeleri en fazladır. Bunu sırasıyla P7 ve P8 izlemektedir. Burada P6 noktasında akım nehir rejiminde iken P8 noktasında akım sel rejimindedir. Dolayısıyla yaklaşık P7 noktası civarında akım kritik yükseklikten geçmektedir. Bu nedenle P7 eğrisi maksimum seviyeye ulaştıktan sonra eşik üzerindeki kritik yüksekliğin zamanla değişimini ifade ettiği düşünülebilir.



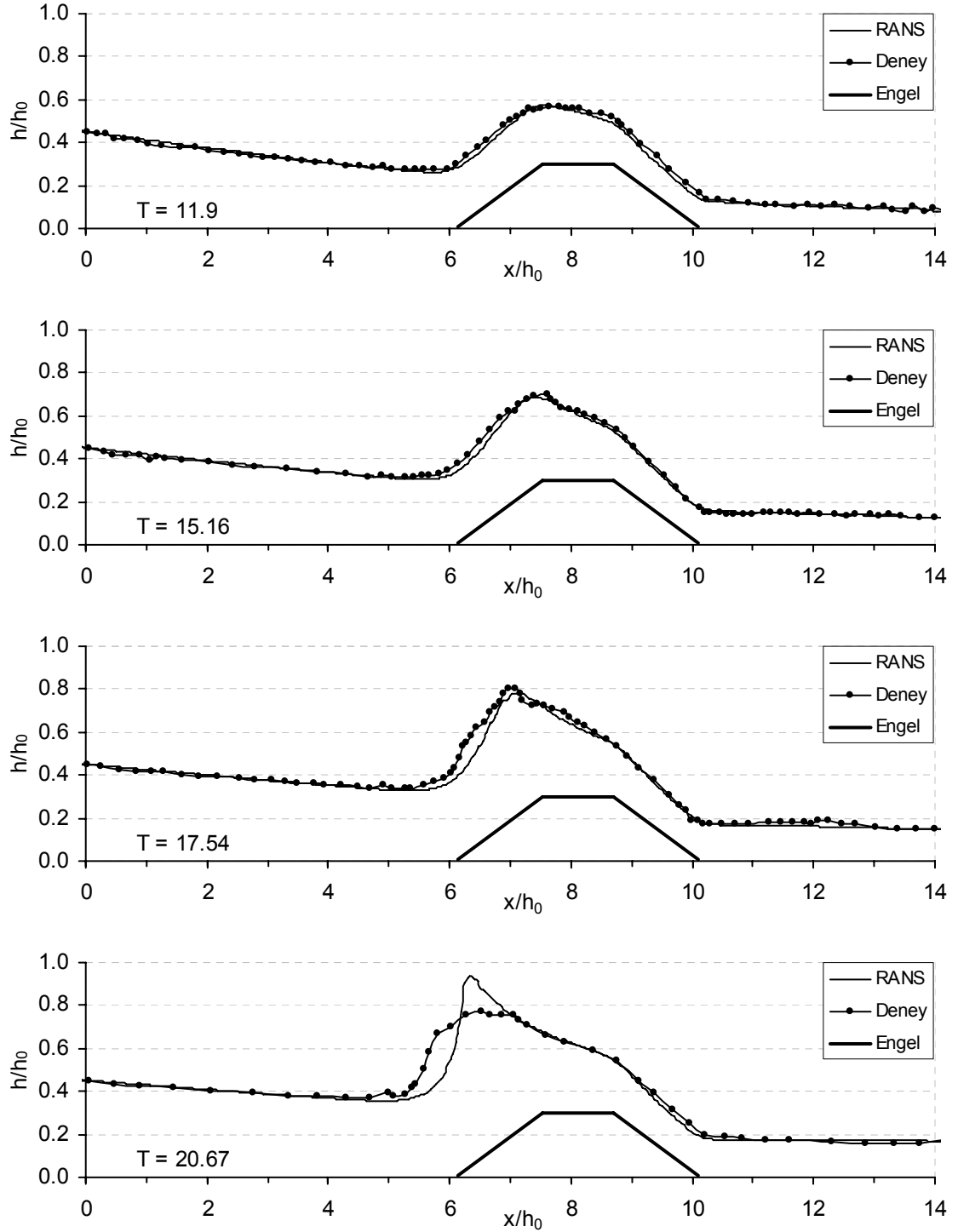
Şekil 5.41. Mansapta trapez eşik olması durumunda eşik civarındaki noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri

5.5.2.1. Trapez Eşik Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması

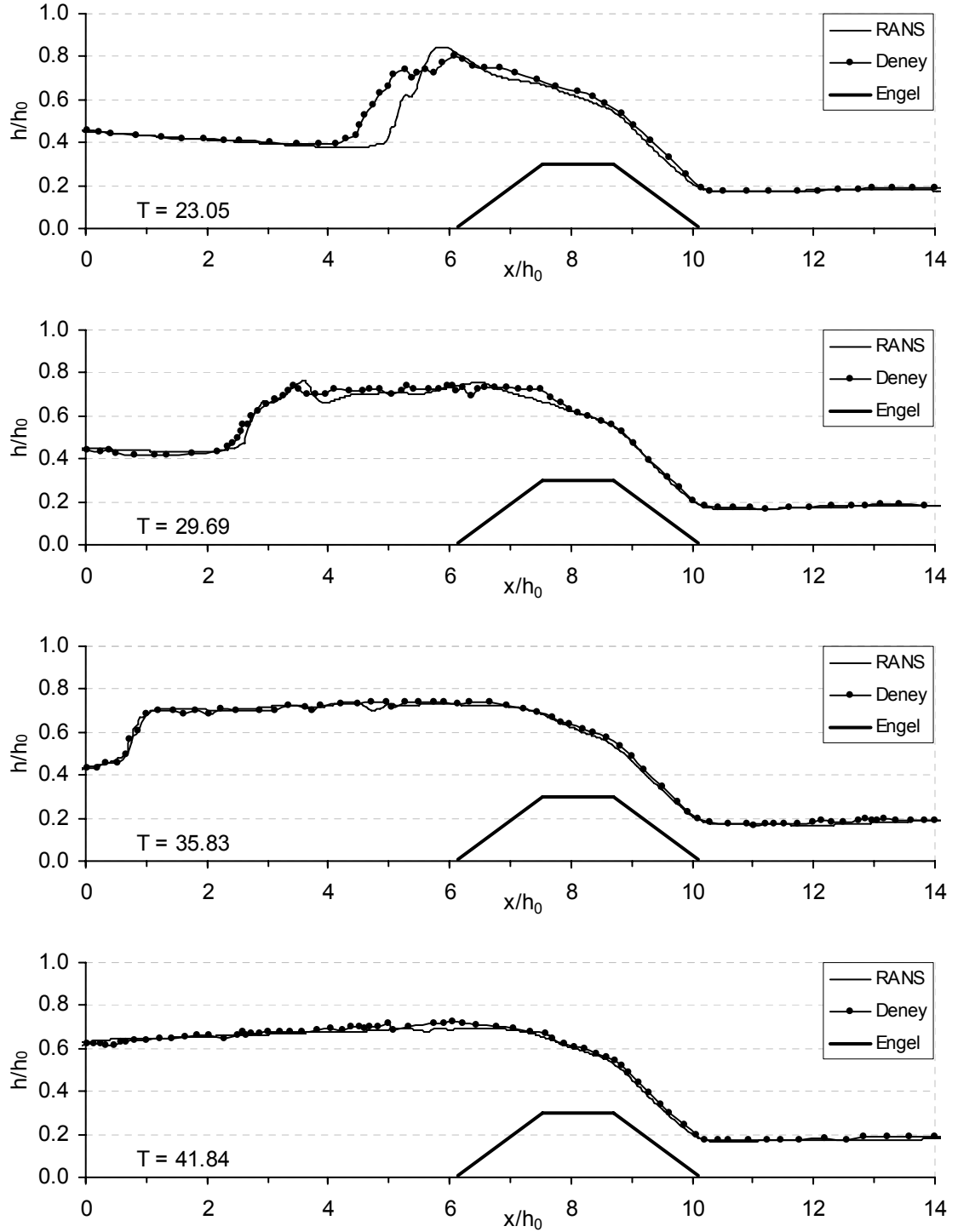
Baraj mansabında trapez eşik bulunması durumu için elde edilen deney sonuçları sadece Reynold Ortalamalı Navier-Stokes (**RANS**-Reynolds Avaraged Navier-Stokes) denklemlerine dayanan 2-boyutlu sayısal model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal model oluşturulurken Şekil 5.38'de verilen deney kanalı boyutları dikkate alınmıştır. Engel geometrisi dışında problemin sınır şartları, ağ aralıkları ve diğer tüm parametreleri Bölüm 5.5.1.1'de verilen üçgen eşik durumu ile aynı alınmıştır.

Şekil 5.42’de baraj yıkılması taşkın dalgasının mansapta bulunan bir trapez eşik üzerinden aşması durumunda farklı zamanlarda elde edilmiş deneysel ve sayısal su yüzü profilleri görülmektedir. Taşkın dalgasının eşik üzerinden aşması ile birlikte eşğin memba yüzeyi üzerinde su yüzeyinde bir kabarma gözlenmektedir. Bu aşamada ($T=11.9-17.54$) RANS çözümü deney sonuçları ile oldukça uyumlu olmaktadır. $T=20.67$ anına gelindiğinde deney profilinde kabarma dalgası (hidrolik sıçrama) oluşmuş negatif yönde hareket başlamıştır. RANS çözümünden elde edilen profilde ise eşik arkasında su yüzeyi yükselmeye devam etmekte ve oldukça dikleşmektedir. Bu aşamada eşik memba yüzeyi üzerinde su yüzü profilleri arasında belirgin bir fark gözlenmektedir. $T=23.05$ anına gelindiğinde RANS profilinde dalga kırılmasının meydana geldiği ve sayısal çözümde oluşan kabarma dalgasının deney sonuçlarının gerisinde kaldığı görülmektedir. $T>29.69$ anından itibaren RANS ve deney profilleri arasında oldukça iyi bir uyum görülmektedir. Su yükseklikleri ve negatif yönde ilerleyen kabarma dalgasının yayılma hızı RANS denklemleri ile etkili bir biçimde belirlenebilmektedir. $T=29.69$ anında kabarma dalgası arkasındaki su yüzeyi yatay iken $T=35.83$ anından itibaren su yüzeyinin eşik civarında maksimum olacak şekilde memba yönünde azalan bir eğime sahip olduğu görülmektedir. Bu durum kapak açıldıktan bir süre sonra rezervuardaki suyun azalması ve gelen akım debisinin düşüşü ile açıklanabilir.

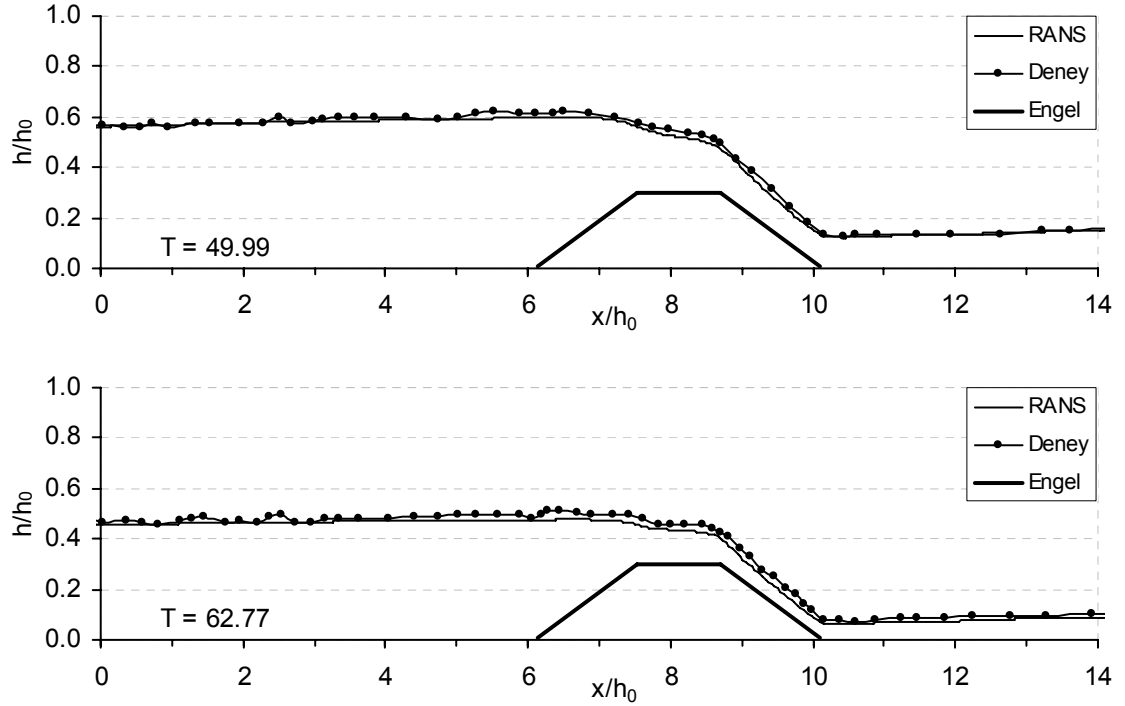
Sonuç olarak mansapta bir eşik bulunması durumunda meydana gelen su yüzü profilleri, RANS denklemlerinin sayısal çözümü ile hassas bir biçimde belirlenebilmektedir. Sadece taşkın dalgasının eşik memba yüzeyi üzerinde başlangıçtaki kabarması ve yansıması esnasında deneysel ve sayısal profiller arasında bir süre sapma meydana gelmektedir. Bunun nedeni de RANS çözümünde eşik memba yüzeyi üzerinde su seviyesinin yükselmesi ve yansıması sonucu tam dalga kırılmasının (sıçrama tipi-plunging) oluşmasıdır. Deneylerde taşkın dalgasının eşik memba yüzeyi üzerinden yansıması sonucu tam dalga kırılması oluşmamakta bunun yerine Şekil 5.39’da görüldüğü gibi kabarma dalgasının oluşumu hidrolik sıçrama şeklinde yumuşak bir (köpürerek-spilling) geçişle meydana gelmektedir.



Şekil 5.42a. Mansapta trapez eşik olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



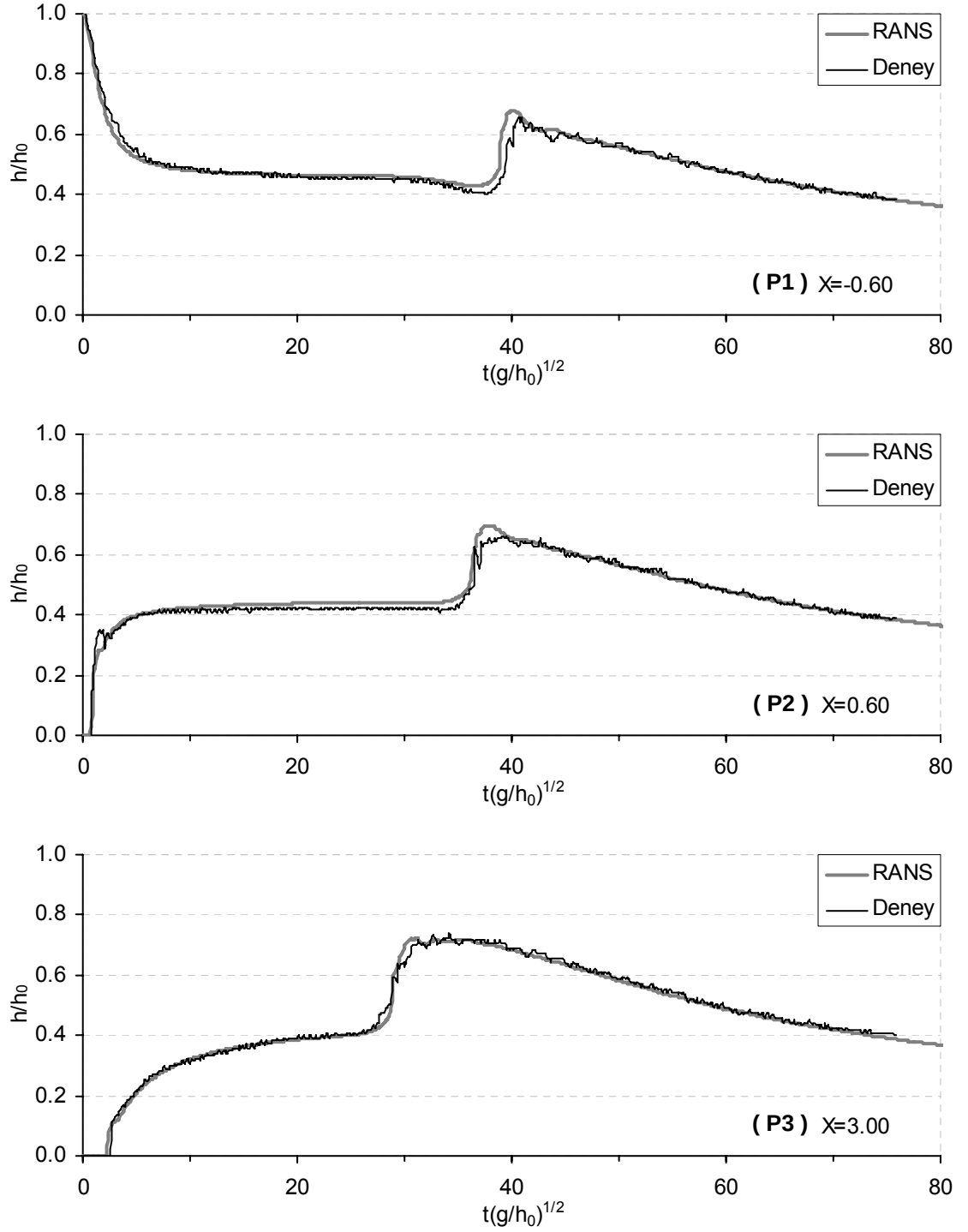
Şekil 5.42b. Mansapta trapez eşik olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



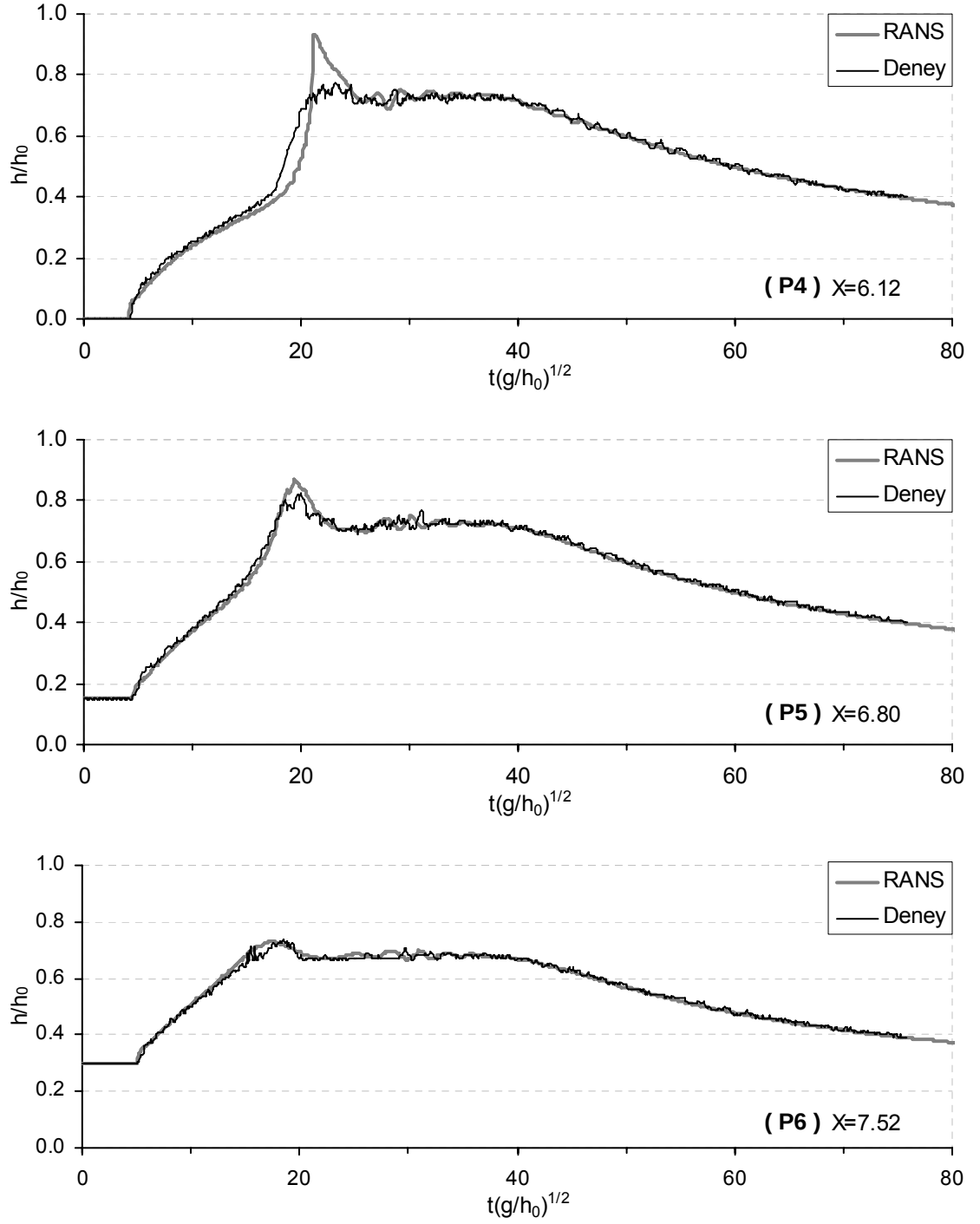
Şekil 5.42c. Mansapta trapez eşik olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması

Şekil 5.43’de mansapta trapez eşik bulunması durumu için kanal boyunca farklı noktalarda video görüntülerinden elde edilen zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin RANS denklemlerine dayanan sayısal çözümlerle karşılaştırması verilmiştir. Grafiklerde uzunluk ve yükseklikler rezervuarın başlangıçtaki derinliğine (h_0) bölünerek, zaman büyüklükleri ise $(g/h_0)^{1/2}$ ifadesi ile çarpılarak boyutsuzlaştırılmıştır. Deney verileri 0.02 s aralıklarla 12 s ($T=75$) süresince kaydedilmiş görüntüler kullanılarak elde edilmiştir. Ölçüm alınan noktaların baraj aksından olan uzaklıkları Şekil 5.38’de verilmiştir. Burada P1 ($X=-0.6$) noktası barajın hemen membasında, P2 ($X=0.6$) noktası hemen mansabında, P3 ($X=3$) noktası baraj ile eşik orta noktasında, P4 ($X=6.12$) eşiğin başladığı noktada, P4-P8 arasındaki noktalar ise eşik üzerinde seçilmiştir.

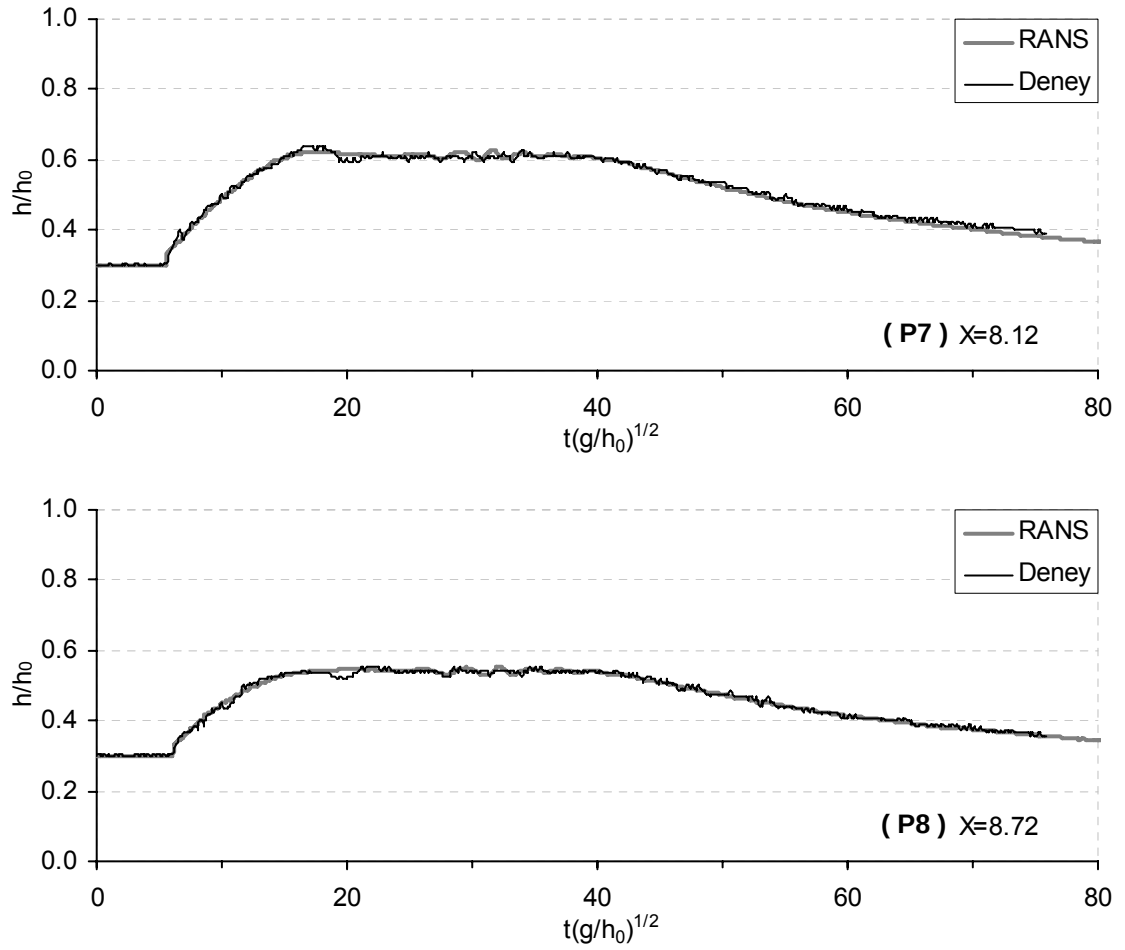
Şekil 5.43’deki grafiklere genel olarak bakılırsa P4 ($X=6.12$) noktası haricinde ölçüm alınan diğer tüm noktalardaki grafiklerde RANS denklemleri ile elde edilen su seviyesi değişimlerinin deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.43a. Trapez eşik durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 5.43b. Trapez eşik durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 5.43c. Trapez eşik durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması

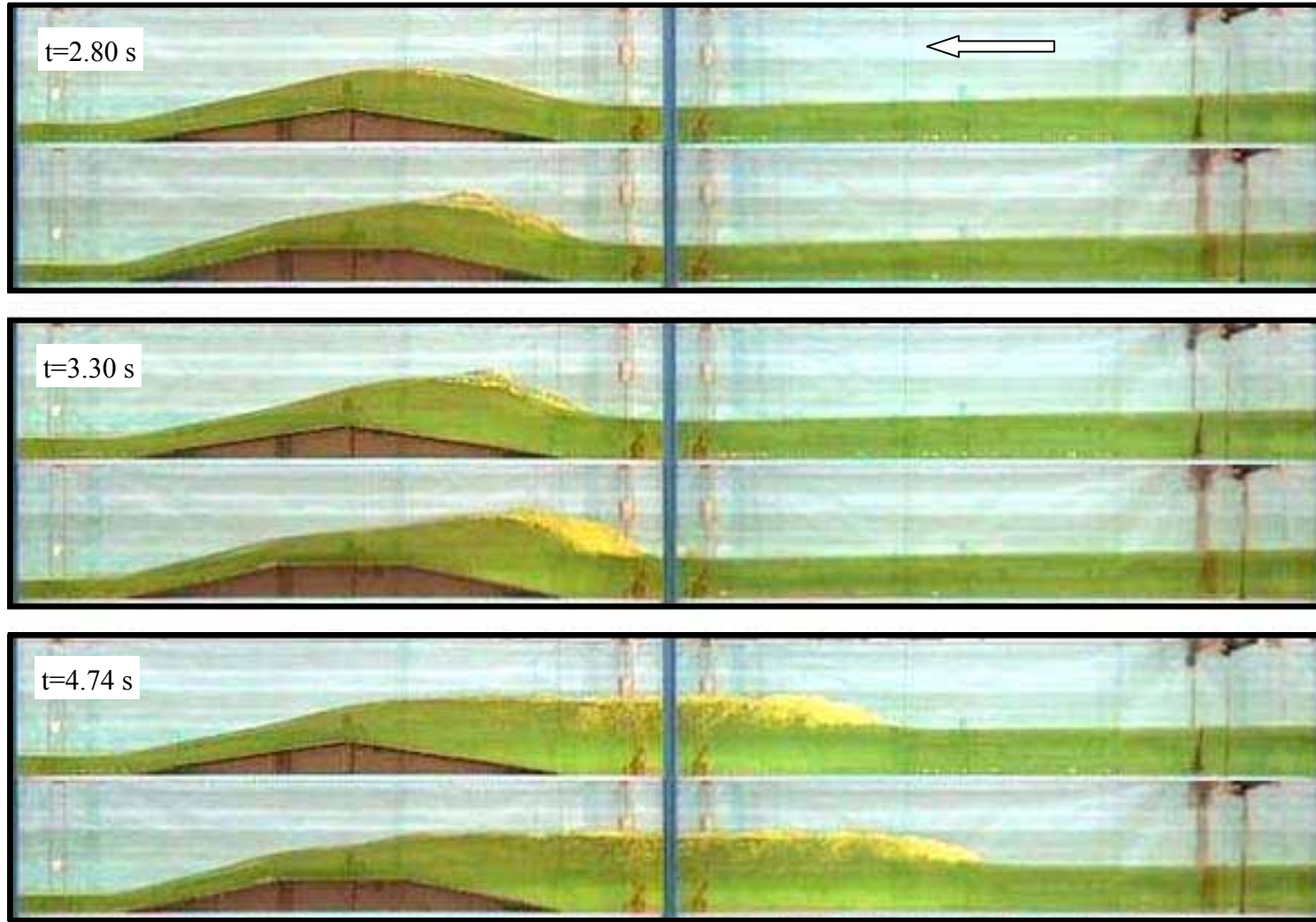
P4 noktasında sayısal çözümde yansıyan dalganın gelişi ile birlikte ($T=20$) su seviyesinin oldukça hızlı bir şekilde yükselerek deney sonuçlarının çok üzerinde bir maksimum yüksekliğe ulaştığı ve sonrasında da hızlı bir şekilde su seviyesinin azalarak sabit bir yükseklikte kaldığı görülmektedir. Deney ve sayısal sonuçlar arasındaki bu sapmanın nedeni önceki kısımda bahsedildiği gibi RANS çözümünde taşkın dalgasının eşikten yansımasıyla birlikte sıçrama tipi (plunging) dalga kırılmasının meydana gelmesidir. Şekil 5.42’de $T=20.67$ anındaki su yüzü profilinde de görüldüğü gibi dalga kırılması, P4 noktası civarında olmaktadır. Şekil 5.43’de P5 noktasındaki su seviyesi değişim eğrisine bakılırsa ilk dalganın geçişi ile birlikte su seviyesi kesintisiz bir şekilde yükselmektedir. Bu noktada RANS çözümü ile elde

edilen maksimum su yüksekliği ($h/h_0=0.86$) deney sonuçlarının ($h/h_0=0.82$) bir miktar üzerinde olmaktadır. Deneysel sonuçlarda maksimum su yüksekliği eşiğin artan eğime sahip kısmının ortasındaki P5 noktasında meydana gelmektedir. Sayısal çözümde elde edilen maksimum yükseklik ise eşiğin başladığı P4 noktasında oluşmaktadır. Dikkat edilirse su seviyesi P5 noktasında yükselerek memba yönünde hareket etmekte ve sonunda yaklaşık P4 noktası civarında sıçrama tipi dalga kırılması oluşmaktadır. Bu nedenle, deney sonuçlarında sıçrama tipi dalga kırılması gözlenmediği için sayısal çözümde de maksimum su seviyesinin P5 noktasında olduğu varsayılmalıdır. Bu sorunun sayısal çözümde ağ aralıklarının küçültülmesiyle azaltılabileceği düşünülmektedir.

5.5.3. Üçgen ve Trapez Eşik için Elde Edilen Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Akarsu yatağındaki taban geometrisi değişiminin baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılmasına etkisini incelemek amacıyla barajın mansap kısmında üçgen ve trapez olmak üzere iki farklı geometriye sahip taban eşiği kullanılmıştır. Deney kanalının kesiti ve eşiklerin boyutları sırasıyla üçgen eşik için Şekil 5.32’de trapez eşik için Şekil 5.38’de verilmiştir. Eşiklerin birbiri ile karşılaştırılabilmesi için her iki eşiğin yüksekliği 7.5 cm ve taban genişlikleri 100 cm olarak belirlenmiştir. Eşikler baraj aksından yaklaşık 150 cm uzaklığa yerleştirilmişlerdir. Kapak kanalın memba ucundan 465 cm uzaklığa yerleştirilmiş ve rezervuardaki su derinliği 25 cm olarak alınmıştır.

Şekil 5.44’de baraj mansabında üçgen ve trapez eşik bulunması durumları için iki kamera görüntüsünün birleştirilmesi ile elde edilmiş farklı zamanlardaki deney görüntüleri verilmiştir. Kapağın ani olarak kalkmasıyla birlikte mansap doğrultusunda yayılan taşkın dalgasının üçgen veya trapez eşik ile karşılaşması sonucunda akımın bir kısmı eşikleri aşarken diğer yandan eşiklerin artan eğime sahip memba yüzeyleri üzerinde su seviyesi hızla kabarmakta ve memba yönüne doğru hareket eden bir kabarma dalgası oluşturmaktadır. Her iki durumda da su seviyesindeki yükselme ve kabarma dalgasının oluşumu, eşiklerin artan eğime sahip kısımları üzerinde meydana gelmektedir.



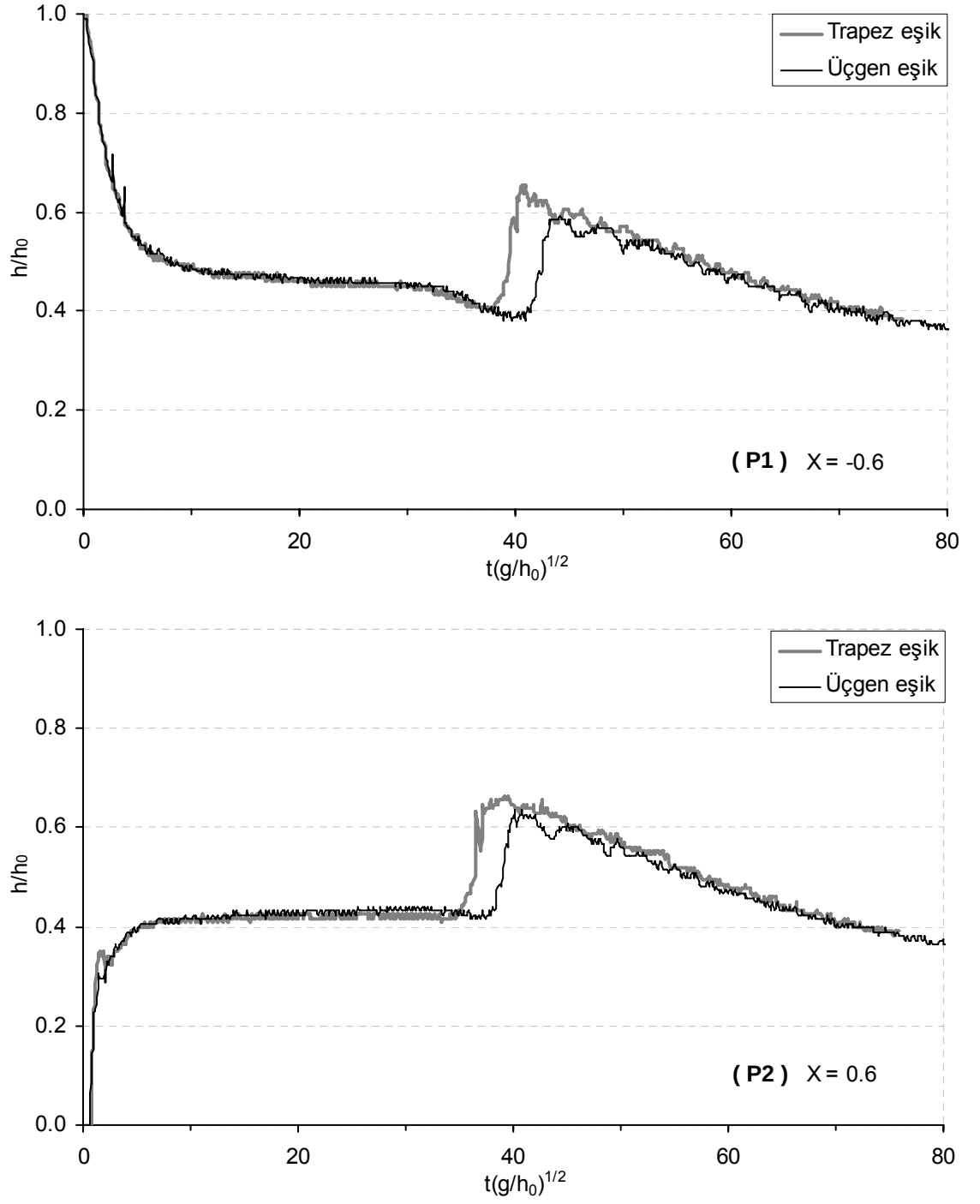
Şekil 5.44. Mansapta trapez ve üçgen eşik olması durumunda elde edilen deney görüntülerinin karşılaştırılması

Dikkat edilirse $t=2.80$ s anında trapez eşiğin memba yüzeyi üzerinde su seviyesi daha hızlı yükselmektedir ve kabarma dalgası oluşumu başlamıştır. Bu anda üçgen eşik üzerinde su seviyesi yükselmeye devam etmektedir ve su yüzeyi üzerinde herhangi bir köpüklenme görülmemektedir. Sonraki $t=3.30$ s anına gelindiğinde bu kez üçgen eşiğin memba yüzeyi üzerinde kabarma dalgası oluşumu başlamış, trapez eşik olması durumunda ise kabarma dalgası oluşmuş ve memba yönünde harekete başlamıştır. Son olarak $t=4.74$ s anındaki görüntüde ise her iki eşik durumunda kabarma dalgasının oluşmuş olduğu ve memba yönünde ilerleyen kabarma dalgasının trapez eşik durumunda daha ileride olduğu görülmektedir. Bu bilgilerle trapez eşik durumunda kabarma dalgası oluşumunun daha erken meydana geldiği ve memba yönünde daha hızlı ilerlediği sonucuna varılabilir. Bu davranışın sebebi, trapez eşik durumunda eşiğin memba yüzeyi eğiminin daha dik olması nedeniyle akımda daha güçlü yansımaların meydana gelmesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte önceki bölümlerde bahsedildiği gibi kapağın açılmasıyla eşiğe doğru gelen akımın eşik üzerinden aşabilmesi için özgül enerjisinin eşik üzerindeki minimum enerji yüksekliğine eşit veya daha fazla olması gereklidir. Bununla birlikte akım değişken olduğu için özgül enerji-minimum enerji ilişkisi anlık değişmektedir. Gelen akım sel rejiminde olduğu için kısa sürede enerjisini arttırması da ancak akımın nehir rejimine geçmesi ile mümkün olmaktadır. Bu durumda eşik arkasında hidrolik sıçrama meydana gelecektir. Her iki eşik yüksekliği aynı olduğu için enerji kayıpları ihmal edilirse eşiklerin gerekli olan anlık minimum enerjileri de aynı olacaktır. Bununla birlikte trapez eşiğin artan eğime sahip kısmı üçgen eşiğe göre daha kısa olduğu için gerekli olan minimum enerjiye daha kısa sürede ulaşması gereklidir. Bu nedenle trapez eşiğin memba yüzeyi üzerinde su seviyesi daha hızlı yükselmekte ve kabarma dalgası oluşumu (hidrolik sıçrama) daha erken meydana gelmektedir.

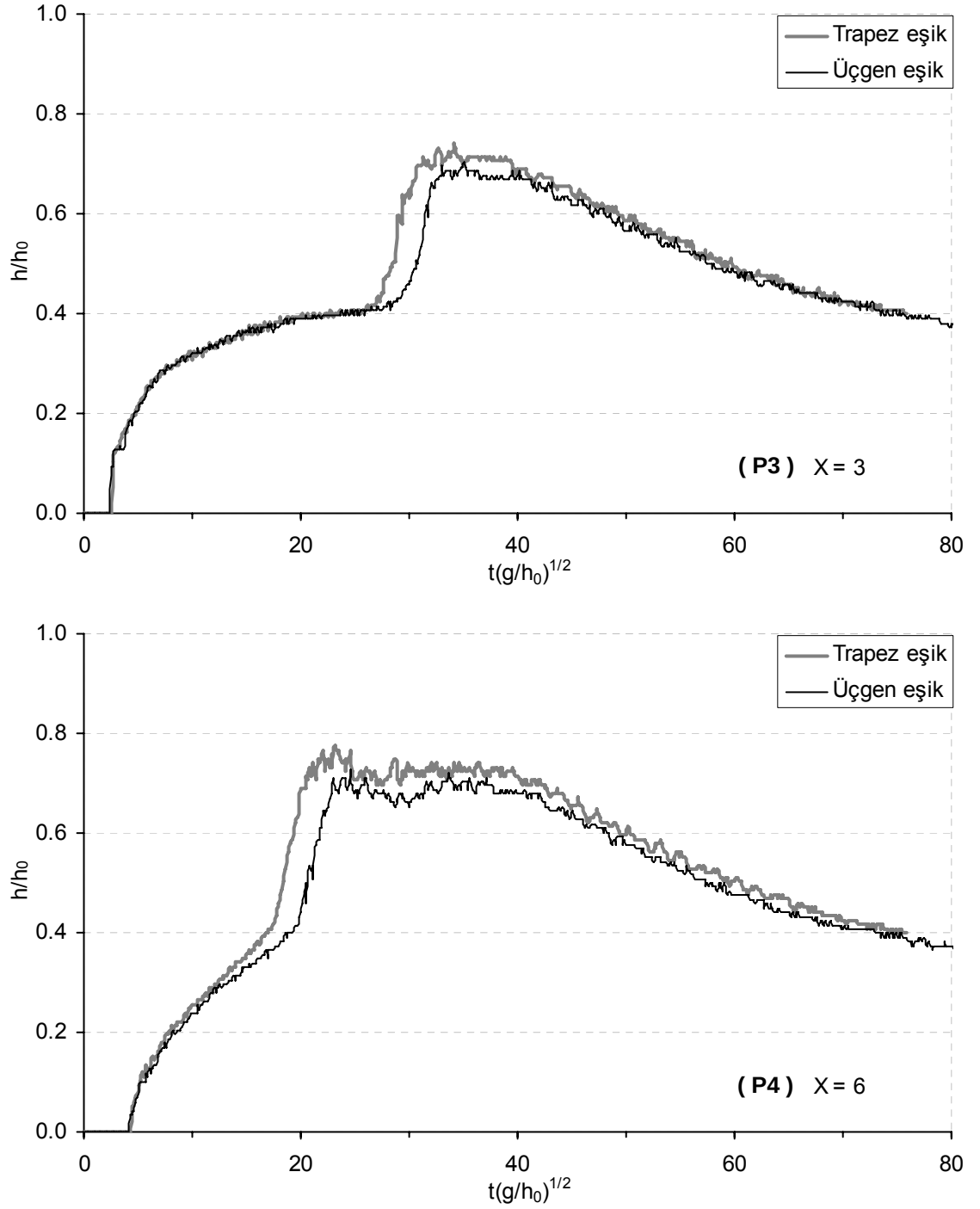
Şekil 5.44'e bakılırsa $t=4.74$ s anında kanal boyunca farklı akım rejimleri oluşmaktadır. Görüntüde kabarma dalgası önü ile baraj aksı arasında sel rejimi, kabarma dalgası önü ile eşiklerin tepe noktası arasında nehir rejimi, eşiklerin mansabında sel rejiminin olduğu karmaşık bir akım ortamı vardır. Eşik üzerindeki akım üçgen eşikte nehir rejiminden sel rejimine tepe noktasında, trapez eşikte ise eşiğin düzlem kısmının ortası civarında kritik yükseklikten geçmektedir.

Şekil 5.45a ve Şekil 5.45b’de baraj mansabında trapez ve üçgen eşik bulunması durumunda kanal boyunca farklı noktalardaki video görüntüler yardımıyla ölçülen zamana göre su seviyesi değişimleri verilmiştir. Deney kanalında ölçüm alınan noktaların baraj aksından uzaklıkları sırasıyla üçgen eşik için Şekil 5.32’de trapez eşik için Şekil 5.38’de verilmiştir. Sağlıklı bir karşılaştırma olması için baraj aksından aynı uzaklıklara sahip 4 nokta seçilmiştir. Burada P1 barajın hemen membasında, P2 barajın hemen mansabında, P3 baraj ile eşiklerin bulunduğu yerin orta noktasında ve P4’de eşiklerin başladığı noktalarda yer almaktadır.

Şekil 5.45a ve Şekil 5.45b’de tüm grafiklerde su seviyesi değişimlerinin genel gidişatı benzer olmakla birlikte trapez eşik durumunda yansıyan dalga daha hızlı ilerlemekte ve eşik arkasında oluşan maksimum yükseklikler üçgen eşik durumuna göre daha fazla olmaktadır. Grafiklerdeki alçalma eğrilerinde de trapez eşik arkasındaki su yüksekliğinin biraz daha fazla olduğu görülmektedir. P4 noktasında alçalma eğrisindeki yükseklik farkı daha belirgin olarak görülmektedir.



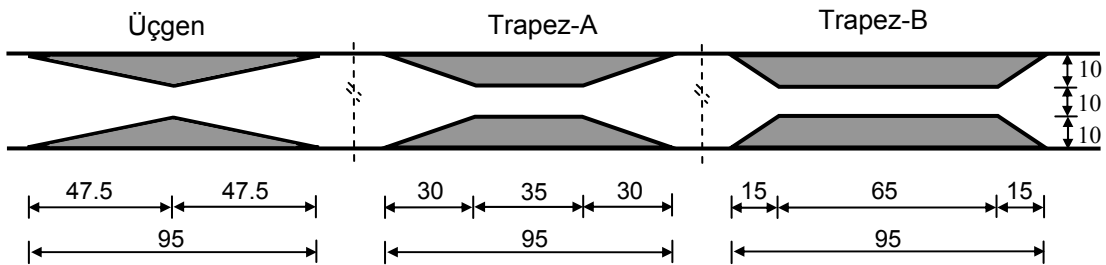
Şekil 5.45a. Mansapta trapez ve üçgen eşik olması durumları için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı deneysel su seviyesi değişimlerini



Şekil 5.45b. Mansapta farklı geometriye sahip daralma durumları için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı deneysel su seviyesi değişimleri

5.6. Kanal Genişliğinde Meydana Gelen Yerel Değişimlerin Baraj Yıkılması Taşkın Dalgasının Yayılmasına Etkisi

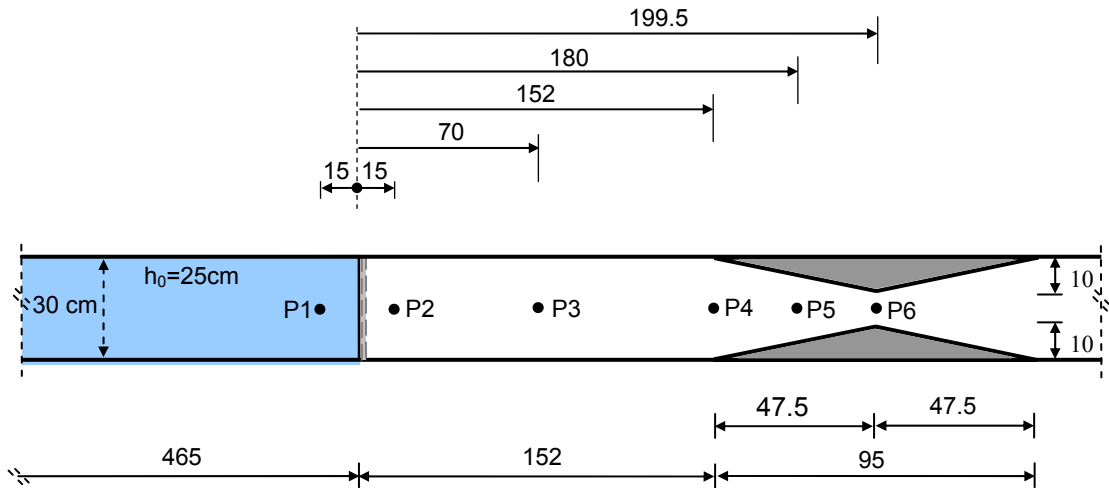
Enkesit değişiminin baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılması üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için tez kapsamında dikdörtgen kanal içerisinde baraj mansabında Şekil 5.46’da görülen üç farklı geometride simetrik kanal daralması oluşturulmuştur. Daralmayı oluşturan parçalar geometrik şekillerine göre üçgen, trapez-A ve trapez-B tipi daralma olarak adlandırılmıştır. Daralmayı oluşturan engelleri birbiri ile karşılaştırabilmek için uzunlukları ve minimum daralma mesafeleri eşit seçilmiştir. Deneylerde başlangıç rezervuar derinliği $h_0=25$ cm olarak alınmış ve mansapta kuyruk suyu düşünülmemiştir. Rezervuar uzunlukları aynı seçilmiştir. Engeller baraj aksından eşit uzaklıkta yerleştirilmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ihmal edilmiş ve kanal tabanı yatay kabul edilmiştir. Kanal mansap ucu açık bırakılarak gelen akım serbestçe kanaldan uzaklaştırılmıştır. Elde edilen grafiklerde uzunluklar başlangıç rezervuar derinliği h_0 ’a bölünerek, zaman ise $(g/h_0)^{1/2}$ ile çarpılarak boyutsuzlaştırılmıştır. Engeller kanal içerisindeki akımın izlenebilmesi için 1cm kalınlıklı pleksiglas malzemeden yapılmıştır ve simetrik duran iki üçgen parçadan oluşan daralmanın her bir parçası, ısı ile bükülmek suretiyle tek parça olarak imal edilmiştir. Parçalar kanal içerisinde silikon ve şeffaf bantlarla tutturulmuştur. Akımın daha iyi izlenebilmesi için rezervuardaki suya kırmızı renkte gıda boyası katılmıştır. Üçgen daralmayla yumuşak geçiş, trapez daralmalarla daha sert geçiş düşünülmüştür.



Şekil 5.46. Deneylerde kullanılan daralma geometrileri ve boyutları

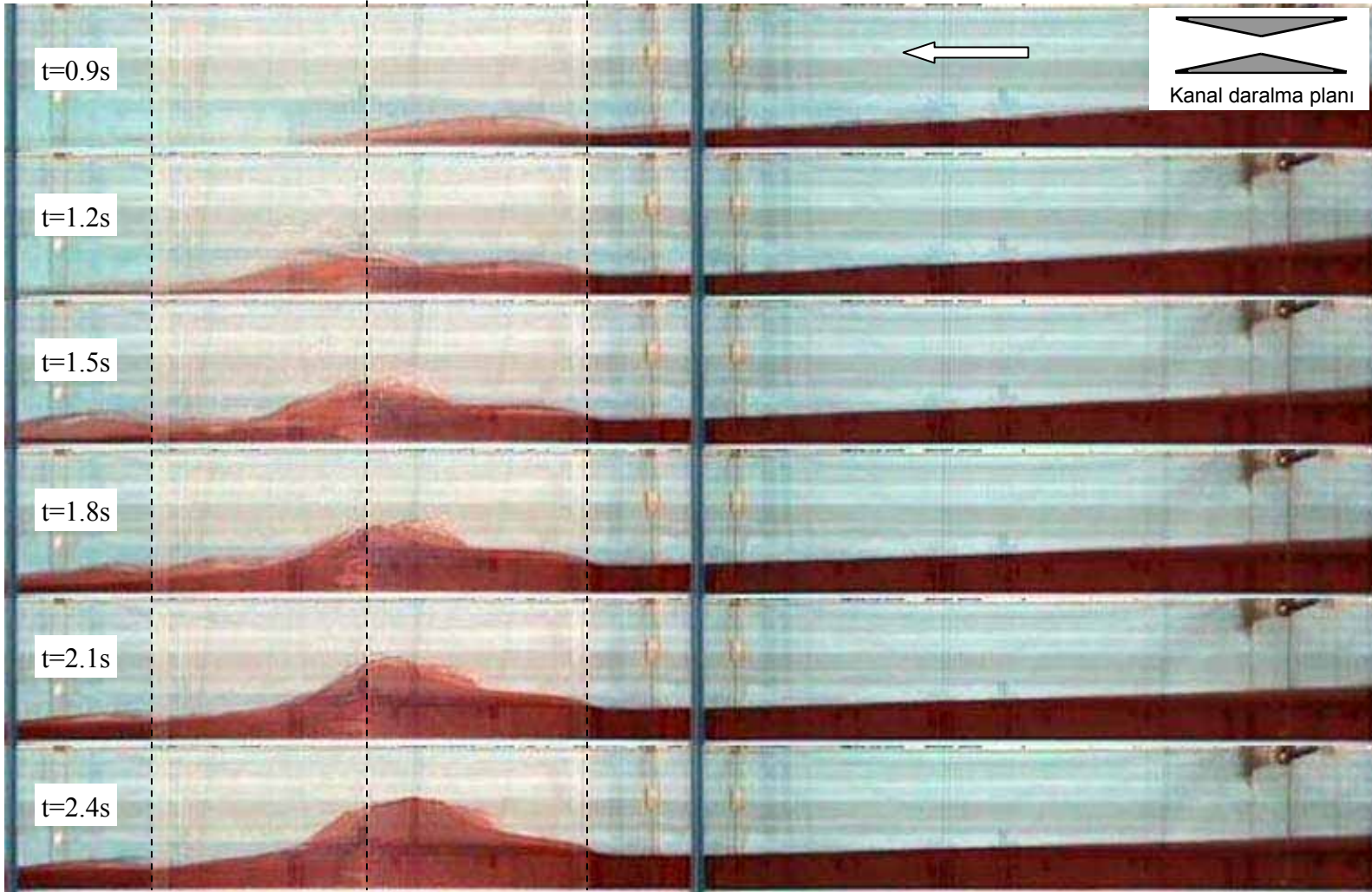
5.6.1. Baraj Mansabında Üçgen Daralma Durumu

Şekil 5.47’de içerisinde üçgen geometriye sahip enkesit değişiminin olduğu deney kanalının planı ve bu plan üzerinde su seviyesinin zamanla değişimlerinin belirlendiği noktaların baraj aksından olan uzaklıkları verilmiştir. Enkesit değişimi baraj aksından 152 cm uzaklıkta başlamaktadır. 30 cm olan kanal genişliği 47.5 cm’lik bir mesafede 1/3 oranında azaltarak en dar yerde 10 cm genişlik oluşturulmuştur. Başlangıçtaki rezervuar derinliği 25 cm alınmış ve kapak memba ucundan 465 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Mansap kısmında herhangi bir kuyruk suyu bulunmadığı ve taşkın dalgasının kuru yatak üzerinde yayıldığı düşünülmüştür. Biri membada ve diğerleri mansapta olmak üzere toplam 6 noktada su seviyesinin zamanla değişimleri belirlenmiştir.

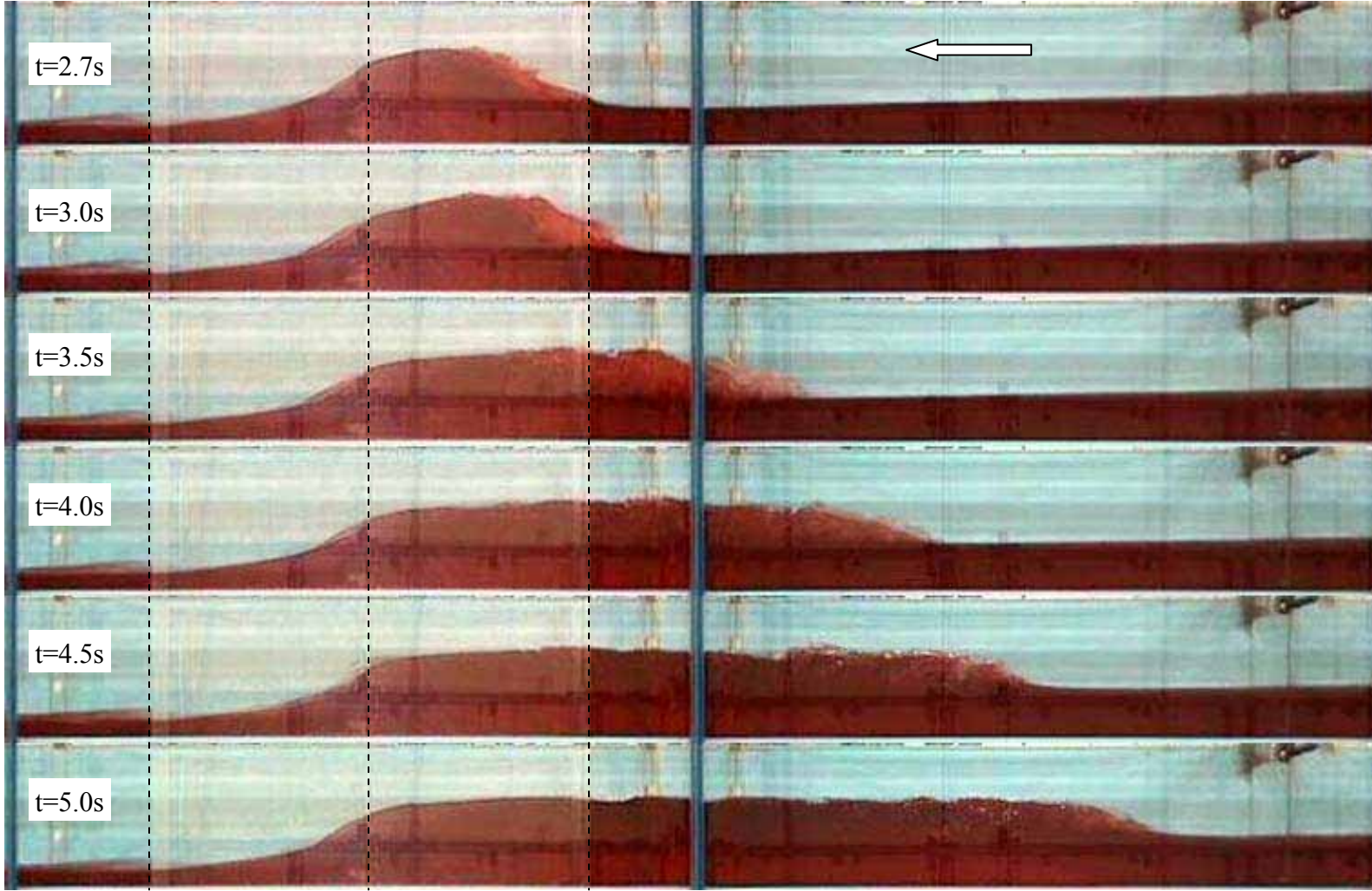


Şekil 5.47. Baraj mansabında üçgen daralma bulunması durumu için kanal planı

Şekil 5.48’de baraj mansabında üçgen daralma olması durumu için ilk 5 s süresince elde edilen farklı zamanlardaki deney görüntüleri verilmiştir. Görüntüler iki video kamera görüntüsünün birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Kesikli çizgiler daralmanın sınırlarını göstermektedir. Görüntüler başlangıçta 0.3 s aralıklarla, $t=3$ s anından itibaren 0.5 s aralıklarla verilmiştir.



Şekil 5.48a. Mansapta üçgen daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri



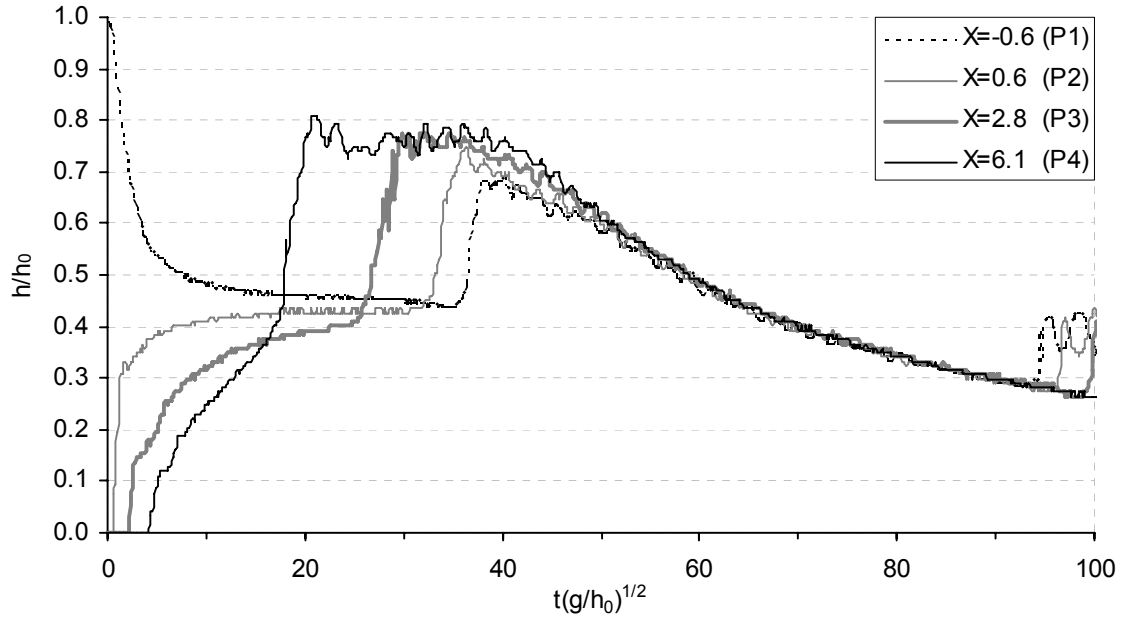
Şekil 5.48b. Mansapta üçgen daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri

Kapağın ani olarak kalkması ile oluşan taşkın dalgasının, daralma kesitine ulaşmasıyla ($t=0.9s$) birlikte su yüzeyinde belirgin değişimler gözlenmeye başlanmıştır. Enkesit değişiminin olduğu kısımda akış enkesitinde önce bir küçülme (daralmanın memba kısmı) sonra bir genişleme (daralmanın mansap kısmı) söz konusudur. Gelen dalga önü başlangıçta en kesitteki azalmadan dolayı sıkışmakta ve yan duvarlara tırmanmaktadır (Şekil 5.48 $t=0.9s$). Daha sonra ($t=1.2s$) akım kanalın en dar olduğu açıklıktan (ortadaki kesikli çizgi) sıçrayarak geçerken su seviyesi de yükselmeye başlamıştır. Şekilde $t=1.5s$ anına gelindiğinde kanalın en dar olduğu noktada su seviyesindeki yükselmenin en fazla olduğu görülmektedir. Bu aşamada minimum daralmanın hemen membasında yüzeydeki köpüklenmeden hidrolik sıçramanın olduğu gözlenmektedir. Daralmanın hemen mansabında ise kanal genişliğinin artmasından dolayı mansaba doğru ilerledikçe su seviyesi hızla azalmaktadır. Akımın mevcut açıklıktan geçişi ile birlikte başlangıçta ($t=1.5s-1.8s$) su seviyesinin en dar nokta üzerinde yükseldiği daha sonra ($t>2.1s$ anından itibaren) yükselmeyle birlikte maksimum su seviyesinin memba yönünde harekete başladığı görülmektedir. Ayrıca enkesit genişliğinin azaldığı kısımda (daralmanın memba kısmı) su yüzeyinin eğimi gittikçe artmaktadır. Bu artış $t=3.0s$ anına kadar devam etmektedir. Bu aşamada enkesitin daralan kısmındaki su yüzü profili tümsek bir görünüm almaktadır. Genişleyen mansap kısmında ise su yüzü profili parabolik olmaktadır. Oluşan kabarma dalgası önü daralan kesitten çıktıktan ($t>3.5$) sonra minimum daralmanın mansabında (kabarma dalgası arkasında) su yüzeyi yaklaşık yatay olmaktadır.

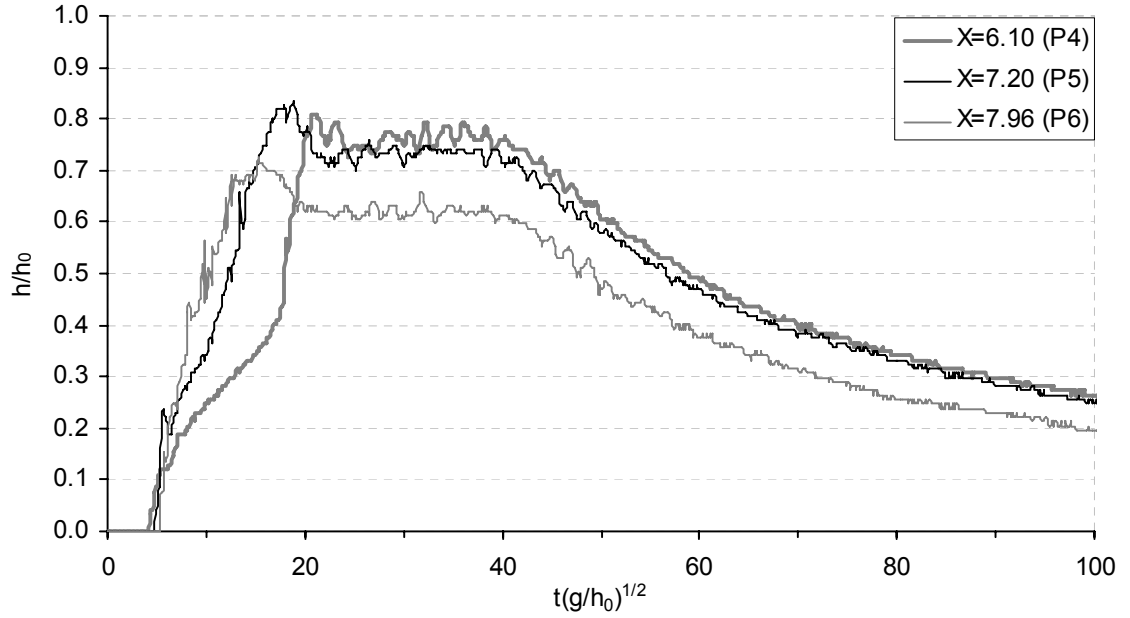
Özetle, baraj yıkılması taşkın dalgasının bir daralma ile karşılaşması durumunda akımın bir kısmı mevcut açıklıktan geçerken bir kısmı daralmanın memba kısmında yükselerek geriye doğru negatif bir kabarma dalgası oluşumuna neden olmaktadır. Bu davranışın nedeni kanal tabanında eşik bulunması durumunda olduğu gibi minimum enerji-özellik enerji arasındaki ilişki ile açıklanabilir. Herhangi bir andaki q debisinin daralmış kesitten geçebilmesi için akımın özgül enerjisinin ($E_0=h+Q^2/(2gA^2)$) daralmış kesitteki minimum enerjiye ($E_{min}=1.5(Q^2/(B^2g))$) eşit veya daha büyük olması gerekmektedir. Kanal tabanı yatay olduğundan daralmış kesitteki minimum enerji gelen akımın debi değerine, daralmış kesitin genişliğine

bağlı olarak değişecektir. Daralmış kesit genişliği (B_1) normal kanal genişliğinden (B_0) daha az olduğu için daralmış kesitteki minimum enerji (E_{min1}) kanaldaki normal minimum enerji yüksekliğinden (E_{min0}) daha fazla olacaktır. Kesit ne kadar daralırsa minimum enerji yüksekliği o kadar fazla olacaktır. Bununla birlikte yapılan çalışmada kesit 1/3 oranında daraltılmıştır ve farklı kesit daralması oranlarının etkisi incelenmemiştir. Diğer yandan baraj yıkılması akımı değişken akım olduğu için debi değeri dolayısıyla özgül ve minimum enerjiler anlık değişmektedir. Debi değeri önce hızla yükselmekte sonra kanaldaki suyun azalmasıyla birlikte azalmaktadır. Debi değeri arttıkça gerekli minimum enerji de artacaktır. Bu nedenle özgül enerji-minimum enerji arasındaki ilişki sürekli değişmekte ve düzenli akım durumuna göre çok daha karmaşık olmaktadır. Akım daralmış kesitten geçerken özgül enerjisi minimum enerjinin altında kaldığından bu noktada su seviyesi hızla yükselmektedir. Daralmış kesite yaklaşan baraj yıkılması taşkın dalgası sel rejiminde olduğu için kısa sürede su seviyesinin yükselmesi ancak hidrolik sıçrama ile mümkün olmaktadır. Bu durumda akım sel rejiminden nehir rejimine geçmektedir. Dikkat edilirse taşkın dalgasının daralma kesitine ulaşması ve geçişi ile birlikte daralmış kesitte su seviyesi yükselirken bu kesitin hemen membasında ilk anlardan itibaren ($t=1.5s$) hidrolik sıçrama görülmeye başlanmıştır. Daha sonra bu hidrolik sıçrama gelen akım debisinin artması ve sonra azalmasından dolayı memba yönünde hareket eden bir kabarma dalgası haline gelmektedir. Gerçekte oluşan bu kabarma dalgası hareketli hidrolik sıçrama olarak düşünülebilir. Şayet debi değeri sabit kalsaydı hidrolik sıçrama belirli bir mesafeye kadar memba yönünde hareket edecek ve orada sabit kalacaktı. Akımın daralmış kesitten geçebilmesi için özgül enerjisinin minimum enerjiye eşit olması gerektiğinden bu noktadaki yükseklik kritik yükseklik olacaktır. Dolayısıyla daralma bölgesi arkasındaki kabarmış su yüksekliği en dar kesitten geçerken kritik yükseklik değerine düşecektir. Kritik derinliğin her iki tarafında akım farklı rejimlerde olacağından daralmış kesitten sonra akım tekrar sel rejiminde olmalıdır. Bu durumda kabarma dalgası oluştuğundan sonra kanal boyunca gelen akım sel rejiminde, kabarma dalgası arkasındaki akım nehir rejiminde ve daralmış kesitin mansabındaki akım sel rejiminde olacaktır.

Şekil 5.49 ve Şekil 5.50’de mansapta üçgen daralma olması durumunda video görüntülerden elde edilen kanal boyunca belirli noktalardaki su seviyesinin zamanla değişimleri boyutsuz olarak gösterilmiştir. Ölçüm alınan noktaların baraj aksından uzaklıkları Şekil 5.47’de verilmiştir. Şekil 5.49’da P1 ve P2 barajın hemen memba ve mansabındaki noktaları, P3 baraj aksı ile daralmanın başladığı yerin yaklaşık orta noktasını, P4 ise daralmanın başladığı noktayı göstermektedir. Kapağın kalkmasıyla birlikte başlangıçta membada (P1) hızlı bir düşme gözlenirken hemen mansapta (P2) hızlı bir yükselme meydana gelmektedir. Daha sonra bu noktalarda su seviyesindeki değişimler oldukça yavaş olmakta ve daralmadan yansıyan dalga bu noktalara ulaşana kadar su yükseklikleri 4/9 değerine yaklaşmaktadır. Mansapta daha uzakta yer alan P3 noktasında taşkın dalgasının gelişiyile birlikte su seviyesi P2 noktasına göre daha yavaş yükselmektedir. P4 noktasında ise ilk dalganın geçişinden sonra su seviyesindeki yükselme daralmanın etkisinden dolayı tekrar hızlanmakta ve maksimum su yüksekliğine ulaşana kadar kesintisiz artmaktadır. Kabarma dalgası memba yönünde hareket ettiğinden su seviyesi önce P3 kesitinde daha sonra sırasıyla P2 ve P1 kesitinde hızlı bir şekilde artmaktadır. Dalganın geçişinden sonra P4 kesitinde su seviyesi bir süre sabit kalmakta ve daha sonra hızla azalmaktadır. Diğer kesitlerde ise dalganın geçişi ile birlikte su seviyesi hızla azalmaktadır. Bu davranışın nedeni daha önce bahsedildiği gibi rezervuarın belirli bir büyüklüğe sahip olmasından dolayı akım debisinin bir süre sonra azalması bundan dolayı kesitlerde su seviyesinin hızla düşüşe geçmesi ile açıklanabilir. Yansıyan kabarma dalgası P1 ve P2 kesitlerine ulaşana kadar debi azalmaya başladığından su seviyesi de kabarma dalgasının geçişiyle birlikte azalmaktadır. Grafikteki alçalma eğrilerinin paralellik gösterdiği söylenebilir. Bu da su yüksekliğinin azalması sırasında kanaldaki su yüzeyinin yaklaşık yatay olduğu anlamına gelir. Ayrıca grafiklerde yaklaşık T=95 anında tekrar küçük bir yükselme görülmektedir. Bunun nedeni daralmış kesitten yansıyan kabarma dalgasının kanal memba ucundaki duvardan yansıyarak ölçüm alınan noktalara tekrar ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu bilgilerle daralma kesitine yakın yerlerde su seviyesindeki yükselmenin çok hızlı olduğu ve ölçüm alınan noktalarda elde edilen maksimum su yüksekliklerinin daralma kesiti civarında daha fazla olduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 5.49. Üçgen daralma durumu için daralma kesiti membasında farklı noktalardaki su seviyelerinin zamanla değişimleri



Şekil 5.50. Üçgen daralma durumu için daralma bölgesindeki noktalarda su seviyelerinin zamanla değişimleri

Şekil 5.50’de P5 noktası, daralmanın başladığı yer (P4) ile en dar kesitin (P6) arasındaki orta noktayı göstermektedir. Grafiklere bakıldığında, taşkın dalgasının daralma kesitine ulaşmasıyla birlikte su seviyelerinde oldukça hızlı bir yükselme görülmektedir. En dar kesite yakın yerlerde (P5-P6) maksimum su seviyesi kesintisiz bir şekilde yaklaşık lineer olarak yükselmektedir. Grafiklerde oluşan maksimum su yüksekliğinin P5 noktasında (Şekil 5.50’de $T=19$, $h/h_0=0.83$) meydana geldiği görülmektedir. Buradan kanal boyunca meydana gelen maksimum yüksekliğin daralmanın başladığı yer ile en dar kesit arasında bir yerde meydana geldiği sonucu çıkarılabilir. Daralmanın en az olduğu P6 noktasında akım kritik yükseklikte olduğundan su seviyesinin yükselmesiyle birlikte bu eğrinin kritik yüksekliğin zamanla değişimini temsil ettiği söylenebilir. Dikkat edilirse daralmış kesit arkasındaki kabarmış su yüksekliği en dar kesitte kritik yükseklikten geçtiğinden P6 eğrisinde su yükseklikleri P4 ve P5 eğrilerindeki yüksekliklere göre daha az olmaktadır.

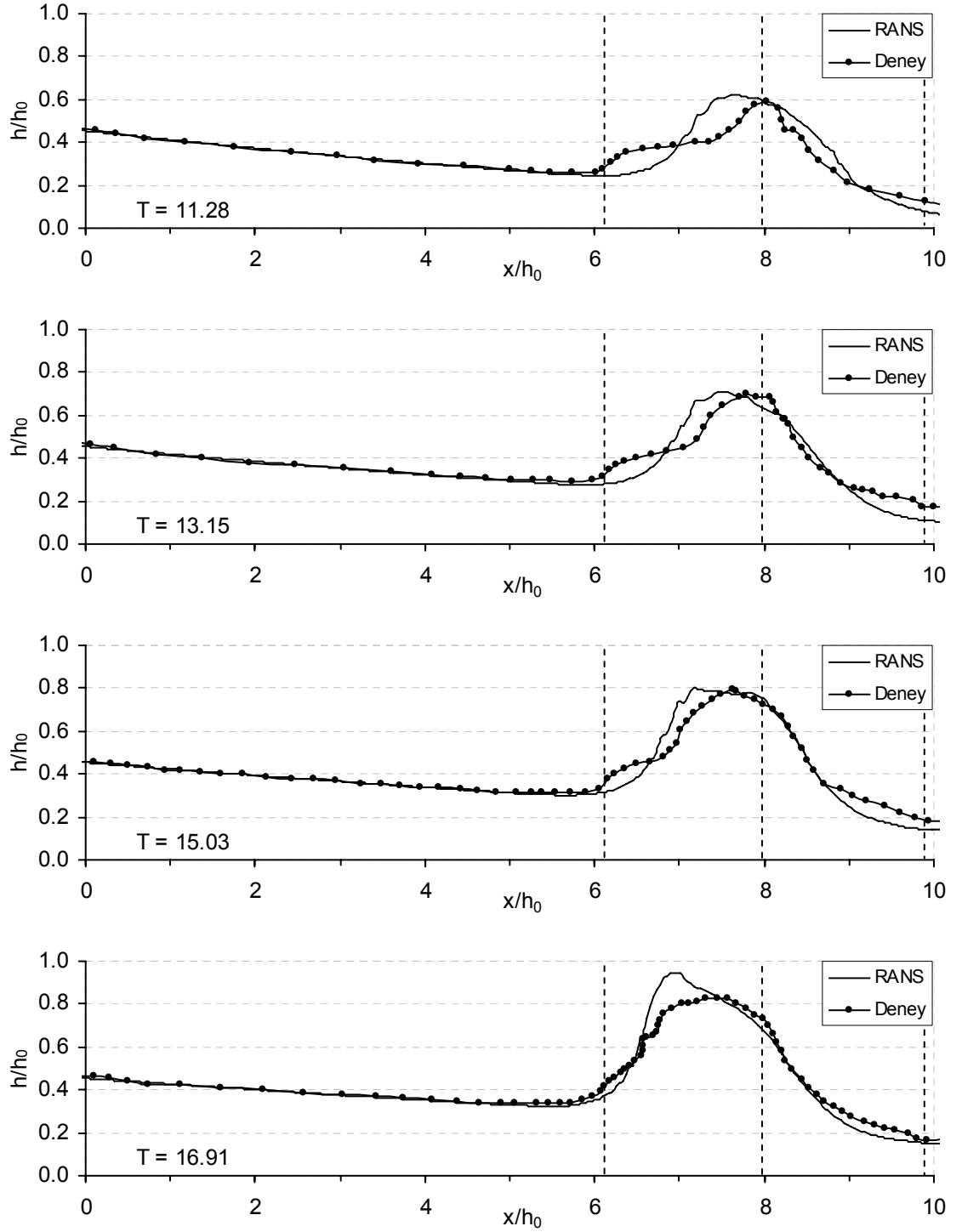
5.6.1.1. Üçgen Daralma Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması

Yapılan çalışmada üçgen daralma durumu için görüntülerden elde edilen su yüzü profilleri ve belirli noktadaki su seviyelerinin zamanla değişimleri, 3-boyutlu RANS denklemlerine dayanan sayısal çözüm ile karşılaştırılmıştır. Problem geometrisi Şekil 5.47’de planı verilen deney kanalı boyutları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bununla birlikte kanal içerisindeki daralma simetrik olduğundan kanal genişliğinin orta noktasındaki eksen simetri eksenini kabul edilmiş ve deney kanalının yarısı modellenmiştir. Bu sayede problemin hesap yükü dolayısıyla çözüm süresi oldukça azaltılmıştır. Bu nedenle 8.90 m uzunluğa, 0.30 m yüksekliğe ve 0.15 m genişliğe sahip bir hesaplama bölgesi düşünülmüştür. Baraj, kanalın memba ucundan 4.65 m ve mansap ucundan 4.25 m uzaklıkta yerleştirilmiştir. Rezervuardaki suyu temsil etmek amacıyla çözüm bölgesi içerisinde 4.65 m uzunluğunda ve 0.25 m yüksekliğinde bir akışkan hacmi tanımlanmıştır. Bu, aynı zamanda problemin başlangıç şartını da oluşturmaktadır. Kanal içerisindeki daralma, ayrı bir CAD programında hazırlanan engel geometrisinin FLOW-3D yazılımında

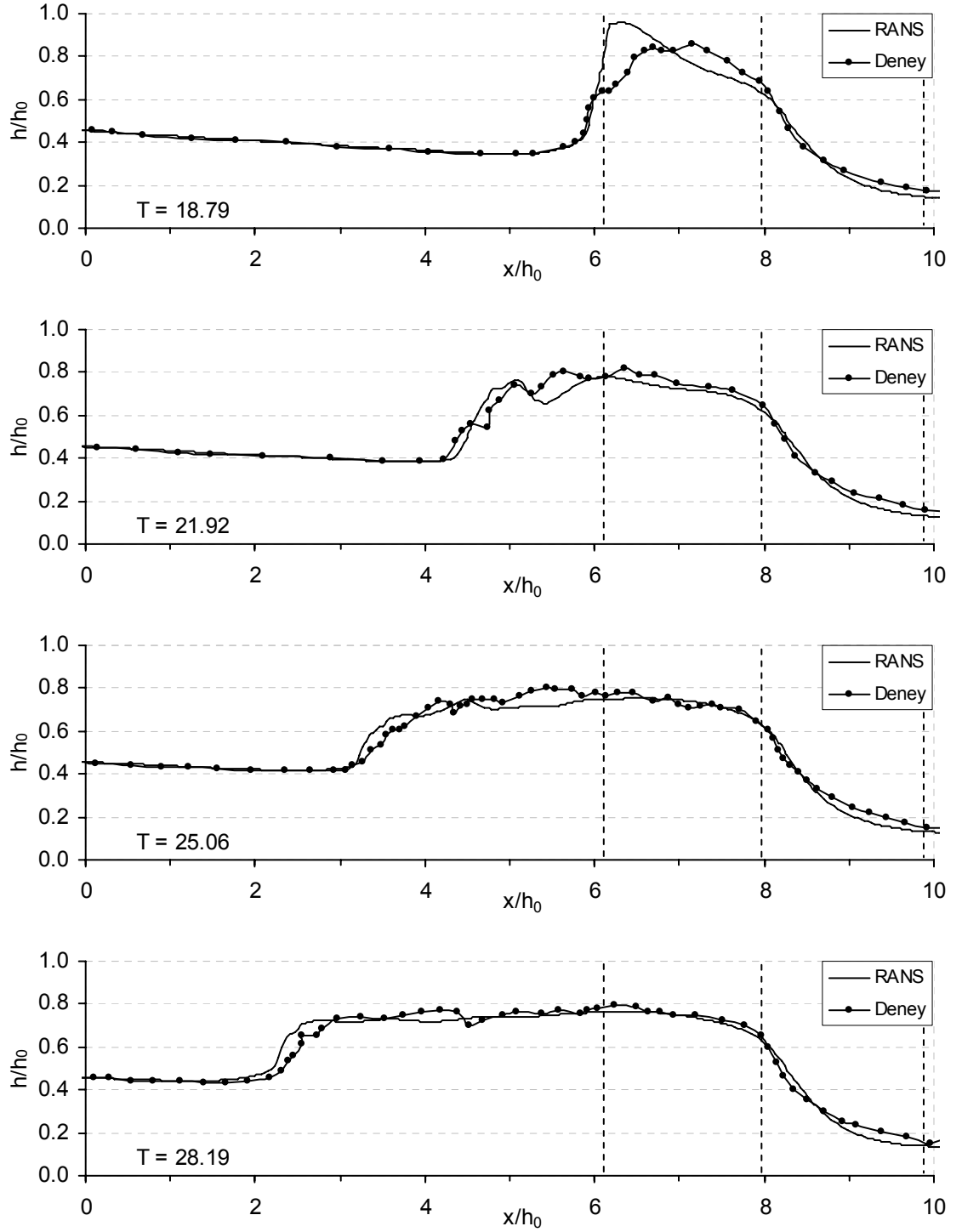
hesaplama bölgesi içerisinde baraj aksından 1.52 m uzaklığa yerleştirilerek hücrelerin kapatılmasıyla oluşturulmuştur. Problemden sınır şartı olarak kanalın memba ucu (x_{min}) bu yüzey kapalı olduğundan duvar (wall), mansap ucu (x_{maks}) ise su kanaldan serbestçe uzaklaştırıldığı için çıkan akım (outflow) seçilmiştir. Kanal yan yüzeyi (y_{min}) ve kanal tabanı (z_{min}) duvar (wall), kanalın yarısı modellendiği için kanal genişliğinin orta noktası (y_{maks}) simetri olarak belirlenmiştir. Akım, serbest yüzeyli olduğundan çözüm bölgesinin üst sınırı (z_{maks}) da simetri eksenini seçilmiştir. Bu durumda serbest yüzey üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve atmosfer basıncı etkili olmaktadır. Engel yüzeylerindeki pürüzlülük ihmal edilmiştir. Türbülans modeli olarak k- ϵ seçilmiştir.

Hesaplama bölgesi içerisinde ağ aralıkları x, y ve z doğrultularında 0.01 m olarak belirlenmiştir. 486 bin hücreden oluşan hesaplama bölgesinin 20 s'lik çözüm süresi yaklaşık 6.5 saat sürmüştür.

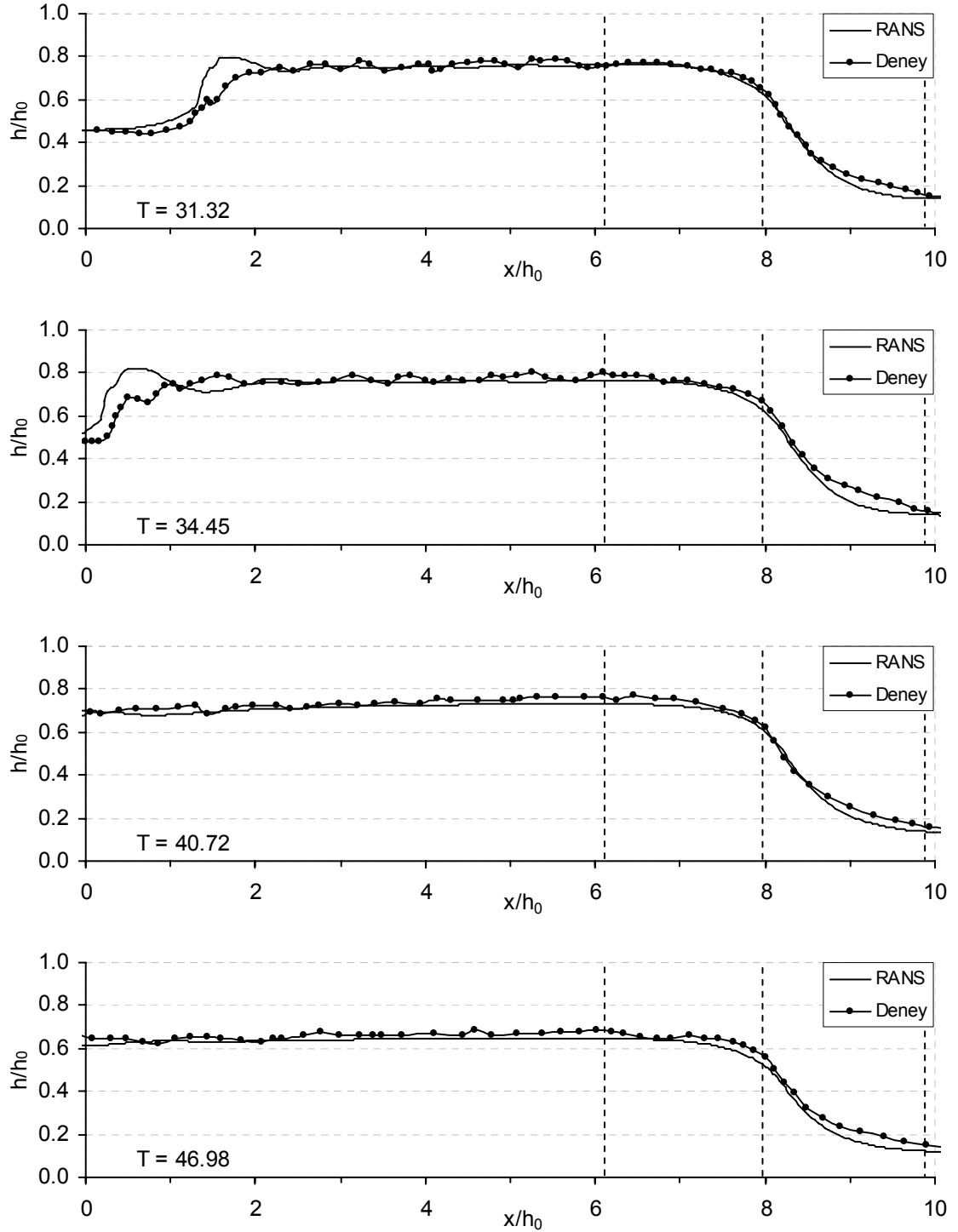
Şekil 5.51'de mansapta üçgen daralma bulunması durumunda meydana gelen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri görülmektedir. Grafiklerde daralma bölgesi $x/h_0=6$ ve $x/h_0=10$ noktaları arasında kalmaktadır. Şekil 5.51'de $T=47$ anına kadar kısa zaman aralıklarına sahip 12 adet grafik bir arada sunulmuştur. Baraj yıkılması taşkın dalgası mansapta bir daralma ile karşılaştığında su yüzeyinde belirgin değişimler meydana gelmektedir. Grafiklerde $T=11.28$ anında engelin başladığı ($x/h_0=6$) yerden itibaren su seviyesinde bir artış gözlenmektedir. Artışın maksimum olduğu yer kesitin en dar olduğu $x/h_0=8$ noktasıdır. Bu anda engel civarında deney sonucu ile RANS çözümü arasında önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Bununla birlikte engelin başladığı yere kadar olan kısımda ($0 < x/h_0 < 6$) RANS çözümü oldukça yakınsamaktadır. Zaman ilerledikçe ($T=13.15-21.92$) RANS çözümünde de su seviyesinin kesitin en dar kısmının ($x/h_0=8$) hemen membasında hızla yükselerek daralmış kesitten yansımakta ve memba yönünde hareket eden bir kabarma dalgası oluşumu söz konusu olmaktadır. Bu aşamada deney ve sayısal sonuçlar arasında önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Kabarma dalgası oluşması ve negatif yönde ilerleyen dalga önünün daralmış kesitten ($x/h_0 < 6$) çıktığı $T=21.92$ anından itibaren RANS çözümü ile elde edilen su yüzü profilleri deney sonuçları ile oldukça uyumlu olmaktadır.



Şekil 5.51a. Mansapta üçgen daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri



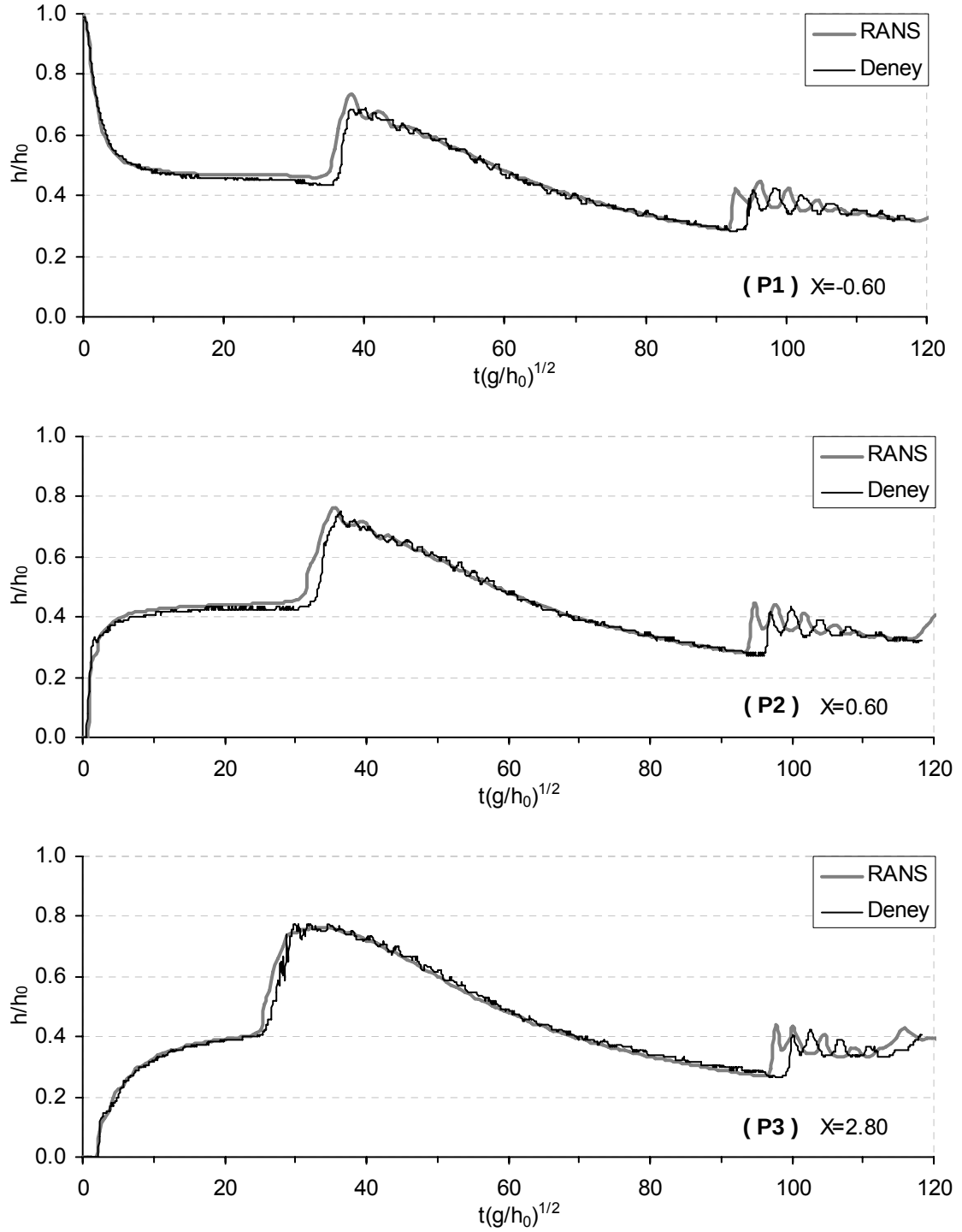
Şekil 5.51b. Mansapta üçgen daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri



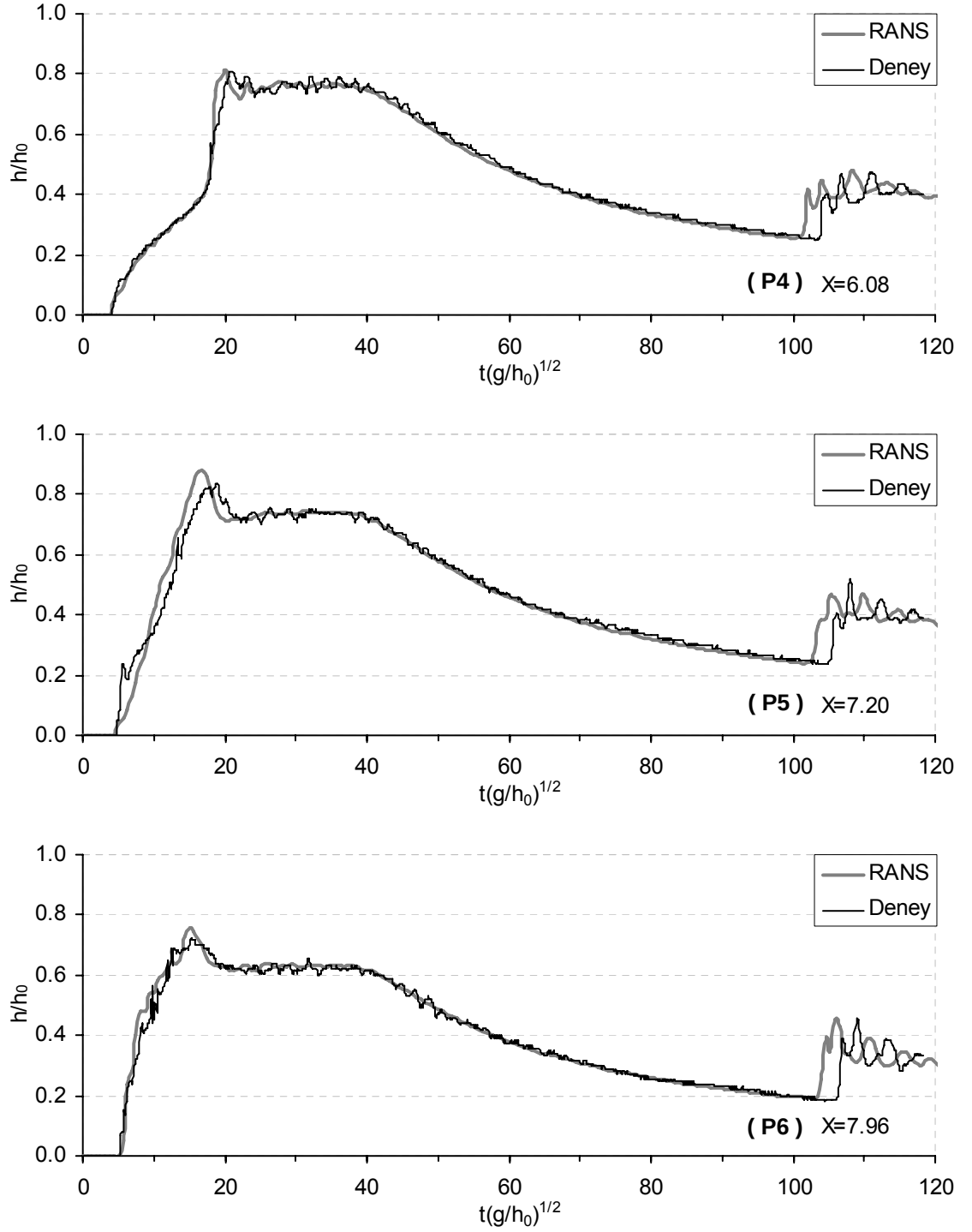
Şekil 5.51c. Mansapta üçgen daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri

Negatif dalga yayılma hızı da RANS çözümünde yaklaşık aynı hızda ilerlemektedir. En dar kesitin mansabında ($x/h_0 > 8$) ise deney sonuçları RANS çözümlerinin biraz daha üzerinde çıkmaktadır. Ayrıca taşkın dalgasının daralmış kesitten yansmasıyla birlikte RANS çözümünde sıçrama tipi dalga kırılması meydana gelirken deneylerde ise taşma şeklinde dalga kırılması olmaktadır. Bu durum $T=16.91-18.79$ 'daki RANS çözümünden elde edilen su yüzeyi profilinde bir miktar görülebilmektedir. Bu grafiklerden görüldüğü gibi dalga tepesi kırılma öncesinde iyice dikleşmiştir. Kanal boyunca okunan maksimum su yüksekliği RANS çözümünde daha fazla olmaktadır. Buraya kadar olan bilgilerle kabarma dalgası oluşumuna kadar geçen sürede RANS çözümü ile deney sonuçları arasında önemli farklılıkların bulunduğu, kabarma dalgası oluşumundan itibaren elde edilen su yüzü profilleri arasında oldukça iyi bir uyumun olduğu sonucu çıkarılabilir.

Şekil 5.52'de kanal üzerinde video görüntülerden elde edilen belirli noktalardaki su seviyesinin zamanla değişimleri sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çözümlerde 19 s ($T=120$) saniye süresince 0.020 s zaman aralıklarına sahip video görüntülerden yararlanılmıştır. Deneysel eğrinin belirlenebilmesi için yaklaşık 950 resim kullanılmıştır. Ölçüm alınan noktaların yerleri Şekil 5.47'de verilmiştir. Şekil 5.52'de verilen grafiklere bakıldığında RANS çözümü ile elde edilen su seviyesi değişimlerinin daralmış kesit de dahil olmak üzere kanalın her noktasında deney sonuçları ile oldukça iyi uyum gösterdiği söylenebilir. Grafiklerde kapağın kalkmasıyla birlikte mambadaki P1 noktasında su seviyesinde hızlı bir düşüş gözlenirken mansaptaki tüm kesitlerde taşkın dalgasının geçişi ile birlikte su seviyelerinde hızlı bir yükselme meydana gelmektedir. Daha sonra daralmış kesitten yansıyan dalgaının ölçüm noktalarına ulaşmasıyla su seviyesi eğrilerinde hızlı bir yükselme meydana gelmektedir. Yükselmenin ardından daralma bölgesine yakın kesitlerde (P4, P5 ve P6) bir süre sabit kaldıktan sonra diğer kesitlerde (P1, P2 ve P3) beklemeksizin su seviyesinde hızlı bir düşüş gözlenmektedir. Bu düşüşün sonuna doğru kesitlerdeki su seviyesinde tekrar küçük bir yükselme meydana gelmektedir. Örneğin P1 noktasında $T=95$ anından itibaren bu durum gözlenmektedir. Bu yükselmeden sonra su yüzeyinde küçük dalgalanmaların olduğu da dikkati çekmektedir.



Şekil 5.52a. Üçgen daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 5.52b. Üçgen daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması

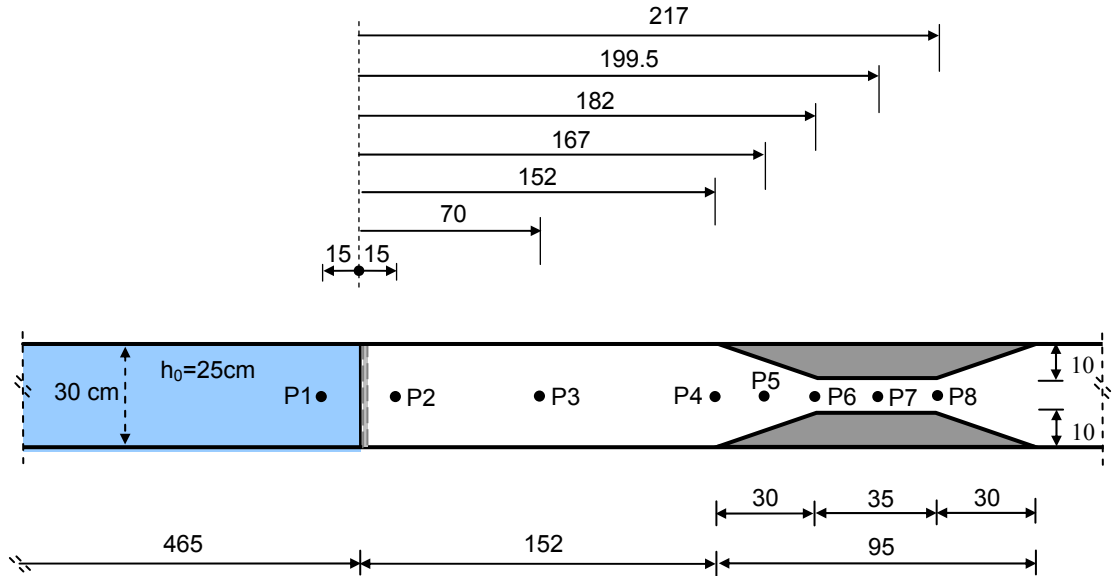
Bu yükselmenin nedeni daralmış kesitten yansıyan dalga'nın kanal memba ucundaki düşey duvardan tekrar yansıyarak ölçüm alınan kesitlere ulaşmasıdır. Kabarma dalgası memba ucundaki duvardan yansıdıktan sonra su yüzeyinde küçük dalgalanmalar oluşmakta ve su seviyesinin iyice azalmış olmasından dolayı mansap yönünde hareket eden küçük dalga boylu ve yükseklikli dalga treni meydana gelmektedir. Dikkat edilirse dalga treninin RANS çözümlerinde de meydana geldiği buna karşın dalga önünün deney sonuçlarına göre daha hızlı ilerlediği göze çarpmaktadır. Deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, RANS çözümleri ile küçük dalgalanmalar bile etkili bir biçimde belirlenebilmekte fakat dalgalanmalar bir miktar zamanda ötelenmiş gibi durmaktadır. Bunun nedeni de uzun sürede enerji kayıplarının önem kazanması ve deney sonuçlarında kayıpların daha fazla olması ile açıklanabilir. Diğer bir önemli noktada, kabarma dalgasının geçişi ile birlikte kesitlerde okunan maksimum su seviyelerinin RANS çözümlerinde biraz daha yüksek çıkmasıdır. Bu sonuçlarla, RANS denklemleri ile elde edilen maksimum su yüksekliklerinin biraz daha fazla olması ve yansıyan dalga önünün daha hızlı ilerlemesiyle RANS denklemleri ile yapılan analizlerde daha emniyetli yönde kalınması sağlanacaktır.

Ayrıca Şekil 5.52'de deney ve sayısal sonuçlar arasındaki uyum, su seviyesi değişimlerinin ilave bir ölçüm aletine gerek kalmaksızın video görüntülerinden oldukça doğru bir biçimde belirlenebileceğini göstermektedir.

5.6.2. Baraj Mansabında Trapez-A Daralma Durumu

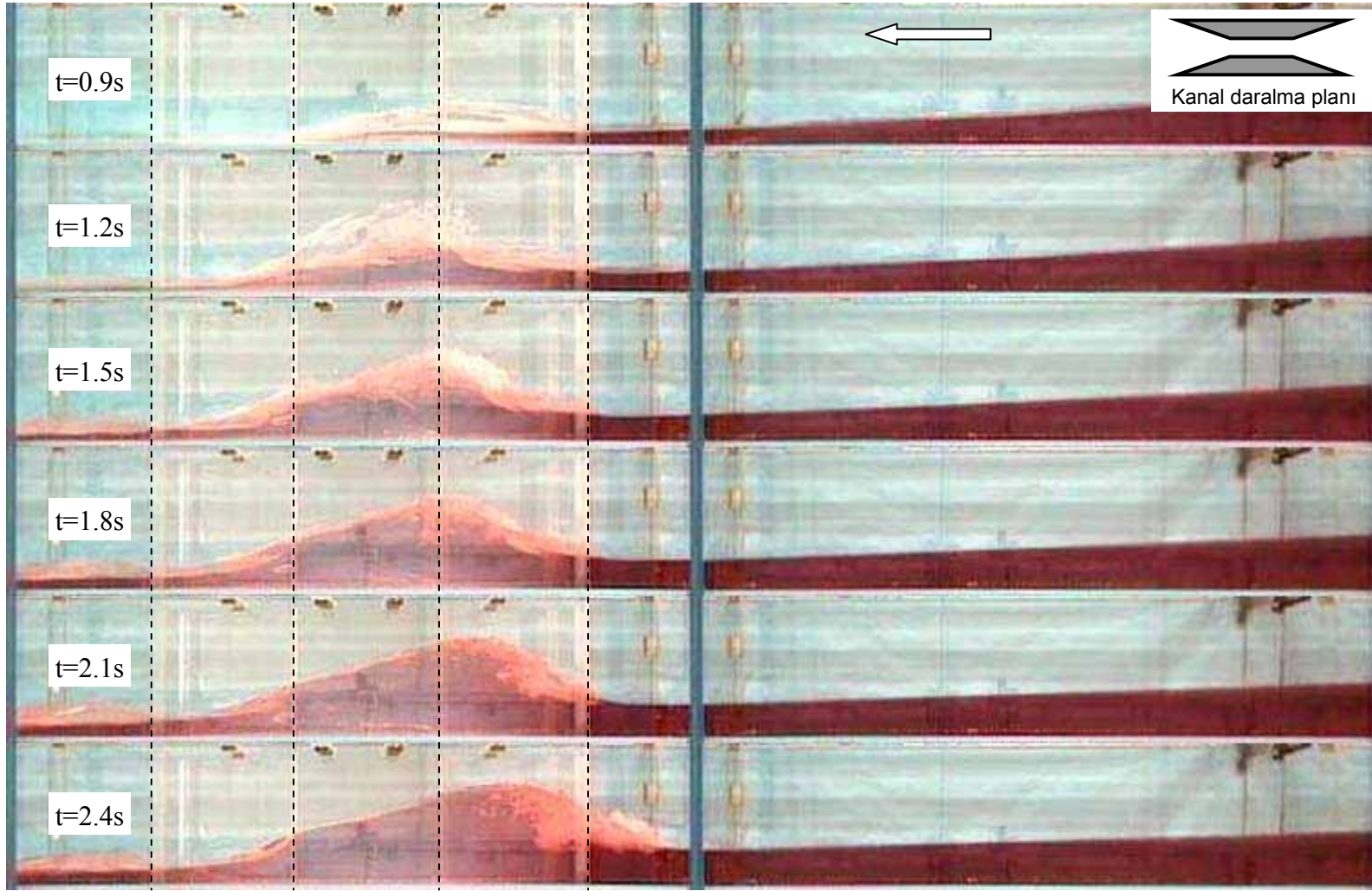
Şekil 5.53'de mansapta trapez daralma olması durumu için kanal planı ve su seviyesi ölçümü yapılan noktaların baraj aksından uzaklıkları verilmiştir. Yıkılma öncesi başlangıçtaki rezervuar derinliği $h_0=25$ cm ve rezervuar uzunluğu 465 cm alınmıştır. Barajın mansap kısmında kuyruk suyu bulunmamaktadır. Enkesit değişimi barajın yaklaşık 152 cm mansabındadır. Normal genişliği 30 cm olan kanal içerisine 10 cm genişliğinde trapez geometriye sahip pleksiglas malzemeden yapılmış iki engelin yerleştirilmesiyle 1/3 oranında daraltılmıştır. Kanal tabanı yatay ve pürüzsüz kabul edilmiştir. Kanalin memba ucu düşey bir kapak ile kapatılmış barajdan 435 cm uzaklıktaki mansap ucu ise açık bırakılarak akımın serbestçe kanaldan

uzaklaştırılması sağlanmıştır. Akımın davranışının daha belirgin izlenebilmesi için su içerisine kırmızı renkte gıda boyası katılmıştır. Kanalda meydana gelen su seviyesi değişimleri biri membada ve 7 tanesi mansapta olmak üzere toplam 8 kritik noktada video görüntülerden yararlanılarak ölçülmüştür.

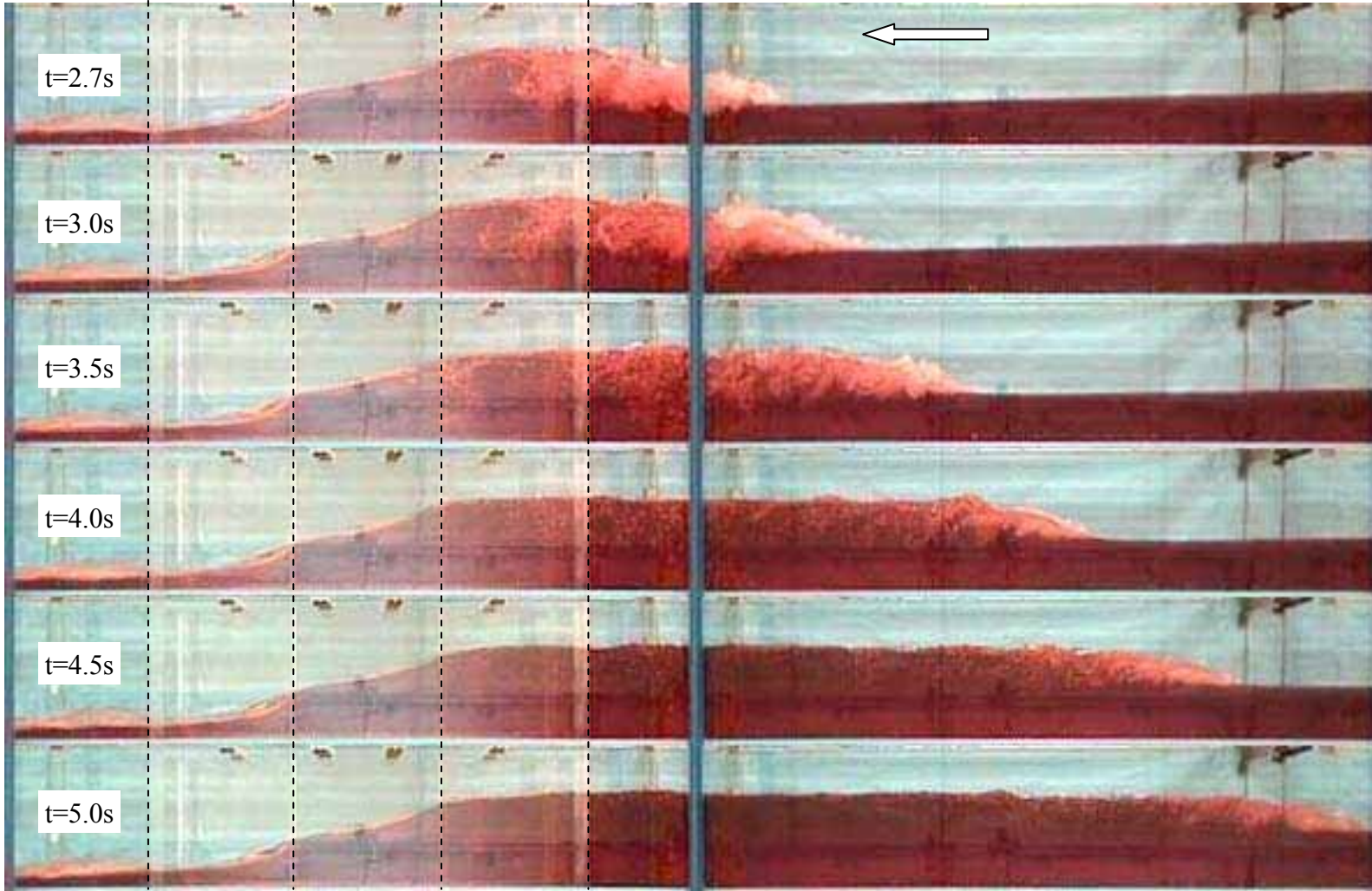


Şekil 5.53. Baraj mansabında trapez-A daralma bulunması durumu için kanal planı

Taşkın dalgasının engele ulaştığı andan itibaren farklı zamanlarda çekilmiş deney görüntüleri Şekil 5.54’de verilmiştir. Bu görüntüler, iki ayrı video kameradan alınan eş zamanlı görüntülerin birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Taşkın dalgasının gelişim aşamalarının daha iyi görülebilmesi için başlangıçta 0.3s ve sonlara doğru 0.5s aralıklı 5s süresince çekilmiş 12 adet görüntüden yararlanılmıştır. Görüntülerdeki kesikli çizgiler enkesit değişiminin olduğu sınırları göstermektedir. Kapağın ani olarak kaldırılması sonucu oluşan taşkın dalgası enkesit değişimi ile karşılaştığında ($t=0.9s$) akımın sıkışmasından dolayı, dalga önü daralan kesit bölgesindeki yan duvarlar üzerine bir miktar tırmanmakta ve daralmış kesite girdikten sonra ($t=1.2s$) gelen akımın aynı oranda daralmış kesitten geçememesi nedeniyle su yüzeyinde sıçramalar meydana gelmektedir. Zaman ilerledikçe ($t=1.5-1.8s$) en dar kesitin başladığı noktada su seviyesi çalkantılı bir şekilde yükselmektedir.



Şekil 5.54a. Mansapta trapez-A daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri



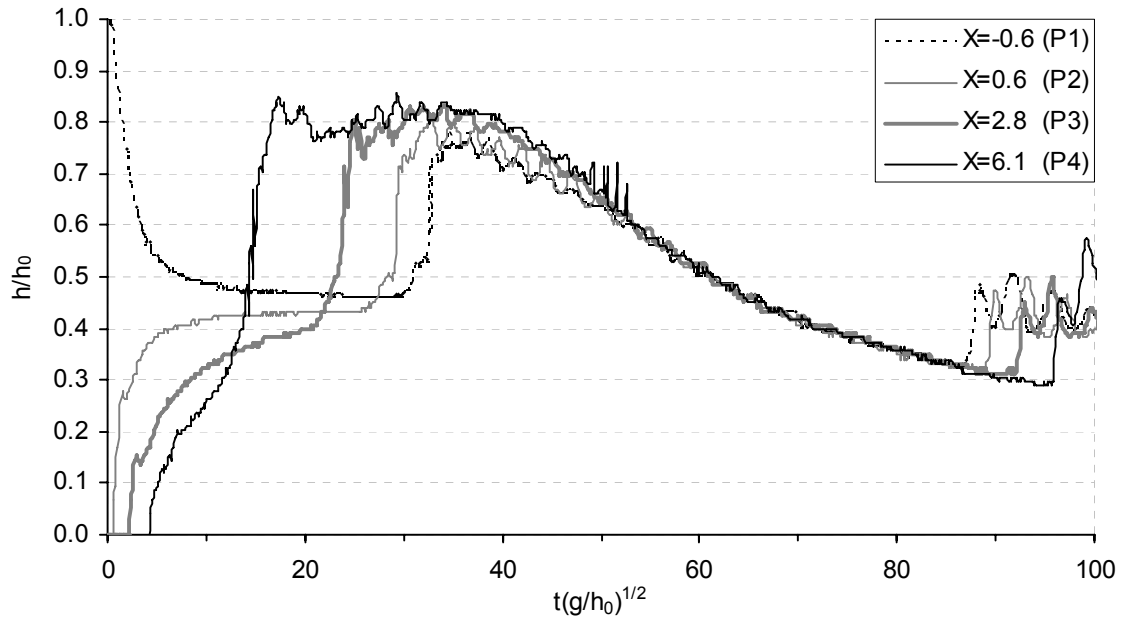
Şekil 5.54b. Mansapta trapez-A daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri

Önceki bölümde bahsedildiği gibi akımın daralmış kesitten geçebilmesi için anlık özgül enerjisi daralmış kesitteki anlık minimum enerji seviyesine yükselmelidir. Bunun için su seviyesini arttırması gerekmektedir. Gelen akım sel rejiminde olduğu için bu da ancak akımın hidrolik sıçrama ile nehir rejimine geçişi ile mümkün olmaktadır. Daralmış kesitteki su seviyesinin belirli bir yüksekliğe ulaşmasından sonra yükselmeye birlikte memba yönünde hareket başlamaktadır ($t=2.1-2.4s$). Bu aşamada ($t=2.4s$) daralma mesafesinin yaklaşık orta noktasında maksimum olacak şekilde su yüzeyi tümsek görünüm almaktadır. Memba yüzeyinde belirgin bir hidrolik sıçrama gözlenmekte ve önemli derecede hava girişi olmaktadır. Memba yönünde hareketin devam etmesiyle ($t=2.7-5.0s$) hidrolik sıçrama daralma kesiti dışına çıkmakta ve memba yönünde hareket eden bir kabarma dalgası oluşmaktadır. Görüntülere dikkat edilirse kabarma dalgası önünde başlangıçta ($t=2.7-3.5s$) önemli derecede hava girişi ve enerji kırılması söz konusu iken memba yönünde ilerledikçe ($t=4.0-5.0s$) dalga önündeki hava girişi gittikçe azalmaktadır. Bunun nedeni başlangıçta gelen akım debisinin gittikçe artmasından dolayı gelen ve yansıyan kabarma dalgası arasındaki girişimin daha şiddetli olmasındandır. Ayrıca sel rejimindeki gelen akımın daralmış kesitten geçebilmesi için debinin artışı sırasında enerjisinin daha çabuk kırılması ve su yüksekliğini arttırarak nehir rejimine geçmesi gerekmektedir. Bir süre sonra gelen akım debisi zamanla azaldığından akımın özgül enerjisi de azalmaktadır. Bunun sonucunda memba yönünde hareket eden kabarma dalgası ve gelen taşkın dalgası arasındaki bölgede daha az hava girişi meydana gelmektedir.

Akımın daralmış kesitten geçebilmesi için en dar kesitin membasındaki akım nehir rejimine geçmiştir. Bununla birlikte daralmış kesit mansabında kanal eski genişliğine ulaştığından mambadaki enerji fazlalığı nedeniyle akım daralmış kesit içerisinde mansaba doğru hızlanmakta ve su seviyesi azalmaktadır. Bu durumda akım daralmış kesit mansabında tekrar sel rejimine geçmekte ve daralmış kesitin orta noktasına yakın bir yerlerde kritik yükseklik oluşmaktadır.

Şekil 5.55’de daralma kesitinin membasında kalan ölçüm noktalarında su seviyelerinin zamanla değişimleri görülmektedir. Mevcut grafikler 16s ($T=100$) süresince 0.02s zaman aralıklarına sahip video görüntülerin analizi sonucu elde

edilmişlerdir. Ölçüm alınan noktaların kanal içerisindeki yerleri Şekil 5.53’de verilmiştir. P1 noktası membadaki P2, P3 ve P4 noktaları barajın mansap kısmındaki su seviyesi değişimlerini göstermektedir. Kapağın kalkmasıyla birlikte membadaki P1 noktasında su seviyesi başlangıçta hızla düşerken barajın hemen mansabındaki su seviyesi ise hızla yükselmektedir. Daha sonra bu noktalarında su seviyesinin değişimi oldukça yavaş bir hızda gerçekleşmektedir. Taşkın dalgasının P2 noktasına ulaşmasıyla bu noktadaki su yüksekliği P1 noktasına göre daha yavaş bir hızla artmaktadır.

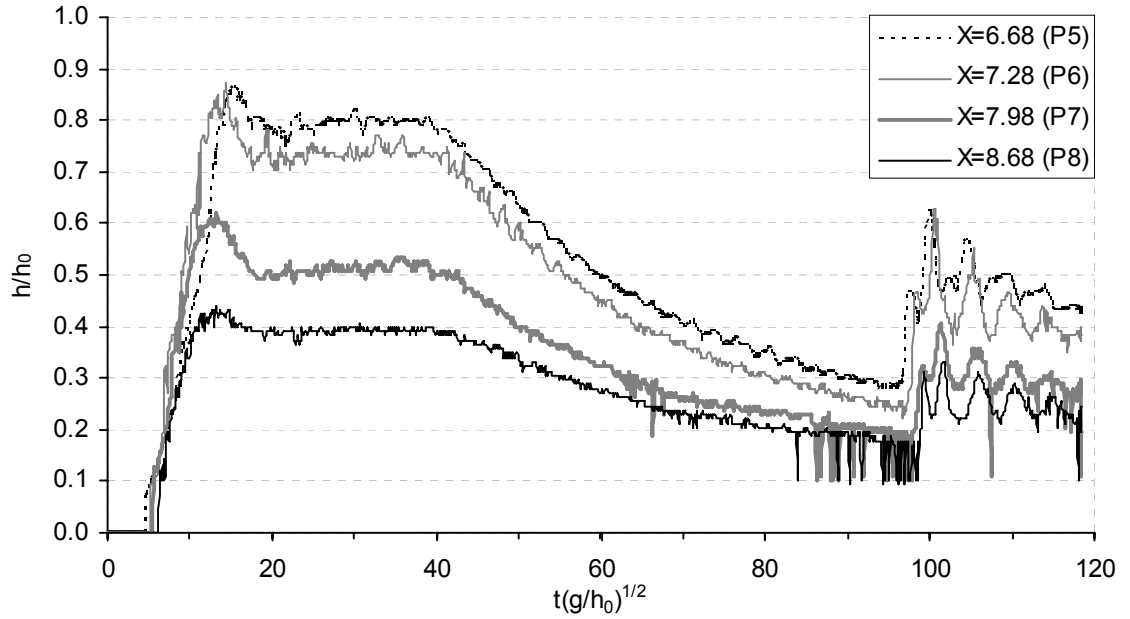


Şekil 5.55. Trapez-A daralma durumu için daralma kesiti membasında farklı noktalardaki su seviyelerinin zamanla değişimleri

Daralmanın başladığı P4 noktasında ise taşkın dalgasının geçişi ve daralmış kesitten yansıma arasındaki süre oldukça kısadır. Bu noktada maksimum su seviyesi değerine oldukça hızlı bir şekilde ulaşılmaktadır. İlk olarak P4 noktasında maksimum su seviyesi meydana gelmekte sonrasında daralmış kesitten yansıyan kabarma dalgasının memba yönünde hareket etmesinden dolayı sırasıyla P3, P2 ve P1 noktalarında maksimum su seviyeleri elde edilmiştir. Ölçüm alınan noktalarda ölçülen en büyük su yüksekliği P4 noktasında $T=17.3$ anında $h/h_0=0.85$ olarak

okunmuştur. Dikkat edilirse daralmış kesitin membasında kalan kısımda elde edilen maksimum su seviyeleri memba yönünde gidildikçe azalmaktadır. Rezervuarın sonlu bir büyüklüğe sahip olmasından dolayı bir süre sonra gelen akımın debi değeri azaldığından kanaldaki su seviyesi düşüşe geçmektedir. Bir süre sonra ($T>50$) ölçüm alınan noktalardaki su yüksekliklerinin aynı olduğu görülmektedir. Buradan kanaldaki su yüzeyinin yatay olduğu ve bu şekilde seviyenin azaldığı söylenebilir. Bu azalma $T=87$ anında kanalın memba ucundaki düşey duvardan yansıyan kabarma dalgasının tekrar yansması sonucu sırasıyla önce P1-P4 noktalarına ulaşmasına kadar devam etmektedir. Kanaldaki su seviyesinin azalmış olmasından dolayı meydana gelen bu yansıma dalgasının yüksekliği daha kısa olmaktadır. Fakat grafikte farklı noktalar için elde edilmiş olan eğrilerden su yüzeyinde bir dalgalanmanın olduğu görülmektedir ($T>87$).

Şekil 5.56'da daralmış kesit içerisindeki su seviyelerinin zamanla değişimi görülmektedir. Ölçümler daralmış kesit içerisinde kesit değişiminin olduğu (P6-P8) ve akımda su seviyesi değişiminin kritik olacağı düşünülen (P5-P7) toplam 4 noktada alınmıştır. Grafikler 19 s ($T=120$) süresince çekilmiş 0.02 s zaman aralığına sahip toplam 950 adet görüntünün geliştirilen yöntem ile otomatik analizi sonucu belirlenmiştir. Şekilden taşkın dalgasının daralmış kesitten geçişi ile birlikte su seviyesinin kesintisiz bir biçimde maksimum su seviyesine ulaştığı görülmektedir. Grafiklerde en büyük su yüksekliği P5 noktasında $T=15.7$ anında $h/h_0=0.87$ olarak okunmuştur. P6 noktasında da bu değere yakın bir maksimum yükseklik meydana gelmektedir. Bu değer deney sırasında kanal boyunca okunan en büyük su yüksekliğidir. Dolayısıyla kanal boyunca meydana gelen maksimum su yüksekliğinin enkesit değişiminin olduğu, daralma kesitinin başladığı yer ile en dar kesitin arasında bir yerde meydana geleceği söylenebilir. Kesitlerde su seviyeleri maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azalarak bir süre sabit kalmaktadır. Bunun nedeni, başlangıçta kabarma dalgasının oluşumu sırasında su seviyesinin yükselerek maksimum değere ulaşması ve memba yönünde hareket eden hidrolik sıçramanın daralmış kesitten çıkmasıyla birlikte su seviyesinin bir miktar azalarak kabarma dalgasına dönüşmesi ile açıklanabilir.



Şekil 5.56. Trapez-A daralma durumu için daralma bölgesindeki farklı noktalarda su seviyelerinin zamanla değişimleri

Bu durumda negatif kabarma dalgası arkasında akım nehir rejimine geçtiği için daralmış kesitin membasında akım daha kararlı olmakta ve yaklaşık yatay bir su yüzeyi meydana gelmektedir. Ayrıca bu aşamadan sonra herhangi bir T anında grafiklerden yükseklikler okunursa su seviyesinin daralmış kesitin membasından mansabına doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. Bu durumda enkesit değişiminin sabit olduğu kısmın orta noktası civarında kritik yükseklik oluşacaktır. Daralmış kesitin membasındaki akımın nehir rejimine geçtiği andan itibaren bu durum geçerlidir. Bu yaklaşımla P7 noktasındaki su seviyesinin zamanla değişiminin yaklaşık $T=19.7$ anından itibaren kritik yüksekliğin değişimini ifade ettiği düşünülebilir.

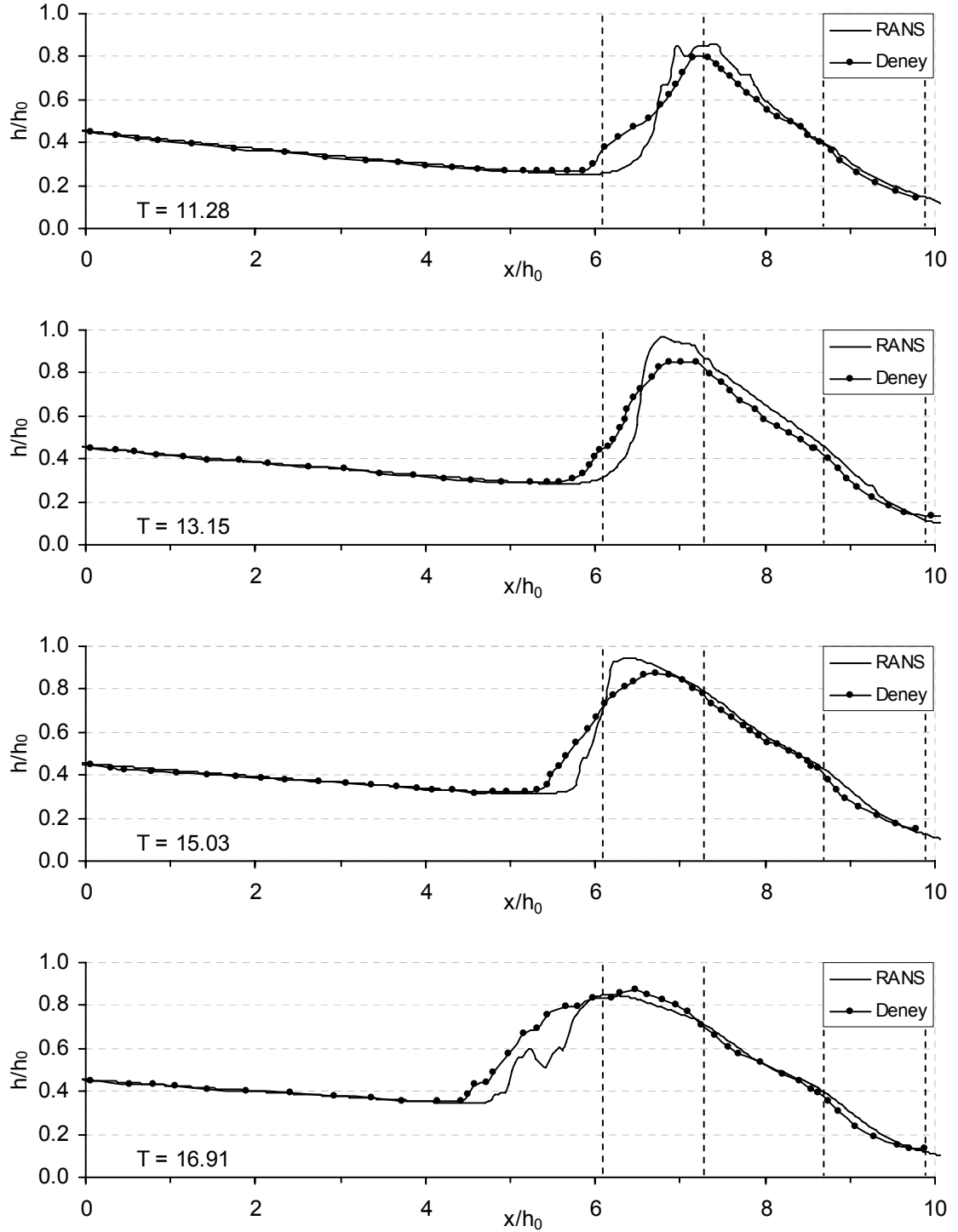
Şekil 5.56'da verilen eğrilerde su seviyesinin tüm noktalarda yaklaşık aynı anda ($T=40$) azalmaya başladığı gözlenmektedir. Bu durum ölçüm noktalarının birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Kabarma dalgasının kanalın memba ucundan yansımından dolayı bir süre sonra ($T=97$) grafiklerdeki azalma eğrilerinde tekrar ani bir yükselme göze çarpmaktadır. Daralmış kesit mansabında taşkın dalgasının ilk geçişi sırasında meydana gelen yükselmeye benzer biçimde kanalın

memba ucundan yansıyarak tekrar daralmış kesite ulaşan dalganın geçişi sırasında P5 ve P6 noktalarında maksimum yükseklikler meydana gelmektedir. Bununla birlikte daralmış kesitten gittikçe azalan genliğe sahip bir dalga treninin geçtiği görülmektedir ($T=97$). Bu durumda negatif kabarmanın kanalın memba ucundaki düşey duvardan yansıması ile mansap doğrultusunda hareket eden bir dalga treninin meydana geldiği sonucu çıkarılabilir.

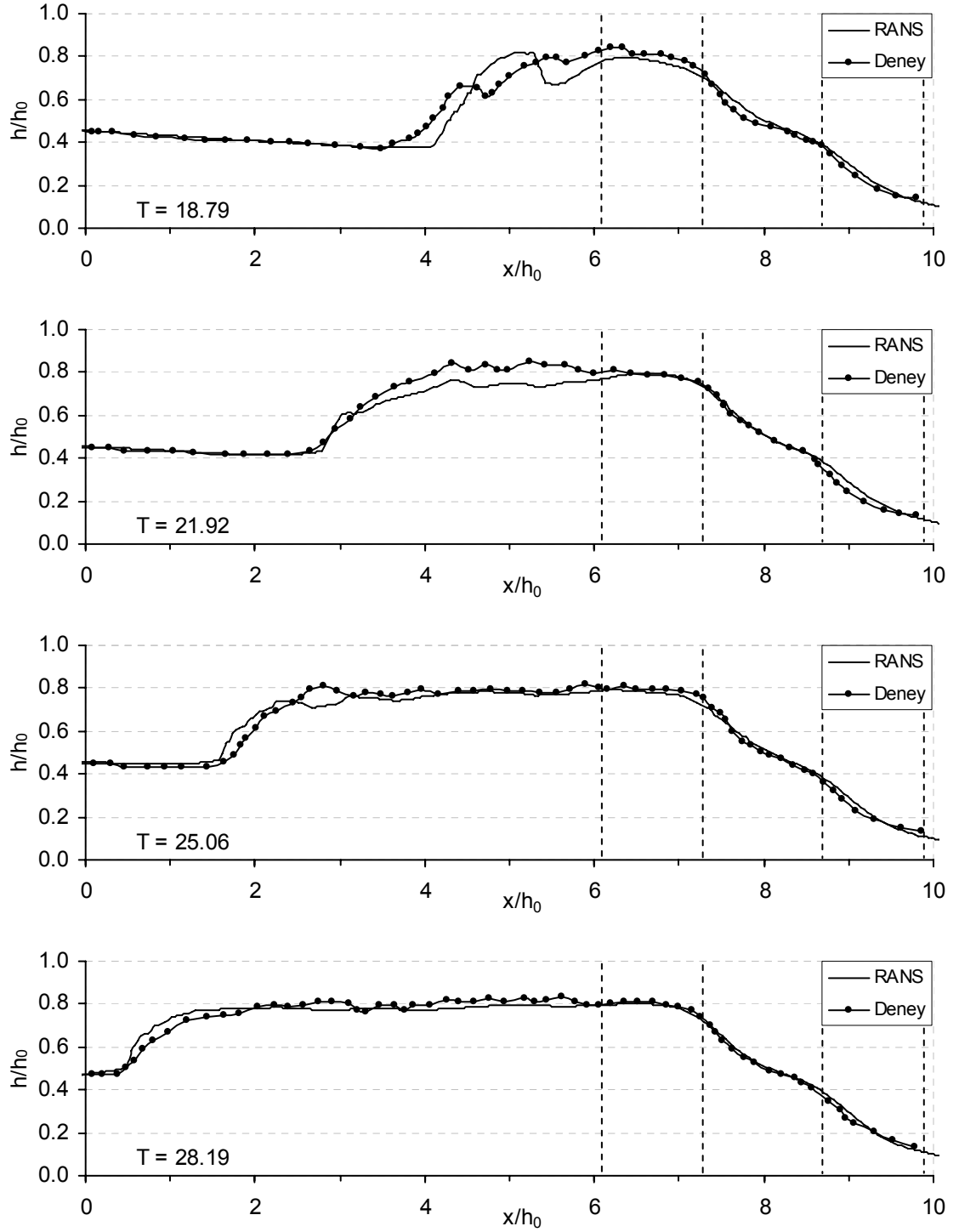
5.6.2.1. Trapez-A Daralma Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması

Trapez-A daralma durumu için Şekil 5.53’de planı verilen deney kanalının RANS denklemlerine dayanan 3-boyutlu sayısal çözümü FLOW-3D yazılımı kullanarak yapılmıştır. Problemin çözüm süresini azaltmak amacıyla kanalın yarısı modellenmiş ve kanal genişliğinin orta noktasından geçen eksen simetri eksenini olarak seçilmiştir. Daralma bölgesindeki engel geometrisi dışında problemin sınır şartları, ağ aralıkları ve diğer tüm parametreleri Bölüm 5.6.1.1’de verilen üçgen daralma durumu ile aynı alınmıştır.

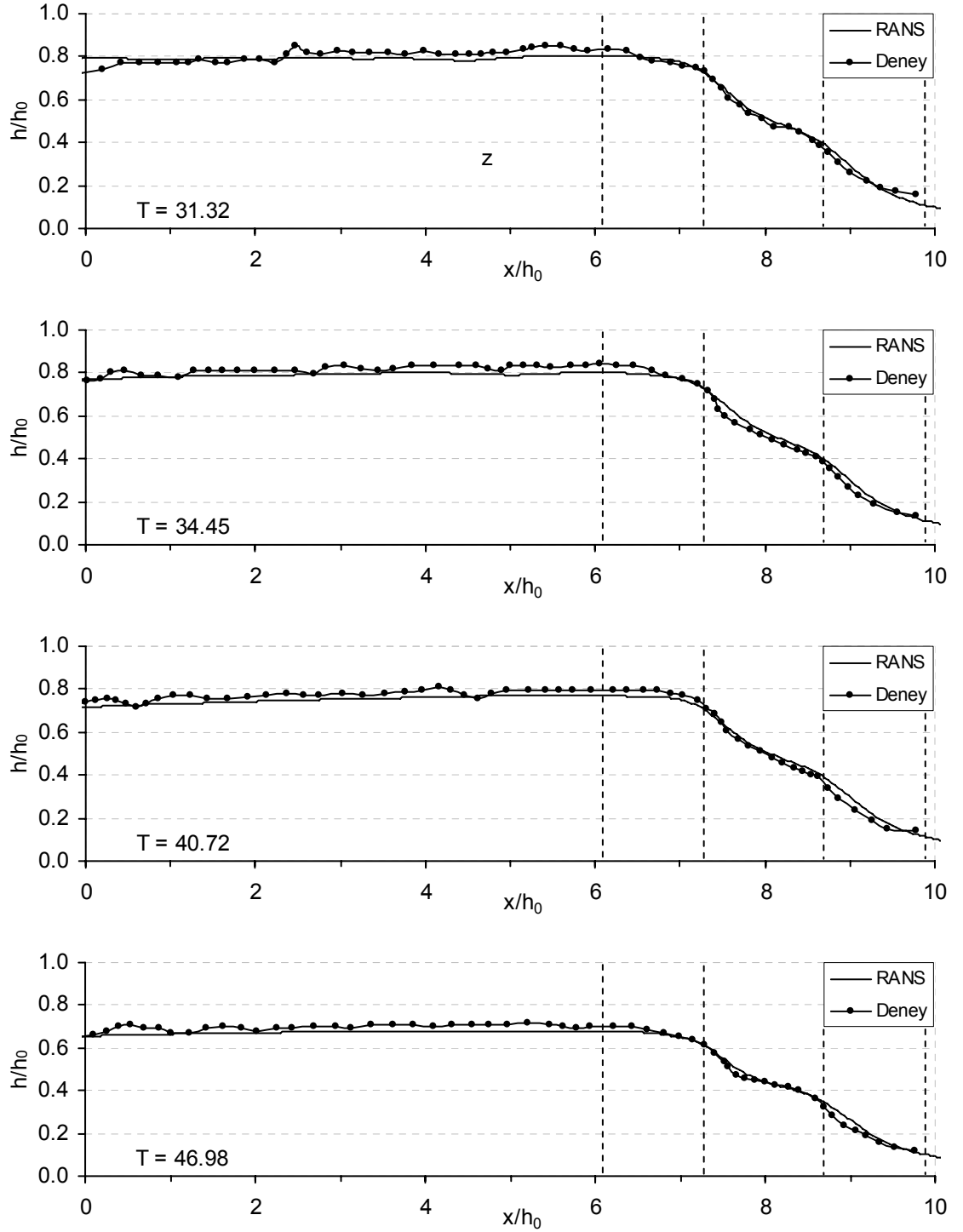
Şekil 5.57’de trapez-A daralma durumu için farklı zamanlarda elde edilen deneysel su yüzü profilleri RANS denklemlerine dayanan sayısal çözüm ile karşılaştırılmıştır. Taşkın dalgasının daralmış kesitten geçtiği $T=11.28$ anından itibaren $T=47$ anına kadar kısa zaman aralıklarına sahip 12 adet grafik ile akımın davranışı aşamalı şekilde sayısal ve deneysel olarak gösterilmiştir. Grafiklerde enkesit değişimi $x/h_0=6$ ve $x/h_0=10$ noktaları arasında bulunmaktadır (kesikli çizgi ile gösterilmektedir). Kapağın ani olarak kalkması sonucu oluşan taşkın dalgasının daralmış kesite ulaşmasıyla ($T=11.28$) en dar kesitin olduğu yerde su seviyesi hızla yükselmektedir. Bu aşamada daralmış kesitte membadaki su yüzeyinin eğimi sayısal sonuçta daha fazla olmaktadır. Daralma bölgesinin membasındaki uzak kısımlarda ise sayısal ve deney sonuçları oldukça uyumludur. $T=13.15$ anına gelindiğinde her iki sonuç için su yüzeyinin yükselmeyle birlikte memba yönünde hareket ettiği görülmektedir. Bu sırada RANS çözümünde memba yüzeyi daha diktir ve maksimum su yüksekliği deney sonuçlarının üzerindedir.



Şekil 5.57a. Mansapta trapez-A daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri



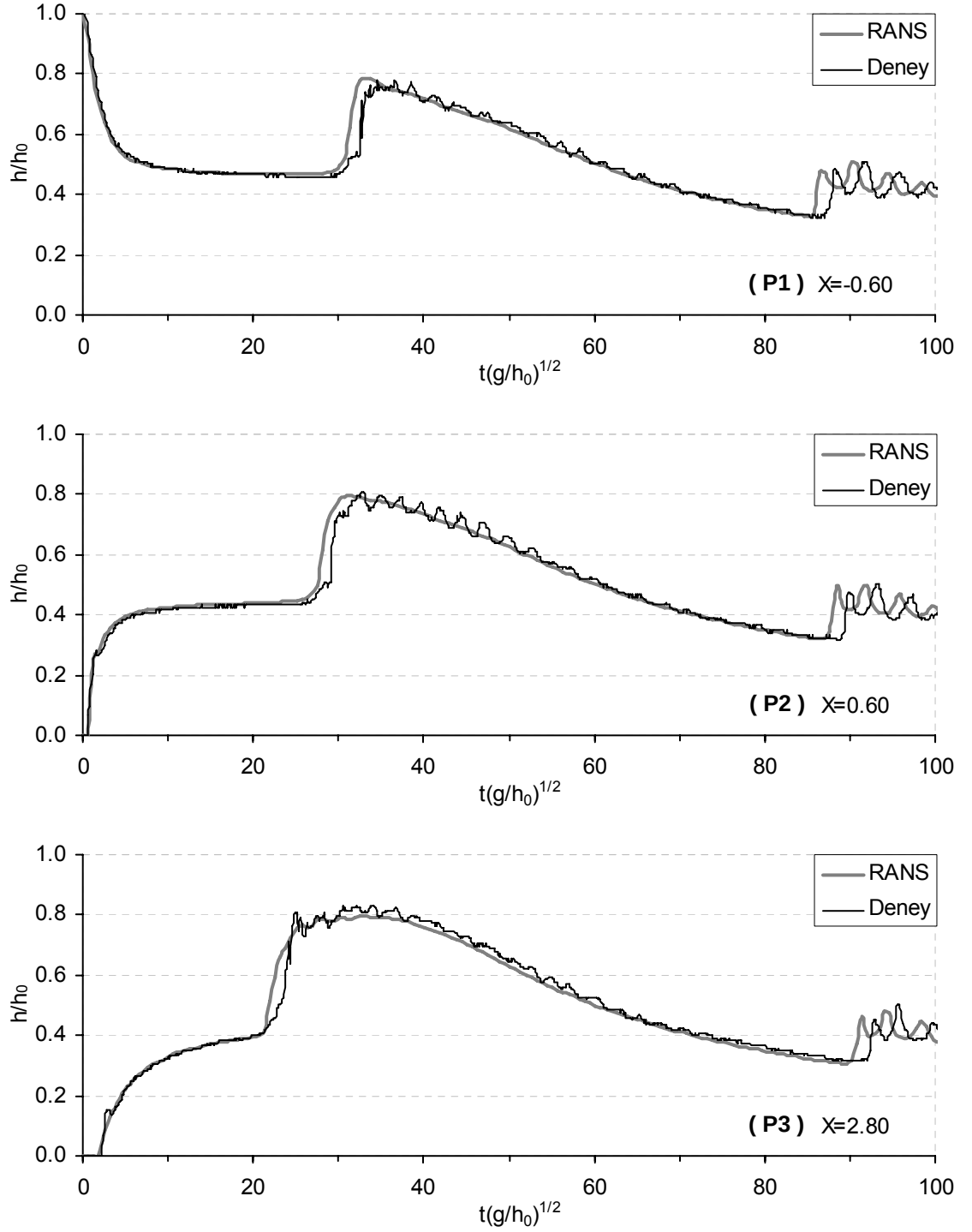
Şekil 5.57b. Mansapta trapez-A daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri



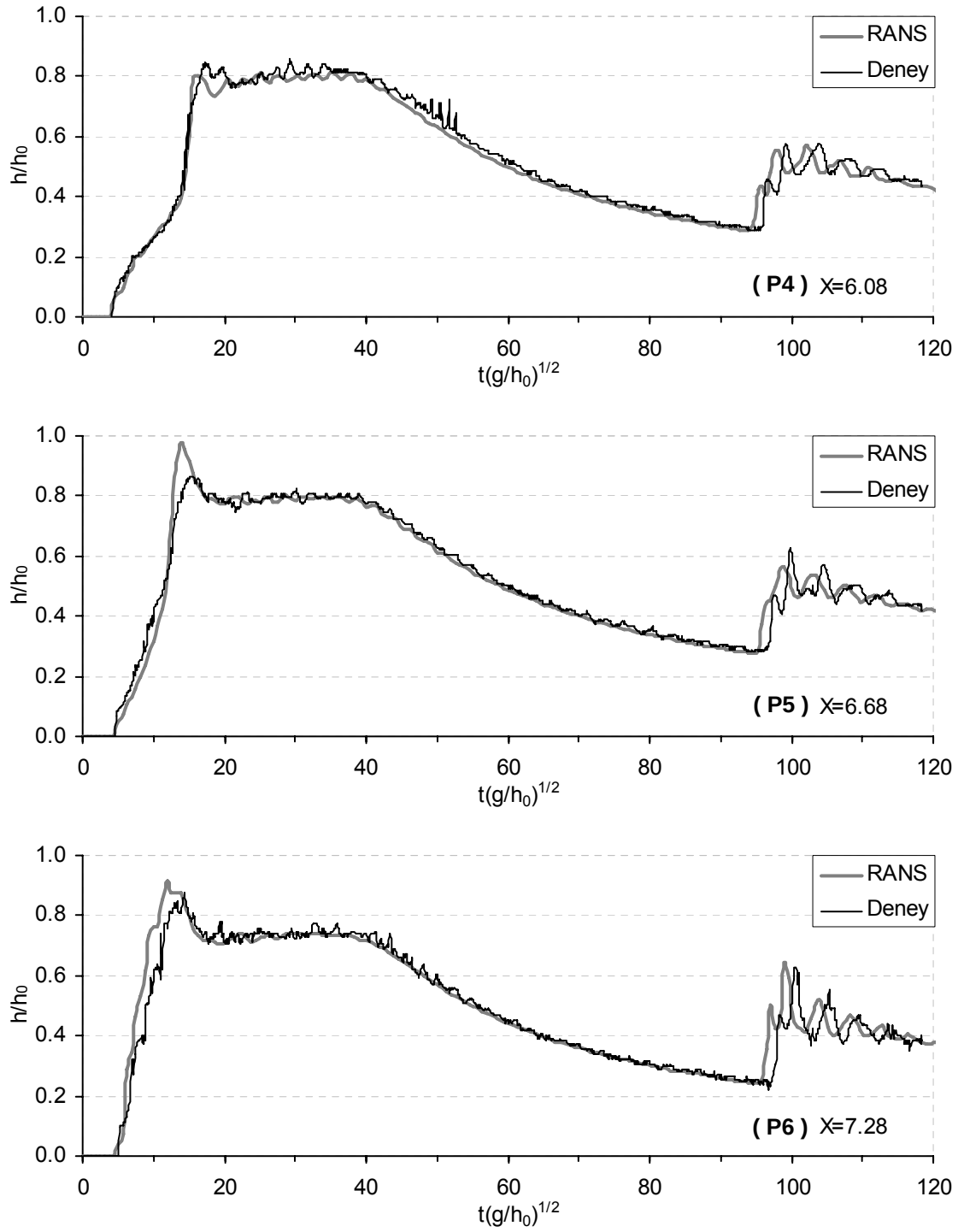
Şekil 5.57c. Mansapta trapez-A daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri

Sayısal çözümdeki maksimum yükseklik neredeyse başlangıçtaki rezervuar yüksekliğine yaklaşmaktadır. Zaman ilerledikçe ($T=15.03$) memba yüzeyinin eğimi daha da artmakta ve bir süre sonra ($T=16.91$) geriye doğru dalga kırılmaktadır. Kırılmayla birlikte maksimum su seviyesi de azalmaktadır. Daha sonra ($T=18.79$ - 28.19) RANS ve deney sonuçlarının her ikisinde memba yönünde hareket eden kabarma dalgasının oluştuğu görülmektedir. Kabarma dalgası oluşumundan sonra deneysel ve sayısal sonuçlar arasında belirgin bir uyum görülmektedir. Sadece deney sonuçlarında su yükseklikleri sayısal sonuçlara göre biraz yüksek çıkmaktadır. Dikkat edilirse taşkın dalgasının daralmış kesite ulaşmasından negatif kabarma dalgası oluşumuna kadar geçen sürede deney ve sayısal sonuçlar arasında sapma olduğu görülmektedir. Bunun nedeni grafiklerde açıkça görülmesi de sayısal sonuçlarda dalganın daralmış kesitten yansıması sonucu sıçrama tipi dalga kırılmasının oluşması, deneylerde ise kırılmanın taşma şeklinde meydana gelmesidir. Ayrıca deney sonuçları elde edilirken görüntülerde hidrolik sıçramanın ve hava girişiminin olduğu köpüklü kısımlarda yüzey sınırları belirlenirken köpük üst sınırı dikkate alınmıştır. Bu nedenle başlangıç aşamalarında negatif dalga önü bir miktar daha önde çıkmaktadır.

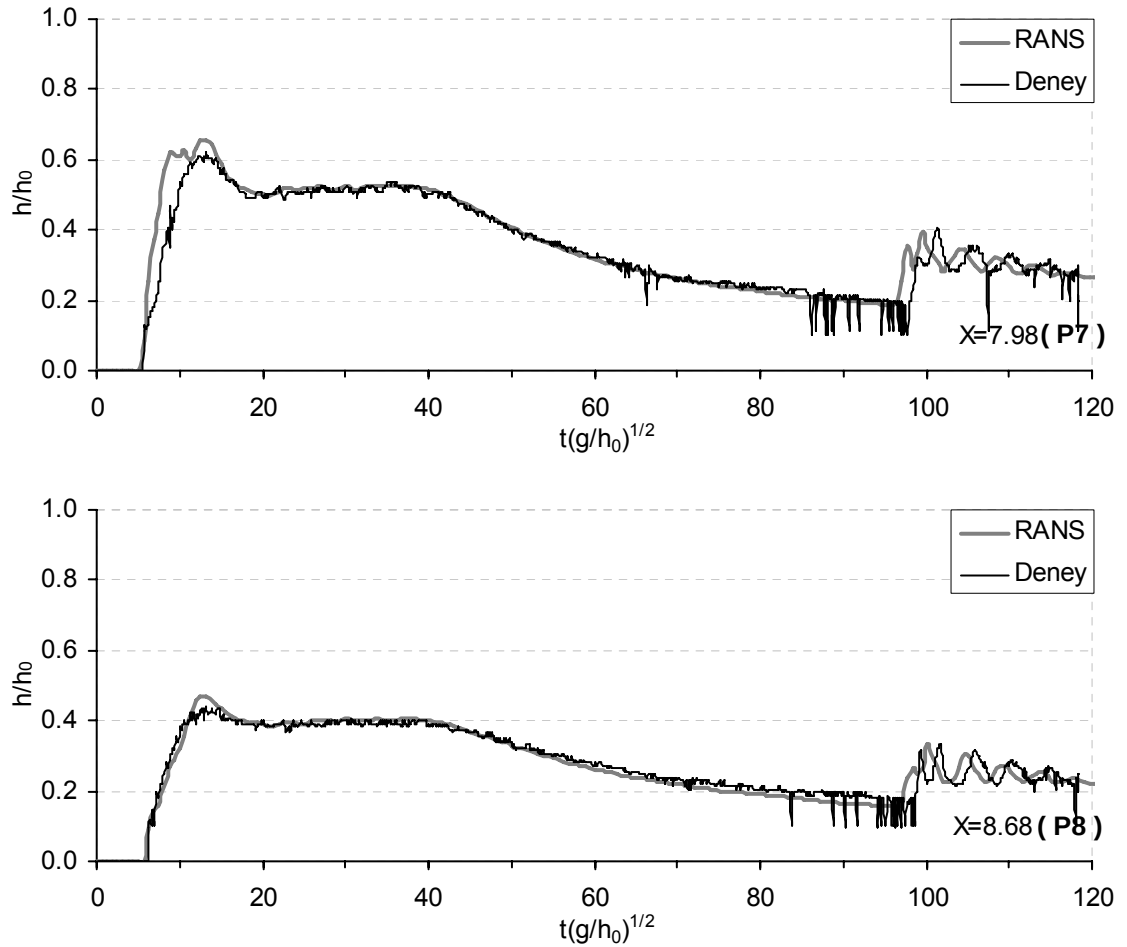
Şekil 5.58’de 3 kameradan elde edilen video görüntülerinden yararlanılarak kanal boyunca farklı noktalarda belirlenen su seviyelerinin zamanla değişimleri RANS denklemlerine dayanan sayısal çözüm ile karşılaştırılmıştır. Su seviyesi değişimleri 16 s süresince 0.020s aralıkla çekilmiş 800 adet görüntünün analizi sonucu belirlenmiştir. Biri barajın membasında ve diğerleri mansabında olmak üzere toplam 8 farklı ölçüm noktasının baraj aksından uzaklıkları Şekil 5.53’de verilmiştir. Şekil 5.58’de verilen grafiklere bakıldığında genel kanal boyunca elde edilen su seviyesi değişimlerinin RANS çözümü ile oldukça uyum sağladığı söylenebilir. Bununla birlikte sonuçlar arasında dikkati çeken bazı farklılıklar bulunmaktadır. RANS çözümü ile elde edilen daralmış kesitten yansıyan negatif kabarma dalgası P1, P2 ve P3 noktalarına daha erken varmaktadır. Dolayısıyla RANS çözümünde kabarma dalgasının çok az daha hızlı ilerlediği söylenebilir. Görüntülerin analizi sırasında renk filtresinin uygulanması sonucu yansıyan kabarma dalgası önünde meydana gelen köpüklenme bölgesi, olduğundan biraz daha kısa görülmektedir.



Şekil 5.58a. Trapez-A daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 5.58b. Trapez-A daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 5.58c. Trapez-A daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması

Bu nedenle P1, P2 ve P3 noktalarında yansıyan kabarma dalgası önleri arasındaki bu farklılık gerçekte biraz daha küçüktür. Ayrıca bu noktalarda deney sonuçlarına ait alçalma eğrilerinde su yüzeyinde küçük salınımlar gözlenirken RANS çözümünde su yüzeyi daha düzgün olmaktadır. Bunun dışında P5, P6 ve P7 noktalarında taşkın dalgasının daralma kesitine ulaşmasıyla birlikte su seviyesinin hızlı yükseldiği kısımlarda RANS ve deney çözümleri arasında belirgin farklılıklar göze çarpmaktadır. Bunun nedeni, taşkın dalgasının daralmış kesitten ilk geçişi ($T=0.9-1.8$) sırasında su yüzeyinde önemli sıçramaların meydana gelmesi ve ölçümlerin görüntüler yardımı ile yapılmasından dolayı bu sıçramaların tam olarak yakalanması ile açıklanabilir. Kanalin tekrar genişlemeye başladığı P8 noktasında sıçrama

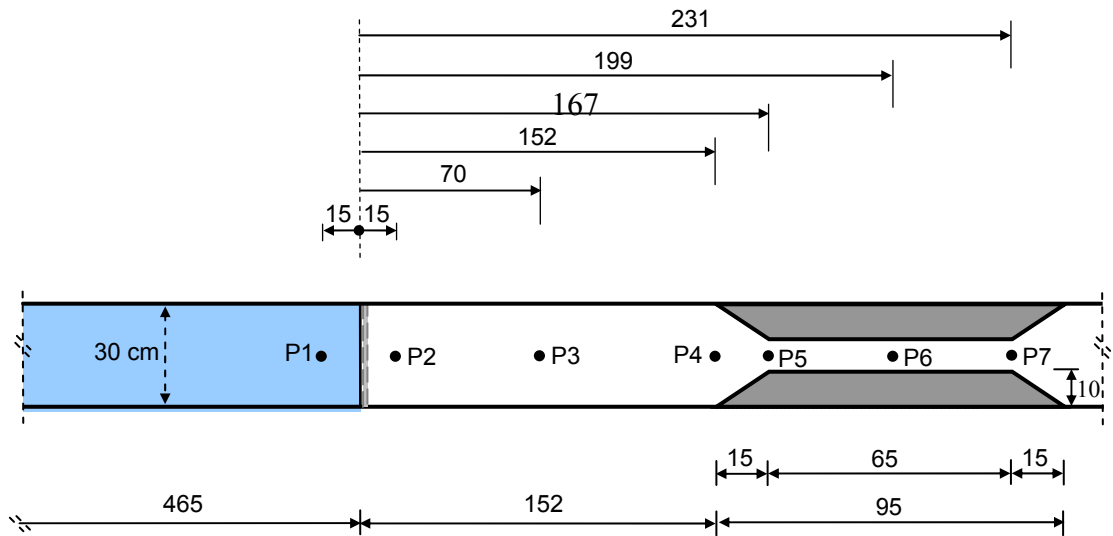
olmadığından iki sonuç arasındaki yükselme eğrisi daha uyumlu olmaktadır. Ayrıca P5 noktasında RANS denklemleri ile elde edilen maksimum su seviyesi deney sonuçlarına göre oldukça yüksek çıkmaktadır. Bu durumun sebebi RANS çözümünde taşkın dalgasının daralmış kesit yüzeyinden yansıması sonucu sıçrama tipi (plunging) dalga kırılmasının meydana gelmesidir. Dikkat edilirse P4 noktasına gelindiğinde yansıyan dalga kırılmış ve elde edilen maksimum su seviyesi deney sonuçlarının bir miktar altında kalmıştır.

Grafiklerde su seviyeleri alçalmakta iken kanal memba ucundan yansıyan kabarma dalgasının ölçüm alınan kesitlere tekrar ulaşmasıyla birlikte bu noktalarda su seviyelerinin hızla yükseldiği ve su yüzeyinde dalgalanmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu sırada oluşan maksimum su yüksekliklerinin ve dalgalanmaların RANS denklemleri ile oldukça iyi bir biçimde modellenemediği ve deney sonuçları ile belirgin bir uyum sağladığı gözlenmektedir. Buna karşın RANS çözümünde dalga önu ölçüm alınan noktalara daha erken ulaşmaktadır. Dikkat edilirse deney sonuçları RANS denklemlerine göre bir miktar ötelenmiş gibi görülmektedir. Bu nedenle RANS denklemleri kullanılarak yapılacak baraj yıkılması analizlerinde bir miktar emniyetli yönde kalınacağı söylenebilir.

Sonuç olarak üçgen daralma durumuna göre daralma mesafesi daha kısa olan Trapez-A durumunda meydana gelen daha güçlü yansımalar RANS denklemleri ile oldukça iyi bir biçimde çözülebilmektedir. Ayrıca başlangıç anındaki su yüzeyindeki sıçramalar dışında kanal boyunca herhangi bir noktadaki su seviyesinin zamanla değişimlerinin video görüntüler kullanılarak etkili bir biçimde belirlenebileceği de görülmüştür.

5.6.3. Baraj Mansabında Trapez-B Daralma Durumu

Baraj yıkılması taşkın dalgasının daha sert en kesit değişimine sahip bir bölgeden geçişi sırasında akımın davranışında meydana gelen değişimleri incelemek amacıyla baraj mansabında trapez-B olarak adlandırılan ikinci bir daralma durumu ele alınmıştır (Şekil 5.59). Bu daralma durumu trapez-A daralma durumuna benzer biçimde 95 cm geçiş uzunluğuna sahiptir ve kanal genişliği trapez geometriye sahip iki engelin kanal içerisine simetrik olarak yerleştirilmesiyle 1/3 oranında daraltılarak akımın geçebileceği 10 cm genişliğinde bir aralık bırakılmıştır. Buna karşın daralma mesafesi (P4-P5 noktaları arasındaki mesafe) daha kısa tutularak daha sert bir geçiş düşünülmüş ve taşkın dalgasının gelişi ile birlikte daha güçlü yansımaların meydana gelmesi amaçlanmıştır. Böylelikle sayısal yöntemin ve ölçüm sisteminin hassaslığı daha güçlü yansımaların olması durumu için irdelenmiştir.



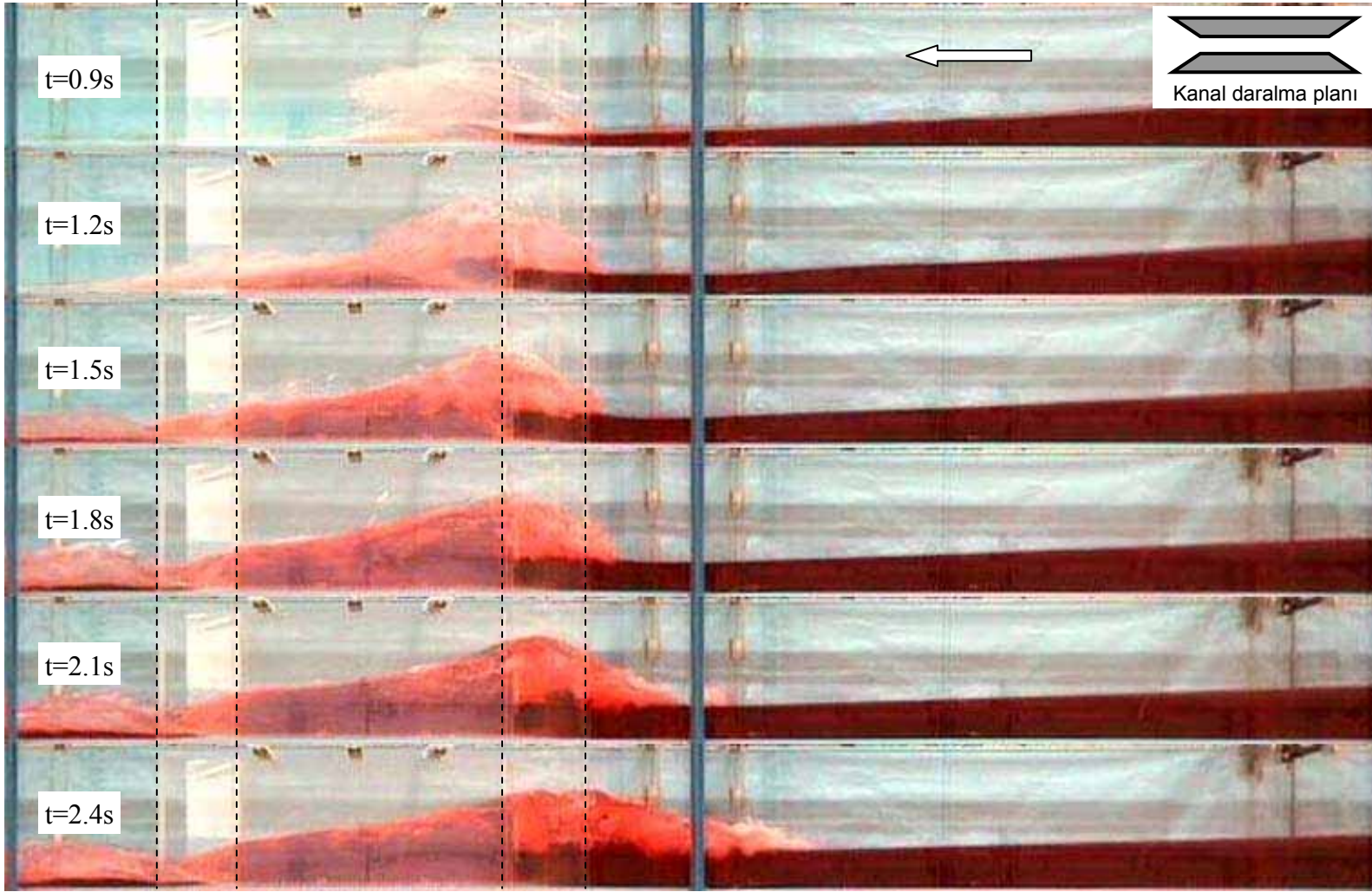
Şekil 5.59. Baraj mansabında trapez-B daralma bulunması durumu için kanal planı

Enkesit değişimi baraj aksından 152 cm uzaklıkta başlamaktadır. Başlangıçtaki rezervuar derinliği $h_0=25$ cm ve rezervuar uzunluğu 465 cm olarak alınmıştır. Barajın mansap kısmı başlangıçta kuru kabul edilmiştir. Akımın kolaylıkla izlenebilmesi ve serbest yüzeyin daha belirgin olması için rezervuardaki su içerisine kırmızı renkte gıda boyası katılmıştır. Kapağın ani olarak kaldırılması ile oluşan

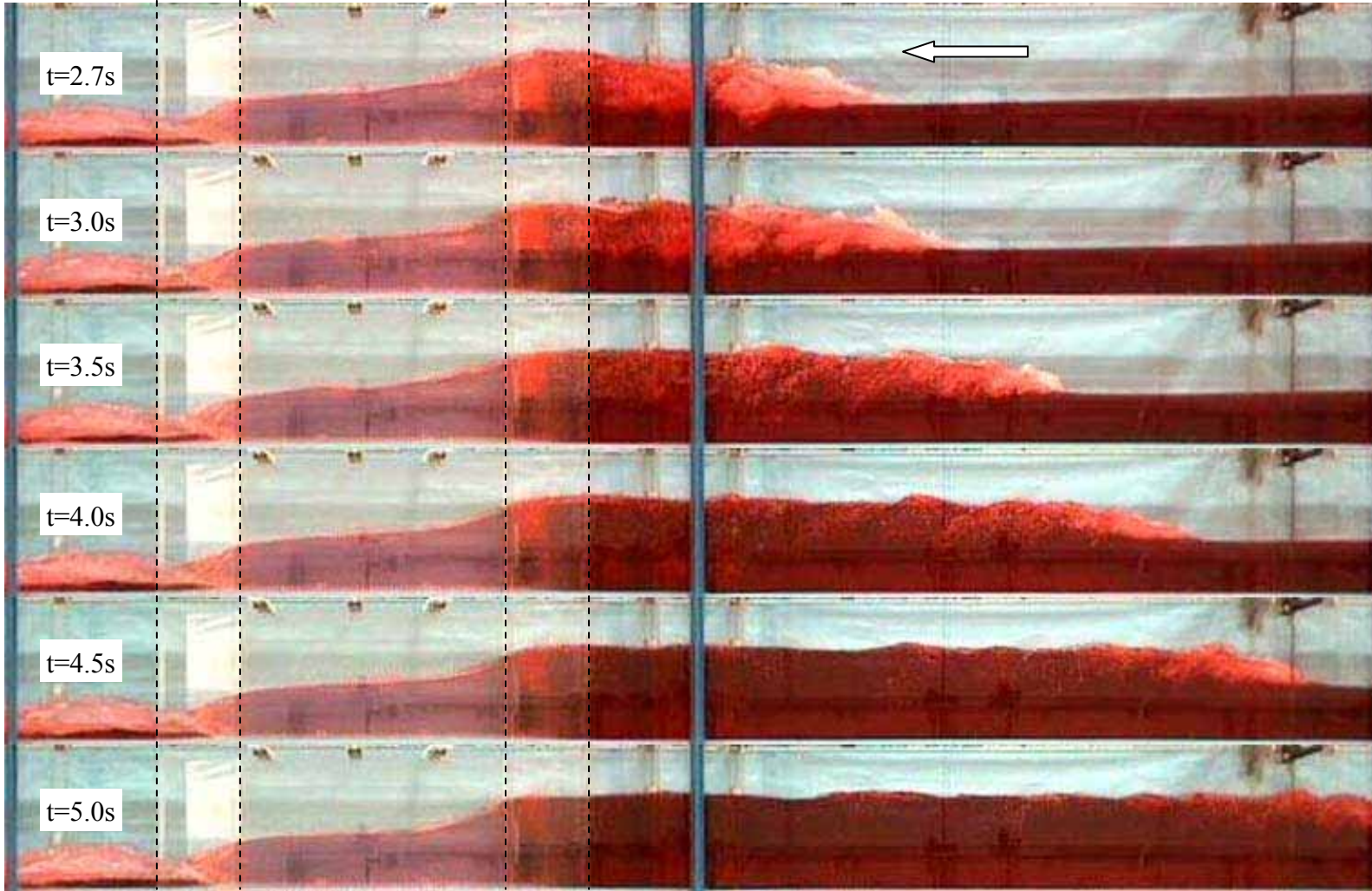
taşkın dalgasının enkesit değişimi ile karşılaşması sonucu meydana gelen su yüzü profilleri ve Şekil 5.59’da barajdan uzaklıkları verilen toplam 7 noktada (P1-P7) su seviyesinin zamanla değişimleri video görüntüler yardımıyla belirlenmiştir.

Şekil 5.60’da mansapta trapez-B enkesit değişimi bulunması durumunda taşkın dalgasının daralma kesitine ulaştığı andan ($t=0.9s$) itibaren belirli zaman aralıkları ile 5s süresince elde edilen deney görüntüleri verilmiştir. Mevcut görüntüler iki ayrı video kameradan elde edilen görüntülerin birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Görüntüler üzerinde bulunan kesikli çizgiler en kesit değişiminin olduğu sınırları göstermektedir. Kapağın ani olarak kaldırılması sonucu mansap doğrultusunda ilerleyen taşkın dalgasının daralma bölgesine ulaşmasıyla ($t=0.9s$) birlikte sıkışan su kanal yan duvarlarına tırmanarak sıçramakta ve daha sonra ($t=1.2-1.8s$) en dar kesitin başladığı yerde (akım doğrultusunda ikinci kesikli çizgi) su seviyesi hızla yükselmektedir. Bu aşamada su yüzeyinde sıçramalar görülmekte ve oldukça önemli miktarda hava girişimi söz konusudur. Sonrasında $t=2.1s$ anına gelindiğinde su seviyesinde yükselirken tepe noktası da memba yönünde harekete başlamıştır. Tepe noktasının daralma bölgesinden çıkışı ile birlikte ($t=2.4-3.0s$) memba yönünde hareket eden bir kabarma dalgası oluşmuştur. Ayrıca daralmış kesitin membasındaki maksimum su seviyesinde de bir miktar düşüş gözlenmektedir. Bu aşamada yansıyan negatif dalga ve gelen dalganın girişim yaptığı yerde önemli hidrolik sıçrama meydana gelmektedir. Bu bölgede su yüzeyinde salınımlar ve önemli ölçüde hava girişimi bulunmaktadır. Kabarma dalgası memba yönünde ilerledikçe ($t>3.5s$) daralmış kesit arkasındaki daha kararlı hale gelmekte kabarma dalgası önündeki hidrolik sıçramanın büyüklüğü de gelen akım debisinin azalmasından dolayı küçülmektedir. Ayrıca görüntülerde daralmış kesit membasındaki su yüzeyinin azalan bir eğime sahip olduğu görülmektedir ($t=4s$).

Daralmış kesit membasında su seviyesinin hızlı yükselmesi ve negatif kabarma dalgası oluşumu önceki bölümlerde bahsedildiği gibi gelen akıma ait anlık özgül enerji-minimum enerji ilişkisi ile açıklanabilir. Gelen taşkın dalgasının özgül enerjisi daralmış kesitteki gerekli olan minimum enerjiden küçük olmasından dolayı daralmış kesitten aynı oranda geçememektedir.



Şekil 5.60a. Mansapta trapez-B daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri

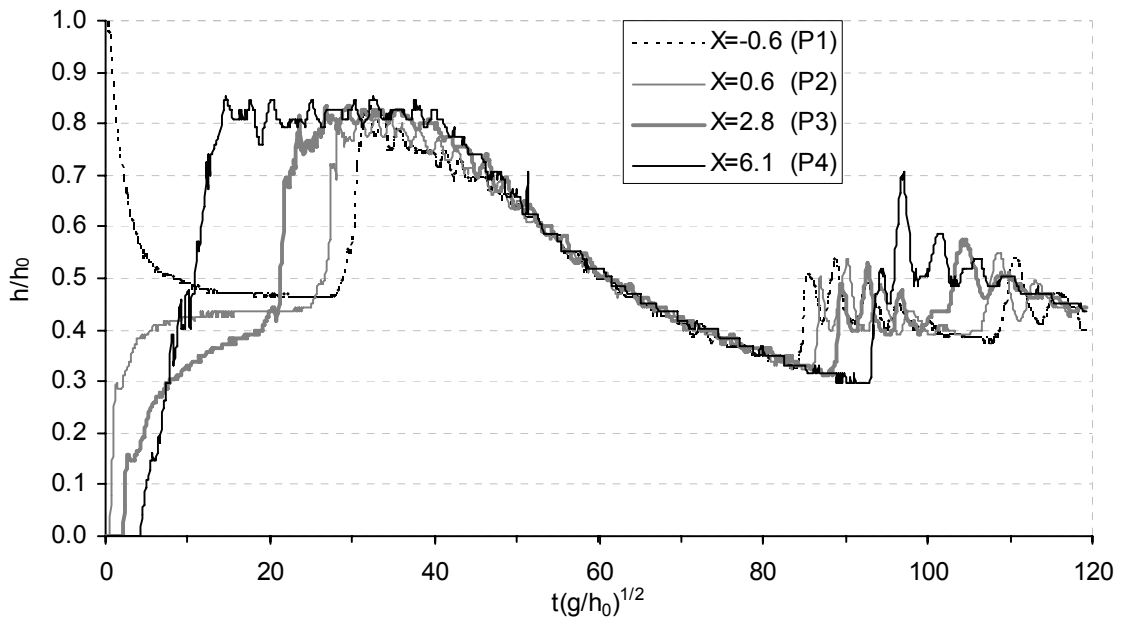


Şekil 5.60b. Mansapta trapez-B daralma olması durumunda elde edilen deney görüntüleri

Gelen sel rejimindeki hızlı değişken akım minimum enerji seviyesine ulaşabilmek için kısa sürede su seviyesini yükseltmektedir. Bu da ancak hidrolik sıçramayla akımın nehir rejimine geçmesi ile mümkün olmaktadır. Şekil 5.60’da verilen görüntülerde başlangıç aşamasından itibaren daralmış kesit mansabında hidrolik sıçramaların meydana geldiği gözlenmektedir. Daralmış kesitten taşkın dalgasının yansması ve gelen akım debisinin zamanla azalmasından dolayı bu hidrolik sıçrama memba yönünde hareket eden bir kabarma dalgasına dönüşmektedir. Hidrolik sıçrama sonucu akımın enerjisi kırılarak su seviyesi yükselmekte ve sıçrama sonrası kısımda akım nehir rejimine geçmektedir. En kesitin değişiminin olduğu bölgenin mansabında akım eski genişliğine ulaştığından minimum enerjisi de düşmektedir. Bu nedenle daralmış kesit membasındaki enerji fazlalığı nedeniyle akım daralmış kesitten mansaba doğru ilerledikçe hızlanarak su yüksekliğini azaltmakta ve kritik bir yükseklikten geçmektedir. Dolayısıyla daralmanın mansap kısmındaki akım sel rejimindedir. En kesit değişiminin sabit olduğu kısım (ortadaki iki kesikli çizgi arası) uzun olduğundan su yüzeyinin eğimi de trapez-A durumuna göre daha az olmaktadır. Kritik yüksekliğin bu bölgenin dolayısıyla en kesit değişiminin orta kısmına yakın bir yerde meydana geldiği öngörülebilir.

Şekil 5.61’de trapez-B durumu için daralma bölgesinin membasında kalan belirli noktalardaki su seviyesinin zamanla değişimleri görülmektedir. Barajdan uzaklıkları Şekil 5.59’da verilen 4 farklı noktada su seviyesi değişimleri yaklaşık 19 s süresince 0.020 s aralıkla çekilmiş üç video kamera görüntüsünün analizi sonucu belirlenmiştir. Her bir ölçüm için yaklaşık 950 görüntüden yararlanılmıştır. Grafikte P1 ve P2 noktaları sırasıyla barajın hemen memba ve mansabındaki değişimi göstermektedir. P4 noktası daralmanın başlangıç yeri, P3 noktası ise baraj ile daralmanın başladığı yer arasında yaklaşık orta noktadadır. Kapağın kalkmasıyla birlikte membadaki su seviyesinde hızlı bir azalma gözlenirken mansaptaki noktalarda taşkın dalgasının gelişile birlikte hızlı bir yükselme göze çarpmaktadır. P3 noktası P2 noktasına göre daha ilerde olduğu için su seviyesindeki yükselme daha yavaş gerçekleşmektedir. Bununla birlikte P4 noktası P3 noktasına göre daha ilerde olmasına rağmen P4 noktasında su seviyesi daha hızlı ve kesintisiz bir biçimde

maksimum yüksekliğe ulaşmaktadır. Bunun nedeni bu noktanın daralma kesitine yakın olması ve taşkın dalgasının daralmış kesitten yansıması ve bu nokta civarında hızla yükselmesinden kaynaklanmaktadır. Grafikte gözlenen maksimum su seviyesi daralmanın başladığı P4 noktasında $T=14.66$ anında $h/h_0=0.85$ olarak okunmuştur. Diğer noktalarda (P1-P3) maksimum su seviyeleri daralmış kesitten yansıyan kabarma dalgasının bu noktalara ulaşmasından sonra meydana gelmektedir ve daralmış kesitten memba doğrultusunda gidildikçe meydana gelen maksimum su yükseklikleri bir miktar azalmaktadır. Ayrıca P4 noktasındaki maksimum su seviyesinin uzun bir süre sabit kaldığı ve memba yönünde ilerledikçe (sırasıyla P3, P2, P1) bu sürenin azaldığı görülmektedir.



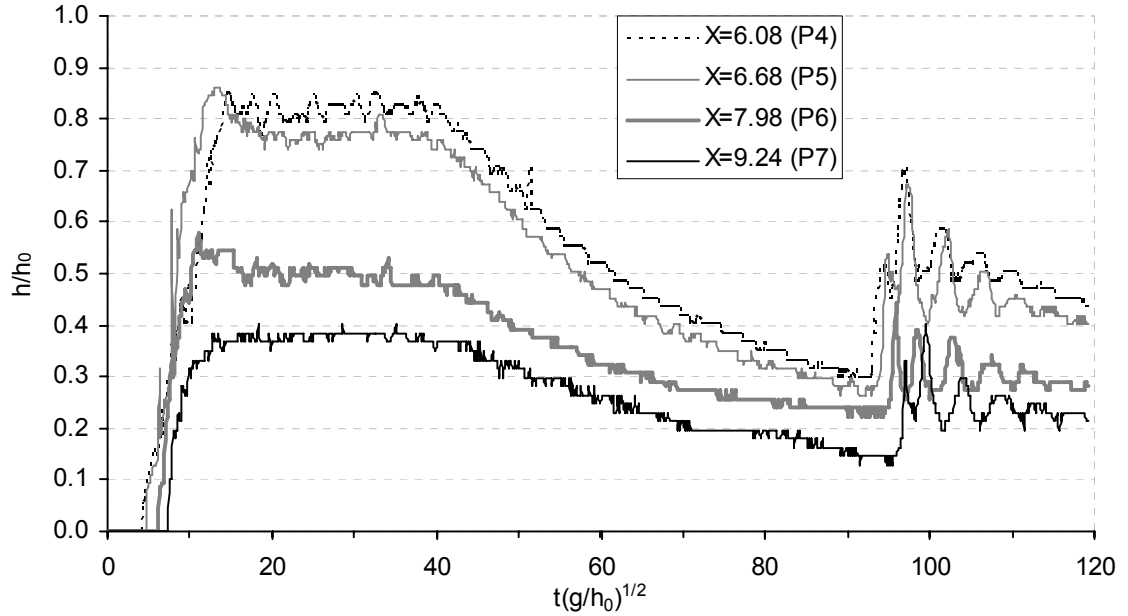
Şekil 5.61. Trapez-B daralma durumu için daralma kesiti membasındaki noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri

P1 noktasında kabarma dalgasının geçişi ile birlikte su seviyesi hızla azalmaktadır. Bu davranışın nedeni daha önce bahsedildiği gibi rezervuarın sonlu bir büyüklüğe sahip olması ile açıklanabilir. Daralmış kesitten yansıyan kabarma dalgası P1 noktasına ulaşıncaya kadar rezervuardaki su seviyesi hızlı düşüşe geçtiğinden, kabarma dalgasının geçişi ile birlikte bu noktadaki su seviyesi de bir süre sabit

kalmaksızın azalmaktadır. Şekil 5.61’de farklı noktalardaki azalma eğrilerinin çakıştığı görülmektedir. Bu da alçalma sırasında su yüzeyinin kanal boyunca yatay olduğunu ve su seviyesinin her yerde aşağı yukarı aynı oranda azaldığını ifade etmektedir. Grafikte yaklaşık $T=85$ anından itibaren su seviyesinde tekrar bir yükselme ve sonrasında su yüzeyinde farklı boyda ve genlikte dalgalanmalar göze çarpmaktadır. Bu durum, daralmış kesitten yansıyan kabarma dalgasının kanal memba ucundaki düşey duvardan yansmasıyla birlikte tekrar mansap doğrultusunda hareket eden bir dalga treninin oluştuğunu göstermektedir. Dikkat edilirse $T=85$ anından itibaren sırasıyla P1, P2, P3 ve P4 noktalarında dalgalanmalar başlamaktadır. P4 noktasında dalga treninin daralmış kesitten geçişi sırasında diğer noktalara oranla su seviyesinde belirgin bir yükselme göze çarpmaktadır. Bu durum daralmış kesite giren dalganın sıkışması ve buradan kayıpsız geçebilmesi için enerjisini dolayısıyla su seviyesini hızlı bir biçimde yükseltmesi ile açıklanabilir. Dalga treninin daralmış kesitten geçişi sırasında akımın bir kısmı tekrar yansımakta ve memba yönünde hareket eden yeni bir dalga oluşturmaktadır. Örnek olarak Şekil 5.61’de P3 noktasında yaklaşık $T=105$ anına bakılırsa su seviyesinin bu yansımadan dolayı ikinci kez bir miktar yükseldiği görülmektedir.

Şekil 5.62’de ise Trapez-B daralma durumu için en kesit değişiminin olduğu bölgede 4 farklı noktada elde edilen su seviyelerinin zamanla değişimleri bir arada verilmiştir. Ölçümler kesit değişiminin olduğu P4, P5 ve P7 noktalarında ve su seviyesi değişiminin kritik olacağı düşünülen P6 noktasında alınmıştır. Taşkın dalgasının daralma kesitinden geçişi ile birlikte ölçüm noktalarında su seviyesi kesintisiz bir biçimde hızla maksimum su seviyelerine ulaşmaktadır. P4 ve P5 noktalarında su seviyesi yaklaşık aynı anda yükselmeye başlamasına rağmen P5 noktasında maksimum su seviyesine ($h/h_0=0.86$) daha erken sürede ($T=13.78$) ulaşılmıştır. Bu değer kanal boyunca meydana gelen en yüksek su seviyesidir. P4 noktasında ise maksimum su seviyesi $T=14.66$ anında $h/h_0=0.85$ olarak okunmuştur. P4 ve P6 noktalarında okunan bu değerler birbirine oldukça yakındır. Buradan kanal boyunca meydana gelen maksimum derinliğin bu iki nokta arasında bir yerde meydana geleceği sonucuna varılabilir. Bununla birlikte P5 noktasında maksimum derinlik elde edildikten sonra su seviyesi bir miktar azalıp bir süre sabit bir değerde

kalmaktadır. P4 noktasında ise maksimum yükseklik elde edildikten sonra su yüzeyinde salınımlar olmakla birlikte su seviyesi bir süre sabit kalmaktadır.



Şekil 5.62. Trapez-B daralma durumu için daralma bölgesindeki noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimleri

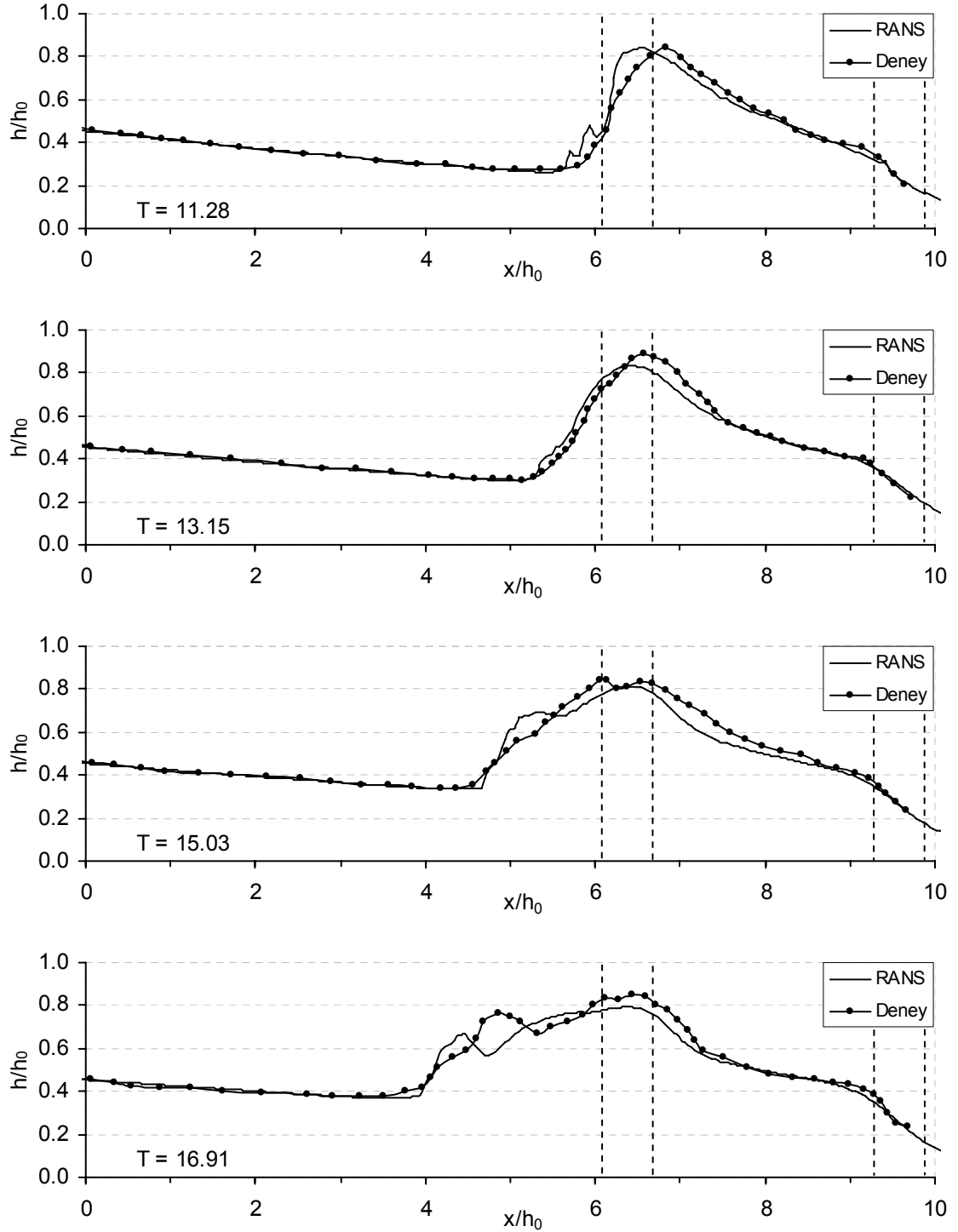
P6 ve P7 noktaları en dar kesitin mansabında kaldıklarından su seviyesi bu noktalarda daha geç yükselmeye başlamaktadır. Ayrıca elde edilen maksimum yükseklikler ve su seviyeleri mansap doğrultusunda ilerledikçe azalmaktadır. P6 eğrisi en kesit değişiminin olduğu bölgenin ortasında yer aldığından bu noktadaki su seviyesinin maksimum yüksekliğe ulaşmasından sonraki aşamalarda P6 eğrisinin kritik yükseklik eğrisini verdiği düşünülebilir. Bu bilgilerle en dar kesitin başladığı (P5) noktasının membasında maksimum su yükseklikleri elde edilirken bu noktanın mansabına doğru su seviyelerinin azalmakta olduğu söylenebilir. Şekil 5.62’de kanal memba ucundan kabarma dalgasının yansıması sonucu oluşan dalga treninin $T=93$ anında daralma kesitine ulaştığı ve su seviyesinde tekrar hızlı bir yükselmenin meydana geldiği görülmektedir. Dalga treninin en dar kesitin membasındaki noktalarda (P4-P5) daha yüksek dalga genliğine sahip olduğu, mansap doğrultusunda

ilerledikçe (P6-P7) genliklerinin azaldığı görülmektedir. Dikkat edilirse dalga treni belirgin bir bozulmaya uğramadan enkesit değişiminin olduğu bölgeden geçmektedir.

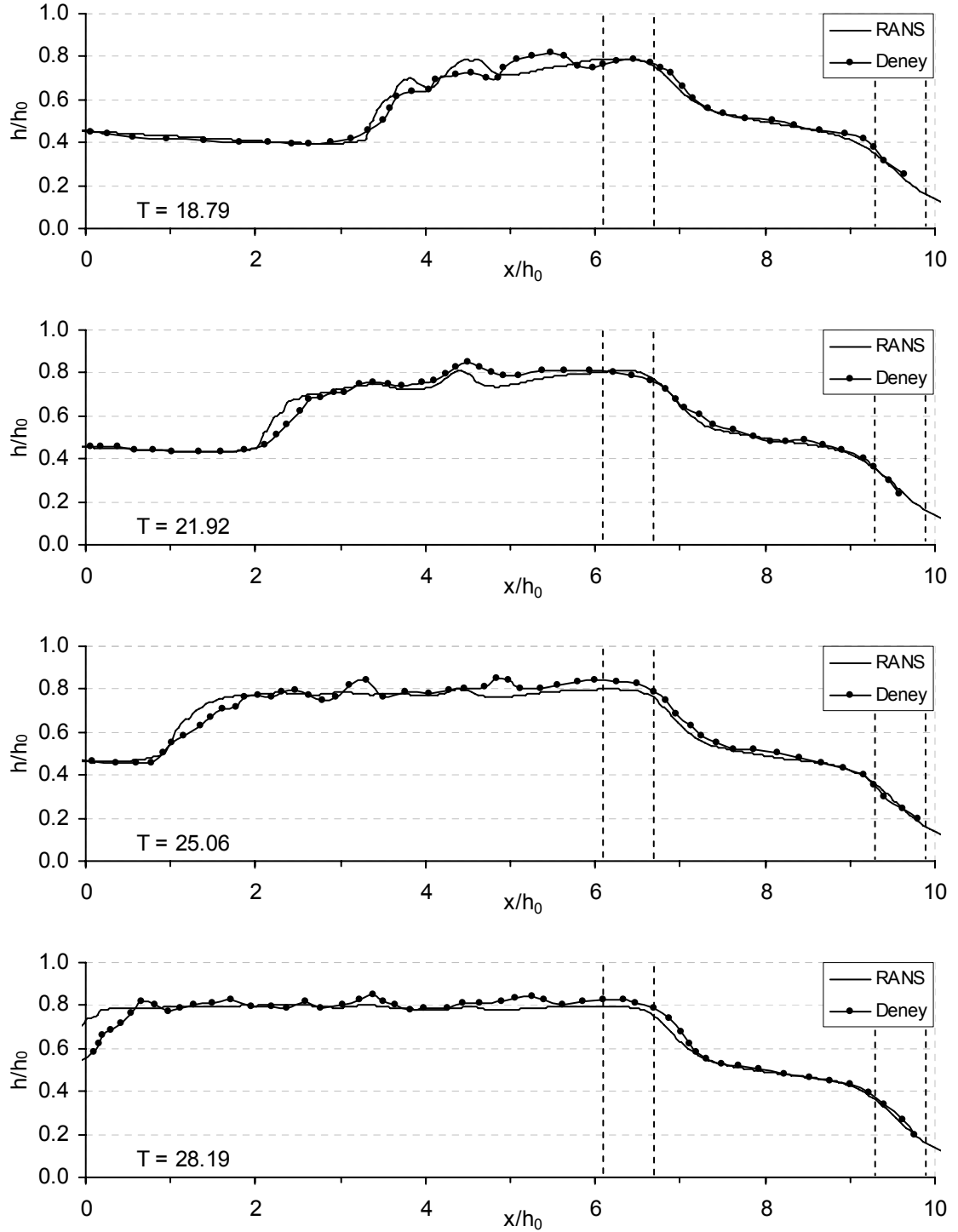
5.6.3.1. Trapez-B Daralma Durumunda Elde Edilen Deney Sonuçlarının Sayısal Sonuçlarla Karşılaştırılması

Trapez-B daralma durumu için görüntülerden elde edilen deneysel verilerin değerlendirilmesi için Şekil 5.59'da planı verilen deney kanalı, FLOW-3D yazılımı yardımıyla 3-boyutlu olarak çözülmüştür. Daralma bölgesindeki engel geometrisi dışında problemin sınır şartları, ağ aralıkları ve diğer tüm parametreleri Bölüm 5.6.1.1'de üçgen daralma durumu için kullanılan değerler ile aynı alınmıştır.

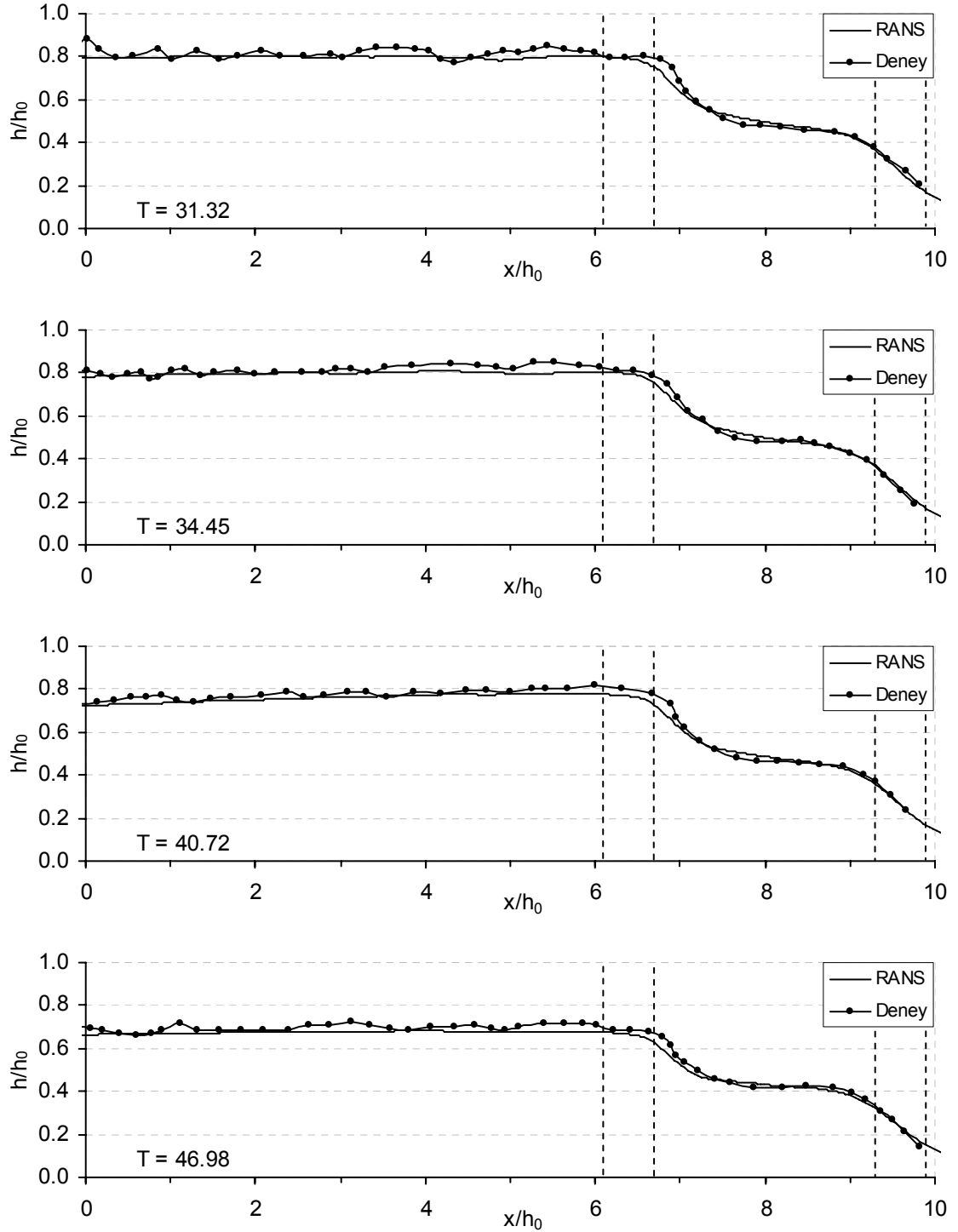
Şekil 5.63'de trapez-B daralma durumu için elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profilleri verilmiştir. 3-boyutlu RANS denklemlerine dayanan sayısal çözüm kanal genişliğinin orta noktasında hesaplanan su yüzü profillerini göstermektedir. Taşkın dalgasının daralmış kesitten geçtiği $T=11.28$ anından $T=47.0$ anına kadar elde edilen 12 adet grafik kullanılarak su yüzü profillerinin gelişim aşamaları detaylı olarak gösterilmiştir. Grafiklerde $x/h_0=6$ ve $x/h_0=10$ arasında gösterilen düşey doğrultudaki kesikli çizgiler en kesit değişiminin olduğu yerleri ifade etmektedir. Kapağın ani açılması ile birlikte mansap doğrultusunda ilerleyen taşkın dalgasının daralmış kesiti geçtiği ilk anlardan ($T=11.28$) itibaren daralmış kesitin membasında su seviyesinin hızla yükseldiği ve memba doğrultusunda yayılan bir kabarma dalgasının oluştuğu sayısal ve deneysel sonuçlarda görülmektedir. Grafiklerde yansıyan dalga'nın etkisinin hissedilmediği yerlerde (örn. $T=13.15$ için $x/h_0<5$) deneysel ve RANS çözümünün oldukça uyumlu olduğu söylenebilir. Yansıyan kabarma dalgasının tamamen oluşmasına kadar geçen sürede ($T=16.91$) deney ve sayısal sonuçlar arasında su yüzeyinde farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu durum yansıyan dalga önünde meydana gelen güçlü hidrolik sıçramaların rasgele salınımlara neden olması ile açıklanabilir. Bunun yanında su yüzü profillerinin deney görüntülerinden belirlenmesi aşamasında su yüzeyinde meydana gelen köpüklenmeler serbest yüzey sınırının tam olarak belirlenememesine yol açmakta ve bu bölgelerde ölçümlerde yapılan hata oranının artmasına neden olabilmektedir.



Şekil 5.63a. Mansapta trapez-B daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri



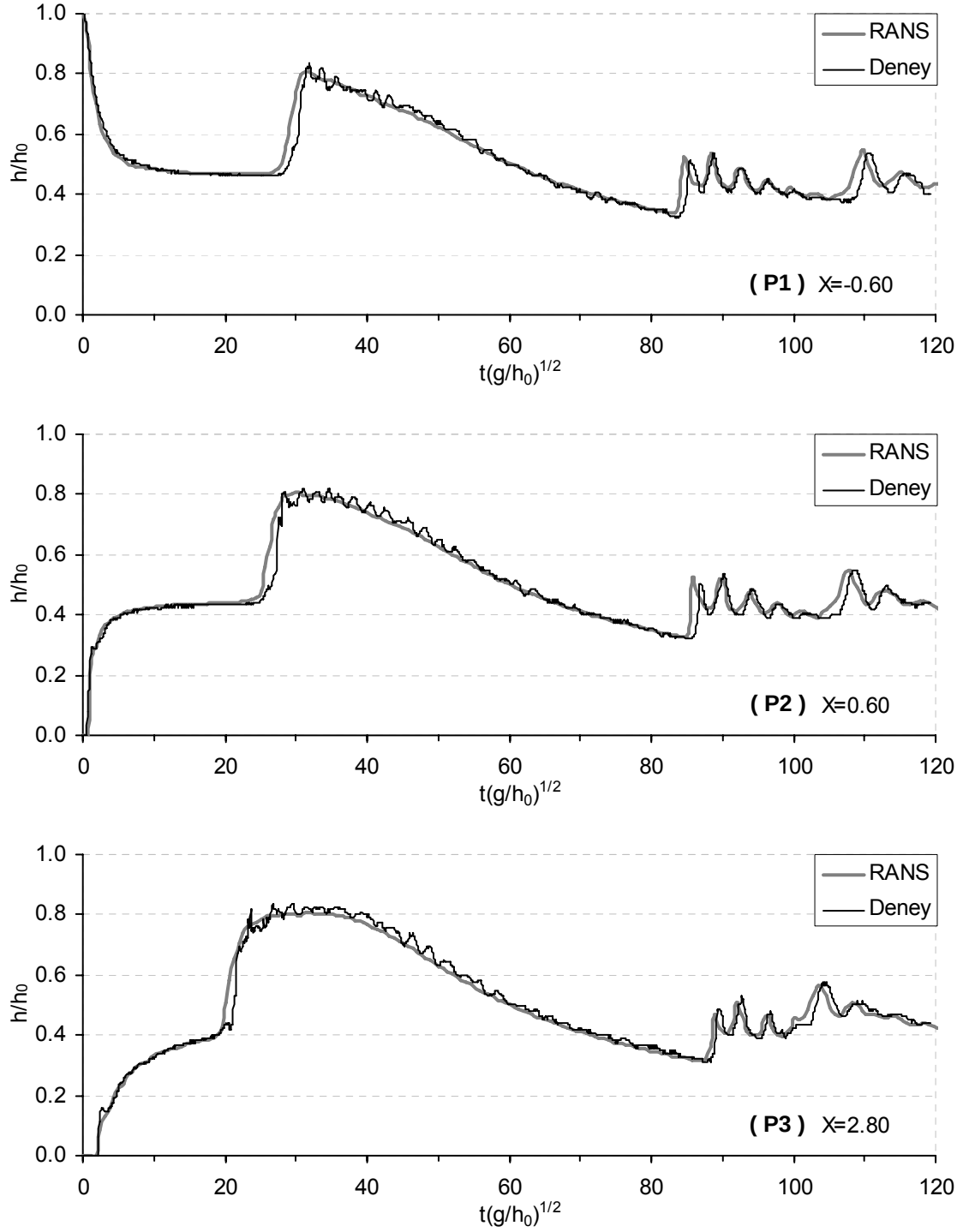
Şekil 5.63b. Mansapta trapez-B daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri



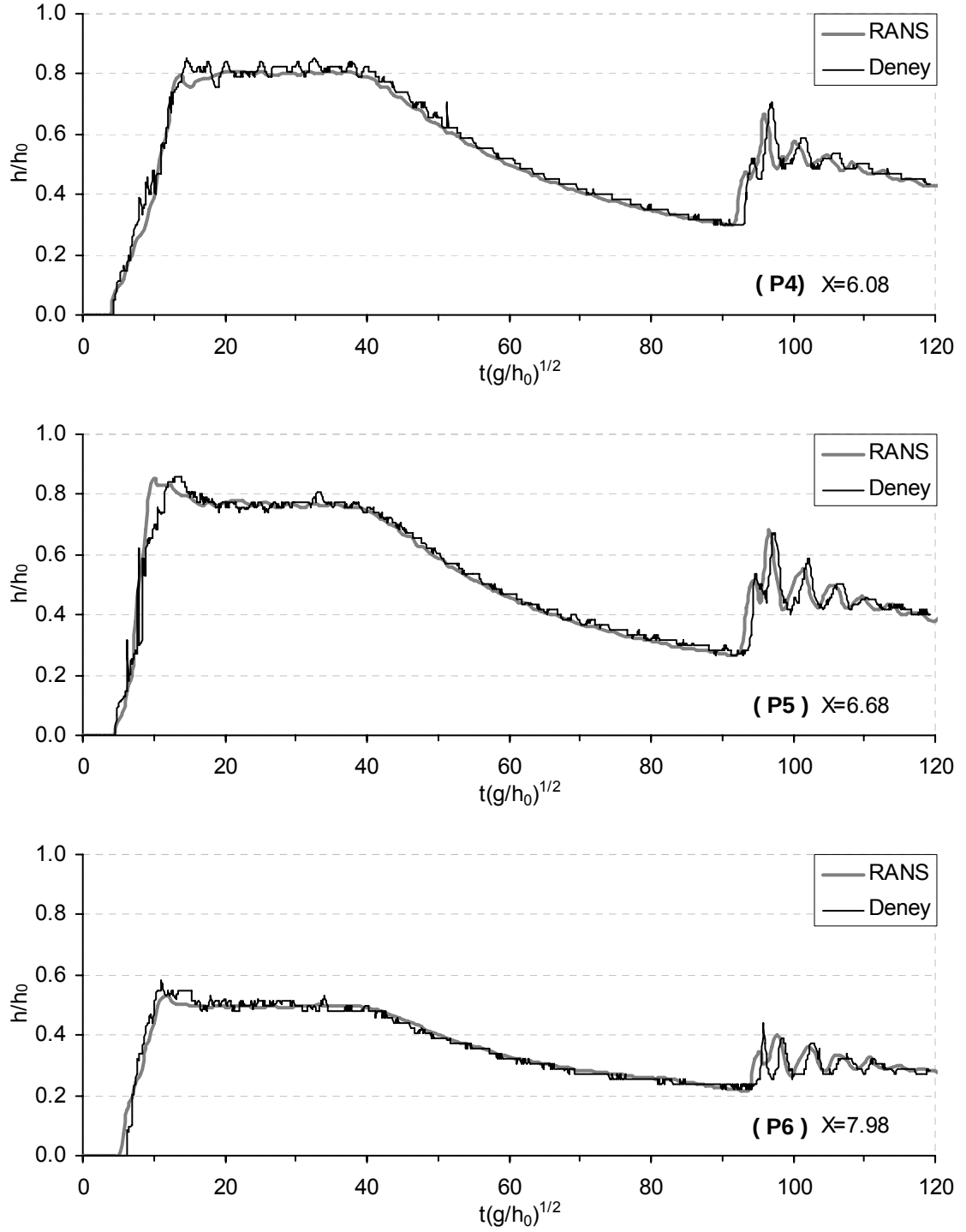
Şekil 5.63c. Mansapta trapez-B daralma bulunması durumunda elde edilen farklı zamanlardaki deneysel ve sayısal su yüzü profilleri

Kabarma dalgasının oluşumundan sonra ($T > 18.79$) su yüzeyi daha kararlı hale gelmekte ve RANS çözümü ile elde edilen su yüzü profilleri deney sonuçları ile oldukça uyumlu olmaktadır. Bu uyum daralmış kesitin mansap kısmındaki profillerde de görülmektedir. Bu aşamada deney sonuçlarında su yüzeyinde küçük salınımların meydana geldiği buna karşın RANS çözümünde daha düzgün profillerin elde edildiği göze çarpmaktadır. Ayrıca sayısal sonuçlar ile elde edilen su yükseklikleri bazı noktalarda deney sonuçlarının çok az altında kalmaktadır. Bununla birlikte genel olarak RANS denklemlerine dayanan sayısal çözümler ile kanal boyunca ani enkesit değişimlerinin olması durumunda taşkın dalgasının ilerleyişinin ve daralmış kesitten dolayı su yüzeyinde meydana gelen güçlü yansımaların oldukça iyi yaklaşıklıkla modellenebileceği söylenebilir.

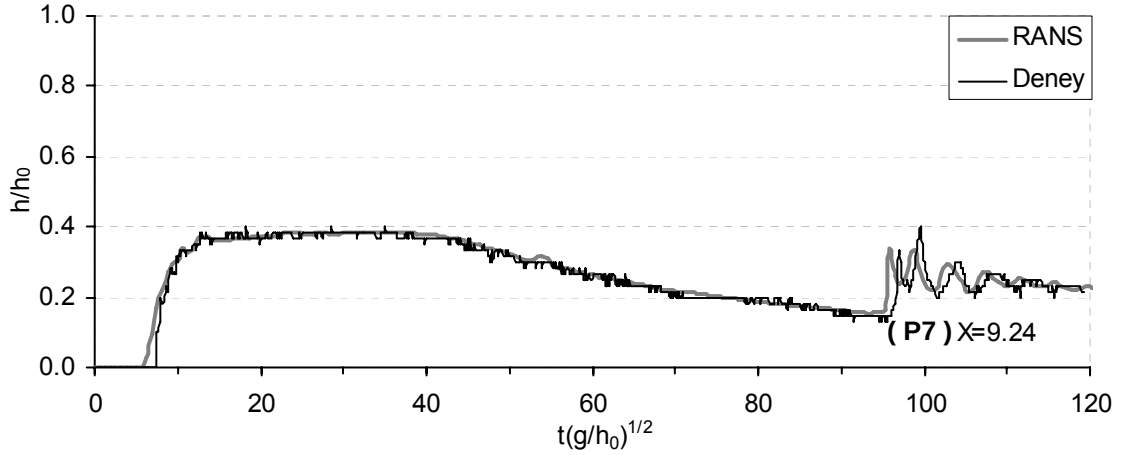
Şekil 5.64’de trapez-B daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda elde edilmiş su seviyesinin zamanla değişimleri RANS denklemlerine dayanan sayısal çözüm ile karşılaştırılmıştır. Deneylerde 3 kameradan elde edilen ve 19 s süresince çekilmiş 950 adet görüntünün analizi sonucu su seviyesinin belirli noktalardaki zamana bağlı değişimleri belirlenmiştir. Biri membada ve diğerleri mansapta olmak üzere toplam 7 ölçüm noktasının barajdan olan uzaklıkları Şekil 5.59’da gösterilmiştir. Grafiklerin geneline bakıldığında, kapağın ani olarak açılması ile birlikte kanal boyunca her ölçüm noktasında meydana gelen su seviyesi değişimleri başlangıç anından itibaren RANS denklemlerine dayanan sayısal çözüm ile oldukça doğru olarak belirlenebilmektedir. Kanal boyunca elde edilen maksimum su seviyeleri, taşkın dalgasının daralmış kesitten yansıyarak oluşturduğu kabarma dalgasının memba doğrultusunda yayılma hızı, kabarma dalgasının memba ucundaki düşey duvardan yansıyarak oluşturduğu dalga treninin genlikleri ve yayılma hızı dikkate alındığında RANS ve deney sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Bununla birlikte deneysel eğrilerde su yüzeyinde küçük salınımların olduğu RANS eğrilerinde ise su yüzeyinin daha düzgün bir değişime sahip olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca dalga treninin deney sonuçlarına göre çok az daha ilerde olduğu söylenebilir. Enkesit değişiminin olduğu bölgedeki ölçüm noktalarına (P4-P7) bakıldığında bu noktalardan gittikçe azalan genliğe sahip bir dalga treninin geçtiği görülmektedir.



Şekil 5.64a. Trapez-B daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 5.64b. Trapez-B daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 5.64c. Trapez-B daralma durumu için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırması

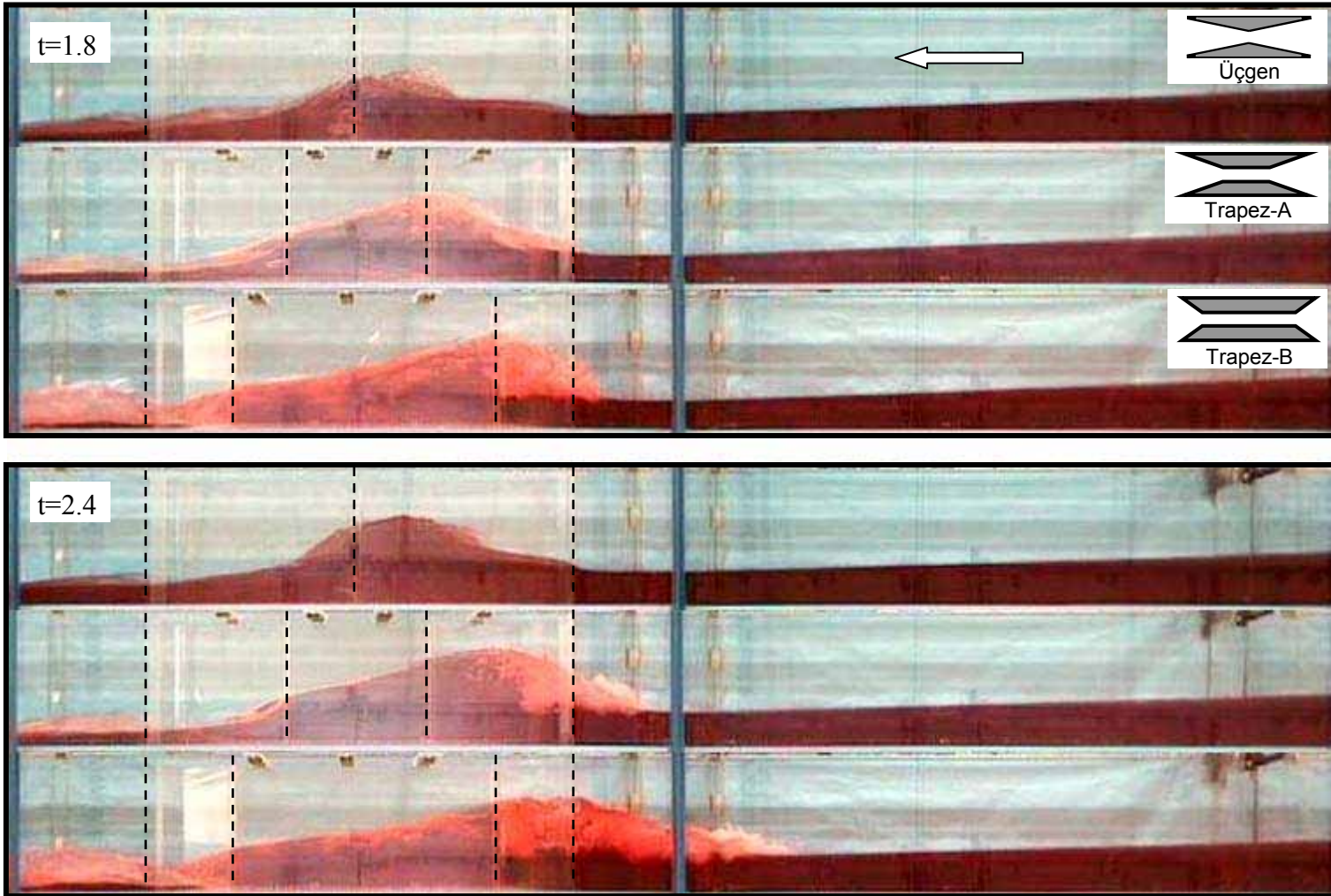
Buna karşın daralma kesiti membasındaki noktalarda (P1-P3) azalan genliğe sahip dalga treninin geçişinden sonra su seviyesinin tekrar yükseldiği ve azalan genliğe sahip yeni bir dalga treninin geçtiği göze çarpmaktadır. Bu durumun sebebi, dalga treninin daralmış kesitten geçişi sırasında akımın bir kısmı mansaba doğru hareket ederken bir kısmında daralma kesiti yüzeyinden tekrar yansıyarak memba doğrultusunda hareket eden yeni bir dalga treni oluşturması ile açıklanabilir. Dikkat edilirse bu durum sadece daralma kesitinin memba kısmında göze çarpmaktadır. Ayrıca P4 ve P5 noktalarında ilk dalga treninin geçişi sırasında ($T=93$) en öndeki dalga'nın yükselmesi sırasında küçük bir pik yapması daha sonra maksimum su seviyesine ulaşması, bu aşamada dalga'nın daralmış kesitten geçebilmek için su seviyesini yükselttiğini ve yansıdığını göstermektedir.

5.6.4. Farklı Geometriye Sahip Daralmaların (Üçgen, Trapez-A, Trapez-B) Deneysel Olarak Karşılaştırmaları

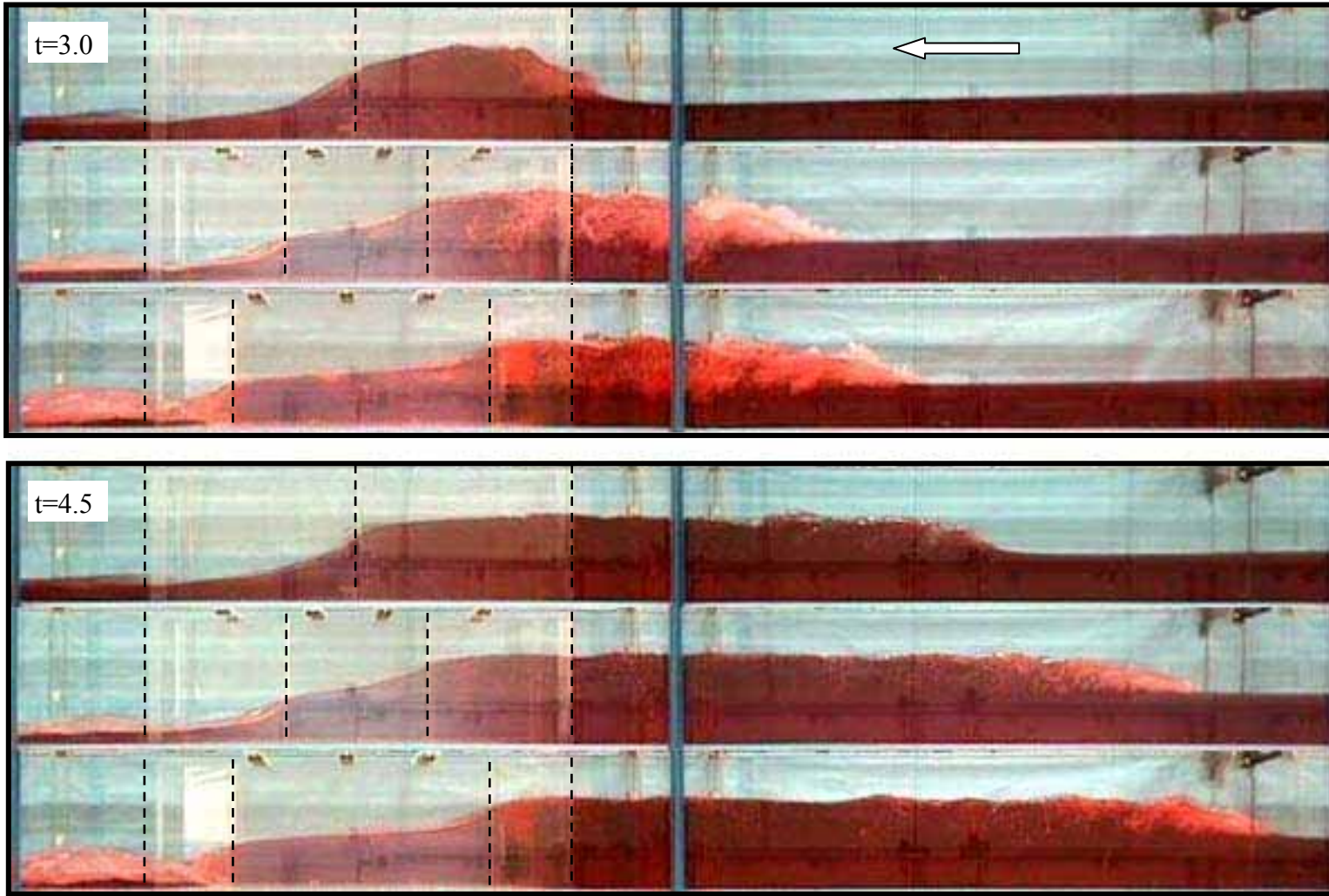
Yapılan çalışmada baraj mansabında bulunan en kesit değişimlerinin taşkın dalgasının yayılmasına etkisini incelemek amacıyla Şekil 5.46'da gösterilen üçgen, trapez-A ve trapez-B olmak üzere dikdörtgen kanal içerisinde üç farklı geometride daralma oluşturulmuş ve elde edilen deney sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Daralmaların kanal içerisindeki yerleşim planları Şekil 5.47, Şekil 5.53 ve Şekil 5.59'da verilmiştir. Karşılaştırmanın sağlıklı yapılabilmesi için engeller baraj aksından eşit uzaklıkta (152 cm) yerleştirilmişlerdir. Başlangıçtaki rezervuar derinliği 25 cm olarak ve rezervuar uzunluğu 465 cm olarak alınmıştır. Kanal genişliği 30 cm iken her üç durumda kesit 1/3 oranında daraltılmış ve en dar genişlik 10 cm olarak alınmıştır. En kesit değişiminin olduğu bölgenin uzunluğu her üç durumda 95 cm olarak belirlenmiştir. Sadece engellerin başladığı yer ile en dar kesitin başladığı yer arasındaki mesafeler dolayısıyla kanal planında daralmış kesitlerin memba yüzeylerinin eğimi farklıdır. Üçgen daralma durumunda 47.5 cm, trapez-A daralma durumunda 30 cm ve trapez-B daralma durumunda 15 cm'lik mesafede en dar kesite ulaşılmıştır.

Şekil 5.65'de mansapta farklı geometride enkesit değişimi olması durumu için elde edilen farklı zamanlardaki deney görüntüleri verilmiştir. Görüntüler iki video kamera görüntüsünün birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Kesikli çizgiler daralma bölgesinde en kesit değişiminin olduğu sınırları göstermektedir. $t=1.8$ s anındaki görüntülere bakıldığında su seviyesindeki yükselmenin, en dar kesitin başladığı noktalarda (akım yönü dikkate alındığında ikinci sıradaki kesikli çizgiler) meydana geldiği ve bu noktadan başlayarak geriye doğru hareket ettiği görülmektedir. Trapez-B daralma durumunda, su seviyesi diğerlerine göre daha hızlı yükselmekte ve daralmış kesitin membasında daha güçlü hidrolik sıçrama meydana gelmektedir. Sıçrama sonucu oluşan hava kabarcıkları kesitin mansabında da görülmektedir. Buna karşın üçgen daralma durumunda su seviyesindeki yükselme daralma mesafesi boyunca daha yavaş gerçekleşmekte ve en dar kesitin hemen membasında oldukça küçük boyutta hidrolik sıçrama meydana gelmektedir. Bir sonraki $t=2.4$ s anına gelindiğinde su seviyesindeki yükselmeyle birlikte memba yönünde hareketin de başladığı görülmektedir. Bu sırada trapez-B daralma durumunda memba yönünde hareket eden kabarma dalgası oluşmuş ve dalga önünde önemli derecede hava girişimi söz konusudur. Üçgen daralmada daralma mesafesinde su yüzeyinin eğimi artmaya devam etmekte ve önemli hava girişimi olmamaktadır. Trapez-A durumunda ise daralma mesafesinin orta kısmında su



Şekil 5.65a. Mansapta üçgen, trapez-A ve trapez-B daralma olması durumunda elde edilen deney görüntülerinin karşılaştırılması



Şekil 5.65b. Mansapta üçgen, trapez-A ve trapez-B daralma olması durumunda elde edilen deney görüntülerinin karşılaştırılması

seviyesi maksimum olacak şekilde su yüzeyi tümsek bir görünüm almış ve yansıyan dalga önünde önemli ölçüde hava girişimi meydana gelmektedir. Daha sonra $t=3.0$ s anında bu kez üçgen daralma durumunda daralmış kesitin membasında su yüzeyi tümsek görünüm almıştır fakat memba yüzeyi üzerinde önemli hava girişimi olmamaktadır. Trapez-A ve trapez-B durumunda dalga önünde belirgin hava girişimi olan kabarma dalgaları memba yönünde ilerlemektedir. Bununla birlikte trapez-B kabarma dalgası daha hızlı hareket etmektedir. Son olarak $t=4.5$ s anına gelindiğinde üçgen durumda da kabarma dalgası meydana gelmiştir. Dalga önünde trapez-A ve trapez-B durumuna göre yine çok az hava girişimi söz konusudur. Bununla birlikte her üç durumda kabarma dalgası arkasında su yüzeyi yatay bir görünüm almıştır.

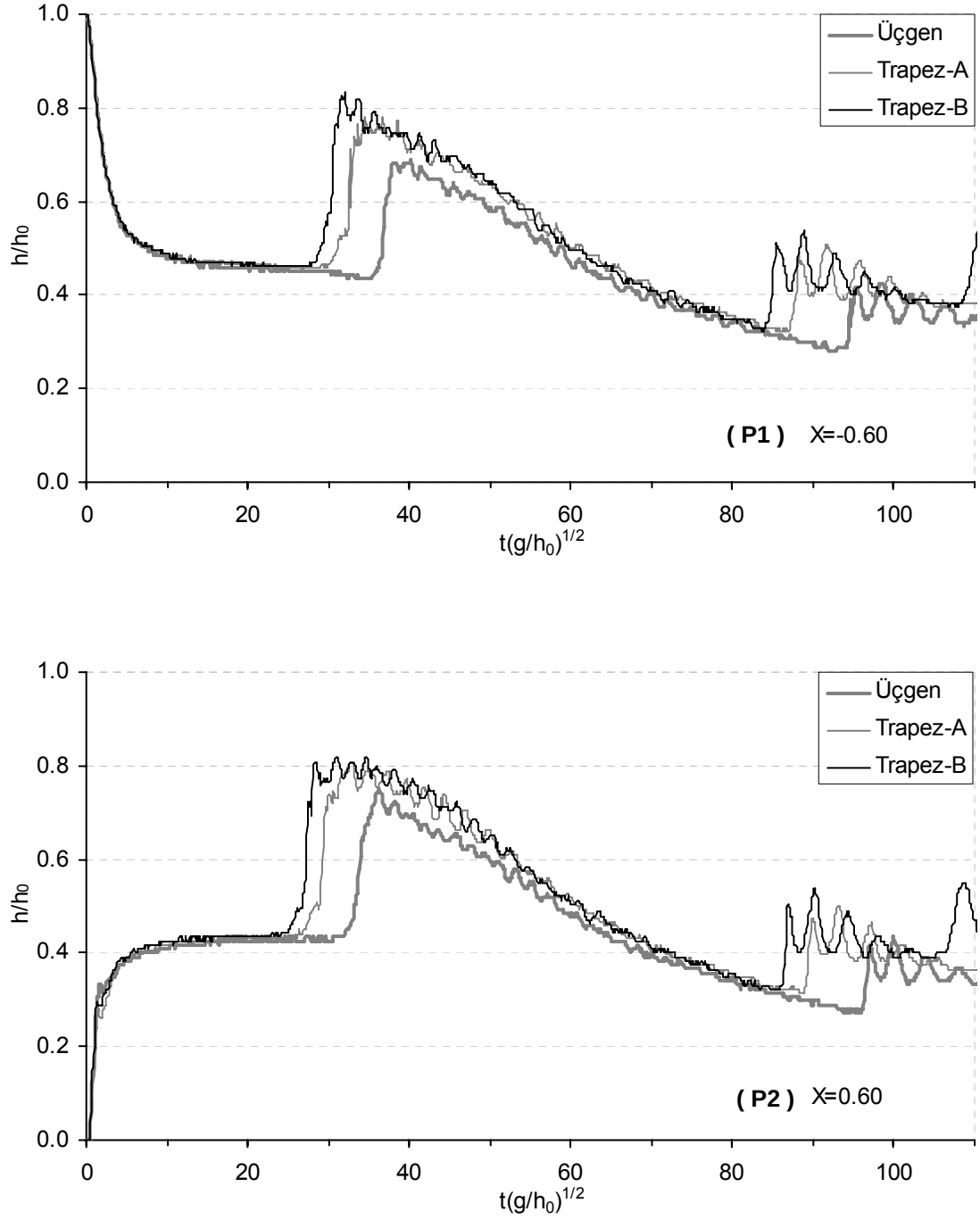
Buraya kadar olan gözlemler özetlenirse trapez-B durumunda taşkın dalgasının geçişi ile birlikte daha güçlü yansımaların meydana geldiği ve kabarma dalgası önünde önemli derecede hava girişimi olduğu söylenebilir. Ayrıca dalga önü memba yönünde daha hızlı hareket etmektedir. Bunu sırasıyla trapez-A ve üçgen daralma durumu izlemektedir. Bu davranışın sebebi, trapez-B durumunda daralma öncesi mesafenin kısa olmasından dolayı akış enkesitinin daha sert bir geçişe sahip olması ve bunun sonucu olarak akımın daralmış kesite girişi ile birlikte yüzeye çarparak daha büyük yansımanın meydana gelmesi ile açıklanabilir. Üçgen daralma durumunda daha yumuşak bir geçiş olduğundan suyun yansıması daha küçük oranda kalmaktadır. Ayrıca en dar kesite ulaşma mesafesi trapez-B durumunda daha kısa olduğu için akımın minimum enerjiye ulaşması için gereken süre daha kısa olmaktadır. Buda daha erken ve daha güçlü hidrolik sıçramaların oluşumuna neden olmaktadır.

Şekil 5.65’de en dar kesitin başladığı noktanın mansabında x doğrultusunda ilerledikçe su seviyelerinin hızla azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte üçgen daralma durumunda akım en dar kısımdan geçtikten hemen sonra kesit genişlediğinden su seviyesi hızla azalmaktadır ve bu kısımda su yüzeyinin eğimi oldukça fazladır. Buna karşın trapez-A ve trapez-B daralma durumunda daralmış kesit genişliğinin değişmediği kısımlarda su yüzeyi eğimi daha az olmakta fakat enkesit değişiminin genişleyen kısmında su yüzeyi eğiminin arttığı dolayısıyla su seviyesinin birden azaldığı gözlenmektedir. Trapez-B daralma durumunda sabit

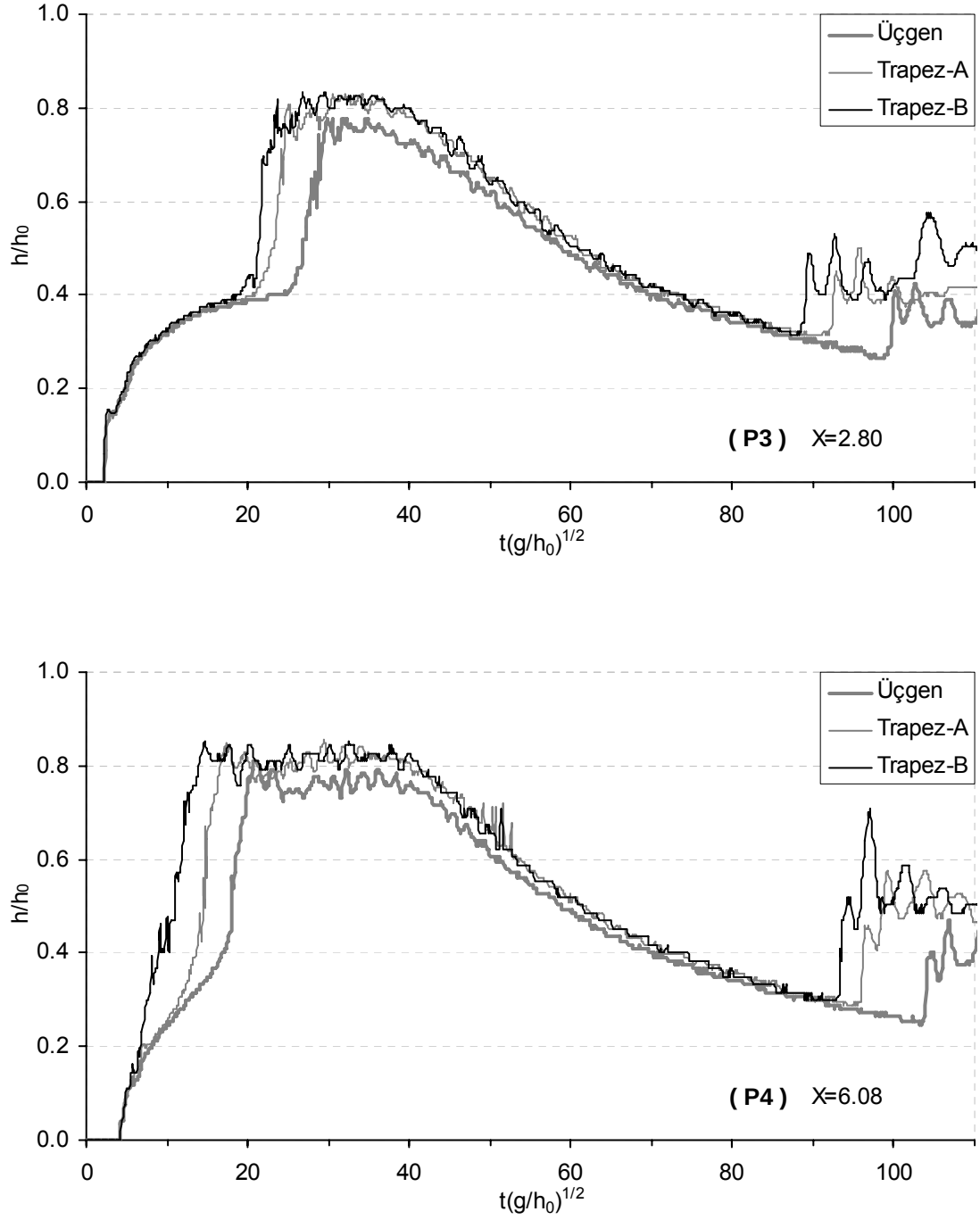
genişlikli daralmış kısım daha uzun olduğundan su yüzeyinin eğimi daha azdır. Bu durum yine minimum ve özgül enerji arasındaki ilişki ile açıklanabilir. Enkesit değişimlerinde kanal genişliğindeki azalmayla birlikte akımın kesitten akabilmesi için aşması gereken minimum enerji miktarı artmakta ve genişliğin artmasıyla birlikte gerekli minimum enerji de azalmaktadır. Enkesit değişiminin olduğu bölgenin dışında kanal tekrar eski genişliğine sahip olduğundan minimum enerjisi de başlangıçtaki yüksekliğine geri gelecektir. Bununla birlikte daralma kesiti membasında su seviyesinin kabarmasına neden olan enerji fazlalığı nedeniyle su seviyesi en dar kesiti geçtikten sonra mansaba doğru azalacak ve akım hızı artacaktır. Üçgen daralma durumunda, en kesit genişliği önce azaldığı ve sonra birden genişlediği için su seviyesinde hızlı bir düşüş gözlenmektedir. Trapez-B daralma durumunda, daralmış kesit genişliğinin sabit olduğu kısım daha uzun olduğundan memba ve mansap uçları arasındaki enerji çizgisinin eğimi daha az olacaktır. Bu durumda akım daha uzun mesafede hızlanmakta ve su yüzeyinin eğimi de daha az olmaktadır.

Şekil 5.65’de 4.5s anındaki görüntülere bakılırsa dalga önünün membasındaki gelen akım ise sel rejiminde olmaktadır. Daralmış kesitlerin memba kısmından negatif kabarma dalgası önünün olduğu yere kadar olan bölgede akım nehir rejiminde olmaktadır. Daralmış kesitin mansabında ise akım tekrar sel rejimine geçmektedir. Dolayısıyla daralmış kesitte kritik yükseklik oluşacaktır. Bu nokta üçgen daralma durumunda kesitin en dar yerinde meydana gelirken trapez-A ve trapez-B durumunda daralmış kesit genişliğinin sabit kaldığı bölgenin orta noktasına yakın bir yerde oluşacaktır. Dikkat edilirse sel rejiminden nehir rejimine geçişte bir süreksizlik meydana gelirken (kabarma dalgası önü) nehir rejiminden sel rejimine geçişte seviye değişimi sürekli olmaktadır.

Şekil 5.66’da mansapta farklı geometriye sahip daralmaların olması durumunda, belirli noktalarda video görüntüler yardımıyla ölçülen su seviyelerinin zamanla değişimleri bir arada verilmiştir. Kanal üzerinde barajın hemen membasında (P1), hemen mansabında (P2), daralmaların başladığı noktada (P4) ve baraj aksı ile daralmaların başladığı bölgenin yaklaşık orta noktasında (P3) olmak üzere baraj aksından olan uzaklıkları eşit olmak üzere 4 noktada elde edilen ölçüm sonuçları



Şekil 5.66a. Mansapta farklı geometriye sahip daralma durumları için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı deneysel su seviyesi değişimleri



Şekil 5.66b. Mansapta farklı geometriye sahip daralma durumları için kanal boyunca farklı noktalarda zamana bağlı deneysel su seviyesi değişimleri

karşılaştırılmıştır. Bu noktaların baraj aksına olan mesafeleri Şekil 5.47, Şekil 5.53 ve Şekil 5.59’da gösterilmiştir.

Şekil 5.66’ya bakıldığında başlangıçtaki rezervuar derinliğinin aynı olmasından dolayı kapağın kalkmasıyla birlikte membadaki P1 noktasında su seviyesindeki hızlı düşüş ve mansaptaki P2-P3 noktalarında taşkın dalgasının gelişi ile birlikte su seviyesinde hızlı yükselme eğrilerinin her üç daralma durumu için çakıştığı görülmektedir. Daralmaların başladığı P4 noktasında ise taşkın dalgasının gelişi ve yansıyan dalganın oluşumu arasındaki süre çok kısa olduğundan bu noktada farklılıklar göze çarpmaktadır. Trapez-B durumunda daralma öncesi mesafe oldukça kısa olduğundan taşkın dalgasının bu noktaya ulaşmasıyla birlikte su seviyesi kesintisiz bir biçimde ve hızla yükselmektedir. Üçgen daralma durumunda ise gelen taşkın dalgasından dolayı meydana gelen yükselme ile daralmadan kaynaklanan su seviyesindeki yükselme arasındaki sınır daha belirgindir. Ayrıca P4 noktasında üçgen daralmada ilk dalganın geçişi ile birlikte dalganın maksimum yüksekliğe ulaşma süresi diğerlerine göre daha uzun olmaktadır. Trapez-B daralmada bu süre $T=10.52$, trapez-A daralmada $T=13.53$ iken üçgen daralmada $T=16.91$ kadar bir zaman almaktadır. Elde edilen maksimum yükseklikler ise trapez-B daralmada $h/h_0=0.85$, trapez-A daralmada $h/h_0=0.84$ ve üçgen daralmada $h/h_0=0.81$ olmaktadır. Görüldüğü gibi trapez-B daralma durumunda meydana gelen maksimum yükseklik en fazladır. P1, P2 ve P3 noktalarındaki grafiklere bakıldığında benzer durumun bu noktalarda da geçerli olduğu görülmektedir. Trapez-B daralma durumu için taşkın dalgası bu noktalara daha erken varmakta ve oluşan maksimum yükseklik daha fazla olmaktadır. Grafiklerden görüldüğü gibi negatif kabarma dalgasının gelişi ile birlikte kesitlerdeki su seviyesi belirgin biçimde artmaktadır. Rezervuarın belirli bir büyüklüğe sahip olmasından dolayı gelen akımın debi değeri bir süre sonra düşmekte ve su seviyesi hızla azalmaktadır. Grafiklerdeki azalma eğrilerinde de üçgen daralma durumunda, su seviyesinin diğer daralma durumlarına göre belirgin biçimde düşük olduğu görülmektedir. Kanal kesitinin daralması sonucu oluşan ve memba yönünde hareket eden negatif kabarma dalgasının kanalın memba ucundaki düşey duvardan yansıması ile tekrar mansap yönünde hareket eden bir dalga treni oluşmaktadır. Grafiklerde su seviyeleri azalmaktayken aniden tekrar yükselmesi ve su seviyelerinin

dalgalanması bu durumu göstermektedir. Dikkat edilirse trapez-B daralma durumunda memba ucundan yansıyan dalganın yine daha ileride ve maksimum yüksekliğe sahip olduğu, üçgen daralma durumunda ise bu dalganın geride kaldığı ve su seviyesinin diğerlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. P4 noktasında kanalın memba ucundan yansıyan dalganın daralma kesitinden geçişi sırasında özellikle trapez-B daralma durumu için su seviyesinin oldukça yükseldiği göze çarpmaktadır. Daha sonra kanal memba ucundan yansıyan dalga, daralmış kesitlerden tekrar yansıyarak memba yönünde tekrar harekete başlamıştır. Bu durum P2 ve P3 noktalarında yaklaşık $T=105$ anındaki trapez-B eğrisinde görülmektedir. Genel olarak baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılması sırasında bir enkesit değişimi (daralma) ile karşılaşması durumunda, akım bir yandan mevcut açıklıktan akarken akımın bir kısmı daralmış kesitten yansıyarak memba yönünde hareket etmekte ve daralma membasında kalan su boşalana kadar daralma kesiti ile rezervuar memba ucu arasında gidip gelen bir dalga hareketine neden olmaktadır. Bu nedenle daralmış kesitin membasında kalan kısımda değişken ve karmaşık bir akım ortamının söz konusu olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak mansapta yayılan taşkın dalgasının, güzergahı üzerinde daha keskin geçişe sahip bir daralma ile karşılaşması durumunda daha güçlü yansımaların meydana geleceği ve daralmış kesitin membasında daha yüksek su seviyelerinin oluşacağı, yansıma sonucu oluşan kabarma dalgasının memba yönünde daha hızlı ilerleyeceği sonucu çıkarılabilir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmada; deneysel, teorik ve sayısal olmak üzere üç farklı açıdan baraj yıkılması problemi ele alınmıştır. Baraj yıkılmalarına ait gerçek arazi verisi oldukça yetersiz olduğundan günümüzde gittikçe artan öneme sahip olan sayısal modellerin doğrulanabilmesi ve baraj yıkılması akımı davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için tez kapsamında bir dizi deney gerçekleştirilmiş ve bu konuda özgün deney verileri elde edilmiştir. Deneyler, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan yatay dikdörtgen bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Baraj yıkılması akımı, membasında belirli bir yükseklikte ve hacimde su bulunan düşey bir kapağın ani olarak kaldırılması sonucu oluşturulmuştur. Deneylerde, taşkın dalgasının kanal boyunca yayılması sırasında meydana gelen su yüzü profillerinin ve istenilen noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin belirlenmesi için ölçüm sistemi olarak görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalardan farklı olarak kanal boyunca herhangi bir noktada meydana gelen zamana bağlı su seviyesi değişimleri geliştirilen kod sayesinde literatürde ilk kez dijital kameralardan alınan görüntülerle belirlenmiştir. Ayrıca deney tekrarlanmasına gerek kalmaksızın kanal boyunca yerleştirilen üç kameradan elde edilen eş zamanlı görüntüler kullanılarak farklı akım ve topografya koşullarında yayılan taşkın dalgasına ait detaylı su yüzü profilleri çıkarılmıştır. Yapılan tüm deneylerde, yıkılma öncesi başlangıçtaki rezervuar derinliği $h_0=25$ cm olarak alınmıştır. Çalışmada, öncelikle kapağın ani kalkması sonucu oluşan taşkın dalgasının kuru ve $\alpha=h_1/h_0=0.1, 0.2, 0.4$ derinlik oranlarına sahip ıslak mansap koşullarında yayılması incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları kuru ve ıslak durum için bilinen analitik sonuçlarla karşılaştırılarak analitik çözümlerin geçerliliği irdelenmiştir. Ayrıca, ıslak durumda kanalın mansap ucu düşey bir kapak ile kapatılarak mansap doğrultusunda yayılan taşkın dalgasının duvardan yansımaları problemi de ele alınmıştır. Daha sonra kanal yatağında ve kanal genişliğinde meydana gelen değişimlerin taşkın dalgasının yayılmasına etkisi incelenmiştir. Kanal tabanındaki değişimlerin etkisini belirlemek amacıyla baraj mansabında üçgen ve trapez olmak üzere iki farklı geometriye sahip eşik kullanılırken mansapta meydana

gelen enkesit değişiminin etkisini belirlemek amacıyla üçgen, trapez-A ve trapez-B olmak üzere üç farklı daralma geometrisi kullanılmıştır. Çalışmalardan elde edilen deneysel sonuçlar sığ su denklemleri (SWE-Shallow Water Equations) ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes) olmak üzere iki farklı teoriye dayanan sayısal çözümlerle karşılaştırılarak, bu denklemlerin baraj yıkılması problemlerini çözebilme hassasiyetleri irdelenmiştir. Her iki teoriye ait denklemlerin sayısal çözümü için, FLOW-3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımından yararlanılmıştır. Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Baraj mansabında kuyruk suyu bulunup bulunmamasına göre yıkılma sonucu mansapta meydana gelen su yüzü profillerinde iki farklı akım davranışı gözlenmektedir. Kuru durumda yıkılma ile birlikte memba yönünde negatif bir dalga yayılırken mansap doğrultusunda pozitif taşkın dalgası yayılmaktadır. Islak durumda ise mansapta çok az miktarda kuyruk suyu olsa dahi kapağın ani olarak kaldırılması ile birlikte membada depolanmış su mansaptaki kendisine direnen kuyruk suyunu sürüklemekte ve bunun sonucu olarak sıçrama tipi dalga kırılması meydana gelmektedir. Dalganın kırılmasından sonra oluşan taşkın dalgası, kabarma dalgası şeklinde mansap doğrultusunda ilerlemektedir. Kabarma dalgası arkasındaki akım derinliği yaklaşık sabit olmaktadır.

- Kuyruk suyu derinliğinin artmasıyla sıçrama tipi dalga kırılması yerine taşma şeklinde dalga kırılması meydana gelmektedir. Ayrıca derinlik oranının ($\alpha=h_1/h_0$) artışıyla birlikte serbest su yüzeyi dalgalı bir görünüm almaktadır ve mansap doğrultusunda hareket eden dalgalı kabarma dalgası (undular bore) oluşumu söz konusu olmaktadır.

- Küçük kuyruk suyu derinliklerinde, sıçrama tipi dalga kırılmasının sonucu olarak dalga önünde daha fazla hava girişi olmaktadır ve akım daha türbülanslı bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla enerji kayıpları daha fazladır.

- Dalga önünün yayılma hızı kuru durumda en fazladır. Mansapta kuyruk suyu olması durumunda ise derinlik oranı arttıkça kabarma dalgası önü geride kalmaktadır.

- Kuru durumda, baraj aksına yakın yerlerde su seviyesi daha hızlı yükselmekte ve maksimum su seviyesine oldukça kısa sürede ulaşılmaktadır. Barajdan uzaklaştıkça maksimum su seviyesine ulaşma süreleri daha geç meydana gelmektedir. Kanal boyunca elde edilen maksimum su seviyeleri baraja yakın kesitlerde daha fazla olmaktadır.

- Küçük kuyruk suyu derinliğine sahip bir kanalda yayılan kabarma dalgasının düşey bir duvara çarpmasıyla, gelen ve yansıyan dalganın akım derinliği boyunca girişimi sonucu meydana gelen şiddetli hava girişimi ve türbülansın dolayısı önemli derecede enerji kaybı olmakta ve yansıyan kabarma dalgası daha yavaş bir hızda memba yönünde hareket etmektedir. Kuyruk suyu derinliğinin artmasıyla bu enerji kayıpları gelen ve yansıyan dalga arasındaki girişim su yüzeyine yakın bölgelerde meydana gelmekte ve enerji kayıpları azalmaktadır. Dolayısıyla küçük kuyruk suyu derinlikleriyle karşılaştırıldığında, yansıyan dalga memba yönünde daha hızlı hareket etmektedir. Büyük derinlik oranlarında ($\alpha=0.4$), kabarma dalgasının düşey duvara çarparak yansması sonucu, memba yönünde hareket eden ve gittikçe azalan genliğe sahip dalga treni ortaya çıkmaktadır. Küçük derinlik oranlarında ($\alpha=0.1$) ise gelen ve yansıma sonucu oluşan kabarma dalgası arasında genel görünüm açısından belirgin bir değişim görülmemektedir.

- Kuru ve ıslak durumda analitik çözüm ile elde edilen su yüzü profilleri yıkılmanın başlangıç anları dışında deney sonuçları ile uyum sağlamaktadır. Kuru durumda, pozitif ve negatif dalga önlerinin yayılma hızları açısından farklılıklar göze çarpmaktadır. Analitik çözümde, pozitif dalga önü deney sonuçlarına göre daha hızlı hareket ederken negatif dalganın yayılma hızı deney sonuçları ile karşılaştırıldığında daha yavaş hareket etmektedir. Islak durumda kabarma dalgasının yayılma hızı, analitik çözüm ile doğru olarak belirlenebilmektedir.

- Kuru durumda deneylerden elde edilen baraj aksındaki su seviyesi, rezervuardaki su seviyesi azalınca kadar analitik çözümde verilen $4/9h_0$ seviyesinde sabit kalmaktadır.

- Islak durumda kuyruk suyu/rezervuar derinliği oranının kritik bir değerine ($\alpha=0.1383$) bağlı olarak kabarma dalgası gerisinin barajın memba ya da mansabında

kalması durumu için analitik çözümde Tip I ve Tip II olarak tanımlanan akım davranışı deney sonuçlarında da gözlenmektedir.

- Taşkın dalgasının baraj mansabında bir eşik ile karşılaşması durumunda, eşğin membasında su seviyesi hızla yükselmekte ve akımın bir kısmı eşikten aşarken bir kısmı da eşikten yansıyarak geriye doğru bir kabarma dalgası (hidrolik sıçrama) oluşumuna neden olmaktadır. Eşğin varlığı ile baraj mansabında gözlenen maksimum su yükseklikleri artmaktadır. Bununla birlikte kanal boyunca gözlenen maksimum su yüksekliği eşğin başladığı yer ile tepe noktası arasında meydana gelmektedir. Eşğin memba yönünde ilerledikçe, kesitlerde oluşan maksimum su yükseklikleri azalmaktadır.

- Farklı eşik geometrileri karşılaştırıldığında eşğin memba yüzeyi eğimi arttıkça daha güçlü yansımalar meydana gelmekte ve daha büyük hidrolik sıçramalar ile önemli derecede hava girişimi söz konusu olmaktadır. Daha dik memba yüzeyine sahip eşikten yansıyan kabarma dalgası, geriye doğru daha hızla hareket etmekte ve eşik membasında daha yüksek su seviyeleri meydana gelmektedir.

- Baraj mansabında kanal genişliğinde bir daralma olması durumunda, gelen taşkın dalgasının bir kısmı mevcut açıklıktan geçmekte ve bir kısmı da daralmış kesitten yansımaktadır. Taşkın dalgasının daralmış kesitten geçişi ile birlikte daralma bölgesinin hemen membasında su seviyesi hızla yükselmekte geriye doğru hareket eden bir kabarma dalgası oluşmaktadır. Daralmadan dolayı daralmış kesitin membasında kalan bölgede su seviyeleri oldukça artmaktadır. Kanal boyunca elde edilen maksimum yükseklik daralma bölgesinde enkesit genişliğinin azaldığı kısmın orta noktası civarında meydana gelmektedir. Kanal boyunca okunan maksimum yükseklikler memba yönünde ilerledikçe azalmaktadır. Kabarma dalgasının kanalın memba ucundaki düşey duvardan yansıması sonucu azalan genliğe sahip dalga treni oluşmaktadır.

- Farklı daralma geometrileri kıyaslanırsa, daralmanın ani olarak meydana gelmesi diğer bir ifade ile daha sert bir geçişe sahip olması durumunda taşkın dalgasının geçişi ile birlikte daha güçlü yansımalar meydana gelmekte ve daralmış kesitin membasında daha yüksek su seviyeleri oluşmaktadır. Yansıma sonucu oluşan kabarma dalgası, memba yönünde daha hızlı ilerlemektedir. Başlangıçta daralmış

kesit bölgesinde ve daha sonra kabarma dalgası önünde daha belirgin bir hava girişimi söz konusu olmaktadır.

- Kuru durumda elde edilen sayısal sonuçlarda; SWE çözümü hidrostatik olmayan basınç dağılımından dolayı, yıkılmanın başlangıç aşamalarında su yüzü profillerini uygun bir biçimde belirleyememekte, zaman ilerledikçe deney sonuçları ile daha uyumlu olmaktadır. Pozitif dalga önü, deney sonuçlarına göre daha hızlı hareket etmekte, rezervuarda hareket eden negatif dalga ise deney sonuçları ile karşılaştırıldığında daha yavaş ilerlemektedir. RANS denklemleri ile su yüzü profilleri ve dalga yayılması hassas olarak belirlenebilmektedir. Bir noktadaki su seviyesinin zamanla değişimleri SWE ve RANS denklemleri ile doğru bir biçimde belirlenebilmektedir. Alçalma eğrilerinde zaman ilerledikçe SWE çözümü ile elde edilen su yükseklikleri deney ve RANS çözümleri ile elde edilen değerlerin bir miktar altında kalmaktadır.

- Islak durum için elde edilen sayısal sonuçlarda; RANS denklemleri küçük derinlik oranlarında meydana gelen sıçrama tipi dalga kırılmasını, yüksek derinlik oranlarında oluşan yüzey salınımlarını ve kabarma dalgasının düşey bir duvardan yansıması sonucu oluşan dalgalanmalarını kanal boyunca oldukça hassas bir biçimde belirleyebilmektedir. SWE denklemleri ile yıkılmanın başlangıç anları dışında su yüzü profilleri ve kanal boyunca istenen noktada su seviyelerinin zamanla değişimleri doğru olarak belirlenebilmektedir. Buna karşın küçük kuyruk suyu derinlikleri için kabarma dalgasının düşey duvara çarpması sonrasında kanal boyunca elde edilen su yükseklikleri olduğundan daha fazla çıkmaktadır ve yansıyan dalganın yayılma hızı deney sonuçlarına göre daha yavaş çıkmaktadır. Islak durumda kuyruk suyu derinliğinin artmasıyla, yıkılma başlangıcında ve mansap ucundaki düşey duvardan yansıma sonrasında daha küçük hidrolik sıçramalar ve su yüzeyinde dalgalanmalar meydana geldiğinden, su seviyelerinin zamanla değişimleri SWE denklemleri ile daha iyi bir biçimde belirlenebilmektedir. Bununla birlikte SWE ile elde edilen su yüksekliklerinin RANS ve deney sonuçlarında gözlenen salınımların orta noktalarını izlediği görülebilir. Dalga önlerinin geçtiği, sıçramaların olduğu yerlerde SWE sonuçlarında akımda süreksizlikler gözlenmektedir.

- Mansapta eşik olması durumu için elde edilen sayısal sonuçlarda; RANS denklemlerinin çözümünde taşkın dalgasının eşikten yansıması ile sıçrama tipi dalga kırılması gözlenirken deneysel sonuçlarda taşma şeklinde dalga kırılması meydana gelmektedir. Bunun dışında RANS denklemleri ile belirlenen su yüzü profilleri, bir noktadaki su seviyelerinin zamana bağlı değişimleri, eşikten yansıyan kabarma dalgasının yayılma hızı, kanal boyunca elde edilen maksimum su seviyeleri deney sonuçları ile oldukça uyumlu olmaktadır. SWE çözümünde ise eşikten yansıyan kabarma dalgasının yüksekliği, olması gerekenden daha fazla çıkmaktadır. Bunun dışında kabarma dalgasının yayılma hızı ve alçalma eğrisindeki su seviyeleri doğru olarak belirlenebilmektedir.

- Mansapta daralma olması durumu için elde edilen 3 boyutlu RANS sonuçlarında su yüzü profilleri, su seviyesinin zamanla değişimleri, kanal boyunca daralmış kesitten yansıyan kabarma dalgasının yayılma hızı, su yüzeyinde meydana gelen dalgalanmalar, kabarma dalgasının kanalın memba ucundan yansıması sonucu oluşan dalga trenine ait genlikler ve yayılma hızları oldukça doğru bir biçimde belirlenebilmektedir.

- Genel olarak SWE ve RANS denklemlerinin sayısal çözümlerinin baraj yıkılması problemlerini çözebilme hassasiyetleri incelendiğinde, su yüzü profillerini ve belirli noktalardaki zamana bağlı su seviyesi değişimlerini RANS denklemleri oldukça iyi, SWE denklemleri ise yeterli yaklaşıklıkta belirleyebilmektedir. SWE denklemlerinin çıkarılışında yapılan hidrostatik basınç dağılımı kabulünden dolayı bu denklemlerin çözümü ile dalga kırılmaları, yüzey dalgalanmaları ve hidrolik sıçramalar tam olarak modellenememektedir. Akımda güçlü hidrolik sıçramalar olduğunda veya baraj yıkılmasının başlangıç aşamalarında olduğu gibi aşırı yüzey eğrilikleri bulunduğunda SWE çözümleri deney sonuçlarından uzaklaşmaktadır. Bununla birlikte SWE denklemlerinin bilgisayar ile sayısal çözümü RANS denklemlerine göre çok daha kısa sürmektedir. Bu nedenle çözüm süresi açısından bakıldığında, son yıllarda bilgisayarların kapasiteleri ve hesaplama hızları oldukça artmış olmasına rağmen baraj yıkılması gibi büyük ölçekli problemlerin modellenmesinde bir takım eksiklikleri bulunan SWE denklemlerine dayanan sayısal çözümler iyi bir seçenek olarak düşünülebilir. Buna karşın akım hakkında daha

detaylı bilgiler ve hassas sonuçlar elde edilmesi isteniyorsa RANS denklemleri tercih edilmelidir.

- Baraj yıkılması gibi değişken açık kanal akımı problemlerinin analizinde, görüntü işleme teknikleri ölçüm sistemi olarak oldukça etkili bir biçimde kullanılabilmekte ve hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. Geliştirilen sanal derinlik ölçer ile kanal boyunca meydana gelen zamana bağlı su seviyesi değişimleri, baraj yıkılması akımına ait video görüntüsü bir kez alındıktan sonra herhangi bir deney tekrarlmasına gerek kalmaksızın, akımda herhangi bir rahatsızlığa neden olmadan istenilen her noktada ve doğrultuda görüntüler üzerinden belirlenebilmekte ve sayısız ölçüm yapılabilmektedir. Bunun yanında basit bir video kamera kullanılarak bile baraj yıkılması analizi deneysel olarak kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bundan dolayı sanal derinlik ölçer diğer noktasal fiziksel su seviyesi ölçüm tekniklerine göre bir çok avantaja sahip olmaktadır. Buna karşın görüntüde parlamaların olduğu kısımlarda (örn. dalga önünde meydana gelen köpüklenmeler) su seviyelerinin belirlenmesinde bir takım güçlükler ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında kullanılacak kameranın çözünürlüğünün artmasıyla daha da hassas sonuçlar elde edilebilecektir.

Tez kapsamında yapılan incelemeler dışında, baraj yıkılması problemi konusunun araştırılması gereken birçok yönü bulunmaktadır. Çalışma kapsamında, su yüzü profilleri ve belirli noktalardaki su seviyesi değişimleri incelenmiştir. İlave olarak akıma ait hız dağılımları ve baraj yıkılması taşkın dalgasının yapıları uyguladığı basınçlar; kanal taban eğimi ve taban pürüzlülüğünün dalga önünün gelişimi ve kanal boyunca oluşacak maksimum su seviyeleri üzerindeki etkileri incelenebilir. Baraj yıkılması taşkın dalgasının katı madde ile etkilişimi konusunda çalışmalar yapılabilir. Ayrıca yazılım ve donanım teknolojisindeki gelişmeler kullanılarak baraj yıkılması sonucu oluşan 3-boyutlu su yüzü profillerinin belirlenebilmesi olanaklı hale gelmiştir. Baraj yıkılması analizlerinin gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan ve temel araçlar haline gelen hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımlarının ve denklemlerin çözümünde kullanılan farklı sayısal yöntemlerin de irdelenmesi gereklidir. Çalışmada geliştirilen sanal derinlik ölçer ile elde edilen deney sonuçlarının farklı fiziksel ölçüm teknikleri ile karşılaştırılması sonucu görüntüleme yönteminin hassaslığı pekiştirilmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- ABDOLMALEKI, K., THIAGARAJAN, K. P. ve MORRIS-THOMAS M. T., 2004. Simulation of The Dam Break Problem and Impact Flows Using a Navier-Stokes Solver. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Australia.
- AURELI, F., MIGNOSA, P. ve TOMIROTTI, M., 1999. Dam-Break Flows in Presence of Abrupt Bottom Variations. Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, Graz (Austria) 22-27 August 1999, Technical University Graz.
- AURELI, F., MIGNOSA, P. ve TOMIROTTI, M., 2000. Numerical Simulation and Experimental Verification of Dam-Break Flows with Shock. Journal of Hydraulic Research, 38 (3): 197-206.
- AURELI, F., MARANZONI, A. ve MIGNOSA, P., 2004. Experimental Modeling of Rapidly Varying Flows on Wet Bed and in Presence of Submersible Obstacles. River Flow, 2004, Proceedings of the Second International Conference on Fluvial Hydraulics, Napoli, 23-25 Giugno 2004, Lisse: Balkema.
- BLASER, F. ve HAGER, W.H., 1999. Positive Front of Dambreak Wave on Rough Bottom. Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, Graz (Austria) 22-27 August 1999, Technical University Graz.
- BELL, S. W., ELLIOT, R.C. ve CHAUDRY, M. H., 1992. Experimental Results of Two Dimensional Dam-break Flows. Journal of Hydraulic Research, 30 (2): 225-252
- BELLOS, V., SOULIS, J.V. ve SAKKAS, J.G., 1992. Experimental Investigation of Two-Dimensional Dam-Break Induced Flows. Journal of Hydraulic Research, 30(1): 47-63.
- BOZKUŞ, Z., 2004. Afet Yönetimi İçin Baraj Yıkılma Analizleri 1, İMO Teknik Dergi, 15 (4): 3335-3350.
- BRUFAU, P.ve NAVARRO, P.G., 2000. Two-Dimensional Dam Break Flow Simulation. International Journal For Numerical Methods In Fluids, 33: 35–57

- BUKREEV, V. I., GUSEV, A. B. ve MALYSHEVA, A. A., 2003. Experimental Verification of the Gas-hydraulic Analogy with Reference to the Dam-break Problem. *Fluid Dynamics*, 39 (5): 801-809.
- BUKREEV, V. I., 2005. On the Water Depth Breach During a Partial Dam Break. *Fluid Dynamics*, 40 (5):769-776.
- BUKREEV, V. I. ve GUSEV, A., 2005. Initial Stage of the Generation of Dam-break Waves. *Doklady Physics*, 50(4): 200-203.
- CHANSON, H., 2004a. *Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- CHANSON, H., 2004b. Dam Break Wave Propagation on Abrupt Drops: An Experimental Study. 15th Australian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Australia.
- CHANSON, H., 2004c. Dam Break Wave With Energy Dissipation: Two Case Studies. Proc. 29th IAHR Congress, Beijing, Theme C, Tsinghua Univ. Pres, Beijing:311-318.
- CHANSON, H., 2005. Applications of the Saint-Venant Equations and Method of Characteristics to the Dam Break Wave Problem CH55/05. Department of Civil Engineering, The University of Queensland.
- CHAUDHRY, M. H., 1993. *Open-Channel Flow*. Prentice-Hall, NY.
- CHERVET, A. ve DALLEVES, P., 1970. Calcul de L'Onde de Submersion Consecutive a la Rupture d'un Barrage. *Schweizerische Bauzeitung*, Vol. 88.
- CHUNG, T.J., 2002. *Computational Fluid Mechanics*. Cambridge University Press.
- DOĞAN (AÇIKGÖZ), R., DOĞAN, S. ve BANGER, G., 1999. Raster Görüntüleri Yapısı, Görüntüleme Tekniklerinin Temelleri ve BITMAP Formatı. *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi*, 86: 61-80.
- DRESSLER, R. F., 1952. Hydraulic Resistance Effects upon the Dambreak Functions. *Journal of Research*, 49 (3): 217-225.
- EAKET, J., HICKS, F. E. ve PETERSON, A. E., 2005. Use of Stereoscopy For Dam Break Flow Measurement. American Society of Civil Engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (1): 24-29.
- FLOW SCIENCE Inc., "Flow-3D User's Manuals", Santa Fe, N.M., 2007.

- FRAZÃO, S. S., 2002. Dam-break Induced Flows in Complex Topographies. PhD Thesis, Université catholique de Louvain, Civ. Eng. Dept., Hydraulics Division, Louvain-la-Neuve.
- FRAZÃO, S. S. ve ZECH, Y., 2002. Dam Break in Channels with 900 Bend. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (11): 956-968.
- FRAZÃO, S. S., BUEGER, C. D., DOURSON, V. ve ZECH, Y., 2002. Dam-break Wave Over a Triangular Bottom Sill. *Proceedings River Flow Conference*, Louvain-la-Neuve, Belgium, September 2002, Balkema, Vol. 1, pp. 437-442.
- FRAZÃO, S. S, LORIES, D., TAMINIAU, S. ve ZECH, Y., (UCL) 2003. Dam-break Flow in a Channel with a Sudden Enlargement. *Proceedings 30th IAHR Congress*, Thessaloniki, Greece, 24-29 August 2003, Vol C-II, pp.221-228.
- FRAZÃO, S. S., NOËL, B. ve ZECH, Y., 2004. Experiments of Dam-break Flow in the Presence of Obstacles *Proceedings of River Flow 2004 Conference*, Naples, Italy, June 2004 Vol. 2, pp. 911-918.
- GOTTARDI, G. ve VENUTELLI, M. 2004. Central Scheme for Two-Dimensional Dam-Break Flow Simulation. *Advances in Water Resources*, 27: 259–268.
- HARLOW, F. H. ve WELCH, E., 1965. Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluids with Free Surface. *Phys. Fluids*, Vol. 8, p. 2182.
- HENDERSON, F. M., 1966. *Open Channel Flow*, Macmillan Publishing Co., Inc. New York.
- HIRT, C. W. ve NICHOLS, B. D., 1981. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *J. Comput. Phys.*, 39, pp. 201–225.
- JAIN, S. C., 2001. *Open-Channnel Flow*. John Wiley and Sons, Inc, NY.
- JANOSI, I. M., JAN, D., SZABO, K. G. ve TEL, T., 2004. Turbulent Drag Reduction in Dam-break Flows. *Experiments in Fluids*, 37: 219-229.
- JOVANOVIC, M. ve DJORDJEVIC, D., 1995. Experimental Verification of the MacCormack Numerical Scheme. *Advanges in Engineering Software*, 23:61-64.

- KARSLI, F. ve AYHAN, E., 2005. Orta ve Yüksek Çözünürlüklü Dijital Kameraların Metrik Performanslarının Belirlenmesi TMMOB Harita ve Kadastro Müh. Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- KHAN, A. A., STEFFLER, P. M. ve GERARD, R., 2000. Dam-Break Surges with Floating Debris. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (5): 375-379.
- KIRKGÖZ, M. S., MAMAK, M. ve AKÖZ, S., 2003. Akışkanlar mekaniği, Kare Yayınları.
- KOCAMAN, S., 2002. Baraj Yıkılması Analizi ve Uygulaması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- KOCAMAN S. ve ÖZMEN-ÇAĞATAY, H., 2003. Gedik Parametrelerinin Baraj Yıkılması Taşkın Dalgalarına Etkisi. Çukurova Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 18(1):17-34
- LAUBER, G. ve HAGER, W. H., 1997a. Positive Front of Dambreak Wave. 27 IAHR Congress San Francisco A:729-739.
- LAUBER, G. ve HAGER, W. H., 1997b. Ritter's Dambreak Wave Revisited. 27 IAHR Congress San Francisco D: 258-262.
- LAUBER G. ve HAGER, W.H., 1998a. Experiments to Dambreak Wave: Horizontal Channel. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3): 291-308.
- LAUBER, G. ve HAGER, W. H., 1998b. Experiments to Dambreak Wave: Sloping Channel. *Journal of Hydraulic Research*, 36 (5): 761-773.
- LAIGLE, P. ve COUSSOT, P., 1997. Numerical Modelling of Mudflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123 (7): 617-623.
- LEAL, J., FERREIRA, R. ve CARDOSO, A., 2006. Dam-break Wave-front Celerity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132: 69-76.
- LIEM, R. ve KONGETER, J., 1999. Application of High-Speed Digital Image Processing to Experiments on Dam Break Waves. Proc. CADAM Meeting, Zaragossa, Spain, pp. 399-411.
- LIU, G. R. ve LIU, M. B., 2003. Smoothed Particle Hydrodynamics—A Meshfree Particle Method, World Scientific, Singapore.

- MOHAPATRA, P. K. ve BHALLAMUDI, S. M., 1996. Computation of A Dam-Break Flood Wave in Channel Transitions. *Advances in Water Resources*, 19 (3): 181-187.
- MOHAPATRA, P. K., ESWARAN, V. ve BHALLAMUDI, S. M., 1999. Two-Dimensional Analysis of Dam-Break Flow in Vertical Plane. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (2): 183-192.
- MONAGHAN, J.J., 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational. Physics*, 110: 399-406.
- NAVARRO, P.G., FRAS, A. ve VILLANUEVA, I., 1999. Dam-Break Flow Simulation: Some Results for One-Dimensional Models of Real Cases. *Journal of Hydrology*, 216:227-247.
- NAVARRO,P.G., BRUFAU, P., VASQUEZ-CENDON, M.E., MENDEZ, A. ve AGUDO, J.P., 2002. Numerical Model Validation with Experimental Data on Dam Break Problems Involving Wetting/Drying Fronts over Initially Dry Bed Adverse Slopes. *River Flow-Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, D. Bousmar & Y. Zech, Editors, Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands.
- NSOM, B., DEBIANE, K. ve PIAU, M. J., 2000. Bed Slope Effect on Dam Break Problem. *Journal of Hydraulic Research*, 38 (6): 459-464.
- NSOM, B., 2002. Horizontal Viscous Dam-Break Flow: Experiments and Theory *Journal of Hydraulic Engineering*,128 (5):543-546.
- OSHER, S. J. ve FEDKIW, R. P., 2002. *Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces*. Springer-Verlag.
- ÖRS, H., 1994. *Akışkanlar Mekaniği*. Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, İstanbul.
- QUECEDO, M., PASTOR, M., HERREROS, M. I., MERODO, J. A. F. ve ZHANG, Q., 2005. Comparison of Two Mathematical Models for Solving the Dam Break Problem Using the FEM Method. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 194: 3984-4005.
- SETHIAN, J. A., 1999. *Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science*. Cambridge University Press.

- STANSBY, P. K., CHEGINI, A. ve BARNES, T. C. D., 1998. The initial Stages of Dam-break Flow. *J. Fluid Mech.*, 374: 407-424.
- SHIGE-EDA, M. ve AKIYAMA, J., 2003. Numerical and Experimental Study on Two-Dimensional Flood Flows with and without Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (10): 817-821.
- SHIGEMATSU, T., LIU P. L.-F. ve ODA, K., 2004. Numerical Modeling of the Initial Stages of Dam-break Waves. *Journal of Hydraulic Research*, 42 (2):183-195.
- STOKER, J. J., 1957. *Water Waves*. Interscience Publishers, Wiley, Newyork, 333-341.
- STURM, T. W., 2001. *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill.
- SUMER, B.M., ÜNSAL, İ. ve BEYAZIT, M., 1983. *Hidrolik*, Birsen Yayınevi.
- THÜREY, N., 2003. A single-phase Free Surface Lattice Boltzmann Method. Masters Thesis, University of Erlangen, Nuremberg, Germany.
- TSENG, M. H., HSU, C. A. ve CHU, C. R., 2001. Channel Routing in Open Channel Flows with Surges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (2): 115-122.
- VALIANI, A., CALEFFI, V. ve ZANNI, A., 2002. Case Study: Malpasset Dam-Break Simulation Using a Two-Dimensional Finite Volume Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (5): 460-472.
- VERSTEEG, H., MALALASEKERA, W. ve MALALASEKERA, W., 1996. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Prentice Hall.
- VISSCHER, D. L. ve HAGER, W. H., 1998. *Dam Hydraulics*. John Willey and Sons Ltd., England, s.271-304.
- WANG, J. S., NI, H. G. ve HE, Y. S., 2000. Finite-Difference TVD Scheme for Computation of Dam-Break Problems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (4): 253-262.
- WILCOX, D. C., 2000. *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., La Canada, CA.
- WU, C., HUANG, G. ve ZHENG, Y., 1999. Theoretical Solution of Dam-Break Shock Wave. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (11): 1210-1215.

- YÜKSEL, Y., 2005. Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik, Arıkan Basım Yayım, İstanbul.
- ZHAO, D. H., SHEN, H.V., LAJ, J. S. ve TABIOS, G. Q., 1996. Approximate Riemann Solvers in FVM for 2D Hydraulic Shock Wave Modelling Journal of Hydraulic Engineering, 122 (12): 692-702.
- ZIENKIEWICZ, O. C. ve TAYLOR, R. L., 2000. Finite Element Method: Volume 3, Fluid Dynamics (Finite Element Method), John Wiley & Sons.
- ZOPPOU, C. ve ROBERTS, S., 1999. Catastrophic Collapse of Water Supply Reservoirs in Urban Areas. Journal of Hydraulic Engineering, 125 (7): 686-695.
- ZOPPOU, C. ve ROBERTS, S., 2000. Numerical Solution of the Two-Dimensional Unsteady Dam Break. Applied Mathematical Modelling, 24: 457-475.
- ZOPPOU, C. ve ROBERTS, S., 2003. Explicit Schemes for Dam-Break Simulations. Journal of Hydraulic Engineering, 129 (1): 11-34.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Antakya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimimi Antakya’da tamamladı. 1994-95 eğitim döneminde Karadeniz Teknik Üniversitesi Kimya Öğretmenliği Bölümü’nde bir yıl okudu. 1995 yılında girdiği Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 1999 yılında mezun oldu. Aynı yıl M.K.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1999 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisansa başladı. 2001 yılında lisansüstü çalışmalarını sürdürebilmek için geçici olarak Çukurova Üniversitesi’nde Araştırma Görevlisi olarak görevlendirildi. Yüksek lisansını 2002 yılında Çukurova Üniversitesinde tamamladı ve aynı yıl doktora başladı. Halen Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.