T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KIVRIMLI KANALDA TSUNAMİ DALGASI YAYILIMININ İNCELENMESİ

Cem YILMAZER

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik Programı

Danışman

Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KIVRIMLI KANALDA TSUNAMİ DALGASI YAYILIMININ İNCELENMESİ

Cem YILMAZER tarafından hazırlanan tez çalışması 17.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Cihan ŞAHİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Oral YAĞCI, Üye
Aydın Adnan Menderes Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Kıvrımlı Kanalda Tsunami Dalgası Yayılımının İncelenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Cem YILMAZER

İmza

Bu çalışma, “Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’nun (TÜBİTAK) 121M858” numaralı projesi ve “Yükseköğretim Kurulu’nun 100/2000 YÖK Doktora Bursu Programı” ile desteklenmiştir.

Aileme

ve

Tsunami sebebiyle hayatını kaybedenlere

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim ve tez sürecince her türlü yardımları sağlayan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Havva Anıl ARI GÜNER'e vermiş olduğu emekler için teşekkürlerimi sunmak isterim. Doktora tezimin olgunlaşmasına katkı sağlayan değerli tez izleme komitesi jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Oral YAĞCI'ya ve Sayın Doç. Dr. Cihan ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e saygılarımı sunmak isterim.

Doktora tez çalışmamı 100/2000 YÖK Doktora Bursu Programı kapsamında destekleyen Yükseköğretim Kurulu'na (YÖK) ve 121M858 nolu proje kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman maddi ve manevi olarak yanımda olan ve doktora sürecim boyunca beni destekleyen annem Sayın Canan YILMAZER ve babam Sayın Mahmut YILMAZER'e sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunarım. Yine doktora tezi sürecim boyunca her zaman yanımda olan değerli dostum Ulaş ERBİL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Cem YILMAZER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **ix**
KISALTMA LİSTESİ **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ **xiv**
TABLO LİSTESİ **xxv**
ÖZET **xxviii**
ABSTRACT **xxx**
1 GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Özeti 1
1.1.1 Tsunamilerin Akarsular Üzerindeki Etkileri ile İlgili Çalışmalar 1
1.1.2 Tsunamilerin Laboratuvar Ortamında Benzeştirilmesi ile İlgili Çalışmalar 5
1.1.3 Kıvrımlı Kanallarda Kararlı Akım Davranışının İncelenmesi ile İlgili Çalışmalar 10
1.1.4 FLOW-3D Sayısal Modeli ile İlgili Çalışmalar 13
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı 21
1.3 Hipotez 24
2 TSUNAMİ DALGASININ MEKANİĞİ, AKARSU ETKİLEŞİMLERİ VE KIVRIMLI KANALLARDA AKIM DAVRANIŞI **25**
2.1 Giriş 25
2.2 Tsunami (Depreşim Dalgası) 27
2.2.1 Tsunami Dalgalarının Oluşum ve Yayılım Mekanizması 27
2.2.2 Tsunami Model Ölçeğinin Belirlenmesi 32
2.2.3 Dalga Koşulları 41
2.3 Tsunamilerin Akarsular Üzerinde Etkileri 46
2.4 Kıvrımlı Kanalda Kararlı Akım Mekanizması 54
3 DENEYSEL YÖNTEMLER VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİ **63**

3.1 Giriş 63
3.2 Deney Sistemi 64
3.2.1 Kıvrımlı Kanal 64
3.2.2 Tsunami Üreteci 68
3.3 Ölçüm Teknikleri 69
3.3.1 Su Yüzü Değişimlerinin Ölçümü 69
3.3.2 Hız Büyüklüklerinin Ölçümü 71
3.4 Deneylerin Sınıflandırılması 77
3.4.1 Froude Ölçeğinin Belirlenmesi 77
3.4.2 Tsunami Dalga Profilleri 77
4 SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİ VE FLOW-3D UYGULAMASI 81
4.1 Giriş 81
4.2 FLOW-3D 82
4.2.1 Sayısal Modelin Teorik Yapısı 83
4.2.2 Hesaplama Ağı Yapısı 92
4.2.3 Model Hataları ve Stabilite Koşulları 93
4.2.4 Sınır Koşulları 97
4.2.5 Türbülans Kapama Modelleri 99
4.2.6 Sonuçların İrdelenmesi 101
4.3 Sayısal Modelin Kurulumu 102
4.3.1 Kıvrımlı Kanalda Kararlı Akımın Modellenmesi 102
4.3.2 Kıvrımlı Kanalda Tsunami Dalgasının İlerlemesinin Modellenmesi 107
5 KIVRIMLI KANALDA KARARLI AKIMIN İNCELENMESİ 113
5.1 Giriş 113
5.2 Kıvrımlı Kanalda Kararlı Akımın Deneysel Olarak İncelenmesi 114
5.2.1 Akım Hızları 114
5.2.2 İç ile Dış Kıvrım Arasındaki Hız Farkları 127
5.2.3 Sekonder Akımın İncelenmesi 139

5.2.4 Boyutsuz Parametreler ile İnceleme 146

5.3 Kıvrımlı Kanalda Kararlı Akımın Sayısal Olarak Modellenmesi 151

5.3.1 Su Derinlikleri 152

5.3.2 Derinlik Boyunca Ortalama Hız 153

5.3.3 Akım Doğrultusundaki Hız Profilleri 156

5.3.4 Taban Kayma Gerilmesi ve Kayma Hızı 160

5.3.5 Türbülans Kinetik Enerjisi 161

6 KIVRIMLI KANALDA TSUNAMİ DALGASININ İLERLEMESİNİN İNCELENMESİ 167

6.1 Giriş 167

6.2 Su Yüzü Değişimlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi 168

6.2.1 Akım Olmaması Durumu (Statik Hal) 168

6.2.2 Kararlı Akım Durumu 178

6.2.3 Birlikte Değerlendirme 196

6.3 Tsunami Dalgasının İlerlemesi Esnasında Elde Edilen Akım Hızları 204

6.4 Froude Sayısının Değişimi 214

6.5 Kıvrımlı Kanalda Tsunami Dalgasının İlerlemesinin Sayısal Olarak Modellenmesi 215

6.5.1 Su Yüzü Değişimlerinin Sayısal Model ile İncelenmesi 215

6.5.2 Tsunami Dalgasının İlerlemesi Esnasında Elde Edilen Akım Hızlarının Sayısal Model ile İncelenmesi 242

6.5.3 Sayısal Modelin Uygulanabilirliği 257

7 SONUÇ 263

KAYNAKÇA 276

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 290

SİMGE LİSTESİ

d_s	Akarsu Tabanındaki Katı Madde Dane Çapı
λ	Akım Çizgilerindeki Sapma Açısı
U	Akım Doğrultusundaki Hız
A	Akışkan En Kesit Alanı
A_F	Alan Kesri
P	Basınç
Fr_b	Bore Froude Sayısı
α	Bore Gücü
L	Dalga Boyu
a	Dalga Genliği
c_p	Dalga Grup Hızı
T	Dalga Periyodu
η	Su Yüzü Değişimi
H	Dalga Yüksekliği
f_{DW}	Darcy-Weisbach Sürtünme Katsayısı
Q	Debi
C_d	Debi Katsayısı
V_{exp}	Deneysel Modelde Ölçülen Veri
c_{exp}	Deneysel Tsunami Dalga Hızı
W_n	Deniz Tabanındaki Deplasman Hızı
U_d	Derinlik Boyunca Ortalama Hız
G	Dış Kuvvetlere Neden Olan İvme
μ	Dinamik Viskozite
N_μ	Dinamik Viskozite Oranı

U_m	En Kesitte Ortalama Akım Hızı
E	Euler Sayısı
S_f	Fay Alanı
D	Fay Düzleminin Ortalama Yer Değiştirme Miktarı
$u(\xi)$	Fay Üzerindeki Nihai Kayma Dağılımı
Fr	Froude Sayısı
N_{Fr}	Froude Sayısı Oranı
N_l	Geometrik Benzerlik Oranı
b	Gözenekli Ortamda Akış Kayıp ve Kazanımları
V_F	Hacim Kesri
D_h	Hidrolik Çap
R_h	Hidrolik Yarıçap
Ir	Iribarren Sayısı
B	Kanal Genişliği
V	Hız
N_V	Hız Oranı
l	Uzunluk
t	Zaman
u	Kartezyen Koordinat için -x (Küresel için Radyal) Yönündeki Hız
v	Kartezyen Koordinat için -y (Küresel için Azimut) Yönündeki Hız
w	Kartezyen Koordinat için -z Yönündeki Hız
u'	Kartezyen Koordinat için -x Yönündeki Çalkantı Hızı
v'	Kartezyen Koordinat için -y Yönündeki Çalkantı Hızı
w'	Kartezyen Koordinat için -z Yönündeki Çalkantı Hızı
τ	Kayma Gerilmesi
u_*	Kayma Hızı
U_s	Kaynağın Yüzeyindeki Akışkan Hızı
F	Kıvrımlı Kanalda Akışkan Partikülüne Etki Eden Kuvvet
ΔH	Kıvrımlı Kanalda İç ile Dış Kıvrım Arasındaki Su Seviyesi Farkı
h	Kıvrımlı Kanalda/Sığ Suda Ortalama Su Derinliği

W	Kıvrımlı Kanalda Üst Kanal Genişliği
R	Kıvrımlı Kanalın Eğrilik Yarıçapı
a_0^+	Kıvrımlı Kanalın Girişinde Pozitif Genlik
R_i	Kıvrımlı Kanalın İç Eğrilik Yarıçapı
k_h	Kindsvater-Shen Formülü için Düzeltme Değeri
ν	Kinematik Viskozite
R_{SOR}	Kütle Kaynağı Terimi
n	Manning Pürüzlülük Değeri
a_m	Modeldeki Dalga Genliği
μ_m	Modeldeki Dinamik Viskozite
Fr_m	Modeldeki Froude Sayısı
X_m	Modeldeki Parametre
Re_m	Modeldeki Reynolds Sayısı
d_m	Modeldeki Su Derinliği
ρ_m	Modeldeki Suyun Özgül Kütlesini
M_W	Moment Büyüklüğü
a^-	Negatif Dalga Genliği
k_s	Nikuradse Eşdeğer Yüzey Pürüzlülüğü
N_x	Ölçek Oranı
N_γ	Özgül Ağırlık Oranı
T	Periyot
a^+	Pozitif Dalga Genliği
a_p	Prototipteki Dalga Genliği
μ_p	Prototipteki Dinamik Viskozite
Fr_p	Prototipteki Froude Sayısı
X_p	Prototipteki Parametre
Re_p	Prototipteki Reynolds Sayısı
d_p	Prototipteki Su Derinliği
ρ_p	Prototipteki Suyun Özgül Kütlesi
Re	Reynolds Sayısı

S_r	Radyal Su Yüzeyi Eğimi
N_{Re}	Reynolds Sayısı Oranı
V_{CFD}	Sayısal Modelde Ölçülen Veri
d	Su Derinliği
ρ	Suyun Özgül Kütlesi
f_c	Sürtünme Katsayısı
M_0	Sismik Moment
St	Strouhal Sayısı
τ_b	Taban Kayma Gerilmesi
N	Toplam Veri Sayısı
c	Tsunami Dalga Hızı
R_{DIF}	Türbülans Difüzyon Terimi
k	Türbülans Kinetik Enerjisi
Sc	Türbülans Schmidt Sayısı
β	Üçgen Savaktaki Tepe Açısı
h_s	Üçgen Savaktaki Savak Yükü
f	Viskoz Terimlerden Kaynaklı İvme
Cr	Yansıma Katsayısı
g	Yerçekimi İvmesi
N_g	Yerçekimi İvmesi Oranı
μ_G	Yeryüzünün Kayma Modülü
N_ρ	Özgül Kütle Oranı
σ	Yüzeysel Gerilme
σ_c	Yüzeysel Gerilme Katsayısı
N_T	Zaman Ölçek Oranı

KISALTMA LİSTESİ

ADV	Acoustic Doppler Velocimetry
AH	Akışkan Hacmi
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
FAVOR	Fractional Area/Volume Obstacle Representation
GMO	General Moving Object
GMRES	The Improved Generalized Minimal Residual
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KOERI	Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute
KTDD	Kısmi Türevli Diferansiyel Denklemler
LES	Large Eddy Simulation
MARE	Mean Absolute Relative Error
MAX	Maksimum Değerin Hatası
NRMSE	Normalized Root Mean Square Error
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RMSE	Root Mean Square Error
RNG	Renormalization Group
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
STL	Stereolithography
USGS	United States Geological Survey
VOF	Volume of Fluid
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Deprem fay kırılmasından kaynaklı tsunami oluşumu (Saito, 2019).....30

Şekil 2.2 Deprem kaynaklı tsunami oluşum geometrisi (Pelinovsky, 2006).....31

Şekil 2.3 Yüzeysel gerilme katsayısı ile su sıcaklığı arasındaki ilişki (Markov vd., 2008).....39

Şekil 2.4 Literatürdeki çalışmaların ve örnek tsunamilerin dalga sınıflandırması (Charvet, 2012).....46

Şekil 2.5 (a) Güçlü ve (b) dalgalı bore şematik gösterimi (Tsuji vd., 1991).....48

Şekil 2.6 (a) 1983 Japonya depreminde tsunami sonrası Noshiro Limanı'nda küçük bir kanalda gözlenen dalgalı bore oluşumu (Tsuji vd., 1991), (b) ve (c) Fukushima 2011 depreminde oluşan tsunami dalgalarının Sunaoshi Nehri'nde dalgalı bore olarak ilerlemesi (Miyagi Prefektörlüğü Polisi Hava Fotoğrafı).....49

Şekil 2.7 (a) 2011 Tohoku Depremi ile oluşan tsunami dalgasının akarsu duvarını aşarak Miyako şehrine ilerlemesi (Wuppukondur, 2021), (b) ve (c) Bu depremden kaynaklı tsunamiye ait Kuzey Kaliforniya'da bulunan Mad Nehri'nin ağzından itibaren 1.5 km mesafedeki tsunami dalgası (Tolkova, 2018).....51

Şekil 2.8 Pürüzsüz taban için (n=0) akarsu ağzında meydana gelen kuramsal tsunami zaman serisi (Tolkava vd., 2015'ten sayısallaştırılarak elde edilmiştir).....54

Şekil 2.9 Kanal kıvrımında sekonder akım oluşumu.....56

Şekil 2.10 Kıvrımlı açık kanal akımı ve akıma dik yönde oluşan sirkülasyon (Blanckaert ve De Vriend, 2004).....56

Şekil 2.11 Akarsu kıvrımlarındaki akışkan partikülünün hareketi ve silindirik koordinat sistemi ile gösterimi (Güngör, 1997).....57

Şekil 2.12 Kıvrımlı bir kanalda enine su yüzü profili (Güngör, 1997).....57

Şekil 2.13 Kanal kıvrımında akım çizgileri (Julien, 2002).....58

Şekil 2.14 Akarsu kıvrımında akım (Julien, 2002).....59

Şekil 2.15 Sabit tabanlı bir kanal kıvrımında akımın radyal düzlemde hız profilleri (Güngör, 1997).....62

Şekil 3.1 Kıvrımlı kanal deney sistemi.....64

Şekil 3.2 Deney sistemindeki üçgen savak, dinlendirme havuzları ve pompa.....65

Şekil 3.3 Deney sisteminin plan ve en kesitleri.....66

Şekil 3.4 Deney sisteminin üç boyutlu SkecthUp çizimi 66

Şekil 3.5 Kindsvater-Shen denklemi ve deney sonuçlarına göre elde edilen anahtar eğrisi 68

Şekil 3.6 Deney sistemindeki tsunami üreteci 69

Şekil 3.7 (a) Dalga monitörü ve (b) dalga probları 70

Şekil 3.8 Dalga problarının kıvrımlı kanal üzerindeki konumları 71

Şekil 3.9 (a) Kanal üstünde ADV yerleşimi, (b) ADV cihaz bileşenleri (Nortek AS, 2018) ve (c) ADV probu için koordinat sistemine göre tanımlanan alıcı numaralandırmaları (Nortek AS, 2018) 72

Şekil 3.10 (a) Kıvrımlı kanalda kararlı akımın incelenmesindeki hız ölçüm konumları ve (b) tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca yayılımı esnasındaki hız ölçüm konumları 76

Şekil 3.11 Tsunami üreteci ile oluşturulan tsunami dalgaları ve tekrarlanabilirlik testleri: (a) a^+/d= 0.24, (b) a^+/d= 0.48, (c) a^+/d= 0.69 ve (d) a^+/d= 0.95 80

Şekil 4.1 HAD metodolojisi akış şeması (Muiruri ve Motsamai, 2018) 83

Şekil 4.2 (a) Serbest yüzeye yakın bölgede akışkan hacmi fonksiyonları (Barkhudarov, 2004), (b) Bir boru kesitinde serbest yüzey oluşumu ile akışkan hacmi fonksiyonları (Flow Science, 2002) 85

Şekil 4.3 FLOW-3D hesaplama ağı teknikleri: (a) bağlantılı ağ yapısı (linked mesh), (b) sınır uyumlu ağ yapısı (conforming mesh), (c) iç içe geçmiş ağ yapısı (nested mesh), (d) kısmen örtüşen ağ yapısı (partially overlapping mesh) (Flow Science, 2002) 93

Şekil 4.4 Stokes ve Cnoidal (Fourier serisi yöntemi) dalga sınır koşulunda dalga profilinin belirlenmesi (Flow Science, 2002) 99

Şekil 4.5 Zamansal çalkantı hız bileşenleri ve ortalama hız 100

Şekil 4.6 (a) Uygun hesaplama ağı hücre sayısını belirlemek için hata metrikleri, (b) uygun türbülans kapama modeli için hata metrikleri, (c) kaba hesaplama ağı-FAVOR, (d) ince hesaplama ağı-FAVOR, (e) memba ölçüm konumunda y=0.005 m'de hızın değişimi, (f) 1A ölçüm konumunda y=0.005 m'de hızın değişimi, (g) 1C ölçüm konumunda y=0.005 m'de hızın değişimi (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 104

Şekil 4.7 (a) Kıvrımlı kanala ait FLOW-3D ile oluşturulan BDT ve hesaplama ağına ait ağ düzlemleri, (b) boyutları verilen hesaplama ağı ve (c) sınır koşulları (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 105

Şekil 4.8 (a) Kıvrımlı kanala ait FLOW-3D ile oluşturulan BDT, (b) FLOW-3D ve deneysel modelde kanal boyunca yerleştirilen problar, (c) boyutları verilen hesaplama ağı ve (d) sınır koşulları 109

Şekil 4.9 Farklı hücre boyutlarına sahip modellerden elde edilen tsunami dalga profillerinin karşılaştırılması: (a-h) sırasıyla Prob 1-8 için 111

Şekil 5.1 (a) d=15 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için memba ölçüm konumu hız profilleri ve (b) hız ölçüm konumları 114

Şekil 5.2 Farklı ölçüm konumlarındaki d=15 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için hız profilleri 117

Şekil 5.3 (a) d=20 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için memba ölçüm konumu hız profilleri ve (b) hız ölçüm konumları 120

Şekil 5.4 Farklı ölçüm konumlarındaki d=20 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için hız profilleri 121

Şekil 5.5 (a) d=25 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için memba ölçüm konumu hız profilleri ve (b) hız ölçüm konumları 124

Şekil 5.6 Farklı ölçüm konumlarındaki d=25 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için hız profilleri 125

Şekil 5.7 d=15 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması 127

Şekil 5.8 d=15 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması 128

Şekil 5.9 d=15 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması 128

Şekil 5.10 d=15 cm derinlik için hız profillerinin kıvrımlı kanal boyunca vektör haritaları: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s. 130

Şekil 5.11 d=15 cm derinlik için kıvrımlı kanal boyunca maksimum birim debi çizgisi: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s..... 131

Şekil 5.12 d=20 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması .. 132

Şekil 5.13 d=20 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması .. 132

Şekil 5.14 d=20 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması 133

Şekil 5.15 d=20 cm derinlik için hız profillerinin kıvrımlı kanal boyunca vektör haritaları: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s. 134

Şekil 5.16 d=20 cm derinlik için kıvrımlı kanal boyunca maksimum birim debi çizgisi: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s..... 135

Şekil 5.17 d=25 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması .. 136

Şekil 5.18 d=25 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması .. 136

Şekil 5.19 d=25 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması 137

Şekil 5.20 d=25 cm derinlik için hız profillerinin kıvrımlı kanal boyunca vektör haritaları: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s. 139

Şekil 5.21 d=25 cm derinlik için kıvrımlı kanal boyunca maksimum birim debi çizgisi: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s..... 139

Şekil 5.22 d=15 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 141

Şekil 5.23 d=15 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 141

Şekil 5.24 d=15 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 142

Şekil 5.25 d=20 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 143

Şekil 5.26 d=20 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 143

Şekil 5.27 d=20 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 144

Şekil 5.28 d=25 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 145

Şekil 5.29 d=25 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 145

Şekil 5.30 d=25 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri 146

Şekil 5.31 Boyutsuz derinlik boyunca ortalama hız: (a) Memba, (b) 1. Kesit, (c) 2. Kesit, (d) 3. Kesit, (e) 4. Kesit (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 149

Şekil 5.32 Boyutsuz taban kayma gerilmesi: (a) Memba, (b) 1. Kesit, (c) 2. Kesit, (d) 3. Kesit, (e) 4. Kesit (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 150

Şekil 5.33 Deney 1-9 için akım doğrultusundaki hız büyüklükleri, derinlik boyunca ortalama hızları ve kayma hızları için FLOW-3D ile deneysel verilerin ait hata metrikleri: (a) MARE (%), (b) RMSE (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 151

Şekil 5.34 HAD modelinden elde edilen su derinlikleri: (a) d = 0.15 m, (b) d = 0.20 m, (c) d = 0.25 m (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 153

Şekil 5.35 Derinlik boyunca ortalama hızlar: (a-i) sırasıyla deney 1-9 için (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 154

Şekil 5.36 HAD modelinden elde edilen hız büyüklükleri: (a-i) sırasıyla deney 1-9 için (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 155

Şekil 5.37 Boyutsuz hız profilleri: (a) Deney 1, (b) Deney 2 ve (c) Deney 3 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 157

Şekil 5.38 Boyutsuz hız profilleri: (a) Deney 4, (b) Deney 5 ve (c) Deney 6 Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 158

Şekil 5.39 Boyutsuz hız profilleri: (a) Deney 7, (b) Deney 8 ve (c) Deney 9 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 159

Şekil 5.40 HAD modelinden elde edilen taban kayma gerilmeleri: (a-i) sırasıyla deney 1-9 için (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 162

Şekil 5.41 Boyutsuz türbülans kinetik enerjisi: (a) Deney 1, (b) Deney 2 ve (c) Deney 3 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 164

Şekil 5.42 Boyutsuz türbülans kinetik enerjisi: (a) Deney 4, (b) Deney 5 ve (c) Deney 6 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 165

Şekil 5.43 Boyutsuz türbülans kinetik enerjisi: (a) Deney 7, (b) Deney 8 ve (c) Deney 9 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024) 166

Şekil 6.1 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 168

Şekil 6.2 a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait kesitlerdeki deney fotoğrafları..... 170

Şekil 6.3 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 171

Şekil 6.4 a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait kesitlerdeki deney fotoğrafları..... 171

Şekil 6.5 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 173

Şekil 6.6 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait kesitlerdeki deney fotoğrafları..... 174

Şekil 6.7 15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 176

Şekil 6.8 a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait kesitlerdeki deney fotoğrafları..... 177

Şekil 6.9 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 179

Şekil 6.10 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 179

Şekil 6.11 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 180

Şekil 6.12 a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulunda kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi 180

Şekil 6.13 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 183

Şekil 6.14 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 183

Şekil 6.15 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 184

Şekil 6.16 a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulunda kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi 184

Şekil 6.17 20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 187

Şekil 6.18 20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 188

Şekil 6.19 20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 189

Şekil 6.20 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulunda kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi 189

Şekil 6.21 15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 192

Şekil 6.22 15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 193

Şekil 6.23 15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi 193

Şekil 6.24 a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait deney fotoğrafı 194

Şekil 6.25 d=25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı debilere göre problardaki su yüzü değişimleri 197

Şekil 6.26 d=25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı debilere göre problardaki su yüzü değişimleri 199

Şekil 6.27 d=20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı debilere göre problardaki su yüzü değişimleri 201

Şekil 6.28 d=15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı debilere göre problardaki su yüzü değişimleri 203

Şekil 6.29 (a) a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın topluluk/grup ortalamalı derinlik boyunca hız profilinin dalga periyodu boyunca değişimi ve (b) tsunami dalgasının yayılımı esnasındaki hız ölçüm konumları 206

Şekil 6.30 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MANSAP-5 konumu, y=0.5 cm)..... 206

Şekil 6.31 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MANSAP-5 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)..... 207

Şekil 6.32 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 209

Şekil 6.33 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 209

Şekil 6.34 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 210

Şekil 6.35 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 210

Şekil 6.36 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 211

Şekil 6.37 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 211

Şekil 6.38 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 212

Şekil 6.39 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 212

Şekil 6.40 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 213

Şekil 6.41 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MEMBA-1 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 213

Şekil 6.42 Kıvrımlı kanal boyunca değişen tsunami dalgasının pozitif genliğinin kanal girişindeki pozitif genliğine oranına göre bore Froude sayısının değişimi 214

Şekil 6.43 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri 216

Şekil 6.44 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri 218

Şekil 6.45 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri 219

Şekil 6.46 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri 221

Şekil 6.47 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....222

Şekil 6.48 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....224

Şekil 6.49 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....225

Şekil 6.50 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....226

Şekil 6.51 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....228

Şekil 6.52 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....229

Şekil 6.53 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....230

Şekil 6.54 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....231

Şekil 6.55 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....233

Şekil 6.56 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....234

Şekil 6.57 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....235

Şekil 6.58 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri.....237

Şekil 6.59 Kıvrımlı kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasına ait FLOW-3D ile elde edilen su yüzü değişimleri (a^+/d=0.69 oranı ve Q_0=0 m^3/s akım koşulları).....238

Şekil 6.60 Kıvrımlı kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasına ait deney fotoğraflarının ve FLOW-3D ile elde edilen simülasyon görsellerinin karşılaştırılması (a^+/d = 0.24 bore gücü ve Q_0 = 0 m^3/s akım koşulları için).....240

Şekil 6.61 Kıvrımlı kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasına ait deney fotoğraflarının ve FLOW-3D ile elde edilen simülasyon görsellerinin karşılaştırılması (a^+/d = 0.69 bore gücü ve Q_0 = 0 m^3/s akım koşulları için) 241

Şekil 6.62 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MANSAP-5 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 243

Şekil 6.63 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 244

Şekil 6.64 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 244

Şekil 6.65 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 245

Şekil 6.66 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 245

Şekil 6.67 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 246

Şekil 6.68 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 246

Şekil 6.69 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 247

Şekil 6.70 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 247

Şekil 6.71 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ... 248

Şekil 6.72 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MEMBA-1 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 248

Şekil 6.73 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (MANSAP-5 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 250

Şekil 6.74 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (4A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ...251

Şekil 6.75 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (4B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)cm 251

Şekil 6.76 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (4C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ...252

Şekil 6.77 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (3A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ...252

Şekil 6.78 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (3B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ...253

Şekil 6.79 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (3C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ...253

Şekil 6.80 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (2A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ...254

Şekil 6.81 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (2B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ...254

Şekil 6.82 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (2C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) ...255

Şekil 6.83 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (MEMBA-1 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm) 255

Şekil 6.84 Kıvrımlı kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasına ait FLOW-3D ile elde edilen hız büyüklükleri 256

Şekil 6.85 (a) Küçük Menderes Havzası Google Earth görüntüsü ve (b) Küçük Menderes Nehri incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü....260

Şekil 6.86 (a) Büyük Menderes Havzası Google Earth görüntüsü ve (b) Büyük Menderes Nehri incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü....260

Şekil 6.87 (a) Kadıköy Kurbalığıdere incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü ve (b) Kadıköy Kurbalığıdere çevresindeki yerleşimin Google Earth görüntüsü 261

Şekil 6.88 (a) Bakırköy Ayamama Deresi incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü ve (b) Bakırköy Ayamama Deresi çevresindeki yerleşimin Google Earth görüntüsü 261

Şekil 6.89 Sığacık Körfezi Azmak Deresi incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü.....262

Şekil 6.90 Alaçatı Karşıyaka Azmağı incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü.....262

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Örnek olarak prototipteki tsunami dalga parametrelerinin model ölçeğine dönüştürülmesi 37

Tablo 2.2 Literatürdeki çalışmalara ait laboratuvar koşullarındaki tsunami dalga üreteçleri ve dalga koşullarına ait örnekler (Charvet, 2012) 45

Tablo 2.3 Tsunamilerde gözlenen akarsularda yayılma mesafeleri (Wuppukondur, 2021) 50

Tablo 3.1 Probların referans probuna (Prob 1) olan uzaklıkları 71

Tablo 3.2 Deney koşulları 79

Tablo 4.1 Uygun hesaplama ağı hücre sayısını belirlemek için hesaplanan NRMSE hata metrikleri 110

Tablo 4.2 Uygun hesaplama ağı hücre sayısını belirlemek için hesaplanan MAX hata metrikleri 110

Tablo 5.1 d=15 cm derinlik için kararlı akım koşulunda Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için U_d (m/s), Reynolds ve Froude sayısı değerleri 115

Tablo 5.2 d=20 cm derinlik için kararlı akım koşulunda Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için U_d (m/s), Reynolds ve Froude sayısı değerleri 119

Tablo 5.3 d=25 cm derinlik için kararlı akım koşulunda Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için U_d (m/s), Reynolds ve Froude sayısı değerleri 123

Tablo 5.4 Kıvrımlı kanalda kararlı akımın incelenmesi için gerçekleştirilen deneylerde kullanılan temel boyutsuz hidrolik parametreler 147

Tablo 5.5 Deney 1-9 için akım doğrultusundaki hız büyüklükleri, derinlik boyunca ortalama hızları ve kayma hızları için FLOW-3D ile deneysel verilerin ait hata metrikleri 152

Tablo 6.1 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı problardaki profil karakteristikleri 169

Tablo 6.2 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı problardaki profil karakteristikleri 172

Tablo 6.3 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı problardaki profil karakteristikleri 175

Tablo 6.4 15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı problardaki profil karakteristikleri 177

Tablo 6.5 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 181

Tablo 6.6 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 181

Tablo 6.7 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 182

Tablo 6.8 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 185

Tablo 6.9 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 186

Tablo 6.10 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 186

Tablo 6.11 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 190

Tablo 6.12 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 190

Tablo 6.13 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 191

Tablo 6.14 15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 194

Tablo 6.15 15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 195

Tablo 6.16 15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri 195

Tablo 6.17 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 216

Tablo 6.18 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 218

Tablo 6.19 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 220

Tablo 6.20 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 221

Tablo 6.21 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 223

Tablo 6.22 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 224

Tablo 6.23 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 225

Tablo 6.24 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 227

Tablo 6.25 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 228

Tablo 6.26 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 229

Tablo 6.27 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 230

Tablo 6.28 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 232

Tablo 6.29 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0= 0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 233

Tablo 6.30 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 234

Tablo 6.31 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 236

Tablo 6.32 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri 237

Tablo 6.33 Kıvrımlı kanalda ilerleyen tsunami dalgasına ait hız-zaman serilerinin hata metrikleri 249

ÖZET

Kıvrımlı Kanalda Tsunami Dalgası Yayılımının İncelenmesi

Cem YILMAZER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER

Bu tez çalışmasında, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak menderesleneen akarsular laboratuvar ortamında modellenerek farklı akım koşullarında tsunami dalgasının kanaldaki ilerlemesi incelenmiştir. Tsunami dalgasının doğadaki davranışını daha gerçekçi benzeştirmek için laboratuvar ortamında pnömatik tsunami üreteci vasıtasıyla N-dalga üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen tsunami dalgaları a^{+}/d=0.24, 0.48, 0.69 ve 0.95 olmak üzere dört farklı bore gücünde sınıflandırılmıştır. Akarsularda kurak ve yağışlı hava koşullarını benzeştirmek için akımın olmadığı statik hal ile üç farklı debide (Q=16, 35, 50 l/s) kararlı akım koşulları oluşturulmuştur. Böylece toplamda 16 farklı deney koşulu incelenmiştir. Kıvrımlı kanalda dalga probları vasıtasıyla özellikle iç ile dış kıvrım arasında oluşabilecek su yüzü değişimleri incelenmiştir. Acoustic Doppler Velocimetry aracılığıyla kıvrımlı kanal boyunca kararlı akım koşullarında ve tsunami dalgası ilerlemesi esnasında kararsız akım koşullarında hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sistem, FLOW-3D aracılığıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi ile sayısal olarak modellenmiştir. Farklı hata metrikleri kullanılarak sayısal modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Kıvrımlı kanalda kararlı akımın incelenmesinde 180° açılı ilk kıvrımın iç tarafından 120° açılı ikinci kıvrımın iç kıvrımına kadar hızın ortalama %30 ve taban kayma gerilmesinin %10 arttığı görülmüştür. Tsunami dalgasının kıvrımlı kanallarda ilerlemesinin incelenmesinde $a^+/d=0.24$ bore gücü için pürüzsüz ve serbest yüzeye sahip dalga katarı şeklinde dalgalı bore formu gözlemlenmiştir. İlk kıvrımdan itibaren ilerleme doğrultusuna göre çapraz dalgaların oluşmaya başladığı görülmüştür. 0.24 bore gücü için pozitif genlik ilk dış kıvrımda ve son dış kıvrımda sırasıyla 1.9 ve 2.1 kat artmaktadır. $a^+/d=0.48$ bore gücüne sahip dalgada, göreceli olarak zayıf bir dalga kırılması gözlemlenmiştir. İlk dalga tepesinde hafif bir kırılma meydana gelmekte ve bu kırılmanın ardından ikincil dalgalar daha düzenli bir forma ulaşmaktadır. $a^+/d=0.69$ ile $a^+/d=0.95$ bore gücüne sahip tsunami dalgaları için köpürme, belirgin çevriler ve yoğun türbülans oluşumu gözlemlenmiştir. Pozitif genlikler, kanala girişinde dalganın kırılmasıyla birlikte yaklaşık %40 ve %50 azalmıştır. Kıvrımları geçtikten sonra son kıvrımdan itibaren çapraz dalgalar ve dalga katarı oluşmaya başlamıştır. Kararlı akım debisinin artmasıyla tsunami dalgasının ilerleme hızı yavaşlamıştır. $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip dalgada, pozitif genlikli dalganın hızı kanala girişten itibaren dalganın kırılmasıyla birlikte yaklaşık %40 azalmıştır. Dalga kırılmasından sonra kanal boyunca belirgin bir hız değişimi gözlemlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Tsunami, kıvrımlı kanal, N-dalga, fiziksel model, hesaplamalı akışkanlar dinamiği

ABSTRACT

Investigation of Tsunami Wave Propagation in a Meandering Channel

Cem YILMAZER

Department of Civil Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER

In this dissertation, meandering rivers were modeled in the laboratory originally from the literature and the propagation of the tsunami wave in the meandering channel was investigated under different flow conditions. In order to more realistically simulate the behavior of the tsunami wave in nature, N-waves were generated by means of a pneumatic tsunami generator. The generated tsunami waves were classified into four different bores: a^+/d=0.24, 0.48, 0.69 and 0.95. In order to simulate dry and wet weather conditions in rivers, static conditions with no flow and steady flow conditions of three different discharges (Q=16, 35, 50 l/s) were developed. Therefore, 16 different experimental conditions were investigated. In the meandering channel, the water surface elevations that may occur especially between the inner and outer bends were observed by using wave probes. Acoustic Doppler Velocimetry was used to measure velocity along the meandering channel under steady flow conditions and under unsteady flow conditions of tsunami wave propagation. The experimental setup was numerically modeled using the Computational Fluid Dynamics method via FLOW-3D. The numerical model was validated using by different error metrics.

The velocity was increased by 30% and the bed shear stress increased by 10% from the inner bend of the first meander with an angle of 180° to the inner bend of the second meander with an angle of 120° in the investigation of the steady flow in the meandering channel. In the study of tsunami wave propagation in meandering channels, a smooth, quasi-two-dimensional free-surface profile and wave train were observed for $a^+/d=0.24$. The positive amplitude increases by a factor of 1.9 and 2.1 at the first and last outer bend of meanders, respectively for $a^+/d=0.24$. For $a^+/d=0.48$ bore, a relatively weak wave breaking and a slight refraction were observed at the first wave crest and, the secondary waves became flatter. On the other hand, air entrainment, marked roller and intense turbulence were observed for tsunami waves with $a^+/d=0.69$ and $a^+/d=0.95$ bore. The positive amplitude decreased immediately after breaking at an amount of 40% and 50% respectively. Cross waves and wave train started to form from the last meander after passing the meandering channel. The propagation of the tsunami wave slowed down as the steady-state flow discharge increased. The velocity of wave with the positive amplitude decreased by about 40% from the entrance to the channel with the breaking of the wave for $a^+/d=0.69$. No change in the velocity of tsunami propagation along the channel was observed after wave breaking.

Keywords: Tsunami, meandering channel, N-wave, physical model, computational fluid dynamics

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

1.1.1 Tsunamilerin Akarsular Üzerindeki Etkileri ile İlgili Çalışmalar

Tsunamilerin akarsular üzerindeki etkileri ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Az sayıdaki bu çalışmalarda esas olarak tsunami dalgasının akarsu boyunca yayılma kapasitesi (katetebildiği mesafe) ve akarsu ile etkileşimi analiz edilmiştir (Tsuji vd., 1991; Yasuda, 2010).

Bu çalışmaların büyük bölümü Pasifik'te meydana gelen 7 ve üzeri büyüklükteki depremlerin ardından meydana gelen tsunamilerin Japonya (Abe, 1986; Yasuda, 2010; Tanaka ve Tinh, 2012; Tanaka vd., 2014; Adityawan vd., 2012) ve Amerika Birleşik Devletleri'nin kuzey batısındaki -özellikle Columbia nehri- (Wilson ve Torum 1972a,b; Yeh vd., 2012; Tolkova, 2013) akarsular boyunca davranışları üzerine yapılmıştır. Tanaka vd. (2008) 2004 yılında Hint Okyanusu'nda Sumatra açıklarında meydana gelen 9.1 büyüklüğündeki depremin yol açtığı tsunaminin Sri Lanka'daki akarsular boyunca davranışlarını araştırmışlardır. Fritz vd. (2011) ise 2010 Şili tsunamisinin Şili'deki Maula nehri boyunca katettiği mesafeyi ve nehir boyunca tsunami dalgasının hidrodinamik davranışlarını incelemişlerdir. Arazi çalışmaları akarsuyun geometrik ve topografik özellikleri (geometrisi ve taban eğimi vs.) ve tsunaminin özelliklerine bağlı olarak tsunami dalgasının akarsu boyunca onlarca kilometre boyunca yayılabildiğini kanıtlamıştır. Örneğin 2011 yılında Japonya'da meydana gelen Tohoku tsunamisi Kitakami ırmağının üzerinde denizden 17 km içerideki inşa edilmiş bağlamanın üzerinden aşarak ırmak uzunluğu boyunca 49 km içeriye ulaşmıştır (Tanaka vd., 2014). Akarsuların dar bir kanyon boyunca aktıkları Kesen ve Yahagi ırmaklarında tsunaminin akış yukarı katettiği mesafeler sırasıyla 8.1 km ve 6.7 km olarak ölçülmüştür (Liu vd., 2013). Ayrıca

gelgit etkisinin güçlü olduğu akarsularda gelgit fazı da önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Tsunami dalgası gel durumu için akarsu boyunca daha uzun mesafe yayılırken, git durumunda bunun tersi bir durum söz konusu olmaktadır (Wilson ve Torum, 1972b; Kayane vd., 2011; Yeh vd., 2012). Tsuji vd. (1991), laboratuvar gözlemlerine ve teorik yaklaşımlara dayanan çalışmalarında akarsuda ilerleyen tsunami dalgası yüksekliğinin 1.5 katına çıkabileceğini bulmuşlardır.

Tsunami dalgasının akarsuya girdikten sonra davranışını inceleyen diğer çalışmalar aşağıda sıralanmıştır:

Abe (1986), 1983 tarihli Japonya Depreminde oluşan tsunami dalgasının beş büyük nehirde yayılmasıyla ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir. Mendereslenme, akışın dallanması gibi çeşitli faktörlerin dalga profillerini karmaşık hale getirebileceği sonucuna varılmıştır. Tsunami dalgasının akarsulara girdikten sonra membada su seviyelerinin mansaptaki su seviyelerine kadar yükseldiğini belirterek rezonans kaynaklı duran dalga oluştuğunu belirtilmiştir. Akarsu ağzından yukarı doğru tsunami dalgalarının dalgalı bore formunda ilerlediğini ifade edilmiştir.

Yasuda vd. (2003) ise aniden bir kapağın kapanmasıyla meydana gelen bir bore dalgasının üniform olmayan akıma karşı yayılmasını analiz eden hidrolik deneylerinin sonucunda, yayılan dalga yüksekliğinin üniform akım koşullarında ilerlemesi durumundaki yüksekliğine göre 1.8 kat fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Viana-Baptista vd. (2006), Lizbon'daki Tagus Halici'ndeki akarsuda tsunami yayılımını simüle etmiş ve akarsudaki tsunami yayılımının, kıyı şeridinden uzaktaki memba bölgesinde şiddetli taşkınlara neden olduğunu göstermiştir.

Eze vd. (2009), başlangıç deniz koşullarından itibaren basit yer değiştirme modelinin yardımıyla tsunaminin açık denizden kıyı bölgesine kadar ilerleyişini matematiksel olarak incelemişlerdir. Tsunaminin ilerleyişinde açık denizde lineer sığ su denkleminin kıyı alanına yaklaştıkça ise lineer olmayan sığ su denkleminin kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca uzun mesafe tsunami dalgasının ilerleyişinde Coriolis etkisinin oldukça önemli olduğu belirtilmiştir.

Samir vd. (2010), Burgers terimlerinin dahil edildiği düzenlenmiş uzun dalga denklemine dayanarak tsunami dalgasının akarsularda ilerleyişi sırasındaki güçlü ve dalgalı bore durumları için matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Kısmi Türevli Diferansiyel Denklemlerin (KTDD) çözümünde satır yöntemi (orijinal

adıyla Method of Lines) kullanmışlardır. Bu çalışmanın temel amacı, tsunami dalgasının akarsu içerisindeki yayılımı sırasında özellikle dalgalı bore durumlarında dalga genliğinde meydana gelen büyüme etkisini değerlendirmek üzere hızlı ve etkili bir tahmin yöntemi geliştirmektir.

Yasuda (2010), çalışmasında akarsularda tsunami dalgasının ilerlemesini bir boyutlu olarak deneysel ve sayısal modelleme ile incelemiştir. Oluşturduğu deneysel modelde bir kanal içerisinde tsunami dalgasının ilerleyişini dalga yüksekliklerini, tsunami dalgasının varış süresini ve dalgalı bore ile oluşan dalga katarı fenomenini araştırmıştır. Sayısal modelleme için üç farklı KTDD kullanılmıştır. İlk olarak sığ su denklemi, ikincil olarak Boussinesq denkleminin Peregrine (1967) tarafından modifiye edilmiş hali ve son olarak Boussinesq denkleminin Goto (1984) tarafından modifiye edilmiş hali kullanılmış ve bunlardan çıkan sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Doğrulanmış sayısal model ile Japonya Hokkaido Adası'nda 2003 yılında Tokachi-oki depreminde meydana gelen tsunaminin Tokachi Nehri içerisindeki hareketi incelenmiştir. Ayrıca çalışmada taban kayma gerilmesini Engelund ve Hansen (1967) tarafından geliştirilen ampirik ifade kullanarak hesaba katılmıştır. Peregrine (1967) farklı derinlikler için kullanılan küçük genlikli lineer olmayan uzun dalganın hareket denklemlerini yansıyan dalga koşullarının da dahil edildiği üniform eğimli kıyılar için soliter dalgaya uygulayarak modifiye edilmiştir. Goto (1984) ise büyük Ursell sayıları için lineer olmayan dispersif dalga denklemini geliştirmiştir. Ayrıca yazar literatürde ilk kez akıma karşı meydana gelen üniform olmayan formdaki tsunami dalgasının bir akarsu boyunca ilerlemesini deneysel olarak iki farklı taban eğimi için çalışmıştır.

Roh vd. (2011), akarsu ağzı morfolojisinin tsunami dalgası üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Akarsu içerisinde tsunami dalgasının ilerlemesinde akarsu ağzı yapısının en etkili unsur olduğu ifade edilmiştir. Yaptıkları çalışmada, 2010 yılında meydana gelen Şili tsunamisinin saha ölçümleri ve sayısal yöntemleri kullanılarak akarsu ağzı morfolojisinin önemi belirtilmişlerdir.

Adityawan vd. (2012), 2011 yılında meydana gelen büyük Japon depremiyle ortaya çıkan tsunami dalgasının akarsular üzerindeki etkilerini bölgeye ait video görüntülerini ve su yüzü değişimi ölçümlerini kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışma video görüntüleri özellikle tsunami dalga yayılma hızını belirlemek için

kullanılmıştır. Tsunami dalgasının maksimum 25-30 km/saat hıza sahip olduğu ve dalga yayılma hızının akarsu membasına doğru azaldığı ifade edilmiştir.

Tolkova vd. (2015), taban kayma gerilmesini dikkate aldıkları bir boyutlu lineer olmayan sığ su yaklaşımını kullanarak akarsu içerisinde tsunami ve gelgit dalgasını sayısal modelleme yöntemi ile bir arada incelemişlerdir. 2010 yılında gerçekleşen Şili ve 2011 yılında gerçekleşen Tohoku tsunamilerindeki saha ölçüm verileri kullanılmıştır. Yüksek gel seviyesinde tsunami dalgasının daha yüksek genlikte olduğu ve düşük git seviyesinde ise tsunami dalgasının genliğinin oldukça azaldığı belirtilmiştir. Diğer bir ifadeyle git durumunda akarsuda ilerleyen tsunami dalgasının genlikleri azalmaktadır. Ayrıca tsunami taşkını sırasında akarsuda meydana gelen geriye doğru (mansaptan membaya) kabarma etkisinin fırtına kabarması durumunda da meydana geldiği bu nedenle akarsularda tsunami ve fırtına kabarmasının benzer etkilere yol açtığı ifade edilmiştir.

Kalmbacher ve Hill (2015), gelgit ve akıntı etkisinin büyük akarsularda tsunami yayılması sırasında ne ölçüde etkili olduğunu, Kolombiya Nehri üzerinde ADCIRC hidrodinamik modelini (Luettich ve Westerink, 1991) kullanarak incelemişlerdir. Gelgit istasyonlarındaki verilerle sayısal modellerini doğrulayarak olası tsunamilerde ne kadar alanın sular altında kaldığını ve tsunami dalgasının ne hızla nehir ağzına giriş yaptığını incelemişlerdir.

Aoyama vd. (2016), tsunami dalgasının akarsuda yayılmasını deneysel ve sayısal olarak modellemişlerdir. Doğrulamasını gerçekleştirdikleri sayısal modelde iki boyutlu sığ su denklemlerini ve çözüm şeması olarak MacCormack yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında akarsu içerisinde ve ağzında kumul birikimi olması durumunda tsunami dalgasında su seviyesinin düştüğüne ve pik dalganın varış süresinin ötelendiğine dikkat çekilmiştir.

Tolkova ve Tanaka (2016), 2011 Tohoku tsunamisinde meydana gelen tsunami dalgasının (akarsuda bulunan su seviyesi gözlem istasyonlarındaki verilere dayanarak) Kitakami Nehri'ne girmesiyle, akarsu ağzından 17.2 km uzakta bulunan bentten dalgaların büyük bir kısmının yansıdığını ve bu nedenle dalgalı boreların oluştuğunu belirtmişlerdir. Böylece akarsuda dalga katarı şeklinde şok dalgalarının oluştuğunu ve her bir dalgalı bore'un formunu koruyarak nehir boyunca 10.9 km ilerleyebildiğini ifade etmişlerdir. Sığ su yaklaşımı (hidrostatik kabul) kullanarak

teorik olarak hesaplanan tsunami borelarının dalga hızlarını akarsudaki ölçüm verileriyle karşılaştırarak uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Tsunami kaynaklı dalgalı boreların nehir içerisindeki hareketlerinin incelenmesinde sığ su yaklaşımının yeterli bir yöntem olduğunu ve tsunami esnasında köprü gibi akarsu üzerindeki yapıların üzerinde oluşacak hasarların belirlenmesi ve tahmin edilmesinde önemli bir modelleme aracı olduğunu ifade edilmiştir.

Yüksel vd. (2020) ile Doğan vd. (2021) İzmir 2020 depremi ile meydana gelen tsunami sonrasında kıyı alanlarında tsunamiden kaynaklı taşkınlara ait saha ölçümleri gerçekleştirmiştir. Yapılan gözlemler sırasında, özellikle "azmak" olarak adlandırılan dere yataklarında tsunami dalgasının iç kesimlere kadar ilerlediği ve bu bölgelerde önemli ölçüde hasara yol açtığı belirlenmiştir. Örneğin İzmir Alaçatı'da kıyıdan 2500 m karaya doğru bir yatı taşıdığı ve bu bölgede yanaşma yapılarında hasarlar meydana geldiği raporlanmıştır.

Wuppukondur ve Baldock (2020), tsunami saha gözlemlerine dayanarak tsunami dalgasının akarsulara girdikten sonra kıyı alanlarında meydana getirdikleri taşkına göre çok daha hızlı ilerlediğini belirtmişlerdir. Çünkü karadaki engeller ve zemin tsunami dalgasının ilerlemesini geciktirmektedir. Çalışmada tsunami dalga yükseklikleri ve akarsuda taşkın koruma duvarları boyunca tsunami dalgasının aşma miktarı deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Tsunaminin ilerleyişinde hem soliter dalga durumu hem de soliter dalganın arkasında oluşan dalgalı bore oluşumları dikkate alınmıştır. Akarsuda tsunami dalgasının ilerleyişinde akarsu genişliğinin azalmasıyla beraber sığlaşmanın meydana geldiği (dalga dikliğinin artması) ve bu durumun da akarsu taşkın koruma duvarlarından aşmaya sebep olduğu ifade edilmiştir.

1.1.2 Tsunamilerin Laboratuvar Ortamında Benzeştirilmesi ile İlgili Çalışmalar

Tsunami dalgalarının akarsulardaki temel karakteristiklerinin (örneğin, su yüzü değişimleri ve dalga ilerleme mesafesi) yanı sıra özel koşullardaki davranışlarının (örneğin, iç ve dış kıvrımlardaki etkilerinin) niceliksel ve niteliksel olarak belirlenmesinde, koşulları kullanıcı tarafından tanımlanabilen deneysel çalışmalar çok sayıda senaryonun test edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca deneysel çalışmalar bu konuda sayısal modellerin geliştirilmesinde, modellerin kalibrasyonu

ve doğrulanmasında gerekli güvenilir bilginin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürde tsunami gibi uzun dalgaların fiziksel olarak modellenmesiyle ilgili birçok kaynak bulunmaktadır. Üretim kaynağına göre (Heyelan, deprem, meteor ve volkanik patlamalar gibi) bu dalga türleri laboratuvar ölçeğinde farklı şekillerde üretilebilmektedir (Hughes, 1993). Fiziksel modellemede uzunluk ve zaman ölçeği seçimi oldukça önemlidir. Tsunamilerin küresel etkileri sebebiyle de bu seçim o kadar kolay olmamaktadır (Goseberg vd., 2013).

Liu vd. (1991), Yeh vd. (1995) ve Liu (2008) çalışmalarında detaylı olarak fiziksel uzun dalga modellemesini derlemişlerdir. Uzun dalga üretimi üzerine farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar ana başlıklar altında (Goseberg vd, 2013); Piston tipi dalga üretimi, baraj yıkılması analojisi, düşeyde hareket eden dalga paleti ile dalga üretimi, hacim odaklı dalga üretimi olarak sıralanabilmektedir. Bu yaklaşımlara ek olarak heyelan sebepli uzun dalga üretim teknikleri de mevcuttur fakat kapsam dışı olduğu için bu tezin literatür özeti kısmında yer verilmemiştir.

Piston tipi dalga üreteçleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Dolayısıyla kullanımları ve limitleri üzerinde oldukça fazla tecrübe ve birikim mevcuttur. Üretebilecekleri dalga karakteristikleri derinlik ve piston hareket aralığı ile sınırlı olmaktadır. Gerçek tsunami dalgasının üretilebilmesi sırasında yaşanan zorluk ise bu dalgaların ekstrem boyutlarda dalga uzunluğuna sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (~500 km). Hiçbir geleneksel dalga paleti bu dalga boyunu üretecek hareket aralığına sahip değildir (Allsop vd., 2014). Schimmels vd. (2014) 1/100 ölçeğinde piston tipi dalga üreteci ile başarılı sayılacak uzun dalga üretmişler fakat dalga çukurlarının üretimi tepeleri kadar iyi gerçekleşmemiştir. Bu sebeple dalga çukurlarının stabil olamayabileceğini belirtmişlerdir. Bu sebeple piston tipi dalga üreteçlerinin tsunami dalgasından daha çok soliter dalga üretebildiğini söylemek mümkündür. Madsen vd. (2008, 2009) yaptıkları çalışmalarda soliter dalga paradigmasının artık tsunami dalga yaklaşımında benzersiz şekilde uygulanamayacağını ve tsunami dalgasının laboratuvar ortamında ölçeklendirilmesi istenildiğinde jeofiziksel ölçeklerle uyuşmazlık gösterdiğini belirtmişlerdir. Soliter dalga uygulandığında zamansal ve uzamsal boyutta hatalar meydana gelmekte ve bu etki dalga kıyı ile etkileşim halinde ise daha da büyük oranlarda oluşmaktadır. Bu sebeple laboratuvar

çalışmalarında daha uzun periyotlu veya uzun dalga boyuna sahip bir dalga formu gerekmektedir (Goseberg vd., 2013).

Öte yandan baraj yıkılması analojisi yaparak oluşturulan dalga üretimi sinüzoidal formda dalga üretebilmektedir. Sadece bu bağlamda pozitif genlikli (dalga tepesi yaklaşımlı) dalga üretilebilmektedir. Buna ek olarak dalga limitli olarak kontrol edilebilmektedir. Çünkü bu yaklaşımda dalga yayılması sadece ağırlık kuvveti tarafından kontrol edilmektedir. Düşeyde hareket eden dalga paleti ile dalga üretimi ise genellikle tektonik kaynaklı tsunami dalgasının benzeştirilmesi için uygulanmaktadır. Çünkü tektonik kaynaklı tsunami dalgalarının oluşumunda bir kaynak bölgesi söz konusu olmaktadır. Aynı zamanda düşey kütle hareketinin olduğu bölgede vorteksler ve türbülans oluşabilmektedir.

Tsunami üretimi yaklaşımında hacim odaklı dalga üretim tekniğinin ilk aşamaları Reynolds (1887), Wilkie ve Young (1952) tarafından rapor edilmiştir. Pnömatik dalga üreteci gelişmeye başladığı aşamalarda başarılı ve farklı amaç ile ölçekler için çok yönlü bir ekipman olarak addedilmiştir. İlk olarak gelgit dalgası üretimi için kullanılmıştır (Allen vd., 1992). 2008 yılında HR Wallingford (HRW) tarafından (London's Global University desteğiyle) yeni bir pnömatik tsunami üreteci geliştirilmiştir. Allsop vd. (2008), Rossetto vd. (2011), Robinson vd. (2009), Charvet vd. (2013), Allsop vd. (2014a, 2014b) ve Schimmels vd. (2014) çalışmalarında yeni dalga üretecinin çalışma prensiplerini, kalibrasyon ve doğrulama testlerini açıklamışlardır. Yeni nesil (3. nesil) tsunami üretecinin soliter, N-dalga ve 2004 Hint Okyanusu tsunamisinin (merkatör dalga) kısa simülasyonunu büyük dalga uzunlukları ile yeniden üretmişlerdir. Bu cihaz ilk defa ekstrem uzunluktaki tsunami dalgalarının (hem tepe hem çukur gelişli) stabil benzeşimini gerçekleştirebilmiştir.

Allsop vd. (2008), laboratuvar ortamında tsunami dalgasını dalga paleti ile modellemişlerdir. Fakat dalga paletinin gerekli dalga boyunu üretmede yeterli olmadığını belirterek HRW 3. nesil tsunami üretecini kullanmışlardır. HRW tsunami üreteci, temelinde Wilkie ve Young (1952) tarafından geliştirilmiş pnömatik bir sistemdir. Bir tank vasıtasıyla içerisinde havanın pompa yardımıyla vakum edilip daha sonra piston etkisi yaratacak şekilde havanın valfler yardımıyla atmosfer basıncına döndürülmesiyle çalışan, tsunami gibi uzun dalga boylarına sahip dalgaların fiziksel modellerde oluşturulmasını sağlayan dalga üreteci

sistemidir. Wilkie ve Young (1952), pnömatik dalga üretim sistemine ilişkin metodolojik adımları şu şekilde sıralamışlardır: öncelikle prototipteki dalga profilinin belirlenmesi, ardından bu profilin fiziksel modele uygun şekilde ölçeklenmesi, tanktan çıkacak ve yeniden girecek su miktarının hesaplanması, gerekli su debisinin ve buna karşılık gelen hava akım debisi ile basıncının belirlenmesi, pompaların bu gereksinimleri karşılayıp karşılamadığının değerlendirilmesi ve son olarak hava valflerinin uygun şekilde ayarlanması.

Lloyd ve Rossetto (2010), tsunami taşkınının kıyı şeridi arkasındaki yapılar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. HRW tsunami üreteci kullanarak fiziksel model oluşturmuşlardır. Hız, dalga profilleri ve yapılar üzerinde etkiyen basınç kuvvetleri ölçülmüştür.

Rossetto vd. (2011), HRW tsunami üretecini kullanarak tsunami dalgasını 1/100 ve 1/50 ölçekle Froude benzeşimini kullanarak modellemişlerdir. Oluşturdukları fiziksel model ile ilk kez dalga tepesi ve dalga çukuruna sahip oldukça uzun dalgalar üretilmiştir. Böylece sadece soliter dalga değil N-dalga, sinüzoidal dalga ve merkatör dalgalar da oluşturulmuştur.

Allsop vd. (2014), tsunami dalga üreteçlerinin performansını OpenFOAM yazılımı aracılığıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu kullanarak incelemişlerdir. 2004 Hint Okyanusu'nda ve 2011 Tohoku Depremi'nde meydana gelen tsunamileri dikkate alınmıştır. Böylece farklı kıyaslama (benchmark) testleri uygulanmış ve fiziksel modelin kabiliyetleri geliştirilmiştir. Laboratuvar ortamında tsunami dalgası üretimi için 3. nesil pnömatik dalga üretecinin güncel ve farklı dalga koşullarının yaratılmasında en uygun üreteç olduğu ifade edilmiştir.

Bağcı (2015), çalışmasında tsunami benzeşimi amacıyla kullanılan N-dalga gibi uzun periyotlu dalgaların, sığ sularda yayılım davranışını ve özellikle kesit daralmalarının bu dalgalar üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda oluşturulan deneysel düzende, pistonlu sistem kullanılarak farklı genlik ve sürelerde N-dalgaları üretilmiş ve bu dalgaların hem su yüzü değişimleri hem de akım hızları ölçülmüştür. Bu çalışmada, N-dalgaların kıyıya yaklaşırken geçirdiği karakteristik değişimler, hız dağılımları, sınır tabakası gelişimleri ve akım içi türbülans karakteristikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı daralma açılarına sahip kesitlerde dalga formunun nasıl değiştiği de

analiz edilmiştir. Bu kapsamıyla bu çalışma, tsunami benzeri dalgaların yapılar üzerindeki etkilerinin daha gerçekçi biçimde modellenmesine yönelik önemli deneysel veriler sunmaktadır. Literatürdeki N-dalga tanımlarına dayalı ilk fiziksel benzeşim örneklerinden birini temsil etmektedir.

Tomiczek vd. (2016), laboratuvar ortamında 1/20 ölçekte oluşturdukları fiziksel modelde kıyıdan uzak tsunami dalgalarının oluşumunu ve kıyı alanında konuşlanmış yapılar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Modellerinde dalga yükseklikleri ve yapılar üzerindeki dalga basınç kuvvetleri ölçülmüştür.

Chandler vd. (2016), 3. nesil tsunami üreteci kullanarak sadece 20 saniye ile 160 saniye arasındaki periyotlarda soliter dalgaları ve 20 saniye ile 240 saniye arasındaki periyotlarda dalga çukuruna da sahip N-dalgaları fiziksel ortamda incelemişlerdir. 40 saniyeden az periyotlu dalgalarda yansımanın dalga üretimini etkilemediği ve 240 saniyeden büyük periyotlu dalgalarda ise kanal boyunca herhangi bir zamanda serbest yüzeylerdeki değişimin çok küçük olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla fiziksel modelde kanal uzunluğunun kritik bir değer olduğu ifade edilmiştir.

McGovern vd. (2018), 3. nesil HRW pnömatik dalga üreteci ile Froude benzeşimini kullanarak 1/50 ölçekli tsunami dalgaları ürettikleri fiziksel bir model kurmuşlardır. Göreceli olarak kısa olan kanalda uzun dalgalar üretmeyi ve bu dalgaların eğimli kıyı alanında tırmanma miktarlarını incelemeyi amaçlamışlardır. Bu sebeple dalgaların profili, dalga tepesi hızları ve hız profilleri incelenmiştir.

Chandler vd. (2021), çalışmalarında dalga paleti, baraj yıkılması analojisi ve HRW 3. nesil pnömatik tsunami dalga üreteçlerini karşılaştırmışlardır. Bu üreteçlerin tasarımlarını OpenFOAM yazılımı yardımıyla HAD metodu kullanarak değerlendirmişlerdir. Kullanımı oldukça yaygın olan dalga paleti ile üretilen tsunami dalgalarında dalga yüksekliklerinde belirli limitler olduğu ifade edilmiştir. Baraj yıkılması analojisi ile çalışan dalga üreteçlerinde ise yeterli su hacmini yakalamada yüksek maliyetler bulunduğuna dikkat çekilmiştir. Fakat kontrollü bir şekilde suyun deney sistemine verilmesiyle çalışan HRW 3. nesil (pnömatik) tsunami üreteçlerinin diğerlerine göre daha efektif olduğuna ve oldukça uzun dalgalar oluşturabildiğine dikkat çekilmiştir. HRW üreteçler ile 1/50 ölçekte N-dalgaların oluşturabileceğini ve böylece tsunami kaynaklı taşkınların, kıyı

erozyonlarının ve tsunami dalgası yapı etkileşimlerinin araştırılmasında önemli bir araç olabileceği ifade edilmiştir.

1.1.3 Kıvrımlı Kanallarda Kararlı Akım Davranışının İncelenmesi ile İlgili Çalışmalar

Deneysel ve sayısal modeller kullanılarak kıvrımlı kanallarda (akarsularda) akım ve hız dağılımının belirlenmesi üzerine geçmişten günümüze birçok araştırmacı tarafından kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Fargue, 1868; Thomson, 1876; Dietrich ve Smith, 1983; Nelson ve Smith, 1989; de Vriend ve Geldof, 1983). Literatürdeki diğer araştırmacıların çalışmaları aşağıda özetlenmiştir:

Yüksel ve Ağaççıoğlu (1995), kanal kıvrımlarındaki yanal akımın hız dağılımına etkisi üzerine yapmış olduğu çalışmada sekonder akımın sürtünme, merkezkaç ve atalet kuvvetlerinin etkileşiminden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Akarsu tabanı yakınında sınır direnci sebebiyle akışkan partiküllerinin hızları geciktirilmektedir. Taban yakınında daha yavaş hareket eden akışkan, merkezkaç ve basınç kuvvetleri arasında denge meydana getirebilmek için daha keskin eğrisel bir yörüngeyi izlemek zorunda kalmaktadır. Yüzeye doğru akışkan partiküllerinin hızı arttığı için atalet de artar dolayısıyla partiküller kanal tabanına doğru hareket etmektedir. Akışkan kütlesinin sürekliliğinin sağlanması için, su dış kıyıda tabana doğru hareket ederken içi kıyıda yüzeye doğru hareket etmektedir. Bu sebeple teğetsel hız bileşenine ek olarak radyal hız bileşeni meydana gelmektedir. Radyal hız bileşeni de akarsu en kesiti boyunca sekonder akımı oluşturmaktadır.

Blanckaert ve Graf (2001), 60^{o} derecelik bir kıvrımlı kanaldaki akımdan dolayı taban topoğrafyasının değişimini incelemişlerdir. Sekonder akımın oluşması ile meydana gelen momentum adveksiyonu, türbülans aktivitesi hızların ve sınır tabakasındaki kayma gerilmelerinin uzamsal dağılımlarını belirlemektedir. Böylece hareketli bir taban durumunda topografyayı şekillendirdiği ifade edilmiştir.

Ferguson ve Parsons (2003), Dean Nehri (İngiltere) üzerinde belirledikleri iki kıvrım üzerinde HAD yöntemi ve Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) ile gerçekleştirilen saha ölçümlerini kullanarak kıvrımlı kanalda akım davranışını incelemişlerdir. Çalışmada sayısal ile saha ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Akımın ilk kıvrımı hissetmesiyle beraber sirkülasyon (sekonder akım) oluşumundan bahsedilmiştir.

Olsen (2003), mendereslenen akarsularda zaman içerisinde morfolojinin değişerek menderes oluşumunu HAD yöntemini kullanarak incelemiştir. Düz bir alüvyal bir kanal için fiziksel model kullanarak katı madde taşınımını modelleyerek sayısal modelini doğrulamıştır. Böylece HAD yönteminin kıvrımlı kanallarda kararlı akım mekanizmasının incelenmesi için kullanılabilecek bir araç olduğunu göstermiştir.

Blanckaert (2009), yapmış olduğu çalışmada akarsu kıvrım bölgesine yaklaştıkça hız dağılımının içe doğru, kıvrım girişinde ise dışa doğru sapmaya başladığını belirtmiştir. Kıvrım çıkışında azalan eğrilik etkisi sebebiyle hız dağılımı dış kıvrıma doğru sapmaya devam ettiğini ifade etmiştir.

Sukhodolov (2012), Spree Nehri'nin (Almanya) kıvrımlı yapıdaki mendereslenen bir kısmını dikkate alarak bu bölgede belirli akarsu en kesitlerinde ADV aracılığıyla hız ölçümleri gerçekleştirmiştir. Akarsu boyunca maksimum birim debiyi dikkate alarak iç ile dış kıvrım arasındaki hız farklarını incelemiştir. Akarsuyun en kesitlerinde yanal hız vektörlerini dikkate alarak sekonder akım oluşumu gözlemlenmiştir. Akarsu morfolojisi üzerinde oldukça önemli olan taban kayma gerilmesi ile türbülans kinetik enerjisi parametreleri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak kanal eğriliğinin akarsu kıvrımlarındaki türbülanslı akım üzerindeki etkileri deneysel ve teorik araştırmaların odak noktasını oluşturduğu ifade edilmiştir.

Scurlock vd. (2015), kıvrımlı kanallardaki akım mekanizmasını hem deneysel çalışmalar hem de Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle geliştirilen sayısal modeller aracılığıyla inceleyen araştırmacılar arasında yer almaktadırlar. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile FLOW-3D yazılımı kullanılarak oluşturulan sayısal model sonuçları başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Sayısal modelleme sürecinde RNG (Renormalization Group) k-ε türbülans kapama modeli tercih edilmiştir. Pradhan vd. (2018), çalışmalarında iki farklı taban pürüzlülüğüne sahip kıvrımlı kanal üzerinde hız dağılımının nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Deney sistemlerindeki kıvrımlı kanal 110^{o} derece simetrik geçişe sahiptir. Çalışmalarında iç kıvrımlarda hız artışı ve dış kıvrımlarda hız düşüşü gözlemlenmiştir. Kıvrımlı kanal geometrisinden kaynaklanan merkezkaç kuvvetinin ve enine basınç gradyanındaki değişimin iç ile dış kıvrım arasındaki hız farkına neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca hız dağılımında taban pürüzlülüğünün ve taban kayma gerilmesinin önemli rol oynadığı ifade edilmiştir.

Park ve Ahn (2019), deneysel çalışmalar ve sayısal benzeşimler sonucunda hız profillerini aynı koşullar altında karşılaştırmış ve analiz etmişlerdir. Tüm senaryolarda, ana akım hız dağılımının ilk kıvrımda iç kıvrıma yöneldiği, geçiş bölgelerinde ise yaklaşık olarak simetrik bir yapı sergilediği ve ardından bir sonraki kıvrımda tekrar iç kıvrıma sapma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, akım koşullarından bağımsız olarak maksimum ana akım hızının kanal boyunca en kısa rotada gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Maurya vd. (2023), kıvrımlı kanallardaki akım mekanizmasını incelemek amacıyla FLOW-3D yazılımı ve RNG k-ε türbülans kapama modelinden yararlanan bir diğer araştırma grubudur. Çalışmalarında, akarsu tabanındaki kumun katı madde taşınımını ve taşkın yatağında gerçekleştirilen kum madenciliğinin akarsu hidrodinamiği üzerindeki olası etkilerini sayısal modelleme ile araştırmışlardır. Bu analizlerde özellikle türbülans kinetik enerjisi parametresini kullanarak değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Burada bahsi geçen araştırmalar tsunami dalgasının kıvrımlarda ilerlerken uğradığı değişimlerin daha kapsamlı olarak incelenebilmesine olanak sağlamaktadır.

Kıvrımların akım yapısı üzerindeki etkilerinin araştırılması için farklı araştırmacılar tarafından hem saha hem de laboratuvar ortamında hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler akım yapısının ve kıvrımlarda meydana gelen değişimlerin detaylı ve net bir şekilde anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Hız ölçümleri, PIV (Particle Image Velocimetry) ve ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) gibi ölçüm teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Kıvrımlı akarsularda üç boyutlu hız değişimlerini, sekonder akımı ve türbülanslı akım yapısını incelemek için birçok araştırmacı tarafından bu tez çalışmasında olduğu gibi ADV aracılığıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Blanckaert ve Graf, 2001; Ferguson vd., 2003; Frothingham ve Rhoads, 2003; Blanckaert ve de Vriend, 2004; Blanckaert vd., 2009; Abad vd., 2011; Sukhodolov, 2012; Park ve Ahn, 2019).

Dombroski ve Crimaldi (2007), yapmış oldukları çalışmada hidrolik cilalı bir taban üzerindeki türbülanslı sınır tabakası akımında ADV hız ölçüm verilerinin doğruluğunu başarılı bir şekilde değerlendirmişlerdir. ADV ile PIV ölçümlerinin özellikle tabana yakın bölgede oldukça yakın sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ek olarak kıvrımlı kanalda sekonder akımın yapısını incelemek için PIV ile

gerçekleştirilen ölçüm çalışmalarına ise Ishigaki (2002) ve Bai vd. (2019) tarafından yapılan laboratuvar çalışmaları örnek olarak verilebilmektedir. Kıvrımlı kanallarda (akarsularda) kanalın doğal halindeki hız yapısının net olarak anlaşılması, tsunami dalgasının yayılması esnasında meydana gelen hidrodinamik değişimlerin daha iyi anlaşılmasını ve incelenmesini sağlamaktadır.

1.1.4 FLOW-3D Sayısal Modeli ile İlgili Çalışmalar

Bu bölümde literatürde yer alan FLOW-3D sayısal modeli ile gerçekleştirilmiş çalışmalara yer verilmiştir.

Kim vd. (2010), bir dolu savak üzerinde ani değişen akımı deneysel ve FLOW-3D ile sayısal olarak modellemişlerdir. Bu çalışma için Endonezya'daki Karian Barajı'nda bulunan dolu savağı dikkate almışlardır. Dolu savakta akım stabilitesini artırmak için yeni tasarımlar oluşturulmuş ve bu tasarımlar FLOW-3D ile test edilerek performans analizi yapılmıştır. Bu çalışmaya benzer bir çalışma Parsaie vd. (2015) tarafından yine bir dolu savak üzerinde FLOW-3D ile HAD metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada dolu savaktaki kılavuz duvarların tasarımı ve performansı incelenmiştir.

Bayon vd. (2016), düşük Reynolds sayılarında hidrolik sıçramayı deneysel ve sayısal olarak inceleyerek OpenFOAM ve FLOW-3D sayısal modellerini karşılaştırmışlardır. RNG k-ε türbülans modeli ve yapısal blok hesaplama ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama ağındaki uygun hücre sayısını belirlemek (mesh independence) için analiz yapılmıştır. Hidrolik sıçrama değişkenleri olarak art arda gelen derinlik oranını, sıçrama uzunluğu, ortalama hız profilleri, hız azalması ve serbest yüzey profilleri dikkate alınmıştır. Deneysel verilerle karşılaştırarak her iki modelin de gayet iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. FLOW-3D'in art arda gelen derinlik oranını daha iyi tahmin ederek nehir rejimi ile sel rejimi arasındaki ilişkiyi daha doğru tasvir ettiği ve maksimum hız azalmasını daha doğru yakaladığı fakat geriye doğru oluşan hız profillerini yakalamada ise OpenFOAM kadar başarılı olmadığı belirtilmiştir. OpenFOAM'un sıçrama uzunluğunu daha iyi tahmin ederek genel hidrolik sıçrama yapısını daha gerçekçi tahmin ettiği belirtilmiştir.

Ferdos ve Dargahi (2016), yüksek Reynolds sayıları (>10000) için FLOW-3D kullanarak türbülanslı akımı ve akım içerisindeki vortisiteleri incelemişlerdir. Sayısal modelin deneysel verilerle doğrulanmasını gerçekleştirmişlerdir. FLOW-

3D'nin yüksek Reynolds sayılarını başarıyla modelleyebildiğine dikkat çekmişlerdir.

Ran vd. (2018), trapezoid kanallarda akımı FLOW-3D ile sayısal olarak modellemişlerdir. Hidrolik yapıların FLOW-3D içerisinde bulunan akışkanhacmi (AH) metodu olan TruVOF ile başarılı bir şekilde modellenebileceği ifade edilmiştir. Dikdörtgen kesitli ve trapezoidal kesitli kanallarda farklı debilerde hidrolik yük kayıplarını karşılaştırarak trapezoidal kesitlerde yük kayıplarının daha az olduğu deneysel ve sayısal model sonuçlarıyla gösterilmiştir. Sayısal modelde RNG k-ε türbülans kapama modeli kullanılmıştır. Hız dağılımları ile Froude sayısı parametreleri kullanılarak sayısal model deneysel verilerle başarılı bir şekilde doğrulanmıştır.

Harlan vd. (2018), bir hidroelektrik santralindeki çökeltme havuzunun performansını FLOW-3D ile test etmişlerdir. Çökeltme havuzunda askıya geçen malzeme miktarı sayısal modelleme ile incelenmiştir. Sayısal modellemede hidrodinamik davranış ve katı madde taşınımı bir arada modellenmiştir. Akışkan hareketi lineer olmayan, zamana bağlı ve ikinci dereceden diferansiyel denklemler kullanarak modellenmiştir.

Hu vd. (2018), baraj yıkılması fenomenini MIKE 3 FM, FLOW-3D ve bir boyutlu analitik yaklaşımla sayısal olarak modellemişlerdir. Her üç yaklaşımla elde edilen sonuçlar deneysel verilerle Karşılaştırılmıştır. Kuru ve ıslak taban koşullarında serbest yüzey, su yüzü değişimleri ve ortalama hız parametreleri dikkate alınmıştır. Analitik çözümlerin sadece kuru taban koşullarında sonuç verdiği ve oldukça limitli olduğu, MIKE 3 FM büyük hesaplama alanları için ve FLOW-3D'nin ise daha küçük hesaplama alanları için uygun olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca MIKE 3 FM'in daha büyük hücrelerle çalışmasından dolayı daha hızlı çözüme ulaştığı ve daha az çözüm hafızasına ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir.

Man vd. (2019) çalışmalarında, köprü ayaklarındaki oyulmaların sayısal modellemesinde farklı türbülans modellerinin etkisini incelemişlerdir. FLOW-3D içerisinde mevcut bulunan katı madde (oyulma için) ve sığ su modellerinden yararlanılmıştır. Beklenildiği üzere daha gerçekçi modelleme imkânı sağlayan Büyük Eddy Benzeşimi (Large Eddy Simulation, LES) türbülans kapama modelinin kullanılmasının Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (Reynolds

Averaged Navier Stokes, RANS) tabanlı RNG k-ε modelinin kullanılmasına göre daha doğru ve deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Hesaplama ağı yapısının vorteks oluşumlarını doğrudan etkilediği ve bu nedenle hesaplama ağı oluştururken dikkat edilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Helmi (2019), keskin kenarlı savak için FLOW-3D sayısal modelini kullanarak RANS tabanlı türbülans modellerinin değerlendirilmesini gerçekleştirmiştir. Bir denklem (türbülans enerji denklemi modeli), k-ε, RNG k-ε ve k-ω türbülans kapama modelleri kullanılmıştır. Ayrıca bir boyutlu hidrostatik kabul yapan HEC-RAS sayısal modelini kullanılarak sonuçları, HAD ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sadece su yüzü değişimlerinin önemli olduğu basit mühendislik tasarım problemlerinde bir boyutlu analizin yeterli olabileceği belirtilmiştir. FLOW-3D için en düşük hata oranının bir denklem türbülans modeliyle elde edildiğini fakat bütün türbülans modelleri arasında ciddi bir fark olmadığı ifade edilmiştir.

Zhou ve Wang (2019), FLOW-3D sayısal modelinde k-ε, RNG k-ε ve LES türbülans modellerini kullanarak bir düşüm havuzunda akımı üç boyutlu olarak incelemişlerdir. Sayısal modelden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak kullanılan türbülans modelleri arasında en doğru sonucun RNG k-ε türbülans kapama modelinin verdiği ifade edilmiştir.

Kulkarni ve Hinge (2022), keskin kenarlı savaklar için debi katsayısını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel verilerle gayet uyumlu sonuçlar elde edilen FLOW-3D sayısal modelinde RNG k-ε türbülans kapama modeli kullanılmıştır. HAD metodunun keskin kenarlı savaklar gibi su yapılarının tasarımı için yararlı bir modelleme aracı olduğu ifade edilmiştir.

Bu bölüme kadar akışkanlar mekaniği problemleri ve su yapılarının genel olarak FLOW-3D ile sayısal olarak modellenmesine ait bazı çalışmalara yer verilmiştir. Bu paragraftan sonra, özellikle bu tez çalışmasının temel konusu olan tsunami dalgasının ilerlemesinin FLOW-3D ile sayısal olarak modellenmesi hakkında literatürdeki çalışmalara yer verilmektedir.

Choi vd. (2007), farklı geometrilere sahip adaların etrafında tsunami dalgasının tırmanma miktarını üç boyutlu olarak sayısal modelleme ile incelemişlerdir. Örnek çalışma alanı olarak dairesel şekle sahip olan Babi Adası'nda 1992 yılında meydana

gelen Flore tsunamisini dikkate alınmıştır. FLOW-3D ile elde edilen sonuçlar fiziksel model ile karşılaştırılarak başarılı bir doğrulama yapılmıştır. Tsunami dalgası giriş sınır koşulu olarak soliter dalga kullanılmıştır. Beklenmedik şekilde, en yüksek tsunami dalgası tırmanma miktarının koni biçimindeki adalarda görüldüğü ifade edilmiştir. Ayrıca derinlik ortalamalı iki boyutlu başka bir sayısal model daha oluşturarak tırmanma miktarını ve türbülans kinetik enerjisini, FLOW-3D ile gerçekleştirilen üç boyutlu sayısal model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hız dağılımlarının, FLOW-3D modelinde derinlik boyunca hızın üniform olmadığı ve hızın tabana yakın bölgede oldukça düşük fakat deniz yüzeyine yakın bölgede ise oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir. Koni biçimindeki adanın dalga geliş yönüne göre arkasında bulunan bölgede (korunaklı tarafta) türbülans kinetik enerjisinin zayıf olduğu fakat adanın tsunami dalga geliş yönüne göre dik doğrultusundaki derinliklerinde yoğun türbülans kinetik enerjisi oluşumlarının gözlemlendiğine dikkat çekilmiştir. Bu durumun iki boyutlu model ile gözlenemeyeceği ifade edilmiştir. Dolayısıyla tsunamilerin incelenmesinde üç boyutlu modellemenin daha avantajlı ve daha gerçekçi olduğu ifade edilmiştir.

RANS yöntemine dayalı HAD uygulamasının yanında Düzleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) yöntemini kullanarak tsunami dalgasının oluşumunun modellendiği çalışmalar da bulunmaktadır. SPH yöntemi RANS yöntemine göre daha eski dönemlerde tercih edilen bir yöntemdir. Das vd. (2009) çalışmalarında bu iki yöntemi kullanarak denizaltı ve kara heyelanlarında ile meydana gelen tsunami dalgası oluşumunu incelemişlerdir. Sayısal model sonuçlarını karşılaştırmak için literatürdeki Heinrich vd. (1992) ile Liu vd. (2005) tarafından gerçekleştirilen deneysel modellerden yararlanılmıştır. Modelde bir tank içerisinde eğik düzlemde bir üçgen kama suyun dışından suya ve suyun içerisinden tabana doğru bırakılarak heyelan analojisi oluşturulmuştur. Doğrulama parametresi olarak su yüzü değişimi ve basınç parametreleri kullanılmıştır. RANS tabanlı HAD modeli için FLOW-3D yazılımından ve RNG k-ε türbülans modelinden yararlanılmıştır. Yazarlar her iki sayısal modelin deney sonuçlarıyla gayet uyumlu olduğunu fakat RANS modelinin su yüzü değişimini belirlemekte daha tutarlı sonuçlar verdiğini ve her iki modelde hız profillerinin oldukça yakın olduğunu belirtmişlerdir. Bazı farklılıkların sebebinin de nümerik difüzyon ve seçilen türbülans modelinden kaynaklı olabileceği açıklanmıştır.

Lau vd. (2011), perfore köprü ayaklarının, tsunami esnasında oluşan büyük dalga kuvvetlerini sönümleyebileceği teorisini araştırmışlardır. FLOW-3D sayısal modelinden elde edilen sonuçlar deneysel modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırarak doğrulanmıştır. Böylece farklı tasarımlar arasında en uygun olanının belirlenmesi için FLOW-3D aracılığıyla parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için FLOW-3D'nin uygun bir sayısal model olduğu ifade edilmiştir.

Japonya'nın doğu kıyısında 2011 yılında meydana gelen tsunami esnasında Oarai Limanı'nda beklenmedik şekilde büyük bir vorteks görülmüştür. Kim vd. (2013), bu vorteks yapısının oluşumunu FLOW-3D aracılığıyla üç boyutlu olarak bire bir ölçekte modellemişlerdir. Sahadan elde edilen ölçümlere ve fotoğraflara göre belirlenen tsunami dalgasının tırmanma miktarı ve oluşan vorteksin şekli gibi niceliksel ve niteliksel parametreleri FLOW-3D ile elde edilen sonuçlarla başarılı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sahadaki ölçüm ve görsel veriler kullanılarak böylesi niceliksel ve niteliksel araştırma konularında HAD yönteminin ve FLOW-3D sayısal modelinin gayet güvenilir bir araç olduğunu göstermektedir.

Velioğlu vd. (2015), tsunamiden dolayı kıyı alanında oluşan taşkın alanlarında, tsunaminin dalga hareketinden kaynaklı tamamen kütle taşınımı olan bir akıma dönüştüğünü belirtmişlerdir. Bu nedenle birçok parametrenin bu fiziksel duruma dâhil olmasıyla tsunaminin sayısal olarak modellenmesinin karmaşık bir hale geldiği belirtilmiştir. Kıyıya yakın sığ su bölgesi ile tsunamiden dolayı taşkına uğramış kıyı alanları için su yüzü değişimlerinin incelenmesinin yeterli bir sayısal model doğrulama parametresi olmadığına dikkat çekilmiştir. Bu nedenle hız ve hız alanları parametrelerinin dâhil edilmesinin de doğru olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca en yüksek doğrululuk ve hassasiyet seviyesinde modelin oluşturulması gerektiğine dikkat çekilerek, iki farklı sayısal model olan FLOW-3D ile NAMI-DANCE modellerini kullanarak elde edilen sonuçlarla kıyaslama testleri oluşturulmuştur. Çalışmalarında tsunaminin sayısal olarak modellenmesinde FLOW-3D yazılımının uygulanabilirliği tartışılmış ve kanıtlanmıştır. Yine aynı yazarlar tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada tsunamilerden dolayı oluşan kıyıya yakın taşkın alanlarında taban sürtünme etkisi FLOW-3D aracılığıyla incelenmiştir (Sogut ve Yalciner, 2018).

Lotfollahi-Yaghin ve Nassiraei (2016), tsunami dalgasının kıyı alanlarındaki yapılar üzerinde oluşturduğu etkileri, FLOW-3D aracılığıyla modelleyerek

araştırmışlardır. Sayısal model, deneysel veriler ve ampirik ifadelerden elde edilen sonuçlarla başarılı bir şekilde doğrulanmıştır.

Moon vd. (2019), FLOW-3D aracılığıyla tsunami dalgasının yarattığı taşkın esnasında dalganın karada ilerleyişini modellemişlerdir. Sayısal modellemede tsunami dalgasını oluşturmak için iki boyutlu olarak baraj yıkılması analojisinden yararlanılmıştır. Bu sebeple özellikle hava-su (iki akışkanın) etkileşimi yani serbest yüzey oluşumu için AH yöntemi kullanılmıştır. 1/50 Froude ölçekli deneysel modelde elde edilen dalga hızı, dalga yüksekliği ve dalga kuvveti etkisiyle yapıların ön yüzeyi üzerinde oluşan basınç kuvveti parametreleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca sayısal modelde serbest yüzey bölgesinde çözünürlüğü (hesaplama ağındaki hücre boyutunun küçülmesi) artırınca dalga varış süresi parametresi açışından daha tutarlı sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. FLOW-3D'nin, kıyı mühendisliği hidrodinamik araştırmaları için oldukça uygun bir sayısal model olduğu ifade edilmiştir. Hava ile su arasındaki serbest yüzeyin incelendiği problemler için FLOW-3D'nin yüksek performanslar gösterdiği belirtilmiştir.

Honarmand vd. (2020), OpenFOAM aracılığıyla (IHFOAM çözücüsü kullanarak) tsunami dalgası oluşumunu ve ilerlemesini üç boyutlu olarak modelleyen bir diğer araştırma grubu olmaktadır. Çalışmalarında Umman Denizi'nde, Çabahar Koyu'nda bulunan Makran Limanı yakınında denizaltında meydana gelen fay çökmesi sonucu oluşan bir tsunami senaryosunu dikkate alınmıştır. Tsunami dalgasının ilerleyişi N-dalga formu ile incelenmiştir. Sayısal modellemede hesaplama ağını oluştururken gerçek batimetri verisinden yararlanılmıştır. Tsunami dalgasının tırmanma miktarı ve tsunami taşkını risk bölgeleri belirlenerek buna benzer araştırma konularında bu tarz sayısal modellerin pratik olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir. Bu çalışma bu tez kapsamı için önemli olarak, RANS yöntemine dayalı üç boyutlu HAD modellerin, konvansiyonel iki boyutlu sığ su koşulları varsayımına dayalı Boussinesq denklemleri kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modellerden daha doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Franco vd. (2020), Alaska'da bulunan Lituya Körfezi'nde 1958'de meydana gelen heyelan sonucu oluşan tsunamiyi ve etkilediği alanı FLOW-3D ile modellemişlerdir. Heyelan sonucu parçalanan kayaçların karışımıyla oluşan daha yoğun bir akışkan dikkate alınmıştır. Olay meydana gelmeden önceki ve sonraki batimetri dikkate alınarak karşılaştırmalı bir model oluşturulmuştur. Tsunaminin

ilerleyişi ve tırmanma miktarı saha ölçüm verileriyle karşılaştırılmıştır. Yazarlar olabildiğince ince oluşturulan hesaplama ağıyla daha tutarlı bir sonuca ulaşılabildiğini ve FLOW-3D'nin heyelan sonucu oluşan tsunamilerin incelenmesinde önemli bir araç olabileceğini ifade etmişlerdir.

Le Quéré vd. (2020), tsunami taşkını sırasında bir kare kolon çevresinde oluşan oyulmayı sayısal olarak modellemişlerdir. İki boyutlu hidrostatik kabuller yaparak çalışan bir sayısal model olan Delft-3D ile üç boyutlu hidrostatik olmayan HAD yöntemine dayalı FLOW-3D sayısal modellerinden yararlanılmıştır. Bu iki sayısal model arasında oyulma miktarı parametresi kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Sayısal modellerden elde edilen bu parametre ile deneysel model sonuçları başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Deneysel modelde tsunami dalgasını oluşturmak için baraj yıkılması etkisiyle analoji yapılmıştır. Çalışmada dört farklı türbülans modeli (k-ε, RNG k-ε, k-ω ve LES) kullanılmıştır. k-ε türbülans modeli hem Delft-3D hem de FLOW-3D içerisinde mevcut bulunmaktadır. Oyulma için iki farklı katı madde taşınım modeli kullanılmıştır: Van Rijn (1984) ve Nielsen (1992). Yazarlar hidrostatik kabulden kaynaklı olarak Delft-3D modelinin FLOW-3D'ye göre daha başarısız olduğunu ifade etmişlerdir. Türbülansın benzeşiminde RANS tabanlı modellere göre daha gerçekçi olan Büyük Eddy Benzeşimi modelinin (LES) daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Sabeti ve Heidarzadeh (2022), denizaltı heyelanı sonucu meydana gelen tsunamilerden kaynaklı oluşan dalgaları FLOW-3D ile modellemişlerdir. Üç farklı büyüklüğe sahip blokları laboratuvar ortamında suyun içerisine 45^{o} eğimle iterek bir benzeşim kurulmuştur. Böylece denizaltı heyelanı sonucu meydana gelen tsunamiler deneysel olarak modellenmiştir. Suyun içerisine itilen blokların hacimleri ile batma derinliği ve dalganın genliği ile ilerleme mesafesi arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler sonucunda, itilen bloklardan dolayı oluşan dalganın genliği ile hem batma derinliğinin hem de dalga ilerleme mesafesinin arasında ters bir üstel ilişki olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca büyük bloğun ürettiği belirgin dalga periyodunun 0.7 s, küçük bloğun ise 1.1 s olduğu gözlemlenmiştir. Küçük blok kullanıldığında, su içerisine giren kütlenin daha az olmasından dolayı daha düşük hızlar oluştuğu ve bu nedenle periyodun arttığı ifade edilmiştir. FLOW-3D aracılığıyla fiziksel model 1:1 ölçekte sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel koşullar kullanılarak 177 adet modelleme

oluşturulmuştur. Deneysel verilerle sayısal model doğrulanmıştır. Yazarlar, deneysel çalışmaların genellikle maliyetli ve zaman alıcı olduğunu belirterek tsunami hakkında çalışma yapan mühendisler ve araştırmacıların FLOW-3D sayısal modelini güven içerisinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Tsunamiler meydana geldiğinde kıyı alanlarına yakın köprüleri de etkilemektedirler. Tsunami taşkını esnasında köprülerin ayaklarında oyulmalar oluşmakta ve bu oyulmalar köprülerin temellerinin stabilitesini etkilemektedir. Li vd. (2022) bu problemi FLOW-3D aracılığıyla HAD yöntemlerini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal modelde tsunami dalgası için giriş sınır koşulu olarak soliter dalga ve türbülans kapama modeli olarak k-ω tanımlanmıştır. Araştırmacılar, 14 farklı dalga periyodu ve maksimum hız koşulu için köprü ayağı çevresinde oluşan hız alanlarını ve zamana bağlı oyulma miktarını incelemişler ve modellerini deneysel model sonuçları ile başarılı bir şekilde doğrulamışlardır.

Bu çalışmaya benzer olarak aynı araştırma grubu tarafından tsunami dalgasının kıyıya yakın yapılarda oluşturabileceği hasar sayısal olarak modellenmiştir (Li vd., 2023). FLOW-3D yardımıyla hem hidrodinamik hem katı madde taşımının dahil edildiği birleştirilmiş bir model oluşturulmuştur. Tsunami dalgası yine soliter dalga formunda modellenmiştir. Sayısal modelden elde edilen parametreler büyük ölçekli bir deneysel model ile doğrulanmıştır. Çalışmalarının oyulma derinliğinin belirlenmesinde başarılı bir model olduğunu ifade etmişlerdir. Nortek HR Aquadopp aracılığıyla deneysel modelde hız profilleri elde edilip sayısal model sonuçlarıyla başarılı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Ayrıca oluşturulan sayısal model aracılığıyla tsunami dalgasından etkilenen yapılar üzerinde oluşan dalga kuvvetleri incelenmiştir.

Bu araştırmalar sonucunda görülmektedir ki tsunami dalgasının etkilediği kıyı alanlarında FLOW-3D aracılığıyla gerçekleştirilen sayısal modellemeler oldukça pratik ve doğru sonuçlar verebilmektedir. Tsunami etkisinde katı madde taşınımının, tsunami dalgasının kıyı alanları bölgesine ilerlemesiyle meydana gelen hidrodinamik etkilerin, tsunami taşkın alanında yapılar üzerinde meydana gelebilecek hasarların incelenmesi için tsunamilerin sayısal olarak modellenmesi HAD yöntemi ve FLOW-3D aracılığıyla yaygın bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Belirli büyüklük ve şiddette meydana gelen depremler, denizaltı heyelanları, volkan patlamaları, buzul kırılmaları, atom bombası veya meteor düşmesi gibi fiziksel olaylar tsunamilere neden olmaktadır. Tsunamiler çok nadir görülen doğa olayı oldukları için, bu tarz prototip olayların gözlenmesi oldukça az rastlanır ve oluşumları sırasında değerlendirilmesi de güçtür. Tsunaminin daha önce meydana geldiği yakın kıyı alanlarında yapılan saha ölçümleri ve tsunamiye neden olan faktörler arasında korelasyon kurup olası riskler tartışılabilmektedir. Fakat daha önce tsunaminin etkili olmadığı alanlarda bu tahmini yapabilmek neredeyse imkansızdır. Ayrıca literatürdeki çalışmalar göstermektedir ki güvenilir saha ölçümlerine ulaşmak oldukça zor olabilmektedir. Dolayısıyla farklı senaryolara göre meydana gelebilecek olası tsunamiler modellenerek riskler önceden tahmin edilmelidir. Kıyı alanlarını etkileyen tsunamilerin modellenmesi yaygın bir şekilde ilgi gören bir konudur. Birçok şehir ve yerleşim yeri için farklı deprem senaryolarında oluşabilecek tsunamiler modellenmektedir. Elde edilen risk haritalarına ve farklı güvenlik düzeylerine göre tahliye planları hazırlanmakta ve tsunami etkisini indirgeyecek kıyı koruma yapıları geliştirilmektedir. Böylece birçok gelişmiş kıyıya yakın yaşam alanı tsunamilere karşı hazır bütünleşmiş hale getirilmektedir. Fakat bu tez çalışmasında incelenen konuda olduğu gibi, tsunami dalgasının akarsuya girdikten sonra nasıl davrandığı ve akarsuyun membası ile kıyılarında ne ölçüde tahribat yaratabileceği hala tam anlamıyla bilinmeyen bir konudur. Dolayısıyla burada oluşabilecek etkilerin de hem deneysel hem de sayısal olarak modellenerek incelenmesi ve gerektiği ölçüde önlemlerin alınması gerekmektedir.

Tsunamilerin akarsu-delta sistemleri üzerindeki etkisinin doğru olarak belirlenmesi akarsu-tsunami etkileşimi ve söz konusu etkileşimin meydana geldiği akarsu geometrisine bağlı olmaktadır. Başka bir deyişle araştırmacıların yanıtını aradıkları sorular şunlar olmaktadır: 1) Akarsu ağzından giren bir tsunami dalgası akarsu boyunca ne kadar mesafe katetmektedir? 2) Tsunami dalgasının tersi yönde ilerleyen akım ile dalga etkileşiminin dalga yüksekliği/su yüzü değişimi üzerindeki etkisi nedir? 3) Akarsuyun kıvrımlı geometrisinin olayın hidrodinamiği üzerindeki etkisi nedir?

Bu tez çalışmasında literatürdeki çalışmalardan farklı olarak ilk kez doğadakine uygun olarak kıvrımlı bir kanal boyunca membadan mansaba doğru kararlı akıma ters yönde ilerleyen tsunami dalgasının formunda ve hidrodinamik davranışında meydana gelen değişim çalışılmıştır. Bu sebeple akarsu debileri ve tsunami dalgası karakteristikleri dikkate alınmıştır. Tsunami dalgalarının doğadaki fiziksel davranışlarına uygun olarak, tsunami dalgası laboratuvar ortamında N-dalga formunda oluşturulmuştur. Yine ilk defa mendereslenmenin olduğu bir akarsu kesitinde tsunami dalgasının iç ve dış kıyılardaki davranışı hem fiziksel hem de sayısal modelleme yaklaşımları ile incelenmiştir. Bu problem İzmir (2020) depreminde Alaçatı'da belirgin olarak karşımıza çıkmış ve yerleşim bölgelerinde can ve mal kaybına yönelik ciddi risk yaratmıştır (Doğan vd., 2021). Bu incelemelerin yapılabilmesi için tez çalışmasının ilk aşaması olan deney sisteminin kurulumu ve tsunami dalgası model ölçeğinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Ardından kıvrımlı kanal boyunca farklı tsunami dalga profilleri için su yüzü değişimleri ve hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak bire bir ölçekte sayısal model oluşturularak deneysel verilerle sayısal modelin doğrulanması yapılmıştır. Tezin kapsamını oluşturan bölümler aşağıda sıralanmıştır:

Bölüm 1'de tsunami dalgasının kanallarda ilerlemesinin araştırılması ile ilgili genel literatür özeti verilmiş, çalışmanın öneminden bahsedilerek bu çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmıştır.

Bölüm 2'de tsunami dalgasının mekaniği, akarsu üzerindeki etkileri ve kıvrımlı kanallarda kararlı akım mekanizması kısaca açıklanmıştır. Bu açıklamalar literatürdeki kaynaklarla desteklenmiştir. Ayrıca tsunami model ölçeğinin belirlenmesi ve dalga koşulları verilmiştir.

Bölüm 3'de tsunami dalgasının kanallarda ilerlemesinin deneysel olarak incelenmesi için oluşturulmuş deney sisteminden bahsedilmektedir. Deney sisteminde kullanılan kıvrımlı kanal ve kanalı besleyen savak ile laboratuvar ortamında tsunami dalgasının üretilmesine imkân sağlayan tsunami üreteci tanıtılmıştır. Tsunami dalgasının laboratuvar ortamında benzeştirilmesi için kullanılan Froude ölçeği ve deney koşulları verilmiştir. Kıvrımlı kanal boyunca oluşturulan kararlı akım koşulları açıklanmıştır. Ayrıca deney sisteminde kullanılan su yüzü değişimi ve hız ölçüm sistemlerinden bahsedilmiştir.

Bölüm 4'te tsunami dalgasının kanallarda ilerlemesinin sayısal olarak incelenmesi için kullanılan sayısal model tanıtılmıştır. Bu çalışmada sayısal modelleme için kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemine dayanan FLOW-3D sayısal modelinin bilimsel altyapısı verilmiştir. Bu tez çalışmasında oluşturulan deney koşulları kullanılarak bire bir ölçekte sayısal modelin oluşturulmasına yer verilmiştir. Uygun hesaplama ağı çalışması ve uygun türbülans kapama modelinin seçimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sayısal modelin doğrulanması için kullanılan hata metrikleri tanıtılmıştır.

Bölüm 5'te kıvrımlı kanalda kararlı akım davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi verilmiştir. Kıvrımlı kanal boyunca oluşan hız dağılımları, iç ile dış kıvrım arasındaki hız farkları, sekonder akım yapısının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Akım doğrultusundaki hız büyüklükleri, derinlik boyunca hız büyüklükleri, türbülans kinetik enerjisi, kayma hızı ve bununla ilişkili taban kayma gerilmesi parametreleri kullanılmıştır. Deneysel modellemeden elde edilen veriler ışığında sayısal modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 6'da kıvrımlı kanal boyunca tsunami dalgasının ilerlemesinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi verilmiştir. Deneyler belirlenen 4 farklı bore gücüne göre oluşturulmuş tsunami dalga profillerinin kanal boyunca değişiminin incelenmesinden oluşmaktadır. Deneyler kanalda durgun su (statik hal) koşulları ve tsunami dalgasının ilerleme yönüne ters yönde 3 farklı debi için kararlı akım koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple kanal boyunca belirlenen 8 farklı noktada su yüzü değişimleri incelenmiştir. Ayrıca kıvrımlı kanal boyunca tsunami dalgasının ilerlemesi esnasında hız büyüklükleri ölçülerek tartışılmıştır. Deneysel modellemeden elde edilen veriler ile sayısal modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal model sonuçları niteliksel ve niceliksel olarak karşılaştırılmıştır. Sayısal modelin uygulanabilirliği için örnek akarsular tartışılmıştır.

Bölüm 7'de gerçekleştirilen bütün çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışması kapsamında, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak mendereslenen akarsular laboratuvar ortamında kıvrımlı kanal geometrisiyle temsil edilerek, tsunami dalgasının bu tür karmaşık morfolojide ilerleyişi hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla özgün tasarıma sahip bir tsunami üreteci ile dört farklı bore gücünde, N-dalga formunda tsunami dalgaları üretilmiş; dalganın kanal boyunca ilerleyişi süresince yaratabileceği taşkın tehlikeleri ve özellikle iç ile dış kıvrımlar arasında meydana gelen su yüzü farkları detaylı biçimde analiz edilmiştir. Dalgalı bore, geçiş ve güçlü bore koşullarında yürütülen deneylerde, tsunami dalgasının farklı akım senaryoları altındaki davranışı gözlemlenmiştir. Bu kapsamda; (i) durgun su koşulları (akımın olmadığı, kurak dönem temsil durumu) ve (ii) üç farklı sabit debiyle temsil edilen kararlı akım koşulları (yağışlı dönem senaryoları) altında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada tsunamiden bağımsız olarak, menderesli akarsularda membadan mansaba gerçekleşen kararlı akımın yapısı da deneysel ve sayısal modelleme yaklaşımlarıyla analiz edilmiştir.

Bu kapsamda, tsunami dalgasının kıvrımlı bir kanal boyunca ilerleyişi sırasında dalga formunda ve su yüzü değişiminde kanal geometrisine bağlı olarak önemli bozulmalar meydana geldiği hipotez edilmektedir. Özellikle ters yönde uygulanan kararlı akım koşullarının, dalganın ilerleme hızını azaltırken, su yüzü yüksekliğini artırarak dalganın taşkın potansiyelini yükselttiği öngörülmektedir. Kıvrım bölgelerinde, dış kıyılarda artan hızların ve iç kıyılarda oluşan düşük hız bölgelerinin dalga enerjisinin asimetrik dağılmasına neden olduğu ve bunun sonucunda yerel su seviyesi değişimlerinin meydana geldiği düşünülmektedir. FLOW-3D yazılımı kullanılarak oluşturulan bire bir ölçekli sayısal modelin, deneysel verilerle niteliksel ve niceliksel uyum içinde olduğu, dolayısıyla kıvrımlı kanallarda hem kararlı akım davranışını hem de tsunami dalgasının ilerleyişini güvenilir şekilde temsil edebildiği varsayılmaktadır. Ayrıca sayısal modelde hesaplama ağı çözünürlüğünün artırılması ile dalga varış süresi gibi kritik parametrelerde daha tutarlı sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir. Bu yönüyle tez çalışması, tsunami-akarsu etkileşimini anlamaya yönelik özgün katkılar sunmakta ve kıyı ile iç kesimlerdeki taşkın risklerinin belirlenmesine yönelik önemli bir bilimsel zemin oluşturmaktadır.

2
TSUNAMİ DALGASININ MEKANİĞİ, AKARSU ETKİLEŞİMLERİ VE KIVRIMLI KANALLARDA AKIM DAVRANIŞI

2.1 Giriş

Tsunamiler, doğada meydana gelen en yıkıcı afetlerden biridir ve insanlık tarihindeki pek çok medeniyete büyük zararlar vermiştir. Özellikle deniz kıyısındaki yerleşim alanları ve buralarda yaşayan insanlar bu felaketten daha fazla etkilenmektedir. Kara alanlarındaki tsunami dalgasının ilerlemesi ve yayılması hakkında birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar aracılığı ile tsunami dalgasının kara alanlarında yayılırken sergilediği davranışlar ve dalganın bu alanlar üzerindeki etkileri büyük ölçüde anlaşılmıştır. Tsunamiden etkilenen bölgelerde yapılan saha gözlemleri, olayın doğasını açıklamak için geliştirilen matematiksel ifadeler ve bu doğa olayını benzeştirmek amacıyla kullanılan sayısal modeller karalardaki tsunami yayılımının anlaşılmasında çok büyük faydalar sağlamıştır.

Ağırlık dalgası sınıfına giren tsunami dalgaları uzun dalgalar (diğeri ise gelgit dalgalarıdır) olup deniz/okyanus tabanındaki tektonik hareketler, volkanik patlamalar veya heyelanlar sonucu meydana gelen ve kıyıya doğru binlerce km ilerleyen oldukça yıkıcı etkiye sahip olan büyük su kütlesi hareketleridir. Bu anlamda tektonik olarak oldukça aktif olan denizlerimizde (özellikle Ege Denizi ve Marmara Denizi) meydana gelecek tsunamiler ülkemiz kıyılarında deniz kaynaklı potansiyel yıkıcı etkilere sahiptirler. Hatta uzun dalga sınıfına giren tsunami dalgaları, meydana geldiği noktadan binlerce kilometre uzağa ulaşabilmeleri nedeniyle Akdeniz'in kuzey doğusundaki kıyılarımız için de risk oluşturmaktadırlar. Uzun dalgalar, rüzgâr dalgası gibi kısa dalgalardan farklı olarak

etkileri deniz tabanı tarafından da hissedilen dalga ilerleme doğrultusunda kütle taşınımının olduğu dalgalardır. Tsunamilerin kıyılardaki yerleşim yerleri üzerindeki yıkıcı etkileri özellikle 90'lı yıllardan itibaren yoğun olarak çalışılmış ve bu konuda oldukça iyi bir bilgi birikimi oluşmuştur (Spence vd., 2009; Mori vd., 2011; USGS, 2013a ve 2013b). Tsunamilerin kıyı alanlarına oldukça büyük ölçekte etkileri (zararları) olacağı gibi akarsu ağızlarından içeri girip membaya doğru kilometrelerce ilerleyerek akarsu havzalarında da aynı ölçekte zararları olabilmektedir. Çalışmaların büyük bölümü kıyı boyunca meydana gelen tsunami dalgası-kıyı etkileşimi ve bu doğa olayının kıyı yerleşimleri üzerindeki katastrofik etkileri üzerine odaklanmaktadır. Ancak tsunamiler akarsu ağızlarından içeri girerek akarsu membasına doğru da uzun mesafeler katetebilir ve akarsu boyunca var olan yerleşim alanları, tarım alanları ve ekolojik yaşam üzerinde de kıyı alanlarındakine benzer yıkıcı etkiler yaratabilirler (Yasuda vd., 2004; Tanaka vd., 2008; Yüksel vd., 2020, Doğan vd., 2020).

Denize doğru taban eğimleri azalan ve akım hızları düşen akarsular, taşıdıkları katı maddeleri bu bölgelere yığarak verimli düzlükler oluşturmaktadırlar. Drenaj alanına bağlı olarak bütün akarsular denize değişik boyutlara sahip birer delta oluşturarak bağlanmaktadır. Mısır'daki Nil Deltası, ABD'deki Mississippi Deltası, Türkiye'deki Gediz, Menderes ve Seyhan Deltaları büyük deltalara örnek verilebilir. Mevsimsel yağışların etkisiyle oluşan akarsu kaynaklı tatlı su taşkınları, yerleşim yerleri açısından risk teşkil etmekle birlikte, geniş tarım alanlarının suyla beslenmesi nedeniyle bazı bölgelerde yerel halk tarafından faydalı olarak değerlendirilebilmektedir. Yıllık olarak dönemleri çok iyi bilinen bu taşkınlardan yerleşik uygarlıklar tarımsal üretimlerini artırmada büyük faydalar sağlamışlardır (örneğin Fırat ve Dicle boyunca yerleşen kadim Sümer ve Nil boyunca yerleşen kadim Mısır uygarlıkları). Hakkında sınırlı bilgiye sahip olunan ve oluşumları genellikle ancak kısa bir süre öncesinde tespit edilebilen tsunami kaynaklı deniz taşkınları, akarsular boyunca akım yönünün tersine ilerleyerek hem yerleşim alanları hem de tarım arazileri üzerinde yıkıcı etkilere neden olabilmektedir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında tsunami dalgasının mekaniği, tsunamilerin akarsular üzerindeki etkileri ve kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizması devam eden bölümlerde açıklanmıştır.

2.2 Tsunami (Depreşim Dalgası)

Tsunami sözcüğü, 1896 yılında Japonya'daki Büyük Meiji Tsunamisi afetinde yaklaşık 22000 kişinin ölümüne neden olmasından sonra, Japonların tüm dünyaya yaptıkları yardım çağrısı içinde yer alan sözcük olarak tanınmış, o tarihten beri de birçok dilde aynı adla "tsunami" olarak kullanılmaya başlanmıştır. Tsunami sözcüğü Japonca kaynaklı olup, tsu (liman) ve nami (dalga) sözcüklerinin birleşiminden oluşarak, "liman dalgası" anlamında kullanılmaktadır. Bunun nedeni, zayıf bir tsunaminin bile kıyılarda ve özellikle sığ sularda şiddetli akıntılar oluşturması ve özellikle limanlarda hasara yol açmasından kaynaklanmaktadır.

Türkiye ve yakın çevresinde 3000 yıllık bir gözlem süresi (MÖ 1500-MS 2000) içerisinde etkili olan tsunamilerin sayıları 125'ten fazla olmaktadır. Türkiye kıyılarında etkili olan tsunamilerin yanı sıra Türkiye'nin yakın çevresinde olmuş ve kıyılarımızı etkilemiş olanlar da bulunmaktadır.

2.2.1 Tsunami Dalgalarının Oluşum ve Yayılım Mekanizması

Tsunami (depreşim dalgası), fay kırılması (deprem), zemin deplasmanı, heyelan ve yanardağ patlaması gibi olaylarla su ortamına geçen enerji sebebiyle meydana gelen uzun dalgalar olarak bilinmektedir. Sismik aktivite kaynaklı tsunami oluşması için, deniz tabanında meydana gelen depremin düşey atımlı fay kırılmasına neden olması gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle fay kırığının olduğu yerin bir yanındaki zeminin diğer tarafa göre düşey olarak bir miktar yükselmesi veya alçalması gerekmektedir. Yanal atımlı fay kırılmalarında ise fayın her iki tarafında düşey olarak zemin deplasmanı bulunmadığı için su yüzeyinde pek bir değişim meydana gelmemektedir. Fakat yanal atımlı fayların başladığı veya bittiği bölgelerdeki zemin hareketi tsunami oluşturabilmektedir. Bu tip fay hareketi denizaltı heyelanlarına sebep olarak tsunami oluşmasına neden olabilmektedir (Yüksel ve Çevik, 2016).

Tsunamiler, genellikle 20 ila 30 dakika arasında değişen periyotlara sahip olmakla birlikte, bu süre 5 dakikadan 1 saate kadar uzayabilmektedir. Ayrıca, tsunamiler oldukça uzun dalga boylarına sahip olabilen dalgalardır. Kıyıdan uzakta, açık deniz koşullarında oluşan tsunamiler genellikle 1 kilometre veya daha büyük derinliklerde meydana gelmekte ve bu derinliklerde yayılmaya başlamaktadır. Bu nedenle, açık denizdeki dalga yükseklikleri genellikle oldukça küçüktür. Hatta bu

dalgalar, bölgede bulunan denizciler tarafından çoğu zaman fark edilemeyecek kadar zayıf şekilde hissedilmektedir. Dolayısıyla bu dalgalar deformasyona uğramadan uzun mesafeler boyunca ilerlemektedirler. Fakat sığ su bölgesine yaklaştığında ise sığlaşma ve sapma etkileriyle çok büyük bir dalga yüksekliğine sahip olmaktadırlar. Reeve vd. (2004) tarafından belirtildiği üzere, büyük tsunamiler genellikle büyüklüğü Richter ölçeğine göre 6.5'in üzerinde olan ve hiposantrı deniz tabanına 60 km'den daha yakın konumlanan depremler sonucunda oluşmaktadır.

Tsunami dalgalarının yayılma hızı, su derinliğine doğrudan bağlıdır. Açık denizde oluşan bir tsunami dalgası, saatte yüzlerce kilometre hızla ilerleyebilmektedir. Deniz tabanının bir deprem sonucu ani yükselmesi durumunda, dalganın ön cephesinde su seviyesi düşerken, arka cephedeki su kütlesi ileri doğru itildiğinden dalga yüksekliği artış gösterir. Tsunami dalgaları kıyıya ulaştığında her zaman kırılmak zorunda değildir; ancak sığ bölgelerde yüksekliği artan bu dalgalar, kıyı alanlarında taşkınlara yol açarak büyük miktarda suyun karaya ulaşmasına neden olur. Bu durum, literatürde 'tırmanma' hareketi (run-up) olarak adlandırılmaktadır.

Tsunaminin kıyıya ulaşması sırasında genellikle ilk olarak suyun kıyıdan çekilmesi gözlemlenir. Bu çekilmeyi, bir dizi ardışık dalga takip eder. Açık denizde kırılan tsunami dalgaları, kıyıya yaklaştıkça bore (öncü) dalgalarına dönüşebilir. Halk arasında genellikle ilk görülen kırılan dalganın en tehlikeli olduğu düşünülse de esas yıkıcı etkiye sahip dalgalar bu ilk dalgayı takip edebilir. Bu nedenle erken uyarı sistemleri, kıyı bölgelerinde yaşayan halkın zamanında tahliye edilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Ancak tsunami dalgalarının birkaç saat sonra ulaşabildiği derin denizlerde bu sistemler etkili olurken, göreceli olarak daha sığ denizlerde tsunami dalgasının sadece birkaç dakika içinde kıyıya ulaşması, erken uyarı sistemlerinin etkinliğini sınırlandırabilmektedir (Yüksel ve Çevik, 2016).

2.2.1.1 Tsunami Dalgalarının Oluşumu

Açık denizlerde meydana gelen büyük depremler sonucunda tsunami oluşumu gerçekleşebilmektedir. Tsunamilerin oluşumu ve yayılımı, temel hareket denklemlerine dayanarak matematiksel olarak tanımlanabilmektedir. Her ne kadar tsunami oluşumu doğrudan yerçekimiyle başlatılmasa da dalganın hareketini sağlayan ana itici kuvvet yerçekimi kuvvetidir. Tsunaminin yayılma hızı ve

karakteristikleri, büyük ölçüde dalga boyu ile deniz derinliğine bağlıdır. Ancak deniz derinliği belirli bir eşik değerin altına düştüğünde, tsunami davranışı lineer olmayan bir hal almakta ve klasik dalga teorileri ile tam olarak açıklanamaz hâle gelmektedir. Kırılmanın moment büyüklüğü ve zaman ölçekleri tsunami çalışmasında önemli parametrelerdir. Moment büyüklüğü, kalıcı deniz tabanı yer değiştirmesini ve tsunaminin büyüklüğünü güçlü bir şekilde kontrol etmektedir. Diğer bir ifadeyle, tsunaminin büyüklüğü neredeyse moment büyüklüğü tarafından belirlenmektedir. Tsunami, kırılmanın zaman ölçeklerinden güçlü bir şekilde etkilenmemektedir. Bununla birlikte, sismik dalgaların oluşumuna sebep olduğu için tsunami çalışmalarında zaman ölçeği kesinlikle önemlidir. Sismik dalgalar, tsunami çalışmalarında çeşitli roller oynamaktadır. Sismik dalgaları analiz ederek depremin büyüklüğü ve yeri tahmin edebilmektedir. Kıyıdaki tsunami dalgasının yüksekliğini tahmin etmek için genellikle deprem odak bilgileri kullanılmaktadır. Moment büyüklüğü (M_w) Denklem 2.1'de ve sismik moment (M_0) ise Denklem 2.2'de verilmiştir (Saito, 2019).

$$M_W = \frac{1}{1.5}\left(\log M_0 - 9.1\right) \tag{2.1}$$

$$M_0 = \mu_G \int\int \left[u\left(\xi\right) dS_f\left(\xi\right) \right] = \mu_G D S_f \tag{2.2}$$

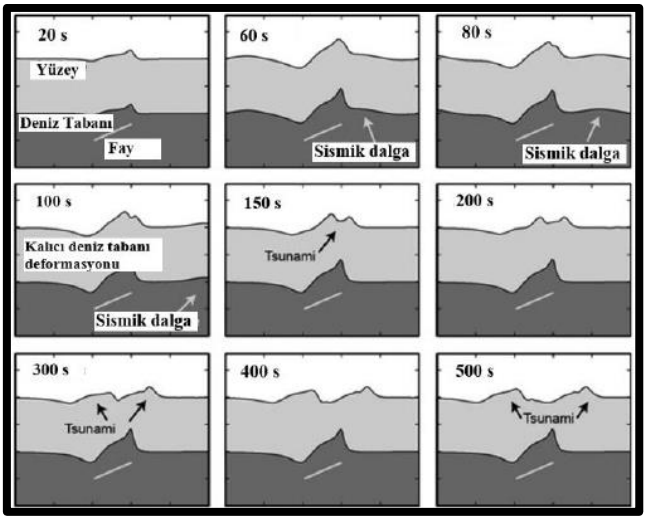
Burada; μ_G rijitlik veya yeryüzünün kayma modülü, $u(\xi)$ fay üzerindeki nihai kayma dağılımı, S_f fay alanı ve D fay düzleminin ortalama yer değiştirme miktarı olarak kabul edilmektedir.

Deprem kırılmasının bir diğer önemli yönü de zaman ölçeğidir. Zaman ölçeğini karakterize eden iki çeşit parametre vardır. Bunlardan birisi kırılma zamanıdır. Kırılma zamanı, kırılmanın toplam süresidir yani çatlamanın fayın bir ucundan diğer ucuna yayılması için geçen süredir. Bir diğeri ise yükselme süresi diğer bir ifadeyle fay üzerinde bir noktanın kayma süresi anlamına gelmektedir. Kısaca fayın duvarlarının birbirine göre hareket etmesi için gerekli zamandır. Kırılma zamanı ve yükselme zamanı, deprem fayının kinematiğini tanımlamaktadır. Dolayısıyla depremler statik ve kinematik parametrelerle karakterize edilmektedir.

Depremden kısa süre sonra deniz tabanında kalıcı yer değiştirme oluşur. Çok kısa bir süre sonra da Rayleigh dalgası oluşmaktadır. Rayleigh dalgası tsunami dalgası olarak kabul görmemektedir. Sadece kalıcı deniz tabanı yer değiştirmesinin neden

olduğu deniz yüzeyi yer değiştirmesi mevcuttur. Yükselen deniz yüzeyi yerçekimi nedeniyle şeklini koruyamaz ve zamanla deniz yüzeyi çöker. Sonuç olarak, deniz yüzeyi yer değiştirmesi bir depreşim dalgası olarak yayılmaktadır. Bu durum yerçekiminin tsunaminin yayılmasında önemli bir rol oynadığını açıkça göstermektedir (Saito, 2019).

Şekil 2.1'de bir depremin neden olduğu tsunami oluşumu gösterilmiştir. Deprem sonucunda deniz tabanında fay üstünde büyük bir deformasyon oluşmaktadır (20 ve 60 s'lik geçen süreler). Aynı zamanda faydan yayılan bir sismik dalga yatay olarak yayılmaktadır. Bu dalga, Rayleigh dalgası adı verilen sismik bir yüzey dalgasıdır. Sismik dalgaların neden olduğu yer değiştirme geçicidir, yani sismik dalgaların geçişinden sonra yer değiştirme sıfıra dönmektedir ve sismik dalga yayılımı ortamın esnekliğinden kaynaklanmaktadır. Sismik dalga, 60, 80 ve 100 s'lik geçen sürelerde görülmektedir. Deniz tabanı deformasyonu deniz suyunun yerini değiştirir ve deniz yüzeyi yükselir (20 ve 60 s'lik geçen süreler). Kalıcı deniz tabanı deformasyonu, deniz yüzeyini odak alanında kısa bir süre için yükseltmektedir (geçen süre 60-80 s). Ancak süre geçtikçe (100-200 s), yerçekimi yükselen deniz yüzeyinin çökmesine neden olmaktadır. Çöken su hacmi, yatay yönde büyük bir su hacminin yerini alır ve deniz yüzeyi deplasmanı uzun dalga yayılımı olarak devam eder. Bu uzun dalga tsunami olarak adlandırılmaktadır. Yayılan sismik dalgaların neden olduğu deniz yüzeyi salınımının tsunami olarak adlandırılmaması gerektiğine dikkat edilmelidir, çünkü dalga yayılımına neden olan itici güç tsunamininkinden farklı olmaktadır (Saito, 2019).



Şekil 2.1 Deprem fay kırılmasından kaynaklı tsunami oluşumu (Saito, 2019)

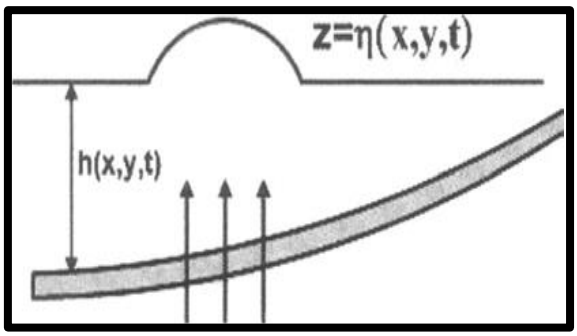
2.2.1.2 Tsunami Dalgalarının Yayılması

Tsunamilerin dalga boyları çok uzun olduğu için derinliğin çok fazla olduğu deniz ve okyanuslarda bile sığ su koşullarında olduğu kabul edilmektedir. Bu yüzden sığ su denklemleri ile açıklanırlar. Sığ su denklemleri kıyı bölgelerinde, kanallarda (akarsularda) ve haliçlerde akışkan hareketini açıklayan denklem sistemidir. Bu denklem sistemi hareket ve kütlenin korunumu denklemleri yardımıyla elde edilmiştir. Denklem 2.3, kütle korunum denklemi yardımıyla elde edilen iki boyutlu akımlar için sığ su denklemini göstermektedir. Denklem 2.4 ise hareket denklemi yardımıyla elde edilen sığ su denklemini göstermektedir. Burada sığ su koşullarında ve tsunami dalgasının yayılımında, h su yüksekliğini, $\bar{u}$ ortalama hız bileşenini göstermektedir. Sığ su koşullarda akımların genel özelliği düşey boyutun yatay boyuttan çok daha büyük olmasıdır (Van Rijn, 1990).

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial t}=0 \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}=-g\frac{\partial h}{\partial x} \tag{2.4}$$

Deprem nedeniyle oluşan tsunami dalgasını açıklayan hidrodinamik model, sığ su denklem sistemini kullanılarak elde edilmektedir. Şekil 2.2'de deprem kaynaklı tsunami probleminin oluşum geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Deprem kaynaklı tsunami oluşum geometrisi (Pelinovsky, 2006)

Problem için uygun sınır şartları yardımıyla Denklem 2.5 ile 2.6 elde edilmektedir (Pelinovsky, 2006). Burada sığ su koşullarında, u yatay hız bileşenini, η su yüzü değişimini ve W_n ise depremden kaynaklanan deniz tabanı deplasmanının düşey y yönündeki hızını ifade etmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\nabla_1 u+g\nabla_1\eta=0 \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_1 \left[(h+\eta) u \right] = W_n \tag{2.6}$$

Denklem 2.5 ve 2.6 lineer olmayan sığ su denklemleri olarak adlandırılmaktadır. Zamanda ve konumda değişkenleri olan η(x,y,t) fonksiyonuna bağlı olmaktadır. Dolayısıyla homojen formda değildirler. Öte yandan, tsunami problemlerinde uygulamalı olarak en yaygın kullanılan yaklaşım, sığ su teorisinin lineerleştirilmiş versiyonudur. Bu yaklaşımda, deniz tabanındaki hareketlerin hızı ve su derinliğindeki değişimlerin küçük olduğu varsayılmakta ve böylece lineer bir denklem çifti elde edilmektedir. Bu denklemler Denklem 2.7 ve 2.8'de verilmiştir. Denklem 2.9'da ise Denklem 2.5 ve 2.6 kullanılarak elde edilen tsunami dalgasının oluşum denklemi verilmiştir (Pelinovsky, 2006). Tsunami dalgasının hızı (c) ise Denklem 2.9 yardımıyla elde edilmiş ve Denklem 2.10'da verilmiştir. Bu ifade sığ su koşullarında yayılan dalgalar için ortak ifade olarak kabul edilmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \nabla_1 \eta = 0 \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_1 (hu) = W_n \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \nabla_1 \left(c^2 \nabla_1 \eta \right) = \frac{\partial W_n}{\partial t} \tag{2.9}$$

$$c(x,y,t) = \sqrt{gh(x,y,t)} \tag{2.10}$$

Tsunami dalgası açık denizde ilerlerken göreceli olarak dalga boyuna göre oldukça küçük dalga yüksekliğine sahip olmaktadır. Bu yüzden açık denizde tsunami dalgası oldukça güç tespit edilmektedir. Bu durum tsunami felaketinin önceden fark edilip önlem alınmasında en önemli zorluklardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle tsunami dalgası kıyıya yaklaştıkça dalga yüksekliği artmakta ve tsunaminin kıyıda daha fazla hasar vermesine neden olmaktadır.

2.2.2 Tsunami Model Ölçeğinin Belirlenmesi

Uzun periyotlu dalgaların ilerlemesi, kıyıya tırmanması, yakın kıyı bölgesindeki hidrodinamik davranışlarının incelenmesi ve ilerleyen dalganın kıyıdaki makro ölçekli pürüzlülük unsurlarıyla olan lineer olmayan etkileşiminin belirlenmesi gibi konular, laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarla değerlendirildiğinde güvenilir ve değerli sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak, gerçek bir tsunami dalgasının

laboratuvar ortamında fiziksel olarak benzeştirilmesi sırasında çeşitli zorluklar ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen, geliştirilmiş deney sistemleri ve laboratuvar teknikleri ile modelleme doğruluğunu ve deneysel verilerin güvenilirliğini artırmaya yönelik önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Öte yandan, tsunami dalgasının soliter dalga yaklaşımıyla temsil edilmeye çalışılması hem zamansal hem de uzamsal boyutlarda belirli hatalara neden olmakta ve tsunami dalgasının gerçek fiziksel özelliklerini tam olarak yansıtamamaktadır (Madsen vd., 2008).

Tsunami dalgasının laboratuvar ortamında benzeştirilebilmesi için öncelikli adım, uygun model ölçeğinin belirlenmesidir. Genel prensip olarak, ölçek faktörü büyüdükçe —yani model, prototipe ne kadar yaklaşırsa— benzeşim kalitesi o ölçüde artmaktadır. Bu durum, etkili kuvvetlerin modele tam olarak yansıtılamaması hâlinde ortaya çıkan ölçek etkilerinin azaltılması açısından önemlidir. Uzun dalgaların modellenmesinde literatürde yaygın olarak 1/100 ölçek kullanılmaktadır. Bunun nedeni, okyanus ortamında (yaklaşık 4000 m derinlikte) 400 km'ye, kıta sahanlığında (yaklaşık 150 m derinlikte) 80 km'ye ve sığ sularda (yaklaşık 15 m derinlikte) 30 km'ye kadar ulaşabilen tsunami dalga boylarının gerçekçi biçimde laboratuvarda temsil edilebilmesi için oldukça uzun deney kanallarına veya havuzlara ihtiyaç duyulmasıdır. Daha büyük ölçeklerde (örneğin 1/25 veya 1/50) yapılan modeller, daha iyi fiziksel benzeşim sağlasa da bu durum, modelleme maliyetlerini ciddi ölçüde artırmakta ve çoğu zaman laboratuvar imkânlarının yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu bölümde, prototip koşullarda tsunami dalgasını oluşturan temel kuvvetlerin laboratuvar ortamında nasıl doğru şekilde tekrar üretilebileceği ve modellenebileceği açıklanmıştır. Ayrıca, deney sonuçlarını doğrudan etkileyebilecek potansiyel ölçek etkileri ele alınmış ve bu etkilerin benzeşim kalitesi üzerindeki rolü tartışılmıştır. Tsunami dalgasının modellenmesinde çoğunlukla distorsiyonsuz modeller tercih edilmektedir; bu durumda düşey ve yatay ölçekler eşit tutulur. Ancak distorsiyonsuz model kullanımı, laboratuvar olanaklarıyla doğrudan ilişkilidir ve özellikle uzun dalgaların modellenmesinde önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, distorsiyonlu modeller de alternatif bir yöntem olarak kullanılabilmektedir. Distorsiyonlu modellemeye örnek olarak, Amerika Birleşik Devletleri Ordusu Mühendisler Birliği bünyesindeki Engineer Research and Development Center'a bağlı Kıyı ve Hidrolik Laboratuvarı'nda inşa edilen, Los Angeles ve Long Beach

limanlarını temsil eden büyük fiziksel model (yaklaşık 0.4 hektar alan) verilebilir. Bu modelde yatay ölçek 1/400, düşey ölçek ise 1/100 olarak belirlenmiş olup, amacı küçük genlikli uzun dalga enerjisini ve liman rezonansını incelemektir (Kim, 2018). Benzer şekilde Goseberg vd. (2013), yeni geliştirilen tsunami üreteciyle gerçekleştirdikleri çalışmada distorsiyonlu ölçek kullanarak zaman ölçeğini gerçek zamanın yarısı olarak uygulamışlardır. Wuppukondur (2021) ise tsunami dalgasının kanalda yayılımını incelemek amacıyla 1/25 düşey ölçek ve 1/1500 yatay ölçek kullanarak distorsiyonlu bir model geliştirmiştir. Bu bağlamda, düşük düşey hız ve ivme bileşenlerine sahip uzun periyotlu dalgaların benzeştirilmesinde distorsiyonlu modeller uygun bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, distorsiyonlu modeller viskoz etkilerden kaynaklanan ölçek uyumsuzluklarını (örneğin Reynolds sayısı farklarını) azaltma avantajına da sahiptir. Ancak bu tür modellerde geometrik benzerliğin bozulması, deneysel verilerin yorumlanmasını karmaşıklaştırabilmektedir. Ölçek faktörü aynı zamanda deney düzeneğinin tasarımı, kanal veya basen boyutları, dalga üreteci konfigürasyonu ve ölçüm sistemlerinin yerleşimi gibi parametreleri de doğrudan etkileyerek uygulama maliyetlerini belirleyici bir unsur haline getirmektedir. Ölçekli bir modelde akım koşullarının benzeştirilmesi ve dinamik benzerliğin sağlanabilmesi için Froude sayısı (Fr), Reynolds sayısı (Re) ve Euler sayısı (E) prototip ile uyumlu olmalıdır. Ayrıca, akım zamana bağlı olarak değişkenlik gösteriyorsa Strouhal sayısı (St) da sağlanmalıdır. Bu boyutsuz parametrelerin tanımları sırasıyla Denklem 2.11 ile 2.14 arasında verilmiştir.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}} \tag{2.11}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V l}{\mu} \tag{2.12}$$

$$E = \frac{2P}{\rho V^2} \tag{2.13}$$

$$St = \frac{l}{Vt} \tag{2.14}$$

burada; V hızı, g yerçekimi ivmesini, *l* uzunluk ölçütünü veya geometrik uzunluğu, ρ özgül kütleyi, μ dinamik viskoziteyi, P akışkanın basıncını ve t ise zamanı temsil etmektedir. Tsunami tankındaki ölçekli model için basen veya kanal boyutlarından dolayı farklı akışkanların kullanılması uygun ve pratik değildir. Reynolds sayısı

dışındaki bütün dinamik benzerlik parametreleri genellikle kolayca uyuşabilmektedir. Froude modeline göre oluşturulmuş deneyler için dalga periyodu (zaman) ve hız ölçeği, uzunluk (boyut) ölçeğinin karekökü eşittir.

Reynolds sayısı (Re) ölçekli modellerde prototiplerle tam olarak uyuşmasa da genel kabul olarak eğer modeldeki Reynolds sayısı türbülanslı akımı ifade edecek kadar yeterince büyükse model sonuçları Reynolds sayısından kaynaklanan etkilerden nispeten bağımsızdır. Prototipteki Reynolds sayısı genellikle 10^7 mertebelerindedir (Burada karakteristik uzunluk olarak akım derinliği alınmaktadır). 1/50 ölçekli tsunami basen deneylerinde Reynolds sayısı 30000 civarında olmaktadır. Bu nedenle Reynolds sayısına bağlı ölçek etkilerinin belirgin olmadığı öngörülmelidir (Kim, 2018). Bu sebeple uzun dalgaları (derinliğin dalga boyuna oranının 1/20'den küçük) modellemek için en uygun yöntem Froude ölçeği olarak kabul edilmektedir. Froude sayısı bir hidrolik akımda atalet kuvvetleri ile yer çekimi kuvveti arasındaki göreceli ilişkiyi ifade etmektedir.

Aşağıda tipik bir prototip dalganın Froude ölçeği kullanılarak modelde nasıl oluşturulacağı açıklanmıştır. Dalga boyu, periyot ve akım hızı için model değerleri verilmiştir. Daha sonra deney sonuçlarını etkileyecek ölçek etkileri tartışılmıştır. Uzun ve çukura sahip (depressed) dalganın ölçeklendirilmesi aşağıda verilmektedir (Charvet, 2012; Rossetto, 2011; McGovern, 2018). Denklem 2.15 ölçek oranını ifade etmektedir.

$$N_X = \frac{X_m}{X_p} \tag{2.15}$$

burada; ölçek oranı (N_X), modeldeki bir parametrenin (X_m) prototipteki aynı parametrenin (X_p) değerine olan oranı olarak ifade edilmektedir. Distorsiyonsuz Froude ölçeği kullanıldığında modeldeki Froude sayısı ile prototipteki Froude sayısının aynı olması gerekmektedir ($Fr_p = Fr_m$).

$$N_{Fr} = \frac{Fr_m}{Fr_p} = \frac{N_V}{\sqrt{N_g N_l}} = 1 \tag{2.16}$$

l burada uzunluğu temsil etmektedir ve genellikle su derinliği (d) olarak dikkate alınmaktadır. Prototip ile model arasında ölçek oranının bu şartı sağlaması gereklidir. Distorsiyonsuz Froude modelinde, geometrik benzerlik için bütün uzunluk ölçeklerinde (derinlik, dalga yüksekliği, uzaklık vb.) bu oran korunması

gerekmektedir. Bu oran model için Denklem 2.16'da N_l ifadesi ile gösterilmektedir. N_g ise yerçekimi ivmesi oranını ifade etmektedir. Hem prototip hem de model için aynı değere sahip olduğundan 1 olarak kabul edilmektedir. Burada; V ise hızı temsil etmektedir. Uzun ve çukura sahip dalganın ölçeklendirilmesinde Denklem 2.17 ile ifade edilebilmektedir. Burada; a dalga genliğini temsil etmektedir. Denklem 2.17'deki hız büyüklüğü Denklem 2.16'ya entegre edilmesiyle Denklem 2.18 formu elde edilmektedir.

$$V = \sqrt{g\left(d + a\right)} \tag{2.17}$$

$$\frac{Fr_m}{Fr_p} = \frac{\sqrt{d_p\left(d_m + a_m\right)}}{\sqrt{d_m\left(d_p + a_p\right)}} \tag{2.18}$$

Bu tez çalışmasında kullanılan tsunami üretecine dair ön çalışmalara göre, mümkün olan en küçük ölçülerde kullanabilecek kanal su derinliği d = 0.15 m alındığında pozitif genlik maksimum a^+ = 0.143 m olarak elde edilmektedir. Yüksel vd. (2020) ölçümlerine göre İzmir Depreminde meydana gelen tsunamide pozitif genlik olarak 1 m ile 2 m arasında maksimum su yüzü değişimi oluşturmuştur. 4 ile 5 m derinliğe sahip dere ağzında ortalama 1.5 m (maksimum pozitif genlik) prototip dalga ile Denklem 2.18'i kullanarak Froude sayısı için ölçek oranı yaklaşık olarak 1 elde edilebilmektedir. Diğer bir ifadeyle prototipteki bu büyüklükler bu çalışmadaki laboratuvar ölçeğine uygun olabilmektedir. Bu nedenle, Froude ölçeklendirmesi bu çalışma için uygun olmaktadır. Hughes (1993)'in çalışması referans alınarak bütün parametreler için ölçeklendirme gereklilikleri aşağıda özetlenmiştir.

Kinematik benzerlik, tüm zaman ve uzunluk ilişkili büyüklükler için özel gereksinimler ortaya çıkarmaktadır. Zaman ve hız ölçekleri sırasıyla Denklem 2.19 ile Denklem 2.20'da verilmiştir.

$$N_T = \sqrt{\frac{N_l N_\rho}{N_\gamma}} \tag{2.19}$$

$$N_V = \sqrt{\frac{N_l N_\gamma}{N_\rho}} \tag{2.20}$$

Burada Denklem 2.21'de özgül ağırlık oranı verilmiştir. Daha önce ifade edildiği gibi yerçekimi ivmesi oranı 1 olmaktadır. Akışkanın özgül kütle oranı ise prototip ve model arasında yaklaşık 1 olarak kabul edilmektedir.

$$N_\gamma = N_\rho N_g \tag{2.21}$$

Denklem 2.21'deki ifadenin 1 olarak kabul edilmesiyle beraber boyut ile zaman ve hız ölçekleri oranının ilişkisi Denklem 2.22'deki şeklini almaktadır.

$$N_T = N_V = \sqrt{N_l} \tag{2.22}$$

Yukarıda verilen örnek ifadeler bu çalışmadaki parametrelerin büyüklüklerinin dereceleri hakkında gösterge olmaktadır. Örnek teşkil etmesi amacıyla sığ suda oluşan bir tsunami dalgasının Froude ölçeğine göre elde edilen model değerleri Tablo 2.1'de özetlenmiştir

Tablo 2.1 Örnek olarak prototipteki tsunami dalga parametrelerinin model ölçeğine dönüştürülmesi

	Derinlik (m)	**Dalga Yüksekliği (m)**	**Dalga Periyodu (s)**	**Akım Hızı (m/s)**
Prototip	15	5	1200	6
Model 1/100	0.15	0.05	120	0.6
Model 1/50	0.3	0.1	170	0.85
Model 1/25	0.6	0.2	240	1.2

Tüm deneysel prosedürler ve varsayımlar doğruysa, küçük bir iki boyutlu kanalda Froude ölçeklendirmesi varsayımıyla modeldeki büyüklüklerin doğru mertebeden yeniden üretilememesi ekstra fiziksel durumların üzerinde durulması gerektiğine işaret etmektedir. Bu durumlar aşağıda sıralanmıştır:

Yansıma: Uzun dalgaların modellenmesinde ölçek etkilerinden en önemlilerinden biri yansıma durumudur. Uzun periyotlu dalgalar (kısa periyotlu dalgalara oranla) katı bir cisimle veya bir sınırla karşılaştığında enerjilerini daha fazla yansıtırlar. Bu nedenle, uzun dalga fiziksel modellerinde yansıma daha çok önem arz etmektedir. Yansıyan dalga enerjisinin seviyesi Denklem 2.23'teki Iribarren sayısı (Ir) ve yansıma katsayısı (Cr) kullanılarak tahmin edilebilir. Allsop ve Hettiarachchi (1988)'de Cr için Ir değerine dayalı farklı formlarda ampirik denklemler verilmiştir.

$$Ir = \frac{\tan\phi}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \tag{2.23}$$

Allsop ve Hettiarachchi (1988) farklı deneysel veri setlerini kullanarak Ir'nin artmasıyla yansıma katsayısının (Cr) 1'e yaklaştığını belirtmişlerdir. Geometrik olarak distorsiyonsuz modeller için, modellerde dik eğimli plaj ve yapılardan gerçekleşen yansımalar özel durumlara bağlı olarak prototipteki yansımadan farklılık gösterebilir (Hughes, 1993). Le Mehaute (1976a) pürüzsüz duvarlardan yansıyan dalgaların modelde prototiptekinden daha küçük olma eğiliminde olduğunu belirtmiştir. Çünkü küçük ölçekli modellerdeki yüzeylerde göreceli olarak prototipe göre pürüzlülük daha çok hissedilmektedir.

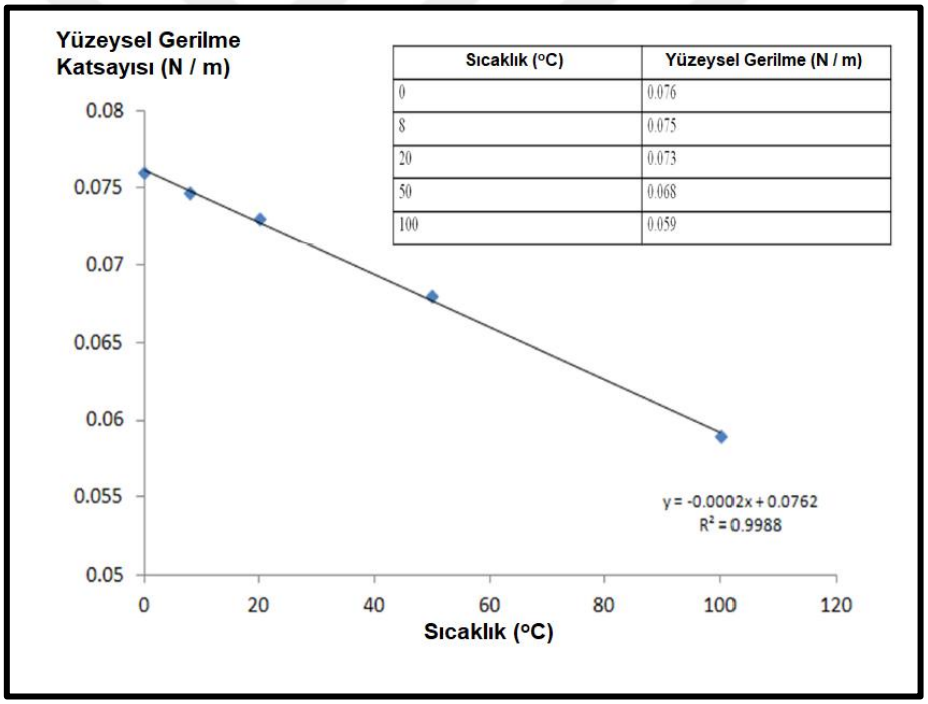
Ölçek Etkileri: Uzun dalga hidrodinamiğinde ölçek etkileri oluşmaktadır. Bu durum ağırlık kuvvetinin atalet kuvvetini dengeleyen baskın fiziksel kuvvet olarak kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Hughes (1993)'e göre viskoz kuvvetlerin fiziksel sürece daha az etkisi olduğuna dair hatalı kabuller yapılmaktadır. Bu nedenle modelde potansiyel ölçek etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Yüzeysel Gerilme (Sönümleme, Dalga Zayıflaması): Uzun dalga modellerinde diğer bir potansiyel ölçek etkisi yüzeysel gerilmedir. Le Meahute (1976b)'e göre çoğunlukla periyodik dalgalar için olmak üzere yüzeysel gerilme dalga hızını etkiler ve dalga sönümlemesine neden olabilmektedir. Bu tez çalışmasında periyodik olmayan dalga üretimi amaçlanmaktadır ve bu nedenle yüzeysel gerilmeden kaynaklı dalga sönümlenmesi önemli bir konu olmamaktadır. Yine de oldukça sığ sulardaki dalgalarda meydana gelen yüzeysel gerilme etkisinin tartışılması gerekmektedir. Hughes (1993) özellikle distorsiyonsuz modellerde su seviyesinin oldukça sığ olduğu durumlarda ($d<0.02$ m) yüzeysel gerilme etkilerine dikkat çekmiştir. Böyle küçük derinliklerde yüzeysel gerilme oldukça önemli olmakta ve modelin karşılaştığı dalga sönümlenme durumu prototipte görülmemektedir. Rossetto vd. (2011) model dalga yüksekliğinin 2 cm'den büyük olduğu veya dalga periyodunun 0.5 s'den büyük olduğu durumlarda yüzeysel gerilme etkisinin genellikle ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Distorsiyonsuz bir modelde dalga yüksekliğinin 10 cm veya daha fazla olduğu durumlarda Stive (1985) ölçek etkisinin dalga kırılması üzerinde oldukça az etkili olduğunu ve hatta mevcut olmadığını belirtmiştir. Ancak yine de uzun dalga modellerinin

çalıştırılması sırasında titiz olunmalı ve yüzeysel gerilme katsayısını ve dolayısıyla ölçek etkisini arttırabilecek su yüzeyinde mevcut bulunan toz, kir ve atıklardan kaçınılmalıdır. Dalga yüksekliğinin veya su derinliğinin yeterince küçük olduğu ve dolayısıyla yüzeysel gerilmenin dalga hızını etkilemeyeceği durumlarda Hughes (1993) dalga grup hızını veren yüzeysel gerilme ve yerçekimi ivmesine bağlı lineer bir ifade vermiştir (Denklem 2.24).

$$c_p^{\,2} = \left(gL/2\pi\right)\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)+\left(\frac{2\pi\sigma_c}{\rho L}\right)\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \tag{2.24}$$

Bu tez çalışmasında mevcut deney koşulları olan oda sıcaklığında 20 °C'de tatlı su için yüzeysel gerilme katsayısı (σ_c) Markov vd. (2008)'in deneysel çalışmalarına dayanarak 0.073 N/m olarak belirlenmiştir (Şekil 2.3). Böylece verilen herhangi bir dalga boyu için yüzeysel gerilmenin hız terimine katkı oranı hesaplanabilmektedir.



Sıcaklık (°C)	Yüzeysel Gerilme (N / m)
0	0.076
8	0.075
20	0.073
50	0.068
100	0.059

Şekil 2.3 Yüzeysel gerilme katsayısı ile su sıcaklığı arasındaki ilişki (Markov vd., 2008)

Viskoz Kuvvetler ve Reynolds Sayısı: Hughes (1993)'e göre Froude kriterleri ile ölçeklendirilmiş uzun dalga hidrodinamiği modellerinde viskoz kuvvetler doğru bir şekilde benzeştirilememektedir. Çünkü model ile prototipteki Reynolds sayıları farklılık göstermektedir. İçsel sürtünme ve suyun viskozitesinden kaynaklı sınır tabakasında meydana gelen sürtünme etkileriyle, özellikle uzun mesafeler kat

ettikçe, uzun dalgalar giderek zayıflamaktadırlar. Reynolds sayısı bir hidrolik akımda atalet ile viskoz kuvvetlerin ilişkisinin bir ölçüsüdür. Bu nedenle de viskoz kuvvetlerden kaynaklı ölçek etkisinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Froude benzeşim kriterlerine benzer şekilde Reynolds benzeşimi de model ile prototipteki Reynolds sayısının aynı olması ilkesine dayanmaktadır ($Re_p = Re_m$). Reynolds benzeşim modelleri viskoz kuvvetlerin hâkim olduğu akımların modellenmesinde kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmadaki modellerde viskoz kuvvetlerin etkisi daha az olduğundan Reynolds modelinin kullanımı uygun değildir. Yine de modeldeki viskoz kuvvetlerin prototiptekiyle kıyasla ne ölçüde önemli olup olmadığını incelemek için deneylerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Aksi halde ölçek etkisi dikkate alınmalıdır. Reynolds benzeşim kriterleri Denklem 2.25 ile 2.26'da verilmiştir. Burada Reynolds sayısı ifadesindeki V hızını Denklem 2.17 ile hesaplanmaktadır.

$$N_{\mathrm{Re}} = \frac{\mathrm{Re}_m}{\mathrm{Re}_p} = \frac{N_V N_l N_\rho}{N_\mu} = 1 \tag{2.25}$$

$$N_{\mathrm{Re}} = \frac{\mu_p \rho_m d_m \sqrt{d_m + a_m}}{\mu_m \rho_p d_p \sqrt{d_p + a_p}} \tag{2.26}$$

20 ^{o}C deniz suyu için (tuzluluk miktarının 35 g/kg olarak kabul edilerek) dinamik viskozite (μ) 0.00108 Pa.s'dir ve 24 ^{o}C tatlı su için ise dinamik viskozite (μ) 0.0009096 Pa.s'dir (Lide, 2004). Denklem 2.12'den model için Reynolds sayısı yaklaşık olarak 13000 olarak elde edilmiştir ve modeldeki Reynolds sayısının prototiptekine oranı 0.003 olarak hesaplanmaktadır (Denklem 2.26). Bu nedenle deneylerdeki viskoz kuvvetler önemli olmasına karşın prototipteki viskoz kuvvetleri temsil etmemektedir. Prototipteki hız ve derinlik laboratuvardaki modelle pratik olarak bire bir örtüşemeyeceğinden laboratuvar dalgaları ile gerçek dalgalar arasındaki bu fark beklenen bir durum olmaktadır. Mevcut deney sisteminde dalgaların kat ettiği mesafe dalga boylarına oranla küçük olduğu için dalga zayıflaması/sönümlenmesi ihmal edilmiştir. Dalga zayıflamasına sahip fiziksel modellerde başlangıç dalga yükseklikleri verileri üzerinde dalga zayıflaması etkisini azaltmak için dalga yükseklikleri verilerini düzeltmek veya kalibre etmek mümkün olmaktadır. Dolayısıyla kıyıya yaklaşan veya akarsuya giren dalgalar doğru bir şekilde prototipteki şartlara göre ölçeklendirilebilmektedir.

Özgül Kütle Etkisi: Suyun özgül kütlesine bağlı herhangi bir parametre kullanıldığı zaman özgül kütle ölçek etkisi dikkate alınmalıdır. Bu tarz parametrelere dalga momentumu, potansiyel enerji ve farklı kuvvet bileşenleri örnek verilebilmektedir. Ölçekli model deneyleri genelde tatlı su kullanılarak yapılmaktadır. Prototipte koşullar tuzlu su ise arada %3'lük bir özgül kütle farkı bulunmaktadır. Yukarıda bahsedildiği üzere Froude modelinde bu fark ihmal edilmektedir ($N\rho \sim 1$). Fakat bu durum prototipteki ilgilenilen dalga parametrelerini etkilemektedir (Le Mehaute, 1976b).

2.2.3 Dalga Koşulları

Tsunami gibi uzun dalga üreten deney sistemlerinde bugüne kadar çoğunlukla soliter dalga benzeşimi gerçekleştirilmiştir (Goring, 1978; Seelam ve Baldock, 2011; Synolakis, 1986; Hammack ve Segur, 1978). Bu araştırmalarda yapılan deneylerde başlangıç yüzey deplasmanının soliter dalgaya dönüştüğü gözlemlenmiştir. Madsen vd. (2008) "soliter dalga paradigma"sının artık tsunami dalga yaklaşımında benzersiz şekilde uygulanamayacağını ve tsunami dalgasının laboratuvar ortamında ölçeklendirilmesi istenildiğinde jeofiziksel ölçeklerle uyuşmazlık gösterdiğini açıklamışlardır. Soliter dalga uygulandığında zamansal ve uzamsal boyutta hatalar meydana gelmekte ve bu etki dalga kıyı ile etkileşim halinde ise daha da büyük oranlarda oluşmaktadır. Fakat aynı zamanda Madsen vd. (2008) yüksek oranda lineer olmama durumunun soliter dalgaların akarsu ağzı gibi sığ su bölgelerine girdiğinde oluşabileceğini bu sebeple bu tarz bölgelerde soliter dalga benzeşiminin çok da hatalı olmadığını belirtmişlerdir. Ancak yine de birçok araştırmada (Rossetto vd., 2011; Goseberg vd., 2013; Schimmels vd., 2014; Mc Govern vd., 2018; Chandler vd., 2021) N-dalga benzeşiminin gerçeği daha fazla yansıttığı belirtilmiştir. Tadepalli ve Synolakis (1994), çukur gelişli N-dalga veya tepe gelişli N-dalga fikrini ilk olarak ortaya koyan araştırmacılardır. Literatürde ve doğada en çok rastlanan ise çukur gelişli N-dalgalardır. Birçok tsunami olayında kıyıda ilk olarak geri çekilme daha sonra tepe gelişi gözlemlenmektedir.

2.2.3.1 Üretilen Dalga Türleri

Literatürde, yayılan uzun dalgaların davranışı hakkında bilgi toplamayı amaçlayan fiziksel modeller genellikle soliter dalgaların üretilmesini içermektedir. Laboratuvar ortamında hareketli palet sistemi ile soliter dalgaların üretilmesi

genellikle teorik dalga profili hesaplarıyla uyumlu olduğu için tercih edilebilmektedir (Hughes, 1993). Dalga üreteci denklemleri (paletin yer değiştirmesi ile dalga parametreleri arasındaki ilişkiyi veren) literatürde kabul gören ve oldukça kullanılan denklemlerdir. Soliter dalgaların üretilmesi için başka metotlar da bulunmaktadır. Hammack (1972) tsunami genliklerinin üretim bölgesindeki değerleriyle ilgili görüş edinmek amacıyla iki boyutlu deney sistemi tasarlamıştır. Bu sistemde dalgalar, kanalın uç kesitinde tabanın düşürülmesi veya yükseltilmesi şeklinde üretilmektedir. Böylece depremde oluşan tsunami dalgası fiziksel olarak benzeştirilmeye çalışılmaktadır. Bu deney sisteminde dispersif dalgalar üretilebilmiştir. Bukreev (1999) soliter dalgaları farklı bir yöntem kullanarak üretmiştir. Bu yöntem kanalda bir engelin yerleştirilip kaldırılması, bir panelin yatay yer değiştirmesi ve kanal boyunca batık bir cismin hareket ettirilmesi şeklinde farklı fiziksel hareketlerin kombinasyonu şeklinde gerçekleştirilmiştir. Fakat bu sistemde prototipteki dalganın modellenmesinde problemlerle karşılaşılmış ve limitli genlik değerleri elde edilmiştir. Literatürde bu durum serbest soliter dalga problemi olarak adlandırılmaktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre $0.2<a/d<0.6$ aralığındaki serbest soliter dalgalar doğal yöntemlerle laboratuvar ortamında üretilemezler. Bu aralıktaki değerler dalga paletinde olduğu gibi ekstra kuvvetler etkisinde üretilebilmektedir. Tsunami gibi uzun dalgalar bore şeklinde fiziksel olarak modellenebilmektedir. Bore, dalgaların açık denizde kırıldıktan sonra kıyıya yaklaşırken aldıkları form olarak nitelendirilmektedir (Yeh, 1991).

Stabil N-dalgaların laboratuvar ortamında üretilmesi oldukça zor olmaktadır. Özellikle sadece negatif genlikli (çukur) dalgaların veya çukur gelişli dalgaların üretilmesi hakkında literatürde oldukça kısıtlı çalışma mevcuttur. Miles (1980) sabit derinlikteki dalga kanalından belirli miktarda suyun dalga tankına çekilerek stabil bir N-dalga çukurunun üretebildiği bir sistem geliştirmiştir. Fakat bu sistemde dalga katarı oldukça fazla salınıma sahip olup kolayca dispersif forma dönüşebilmektedir. Kobayashi ve Lawrence (2004) kıyıdaki katı madde hareketi çalışmalarında bir soliter dalganın kutupsallık (negatif genlikli dalga ile pozitif genlikli dalganın birbiri ile etkileşimi) etkisini incelemiştir. Bunun için klasik düşey palet dalga üretecini tersi yönde kullanarak negatif genlikli soliter dalga üretmişlerdir. Ancak negatif genlikli soliter dalgaların, pozitif genlikli soliter dalgalara göre, yayılırken hızlıca form değiştirip yapılarının bozulduğu

görülmüştür. Laboratuvar ortamında göreceli olarak sadece kısa periyotlu dalgalar üretilebilmesi ve bu konudaki bilgi eksikliği sebebiyle N-dalgaların laboratuvar ortamında kolayca üretilemediğini anlaşılmaktadır (Charvet, 2012).

2.2.3.2 Dalga Periyotları ve Genlikleri

Bugüne kadar üretilen deneysel soliter dalgalar göreceli olarak kısa periyotlara sahiptirler: Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde dalga kanalında ortalama 4 s periyotlara sahip (Goring, 1978), Oregon Üniversitesi'nde (Cox, 2007a; Cox, 2007b) ve Japonya'daki büyük Hydro-Geo dalga kanalında (Shimosako vd., 2002) maksimum 10 s periyotlara sahip dalgalar üretilebilmiştir. Bu durum genellikle dalga paletlerinin strok limitlerinden kaynaklanmaktadır. Hammack (1972), Goring (1978) ve Synolakis (1986) özel olarak palet strok limitlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak maksimum dalga genliğinin paletin strok limitine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle, Briggs vd. (1995) boyutsuz dalga yüksekliğinin en iyi durumda 0.20 civarında elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Oregon Üniversitesi'nde bulunan tsunami dalga baseninde 1 m su derinliğinde 0.8 m yükseklikte dalgalar üretilebilmektedir. Bu sistemde 29 piston tipi dalga paleti bulunmaktadır ve her bir dalga paleti 2.1 m strok limitine sahiptir. Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Hidrodinamik Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan dalga baseninde ise, 0.45 m strok limitine sahip 48 adet piston tipi palet bulunmaktadır. Bu limitlerde 0.75 m su derinliğinde maksimum 0.21 m genliği sahip dalgalar üretilebilmektedir.

2.2.3.3 Deneysel Ölçek

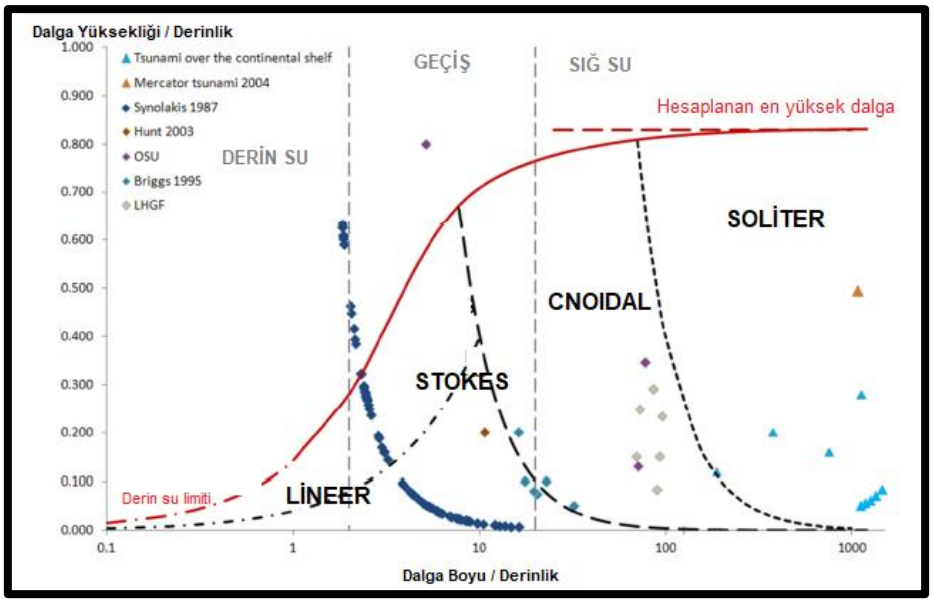
Soliter dalgalar farklı boyutlardaki dalga kanallarında (Synolakis, 1986; Bukreev, 1999) ve aynı zamanda üç boyutlu dalga basenlerinde (Briggs vd., 1995; Borthwick vd., 2006) çalışılmaktadır. Uzun dalgaların modellenmesi amaçlandığında basenin ya da kanalın yeterince büyük olması ($L/d>>1$) ve viskoz etkilerin hissedilmemesi için yeterince derin olması gerekmektedir. Doğal olarak laboratuvar ortamında kilometrelerce uzunlukta ve birkaç metre yükseklikte dalga üretilemeyeceğinden modeldeki dalganın küçük olması gerekmektedir. Ancak dalganın davranışını etkileyen kapiler ve sürtünme etkilerini hissedecek kadar da küçük olmamalıdır. Bu duruma örnek olarak Thusyanthan ve Madabhushi (2008) ve Bukreev (1999) çalışmaları verilebilir (Tablo 2.2).

Büyük ölçekli laboratuvar deneylerinde bile gerçekteki fiziksel davranışı veya olayı küçültülmüş bir ölçekte modellemek ölçek etkilerinden dolayı bazı zorluklar içerebilmektedir. Oregon Üniversitesi'nde bulunan Dalga Araştırma Merkezi'nde (Yim vd., 2004) büyük ölçekli tsunami araştırma tesisi kurulmuştur. Bu tesiste dalga kırılması, türbülans, dalga-yapı etkileşimi, tırmanma, tsunami hızları ve tsunami kaynaklı erozyonların incelenmesi amaçlanmıştır. Bu tesis halen gelişme aşamasındadır.

Tablo 2.2'de sunulan deneyler, bu tez çalışmasının kapsamı için yeterli değildir; yalnızca soliter dalga üretimi ve bore yapısının oluşumuna ilişkin mevcut ve test edilmiş yöntemlere dair kısa bir özet niteliğindedir. Şekil 2.4, gerçekleştirilen bazı deneyleri ve bu deneylerde elde edilen koşulların ait olduğu dalga teorilerini göstermektedir. Görüldüğü üzere, birçok deney geçiş derinliği ve sığ su koşullarında yapılmıştır; sığ su deneyleri ise ağırlıklı olarak cnoidal dalga teorisi kapsamında değerlendirilmiştir. Kıyı bölgesinde sığ su koşullarında incelenen tsunami dalgalarının parametreleri, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi soliter dalga sınıfına girmektedir (örneğin, 2004 Hint Okyanusu tsunamisinden elde edilen kayıtlar). Saha ölçümlerine dayalı olarak incelenen tsunami dalgalarının, laboratuvar ortamında oluşturulanlara kıyasla daha uzun dalga periyoduna ve daha yüksek dalga boyuna sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Literatürde, akarsuya nüfuz eden tsunamilerde N-dalga formunun deneysel olarak incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Sınırlı sayıdaki çalışmalar (Yasuda, 2010; Wuppukondur ve Baldock, 2022) ise soliter dalgaların düz kanallardaki değişimini araştırmıştır. Bu çalışmalar fiziksel ve hidrodinamik açıdan değerli olmakla birlikte, dalga çukuru etkisini kapsamamaktadır. Öte yandan, 2004 Hint Okyanusu ve 2011 Japonya tsunamilerinden sonra yapılan saha ölçümleri, teorik ve sayısal modellerin doğrulanmasına önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmalar bir sonraki bölümde detaylandırılmıştır.

Tablo 2.2 Literatürdeki çalışmalara ait laboratuvar koşullarındaki tsunami dalga üreteçleri ve dalga koşullarına ait örnekler (Charvet, 2012)

Çalışma	Laboratuvar	Kanal/ Basen Boyutu	Dalga Üreteci	Strok Limiti	Eğim	a/d, T
Hammack (1972)	Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü	31.73 m x 0.39 m x 0.61 m	Kanalın uç kısmını düşey hareket ettirme	0.18 m	0º	a/d: Bilgi Yok T: Bilgi Yok
Goring (1978)	Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü	31.73 m x 0.39 m x 0.61 m	Düşey Palet	2.44 m	5.95º, 2.9º, 1.98º	a/d=0.1 T=4.3 s
Synolakis (1986)	Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü	31.73 m x 0.39 m x 0.61 m	Düşey Palet	2.44 m	2.88º	0.03< a/d<0.6 T: Bilgi Yok
Briggs vd. (1995)	Amerika Birleşik Devletleri Ordusu Mühendisler Birliği	27 m x 30 m x 0.6 m	Düşey Palet (60)	0.305 m	14º	0.05<a/d<0.2 3.4 s< T<8 s
Bukreev (1999)	Lavrentev Hidrodinamik Enstitüsü	7.3 m x 0.2 m	Engel blok, Palet, Batık cisim	Bilgi Yok	0º	0.05< a/d<0.2 T: Bilgi Yok
Yim vd. (2004)	Oregon Hinsdale Dalga Araştırma Laboratuvarı	Basen: 48.8 m x 26.5 m x 2 m Kanal: 106 m x 3.7 m x 4.7 m	Basen: Palet (29) Kanal: Mafsallı kanat palet	Basen: 2 m Kanal: 0.8 m	Çeşitli	Basen: a/d=0.8 0.5 s< T<10 s Kanal: a/d =0.4 0.5 s< T<10 s
Hunt (2003)	Plymouth Üniversitesi	72 m x 27 m	Palet (72)	Bilgi Yok	2.86º	a/d=0.2 T: Bilgi Yok
Thusyanthan ve Madabhushi (2008)	Schofield Merkezi	4.5 m x 1.5 m x 1 m	100 kg blok bırakma	Bilgi Yok	15º	a/d=0.2 T=1.5 s



Şekil 2.4 Literatürdeki çalışmaların ve örnek tsunamilerin dalga sınıflandırması (Charvet, 2012)

2.3 Tsunamilerin Akarsular Üzerinde Etkileri

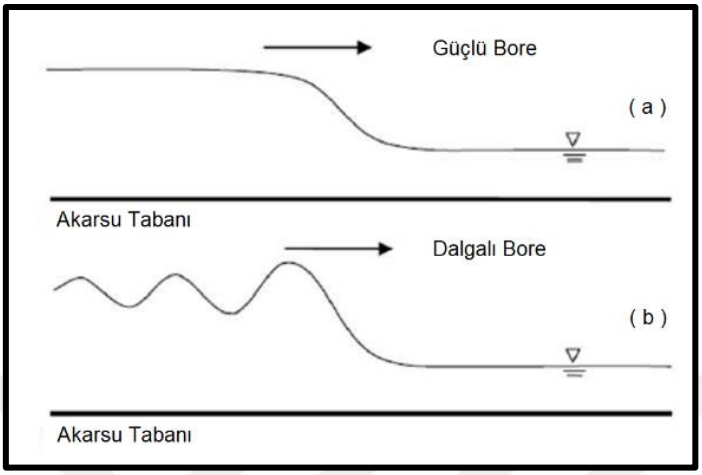
Tsunami dalgasının açık denizdeki davranışı ile akarsu ağzından girdikten sonraki davranışı önemli farklılıklar göstermektedir. Tsunami dalgaları karada ilerlerken pürüzlü tabandan dolayı oluşan sürtünme etkisinin yanında bina, araç ve benzeri birçok yapının oluşturduğu engelden dolayı dalga enerjisi azalmaktadır. Buna karşı tsunamiler nehir ağzından giriş yaptıklarında bu engellerin sayısı daha az olmakla beraber kara alanlarına kıyasla daha pürüzsüz bir ortamla karşılaştıkları için daha uzun mesafeleri daha hızlı bir şekilde katetebilmektedirler. Ortalama dalga hızı 5 m/s'leri bulabilirken, katettikleri mesafeler de 100 km mertebelerine ulaşabilmektedir (Abe, 1986; Tsuji vd., 1991; Yasuda, 2010; Tanaka vd., 2012; Tanaka ve Tinh, 2012; Wuppukondur, 2021; Wuppukondur ve Baldock, 2020, 2022). Bu nedenle yüksek hızlı tsunami dalgaları, nehir boyunca hidrolik yapılar üzerinde de ciddi bir etkiye sahip olmaktadır. Sonuç olarak kıyıda meydana gelen tsunamilere göre daha geniş bir alanı etkileyip daha büyük hasara neden olabilmektedirler.

Tsunami dalgası akarsu ağzından içeri girdikten sonra, ilerleyen dalganın ön cephesindeki akım çizgileri eğrisel bir biçim alır ve dalga dışbükey (konveks) bir yapı kazanır. Başka bir ifadeyle, derinlik boyunca akım çizgileri paralelliğini yitirir ve düşey yönde ivmelenme etkisi belirgin hale gelir. Bu durum, akım alanındaki

hidrostatik basınç varsayımının geçerliliğini yitirerek, hidrostatik olmayan etkilerin baskın hale gelmesine neden olur ve tsunami dalgası farklı bir hidrodinamik forma dönüşür. Böylece, dalganın akarsu ortamındaki davranışı, açık deniz koşullarına kıyasla farklı fiziksel süreçlerle tanımlanır ve bu nedenle analizlerde farklı kabul ve yaklaşımlar gerektirir (Tsuji vd., 1991; Tanaka vd., 2008; Yasuda, 2010; Tolkova vd., 2015). Özellikle büyük tsunami dalgalarının, küçük akarsu sistemleri üzerinde yarattığı etki çok daha çarpıcı bir şekilde gözlemlenmektedir (Abe, 1986). Yapılan sayısal ve fiziksel modelleme çalışmaları, tsunami dalgasının akarsu boyunca büyük taşkınlara yol açabileceğini; bunun da akarsuyun geometrik (giriş ağzının formu, kesit genişliği, taban eğimi, akım yönündeki değişimler vb.), morfolojik (taban yapısı, pürüzlülük vb.) ve hidrolik (debi, akım hızı vb.) özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur (Abe, 1986; Tsuji vd., 1991; Tanaka vd., 2014; Tanaka vd., 2020). Araştırmalar, tsunami sonucu oluşan taşkınların, akarsu ağızları ve mansap kesimlerine yakın konumlanan bölgelerde daha şiddetli etkiler yarattığını göstermektedir (Viana-Baptista vd., 2006; Wuppukondur ve Baldock, 2022).

Tsunami dalgalarının akarsu ağızlarından membaya doğru ilerlemesi sırasında, ortamın değişen hidrodinamik koşulları dalganın geometrik yapısını ve yayılım dinamiklerini belirgin şekilde etkilemekte, bu da dalga formunda ve yayılma karakteristiğinde ciddi farklılıklar ortaya çıkarmaktadır. Tsunami dalgaları (gelgit dalgaları gibi) uzun dalga sınıfında yer almaktadır. Uzun dalgalar, sığ su şartlarında yayıldıklarında dikleşerek bore olarak tanımlanan su yüzü formuna dönüşmektedir. Bore oluşumu değişik mekanizmalar ile meydana gelebilmektedir. Örnek olarak bir kanal akımı üzerinde mevcut olan düşey bir kapağın ani olarak açılıp kapanması, kanal boyunca ilerleyen uzun bir su dalgasının bir engelle karşılaşması, bir gelgit veya tsunami dalgasının akarsu/kanal ağzından girip membaya doğru ilerlemesi gibi pek çok etki kanal/akarsu sistemlerinde bore dalgalarının oluşmasına neden olabilmektedirler. Bore mekanizması durgun bir suya belirli bir debide su girişi yaratılarak oluşabileceği gibi, akıma ters yönde bir su girişi yaratılarak da meydana gelebilmektedir (Treske, 1994). Kısaca bore farklı derinliklere sahip iki üniform serbest yüzey akımı arasındaki su yüzü profili davranışı olarak da tarif edilebilmektedir. Bu nedenle, fiziksel açıdan tsunami dalgasının akarsuya giriş süreci hidrolik sıçramaya benzerlik göstermektedir. Tsuji vd. (1991), tsunami

dalgasının akarsuya girmesiyle birlikte bazı durumlarda dalga katarı şeklinde ardışık dalgalı boreların oluştuğunu, bazı durumlarda ise dalga katarı oluşmaksızın doğrudan güçlü bore (türbülanslı bore olarak da adlandırılmaktadır) yapısının meydana geldiğini belirtmişlerdir. (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 (a) Güçlü ve (b) dalgalı bore şematik gösterimi (Tsuji vd., 1991)

Sığ su koşullarında iki tip bore davranışı gözlenmektedir. Bunlar, "Güçlü bore" ve "Dalgalı bore" olarak adlandırılmaktadır (Pelinovsky vd., 2015).

Dalga parametrelerine bağlı olarak bore tipini belirlemek amacıyla çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, pozitif dalga genliğinin (a^+) başlangıçtaki su derinliğine (d) oranı, yani $\alpha=a^+/d$, bore tipi sınıflandırmasında temel bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. Favre (1935), gerçekleştirdiği deneyler sonucunda bu orana bağlı kritik bir sınır değeri tanımlamış ve bu değeri 'Bore Gücü' olarak adlandırmıştır.

Deneylerine göre:

- $\alpha<0.28$ olduğunda dalgalı bore formu gözlemlenmektedir.
- α değeri 0.28 ile 0.75 arasında olduğunda, geçiş tipi bore oluşur; bu durumda hem ardışık dalgalar hem de en az bir kırılan dalga gözlemlenir.
- $\alpha>0.75$ olduğunda ise yalnızca tek kırılan dalgadan oluşan güçlü bore formu meydana gelmektedir.

Daha sonra yapılan teorik çalışmalar, bu kritik sınırın farklı değerlerde olabileceğini öne sürmüştür. Örneğin, Bjørkavåg ve Kalisch (2011) çalışmasında $\alpha=0.379$, Brun ve Kalisch (2018) çalışmasında ise $\alpha=0.353$ olarak belirlenmiştir. Ancak bu iki çalışma deneysel verilere değil, matematiksel modellere dayanmaktadır.

Literatürde, tsunamilerin akarsular üzerindeki etkilerine ilişkin gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki saha ölçüm çalışmaları aşağıda özetlenmektedir. 2011 yılında meydana gelen Büyük Tohoku tsunamisinde, tsunami dalgalarının Japonya'daki Kitakami Nehri'nin mansabına doğru yaklaşık 49 km ilerlediği gözlemlenmiştir. Bir tsunami dalgası akarsu ağzına ulaştığında mevcut akım koşullarıyla etkileşerek dalga cephesi 'dalgalı bore' formuna dönüşmektedir (Yasuda, 2010) (Şekil 2.6). Bore karakteristikleri; akarsu ağzının morfolojisi, taban eğimi, akarsu debisi ve gelgit seviyesi gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Wilson ve Power, 2020). Tsuji vd. (1991), dalga yüksekliğinin su derinliğine oranı 0.6'dan küçük olduğunda dalgalı bore, bu oranın 1'e yaklaşması durumunda ise güçlü bore formunun ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Bu bulgular, Favre'in (1935) bore için belirlediği kritik eşik değerlerle uyumludur (Pelinovsky vd., 2015; Silva ve Peregrine, 1990). Ancak çalışmalar arasındaki temel fark, Pelinovsky vd. (2015)'in gelgit kaynaklı bore yayılımını tsunami benzeri bir yaklaşımla modellemiş olması, Tsuji vd. (1991)'in ise gerçek tsunami gözlemlerine dayalı analizler yapmış olmasıdır.



Şekil 2.6 (a) 1983 Japonya depreminde tsunami sonrası Noshiro Limanı'nda küçük bir kanalda gözlenen dalgalı bore oluşumu (Tsuji vd., 1991), (b) ve (c) Fukushima 2011 depreminde oluşan tsunami dalgalarının Sunaoshi Nehri'nde dalgalı bore olarak ilerlemesi (Miyagi Prefektörlüğü Polisi Hava Fotoğrafı)

Çoğunlukla Japonya olmak üzere Dünya'nın farklı bölgelerinde ve güncel olarak 2020 İzmir Depremi sebebiyle oluşan tsunami dalgalarının akarsu boyunca ilerleme mesafeleri Tablo 2.3'te listelenmiştir. 2020 İzmir tsunamisine ait veriler Yüksel vd. (2020)'in yapmış oldukları çalışmadan elde edilmiştir. 11 Mart 2011'de Japonya depremiyle oluşan tsunami dalgasının akarsu duvarını aşarak Miyako şehrine ilerlemesi Şekil 2.7a'da gösterilmektedir. 2004 Hint Okyanusu tsunamisinden sonra gerçekleştirilen saha araştırmaları, Hindistan'daki Vellar nehir ağzında dalga yüksekliklerinin 3 ile 6 m arasında değiştiğini ortaya koymuştur. Yüksek enerjili

dalgalar nedeniyle ağız ve akarsu kıvrımlarındaki kum yığınları aşınmış ve enine genişlemiştir (Pari vd., 2008). 2011 Tohoku tsunamisinden sonra yapılan benzer saha araştırmalarında 9 m'lere ulaşan dalga yüksekliği ve 7.5 m/s'lere ulaşan akım hızları rapor edilmiştir (Tanaka ve Tinh, 2012). Dalga yüksekliklerinin akarsu ağzından uzaklaştıkça her kilometrede 1 m olacak şekilde doğrusal olarak azalacağı tahmin edilmiştir (Adityawan vd., 2006). Abe (1986), bore yüksekliklerinin maksimum yüksekliğe kadar lineer olarak arttığını ve sonrasında bazı durumlarda üssel olarak azaldığını yorumlamıştır. Yüksek eğimlerde yayılma mesafesinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Geçmiş tsunami olaylarında periyotları 10 dakika ile 80 dakika arasında değişen 3 ile 11 ardışık tsunami dalgası gözlemlenmiştir (Abe 1986; Yasuda 2010; Wuppukondur, 2021).

Tablo 2.3 Tsunamilerde gözlenen akarsularda yayılma mesafeleri (Wuppukondur, 2021)

Tsunami	Akarsu	Yayılma Mesafesi (km)
1933 Showa	Kensen, Japonya	1.3
1960 Şili	Kensen, Japonya	3
1964 Alaska	Kolombiya, ABD	170
1983 Nihonkai-Chubu	Yoneshiro, Japonya	11.4
	Omono, Japonya	6.6
	Agano, Japonya	14
	Shinano, Japonya	8.5
2004 Hint Okyanusu	Vellar, Hindistan	2.7
2010 Şili	Kitakami, Japonya	33
	Maule, Şili	15
2011 Tohoku	Kitakami, Japonya	49
	Kensen, Japonya	8.1
	Kolombiya, ABD	106
2020 İzmir (Yüksel vd., 2020)	Zeytineli, Türkiye	1
	Alaçatı Azmağı, Türkiye	2.5



Şekil 2.7 (a) 2011 Tohoku Depremi ile oluşan tsunami dalgasının akarsu duvarını aşarak Miyako şehrine ilerlemesi (Wuppukondur, 2021), (b) ve (c) Bu depremden kaynaklı tsunamiye ait Kuzey Kaliforniya'da bulunan Mad Nehri'nin ağzından itibaren 1.5 km mesafedeki tsunami dalgası (Tolkova, 2018)

2011 yılında meydana gelen Tohoku tsunamisi, Kuzey Kaliforniya'nın Humboldt ilçesinde yer alan Mad Nehri'nde tsunami yayılımına neden olmuştur. Bu olay, birkaç görgü tanığı tarafından gözlemlenmiş ve video kayıtlarıyla belgelenmiştir.

Görgü tanıklarından birine göre, tsunami olayının ardından yaklaşık 90 dakikalık bir süre içerisinde akarsuya dört ayrı tsunami dalgası girmiştir. Şekil 2.7a ve 2.7b'de, akarsu ağzından yaklaşık 1.5 km uzaklıkta gözlemlenen dördüncü ve en büyük tsunami dalgası yer almaktadır. Bu dalga, su seviyesinde ani bir yükselme şeklinde ortaya çıkmış ve akarsuyun membasına doğru yayılan bir bore formuna dönüşmüştür. Görüntülerdeki dört dalganın tamamı bore formunda yayılım göstermiştir; ancak her biri farklı tipte bore karakteristiği sergilemiştir.

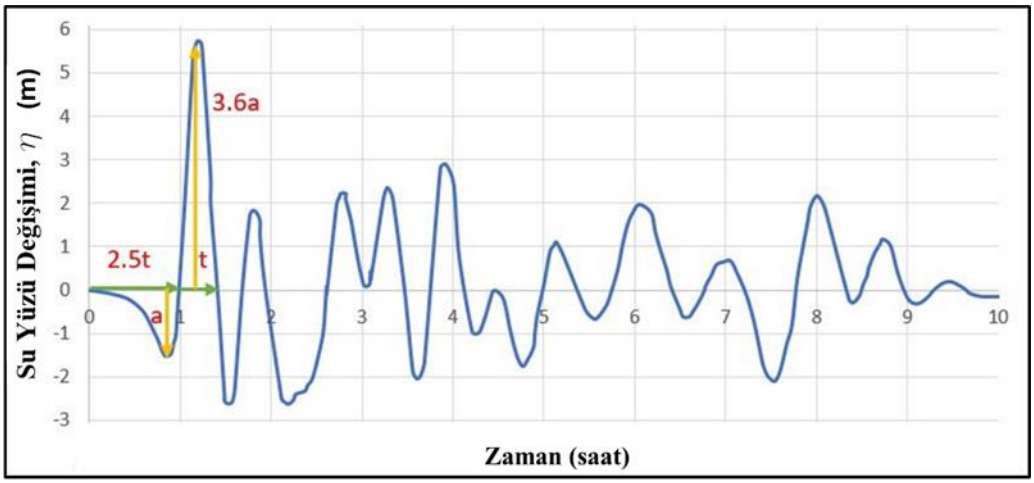
İlk dalga, türbülanslı bir cepheyle karakterize edilen güçlü bore formundadır. İkinci ve daha küçük olan dalga ise net ve pürüzsüz bir cepheyle ilerleyen dalgalı bore formunda yayılmıştır. Üçüncü dalganın, görgü tanıklarının tahminlerine göre, yüksekliği yaklaşık 0.6–0.9 m arasında olup dalgalı bore formu sergilediği belirtilmiştir. Bu dalgaların ilerlemesi sırasında akarsu kıyılarında belirgin türbülanslı çevri hareketleri gözlemlenmiştir. Güçlü bore dalgalarının akarsu boyunca yayılırken yapılarını büyük ölçüde koruyabildikleri ifade edilmiştir. Bazen dalgalı bore formlarının akarsu boyunca bozulduğu gözlemlenmiş olsa da güçlü bore dalgaları, kanal geometrisindeki değişikliklere veya rastlantısal engellere rağmen daha düz ve kompakt bir formda yayılma eğilimindedir. Bu özgün dalga formu ilk kez 2011 Tohoku tsunamisi sırasında Japonya'nın Kitakami Nehri'nde belgelenmiştir.

Tsunami dalgası, nehir ağzından 17.2 km uzaklıkta bulunan bir su bendine ulaştıktan sonra kısmen yansımış, kısmen de bendin üzerinden geçerek ilerlemiştir. Kayıtlara göre, tsunami dalgasının pozitif genliği Fukuchi'de 4.5 m, Iino'da ise 3.4 m olarak ölçülmüştür. Ancak su bendinde bu değer 6 m'ye ulaşmıştır. Dalgalar bu noktada önemli yapısal hasara neden olmuştur. Bendin üzerinden geçen dalgalar, yüksekliğini büyük oranda kaybederek yaklaşık 1 m civarına düşmüş ve bu zayıflamış formda nehir boyunca yaklaşık 49 km kadar ilerlemiştir. (Tolkova, 2018). Bu nedenle, bir akarsudaki tsunami ilerlemesi akarsu boyunca altyapıya ve kıyı şeridinden uzak alanlara zarar verebilmektedir.

Bu çalışmalar kapsamında, tsunami dalgasının akarsularda bore formunda ilerlediği tespit edilmiş ve bu bore formunun özellikle akarsu kıvrımlarındaki hidrodinamik davranışı detaylı biçimde incelenmiştir. Buraya kadar sunulan saha verileri ve literatür çalışmaları doğrultusunda, tsunamilerin akarsular üzerinde oluşturduğu pozitif genlikler ile bore yapılarına ilişkin nitelikler ortaya konmuştur.

Devam eden bölümde ise, literatürde yer alan çalışmalara dayanarak tsunami dalgasının akarsu ağızlarındaki karakteristik özellikleri ve akarsu derinlikleri ile ilişkileri ele alınacaktır. Tanaka vd. (2012)'nin gerçekleştirdiği saha ölçümlerine ve yukarıda anlatılan tüm araştırmaların genel sonuçlarına göre, akarsularda kararlı akım derinliğinin tsunami dalgasının gelmesinden önce ortalama 3-4 m arasında değiştiği gözlenmiştir (farklı iklim ve bölge koşullarına göre bu değerler değişiklik göstermektedir). Tsunami dalgası akarsu ağzına veya haliçe ulaştığında bore olarak akarsu içinde yayılmakta ve dalga yüksekliği artmaktadır. Gerçekleştirilen ölçümlerde ortalama olarak, akım derinliği ve bore dalgasının yüksekliğinin toplamı 6 m civarında olduğu gözlenmiştir (Tanaka vd., 2012; Wuppukondur ve Baldock 2022).

Tolkova vd. (2015), sayısal bir model kullanarak tsunami dalgasının akarsu içerisine girişinden itibaren ilerleyişine ilişkin dalga değişimlerini kuramsal olarak ortaya koymuşlardır. Akarsu ağızlarında su seviyesi verilerinin oldukça sınırlı olması nedeniyle, bu çalışma tsunamilerin akarsu ortamındaki davranışlarının anlaşılması açısından önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca, bu tez kapsamında deneysel olarak modellenen tsunami dalga profillerinin belirlenmesinde de referans teşkil etmektedir. Çalışmada, taban sürtünme etkisinin dikkate alındığı bir boyutlu, doğrusal olmayan sığ su denklemlerine dayalı bir model kullanılmıştır. Geliştirilen kuramsal model sonucunda elde edilen tsunami dalgasının zamana bağlı profil değişimleri, Manning taban pürüzlülük değerinin "n=0" olduğu ideal koşul için Şekil 2.8'de sunulmuştur. Bu profil, çeşitli akarsulardaki ölçüm verilerinin oransal olarak karşılaştırılmasıyla ve ekstrem bir tsunami senaryosu altında akarsuda mevcut bir akım koşulu varsayılarak elde edilmiştir. Şekil 2.8'de yer alan ilk tsunami dalgası profili (t=0–1.4 saat aralığı) incelendiğinde, öncü dalganın beklendiği üzere önce bir çekilme (dalga çukuru), ardından bir tepe oluşturduğu ve bu sayede tipik bir N-dalga formunun meydana geldiği görülmektedir. Dalga çukurunun periyodunun, onu takip eden dalga tepesinin periyodunun yaklaşık 2.5 katı olduğu; ayrıca dalga pozitif genliğinin, negatif genliğe oranının 3.6 olduğu belirlenmiştir. Bu oranlar, literatürde yer alan saha ölçümleriyle karşılaştırıldığında tutarlılık göstermektedir. Dolayısıyla, bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde tsunami dalga profilleri oluşturulurken söz konusu oranlar dikkate alınmıştır.



Şekil 2.8 Pürüzsüz taban için (n=0) akarsu ağzında meydana gelen kuramsal tsunami zaman serisi (Tolkava vd., 2015'ten sayısallaştırılarak elde edilmiştir)

2.4 Kıvrımlı Kanalda Kararlı Akım Mekanizması

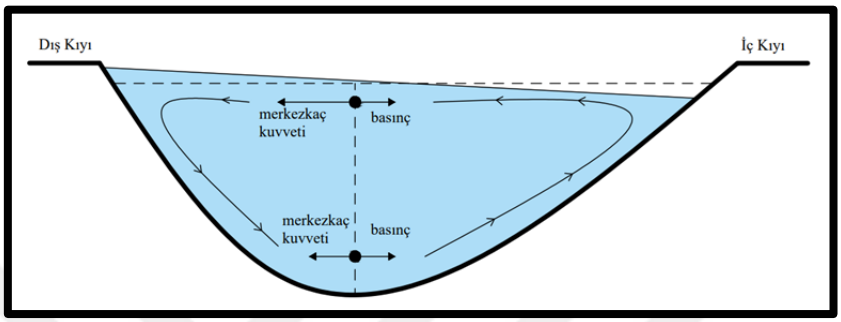
Bu tez çalışmasında tsunami dalgasının kıvrımlı bir kanalda ilerlemesi incelenmektedir. Bu kapsamda, yalnızca tsunami dalgasının fiziksel davranışının anlaşılması değil, aynı zamanda kıvrımlı kanalda oluşan kararlı akım mekanizmasının da detaylı bir şekilde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Çünkü, tsunaminin etki ettiği bir akarsu veya kanal ortamında, akım koşulları sabit durgun su seviyesinde (statik durumda) olabileceği gibi, mevsimsel etkiler nedeniyle membadan mansaba doğru ilerleyen bir kararlı akım da mevcut olabilir. Dolayısıyla, kanal içi akım yapısının karakteristiklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, tsunami-akım etkileşiminin analizinde temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu bölümde kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizması özetlenmektedir.

Bir akarsuda uzun sürede meydana gelen iç ve dış kıyılardaki birikme ve aşınma sonucu (katı madde hareketi) kıvrımlı akarsu oluşumu gerçekleşmektedir. Akarsu uzunluğunun vadi uzunluğuna oranı 1.5'ten büyükse kıvrımlı (mendereslenen) akarsu olarak kabul edilmektedir (Leopold ve Wolman, 1957). Akarsu kıvrımlarındaki akım davranışı uzun zamandan beri araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Akarsu kıvrımlarında akım karakteristikleri doğrusal kanallara göre oldukça karmaşıktır. Araştırmacılar bu karmaşık akımı anlamak için çok sayıda deneysel çalışma gerçekleştirmiştir (Rozovskii, 1957; de Vriend, 1977; Engelund, 1974; Struiksma vd., 1985).

Kıvrımlı bir akarsuda akım ve hız dağılımının belirlenmesi akarsu hidroliğinde kıyı koruması, akarsu ulaşımı, su alma ve katı madde taşınım modelleri ile ilgili olarak pratik bir bakış açısıyla araştırılması açısından önemli olmaktadır. Bir kanalın hız dağılımı hakkında edinilen bilgi ayrıca enerji harcanımını, taban kayma gerilmesi dağılımını ve ilgili ısı ve kütle taşıma problemlerini belirlemeye yardımcı olmaktadır. Akım bir kıvrıma girdiğinde, kanal eğriliğinden kaynaklanan merkezkaç kuvveti su yüzeyinde enine bir eğime yol açmaktadır. Merkezkaç kuvveti ve enine basınç gradyanı arasındaki etkileşim, kesitlerde sekonder akımlara neden olmaktadır ve sekonder akımlar, kıvrım boyunca hareket ederek daha fazla yayılmaktadırlar. Dolayısıyla kıvrımlarda gerçekleşen bu süreçler iç kıvrımda boyuna hız artışına, dış kıvrımda ise azalmaya neden olmaktadır. Hız dağılımı, kanalın genişliği kadar derinliği boyunca da değişmektedir. Derinlik boyunca değişim, kanal tabanında sıfırdan başlayarak, su yüzeyinde veya altındaki bir mesafede, kanal özelliklerine bağlı olarak maksimum bir değere kadar gözlenmektedir. Hız dağılımındaki bu düzensizlik, ağırlıklı olarak taban kayma gerilmelerinden etkilenmektedir. Akımın türbülans yapısı, kanal tabanının hidrolik pürüzlü veya hidrolik cilalı olmasından etkilenmektedir, dolayısıyla, pürüzlülük ve kayma gerilmeleri hız dağılımını etkileyen ana faktörler olarak nitelendirilmektedirler (Pradhan, 2018). Kıvrımlı açık kanal akımı, akıma dik sirkülasyon hücrelerinin (sekonder akım) varlığı ile karakterize edilmektedir. Klasik sarmal hareketin (merkez bölge hücresi) yanı sıra, dış kıyının yakınında ters yönde dönen genellikle daha zayıf ve küçük bir sirkülasyon hücresi (dış kıyı hücresi) gözlemlenmektedir. Bu sirkülasyon hücresi hareketli tabanda kıyı erozyon süreçlerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır (Christensen vd., 1999; Blanckaert ve Graf, 2001a,b, 2004; Blanckaert ve De Vriend, 2004).

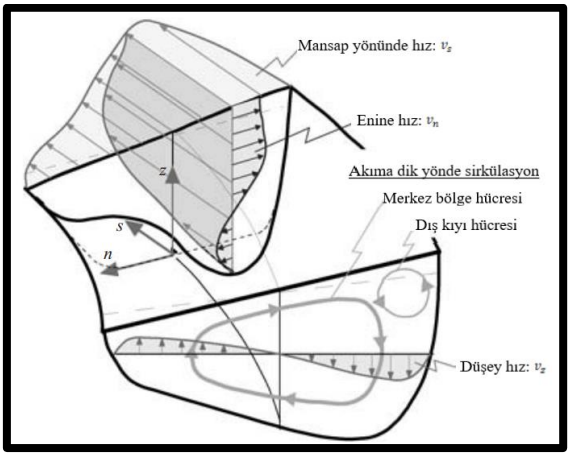
Yapılan çalışmalar neticesinde kıvrımlı akarsularda kıvrımdan itibaren mansap yönüne gidildikçe, iç kıyıda serbest yüzeyde alçalma görülürken dış kıyıda kabarma görülmüştür. Bu hareket esnasında aynı düşey kesitte biri taban yakınında diğeri serbest yüzeye yakın kısımda olmak üzere iki akışkan kütlesi karşılaştırıldığında momentumlarının birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Momentumları birbirinden farklı olduğu için bu iki akışkan kütlesi yer değiştirmeye çalışmaktadırlar. Tabandaki sürtünme faktöründen dolayı tabana yaklaştıkça akışkan partiküllerinin hızı azalmaktadır. Bu olay sonucunda yüzeye yakın akım

çizgileri dış kıyıda oluşan merkezcil kuvvetin dengelenmesi için dış kıyıya doğru yön değiştirirken, taban yakınındaki akım çizgileri iç kıyıya doğru sapmaktadır. Tabana yakın hız, teğetsel taban kayma gerilmesi ve tabandaki akışkan partikülleri genellikle iç kıyıya doğru yönlendirilmektedir. Böylece, akarsu kıvrımlarında en önemli etkenlerden biri olan sekonder akım meydana gelmektedir. Sekonder akım sebebiyle dış kıyıda oluşan merkezcil kuvvetin dengelenmesi için su yüzeyinin dış kıyıda kabarması gerekmektedir (Şekil 2.9) (Rozovskii, 1957; Güngör, 1997).



Şekil 2.9 Kanal kıvrımında sekonder akım oluşumu

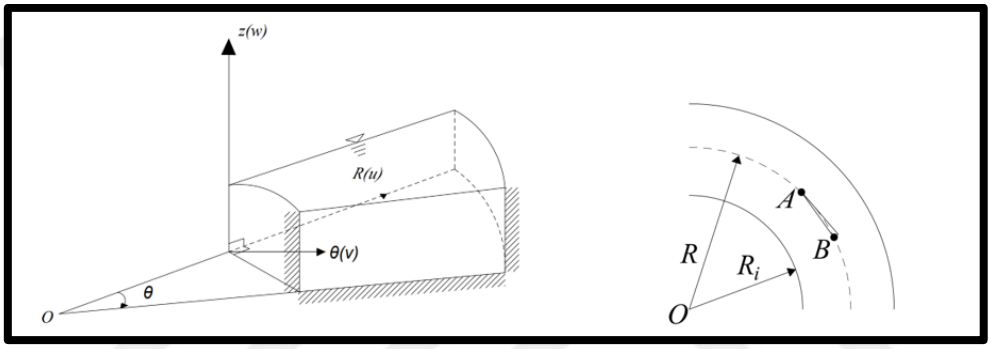
Şekil 2.10'da açık kanalın kıvrımında yer alan olması muhtemel ikinci sirkülasyon hücresi görülmektedir. Bu iki sirkülasyon hücresinin oluşumuna neden olan mekanizmalar, yukarıda anlatıldığı merkezkaç kuvvetinin ve akıma dik yönde gelişen türbülans gerilmelerinin baskın bir rol oynadığı ana akım doğrultusundaki vortisite dengesi ile ortaya çıkmaktadır. Merkez bölge hücresinin oluşumu genellikle merkezkaç kuvveti ve enine basınç gradyanı arasındaki yerel dengesizlik baskın olmaktadır (Rozovskii, 1957). Fakat dış kıyı hücresinin oluşumunda ise sadece türbülansın önemli olduğu bilinmektedir.



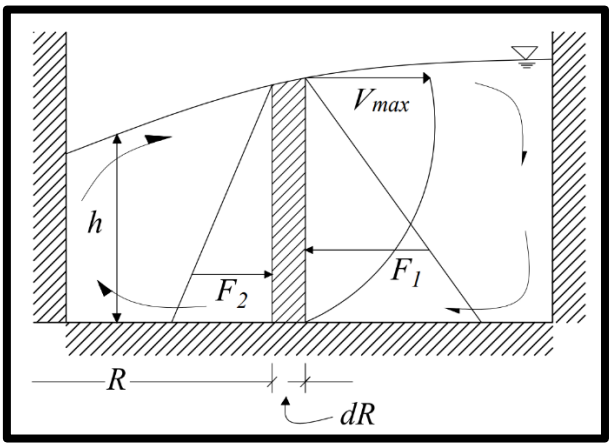
Şekil 2.10 Kıvrımlı açık kanal akımı ve akıma dik yönde oluşan sirkülasyon (Blanckaert ve De Vriend, 2004)

Kıvrımlı kanallarda kararlı akım mekanizmasını açıklayan denklemler aşağıda verilmiştir. Kıvrımlı kanallardaki akımı tanımlamak için burada silindirik koordinat sistemi kullanılmıştır. Bir akışkan partikülünün akım doğrultusunda hareketinde, hız V, kıvrımın eğrilik yarıçapı R olarak verilmiştir (Şekil 2.11 ve 2.12). Akışkan partikülünün A noktasından B noktasına ivmeyle hareket ettiği düşünülürse, kanal kıvrımında akışkan partikülüne etki eden F kuvveti Denklem 2.27'de verilmiştir. Burada, ρ akışkanın özgül kütlesini, V^2/r açısal ivmeyi, RdθdRdz ise akışkan partikülünün hacmini ifade etmektedir.

$$F = \rho R d\theta dR dz \frac{V^2}{r} \tag{2.27}$$



Şekil 2.11 Akarsu kıvrımlarındaki akışkan partikülünün hareketi ve silindirik koordinat sistemi ile gösterimi (Güngör, 1997)



Şekil 2.12 Kıvrımlı bir kanalda enine su yüzü profili (Güngör, 1997)

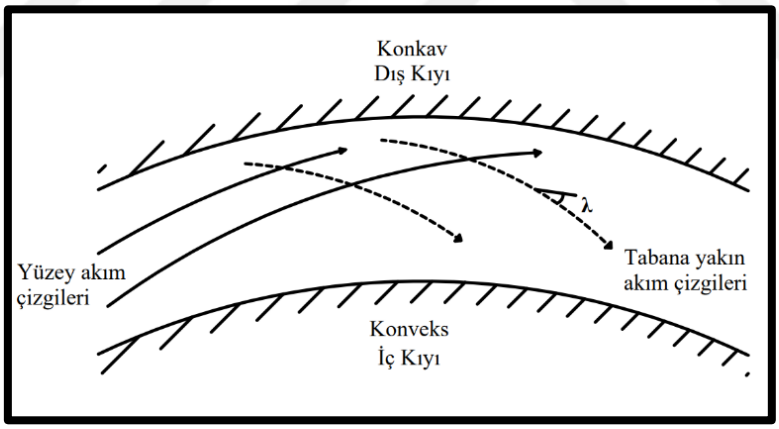
Parçacığa etki eden F kuvveti su seviyesinin enine eğiminin bir sonucu olmaktadır. Dış kıyıya doğru oluşan bu kuvvetin dengelenmesi için su yüzeyi dış kıyıya doğru kabarmaktadır. Kıvrımlı bir kanalda tipik iki boyutlu akım koşulları için akım hızı düşeyde sabit kabul edilirse Denklem 2.28 elde edilmektedir. Daha sonra kıvrımlı

kanalda ortalama akım derinliği (h) ile hız (V) arasındaki bağıntıyı veren I_R ifadesi elde edilmektedir (Denklem 2.29).

$$\frac{\partial h}{\partial R}\rho g R d\theta dR dz = \rho R d\theta dR dz \frac{V^2}{R} \tag{2.28}$$

$$I_R = \frac{\partial h}{\partial R} = \frac{V^2}{gR} \tag{2.29}$$

Düşey doğrultudaki hız da hesaba katılırsa gerçek hızla hesap yapılacağından sürtünme etkisi de dikkate alınmış olur ve sürtünme etkisinden dolayı kanalın tabanında hız yüzeydeki hızdan daha küçük olmaktadır. Kıvrımlardaki enine eğimin etkisi sebebiyle en kesit boyunca oluşacak hızlar farklı olacağından V^2/gR 'nin değeri değişmektedir. Bu değişim χ ile ifade edilmektedir. Eğer düşeyde ortalama hız değeri alınırsa, taban yakınında $\chi > V^2/gR$, yüzeyde ise $\chi < V^2/gR$ olmaktadır. Dolayısıyla su yüzeyi yakınındaki akışkan parçacıkları dış kıyıya doğru, taban yakınındaki akışkan parçacıklarıysa iç kıyıya doğru hareket ederek sekonder akımı meydana getirmektedir (Güngör, 1997) (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Kanal kıvrımında akım çizgileri (Julien, 2002)

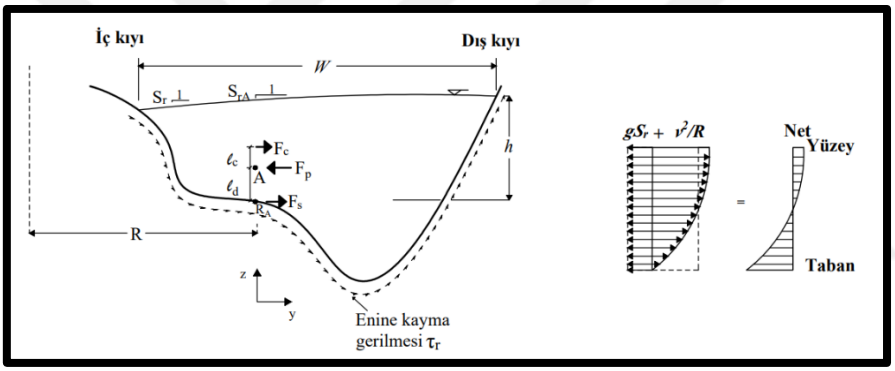
Vries (1989), çalışmasında kanal kıvrımında su yüzeyinin akım eksenine dik bir eğime sahip olduğunu bulmuştur. Kıvrımdaki bir kesitte, kanalın her iki kenarı arasındaki seviye farkı (ΔH) Denklem 2.30 ile hesaplanabilmektedir. Burada, B kanal taban genişliğini ve R_i ise kanal kıvrımındaki iç kenarın eğrilik yarıçapını ifade etmektedir.

$$\Delta H = \frac{V^2 B}{g\left(R_i + \frac{B}{2}\right)} \tag{2.30}$$

Rozovskii (1957), akarsu kıvrımlarındaki akımı tanımlamak için silindirik koordinat sistemini kullanarak Denklem 2.31 elde edilmiştir. Buradan anlaşılmaktadır ki radyal ivme terimlerinin bağıl büyüklükleri, merkezkaç ivmesinin basınç gradyanı ve eksene dik kayma gerilmesi ile dengelenmiştir. Burada, τ_r radyal kayma gerilmesini, S_r radyal su yüzeyi eğimini ifade etmektedir. Burada, z eğrilik yarıçapı r ile değişmektedir.

$$\frac{V^2}{r} = gS_r - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_r}{\partial z} \tag{2.31}$$

Kıvrımdaki kesite bakıldığında (Şekil 2.14) R_A noktasındaki enine sınır kayma gerilmesi τ_{rR}, A noktasındaki radyal su yüzeyi eğimi S_{rA}, aynı noktadaki eğrilik yarıçapı R ve üst kanal genişliği W ölçeklendirme faktörleri olarak verilmektedir (Julien, 2002).



Şekil 2.14 Akarsu kıvrımında akım (Julien, 2002)

Rozovskii (1957), ölçeklendirme faktörlerini boyutsuz parametreler haline getirerek radyal yönde boyutsuz momentum denklemini elde etmiştir (Denklem 2.32). Burada her bir notasyon üzeri * işareti o büyüklüğün boyutsuz halini ifade etmektedir.

$$\rho W h V^2 \int_{\forall^*} \frac{V^{*2}}{r^*} d\forall^* = \rho g W R h S_{rA} \int_{\forall^*} S_r d\forall^* - RW\tau_{rR} \int_{\forall^*} \frac{\partial \tau_r^*}{\partial z^*} d\forall^* \tag{2.32}$$

Denklem 2.32'e denk gelen kuvvet diyagramı Şekil 2.13'te verilmektedir. Denklemin sol taraftaki terimi merkezkaç kuvvetini F_c, basınç kuvveti F_p (sağ taraftaki ilk terimi) ve kayma kuvvetini F_s (sağ taraftaki ikinci terimi) ifade etmektedir (Denklem 2.33).

$$F_c = F_p - F_s \tag{2.33}$$

Sekonder akımı tanımladıktan sonra artık kanal tabanındaki kayma gerilmesinin, doğrultusu ve şiddeti göz önüne alınabilir. Kanal tabanındaki kayma gerilmesi kanal tabanı morfolojisi için oldukça önemli olmaktadır. Şekil 2.13 incelendiğinde basınç kuvvetinin, A noktasının üzerinde l_c mesafesinde uygulanan merkezkaç kuvvetinin toplamını dengelediği, kayma kuvvetinin ise A noktasının altında l_d mesafesinde uygulandığı bulunmuştur. A noktası etrafındaki moment dengesi Denklem 2.34'ü vermektedir. Denklem 2.35 ise hidrolik olarak pürüzlü akarsu tabanları için Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı (f_{DW}) ile kayma hızı arasındaki ilişki ampirik olarak verilmektedir. Burada, d_s akarsu tabanındaki katı maddenin dane çapını, m_1 ile m_2 parametreleri ise akarsu tabanındaki katı madde tipine ve bitki örtüsüne göre değişen ampirik katsayılar olmaktadır (Julien, 2002). Bu sayede kıvrımlı kanaldaki tabandaki kayma kuvveti ampirik ifadelerle basitleştirilmektedir.

$$\Omega_R = \frac{\rho h V^2}{R\tau_{rR}} = \frac{I_d \int_{\forall^*} \frac{\partial \tau_r^*}{\partial z^*} d\forall^*}{I_c \int_{\forall^*} \frac{\nu^{*2}}{r^*} d\forall^*} \tag{2.34}$$

$$\frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f_{DW}}} = m_1 \left(\frac{h}{d_s} \right)^{m_2} \tag{2.35}$$

Boyutsuz parametre Ω_R, sekonder hareketi oluşturan merkezkaç kuvvetinin, hareketi azaltan ve enerjiyi yayan kayma kuvvetine oranını belirtmektedir. (Julien, 2002). Ortaya çıkan radyal kayma gerilmesi τ_{rR}'nin akım yönünde taban kayma gerilmesine τ_θ oranı, tabanın yakınındaki akım çizgilerinin sapma açısını (λ) tanımlamaktadır. Dolayısıyla, Denklem 2.34 ile 2.35 birleştirilerek Denklem 2.36 elde edilmektedir.

$$\tan\lambda = \frac{\tau_{rR}}{\tau_\theta} = \left[\frac{m_1^2}{\Omega_R} \left(\frac{h}{d_s} \right)^{2m_2} \right] \frac{h}{R} \tag{2.36}$$

Rozovskii (1957), Denklem 2.36'daki parantez içindeki terimin değerinin yaklaşık olarak 11'e eşit olduğunu bulmuştur. Engelund (1974), de Vriend (1977), Odgaard (1981) ve Hussein ve Smith (1986) tarafından biraz farklı değerler önerilmiştir. Buradan sapma açısının λ, akım derinliğinin eğrilik yarıçapına oranına bağlı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla keskin kıvrımlar daha güçlü sekonder akımlar

sergilemektedir (Julien, 2002). Bir akarsu kıvrımındaki ana akımın enine dağılımı şu şekilde açıklanabilir (de Vriend ve Struiksma, 1983; Güngör, 1997):

- Kanalda kıvrım bölgesine yaklaşıldıkça akım, memba tarafındaki basınç yükünün etkisiyle karşılaşmaktadır. Basınç yükü akım çizgisinin eğriliğini tedrici olarak arttırmaya çalışmaktadır.
- Akım çizgisinin eğriliği, kıvrımın giriş kısmında iç kıyıda akımın hızlanmasına sebep olan enine ve boyuna basınç gradyanlarına sahip olmaktadır.
- Kıvrım girişinden sonra akım, üniform olmayan derinlik dağılımına uymaya çalışmaktadır. Bunun sonucunda ortalama hızın enine dağılımı dış kıyıya doğru sapmaya başlamaktadır.
- Ortalama hızın enine dağılımının dış kıyıya doğru saparak, sekonder akımın düşey bileşeninin konvektif (taşınımsal) ivme etkisini arttırmaya çalışmaktadır.
- Kıvrım çıkışına doğru akım çizgisinin eğriliği tedrici olarak azalmaya başlamaktadır.
- Enine basınç gradyanındaki değişim, iç kıyıda akımı yavaşlatarak dış kıyıda ise akımı hızlandırarak boyuna basınç gradyanlarına neden olmaktadır. Böylece kıvrım çıkışına yakın bölgede ortalama hızın enlemesine dağılımında, dış kıyıya doğru olan daha fazla çarpılma ve sapmaya neden olmaktadır.
- Kıvrımın dışında bu değişiklikler kendini tedricen taban topografyasına uygun hale getirmektedir.

Kıvrımlı kanallarda kararlı akım, eğrisel karakteristiklerinden dolayı düzgün üniform bir kanaldaki akımdan oldukça farklı davranmaktadır. Kıvrım boyunca akım kesitten kesite değişim gösterebilmektedir. Her ne kadar boyuna kütle transferine göre küçük olsa da kıvrımda enine kütle transferi de etkili olmaktadır. Yeh ve Kennedy (1993), kıvrım boyunca ana akım hız profillerindeki değişimi de dahil ederek sabit tabanlı ve sabit yarıçaplı kanal kıvrımlarındaki akım için gerçekleştirdikleri çalışmada $h/R<<1$ için uzun bir kıvrımdaki kararlı ve sıkışamaz akım (su) için silindirik koordinatlarda r,θ,z doğrultusunda hareket ve süreklilik denklemlerini sırasıyla Denklem 2.37 ile 2.40 arasında verilmiştir (Güngör, 1997).

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial u}{\partial \theta}-\frac{v^2}{r}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho g_r+\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\sigma_{rr}\right)}{\partial r}-\frac{\sigma_{\theta\theta}}{r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial\theta}+\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} \tag{2.37}$$

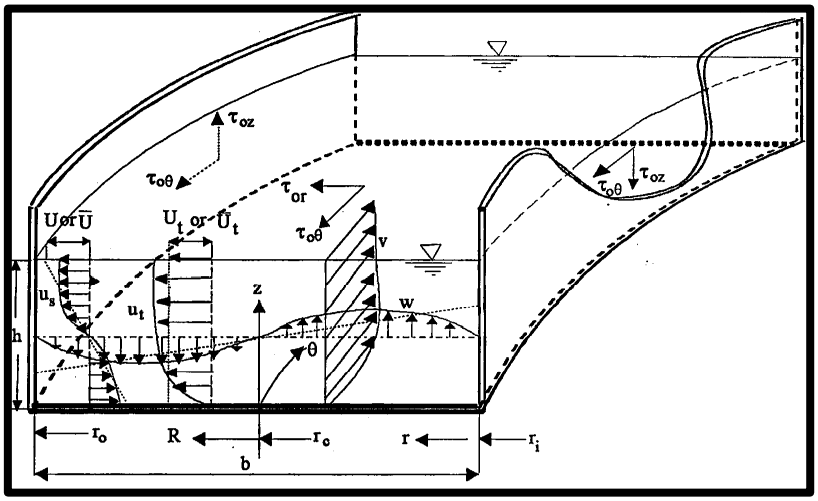
$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial v}{\partial \theta}+\frac{uv}{r}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=\rho g_\theta+\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r^2\tau_{r\theta}\right)}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial\theta}+\frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial z} \tag{2.38}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial w}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial w}{\partial \theta}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=\rho g_z+\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\tau_{rz}\right)}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial\theta}+\frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \tag{2.39}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\left(ru\right)}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial\theta}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{2.40}$$

Burada, ρ akışkanın özgül kütlesini, u,v,w sırasıyla r,θ,z doğrultusundaki hız bileşenlerini, $\rho_{r,\theta,z}$ silindirik koordinat yönlerindeki özgül kütle bileşenlerini, $\sigma_{ii}=-P+\tau_{ii}$ normal gerilmeyi (P basınç, τ_{ii} kayma gerilmesi) ifade etmektedir.

Şekil 2.15'te sabit tabanlı ve sabit yarıçaplı kıvrımlı kanalda akım ve hız dağılım profilleri verilmiştir. Ana akım hızı U(r,θ,z), düşeyde üniform olarak dağılmamaktadır. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki kıvrımlı kanal girişinden itibaren sekonder akımın etkisiyle birlikte enine momentumdan dolayı genellikle maksimum ana akım hızı, iç kıyıdan dış kıyıya doğru yer değiştirmektedir (Yeh ve Kennedy, 1993; Julien, 2002). Buna karşılık keskin kıvrımlarda yani kıvrım yarıçapının kanal taban genişliğine oranı yaklaşık 1 olarak alındığında maksimum hızlar kıvrım çıkışına kadar iç kıyı yakınında meydana gelmektedir. Fakat kıvrım çıkışında dış kıyıda oluşmaktadır.



Şekil 2.15 Sabit tabanlı bir kanal kıvrımında akımın radyal düzlemde hız profilleri (Güngör, 1997)

3
DENEYSEL YÖNTEMLER VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

3.1 Giriş

Tsunami dalgalarının en çok etkili olduğu kritik yerlerden biri akarsu ağızları ve akarsu yollarıdır. Bu nedenle, tsunami dalgasının akarsularda ilerlemesinin fiziksel model yardımıyla incelenmesi, tsunami etkilerinin akarsular ve çevresine olan etkilerini anlamada önemli faydalar sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan doğrusal ve ardından 180° ve 120° açılı iki farklı kıvrımdan oluşan dikdörtgen kesitli kanalın mansabına yerleştirilen tsunami üreteci ile akımın membasına doğru ilerleyen tsunami dalgalarının oluşturulması sağlanmıştır. Tsunami dalgasının kanal boyunca yayılımı, kıvrımlı bölümlerdeki değişimi ve farklı hidrolojik koşullar altındaki davranışı detaylı olarak incelenmiştir. Bu koşullar; akışın olmadığı durgun su koşulları (statik hal) ve membadan mansaba doğru kararlı akım koşulları olmak üzere iki ana başlıkta ele alınmıştır. Kararlı akım koşullarını sağlamak amacıyla üç farklı debi değeri seçilmiştir. Bu bölümde, deney sisteminin yapısı, kıvrımlı kanal özellikleri ve fiziksel modellemede kullanılan N-dalga üreteci ile deney koşullarına ilişkin bilgiler sunulmaktadır. Tsunami dalgasının kanal boyunca yayılması ve hidrodinamiğinin incelenmesi amacıyla iki türlü ölçüm gerçekleştirilmiştir. Dalga formlarının kanal boyunca nasıl değiştiğini gözlemlemek için su yüzü değişimleri ölçülürken, bu dalganın yayılması esnasındaki hızı ve kanalda kararlı akım olması durumunda (akarsuda kararlı akımı temsilen) farklı debiler için mevcut kararlı akımın hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tsunami dalgası olmadan kararlı akım koşullarında hız ölçümü gerçekleştirilerek kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizması incelenmesi amaçlanmıştır.

3.2 Deney Sistemi

3.2.1 Kıvrımlı Kanal

Akarsular, doğal ortamda genellikle kıvrımlar oluşturarak yüzeysel sulara (denizler ve göller) akışlarını sağlamaktadır. Literatürde, bu tür kıvrımlı akarsu kanallarında tsunami dalgalarının ilerleyişi ve buna bağlı hidrodinamik değişimlerin deneysel olarak incelenmesine yönelik çalışmaların yetersiz olduğu görülmüştür. Bu nedenle, mansaba doğru menderesler yaparak ilerleyen bir akarsu boyunca tsunami dalgasının kanal içerisindeki hidrodinamik davranışındaki değişimleri incelemek amacıyla bu tez çalışmasında deney sistemi olarak kıvrımlı bir kanal tercih edilmiştir. (Şekil 3.1).



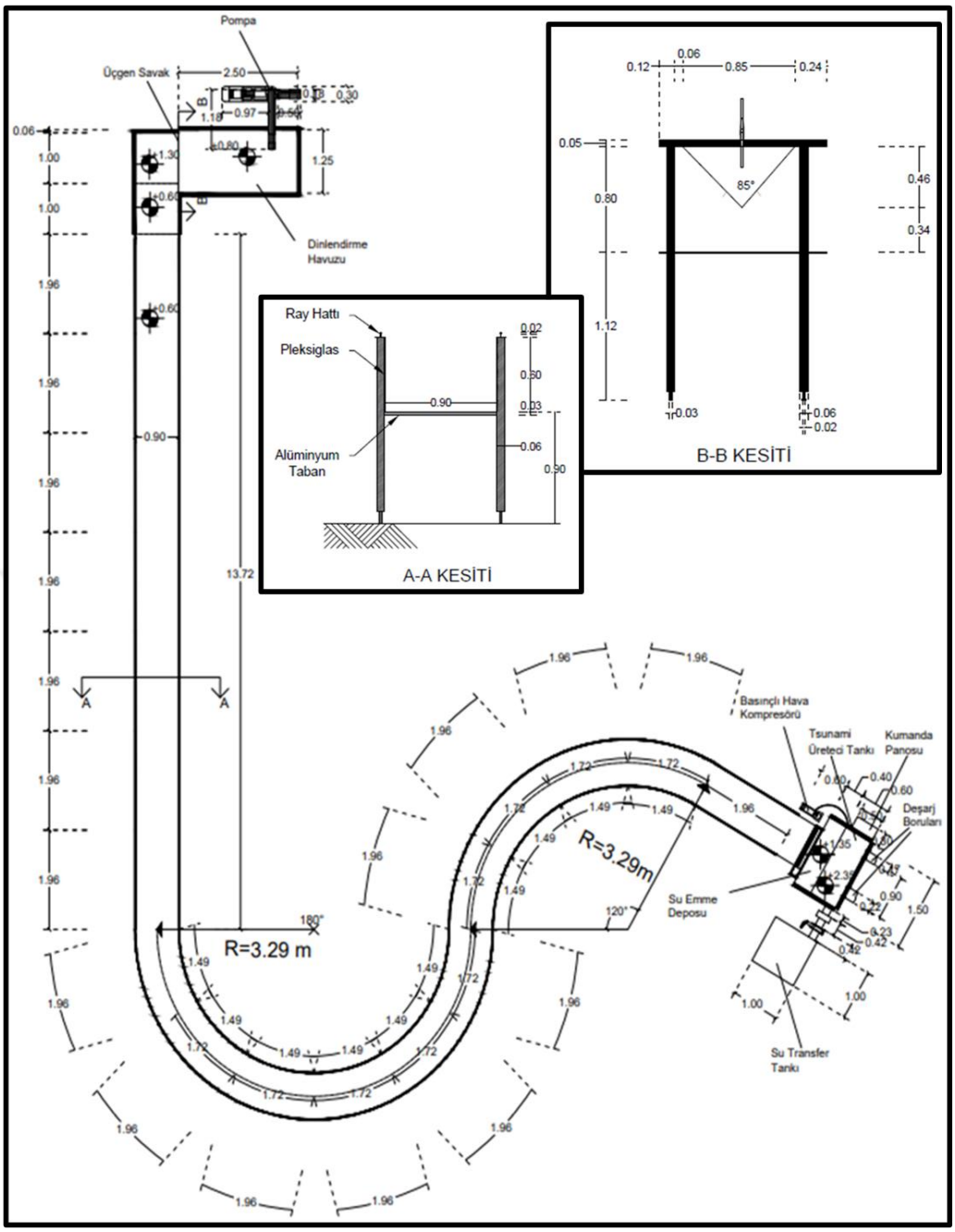
Şekil 3.1 Kıvrımlı kanal deney sistemi

Deney kanalının detaylı olarak bölümleri ve özellikleri şu şekilde sıralanmaktadır.

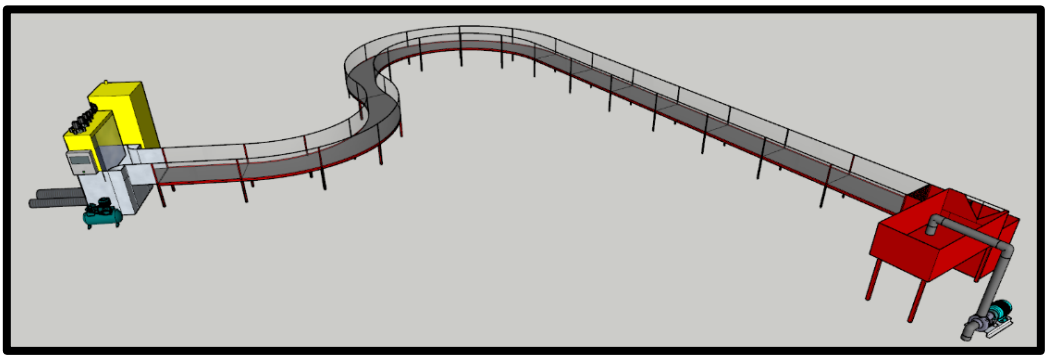
- Kanalın membasında deney sitemine 10 ile 50 l/s aralığında debi basabilen bir pompa bulunmaktadır.
- Deney kanalını besleyen dinlendirme havuzu ve üçgen savak: Dinlendirme havuzu 2.5 m x 1.25 m ebatlarında ve 0.8 m yüksekliğindedir. Havuzun ortasına suyun hareketini düzenlemesi için delikli perde duvardan oluşan sönümlendiriciler yerleştirilmiştir. Havuzun çıkışında ise 0.85 m üst genişliğe sahip üçgen savak bulunmaktadır. Savak tepe noktası, havuz tabanından 0.34 m yüksekliktedir. Deney sistemine verilecek debi, bir üçgen savak ile ölçülmektedir (Şekil 3.2).
- Savaktan sonraki dinlendirme havuzu: 2 m x 0.9 m ebatlarında ve yarısı 0.6 m ve diğer yarısı 1.30 m yüksekliğinde olan bu ikinci dinlendirme havuzu iki adet delikli perde içermektedir.
- Deney kanalı: 13.72 m uzunluğundaki doğrusal kanalın ardından 180°'lik 10.32 m uzunluğunda ve 120°'lik 6.88 m uzunluğunda iki kıvrımlı kesit ve bu kesitlerin ardından 1.96 m uzunluğunda tekrar doğrusal kanal bulunmaktadır. Toplam kanal uzunluğu 32.88 m olup, 0.90 m genişliğinde ve 0.60 m yüksekliğindedir. Tabanı alüminyum ve yan duvarları pleksiglastan imal edilmiştir (Şekil 3.3). Deney sisteminin üç boyutlu çizimi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.2 Deney sistemindeki üçgen savak, dinlendirme havuzları ve pompa



Şekil 3.3 Deney sisteminin plan ve en kesitleri



Şekil 3.4 Deney sisteminin üç boyutlu SkecthUp çizimi

Anahtar eğrisi, bir akarsu kesitinde veya bir savakta su seviyesi (h_s) ile debi (Q) arasındaki ilişkiyi vermektedir. Anahtar eğrisinin elde edilmesi için bir kontrol kesiti belirlenerek farklı su seviyelerinde debi ölçümü gerçekleştirilir ve ikisi arasındaki ilişki grafik üzerinde işaretlenmektedir. Böylece kontrol kesitinde veya savakta her su seviyesi için debi değerini veren bir grafik elde edilmektedir.

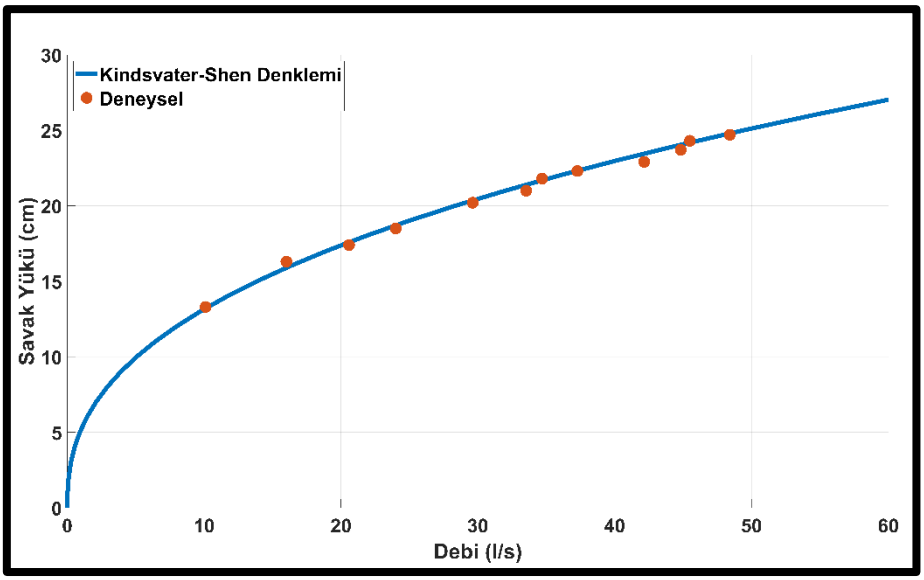
Bu deney sisteminde kanalın membasında kontrollü kararlı akımı sağlamak için üçgen savak bulunmaktadır (Şekil 3.2). Savak yükü limnimetre aracılığıyla ölçülmüştür. Deney sistemindeki dinlendirme havuzu kapatılarak her savak yükü değeri için beşer kez kronometre ile debi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Böylece bu deney sistemindeki üçgen savak için farklı savak yüklerine göre debi değerleri deneysel olarak elde edilmiştir (Şekil 3.5). Üçgen savakta debi ile savak yükü arasındaki ilişkiyi Kindsvater-Shen formülü ampirik olarak vermektedir (Shen, 1981) (Denklem 3.1). Burada, Q debi (m^3/s), C_d debi katsayısı, g yerçekimi ivmesi (m/s^2), β üçgen savaktaki tepe açışı, h_s savak yükü (m) ve k_h ise düzeltme değeri (m) olarak tanımlanmaktadır. Üçgen savaktaki debi katsayısı Denklem 3.2 ve düzeltme değeri ise Denklem 3.3 ile elde edilmektedir.

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)\left(h_s + k_h\right)^{\frac{5}{2}} \tag{3.1}$$

$$C_d = 0.6085 - 0.05254\beta + 0.02135\beta^2 \tag{3.2}$$

$$k_h = 0.0039058 - 0.00385558\beta + 0.001194\beta^2 \tag{3.3}$$

Kindsvater-Shen formülü kullanılarak, savak yüksekliği 1 cm aralıklarla artırılarak debi (Q) değerleri hesaplanmıştır. Debi katsayısı (C_d), üçgen savakta kullanılan 85° tepe açısı dikkate alınarak 0.58 olarak belirlenmiştir. Formülde kullanılan k_h değeri ise 0.000811 olarak elde edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler bu formülden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Fakat debi katsayısı 0.58 alındığı durumda deneysel verilerle hesaplanan anahtar eğrisi arasında bir miktar sapma görülmektedir. Bu nedenle debi katsayısı bu deney koşullarına en uygun optimum değer olarak 0.72 olarak belirlenmiştir. Böylece deneysel verilerle hesaplanan anahtar eğrisi oldukça uyum göstermiştir (Şekil 3.5). Bu sayede doğruluğu kanıtlanmış bu anahtar eğrisi ile kanalda istenilen debi değeri limnimetre aracılığıyla kanala sağlanabilmektedir.



Şekil 3.5 Kindsvater-Shen denklemi ve deney sonuçlarına göre elde edilen anahtar eğrisi

3.2.2 Tsunami Üreteci

Kıvrımlı kanalda tsunami deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla YTÜ Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği Laboratuvarı'nda pnömatik tipte tsunami dalga üreteci kurulmuştur (Şekil 3.6). Bu pnömatik tsunami üreteci özel bir yazılımla kontrol edilerek istenilen dalga profillerinin kanal girişinde (mansabında) oluşturulması sağlanmaktadır. Tsunami üretecinin çalışma mekanizması kısaca şu şekildedir:

Kıvrımlı kanalın çıkışına, suya batırılmış ve ağzı kanal yönüne bakan ters çevrilmiş bir tank yerleştirilmiştir. Bu tankın içindeki hava, vakum pompası yardımıyla dışarı çekilerek tank içerisinde negatif basınç (vakum) oluşturulmakta ve böylece kanal içindeki suyun tank içerisine emilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem sayesinde, özgün bir yaklaşım olarak N-dalga karakteristiğine sahip tsunami dalgasının öncül çukur (negatif genlik) kısmı fiziksel olarak modellenebilmektedir.

Tank içerisine çekilen su, önceden belirlenen parametrelere göre kontrollü bir şekilde geri salınarak istenilen dalga formu oluşturulmaktadır. Farklı tsunami dalga profilleri, tankın üst kısmında yer alan ve farklı çaplara sahip dört adet pnömatik klapenin çeşitli kombinasyonlarla kullanılması sayesinde elde edilebilmektedir. Tsunami üreteci; vakum pompasının gücü, tank içerisine çekilecek su miktarı ve klapelerin açılma süreleri gibi parametrelerin kontrol edildiği bir bilgisayar destekli kumanda sistemiyle yönetilmektedir. Bu sistem, farklı senaryolara uygun dalga şekillerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 3.6 Deney sistemindeki tsunami üreteci

3.3 Ölçüm Teknikleri

3.3.1 Su Yüzü Değişimlerinin Ölçümü

Kıvrımlı kanalda oluşan dalga profilleri ikiz çubuk elektrotlu problar vasıtası ile CLE3C30 model 8 kanallı bir dalga monitörü yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.7). İkiz çubuk elektrotlu prob sistemi, iki elektrot arasındaki su sütununun elektriksel iletkenliği ile çalışmaktadır. Elektrotlar arasındaki devre, su tarafından tamamlandığında, su yüzeyinin alçalma ve yükselmesine bağlı olarak ölçülen elektriksel direnç değişmektedir. Bu prensip doğrultusunda su seviyesi zamana bağlı olarak yüksek hassasiyetle belirlenebilmekte ve dalga profili elde

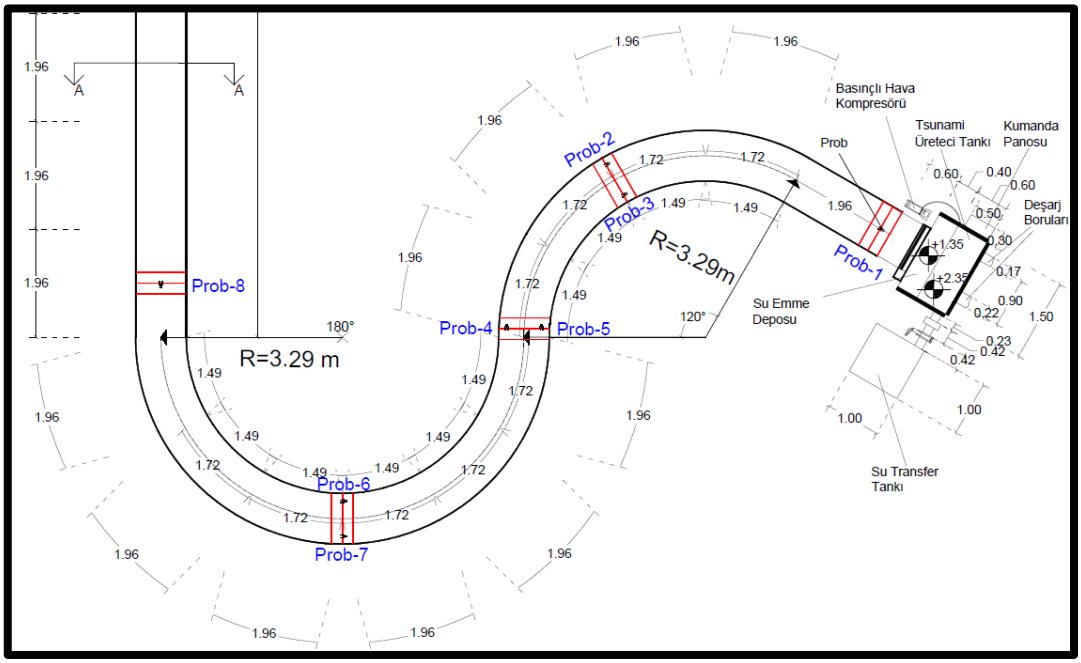
edilebilmektedir. Ölçümler, HR Wavedata programının 3.0 sürümü kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Dalga üretim kanalında doğru verileri elde etmek için probların kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Elektrotlar, üzerlerindeki su seviyeleri ile değişen akımı algılayarak HR Wavedata sistemiyle dalga karakteristiklerini bilgisayar ortamında düzenlemektedir. Probların kalibrasyonlarının yapılması için elektrodların farklı su seviyelerinde akım değerleri ölçülerek bu değerlere karşılık gelen su yüzü değişimindeki artış grafiğinin R^2 =1 gibi bir lineer doğru üzerinde olması istenmektedir. Her deneyden önce sakin su durumunda sistemin direnci dengeye getirilmek suretiyle kalibrasyon yapılmıştır. Deneylerde kullanılan örnekleme frekansı 100 Hz ve ölçüm doğruluğu ise +/- 0.5 mm olmaktadır.



Şekil 3.7 (a) Dalga monitörü ve (b) dalga probları

Toplamda, kıvrımlı kanal boyunca Şekil 3.8'de konumları gösterilen 8 adet prob kullanılmıştır. Dalga monitörünün 8 kanallı olması, deney sisteminde en fazla 8 adet prob kullanımını mümkün kılmıştır. Problardan ikisi, 120°'lik kıvrımın tam ortasında, biri konkav (dış) kıyıya, diğeri konveks (iç) kıyıya yakın olacak şekilde yan yana yerleştirilmiştir. Benzer şekilde, diğer iki prob da 180°'lik kıvrımın ortasında aynı düzende konumlandırılmıştır. İki adet prob ise bu iki kıvrımın birleşim noktasında, yine yan yana olarak konumlandırılmıştır. Birinci prob, kanal girişinde üretilen tsunami dalgasının tanımlanması amacıyla kullanılırken;

sekizinci prob, kıvrımların ardından gelen düz kanal kesitinin başında yer almakta ve dalganın kıvrımlardan sonraki gelişimini belirlemek amacıyla yerleştirilmiştir. Yan yana yerleştirilen problar, kanal duvarından 15 cm mesafeye konumlandırılmış olup, bu yerleşimle aynı kesitteki iki prob arası mesafe 30 cm olmaktadır. Tablo 3.1'de, 2 ila 8 arasındaki probların, referans olarak kabul edilen 1 numaralı proba olan doğrusal mesafeleri verilmiştir.



Şekil 3.8 Dalga problarının kıvrımlı kanal üzerindeki konumları

Tablo 3.1 Probların referans probuna (Prob 1) olan uzaklıkları

Prob No	Prob 1 Kesitine Olan Uzaklık (m)
2-3	5.20
4-5	8.64
6-7	13.80
8	19.96

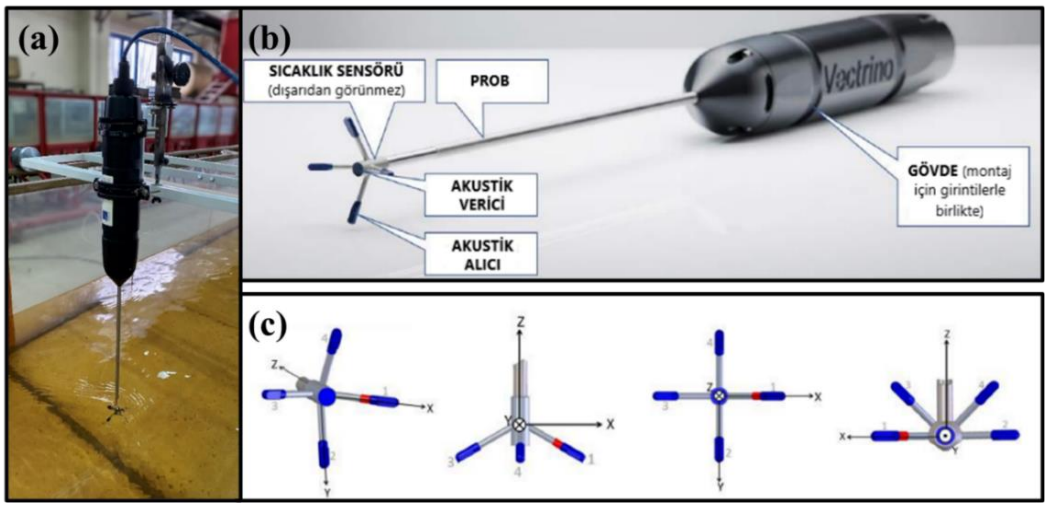
3.3.2 Hız Büyüklüklerinin Ölçümü

Hız ölçümleri, Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9a). ADV; hidrolik laboratuvarlarında, açık kanal modellerinde ve benzeri fiziksel sistemlerde akım hızlarını ve buna bağlı olarak türbülans bileşenlerini ölçmek amacıyla geliştirilmiş, uzaktan algılama prensibine dayalı, üç boyutlu bir hız sensörüdür. Cihazın çalışma prensibi, "Doppler Etkisi"ne

dayanmaktadır. Doppler etkisi, ses dalgası kaynağı ve gözlemci arasında rölatif bir hareket bulunduğunda dalga frekansında meydana gelen değişimi tanımlamaktadır. ADV, bu fiziksel prensibi kullanarak akışkan içindeki parçacıkların hareketinden yola çıkarak hız bileşenlerini ölçmektedir. Saha koşullarında bile laboratuvar düzeyinde hassasiyet sunabilmesi nedeniyle ADV, güvenilir bir akustik hız ölçüm cihazı olarak değerlendirilmektedir (Lohrmann vd., 1994).

ADV sistemleri; yüksek kayma gerilmesinin söz konusu olduğu sınır tabakalarında, kırılan dalga durumunda ve diğer karmaşık akım koşullarında da başarılı performans sergilemektedir. Yüksek örnekleme frekansı ve küçük bir örnekleme hacmi ile üç boyutlu, engellenmemiş hız ölçümleri yapılmasına imkân tanımaktadır. Ölçüm hacmi, cihazdan çıkan ışınların birbiriyle kesiştiği noktadır ve bu nokta, vericiden (probdan) yaklaşık 5 cm uzaklıktadır. Dolayısıyla, cihaz bu referansa göre yerleştirildiğinde, tabana yakın hız bileşenleri elde edilebilmektedir (Nortek AS, 2018).

ADV cihazı bir adet verici ve dört adet alıcıdan oluşmaktadır. Alıcı uçlar, verici ile aralarında 65° eğim olacak şekilde yerleştirilmiştir. Dört alıcı arasındaki açılar ise birbirine göre 90°'dir. Bu düzenleme sayesinde alıcı uçların ikili kombinasyonları hem yatay hem de düşey yönlerdeki hız bileşenlerini belirleyebilmektedir. X yönü için 1 ve 3 numaralı uçlar, Y yönü için 2 ve 4 numaralı uçlar kullanılırken; düşey Z yönündeki bileşenler Z1 ve Z2 olarak ifade edilmektedir. (Şekil 3.9c).



Şekil 3.9 (a) Kanal üstünde ADV yerleşimi, (b) ADV cihaz bileşenleri (Nortek AS, 2018) ve (c) ADV probu için koordinat sistemine göre tanımlanan alıcı numaralandırmaları (Nortek AS, 2018)

ADV cihazı, belirli bir frekansta üretilen kısa süreli çift ses sinyalini su sütununa yayarak hız ölçümlerini gerçekleştirmektedir. Bu sinyallerin bir bölümü, akışkan içerisinde askıda bulunan parçacıklardan yansıyarak cihaza geri ulaşmakta ve dönüş sinyalleri cihaz tarafından işlenmektedir. Yansıyan ses dalgaları doğrudan sudan değil, akım içerisinde sürüklenen pasif izleyicilerden, yani tipik olarak zooplankton, askıda katı madde ya da hava kabarcıkları gibi parçacıklardan kaynaklanmaktadır. Bu parçacıklar akışkan ile birlikte hareket ettiklerinden, cihaz tarafından ölçülen hızlar akım hızlarını doğru bir şekilde temsil etmektedir.

ADV'nin ölçüm prensibi Doppler kayması olarak bilinen frekans değişikliğine dayanmaktadır. Cihazın merkezindeki verici (merkezi dönüştürücü) gecikmeli olarak iki ses sinyali iletmektedir. Bu sinyaller, örnekleme hacminde bulunan parçacıklardan yansıdığında, farklı yönlerde konumlandırılmış akustik alıcı elemanlar (Şekil 3.9b) tarafından algılanır. Ardışık iki sinyal arasındaki faz farkı, akım hızını hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu yöntem, "sinyalden sinyale tutarlı faz farkı yöntemi" olarak adlandırılmakta olup, küçük hız değişimlerinin yüksek hassasiyetle algılanmasına olanak tanımaktadır.

Üç ya da dört alıcıdan elde edilen Doppler kaymaları, her bir alıcı yönünde akım hızlarının tahmin edilmesine imkân verir. Bu tahminler yardımıyla üç ortogonal bileşenli (X, Y ve Z yönlerinde) hız vektörü elde edilmektedir. ADV bu şekilde, her bir alıcının konumuna bağlı olarak üç boyutlu örnekleme hacmindeki hız bileşenlerini doğru bir biçimde hesaplayabilmektedir.

Bu yöntem sayesinde cihaz, düşük gürültü seviyesine sahip ve yüksek doğrulukta hız ölçümleri sunmakta olup, özellikle laboratuvar ortamlarında ve karmaşık hidrodinamik koşullarda güvenilir veri sağlamaktadır (Nortek AS, 2018).

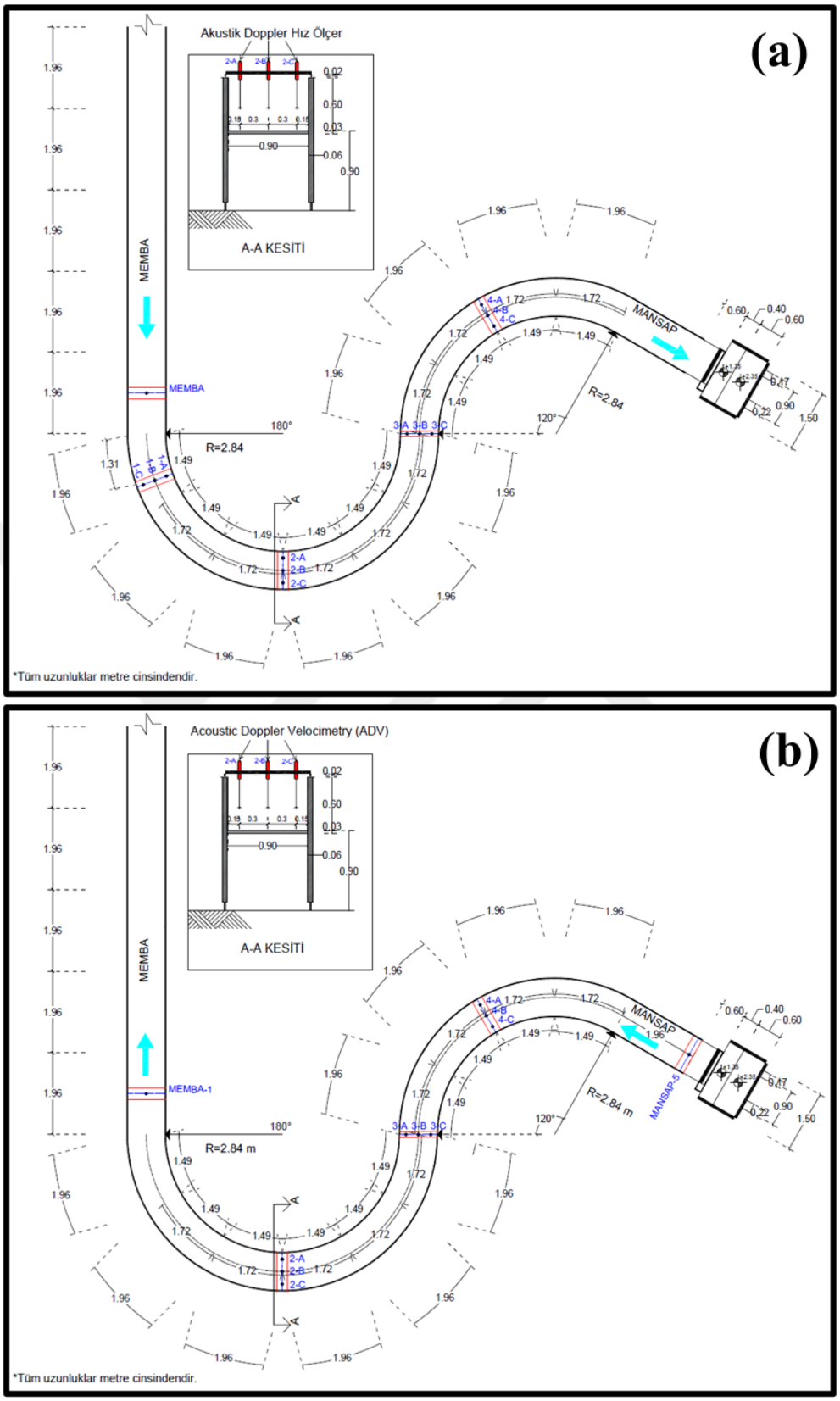
Verilerin kalitesinden emin olmak ve hızların doğru hesaplanmasını sağlamak için, alınan yansımanın (parçacıklar tarafından yansıtılan) belirli bir seviyenin üzerinde olması gerekmektedir. Sinyal gücü (genlik), sudan gelen akustik yansımanın büyüklüğünün bir ölçüsüdür ve sudaki parçacıkların türü ile miktarının bir fonksiyonu olmaktadır. Yansıma zayıfsa, hesaplama istatistiksel olarak "gürültülü" olup hız verileri önemli ölçüde kısa vadeli değişkenlik göstermektedir. Sinyal gücü cihaz tarafından verilmektedir ve veri kalitesini değerlendirmek için kullanılabilmektedir. Akustik sinyalin yansımalarını oluşturmak için gerekli olan

parçacıklar, doğal olarak oluşan askı malzemeleri (akarsu, deniz, kumla veya kirleticilerle dolmuş model basenleri), pompa sistemlerinden sürüklenen kabarcıklar veya laboratuvar ortamında yapılan deneylerde kullanılan yapay askı malzemeleri (seeding material) olabilmektedir (Nortek AS, 2018). Bu sebeple tez kapsamında sürdürülen deneylerde ölçüm korelasyon katsayısını arttırmak için 75 μm tane çapına sahip askı malzemeleri su ile karıştırılarak kanal içine hızı etkilemeyecek şekilde ilave edilmiştir.

ADV örnekleme frekansı 200 Hz olarak belirlenmiştir. Her bir nokta için 1 dakika boyunca ölçüm alınarak 12000 veri elde edilmiştir. ADV ölçüm kriterleri çerçevesinde bu veriler içerisinde %90 ve üzeri korelasyona sahip veriler dikkate alınmıştır. Ayrıca verilerin dağılımı incelenmiş ve %95 güven aralığına sahip veriler dikkate alınarak aykırı veriler çıkarılmıştır. Geriye kalan geçerli veriler üzerinden her bir ölçüm noktası için zamansal ortalamalar hesaplanarak analizlerde kullanılmıştır. Bu sayede, hız ölçümleri için güvenilir ve temsil edici veri setleri elde edilmiştir. Kararlı akım koşullarında 15 cm, 20 cm ve 25 cm derinlik için Şekil 3.10a'da verilen konumlarda hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler üç farklı debiye göre (Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s) oluşturulan kararlı akım koşulları için tekrarlanmıştır. Toplamda 9 adet deney koşulu bulunmaktadır. Kanal boyunca dört ayrı kıvrım kesitinde, her birinde iç kıvrım, dış kıvrım ve eksen olmak üzere üç farklı ölçüm konumu belirlenmiş, buna ek olarak kanalın memba kesiminde yalnızca eksen konumunda bir ölçüm noktası tanımlanmıştır. Böylece toplamda 13 ayrı ölçüm konumu oluşturulmuştur. Bu konumlar, kıvrım bölgelerinde tsunami dalgasının ilerleyişi sırasında hız profillerinde meydana gelebilecek değişimlerin hidrodinamik açıdan değerlendirilmesine olanak sağlamak amacıyla seçilmiştir. Özellikle 1. kesit, akımın membadan itibaren ilk kıvrımı algılamaya başladığı bölgedeki davranışını analiz edebilmek amacıyla belirlenmiştir. Membadaki bu ilk ölçüm konumu, yaklaşım kanalının sonunda konumlandırılarak kıvrımlar öncesinde akımın yeterince gelişmiş profiline ulaşıp ulaşmadığını değerlendirmek için referans olarak kullanılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında hız ölçümleri yalnızca kararlı akım koşullarında değil, aynı zamanda tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca yayılımı sırasında da gerçekleştirilmiştir. Tsunami dalgası esnasındaki hız ölçümleri, su yüzü değişimlerinin kaydedildiği prob konumları dikkate alınarak

planlanmış ve bu bağlamda 1. kesitte ölçüm yapılmasına gerek duyulmamıştır. Bununla birlikte, tsunami dalgasının kanala giriş hızını belirlemek amacıyla mansapta yer alan prob 1 konumunda, ADV cihazı ile hız ölçümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10b). Tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca yayılımı sırasında su yüzü değişimlerindeki ölçümlerle uyumlu olması için ADV örnekleme frekansı 100 Hz olarak belirlenmiştir.

Her bir konumda derinlik boyunca tabandan itibaren 2 cm aralıklarla 15 cm derinlik için 5 farklı noktada (y=0.5, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5 cm), 20 cm derinlik için 7 farklı noktada (y=0.5, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5, 10.5, 12.5 cm) ve 25 cm derinlik için 9 farklı noktada (y=0.5, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5, 10.5, 12.5, 14.5, 16.5 cm) hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kanal içerisindeki akımın sınır tabakasındaki davranışını incelemek amacıyla hız ölçümleri, tabandan itibaren 0.5 cm yüksekliğinden başlatılmıştır. Derinlik boyunca gerçekleştirilen ADV ölçümlerinde, cihazın teknik kısıtları nedeniyle, ölçüm yapılan son nokta ile su yüzeyi arasında kalan 7.5 cm'lik bölge ölçülememektedir. ADV ölçüm tekniğinde, örnekleme hacmi ile prob uçları arasındaki mesafe 5 cm, prob uçlarının su içinde kalması gereken minimum derinlik ise 2.5 cm'dir (Nortek AS, 2018). Bu nedenle, su yüzeyine yakın bölgedeki hızlar ADV ile doğrudan ölçülememektedir. Bu bölgedeki yüzey hızları ise bir kâğıt parçası kullanılarak belirli bir mesafeyi katetme süresinin kronometre ile ölçülmesi yoluyla belirlenmiştir. Daha güvenilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla bu ölçümler her bir durumda beş kez tekrarlanmıştır.



Şekil 3.10 (a) Kıvrımlı kanalda kararlı akımın incelenmesindeki hız ölçüm konumları ve (b) tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca yayılımı esnasındaki hız ölçüm konumları

3.4 Deneylerin Sınıflandırılması

3.4.1 Froude Ölçeğinin Belirlenmesi

Literatürde yer alan ölçümler dikkate alındığında, tsunami etkisine maruz kalan akarsularda prototip akım derinliklerinin genellikle 3–5 m arasında değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan 1/20 Froude benzeşim ölçeği kapsamında, bu derinlikler laboratuvar kanalında yaklaşık 15–25 cm aralığına karşılık gelmektedir. Tanaka vd. (2012) tarafından sunulan ölçüm verileri, bu tez çalışmasında gerçekleştirilen ön deneyler ve deney sisteminin fiziksel sınırları göz önünde bulundurularak, ortalama akım derinliği ile bore dalgasının toplam yüksekliği prototipte yaklaşık 6–6.8 m olarak belirlenmiştir. Tsunami dalgalarının prototipteki dalga boylarının 12 km'ye kadar ulaşabildiği bilindiğinden, deney kanalında oluşturulan 24 m'lik dalga boyu, yatayda yaklaşık 1/500'lük bir ölçeğe karşılık gelmektedir. Bu nedenle, deneysel çalışma düşeyde 1/20 ve yatayda 1/500 ölçeklere sahip distorsiyonlu bir fiziksel model kapsamında gerçekleştirilmiştir. Tsunami gibi uzun dalgaların modellenmesinde düşey ve yatayda farklı ölçeklerin kullanılması kaçınılmaz bir durum olup, bu durum literatürde de kabul gören bir uygulamadır. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında elde edilen veriler ve gözlemler, uzunluğu yaklaşık 17 km'ye kadar ulaşan ve 3–5 m akım derinliğine sahip doğal akarsu sistemlerine uygun bir şekilde ölçeklendirilebilecek niteliktedir.

3.4.2 Tsunami Dalga Profilleri

Deneylerde dikkate alınan pozitif dalga genlikleri (a^+) farklı bore gücü ($\alpha=a^+/d$) koşullarını temsil edecek şekilde seçilmiştir. Tsunamilerin akarsular üzerindeki etkilerinin tartışıldığı bölümde anlatıldığı üzere pozitif (a^+) ve negatif (a^-) dalga genlikleri arasındaki oran ile dalga çukuru ve dalga tepesinin sahip olduğu dalga periyotları arasındaki oran, gerçekleştirilen ölçümler ve kuramsal çalışmalarla uyumlu olacak şekilde seçilmiştir. Böylece tsunami dalgasının doğadaki davranışının fiziksel olarak modellenmesi için bu çalışmada laboratuvar ortamında N-dalga üretilmiştir.

Tsunami üretecinin kapasitesi ve kıvrımlı kanaldaki su derinliklerinin elverdiği sınırlar dahilinde, gerçekleştirilen ön deneyler sonucunda dört farklı bore dalgası şiddetine ($\alpha = 0.24$, 0.48, 0.69 ve 0.95) sahip tsunami dalga profilleri tanımlanmıştır (Şekil 3.11). Bu dalga profillerinin belirlenmesinde yalnızca deneysel koşullar

değil, aynı zamanda literatürde tanımlanan karakteristik tsunami dalga koşulları ve bore şiddeti kriterleri de dikkate alınmıştır. Böylece deneylerde doğal koşulları yansıtacak şekilde farklı dalga enerjilerini temsil eden tsunami profilleri elde edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında iki farklı deney türü gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki, kurak hava koşullarını temsil eden ve kanalda akımın bulunmadığı durgun su koşullarında (Q_0 = 0 m³/s) gerçekleştirilen deneylerdir. İkincisi ise, yağışlı hava koşullarını temsil eden ve membadan mansaba doğru kararlı akımın oluşturulduğu deneylerdir. Her iki deney grubu, tsunami dalgasının farklı hidrodinamik koşullar altındaki yayılımını değerlendirmek amacıyla planlanmıştır. Bu kapsamda, tsunami dalgasının hem statik (durgun) hem de dinamik (kararlı akım mevcut) akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca ilerleme biçimi ve etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

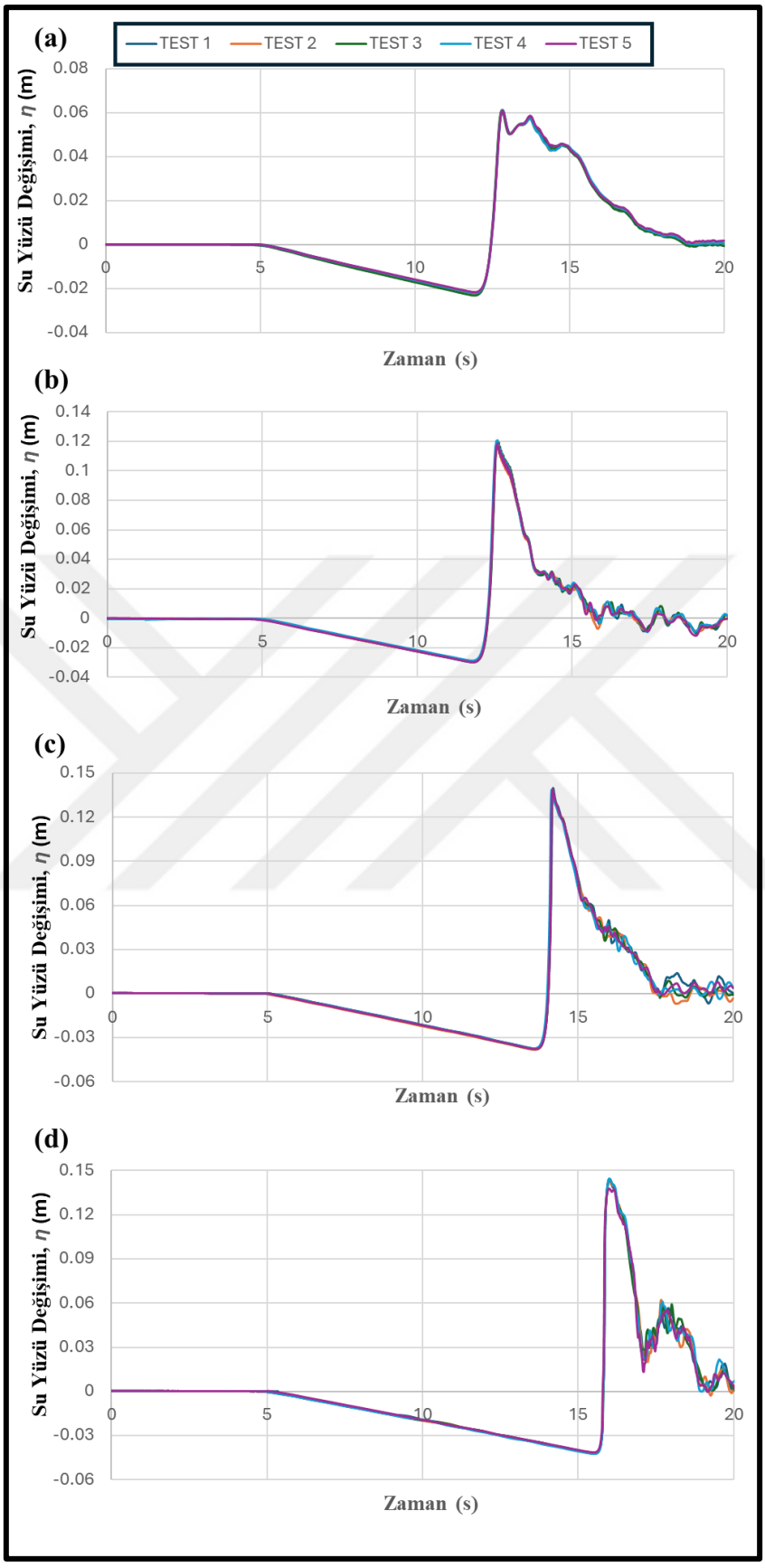
Kararlı akım koşulları, üç farklı debi değeriyle temsil edilmiştir (Q_1 = 0.016 m³/s, Q_2 = 0.035 m³/s, Q_3 = 0.05 m³/s). Bu tez çalışmasının amaçlarından biri, kıvrımlı kanalda kararlı akım rejiminin davranışını farklı derinlik ve debi kombinasyonları altında incelemektir. Bu kapsamda, üç farklı su derinliği (d = 0.15 m, 0.20 m ve 0.25 m) için her bir debi değeri uygulanarak toplam dokuz farklı deneysel durum oluşturulmuştur. Her bir durumda kanal boyunca ayrıntılı hız ölçümleri gerçekleştirilmiş ve kararlı akım koşulları altında akımın gelişimi değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının temel amacı doğrultusunda, ayrıca dört farklı bore şiddetine sahip tsunami dalgasının (α = 0.24, 0.48, 0.69, 0.95) kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi incelenmiştir. Bu kapsamda, her bir tsunami dalgası için dört farklı akım durumu dikkate alınarak toplamda 16 farklı deney koşulu tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen tüm koşullar Tablo 3.2'de özetlenmektedir. Burada farklı debilere ve su derinliklerine ait en kesitsel ortalama akım hızları (U_m) da verilmiştir.

Tablo 3.2 Deney koşulları

Test	d (m)	a^+ (m)	a^- (m)	T (s)	$\alpha=a^+/d$	Q (m^3/s)	U_m (m/s)
1	0.25	0.610	0.220	13.9	0.24 (Dalgalı bore)	0	0
2						0.016	0.071
3						0.035	0.156
4						0.050	0.222
5	0.25	0.119	0.30	10.8	0.48 (Kırılan dalga, geçiş durumu)	0	0
6						0.016	0.071
7						0.035	0.156
8						0.050	0.222
9	0.20	0.138	0.370	12.3	0.69 (Kırılan dalga, geçiş durumu)	0	0
10						0.016	0.089
11						0.035	0.194
12						0.050	0.278
13	0.15	0.143	0.420	14.4	0.95 (Kırılan dalga, güçlü bore)	0	0
14						0.016	0.119
15						0.035	0.259
16						0.050	0.370

Laboratuvar ortamında oluşturulan fiziksel modellerde kullanılan parametrelerin tutarlılığı ve deney matrisinin uygulanabilirliği için aynı parametrelerle elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve tekrarlanabilirliğinin ispat edilmesi gerekmektedir. Her profil için aynı parametrelerle 5 farklı test uygulanmıştır. Sonuç olarak elde edilen dalga profillerinin tekrarlanabilir olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.11). Şekil 3.11c ve 3.11d'de özellikle dalga tepesi arkasında oluşan profillerde 0.5 cm mertebelerine ulaşan farklılıklar gözlenmektedir. Bunun sebebi bu profillerde a^+/d oranlarının büyük olmasıdır. Bu değerlerde dalga kırılan (türbülanslı) bore olarak ilerlemektedir. Türbülansın doğası gereği dalga tepesinin arkasında bu tarz çalkantılar gözlenebilmektedir. Ancak özellikle Şekil 3.11a'de görüldüğü üzere a^+/d oranı küçüldükçe dalgalı bore oluşmakta ve dalga kırılmadan ilerlemektedir. Böylece tsunami dalgasının daha çalkantısız ve düzgün bir şekilde görünmesini ve her test sonuçlarının birbiri ile daha uyumlu olmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.11 Tsunami üreteci ile oluşturulan tsunami dalgaları ve tekrarlanabilirlik testleri: (a) $a^+/d= 0.24$, (b) $a^+/d= 0.48$, (c) $a^+/d= 0.69$ ve (d) $a^+/d= 0.95$

4
SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİ VE FLOW-3D UYGULAMASI

4.1 Giriş

Tsunami modellemesi için matematiksel yöntemlere ve fiziksel özelliklere dayalı sayısal modeller oluşturulmaktadır. Analitik ve sayısal yöntemler, tsunami hareketi ve tsunami su taşkın sahalarını tahmin edebilmek için yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu yöntemler ile tsunaminin hidrodinamik davranışı incelenebilmektedir. Saha çalışmaları ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler bu sayısal modellerin doğrulanması ve performans değerlendirmesi için kullanılmaktadır. Tsunaminin sayısal olarak modellenmesi için derinliğe göre ortalaması alınmış iki boyutlu sığ su denklemleri kullanılmaktadır. Bu modeller hidrostatik basınç kabulü ve doğrusal artan/azalan batimetri gibi birçok kabul yapmaktadır. Bu modellerden elde edilen su seviyeleri aracılığıyla, coğrafi bilgi sistemlerinde işlenen topoğrafya verilerine göre tsunami taşkın risk haritaları oluşturulmaktadır. Bu yöntemler, başlangıç düzeyinde olup en yaygın kullanılan tsunami modelleme araçları olarak kabul görmektedir. Ancak bu modeller oldukça pragmatik olup birçok fiziksel etkeni göz ardı etmektedir. Örneğin, güçlü türbülans hareketleri gibi üç boyutlu akım özelliklerinin oluştuğu sığ su bölgelerinde yeterli olamamaktadır. Kıyıya yakın bölgelerde oluşabilecek yansıma ve vorteks etkileri de ihmal edilebilmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi, akarsu içerisinde özellikle kıvrımlı menderes yapılarında oluşacak yanal etkiler göz ardı edilmektedir. Hidrostatik kabul yapıldığından tsunami dalgasının akarsu içerisinde ilerlemesi sırasında ani değişen akım koşulları dikkate alınamamakta ve kıyı alanında veya akarsu içerisinde bulunabilecek su yapılarının da etkileri bu modellere dahil edilememektedir.

Tsunami dalgalarının akarsularda ilerleyişini doğru bir şekilde modelleyebilmek için akım yapısını üç boyutlu olarak çözümleyebilen sayısal modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, akışkanların hareketini tanımlayan Navier-Stokes denklemlerini temel alan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri, bu tür karmaşık hidrodinamik süreçlerin modellenmesinde etkin bir araç olarak öne çıkmaktadır. HAD temelli sayısal modeller, türbülansın akım üzerindeki etkilerini de göz önünde bulundurmak amacıyla genellikle Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) modelleri veya Büyük Eddy Benzeşimi (Large Eddy Simulation, LES) gibi gelişmiş türbülans kapama modelleri ile birlikte kullanılmaktadır. Böylece, tsunami dalgalarının karmaşık etkileşim süreçleri ve akarsu morfolojisi ile olan ilişkisi daha gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmektedir. Literatür bölümünde bahsedildiği gibi tsunami hareketinin modellendiği ve/veya HAD yönteminin kullanıldığı birçok sayısal model bulunmaktadır.

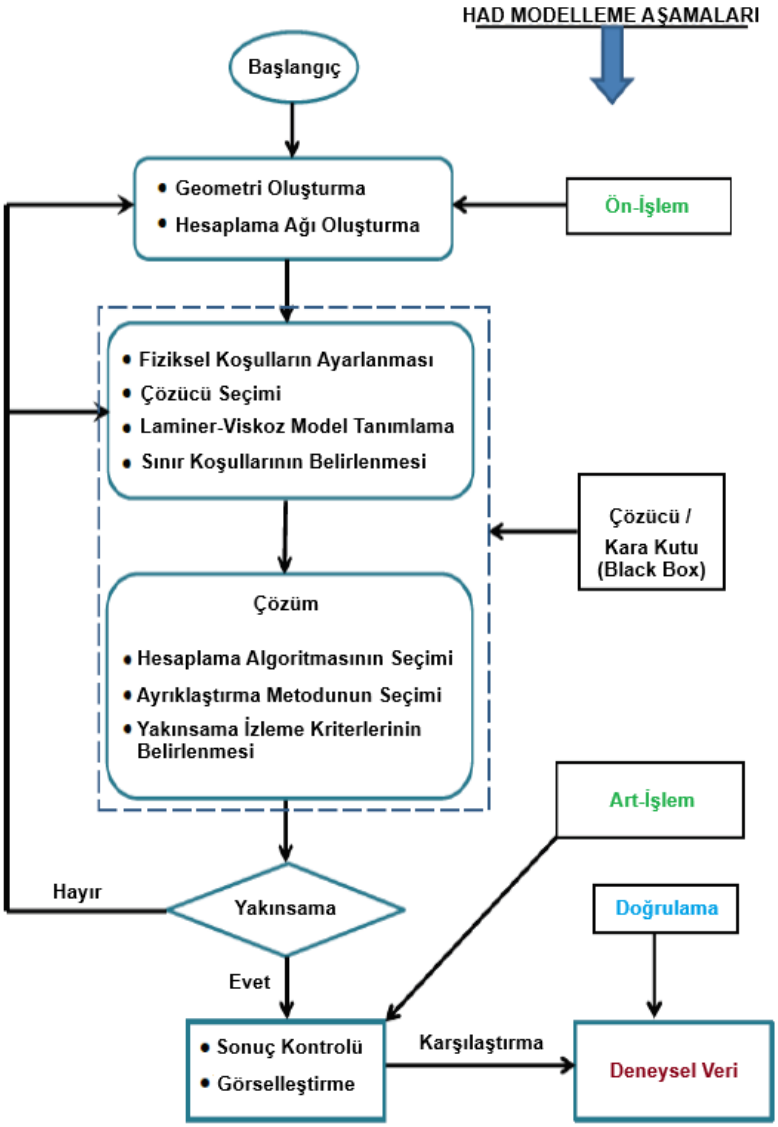
Bu tez çalışması kapsamında yüksek doğrululuk ve hassasiyete sahip hızlı çözümleme imkânı sunan ve içerisinde mevcut bulunan çözücülerinin matematiksel şemasının geçerliliği kanıtlanmış FLOW-3D yazılımı tercih edilmiştir. FLOW-3D sonlu hacimler yöntemine dayalı bir HAD çözücüsü olarak akademik araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Modelden elde edilecek sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak sayısal modelin kalibrasyonu ve doğruluğu (validation) değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, menderesli bir akarsuyu ölçekli olarak temsil etmek üzere kıvrımlı bir kanalda tsunami dalgasının ilerlemesinin hem durgun hem de kararlı akım koşullarında sayısal olarak modellenmesi amaçlanmıştır Sayısal modelin doğrulaması hem niteliksel hem de niceliksel analizlerle gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, modelin uygulanabilirliğini ve gerçek koşullara uyarlanabilirliğini değerlendirmek amacıyla, bu tez çalışmasının kapsamına uygun nitelik taşıyan Türkiye'deki akarsular örnek vaka alanları olarak ele alınmıştır.

4.2 FLOW-3D

FLOW-3D, Flow Science, Inc tarafından geliştirilen bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. Akademik araştırmalarda ve endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılan çok güçlü ve doğruluğu

kanıtlanmış (verified) bir HAD çözücüsüdür. FLOW-3D hidrolik, denizcilik, kirlilik ve çevre bilimleri, havacılık, uzay, gaz, petrol gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılan bir sayısal modelleme aracı olmaktadır. Şekil 4.1'de HAD metodolojisi akış şeması verilmektedir (Muiruri ve Motsamai, 2018).



Şekil 4.1 HAD metodolojisi akış şeması (Muiruri ve Motsamai, 2018)

4.2.1 Sayısal Modelin Teorik Yapısı

HAD yöntemi, kısmi türevli diferansiyel denklemler (KTDD) olan Navier-Stokes ve süreklilik denklemlerinin ayrıklaştırarak çözümüne dayanmaktadır. Bu ayrıklaştırma için sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemleri kullanılmaktadır. FLOW-3D ise sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Sonlu hacimler yönteminde, incelenen akış alanı (flow domain) küçük kontrol hacimlere

ayrılmakta ve böylece çok sayıda kontrol hacime sahip bir hesaplama ağı (mesh) oluşmaktadır. Bu kontrol hacimlerinin yüzeyine diverjans operatörü uygulanarak KTDD analitik çözüme dönüştürülmektedir. Böylece karmaşık görünen bir akışkan problemi önemli ölçüde basitleştirilmektedir.

FLOW-3D içerisinde hali hazırda bulunan çözücü algoritmalar aracılığıyla her bir hücredeki hız, basınç, sıcaklık ve özgül kütle gibi temel fiziksel parametreler elde edilebilmektedir. Temelinde akışkanın hareket denklemleri olan ve analitik olarak çözümü mümkün olmayan Navier-Stokes denklemlerinin belirli kabuller altında sayısal analiz yöntemler kullanılarak çözümlenmesine dayanmaktadır. Bu denklemler; süreklilik denklemi (Denklem 4.1) ve -x, -y, -z üç yönde hareket denklemleri (sırasıyla Denklem 4.2,4.3,4.4) olmaktadır. Burada u,v,w sırasıyla -x, -y, -z üç yönde hız bileşenini, ρ akışkanın özgül kültesini ve p skaler büyüklük olarak tek noktadaki basınç bileşenini ifade etmektedir. X, Y ve Z ise o doğrultuda etkiyen yerçekimi gibi kütlesel kuvvetleri temsil etmektedir. μ∇u, μ∇v ve μ∇w ise viskoz terimleri ifade etmektedir. Farklı HAD çözücü algoritmaları için bu denklemler farklı formlara dönüşmektedir. Bu denklemlerin FLOW-3D içerisindeki formları ilerleyen bölümlerde açıklanmaktadır.

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{4.1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=X-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\nabla u \tag{4.2}$$

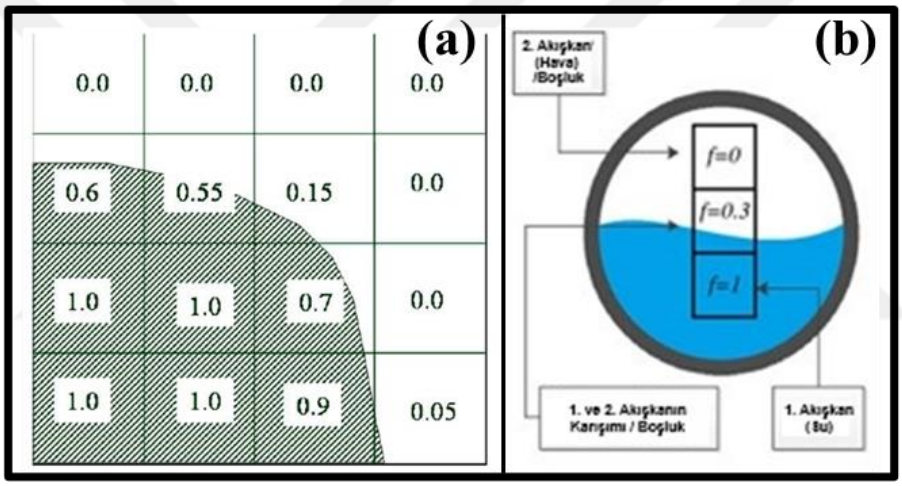
$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=Y-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\nabla v \tag{4.3}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=Z-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\nabla w \tag{4.4}$$

Özellikle hidrolik ve kıyı modellemelerinde incelenen akım serbest yüzeyli olmaktadır. Dolayısıyla hava ile suyun etkileşimi söz konusudur ve bu nedenle hesaplama ağındaki her bir hücre tamamen tek bir akışkan ile dolu değildir. Serbest yüzeyin oluştuğu bölgede hücrelerin sadece bir kısmı akışkan ile dolu olmaktadır. Serbest yüzey tanımlaması iki akışkanın birbirine karışmadığı (immiscible) ve kimyasal tepkimeye girmediği durumlar için geçerli olmaktadır. Dolayısıyla hesaplama ağı içerisinde bir hücrenin ne kadarının dolu olduğunu ifade etmek için 1 (tam dolu) ile 0 (tam boş) değerleri arasında değişin bir "F" fonksiyonu

kullanılmaktadır (Şekil 4.2). Bu fonksiyona ve bu yönteme Akışkan Hacmi (AH) (orijinal adıyla Volume of Fluid, VOF) denilmektedir. HAD için bu yöntem ilk kez Hirt ve Nichols tarafından 1981 yılında yayınlanmıştır. Bu fonksiyon kartezyen koordinat sisteminde üç eksende geçerli ve zamana bağlı olarak tanımlanan bir fonksiyondur. F(x,y,z,t) Denklem 4.5'te KTDD formunda verilmektedir (Hirt ve Nichols, 1981; Hirt ve Sicilian, 1985). Burada "V_F" akışkan hacim oranı olarak tanımlanmaktadır. Kartezyen koordinat sistemine göre -x, -y ve -z yönü için u,v,w hız bileşenlerini; A_x, A_y, A_z ise akışkan alan oranını ifade etmektedir. Dolasıyla buradaki denklem aslında süreklilik denklemini vermektedir.

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(FA_x u\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(FA_y v\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(FA_z w\right)\right]=0 \tag{4.5}$$



Şekil 4.2 (a) Serbest yüzeye yakın bölgede akışkan hacmi fonksiyonları (Barkhudarov, 2004), (b) Bir boru kesitinde serbest yüzey oluşumu ile akışkan hacmi fonksiyonları (Flow Science, 2002)

F değerleri bilindiğinde serbest yüzeyin konumu ve hesaplama ağındaki hücrelerin arasındaki açısı hesaplanabilmekte ve bu hesaplama komşu hücrelerdeki akışkan miktarını kontrol ederek gerçekleşmektedir. Bu komşu hücrelerde uygun sınır koşulları tanımlandığında akışkan hareketi hesaplanabilmektedir. Sayısal modelde her bir çözüm adımında tanımlanan fiziksel koşullar çerçevesinde her bir hücrede F değerleri değişmektedir. AH yöntemi aslında doğrudan serbest yüzeyi tanımlamamaktadır. Bunun yerine hesaplama ağı içerisinde bir akışkanın bulunduğu bölgeyi tanımlamaktadır. Bu nedenle de akışkanın bulunduğu bölgeler birleştiğinde veya ayrıldığında çözücüde algoritma ve yakınsama hatalarına sebep olmamaktadır.

Son yıllarda FLOW-3D için orijinal AH yönteminde bazı geliştirmeler yapılmaktadır. Hesaplama ağında, modelde asıl incelenen akışkan su gibi tek bir akışkan ise havanın veya boşluğun olduğu bölgeler çözüme dahil edilmemekte ve böylece çözüm süresi ile hafıza miktarı oldukça azalmaktadır. Ayrıca farklı sıvı veya gaz arayüzlerini takip edebilme doğruluğu artmaktadır. FLOW-3D içerisinde AH yönteminin bu geliştirilmiş formuna TruVOF yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

FLOW-3D yazılımında TruVOF yöntemi aracılığıyla serbest yüzey hareketini hesaplarken, "Alan/Hacim Fraksiyonu Engel Gösterimi" (orijinal adıyla Fractional Area/Volume Obstacle Representation, FAVOR) tekniği karmaşık geometrik bölgeleri modellemek için kullanılmaktadır (Hirt ve Sicilian, 1985). FAVOR, dikdörtgen prizma şeklindeki hesaplama ağı içerisindeki geometrik nesneleri (katı cidar) tanımlamak için kullanılan özel bir teknik olarak kabul görmektedir. Örneğin, bir akış alanı içerisinde bulunan silindir köprü ayakları FAVOR tekniği aracılığıyla modellenmektedir. Blok hücrelerden oluşan bir hesaplama ağı içerisinde köprü ayaklarının yüzeyi tanımlanarak akışkanın bu yüzey ile teması sağlanmaktadır. Kısaca o bölgede duvar sınır koşulunu belirlemek için bu teknik kullanılmaktadır. Bu sayede FLOW-3D ile en karmaşık geometrileri bile sayısal olarak modellemek mümkün olabilmektedir.

FLOW-3D, Alan Kesri (A_F) ve Hacim Kesri (V_F) kavramlarına dayandığından karmaşık geometrilerle iyi çalışmaktadır (Hirt ve Sicilian, 1985). FAVOR güçlü bir yöntem olmasına rağmen, tüm ayrıklaştırma yöntemlerinde olduğu gibi hesaplama ağı içerisindeki hücre sayısından (çözünürlük) etkilenmektedir. Akışkanın temas ettiği rijit cisimlerin köşe ve dairesellik gibi geometrik özelliklerine göre hücre boyutu ve sayısının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Geometrik gösterim, hesaplama ağı çözünürlüğünün artmasıyla (yani hücre boyutunun azalmasıyla) iyileştirilebilmektedir.

FAVOR tekniği, akış alanındaki genel hareketli nesne (orijinal adıyla General Moving Object, GMO) modellenmesinde de etkili olmaktadır. FLOW-3D içerisinde, GMO modeliyle tanımlanan nesneler kullanıcı tarafından belirlenen hareketlere sahip veya akışkan hareketinden dolayı dinamik olarak etkilenerek hareket edebilen rijit katı cisimler olarak tanımlanmaktadır. Modellenen rijit katı cisim, altı serbestlik derecesine sahip olabildiği gibi sabit eksen veya sabit nokta

gibi hareket kısıtlamalarına tabi olabilmektedir. GMO modeli, akışkan etkileşimi ile meydana gelen bağımsız hareket türlerinin yanında birden fazla katı nesnenin çarpışma ve birbiriyle sürekli temas halinde bulunma durumlarını da incelemektedir (Flow Science, 2002). Böylece örneğin deniz ortamında yüzen bir cismin farklı dalga ve akıntı koşulları için altı serbestlik derecesinde hareketi sayısal olarak modellenebilmektedir. Benzer şekilde katı madde hareketi de bu şekilde modellenebilmektedir.

FLOW-3D içerisinde akışkanın temas ettiği katı cidar ve karmaşık geometriler Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) ile oluşturulmuş Stereolithography (STL) formatlı dosyalar ile tanımlanabilmektedir. Bu tasarım ve geometriler için kıvrımlı kanal, yaklaşım kanalı, bağlantı borusu, dolu savak yapısı ve köprü ayağı gibi örnekler verilebilmektedir. FLOW-3D içerisine aktarılan bu geometriler hesaplama ağının duvar sınır koşulu olarak (katı cidar) tanımlanarak temas ettiği engelleri ifade etmektedir. Ayrıca küçük ölçekli batimetri veya topografya verilerini dönüştürücü araçlarla yine STL formatına dönüştürerek FLOW-3D içerisinde tabanda duvar sınır koşulu olarak tanımlanabilmektedir. STL formatı, üç boyutlu geometrik nesnelerin temsili açısından birçok endüstride yaygın olarak kullanılan bir veri formatıdır. Ancak, su kaynakları ve çevre mühendisliği uygulamalarında, doğal ortamın yüzey özelliklerini (örneğin batimetri ve topoğrafya) temsil etmek amacıyla farklı veri formatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. ESRI ASCII olarak bilinen raster veri formatı, arazi verilerini doğrudan FLOW-3D içerisine aktarmaktadır. Tüm Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılım paketlerinde bulunan ASCII (.asc) formatıyla oluşturulabilen bu veri dosyaları FLOW-3D içerisine kolayca aktarılmaktadır. Örneğin akarsularda ve kıyılarda meydana gelen taşkınların modellenmesinde o bölgeye ait raster verileri oldukça önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında olduğu gibi, FLOW-3D raster verilerini kullanarak akarsuda tsunami dalgasından kaynaklı oluşabilecek bir taşkını modelleyebilmektedir.

Akışkanın temas ettiği yüzeyin geometrik tanımının yanı sıra, yüzey pürüzlülüğünün nicel olarak belirlenmesi de kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Özellikle sığ su modelleriyle gerçekleştirilen akarsu, taşkın dalgaları ve tsunami dalgası simülasyonlarında, yüzey pürüzlülüğü kalibrasyon sürecinde önemli bir rol oynamaktadır ve modelin doğruluğunu doğrudan etkileyen bir unsur olarak kabul edilmektedir.

FLOW-3D yazılımında, eşit derecede ve homojen dağılıma sahip yüzey pürüzlülükleri tanımlanabilmektedir. Bunun yanı sıra, pürüzlülüğün değişkenlik gösterdiği durumlar için eşdeğer pürüzlülük değerleri hesaplanabilmekte ve mekansal olarak değişen pürüzlülük dağılımları da modellenebilmektedir. Bu mekansal pürüzlülük verileri, ASCII raster formatında hazırlanarak FLOW-3D içerisine aktarılabilmektedir. Eşdeğer bir pürüzlülük değerinin hesaplanması gerektiğinde, Manning pürüzlülük değeri (n), Denklem 4.6'da verildiği şekilde FLOW-3D için sürtünme katsayısı olan f_c değerine dönüştürülebilmektedir (Velioğlu, 2017). Burada, D_h hidrolik çap ve hidrolik yarıçapın R_h 4 katına eşit olmaktadır.

$$f_c \cong 3.72067 D_h \exp\left(\frac{-0.103252 D_h^{1/6}}{n}\right) \tag{4.6}$$

Sürtünme katsayısının yerine FLOW-3D içerisinde yüzey pürüzlülük yüksekliği de tanımlanabilmektedir. Burada, yüzey pürüzlülüğü homojen şekilde dağılmış olarak kabul edilip tüm pürüzlülük elemanlarının ortalama yüksekliği dikkate alınmaktadır. Nikuradse eşdeğer yüzey pürüzlülüğü (k_s) parametresi kullanılmaktadır. Nikuradse (1933), pürüzsüz ve pürüzlü borularda hız profilini ve basınç düşüşünü ölçerek sürtünme faktörünü ortalama akım hızı ve Reynolds sayısıyla ilişkisini tanımlamıştır. Yen (1991), geçirimsiz rijit sınır koşullarına sahip geniş açık kanallar için Nikuradse eşdeğer yüzey pürüzlülüğü (k_s) değeri ile Manning pürüzlülük değeri (n) arasındaki ilişkiyi vermiştir (Denklem 4.7).

$$k_s = \left(\frac{n}{0.0389}\right)^6 \tag{4.7}$$

Yukarıda bahsedildiği gibi, FLOW-3D, akışkan hareketini tanımlamak için üç boyutlu olarak süreklilik denklemini ve hareket (Navier-Stokes) denklemlerini kartezyen koordinat sisteminde (x,y,z) sonlu farklar veya sonlu hacim yöntemiyle çözmektedir. Silindirik koordinat sistemi için (r,θ,z), -x koordinatı radyal yön olarak r, -y koordinatı azimut koordinatına (θ) dönüştürülür ve z yine eksenel koordinat olarak kabul edilmektedir. FLOW-3D içerisinde silindirik geometriler için kartezyen koordinat sistemindeki hareket denklemlerine ek terimler eklenmektedir. Bu terimler bir "ξ" katsayısı ile dahil edilmiştir; öyle ki ξ=0 Kartezyen geometriye, ξ=1 ise silindirik geometriye karşılık gelmektedir.

Tüm denklemler alan ve hacim gözeneklilik (porous) fonksiyonları FAVOR yöntemine bağlı şekilde formüle edilmiştir. Diğer bir ifadeyle hesaplama ağındaki katı cisimler sıfır hacimli gözeneklilik bölgeleriyle tanımlanmaktadır. FLOW-3D içerisinde alan ve hacim fraksiyonları zamandan bağımsız olarak kabul edilmektedir. Ancak bu ifadeler GMO'nun kullanıldığı modellerde zamana göre değişebilmektedir. Genel kütle korunumu-süreklilik denklemi FLOW-3D çözücüleri içerisinde tanımlanan formuyla Denklem 4.8'de verilmektedir (Flow Science, 2002). Burada, R_{DIF} türbülans difüzyon terimi ve R_{SOR} ise kütle kaynağı olarak tanımlanmaktadır.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \mathcal{R}\frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (4.8)$$

Hız bileşenleri (u,v,w), hem kartezyen koordinat sisteminde (x,y,z) hem de silindirik koordinat sistemi (r,θ,z) için tanımlanmaktadır. *R* katsayısı koordinat sistemine bağlıdır ve silindirik koordinat sistemi kullanıldığında geçerli olmaktadır. Denklem 4.9'da -y koordinatındaki türevler azimut koordinatındaki türevlere dönüştürülmüştür. Burada, r_m sabit bir referans yarıçapını ifade ederek $R=r_m/r$ ve $y= r_m\ \theta$ olarak tanımlanmaktadır. Kartezyen koordinat sisteminde *R* bir değişmez büyüklüktür ve $\xi=0$ değerini almaktadır.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{r_m}{r}\frac{\partial}{\partial y} \quad (4.9)$$

Türbülans difüzyon terimi (R_{DIF}), türbülans karışım işlemini belirlemek için etkilidir ve üniform özgül kütleye sahip olmayan (sıkıştırılabilir) akışkanlar için Denklem 4.10'da tanımlanmaktadır. Burada, Sc türbülans Schmidt sayısı olarak tanımlanmaktadır. Akışkanlar dinamiğinde, bir akışkanın Schmidt sayısı o akışkanın momentum yayılımının (kinematik viskozite) kütle yayılımına (moleküler difüzyon) oranı olan boyutsuz ve skaler bir büyüklük olarak tanımlanmaktadır (Yeung ve Sreenivasan, 2014). Bir akışkanda eş zamanlı momentum ve kütle difüzyonunun olduğu konveksiyonel süreci ifade etmektedir. Dolayısıyla burada türbülansın olduğu durumlarda kullanılmaktadır (Denklem 4.10).

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}\left(S_c \frac{\mu}{\rho} A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + \mathcal{R}\frac{\partial}{\partial y}\left(S_c \frac{\mu}{\rho} A_y \mathcal{R}\frac{\partial \rho}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(S_c \frac{\mu}{\rho} A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}\right) + \xi S_c \frac{\mu}{\rho}\frac{A_x}{x}\frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (4.10)$$

Kütle kaynağı (sabit bir kontrol hacim için aynı zamanda özgül kütle kaynağı olarak bilinir) olan R_{SOR}, gözenekli katı cisimlerin yüzeylerinden hesaplama ağı içerisine doğru kütle enjeksiyonunu modellemek için kullanılmaktadır. Sıkışamaz akışkanlar için özgül kütle sabittir ve Denklem 4.8 içerisindeki R_{DIF} ve $\partial\rho/\partial t$ terimleri 0 olmakta ve Denklem 4.11'deki forma indirgenmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(uA_x\right)+\mathcal{R}\frac{\partial}{\partial y}\left(vA_y\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(wA_z\right)+\xi\frac{uA_x}{x}=\frac{R_{SOR}}{\rho} \tag{4.11}$$

Akışkan hızı bileşenlerini (u,v,w) içeren -x, -y ve -z yönlerindeki Navier-Stokes denklemleri (hareket denklemleri) sırasıyla Denklem 4.12, 4.13 ve 4.14'te verilmektedir (Flow Science, 2002).

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\mathcal{R}\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}+\xi\frac{A_y v^2}{xV_F}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+G_x+f_x-b_x-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(u-u_w-\Delta u_s) \tag{4.12}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\mathcal{R}\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\}+\xi\frac{A_y uv}{xV_F}=-\frac{1}{\rho}\left(\mathcal{R}\frac{\partial P}{\partial y}\right)+G_y+f_y-b_y-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(v-v_w-\Delta v_s) \tag{4.13}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\mathcal{R}\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+G_z+f_z-b_z-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(w-w_w-\Delta w_s) \tag{4.14}$$

burada; G_x, G_y ve G_z yerçekimi ve merkezkaç gibi dış kuvvetlere neden olan ivmeleri; f_x, f_y ve f_z viskoz terimlerinden kaynaklı ivmeleri ve b_x, b_y ve b_z sırasıyla -x, -y ve -z koordinatlarında gözenekli ortamdaki akım kayıp ve kazanımlarını göstermektedir. Dinamik viskozite (μ) için viskoz ivmeler sırasıyla -x, -y ve -z koordinatları için sırasıyla Denklem 4.15 ile 4.17 arasında verilmektedir. Bu denklemlerde bulunan kontrol hacime ait kayma gerilmeleri terimleri Denklem 4.18 ile 4.23 arasında verilmiştir.

$$\rho V_F f_x=w_{S_x}-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(A_x\tau_{xx}\right)+\mathcal{R}\frac{\partial}{\partial y}\left(A_y\tau_{xy}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(A_z\tau_{xz}\right)+\frac{\xi}{x}\left(A_x\tau_{xx}-A_y\tau_{yy}\right)\right\} \tag{4.15}$$

$$\rho V_F f_y=w_{S_y}-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(A_x\tau_{xy}\right)+\mathcal{R}\frac{\partial}{\partial y}\left(A_y\tau_{yy}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(A_z\tau_{yz}\right)+\frac{\xi}{x}\left(A_x+A_y\tau_{xy}\right)\right\} \tag{4.16}$$

$$\rho V_F f_z=w_{S_z}-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(A_x\tau_{xz}\right)+\mathcal{R}\frac{\partial}{\partial y}\left(A_y\tau_{yz}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(A_z\tau_{zz}\right)+\frac{\xi}{x}\left(A_x\tau_{xz}\right)\right\} \tag{4.17}$$

$$\tau_{xx} = -2\mu\left\{\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \mathcal{R}\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x}\right)\right\} \tag{4.18}$$

$$\tau_{yy} = -2\mu\left\{\mathcal{R}\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \mathcal{R}\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x}\right)\right\} \tag{4.19}$$

$$\tau_{zz} = -2\mu\left\{\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \mathcal{R}\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x}\right)\right\} \tag{4.20}$$

$$\tau_{xy} = -\mu\left\{\frac{\partial v}{\partial x} + \mathcal{R}\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi u}{x}\right\} \tag{4.21}$$

$$\tau_{xz} = -\mu\left\{\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right\} \tag{4.22}$$

$$\tau_{yz} = -\mu\left\{\frac{\partial v}{\partial z} + \mathcal{R}\frac{\partial w}{\partial y}\right\} \tag{4.23}$$

u_w, v_w ve w_w parametreleri, GMO modellerinde kullanılan parametreler olup bir kütle kaynağı için sıfır olmayan kaynak bileşeninin hızını temsil etmektedir. u_s, v_s ve w_s parametreleri, kaynağın kendisine göre kaynağın yüzeyindeki akışkan hızlarını temsil etmektedir. $U_s=(u_s,v_s,w_s)$ olarak tanımlanmakta ve her kontrol hacimde Denklem 4.24'te verildiği şekilde hesaplanmaktadır. Burada, dQ debiyi, ρQ kaynaktaki akışkanın kütlesel debisini, dA hücredeki kaynağın yüzey alanını ve $\bar{n}$ yüzeye normal vektörü ifade etmektedir.

$$U_s = \frac{dQ}{\rho Q dA}\vec{n} \tag{4.24}$$

Çok fazlı akımlarda ve ısı transferi olaylarında yaygın şekilde kullanılan FLOW-3D, çok ölçekli ve çok fizikli akım problemlerini modelleyebilmektedir. Zamana bağlı, üç boyutlu çözümler elde etmek amacıyla akışkanların KTDD formundaki hareket denklemlerini son derece uzmanlaşmış sayısal teknikler aracılığıyla çözmektedir.

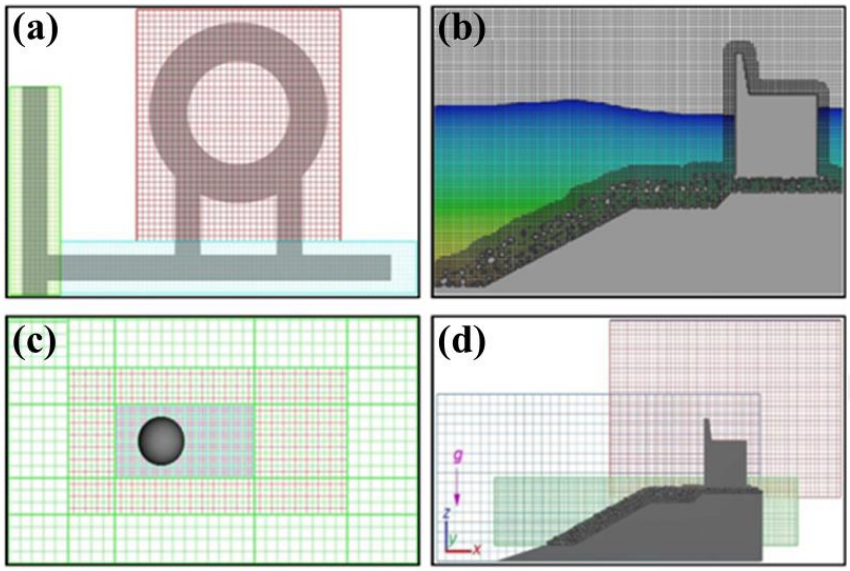
4.2.2 Hesaplama Ağı Yapısı

FLOW-3D içerisinde çeşitli hesaplama ağı oluşturma teknikleri bulunmaktadır. FLOW-3D çoklu bloklardan oluşan yapılandırılmış ağ (structural mesh) sistemi kullanmaktadır. FLOW-3D yapılandırılmamış ağ yapısı (unstructural mesh) kullanmamakta ve hücreler sadece dikdörtgen prizma şeklindeki bloklardan oluşmaktadır (Flow Science, 2002). Bu özellik çözücü kodlara (algoritmalara) çalışırken hatalarla başa çıkma yeteneği (robustness) ve yüksek verimlilik sağlamaktadır. Yapılandırılmamış hesaplama ağlarında iterasyon sayıları artmakta ve kütle korunumu problemleri meydana gelerek çözücüler zorlanmaktadır.

Çoklu hesaplama ağı bloklarının kullanılması sayesinde, ilgili alanlarda (marjinal bölgelerde) yerel iyileştirmeler (hücre boyutunu küçülterek hücre sayısını arttırmak-refinement) yapmak mümkün olabilmektedir. Böylece bir sayısal model için gereken hesaplama kaynaklarında önemli bir azalma yaratılabilmekte ve zamandan tasarruf yapılabilmektedir. Bağlantılı, sınır uyumlu, iç içe geçmiş ve kısmen örtüşen ağ blokları gibi çeşitli çok bloklu ağ oluşturma seçenekleri bulunmaktadır (Şekil 4.3). Bunlar küçük engelleri, karmaşık geometrileri ve genel alan boyutundan daha küçük olan ince kanalları doğru bir şekilde çözmek için kullanılmaktadır. Bağlantılı ağ blokları (linked mesh) yalnızca farklı hesaplama ağlarını birbirine bağlamaya ve bu sayede hesaplama ağındaki hücrelerin toplam sayısını azaltmaya yaramaktadır. Ölçekte keskin değişiklikler olan düzensiz şekilli geometrileri çözmek için sınır uyumlu ağ yapısı (conforming mesh) blokları kullanılmaktadır. İç içe geçmiş ağ blokları (nested mesh) incelenen özel bir bölgenin etrafındaki hücre sayısını (çözünürlüğü) artırmaya yaramaktadır. Duvar sınır koşulunda viskoz etkilerin önemli olduğu bölgede, bir rijit cisim ardında art-iz bölgenin incelendiği oyulma problemlerinde veya serbest yüzeyin incelendiği bölgelerde bu ağ yapısından yararlanılmaktadır. Buna benzer olarak kısmen örtüşen ağ blokları (partially overlapping mesh) da kullanılabilmektedir. Ayrıca yine ölçekte keskin değişikliklerin olduğu düzensiz şekilli geometriler için de örtüşen ağ blokları yapısından yararlanılabilmektedir. Bu ağ oluşturma teknikleri, kullanıcılara basit ama etkili ağlar oluşturma esnekliği sağlamaktadır. Bu sayede çözücü performansı artırılarak işlem süresi kısaltılmaktadır.

İki veya daha fazla akışkan arasındaki serbest yüzey problemi (su-hava gibi) AH yöntemi ile çözüldüğü daha önceden belirtilmiştir. Bu iki akışkanın etkileşim

bölgesinde daha ince hesaplama ağı hücrelerinin bulunması (diğer bir ifadeyle çözünürlüğün artması) oldukça önemlidir. Bu nedenle, hesaplama ağında en uygun hücre boyutunu belirlemek gerekmektedir. Bu sadece modelin çözünürlüğü için değil, aynı zamanda seçilen algoritmanın akım koşullarına uygun daha istikrarlı bir çözüme ulaşması için de gerekmektedir. Oldukça büyük hücrelerden oluşan bir hesaplama ağında akım davranışı tutarlı bir şekilde modellenememektedir. Bununla birlikte, daha küçük hücrelerden oluşan bir hesaplama ağı yapısı çözüm süresini gereksiz uzatabilmekte ve aşırı bellek yüklenmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, daha kararlı bir sayısal model için hesaplama ağı içerisindeki uygun hücre sayısını belirleme çalışması (mesh independence study) gerçekleştirilmektedir



Şekil 4.3 FLOW-3D hesaplama ağı teknikleri: (a) bağlantılı ağ yapısı (linked mesh), (b) sınır uyumlu ağ yapısı (conforming mesh), (c) iç içe geçmiş ağ yapısı (nested mesh), (d) kısmen örtüşen ağ yapısı (partially overlapping mesh) (Flow Science, 2002)

4.2.3 Model Hataları ve Stabilite Koşulları

Herhangi bir sayısal analiz yönteminde olduğu gibi HAD modellerinde de bazı hata ve belirsizlikler bulunmaktadır. Akışkan hareketini tanımlayan Navier-Stokes denklemleri KTDD olup analitik yöntemler ile çözülememektedir. Bu nedenle ileri seviye sayısal analiz yöntemlerinden yararlanılarak ayrıklaştırma işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bu ayrıklaştırma sürecinde hataların ortaya çıkması mümkün olmaktadır. Çünkü burada bazı kabuller yapılmakta ve belirli hassasiyet seviyesinde kalınmaktadır. Seçilen temel denklemlerle hesaplama ağı içerisinde ilgilenilen akışkanın davranışı yeterince doğru temsil edilmiyorsa bazı hatalar

oluşmaktadır. Üstelik kullanıcının problemin tanımlanmasında veya sonuçların analizinde ve yorumlanmasında hata yapması olasılığı da bulunmaktadır. Oldukça karmaşık olabilen bu problemlerin ve denklemlerin çözümü için çözücü algoritmalar oluşturulmaktadır. Bu algoritmaları içeren kodlar bilgisayar kullanılarak çözülmektedir. Bu durumda bilgisayar kaynaklı veya çözücü kodu kaynaklı hataların da meydana gelmesi mümkün olmaktadır. Bu nedenle bir HAD modeli olan FLOW-3D için sayısal model gerçekleştirirken dikkatli olunması gerekmektedir. İçerisinde bulunabilecek hatalara karşı hata limitleri, stabilite limitleri ve yakınsama kriterleri kullanılarak oluşabilecek hataları yakından takip etmek mümkün olabilmekte ve hatalar minimize edilebilmektedir.

ERCOFTAC (2002)'e göre, hatalara ve belirsizliğe yedi farklı sebep neden olabilmektedir (Maguire, 2011):

- Model hatası ve belirsizlik (Model error and uncertainty): Gerçek akım davranışı ile sayısal model denklemlerinin çözümü arasındaki fark olarak tanımlanan modelleme hataları ve belirsizlikleridir, genellikle denklemlerin yanlış çözülmesinden kaynaklanmaktadır.
- Ayrıklaştırma veya sayısal analiz hataları (Discretisation or numerical error): KTDD'lerin ayrıklaştırırken türevleri temsil etmek için kullanılan sonlu farklar yaklaşımı nedeniyle oluşabilmektedir. Modellenen denklemlerin tam çözümü (analitik) ile sonlu fark noktaları (bir hesaplama ağında bulunan noktalar) üzerindeki sayısal çözüm arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Ağdaki noktaların sayısı arttıkça bu hatanın oluşma ihtimali azalacak ve kullanılan sayısal yöntemin yakınsama derecesine göre (birinci mertebeden ileri farklar, ikinci mertebeden ileri farklar gibi) de belirlenen oranda hata sıfıra doğru yaklaşması beklenmektedir.
- İterasyon veya yakınsama hatası (Iteration or convergence error): Sonlu sayıda ağ noktasında tam yakınsayan çözüm ile tam yakınsamamış çözüm arasındaki fark bu hataya neden olmaktadır (MARNET, 2002). Bu hatalar ancak iterasyon sürecinin süresiz olarak devam etmesine izin verilirse önlenebilmektedir. Elbette bu durum mümkün olmamaktadır. Bilhassa çözücülerin zamandan tasarruf edebilmesi için bazı yakınsama limitleri belirlenerek doğruluk toleranslarına göre iterasyon sayıları ayarlanmaktadır.

- Yuvarlama hatası (Round-off error): Bir parametreye ait bir sayının modelde hesaplanan değeri ile tam gerçek matematiksel değeri arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Bu hatanın oluşma nedeni, bilgisayarların belirli bir değeri yalnızca sınırlı sayıda basamakla (16, 32 ve 64 bit) hafızada tutmasıyla açıklanmaktadır. Diğer bir ifadeyle virgülden sonra kaç basamağın hafızada saklanmasıyla ilgili olmaktadır. Bu hata çok hassas değerlerle çalışılan modellerde sistematik hatalara sebep olabilmektedir. FLOW-3D gibi birçok HAD yazılımında bu hatayı indirgemek adına hafızada tutulan basamak sayısı değiştirilebilmektedir. Elbette bu durum hafıza miktarını ve çözüm süresini etkilemektedir.
- Uygulama belirsizlikleri (Application uncertainties): Bu hatanın sebebi oluşturulan sayısal modelin gerçekte incelenmek istenilen akışkanlar dinamiği problemini doğru yansıtamamasından kaynaklanmaktadır. Problem karmaşık olduğunda ve doğru tanımlanamadığında bu hatalar ortaya çıkabilmektedir. Örnek verilmesi gerekirse, geometrideki belirsizlikler, sınır koşullarının bilinmezliği, fiziksel özelliklerin eksik değerlendirilmesi veya akımın kararlı mı yoksa kararsız mı olduğuna emin olamama gibi durumlar bu hataya sebep olmaktadır.
- Kullanıcı hataları (User errors): Kullanıcının kodla etkileşiminin herhangi bir aşamasında (yani geometri oluşturma, hesaplama ağı oluşturma, sonuçları irdeleme) meydana gelen hatalar olmaktadır. Kullanıcı ne kadar deneyimli olursa, hata o kadar az meydana gelmektedir.
- Kod hataları (Code errors): Genellikle programlama hataları veya yazılım açıkları (bugs) kaynaklı hatalar olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca bilgisayar donanımındaki derleyicilerden kaynaklı olarak da meydana gelebilmektedir. Bu nedenle bir HAD çözücü kodu endüstriyel alanda ve akademik araştırmalarda kullanılmadan önce kodun ve içerisindeki matematiksel şemanın sağlamasının (verified) yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda oluşturulan sayısal modellerde doğrulama (validation) işlemi bu hatayı önlemek adına yapılmaktadır. Bir HAD çözücü kodunun kanıtlanması çoğu zaman oldukça zor bir süreç olabilmektedir. FLOW-3D yazılımı içerisindeki çözücü kodların sağlaması (matematiksel şemaların geçerliliği) gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda bahsedilen hata ve belirsizlikleri engellemek adına sonlu farklar ve sonlu hacimler yöntemlerinde çözüm esnasında dikkat edilmesi gereken stabilite koşulları bulunmaktadır. Zaman adımı bunlar arasında en belirleyici unsur olarak kabul edilmektedir. FLOW-3D içerisinde zaman adımı belirlenirken uyulan kısıtlamalar sayısal analizin stabilitesini koruyabilmektedir. FLOW-3D içerisinde zamandan tasarruf ederek hızlı bir sonuç verebilmek için zaman adımı boyutu, kararlılık sınırlarını aşmadan, doğruluğu etkilemeden veya süreklilik koşulunu çiğnemeden mümkün olduğu kadar büyük olacak şekilde otomatik olarak ayarlanmaktadır. Gerektiğinde, iterasyon seçeneklerine ve belirlenen hata oranına bağlı kalınarak basınç veya sıcaklık iterasyonlarına karşılık gelen nominal değerlerden büyük olduğunda zaman adımı boyutu otomatik azaltılmaktadır. Optimum sonuçlara ulaşmak için otomatik zaman adımı özelliği büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca zaman adımları manuel olarak da belirlenebilmektedir (Flow Science, 2002). Ancak bu durumda Denklem 4.25'de verilen stabilite koşulunu sağlayan zaman adımlarının seçilmesi gerekmektedir. Burada, CON stabilite faktörü olup genellikle basitleştirilmiş bir stabilite analizi için 0.45 olarak alınabilmektedir. Sıkıştırılabilir akışkanlar için bu değer 0.25'e kadar düşürülebilmektedir.

$$\Delta t < CON * \min\left(\frac{V_F \Delta x_i}{A_x u}, \frac{V_F \Delta y_j}{\mathcal{R} A_y v}, \frac{V_F \Delta z_k}{A_z w}\right) \tag{4.25}$$

Yüzey dalgalarının yayılmasına ilişkin zaman adımı büyüklüğü seçilirken stabilite koşulu olarak, bu dalgaların bir zaman adımında birden fazla hücreyi geçmemesi beklenmektedir. Aksi halde stabil olmayan sayısal difüzyon problemi ortaya çıkmaktadır. Eğer z yüzeye normal yön ise ve G_z ise -z yönündeki ivme ise, o zaman zaman adım Denklem 4.26'daki gibi belirlenebilmektedir.

$$\Delta t < \frac{\sqrt{V_F}}{2G_z \Delta z_k \left(\frac{A_x}{x_i^2} \max\left(1, \frac{\Delta x_i}{\Delta z_k}\right) + \frac{A_y \mathcal{R}_i^2}{y_j^2} \max\left(1, \frac{\Delta y_i}{\mathcal{R}_i \Delta z_k}\right)\right)} \tag{4.26}$$

Serbest yüzey içeren her hücre için -x ve -y yönlerinde de benzer limitlerin uygulanması gerekmektedir. Sığ su akımları durumunda, zaman adımı stabilite limiti yine derinlik boyunca belirlenen yüzey dalga hızı tarafından belirlenmektedir (Denklem 4.27). Burada, F hücrede AH yöntemindeki akışkan fraksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Flow Science, 2002).

$$\Delta t < 0.5 \frac{\min\left\{\Delta x_i, \frac{\Delta y_i}{\mathcal{R}_i}\right\}}{\sqrt{F \Delta z_k G_z}} \tag{4.27}$$

4.2.4 Sınır Koşulları

HAD modellemesinde, KTDD çözülmesi için kullanılan sonlu farklar veya sonlu hacimler yöntemleri sınır koşullarına ihtiyaç duymaktadır. FLOW-3D çeşitli sınır koşulları içermekte olup önemli olan sınır koşulları aşağıda açıklanmaktadır.

Simetri Sınır Koşulu (Symmetry): Yansıma sınır koşulu olarak da ifade edilmektedir. Simetri sınır koşuluna komşu hücredeki akışkana ait herhangi bir parametre bu sınır koşulunda tamamen aynı olarak tanımlanmaktadır. Burada bir parametrenin konuma ve zamana göre türevi sıfır olarak kabul edilmektedir. Kısaca o hücredeki bir u hız değeri simetri sınır koşulunda da aynı u hız değerindeymiş gibi kabul edilerek modelleme gerçekleştirilmektedir. Böylece çözüm süresinden ve hafızadan tasarruf edilebilmektedir. Bir akışkanlar dinamiği probleminde tüm bir alanı modellemek yerine sadece incelenen alanı modellemek mümkün olabilmektedir. Örneğin, bir dalga kanalı modellemesinde dalga hareket yönüne dik olan kenarlarda bu sınır koşulu kullanılmaktadır. Benzer şekilde simetri sınır koşulu kullanılarak bir dolu savak üzerindeki akım modellendiğinde sadece belirli bir kesit göz önünde bulundurulmaktadır.

Hız Girişi Sınır Koşulu (Specified Velocity): Yukarıda daha önceden ifade edilen kaynak tanımlaması şeklinde gerçekleşmektedir. Diğer bir ifadeyle hesaplama alanına bir girdi söz konusu olmaktadır. Bu sınır koşulunda, sabit üniform vektörel hız (-x, -y ve -z yönlerinde) tanımlanabildiği gibi aynı zamanda zamana göre değişen vektörel hızlar da tanımlanabilmektedir. FLOW-3D içerisinde hız girişi sınır koşulunda hangi eksende hangi seviyeye kadar akış olacağı veya o sınır koşuluna ait yüzeyin yüzde kaçında akış olacağı tanımlanabilmektedir.

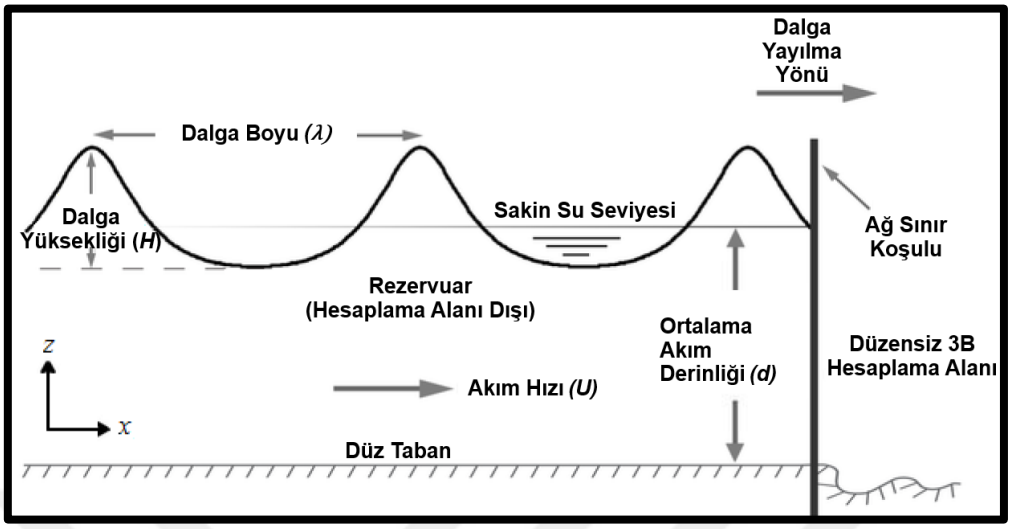
Debi Giriş Sınır Koşulu (Volume Flow Rate): Hesaplama ağına giren belirli bir zamandaki bir akışkan kütlesinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Aslında tamamen hız girişi sınır koşuluna benzer bir sınır koşulu olarak kabul edilmektedir. Fakat farklı olarak burada hem girdi hem de çıktı olabilecek bir kaynaktan söz edilebilmektedir. Örneğin, bir borudan akışkanın belirli bir süre içerisinde ne kadar deşarj olabileceği veya girebileceği bu sınır koşuluyla tanımlanmaktadır.

Basınç Sınır Koşulu (Specified Pressure): Hesaplama ağından basınç etkisinin bulunduğu sınır koşulu olarak tanımlanmaktadır. Bu sınır koşulunda iki tip durumdan söz edilmektedir. Bunlar, durgunluk basınç kaynağı ve statik basınç kaynağı olarak ifade edilmektedir. Bir durgunluk basınç (stagnation pressure) kaynağında, akışkanın bölgeye sıfır hızla girdiği varsayılmaktadır. Bir roketin arkasında ortaya çıkan akışkan veya sönen bir balon, durgunluk basınç kaynağının bazı örnekleri olarak verilebilmektedir. Mansapta bulunan sabit su seviyeli bir rezervuara doğru su akımı modellendiğinde, bu durgunluk basınç sınır koşulu ile mansapta su derinliğine göre hidrostatik basınç tanımlanmaktadır. Statik bir basınç (static pressure) kaynağında fiziksel olarak atmosfere açılan bir kapak gibi davranmaktadır. Hesaplama ağı içerisindeki rölatif basınç ile bu sınır koşulundaki basınç arasında fark olduğunda akım basıncın az olduğu doğrultuya yönelmektedir. Bu duruma uzun düz bir borudan dışarı çıkan akışkan örnek olarak verilebilmektedir. Fakat içerisinde bir vakum basıncı söz konusu ise bu sefer içeri doğru bir akışkan girişi olması gerekmektedir.

Çıkış Sınır Koşulu (Outflow): Bu sınır koşulu akışkanın herhangi bir etki ve değişime uğramadan hesaplama ağından çıkıp gitmesine olanak sağlamaktadır. Sınır koşulunda fiziksel özelliklerin bilinmediği durumlarda outflow sınır koşulu, statik bir basınç kaynağına sahip basınç sınır koşulu yerine kullanılabilmektedir. Örneğin deşarj yapan bir borunun modellenmesinde borunun çıkışındaki ortam bilinmiyorsa bu sınır koşulundan yararlanılmaktadır. Benzer şekilde dalgaların modellenmesinde bir dalganın yansımadan hesaplama ağını terk etmesi bu sınır koşulu ile sağlanabilmektedir. Ayrıca FLOW-3D güncel sürümlerinde outflow yerine dalganın yansımadan ve etkileşime girmeden hesaplama ağını terk edebileceği “wave outflow” sınır koşulu da bulunmaktadır.

Dalga Sınır Koşulu (Wave): Hesaplama ağı içerisine giren dalga profillerinin tanımlanmasına imkân vermektedir. FLOW-3D içerisinde bulunan dalga sınır koşulunda lineer (Airy) dalgalar, soliter dalgalar, Stokes ve Cnoidal dalgalar (Fourier serisi yöntemiyle), Stokes dalgalar (Fenton’un 5.mertebeden dalga teorisiyle) modellenebilmektedir (Şekil 4.4). Burada akım hızı, dalga boyu, dalga uzunluğu, dalga periyodu ve ortalama akım derinliği gibi parametreler tanımlanmaktadır. Ayrıca, FLOW-3D içerisinde spektral dalga verisi tanımlanabilmektedir. Doğrudan enerji spektrum dosyası yüklenebileceği gibi

Pierson-Moskowitz ve JONSWAP spektrumları tanımlamak gibi alternatifler bulunmaktadır.

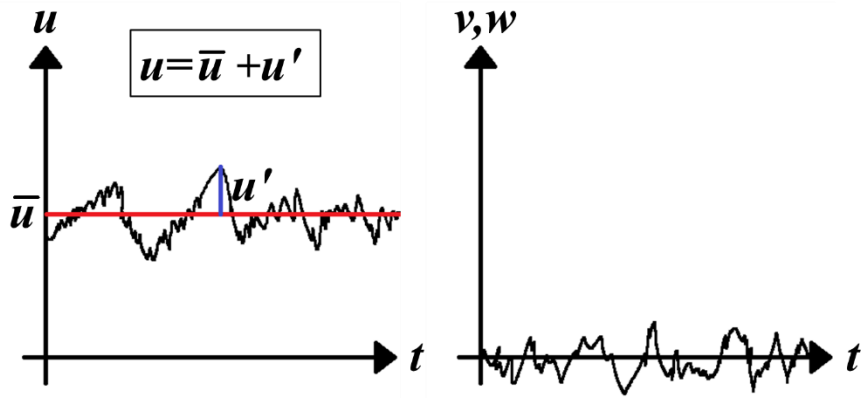


Şekil 4.4 Stokes ve Cnoidal (Fourier serisi yöntemi) dalga sınır koşulunda dalga profilinin belirlenmesi (Flow Science, 2002)

Duvar Sınır Koşulu (Wall): Akışkanın katı cidarla etkileştiği bölgelerde kullanılmaktadır. Burada taban pürüzlülüğü tanımlanarak akışkanın katı cidarla etkileştiği bölgelerde viskoz etkiler hesaba katılabilmektedir. Durgun sabit duvar sınır koşullarının yanında hareketli duvar sınır koşulları da kullanılabilmektedir. Türbülans ve viskoz gerilmelerinin doğru hesaplanabilmesi için akım koşullarına göre duvar sınır koşulları yakınında ekstra küçük hücrelerden oluşan hesaplama ağı yapıları kullanılması gerekebilmektedir.

4.2.5 Türbülans Kapama Modelleri

Doğadaki akım davranışları göz önüne alındığında birçok yerde türbülanslı akım görülmektedir. FLOW-3D içerisinde türbülanslı akımı modellemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Türbülanslı bir akımda akım içerisinde bir noktada hız zamansal olarak (u,v,w,t) ölçüldüğünde çalkantılı bir hız diyagramı elde edilmektedir. Zamansal ortalama alındığında ise ortalama hız elde edilmekte ve aslında Navier-Stokes denklemlerinde bu ortalama hız bileşenleri ($\bar{u}$) kullanılmaktadır (Şekil 4.5). Fakat çalkantı hızlarından (u') kaynaklı akışkan tabakaları içerisinde Reynolds gerilmeleri oluşmaktadır.



Şekil 4.5 Zamansal çalkantı hız bileşenleri ve ortalama hız

Reynolds gerilmelerinin Navier-Stokes denklemlerine eklenmesiyle, süreklilik ve -x, -y ve -z yönlerindeki hareket denklemlerindeki bilinmeyen sayısı artmaktadır. Navier-Stokes denklemlerinde bulunan u,v,w hızları ve P basıncı olmak üzere 4 bilinmeyen sayısı hızlardaki çalkantıların (u', v', w') dahil edilmesiyle 10 bilinmeyen olmaktadır. Dolayısıyla Navier-Stokes denklemleri -x, -y ve -z yönlerinde sırasıyla Denklem 4.28, 4.29 ve 4.30 haline dönüşmektedir. Bu denklemlerde çalkantı hızından kaynaklı 9 adet ek bilinmeyen terim görülse bile gerilme tensöründeki simetriden kaynaklı olarak aslında ekstra bilinmeyen sayısı 6 adede indirgenmektedir. 4 denklem ile 10 bilinmeyen çözmek analitik olarak imkânsız olmaktadır. Dolayısıyla bu ekstra 6 bilinmeyen için türbülans kapama modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}+\bar{w}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)=X-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x}+\mu\nabla\bar{u}-\rho\left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}\right) \tag{4.28}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}+\bar{w}\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right)=Y-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x}+\mu\nabla\bar{v}-\rho\left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z}\right) \tag{4.29}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}+\bar{w}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)=Z-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x}+\mu\nabla\bar{w}-\rho\left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z}\right) \tag{4.30}$$

Temelde üç farklı türbülans modelleme yaklaşımı bulunmaktadır. Bunlar Reynolds ortalamalarının alındığı ve hız çalkantılarının istatistiksel olarak modellendiği Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS) yöntemi, türbülans kaynaklı oluşan büyük eddy bileşenlerinin doğrudan hesaplandığı, küçük eddy bileşenlerinin ise modellendiği Büyük Eddy Benzeşimi (Large Eddy Simulation, LES) yöntemi ve doğrudan sayısal olarak bütün türbülans

eddylerinin modellenerek gerçek doğa koşullarına en yakın sonucu veren Doğrudan Sayısal Benzetim (Direct Numerical Simulation, DNS) yöntemi olarak sıralanmaktadır. DNS yöntemi oldukça fazla zaman, işlemci gücü ve hafıza gerektirdiğinden mühendislik uygulamalarında kullanımı pek yaygın değildir ve FLOW-3D içerisinde de mevcut bulunmamaktadır.

RANS modeller ise kendi içerisinde sıfır denklem modeli, tek denklem modelleri, çift denklem modelleri ve altı denklem modeli olmak üzere ayrılmaktadır. Genellikle burada enerji denkleminden yararlanılmaktadır. En yaygın kullanılan parametre türbülans kinetik enerjisi (k) olmaktadır. Sıfır denklem modeli, en yaygın ve en temel türbülans modellemesi olarak kabul görmekte ve Prandtl Karışım Uzunluğu yaklaşımına dayanmaktadır. Tek denklem modelleri, doğrudan türbülans kinetik enerjisini kullanmaktadır. İki denklem modelleri ise k-ε türbülans modeli ve k-ω türbülans modelleri olarak iki ana yaklaşıma dayanmaktadır. Ayrıca bu modellerin geliştirilmiş versiyonları da literatürde farklı sayısal modeller için mevcut olmaktadır. k-ε türbülans modelinde ε türbülans kaybı miktarı olup uzunluk ölçeğini temsil etmektedir. k-ω türbülans modelinde bulunan ω ise türbülans dağılım çözülme oranını ifade etmektedir. Altı denklem modeli ise her bir Reynolds gerilmesinin ayrı ayrı çözmektedir. Dolayısıyla altı denklem oluşturarak türbülans kapama problemini çözmekte ve Reynolds Stress Model (RSM) modeli olarak adlandırılmaktadır. FLOW-3D içerisinde Prandtl karışım uzunluğu (sıfır denklem); türbülans enerji modeli (bir denklem); k-ω, k-ε ve geliştirilmiş versiyonu olan Renormalization Group (RNG) k-ε (iki denklem); ve Büyük Eddy Benzeşimi (LES) türbülans modelleri kullanılabilmektedir.

4.2.6 Sonuçların İrdelenmesi

HAD modellemesinde sonuçların irdelenmesi (art-işlemler), sayısal modelin doğrulaması için kontrol yapılması ve görselleştirerek simülasyon haline getirmesi oldukça önemli bir aşama olmaktadır. FLOW-3D, FlowSight adıyla bilinen çıkış verilerinin sonradan işlenmesi ve görselleştirilmesi gelişmiş bir görselleştirme aracı kullanmaktadır. Ayrıca FLOW-3D için FLOW-3D POST yazılımı son yıllarda kullanılan yeni bir veri işleme ve görselleştirme aracı olarak kabul görmüştür. Birden fazla simülasyon sonucunu aynı anda analiz etme ve karşılaştırma, hacim oluşturma, zamansal ortalamalar alma, boyutsuz parametreler elde etme, zamanla değişen iki ile üç boyutlu animasyonlu grafikler ve videolar oluşturma, akım

çizgilerini hareketli (vektörel) oklar veya konilerle birlikte görselleştirme gibi imkanlar bulunmaktadır. Sonuçların irdelenmesinde kullanılan bu yazılımlar farklı simülasyon verilerini karşılaştırmalı olarak gösterdiği için parametrik çalışmaya olanak sağlayan bütünleşmiş grafik araçları olarak kabul görmektedir.

4.3 Sayısal Modelin Kurulumu

Bu tez çalışması kapsamında, mevcut deney sistemi kullanılarak kıvrımlı kanal üzerinde iki farklı sayısal modelleme gerçekleştirilmiştir. İlk modelleme kararlı akımın kıvrımlı kanaldaki davranışını incelemeye yönelik iken, ikinci modelleme tsunami dalgasının kıvrımlı kanallarda ilerleyişini araştırmayı amaçlamaktadır. Her iki sayısal modelin doğrulanması için deneysel modellemeden elde edilen veriler kullanılmıştır. Modellerde uygun hesaplama ağı belirleme çalışmaları, türbülans kapama modelinin seçimi ve sınır koşullarının tanımlanması titizlikle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sayısal modellerin doğruluk seviyesini değerlendirmek üzere kullanılan hata metrikleri detaylı şekilde açıklanmıştır.

4.3.1 Kıvrımlı Kanalda Kararlı Akımın Modellenmesi

Kıvrımlı kanalda kararlı akımın sayısal olarak modellenmesi için ilk olarak uygun hesaplama ağı hücre boyutu ve hücre sayısı belirleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 0.1 m, 0.05 m, 0.02 m ve 0.015 m olmak üzere dört farklı hücre boyutu değerlendirilmiştir. Farklı hücre boyutları için oluşturulan her modelde, belirli bir noktadaki hız parametresinin değişimi, akım doğrultusundaki hız büyüklüklerine ait hata metriklerinin ölçümleri ve FAVOR ile oluşturulan kanal kıvrımlarındaki yüzey yapısı dikkate alınmıştır. En uygun hücre boyutunu ve türbülans kapama modelini belirlemek için Ortalama Mutlak Bağıl Hata (Mean Absolute Relative Error, MARE, %) ve Ortalama Karekök Hata (Root Mean Square Error, RMSE) hata metrikleri tercih edilmiştir (sırasıyla Denklem 4.31 ve 4.32). Şekil 4.6a'da, akım doğrultusundaki hız profillerine ait hata metrikleri dikkate alındığında 0.02 m'lik hücre boyutunun en uygun sonucu verdiği görülmektedir.

Aslında, tüm hücre boyutları için önemli bir hata farkı bulunmamaktadır. Ancak, ölçüm konumlarındaki derinlik boyunca hız profilleri analiz edildiğinde, daha küçük hücre boyutlarına (0.02 m ve 0.015 m) sahip modellerin yüzey hızlarını, tabana yakın hızları ve derinlik boyunca maksimum hızın meydana geldiği

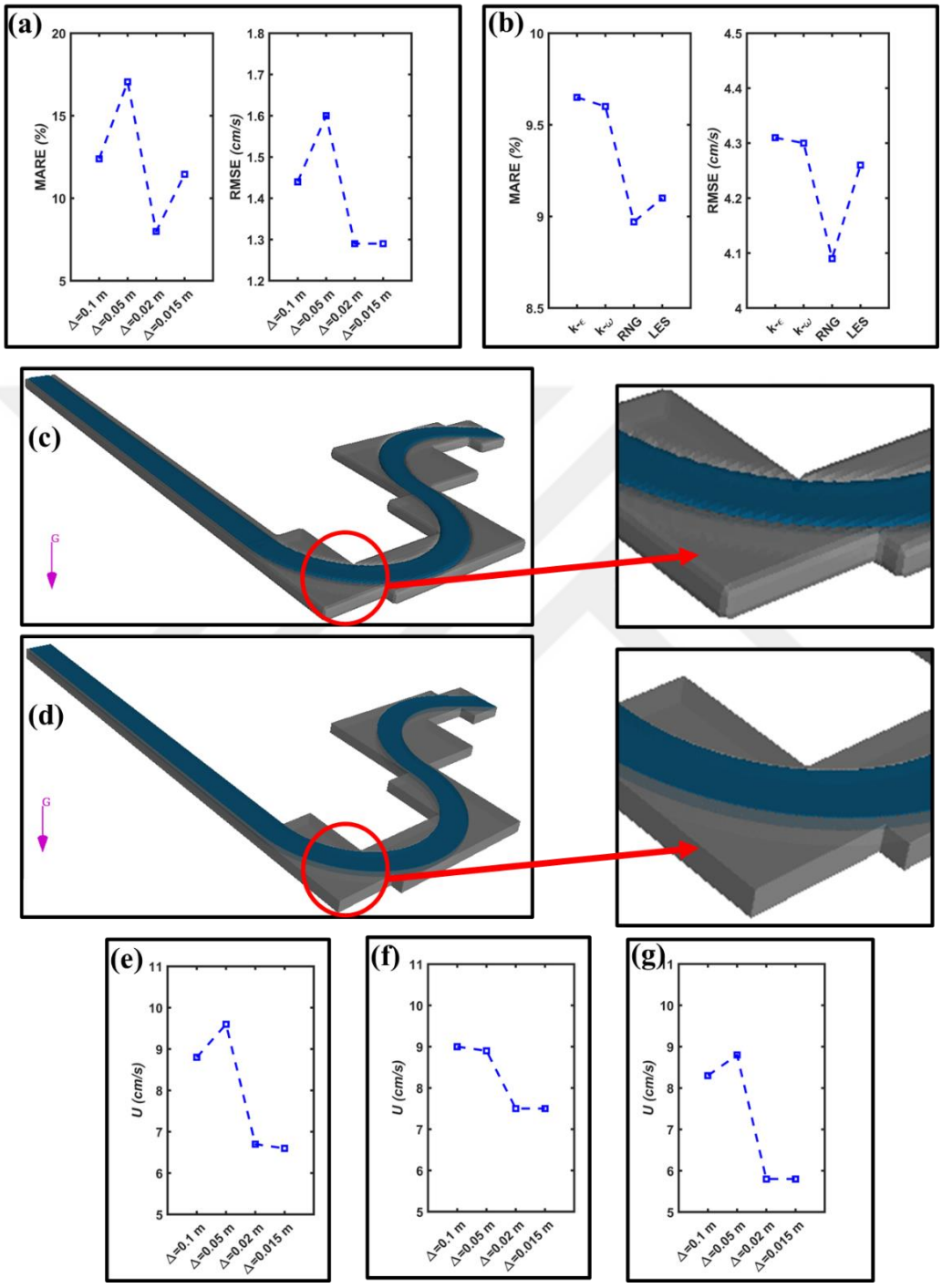
noktaları tespit etmede daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Daha da önemlisi, FAVOR ile oluşturulan hesaplama ağı yüzeyleri dikkate alındığında daha büyük hücre boyutlarında (0.1 m ve 0.05 m) FAVOR yönteminin kavisli kanal geometrisini yakalamakta başarısız olduğu görülmüştür (Şekil 4.6c ve 4.6d). Ayrıca, üç ölçüm noktasında farklı hücre boyutlarına göre akım yönündeki hız değerinin değişimi incelenmiş ve sonuç olarak 0.02 m ve 0.015 m hücre boyutlarında değişimin sabitlendiği görülmüştür (Şekil 4.6e, 4.6f ve 4.6g). Uygun hesaplama ağı çalışmasında belirli bir parametrenin değişmediği hücre boyutlarında, o sayısal model için uygun hücre boyutunun belirlendiği anlaşılmaktadır. Bu ölçüm noktaları, sayısal model için sınır tabakasındaki hızın tahmin edilmesinin daha önemli olması nedeniyle seçilmiştir. Sonuç olarak, çözümleme zamanından tasarruf ve daha az bellek kullanımı için hesaplama ağında daha az hücre sayısına neden olan 0.02 m'lik hücre boyutu seçilmiştir. Benzer sebeple kıvrımlı kanal geometrisine uygun olarak hesaplama ağı 7 farklı bloğa ayrılmıştır (Şekil 4.7a). Toplamda 2.9 milyon hücreye sahip yedi farklı bloğun boyutları ve giriş ile çıkış sınır koşullarına olan uzaklıkları Şekil 4.7b'de verilmektedir. Denklem 4.31 ve 4.32'de, N toplam veri sayısını, V_{exp} deneysel çalışmada ölçülen verileri ve V_{CFD} HAD modelinden elde edilen verileri ifade etmektedir.

$$MARE = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left|\frac{V_{\exp} - V_{CFD}}{V_{\exp}}\right| \times 100 \tag{4.31}$$

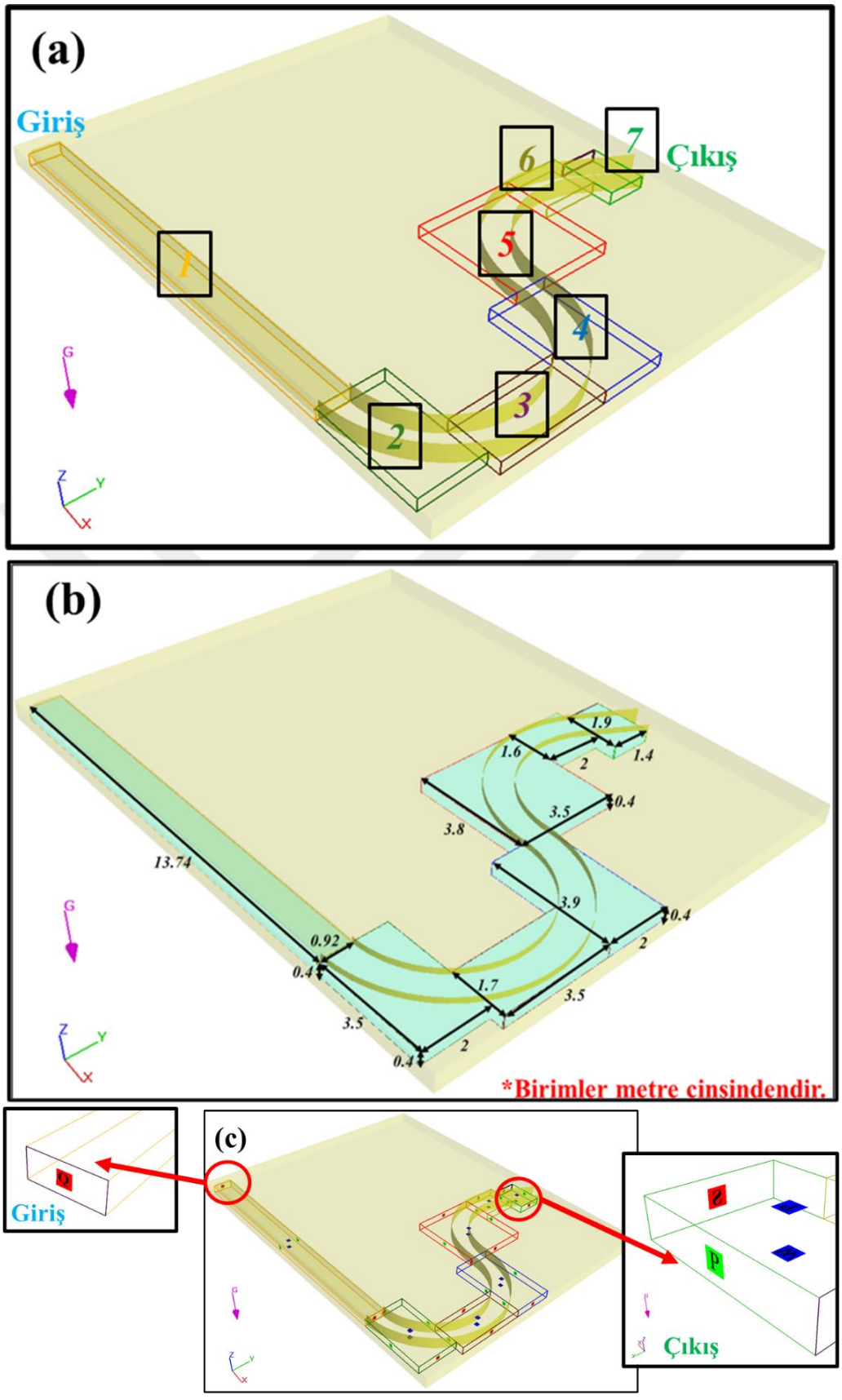
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(V_{\exp} - V_{CFD}\right)^2} \tag{4.32}$$

Deneysel çalışmada oluşturulan 9 deney koşulunun tamamı sayısal modelde uygulanmıştır. Başlangıç koşulları ve sınır koşulları daha gerçekçi fiziksel davranışları yansıtabilecek şekilde ayarlanmıştır. Kıvrımlı kanalın yan duvarları ve tabanı FLOW-3D için mevcut olan FAVOR yöntemi kullanılarak duvar sınır koşulları olarak tanımlanmıştır. Kıvrımlı kanalın (akım alanının) tüm üst yüzeyi, atmosfere açıklığı temsil etmek üzere 0 Pa bağıl basınç ile basınç sınır koşulu olarak kabul edilmiştir. Kanala giren debiyi ayarlamak için kanal girişinde hacimsel debi sınır koşulu kullanılmıştır. Akım alanının çıkış sınır koşulu olarak durgunluk basıncı sınır koşulu kullanılmış ve böylece deneysel koşullara benzer şekilde çıkışta

sabit bir su derinliği korunmuş ve suyun kanaldan deşarjı sağlanmıştır (Şekil 4.7c). Ayrıca, deney koşullarında belirtilen kanaldaki su derinlikleri, akım alanı içerisinde başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.6 (a) Uygun hesaplama ağı hücre sayısını belirlemek için hata metrikleri, (b) uygun türbülans kapama modeli için hata metrikleri, (c) kaba hesaplama ağı-FAVOR, (d) ince hesaplama ağı-FAVOR, (e) memba ölçüm konumunda y=0.005 m'de hızın değişimi, (f) 1A ölçüm konumunda y=0.005 m'de hızın değişimi, (g) 1C ölçüm konumunda y=0.005 m'de hızın değişimi (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)



Şekil 4.7 (a) Kıvrımlı kanala ait FLOW-3D ile oluşturulan BDT ve hesaplama ağına ait ağ düzlemleri, (b) boyutları verilen hesaplama ağı ve (c) sınır koşulları (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

FLOW-3D içerisinde mevcut bulunan Büyük Girdap Benzeşimi ve Reynolds ortalamalı Navier-Stokes tabanlı k-ε, Renormalization Group (RNG) ve k-ω türbülans kapama modelleri test edilerek en uygun model araştırılmıştır. Akım yönündeki hız profillerine ait hata metriklerine göre RNG türbülans modelinin en uygun model olduğu görülmüştür (Şekil 4.6b). Fakat kullanılan tüm türbülans modellerinden elde edilen parametreler karşılaştırıldığında önemli bir farklılık görülmemektedir. FLOW-3D, RNG yaklaşımının türbülanslı ve kayma gerilmesi bulunan akımlar için çözümün doğruluğunu ve kararlılığını artırabileceğini önermektedir (Flow Science, 2019). RNG türbülans modeli özellikle kıvrımlı kanallarda gözlemlenmesi beklenen akım çizgisinde ayrılma ve vorteks koşullarının incelenmesi için tercih edilmektedir (Yakhot, 1992). Ayrıca, bu çalışmada incelenen temel akım parametrelerinden biri olan türbülans kinetik enerjisi parametresini elde etmek için LES yerine RANS tabanlı türbülans kapama modellerinin tercih edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak bu sayısal model için kıvrımlı kanalda akım yapısının incelenmesinde en uygun türbülans kapama modeli olarak RNG türbülans kapama modeli seçilmiştir.

FLOW-3D, Courant sayısının 1'den küçük olmasını sağlayarak stabilite şartını korumak için simülasyon sırasında zaman adımını optimize etmektedir. Bu çalışmada, tüm modeller için zaman adımı ortalama 0.014 s olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, Courant sayısının ortalama 0.130 olduğu görülmüş ve tüm çözümlerde stabilite şartı sağlanmıştır. Ayrıca, tüm modeller için yakınsama kriteri 10^{-4} olarak kullanılmıştır. Basınç ve hız parametrelerine ait süreklilik ve momentum denklemleri birinci dereceden yaklaşımla çözümlenmiştir. Basınç çözücü tipi, kapalı (implicit) olarak seçilmiştir. Sayısal çözüm için iteratif bir yöntem olarak The Improved Generalized Minimal Residual (GMRES) yöntemi tercih edilmiştir. FLOW-3D zamanla değişen akım koşullarına (transient) göre çözüm gerçekleştirmektedir. Bu nedenle, simülasyon süreleri ortalama 450 s olarak ayarlanmış ve bütün modeller için genel olarak 350 s'den sonra kararlı akım durumu gözlemlenmeye başlanmıştır. Ancak nihai sonuçlara ulaşabilmek için akım koşulları kararlı hale gelene kadar çözümler grafik üzerinde takip edilerek gözlemlenmiştir. Bu nedenle, simülasyon sırasında çözücüde kanaldaki su derinliği, derinlik boyunca ortalama hız, ortalama kinetik enerji ve akışkan alanındaki akışkan hacminin sabitliği kontrol edilmiştir.

4.3.2 Kıvrımlı Kanalda Tsunami Dalgasının İlerlemesinin Modellenmesi

Tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesinin sayısal olarak modellenmesi için, deneysel modelin 1:1 ölçekte bilgisayar destekli tasarımı oluşturarak FLOW-3D içerisine akım alanı (flow domain) olarak aktarılmıştır (Şekil 4.8a). Burada tsunami dalgasının kanala giriş yönünü -x doğrultusundaki sınır koşulunda tanımlamak için kıvrımlı kanalda kararlı akımın incelenmesindekinden daha farklı bir geometri koordinat sistemi kullanılmıştır. Benzer sebeple, deney sistemindeki tsunami üreteci ile Prob 1 konumundaki mesafeyi ayarlamak için kanal giriş mesafesi uzatılmıştır. Deneysel çalışmada belirlenen 5 adet ölçüm kesitindeki 8 prob FLOW-3D için de aynı konumlarda tanımlanmıştır (Şekil 4.8b).

Sayısal modelin kurulumunda yine ilk olarak uygun hücre sayısını belirleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 0.08 m, 0.05 m, 0.035 m, 0.02 m ve 0.01 m olmak üzere beş farklı hücre boyutuna sahip hesaplama ağı değerlendirilmiştir. Sırasıyla 85 bin, 356 bin, 1 milyon, 5.6 milyon ve 44.6 milyon hücreye sahip 5 farklı sayısal model oluşturulmuştur. Her modelde su yüzü değişimlerine ait hata ölçümleri ve FAVOR ile oluşturulan kanal kıvrımlarındaki yüzey yapısı dikkate alınmıştır. Burada kıvrımlı kanalda kararlı akım davranışının incelenmesinden farklı olarak, MARE ve RMSE hata metrikleri yerine Normalleştirilmiş Ortalama Karekök Hata (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE, %) ve Maksimum Değerin Hatası (MAX, %) hata metrikleri tercih edilmiştir (sırasıyla Denklem 4.33 ve 4.34). Maksimum hata bir zaman serisindeki maksimum değerin hata miktarını ölçmektedir. Su yüzü değişimlerinde (dalga profillerinde) bu değer pozitif genlik olmaktadır. Kıvrımlı kanalda kararlı akım davranışının incelenmesinden farklı hata ölçüm yöntemlerinin tercih edilmesinin sebebi burada incelenen verilerin birer zaman serisi olmasından kaynaklanmaktadır. Herhangi bir dalga incelendiğinde Ortalama Karekök Hatayı (RMSE) dalga yüksekliği ile normalleştirmek gerekmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) Teknik Memorandumunun OAR-PMEL-135 standardı NRMSE ve MAX için en son izin verilen hata sınırlarını ortaya koymaktadır (Synolakis vd., 2007). Bu standarda göre sayısal modelin doğrulanması için laboratuvar verileri kullanıldığı takdirde izin verilen hata sınırları

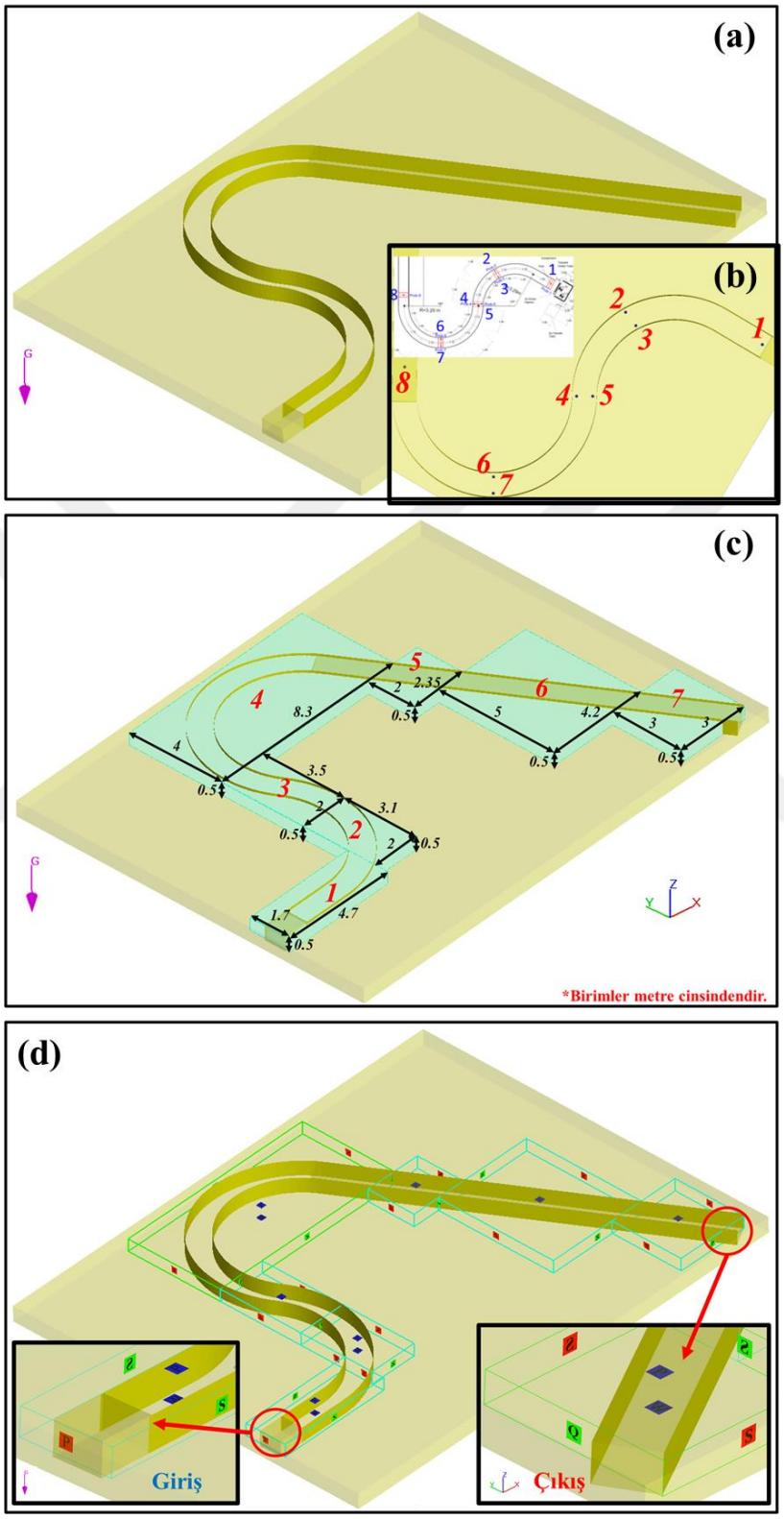
su yüzü değişiminde NRMSE için %15 ve MAX için %10; hız-zaman serisinde NRMSE için %15 ve MAX için %25 olarak kabul edilmektedir (Velioglu vd., 2016). Denklem 4.33 ve 4.34'te, RMSE daha önce açıklanan Ortalama Karekök Hatayı (Root Mean Square Error, RMSE), V_{expmax} deneysel veri setindeki maksimum değeri, V_{expmin} deneysel veri setindeki minimum değeri ve V_{CFDmax} HAD modelindeki maksimum veri değerini ifade etmektedir.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{V_{\exp_{max}} - V_{\exp_{min}}} \tag{4.33}$$

$$MAX = \frac{\left| V_{\exp_{max}} - V_{CFD_{max}} \right|}{V_{\exp_{min}}} \tag{4.34}$$

Tablo 4.1 ve 4.2'de kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimlerine ait hata metrikleri verilmektedir. Her iki hata metriği de dikkate alındığında 0.02 m'lik hücre boyutunun en uygun sonucu verdiği görülmektedir. MAX hata metriği için daha küçük hücre boyutlarına (0.01 m ve 0.02 m) sahip modellerin birbirine yakın pozitif genlik değerleri verdiği görülmektedir. Uygun hücre sayısını belirleme çalışmasında, kabul edilebilir hücre boyutları için belirli bir parametrenin değişim miktarının azalması beklenilmektedir. MAX hatanın birbirine yakın çıkması bu durumu ifade etmektedir. Ayrıca FAVOR ile oluşturulan hesaplama ağı yüzeyleri dikkate alındığında, bu hücre boyutlarına sahip modellerin kavisli kanal geometrisini yakalamakta başarılı olduğu görülmektedir. Şekil 4.9'da farklı hücre boyutlarına sahip modellerden elde edilen tsunami dalga profillerinin karşılaştırılması verilmektedir. Burada, dalga karakteristiklerini tahmin etmede modeller birbirine yakın sonuçlar verse de hücre boyutu arttıkça pozitif genlik yanlış hesaplanmaktadır. Ayrıca 0.08 m, 0.05 m ve 0.035 m hücre boyutlarına (kaba hesaplama ağları) sahip modellerin tsunami dalgası kanal boyunca ilerledikçe su yüzü değişimlerinde öncül dalgadan sonra oluşan bore yapısını yakalamakta başarısız olduğu görülmektedir. 0.01 ve 0.02 m'lik hücre boyutlarına sahip modeller tsunami dalgasına ait su yüzü değişimlerini yakalamakta daha başarılı olmaktadır. Sonuç olarak kıvrımlı kanalda kararlı akımın modellenmesi gibi çözümleme zamanından tasarruf ve daha az bellek kullanımından dolayı hesaplama ağında daha az hücre sayısına neden olan yine 0.02 m'lik hücre boyutunun seçilmesi uygun görülmüştür. Benzer sebeple kıvrımlı kanal geometrisine uygun olarak hesaplama

ağı 7 farklı bloğa ayrılmıştır. Bu blokların boyutları ve giriş ile çıkış sınır koşullarına olan uzaklıkları Şekil 4.8c'de verilmektedir.



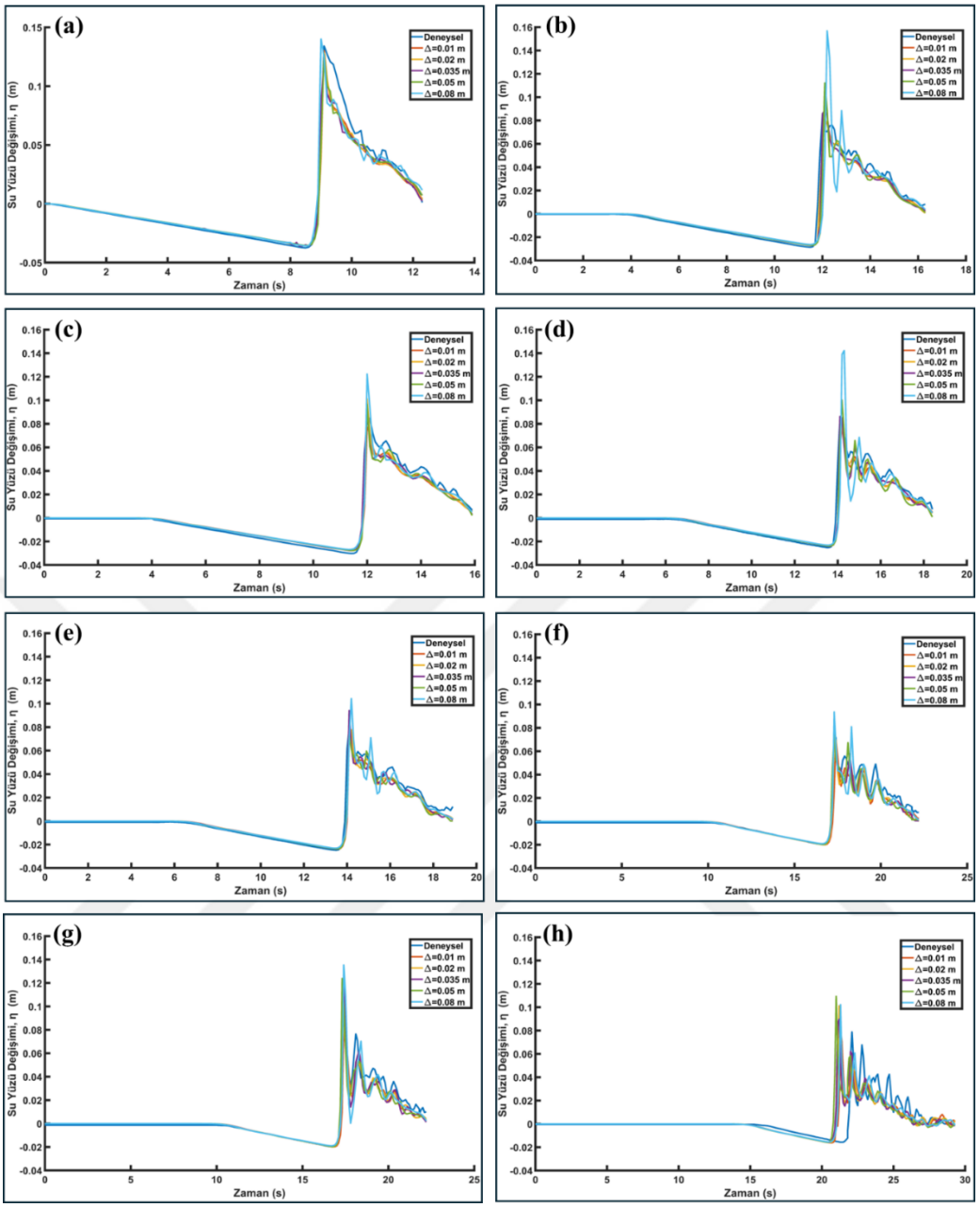
Şekil 4.8 (a) Kıvrımlı kanala ait FLOW-3D ile oluşturulan BDT, (b) FLOW-3D ve deneysel modelde kanal boyunca yerleştirilen problar, (c) boyutları verilen hesaplama ağı ve (d) sınır koşulları

Tablo 4.1 Uygun hesaplama ağı hücre sayısını belirlemek için hesaplanan NRMSE hata metrikleri

Prob No.	Δ=0.01 m	Δ =0.02 m	Δ =0.035 m	Δ =0.05 m	Δ =0.08 m
1	4.27	3.68	4.54	4.37	6.04
2	6.11	4.24	5.88	7.95	11.65
3	4.36	4.22	3.63	4.67	4.70
4	5.27	4.41	5.02	5.84	9.94
5	5.52	4.65	5.18	5.11	6.31
6	5.85	4.06	5.15	5.56	6.41
7	6.97	4.39	6.33	6.04	8.53
8	11.82	11.85	13.14	13.83	12.83
Ort.:	**6.27**	**5.19**	**6.11**	**6.67**	**8.30**

Tablo 4.2 Uygun hesaplama ağı hücre sayısını belirlemek için hesaplanan MAX hata metrikleri

Prob No.	Δ =0.01 m	Δ =0.02 m	Δ =0.035 m	Δ =0.05 m	Δ =0.08 m
1	2.98	4.49	9.36	5.42	4.34
2	6.10	5.65	3.07	30.52	82.59
3	8.78	19.47	9.25	14.08	44.51
4	5.18	1.12	3.72	20.59	71.10
5	6.51	1.00	19.80	7.17	32.75
6	8.72	5.42	16.14	1.99	22.47
7	1.78	1.59	48.92	48.03	61.74
8	27.40	28.45	13.93	38.83	29.74
Ort.:	**8.43**	**8.40**	**15.52**	**20.83**	**43.66**



Şekil 4.9 Farklı hücre boyutlarına sahip modellerden elde edilen tsunami dalga profillerinin karşılaştırılması: (a-h) sırasıyla Prob 1-8 için

Kıvrımlı kanalda kararlı akımın sayısal olarak incelenmesi sırasında, RNG türbülans kapama modelinin uygun olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesinin modellenmesi (aynı geometrik ve fiziksel ortam sebebiyle) için yine RNG türbülans kapama modeli kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada oluşturulan 16 deney koşulunun tamamı sayısal modelde uygulanmıştır. Sayısal modelde başlangıç koşulları ve sınır koşulları daha gerçekçi fiziksel davranışları yansıtabilecek şekilde ayarlanmıştır. Kıvrımlı kanalda kararlı akımın incelenmesinde olduğu gibi, kıvrımlı kanalın yan duvarları ve tabanı

FLOW-3D için FAVOR yöntemi kullanılarak duvar sınır koşulları olarak tanımlanmıştır. Kıvrımlı kanalın tüm üst yüzeyi, atmosfere açıklığı temsil etmek üzere 0 Pa bağıl basınç ile basınç sınır koşulu olarak kabul edilmiştir.

Deney sistemindeki tsunami üretecinde üretilen tsunami dalga profillerini sayısal modelde fiziksel olarak bire bir oluşturmak için kanal girişinde zaman serisi şeklinde basınç sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Kararlı akım koşulları altında gerçekleştirilen deneylerin modellenmesinde kanala giren debiyi ayarlamak için kanal sonunda, tsunami dalgasının ilerleme yönüne zıt olacak şekilde hacimsel debi sınır koşulu kullanılmıştır. Durgun su koşullarında (statik hal) olan diğer deney koşulları için kanalın sonunda sabit su derinliğini korumak adına durgunluk basıncı sınır koşulu kullanılmıştır (Şekil 4.8d). Ayrıca, deney koşullarında belirlenen su derinlikleri (d=15, 20, 25 cm), akış alanı (flow domain) içerisinde başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır.

FLOW-3D ile ilgili stabilite koşulları, kıvrımlı kanalda kararlı akım davranışının modellenmesi bölümünde ayrıntılı verilmiştir. Simülasyon süresince stabilite koşullarını sağlayan parametreler sürekli takip edilmiştir. Tsunami dalgasına ait su yüzü değişimleri zamana bağlı bir değişken olduğu için modellemeler kararlı olmayan akım koşulları (unsteady) altında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle kıvrımlı kanalda kararlı akımın modellenmesinden farklı olarak akım koşullarının kararlı olması beklenmemiş tsunami dalgasının kanal boyunca ilerlemesi tamamlanana kadar (yaklaşık 35 s ile 40 s) çözüm sürdürülmüştür. Fakat kararlı akım koşulları altında (karşı yönden akıntı gelmesi durumunda) tsunami dalgasının ilerlemesinin gerçekleştirildiği modellerde kanal içerisinde kararlı akım koşullarını sağlamak adına tsunami dalgasının kanala girişi 450 s sonra başlatılmıştır. Zaman adımı, simülasyon sürecince tsunami dalgasının kanala girişinden itibaren ortalama 0.0018 s ile 0.005 s arasında değişebilmektedir. Dolayısıyla, Courant sayısının ortalama 0.108 ile 0.3 arasında olduğu görülmüş ve tüm çözümlerde stabilite koşulu sağlanmıştır. Ayrıca, tüm modeller için yakınsama kriteri 10^{-4} olarak kullanılmıştır. Kıvrımlı kanalda kararlı akımın modellenmesinde olduğu gibi, FLOW-3D için basınç ve hız parametrelerine ait süreklilik ve momentum denklemleri birinci dereceden yaklaşım kullanılarak çözümlenmiştir. Basınç çözücü tipi, kapalı (implicit) olarak seçilmiştir. Sayısal çözüm için iteratif bir yöntem olarak yine GMRES yöntemi tercih edilmiştir.

5
KIVRIMLI KANALDA KARARLI AKIMIN İNCELENMESİ

5.1 Giriş

Bu bölümde, kararlı akım koşulları altında kıvrımlı bir kanal boyunca akım davranışı hem deneysel veriler hem de FLOW-3D sayısal modeli aracılığıyla kapsamlı biçimde incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen hız verileri kullanılarak, her bir kıvrım kesitinde hız profillerinin değişimi değerlendirilmiş; özellikle merkezkaç kuvveti ve yanal momentum transferinin etkisiyle iç ve dış kıvrımlar arasında oluşan hız farklılıkları analiz edilmiştir. Literatürde tanımlanan mekanizmalara referansla kıvrımlı kanal boyunca sekonder akım yapısının gelişimi gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, farklı akım derinlikleri ve debileri boyutsuzlaştırılarak elde edilen parametreler doğrultusunda akım mekanizması boyutsuz analiz çerçevesinde de değerlendirilmiştir. Kanal geometrisinde yer alan 180°'lik ilk kıvrım ile onu izleyen ters yönlü 120°'lik ikinci kıvrımın oluşturduğu yapı nedeniyle meydana gelen akım davranışındaki değişimler detaylı olarak tartışılmıştır. Bu bölümde, daha ayrıntılı bir analiz için ADV ile elde edilen deneysel hız verilerinden yararlanılarak derinlik boyunca ortalama hız, kayma hızı, taban kayma gerilmesi ve türbülans kinetik enerjisi gibi kritik hidrodinamik parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler, kıvrımlı kanalda (doğadaki menderesli akarsuları benzeştiren) akımın oluşum mekanizması ve morfolojisi üzerinde etkili olan temel faktörlerin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, kararlı akım koşulları altındaki kıvrımlı kanal boyunca hidrodinamik davranış deneysel olarak incelenmiştir. Takip eden aşamada, aynı parametreler kullanılarak FLOW-3D yazılımı ile birebir ölçekli sayısal model geliştirilmiş ve modelin geçerliliği niceliksel ve niteliksel ölçütler ışığında kapsamlı

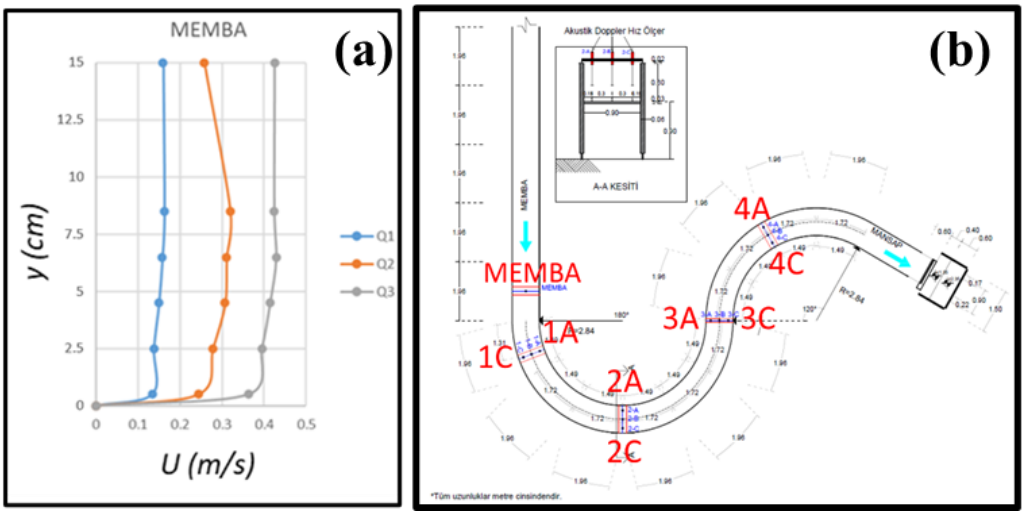
şekilde doğrulanmıştır. Doğrulama sonucunda, sayısal model aracılığıyla kıvrımlı kanaldaki akım davranışı detaylı olarak analiz edilmiştir.

5.2 Kıvrımlı Kanalda Kararlı Akımın Deneysel Olarak İncelenmesi

5.2.1 Akım Hızları

5.2.1.1 d=15 cm Su Derinliği için Farklı Debilerin Karşılaştırılması

Kararlı akım koşullarında 15 cm derinlik için Tablo 5.1'de, d=15 cm su derinliği için farklı debilere göre elde edilen akım doğrultusundaki derinlik boyunca ortalama hızlar (U_d), Reynolds (Re) ve Froude (Fr) sayısı değerleri verilmektedir. Re sayısı Q_1 debisi için 13749 ile 124039; Q_2 debisi için 28454 ile 48516; Q_3 debisi için 44175 ile 76658 arasında, Fr sayısı Q_1 debisi için 0.076 ile 0.132; Q_2 debisi için 0.156 ile 0.267; Q_3 debisi için 0.243 ile 0.421 arasında değişmektedir. Tüm deney koşullarında, Fr<1 olduğundan akımlar nehir rejimindedir. Her bir debi durumu için Reynolds ve Froude sayıları; minimum olarak 4A konumunda maksimum olarak 4C konumunda elde edilmektedir. U_d için ise Q_1 debisi için 0.092 ile 0.160 m/s; Q_2 debisi için 0.190 ile 0.323 m/s; Q_3 debisi için 0.295 ile 0.511 m/s arasında değişmektedir. Kıvrımlı kanalda membadan mansaba doğru, A ölçüm konumu kanalın solunda, B ölçüm konumu eksen ortasında ve C ölçüm konumu kanalın sağ tarafında olacak şekilde belirlenmiştir. Bu bölümde ölçümleri verilen hız dağılımları ana akım (mansap) doğrultusundaki hızlardır. Şekil 5.1'de, memba konumu için elde edilen hız profilleri ve bu ölçüm konumları görülmektedir.



Şekil 5.1 (a) d=15 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için memba ölçüm konumu hız profilleri ve (b) hız ölçüm konumları

Tablo 5.1 d=15 cm derinlik için kararlı akım koşulunda Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için U_d (m/s), Reynolds ve Froude sayısı değerleri

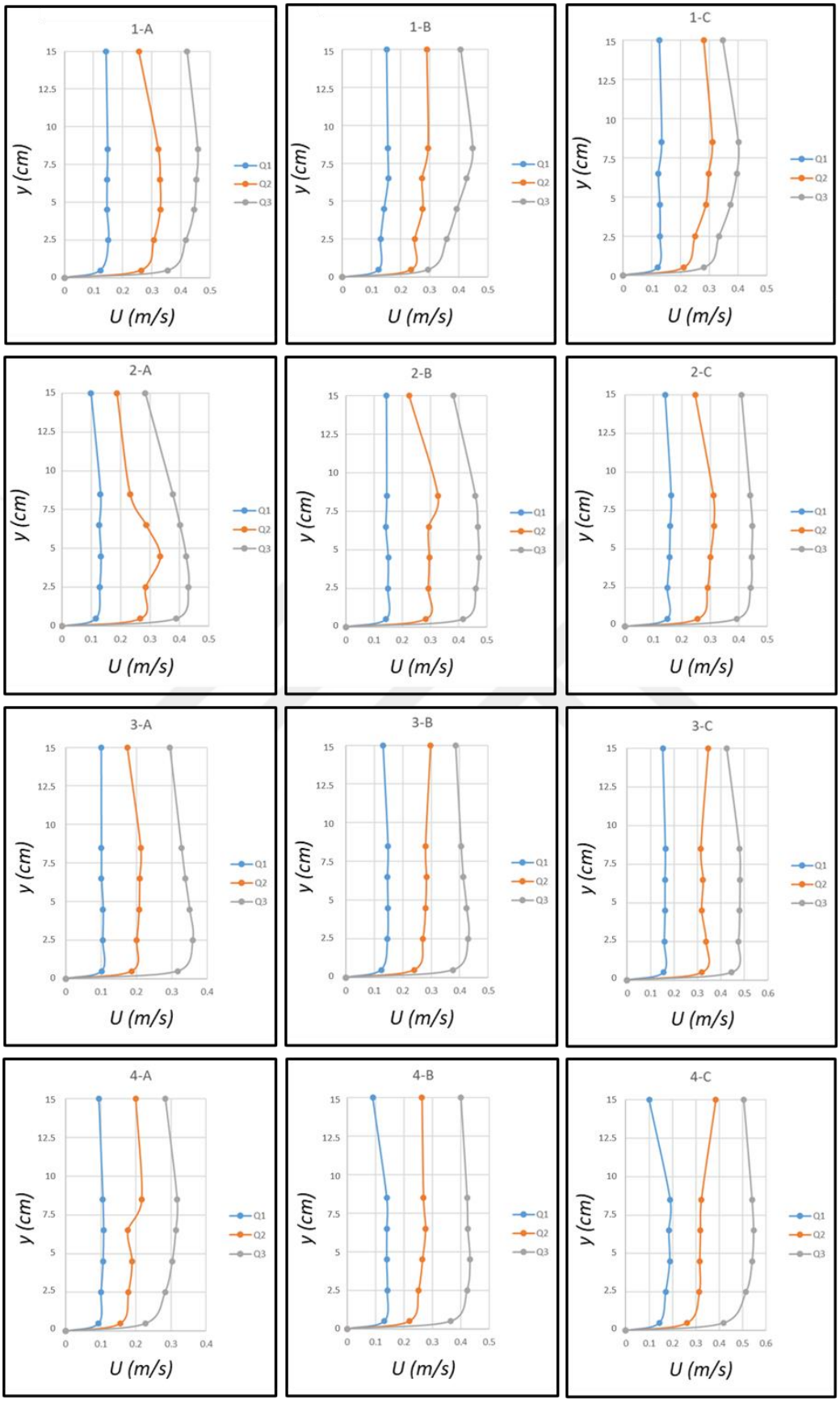
Q (m^3/s)	Ölçüm Konumu	U_d (m/s)	Re	Fr
0.016	**Memba**	0.151	22707	0.125
	1A	0.142	21363	0.117
	1B	0.145	21777	0.120
	1C	0.126	18860	0.104
	2A	0.119	17885	0.098
	2B	0.143	21471	0.118
	2C	0.151	22710	0.125
	3A	0.100	15008	0.082
	3B	0.140	20933	0.115
	3C	0.156	23466	0.129
	4A	0.092	13749	0.076
	4B	0.126	18867	0.104
	4C	0.160	24039	0.132
0.035	**Memba**	0.286	42951	0.236
	1A	0.297	44543	0.245
	1B	0.272	40813	0.224
	1C	0.278	41680	0.229
	2A	0.249	37283	0.205
	2B	0.283	42396	0.233
	2C	0.283	42513	0.234
	3A	0.196	29332	0.161
	3B	0.275	41288	0.227
	3C	0.320	48041	0.264
	4A	0.190	28454	0.156
	4B	0.257	38511	0.212
	4C	0.323	48516	0.267
0.05	**Memba**	0.408	61156	0.336
	1A	0.425	63820	0.351
	1B	0.396	59396	0.326
	1C	0.359	53881	0.296
	2A	0.368	55131	0.303
	2B	0.434	65122	0.358
	2C	0.425	63679	0.350
	3A	0.322	48307	0.265
	3B	0.398	59681	0.328
	3C	0.456	68344	0.376
	4A	0.295	44175	0.243
	4B	0.408	61170	0.336
	4C	0.511	76658	0.421

Akım debisi arttıkça hızlar da beklenildiği gibi artmaktadır. Bu durum bütün hız ölçüm konumlarında görülmektedir. Şekil 5.2'de kıvrımlı kanal boyunca bütün hız ölçüm konumlarında Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için hız profilleri verilmektedir. Membada derinlik boyunca ortalama hız, maksimum debide (Q_3=0.050 m^3/s) yaklaşık 2.7 kat artış göstermiştir. Diğer ölçüm konumlarında ise hızlar sırasıyla 1A için 3; 1B için 2.7; 1C için 2.8; 2A için 3.1; 2B için 3; 2C için 2.8; 3A için 3.2; 3B için 2.8; 3C için 2.9; 4A için 3.2; 4B için 3.2 ve 4C için 3.2 kat artmıştır. Kısaca kıvrımlı kanal boyunca hızlar debinin 0.016 m^3/s'den 0.050 m^3/s'ye artmasıyla ortalama 3 kat artmaktadır.

Q_1 debisinde derinlik boyunca ortalama hızlar birbirine oldukça yakın olmakta ve üniform hız dağılımına benzemektedir. Fakat debinin artmasıyla hız dağılımı daha parabolik bir forma dönüşmektedir.

Membada akım doğrultusundaki maksimum hız, Q_1 ve Q_2 debileri için y = 8.5 cm, Q_3 debisi için ise y = 6.5 cm derinlikte oluşmaktadır. Burada y, tabandan itibaren mesafeyi belirtmekte olup bundan sonra sadece y olarak ifade edilecektir. 1. kıvrımın başlangıcında (180°'lik kıvrımda) Q_1 debisinde maksimum hız; 1A konumunda y = 2.5 cm, 1B konumunda y = 6.5 cm, 1C konumunda ise y = 8.5 cm derinlikte meydana gelmektedir. Q_2 debisinde ise 1A konumunda maksimum hız y = 4.5 cm, 1B ve 1C konumlarında y = 8.5 cm derinliktedir. Q_3 debisinde ise tüm konumlarda maksimum hız y = 8.5 cm derinlikte oluşmaktadır. Yani dış kıvrımda (1C) maksimum hızın meydana geldiği derinlik, debiden bağımsız olarak değişmemektedir. Öte yandan iç kıvrımda (1A), debi arttıkça maksimum hız yüzeye doğru kaymaktadır.

Akım 180°'lik kıvrımın merkezine (2. kesit) ilerledikçe maksimum hızlar genellikle tabana yakın bölgede, yani tabandan itibaren yaklaşık üçte birlik kısımda oluşmaktadır. Q_1 debisinde 2A ve 2B konumlarında maksimum hız y = 4.5 cm derinlikte, 2C konumunda ise y = 8.5 cm derinliktedir. Q_2 debisinde 2A konumunda maksimum hız y = 4.5 cm, 2B konumunda y = 8.5 cm, 2C konumunda ise y = 6.5 cm derinlikte gözlenmektedir. Q_3 debisinde ise tüm konumlarda maksimum hız y = 4.5 cm derinlikte oluşmaktadır.



Şekil 5.2 Farklı ölçüm konumlarındaki d=15 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için hız profilleri

İki kıvrım arası geçiş kesiti olan 3. kesitte maksimum hız değerleri kesit boyunca farklılıklar göstermektedir. Q_1 debisi için maksimum hız yine tabana yakın bölgede 3A, 3B ve 3C konumlarında y=4.5 cm derinlikte meydana gelmektedir. Q_2 debisinde ise 3A konumunda maksimum hız y=8.5 cm derinlikte görülürken, 3B ve 3C konumlarında yüzey hızında yani y=15 cm'de görülmektedir. Q_3 debisi için ise maksimum hız 3A ve 3B konumlarında y=2.5 cm derinlikte görülürken 3C konumunda ise y=6.5 cm derinlikte görülmektedir. İki kıvrım arası geçiş bölgesi olduğundan dolayı bu bölgede maksimum hız derinlikleri farklılıklar göstermektedir. Bu durumun iki kıvrım arasında geçiş kesiti olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

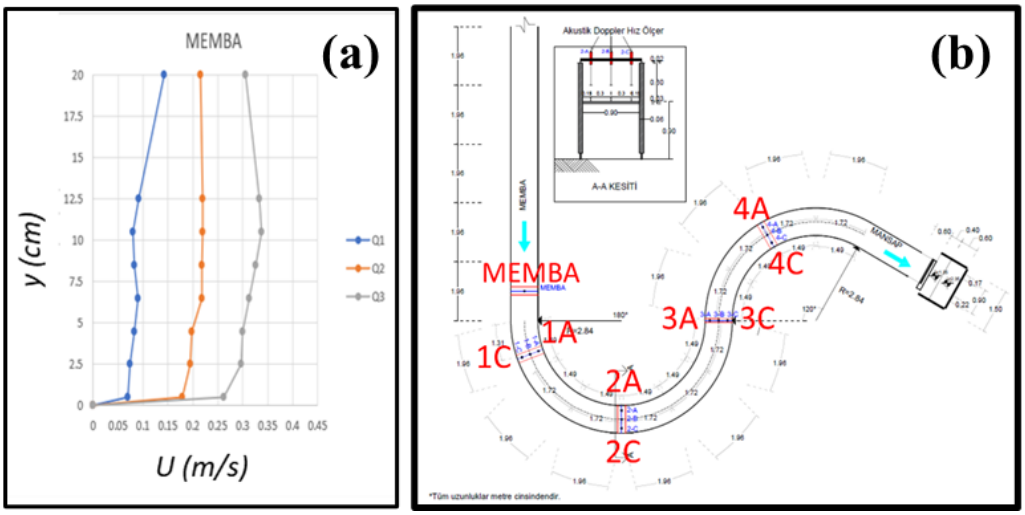
Kıvrımlı kanal boyunca son kıvrım ve 120º'lik kıvrımın merkezi olan 4. kesitte maksimum hızlar Q_1 debisi için 4A konumunda y=6.5 cm, 4B konumunda y=2.5 cm ve 4C konumunda y=8.5 cm derinlikte oluşmaktadır. Q_2 debisi için 4A konumunda y=8.5 cm, 4B konumunda y=6.5 cm ve 4C konumunda yüzeyde (y=15 cm derinlikte) oluşmaktadır. Q_3 debisi için ise 4A konumunda yine y=8.5 cm, 4B konumunda y=4.5 cm ve 4C konumunda ise y=6.5 cm derinlikte görülmektedir. Burada hızın daha düşük olduğu dış kıvrım olan 4A konumunda maksimum hız konumu yaklaşık olarak (Q_1 debisi için 4A için hız profili üniforma yakındır) aynı derinlikteyken, hızın yüksek olduğu iç kıvrım olan 4C konumunda değişkendir. Fakat debi ile doğrudan bir ilişkisi bulunmamaktadır.

5.2.1.2 d=20 cm Su Derinliği için Farklı Debilerin Karşılaştırılması

Kararlı akım koşullarında 20 cm derinlik Tablo 5.2'de farklı debilere göre ölçülen derinlik boyunca akım hızları, Reynolds ve Froude sayısı değerleri verilmiştir. Re sayısı Q_1 debisi için 13200 ile 22600; Q_2 debisi için 29600 ile 52600; Q_3 debisi için 43800 ile 77800 arasında, Fr sayısı Q_1 debisi için 0.047 ile 0.081; Q_2 debisi için 0.106 ile 0.223; Q_3 debisi için 0.156 ile 0.278 arasında değişmektedir. Tüm deney koşullarında Fr<1 olduğundan akımlar nehir rejimindedir. U_d ise Q_1 debisi için 0.065 ile 0.113 m/s; Q_2 debisi için 0.148 ile 0.263 m/s; Q_3 debisi için 0.219 ile 0.389 m/s arasında değişmektedir. Şekil 5.3'te, memba kesiti için elde edilen hız profilleri görülmektedir. Diğer ölçüm konumlarında ise hız profilleri Şekil 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.2 d=20 cm derinlik için kararlı akım koşulunda Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için U_d (m/s), Reynolds ve Froude sayısı değerleri

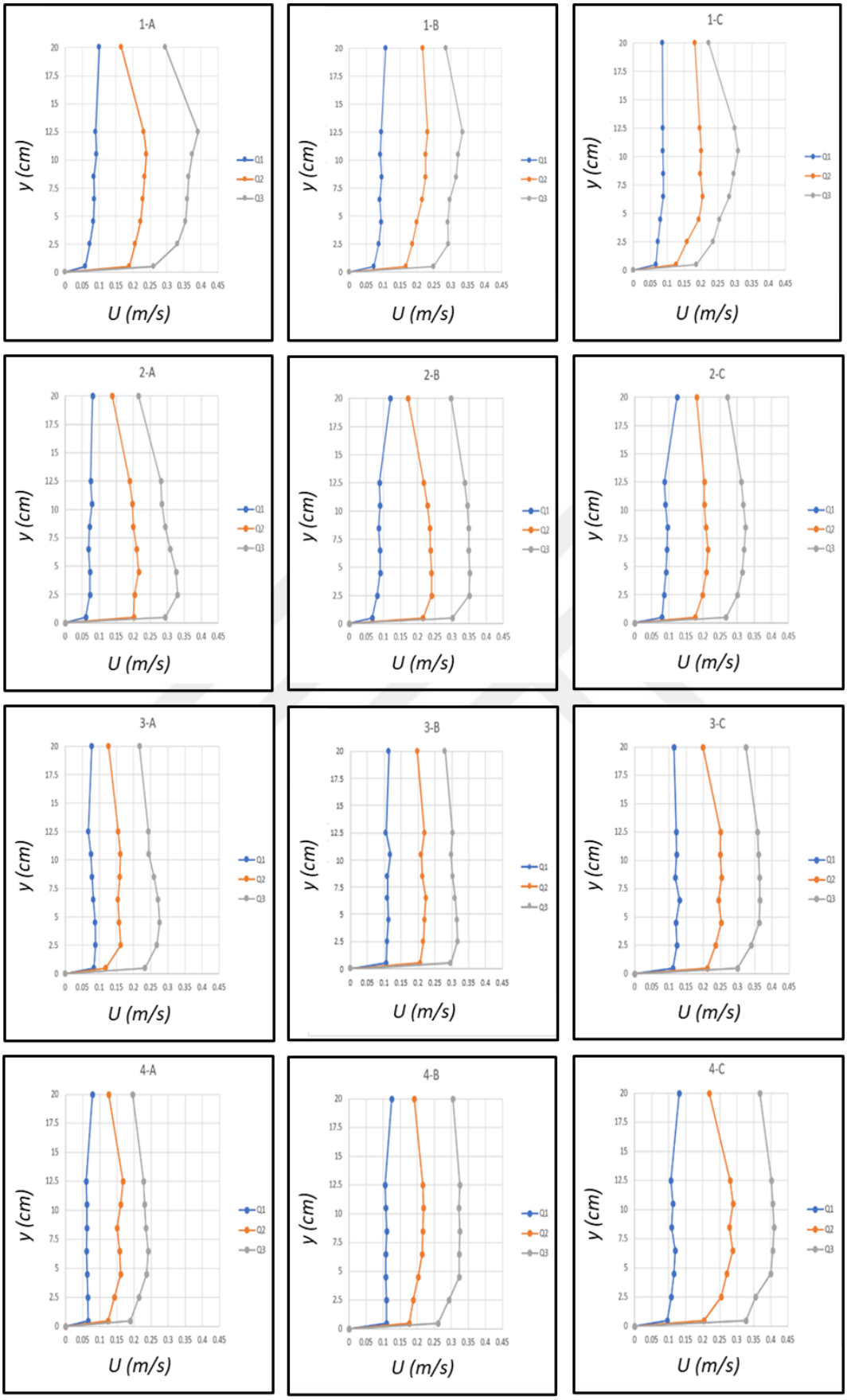
Q (m^3/s)	Ölçüm Konumu	U_d (m/s)	Re	Fr
0.016	**Memba**	0.095	19000	0.068
	1A	0.088	17600	0.063
	1B	0.095	19000	0.068
	1C	0.084	16800	0.060
	2A	0.075	15000	0.054
	2B	0.092	18400	0.066
	2C	0.096	19200	0.069
	3A	0.079	15800	0.056
	3B	0.109	21800	0.078
	3C	0.120	24000	0.086
	4A	0.066	13200	0.047
	4B	0.112	22400	0.080
	4C	0.113	22600	0.081
0.035	**Memba**	0.210	42000	0.150
	1A	0.214	42800	0.153
	1B	0.193	38600	0.138
	1C	0.184	36800	0.131
	2A	0.185	37000	0.132
	2B	0.200	40000	0.143
	2C	0.216	43200	0.154
	3A	0.148	29600	0.106
	3B	0.211	42200	0.151
	3C	0.235	47000	0.168
	4A	0.150	30000	0.107
	4B	0.203	40600	0.145
	4C	0.263	52600	0.188
0.05	**Memba**	0.313	62600	0.223
	1A	0.349	69800	0.249
	1B	0.309	61800	0.221
	1C	0.270	54000	0.193
	2A	0.283	56600	0.202
	2B	0.333	66600	0.238
	2C	0.303	60600	0.216
	3A	0.247	49400	0.176
	3B	0.301	60200	0.215
	3C	0.347	69400	0.248
	4A	0.219	43800	0.156
	4B	0.312	62400	0.223
	4C	0.389	77800	0.278



Şekil 5.3 (a) d=20 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için memba ölçüm konumu hız profilleri ve (b) hız ölçüm konumları

Membada derinlik boyunca ortalama hız, maksimum debide (Q_3=0.050 m^3/s) yaklaşık 3.3 kat artış göstermiştir. Diğer ölçüm konumlarında ise hızlar sırasıyla 1A için 4; 1B için 3.3; 1C için 3.2; 2A için 3.8; 2B için 3.6; 2C için 3.2; 3A için 3.1; 3B için 2.8; 3C için 2.9; 4A için 3.3; 4B için 2.8 ve 4C için 3.4 kat artmıştır. Kısaca kıvrımlı kanal boyunca hızlar debinin 0.016 m^3/s'den 0.050 m^3/s'ye artmasıyla ortalama 3.3 kat artmaktadır. Genel olarak ortalama artış memba ile aynı olmaktadır.

Membada akım doğrultusundaki maksimum hız Q_1 ve Q_2 debisi için y=6.5 cm ve Q_3 debisi için y=10.5 cm derinlikte meydana gelmektedir. 1 kesitinde (180°'lik kıvrım başlangıcında) Q_1 debisi için 1A konumunda derinlik boyunca maksimum hız y=10.5 cm, 1B konumunda y=8.5 cm, 1C konumunda ise y=6.5 cm derinlikte oluşmaktadır. Q_2 debisinde 1A konumunda maksimum hız y=10.5 cm, 1B konumunda y=12.5 cm, 1C konumunda ise y=6.5 cm derinlikte görülmektedir. Q_3 debisinde ise 1A ile 1B konumları için maksimum hız y=12.5 cm ve 1C konumu için y=10.5 cm derinlikte meydana gelmektedir. İç kıvrımda (1A) Q_1 debisinde derinlik boyunca hızlar birbirine oldukça yakın olup, üniform hız dağılımına benzemektedir. Akım debisi Q_1'den Q_2 debi durumuna geçtiğinde derinlik boyunca ortalama hızlarda yaklaşık 2.6 kat, Q_3 debi durumunda ise Q_1 debi durumuna göre yaklaşık 4 kat artış gözlemlenmektedir.



Şekil 5.4 Farklı ölçüm konumlarındaki d=20 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için hız profilleri

Akım 180°'lik kıvrımın merkezi (2. kesit) için maksimum hızlar Q_1 debisi için 2A konumunda y=10.5 cm derinlikte ve 2B ve 2C konumlarında su yüzeyinde (y=20 cm) derinlikte oluşmaktadır. Q_2 debisi için 2A konumunda maksimum hız y=4.5 cm, 2B konumunda y=2.5 cm, 2C konumunda ise y=6.5 cm derinlikte oluşmaktadır. Q_3 debisi için 2A ile 2B konumlarında maksimum hız y=2.5 cm ve 2C konumunda ise y=8.5 cm derinlikte meydana gelmektedir.

İki kıvrım arası geçiş kesiti olan 3. kesitte maksimum hız değerleri kesit boyunca farklılıklar göstermektedir. Q_1 debisi için maksimum hız 3A konumunda su yüzeyinde (y=20 cm), 3B konumunda y=10.5 cm, 3C konumunda ise y=6.5 cm derinlikte oluşmaktadır. Q_2 debisinde ise 3A konumunda y=2.5 cm, 3B konumunda y=6.5 cm, 3C konumunda ise y=4.5 cm derinlikte meydana gelmektedir. Q_3 debisi için ise maksimum hızlar 3A konumunda y=4.5 cm, 3B konumunda y=2.5 cm ve 3C konumunda ise yine y=4.5 cm derinlikte oluşmaktadır.

Kıvrımlı kanal boyunca son kıvrım ve 120^o kıvrımın merkezi olan 4. kesitte maksimum hızlar Q_1 debisi için 4A, 4B ve 4C konumlarında hepsinde su yüzeyinde (y=20 cm oluşmaktadır. Q_2 debisi için 4A konumunda y=12.5 cm, 4B konumunda y=8.5 cm ve 4C konumunda y=6.5 cm meydana gelmektedir. Q_3 debisi için ise 4A konumunda y=6.5 cm, 4B konumunda y=4.5 cm ve 4C konumunda ise yine y=6.5 cm derinlikte görülmektedir.

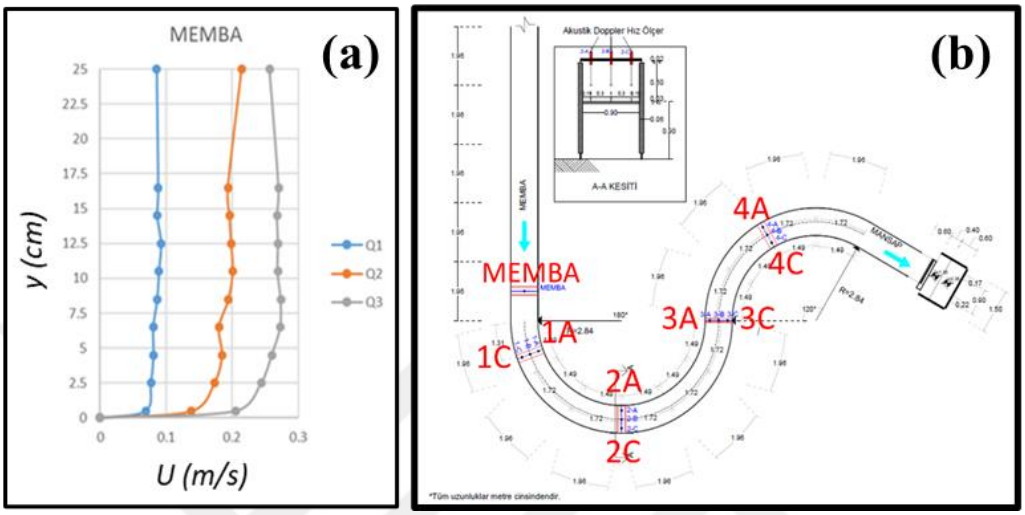
5.2.1.3 d=25 cm Su Derinliği için Farklı Debilerin Karşılaştırılması

Kararlı akım koşullarında 25 cm derinlik için Tablo 5.3'te farklı debilere göre elde edilen derinlik boyunca ortalama hızlar, Reynolds ve Froude sayısı değerleri verilmiştir. Re sayısı Q_1 debisi için 13617 ile 24934; Q_2 debisi için 32604 ile 56406; Q_3 debisi için 48790 ile 76910 arasında, Fr sayısı Q_1 debisi için 0.035 ile 0.064; Q_2 debisi için 0.083 ile 0.144; Q_3 debisi için 0.125 ile 0.196 arasında değişmektedir. Tüm deney koşullarında, Fr<1 olduğundan akımlar nehir rejimindedir. Her bir debi durumu için diğer su derinliklerinde olduğu gibi Reynolds ve Froude sayıları; minimum olarak 4A konumunda ve maksimum olarak 4C konumunda görülmektedir.

Tablo 5.3 d=25 cm derinlik için kararlı akım koşulunda Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için U_d (m/s), Reynolds ve Froude sayısı değerleri

Q (m^3/s)	Ölçüm Konumu	U_d (m/s)	Re	Fr
0.016	**Memba**	0.084	20987	0.054
	1A	0.081	20148	0.051
	1B	0.083	20717	0.053
	1C	0.069	17104	0.044
	2A	0.070	17034	0.044
	2B	0.082	20570	0.053
	2C	0.082	20547	0.052
	3A	0.061	15251	0.039
	3B	0.080	19962	0.051
	3C	0.093	23152	0.059
	4A	0.054	13617	0.035
	4B	0.079	19833	0.051
	4C	0.100	24934	0.064
0.035	**Memba**	0.190	47510	0.121
	1A	0.195	48763	0.125
	1B	0.183	45671	0.117
	1C	0.159	39708	0.101
	2A	0.165	41250	0.105
	2B	0.193	48130	0.123
	2C	0.180	44970	0.115
	3A	0.145	36302	0.093
	3B	0.175	43693	0.112
	3C	0.207	51643	0.132
	4A	0.130	32604	0.083
	4B	0.180	44904	0.115
	4C	0.226	56406	0.144
0.05	**Memba**	0.259	64824	0.166
	1A	0.283	70728	0.181
	1B	0.252	63112	0.161
	1C	0.215	53848	0.138
	2A	0.235	58782	0.150
	2B	0.264	65870	0.168
	2C	0.235	58776	0.150
	3A	0.219	54680	0.140
	3B	0.246	61484	0.157
	3C	0.282	70550	0.180
	4A	0.195	48750	0.125
	4B	0.250	62560	0.160
	4C	0.308	76910	0.196

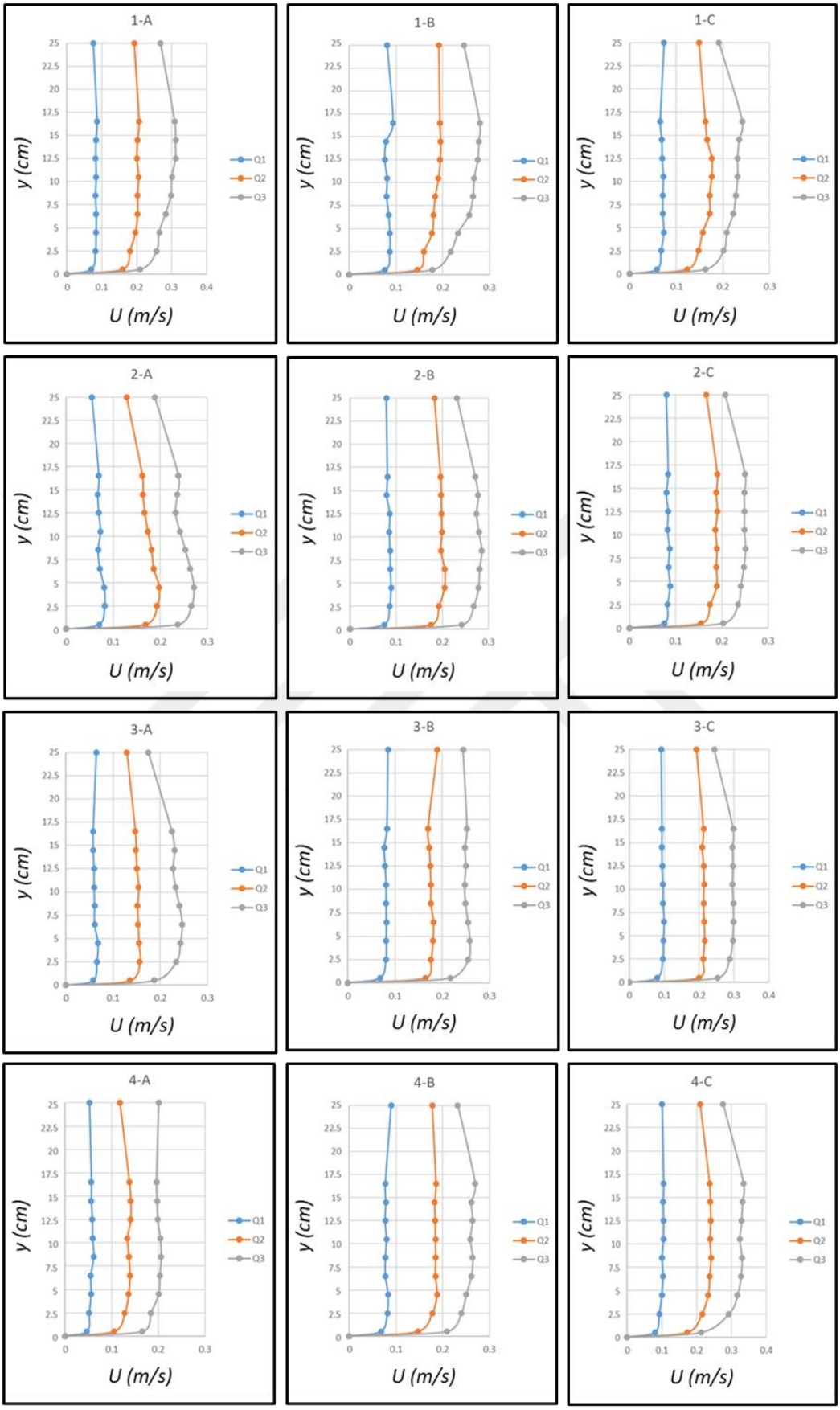
Derinlik boyunca ortalama hızlar Q_1 debisi için 0.054 ile 0.100 m/s; Q_2 debisi için 0.130 ile 0.226 m/s; Q_3 debisi için 0.195 ile 0.308 m/s arasında değişmektedir. Şekil 5.5'de, memba kesiti için elde edilen hız profilleri görülmektedir. Şekil 5.6'da ise diğer ölçüm konumlarındaki Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için hız profilleri verilmektedir.



Şekil 5.5 (a) d=25 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için memba ölçüm konumu hız profilleri ve (b) hız ölçüm konumları

Akım debisi arttıkça hızlar yine beklenildiği gibi artmaktadır. Bu durum bütün hız ölçüm konumlarında görülmektedir. Membada derinlik boyunca ortalama hız, maksimum debide (Q_3=0.050 m^3/s) yaklaşık 3.1 kat artış göstermiştir. Diğer ölçüm konumlarında ise hızlar 1A için 3.5; 1B için 3; 1C için 3.1; 2A için 3.4; 2B için 3.2; 2C için 2.9; 3A için 3.6; 3B için 3.1; 3C için 3; 4A için 3.6; 4B için 3.2 ve 4C için 3.1 kat artmıştır. Kısaca kıvrımlı kanal boyunca hızlar debinin Q_1=0.016 m^3/s'den Q_3=0.050 m^3/s'ye artmasıyla ortalama 3.2 kat artmıştır. Membada maksimum hızlar derinlik boyunca Q_1 debisi için y=12.5 cm, Q_2 debisi su yüzeyinde (y=25 cm) ve Q_3 debisinde ise y=8.5 cm derinlikte meydana gelmektedir.

İlk olarak, 1 kesitinde, Q_1 debisi için 1A konumunda derinlik boyunca maksimum hız y=16.5 cm, 1B konumunda y=16.5 cm, 1C konumundaysa su yüzeyinde (y=25 cm) derinlikte oluşmaktadır. Q_2 debisinde 1A konumunda maksimum hız y=16.5 cm, 1B konumunda y=12.5 cm ve 1C konumunda y=4.5 cm derinlikte görülmektedir. Q_3 debisinde maksimum hız 1A konumunda y=14.5 cm derinlikte, 1B ve 1C konumlarında y=16.5 cm derinlikte meydana gelmektedir.



Şekil 5.6 Farklı ölçüm konumlarındaki d=25 cm su derinliğinde Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s, Q_3=0.050 m^3/s debileri için hız profilleri

2 kesitinde, maksimum hızlar genellikle kanal tabanına yakın bölgede (tabandan itibaren üçte birlik kısımda) oluşmaktadır. Q_1 debisi için 2A konumunda y=2.5 cm derinlikte, 2B ve 2C konumlarında ise maksimum hız y=4.5 cm derinlikte oluşmaktadır. Q_2 debisi için 2A konumunda y=6.5 cm derinlikte, 2B konumunda y=12.5 cm ve 2C konumunda ise y=2.5 cm derinlikte meydana gelmektedir. Q_3 debisi için 2A konumunda y=4.5 cm derinlikte, 2B ve 2C konumlarında ise maksimum hız y=8.5 cm derinlikte ölçülmektedir.

3. kesitte maksimum hız değerleri kesit boyunca farklılıklar göstermektedir. Q_1 debisi için maksimum hız 3B konumunda su yüzeyinde y=25 cm derinlikte, 3A ve 3C konumlarında y=4.5 cm derinlikte meydana gelmektedir. Q_2 debisinde ise 3A konumunda su yüzeyinde (y=25 cm) derinlikte görülürken, 3B ve 3C konumlarında y=4.5 cm'de görülmektedir. Q_3 debisi için maksimum hız 3A ve 3B konumlarında y=16.5 cm derinlikte görülürken, 3C konumunda y=8.5 cm derinlikte ölçülmektedir. Diğer deney sonuçlarında olduğu gibi, 3. kesit iki kıvrım arası geçiş bölgesi olduğundan dolayı bu bölgede maksimum hız derinlikleri beklenmedik farklılıklar gösterebilmektedir. Son kıvrım olan 4. kesitte ve 120º'lik ikinci kıvrımın ortasında maksimum hızlar Q_1 debisi için 4A konumunda y=16.5 cm derinlikte, 4B konumunda su yüzeyinde (y=25 cm) ve 4C konumunda y=8.5 cm derinlikte oluşmaktadır. Q_2 debisi için 4A konumunda y=8.5 cm, 4B konumunda y=4.5 cm ve 4C konumunda y=14.5 cm derinlikte ölçülmüştür. Q_3 debisi için 4A ve 4B konumlarında y=16.5 cm derinlikte ve 4C konumunda ise y=8.5 cm derinlikte görülmektedir. Her üç derinlikteki (15 cm, 20 cm ve 25 cm) bütün debi koşulları dikkate alındığı zaman en yüksek hızların daima 4C konumunda ölçüldüğü gözlemlenmiştir.

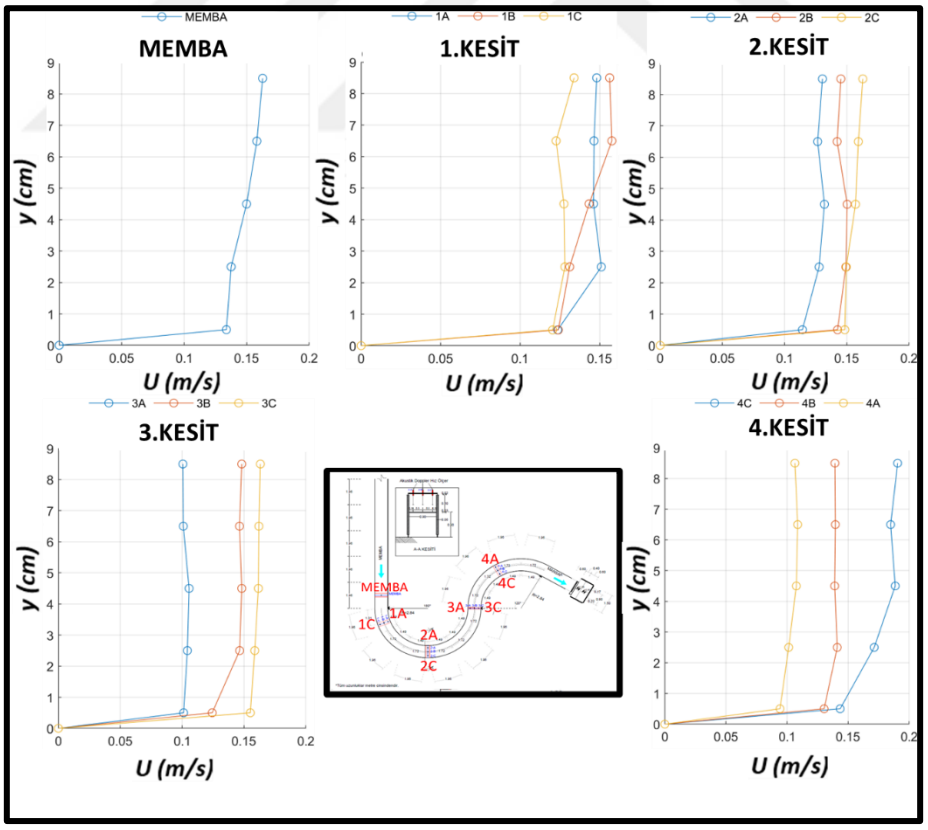
Akım doğrultusundaki hız profili bulguları literatür çalışmalarıyla da uyum göstermektedir. Chow (1959)'a göre laminer akım için maksimum akım hızı, su seviyesinde meydana gelirken türbülanslı akımlar için maksimum akım hızı, su yüzeyinin altında su derinliğinin yaklaşık %5-25'inde meydana gelmektedir. Türbülanslı akım içindeki akışkan parçacıklarının şiddetli karışımı ilave enerji harcanımına sebep olmaktadır. Böylece türbülanslı akımdaki hız dağılımı laminer akımdan daha üniform olmaktadır (Yüksel, 2020). Bu durum beklenildiği üzere bu çalışmadaki deneysel verilerden elde edilen akım doğrultusundaki hız profillerinde de görülmektedir.

5.2.2 İç ile Dış Kıvrım Arasındaki Hız Farkları

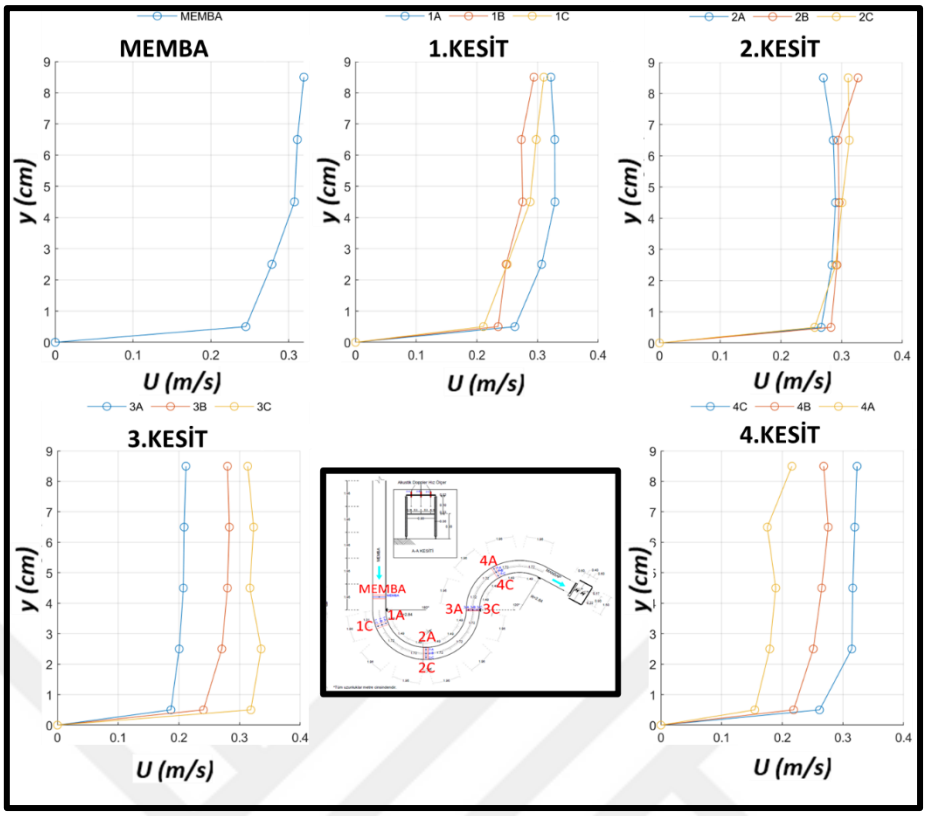
5.2.2.1 d=15 cm Su Derinliği Olması Durumu

15 cm derinlik için Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da sırasıyla Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m /s ve Q_3=0.05 m^3/s debileri için aynı kesitte bulunan ADV ile ölçülen tabana yakın hız profilleri verilmektedir. Burada her üç debi için her kesitte eksen ile iç ve dış kıvrım arasında oluşan hız farkları incelenmiştir.

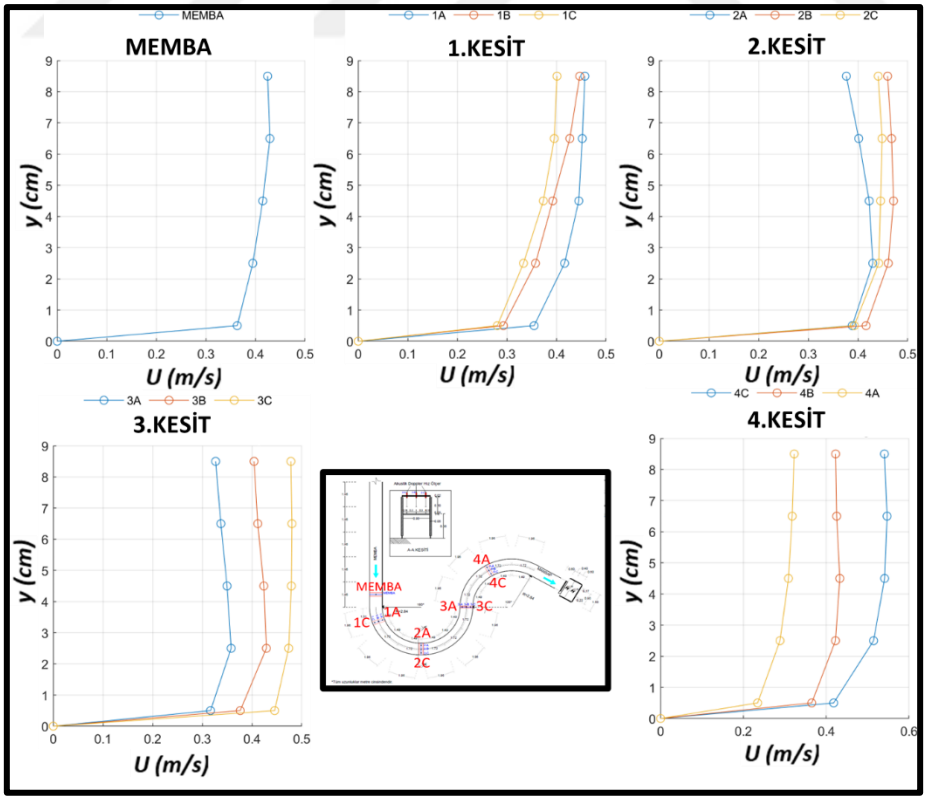
1 kesitinde (180°'lik kıvrım başlangıcında) debi arttıkça maksimum hız ve ortalama akım hızı iç kıvrımda (1A) oluşmaktadır. 2. kesit incelendiğinde, her üç debi durumu için 2A, 2B ve 2C konumlarında ciddi farklar gözlenmemektedir. Q_1=0.016 m^3/s debisi için 2C konumunda hızın bir miktar daha yüksek olduğu, Q_2=0.035 m^3/s debisi için 2B ve 2C konumlarında hızın aynı ve 2A konumuna göre daha yüksek olduğu ve Q_3=0.050 m^3/s debisi için ise hızın sadece 2B konumunda daha yüksek olduğu görülmektedir. Debinin artmasıyla beraber hızın yüksek olduğu bölgenin dış kıvrımdan (2C) ortalara doğru eksene (2B) kaymaya başladığı gözlenmektedir.



Şekil 5.7 d=15 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması



Şekil 5.8 d=15 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması



Şekil 5.9 d=15 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması

Q_1 debisi için 1. kesitte maksimum hız 1B konumunda görülmüştür. 2. kesitte ise maksimum hız 2C konumunda meydana gelmiştir ve 1B konumuna göre 1.05 kat artmış ve ciddi bir artış eğilimi göstermemiştir. Q_2 debisi için 1. kesitte maksimum hız 1A konumunda oluşmaktadır ve daha sonra 2. kesite geldiğinde ise 2B konumunda meydana gelmektedir. Burada 1A konumundan 2B konumuna doğru hız 1.05 kat azalmaktadır. Fakat yine önemli bir artış veya azalış eğiliminden söz etmek mümkün değildir. Q_3 debisi için ise 1. kesitte maksimum hız iç kıvrımda (1A) konumunda ve 2. kesitte maksimum hız 2B konumunda görülmektedir. Bu debi için de 1A konumundan 2B konumuna doğru hız 1.02 kat azalarak yine ciddi bir değişim göstermemektedir.

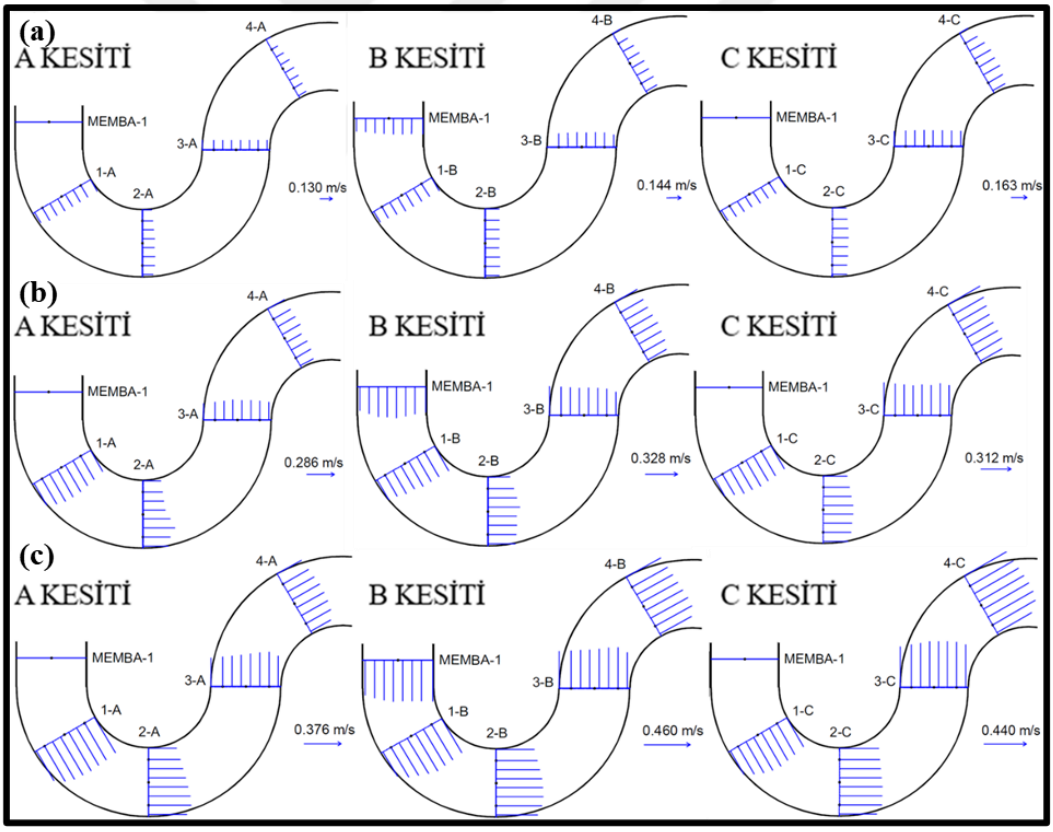
Kıvrımlı kanal boyunca iki kıvrım arası geçiş kesiti olan 3. kesitte hız değerleri dış kıvrıma (3C) doğru yaklaştıkça artmaktadır. Özellikle debinin artmasıyla 3A ile 3C konumu arasında hız profillerindeki fark artmaktadır. Benzer şekilde derinlik boyunca ortalama akım hızları dikkate alındığında, 3A konumu ile 3C konumu arasındaki hız farkı Q_1 ile Q_3 debisinde 1.5 kat ve Q_1 ile Q_2 debisinde 1.6 kat olduğu görülmektedir.

Q_1 debisi için 2. kesitte maksimum hız 2C konumunda oluşmakta ve 3. kesite geçtiğinde 3C konumunda meydana gelmektedir. 2C konumundan 3C konumuna doğru hız 1.03 kat artmıştır ve yine ciddi bir fark gözlemlenmemiştir. Q_2 debisi için 2. kesitte maksimum hız ortalarda eksende 2B konumunda oluşmaktadır. 2B ile 2C konumlarındaki hız profilleri birbirine yakındır ve ortalama akım hızları ise aynı olmaktadır. 3. kesite geçtiğinde maksimum hız yine 3C konumunda meydana gelmekte ve 1.13 kat artmaktadır. Q_3 debisi için ise 2. kesitte maksimum hız 2B konumunda iken 3. kesitte 3C konumunda oluşmuştur ve hızda yine önemli bir değişim gözlenmemektedir.

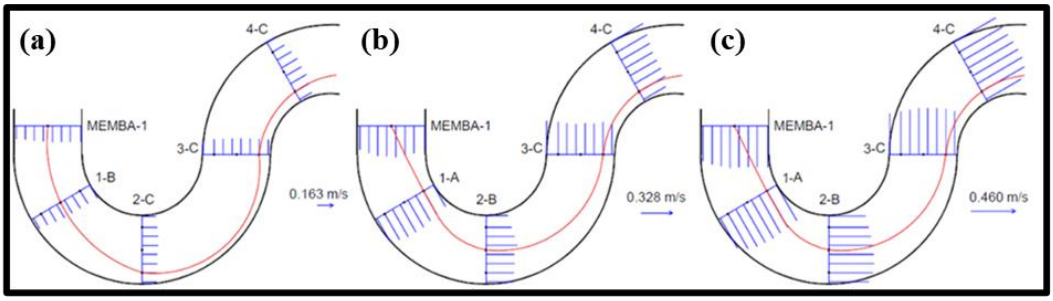
120°'lik ikinci kıvrım (4. kesit) merkezinde ölçülen hız değerleri tekrar iç kıvrıma doğru artmaktadır. Her 3 debi durumunda hız profilleri arasındaki fark belirgin ve 4C konumunda yüksek olmaktadır. Derinlik boyunca ortalama akım hızları dikkate alındığında, 4C ile 4A konumları arasındaki hız farkı 1.75 kat, Q_2 debisi için 1.7 kat ve Q_3 debisi için 1.73 kat olduğu görülmektedir. Kısaca her 3 debi için de iki ölçüm konumu arasındaki hız farkının oldukça yakın olduğu ifade edilebilmektedir. Kıvrımlı kanal içerisinde ilerledikçe her kesitte iç ve dış kıvrım arasındaki hız profilleri ve dolayısıyla ortalama akım hızları farkı giderek artmaktadır. Bu durum

en belirgin şekilde Q_3=0.05 m^3/s debisi için ve 4. kesitte görülmektedir. Tüm kesitlerde hız dağılımları incelendiğinde mansaba doğru hızların bir miktar artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu eğilim her koşul için membadan itibaren 4C konumuna doğru olmaktadır. Bu artış yaklaşık 1.25 kat değerindedir.

Şekil 5.10'da mansap doğrultusundaki hızların derinliğe göre dağılımları verilmiştir. Burada kanalın dışında belirtilen hız vektörü (mavi ok) referans hız vektörünü ve ilgili ölçüm konumundaki ortalama hız değerini göstermektedir. Kanal içindeki hız dağılımları yine bu ortalama değerlere göre ölçekli olarak verilmiştir. Bu şekilde her üç debiye göre her ölçüm konumu için (A, B ve C) derinliğe göre oluşan hız profilleri bir arada sunulmaktadır. Şekil 5.11'de ise farklı debiler için maksimum birim debinin kanal boyunca izlediği rota verilmektedir. Debi arttıkça maksimum birim debi beklenildiği gibi hızlarda olduğu gibi en kısa rotayı izlemektedir.



Şekil 5.10 d=15 cm derinlik için hız profillerinin kıvrımlı kanal boyunca vektör haritaları: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s



Şekil 5.11 d=15 cm derinlik için kıvrımlı kanal boyunca maksimum birim debi çizgisi: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s

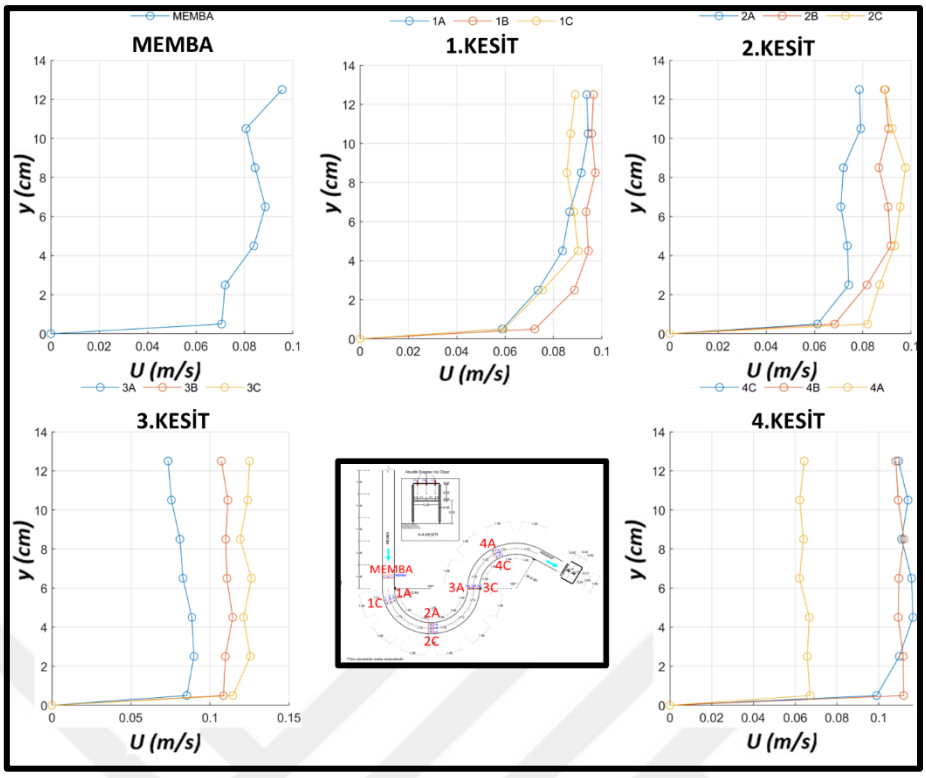
5.2.2.2 d=20 cm Su Derinliği Olması Durumu

20 cm derinlik için Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14'te sırasıyla Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s ve Q_3=0.05 m^3/s debileri için aynı kesitte bulunan ADV ile ölçülen tabana yakın hız profilleri verilmektedir. Burada her üç debi için her kesitte eksen ile iç ve dış kıvrım arasında oluşan hız farkları incelenmiştir.

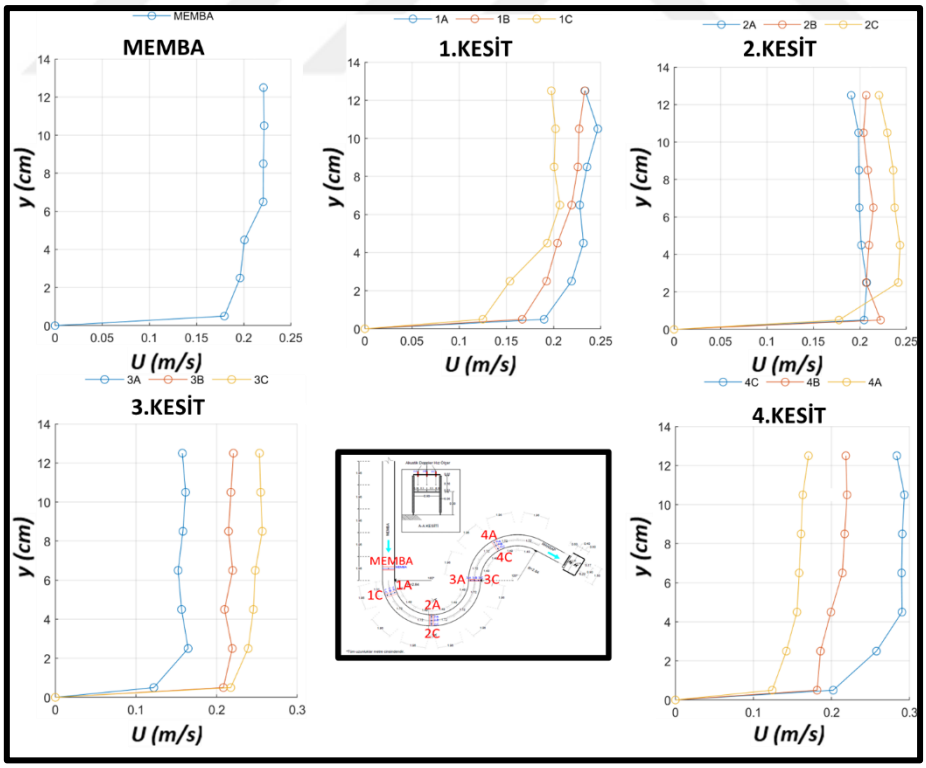
1 kesitinde (180°'lik kıvrım başlangıcında) debi arttıkça maksimum hız ve derinlik boyunca ortalama akım hızı iç kıvrımda (1A) oluşmaktadır.

2. kesit incelendiğinde, her üç debi durumu için 2A, 2B ve 2C konumlarında ciddi farklar gözlenmemektedir. Q_1=0.016 m^3/s debisi için 2C konumunda hızın bir miktar daha yüksek olduğu, Q_2=0.035 m^3/s debisi için yine 2C konumunda de hızın yüksek olduğu ve Q_3=0.050 m^3/s debisi için ise hızın 2B konumunda daha yüksek olduğu görülmektedir. Debinin artmasıyla beraber d=15 cm durumunda olduğu gibi hızın yüksek olduğu bölgenin dış kıvrımından (2C) ortalara doğru eksene (2B) kaymaya başladığı gözlenmektedir.

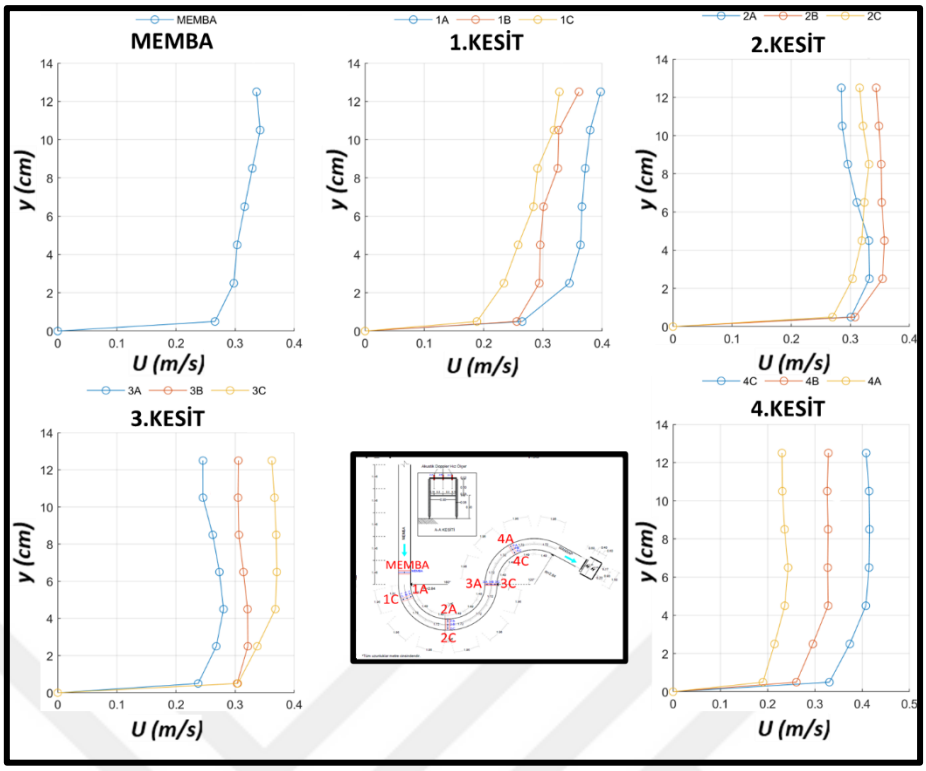
Q_1 debisi için 1. kesitte maksimum hız 1B konumunda görülmüştür. 2. kesitte ise maksimum hız 2C konumunda meydana gelmiştir. Fakat 1B konumuna göre 1.05 kat artarak ciddi bir artış eğilimi göstermemiştir. Q_2 debisi için 1. kesitte maksimum hız 1A konumunda oluşmaktadır ve daha sonra 2. kesite geldiğinde ise 2C konumunda meydana gelmektedir. Burada 1A konumundan 2C konumuna doğru hız miktarı değişim göstermemiştir. Q_3 debisi için ise 1. kesitte maksimum hız iç kıvrımda (1A) ve 2. kesitte maksimum hız 2B konumunda görülmektedir. Bu debi için de 1A konumundan 2B konumuna doğru hız %10 azalarak yine ciddi bir değişim göstermemektedir.



Şekil 5.12 d=20 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması



Şekil 5.13 d=20 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması



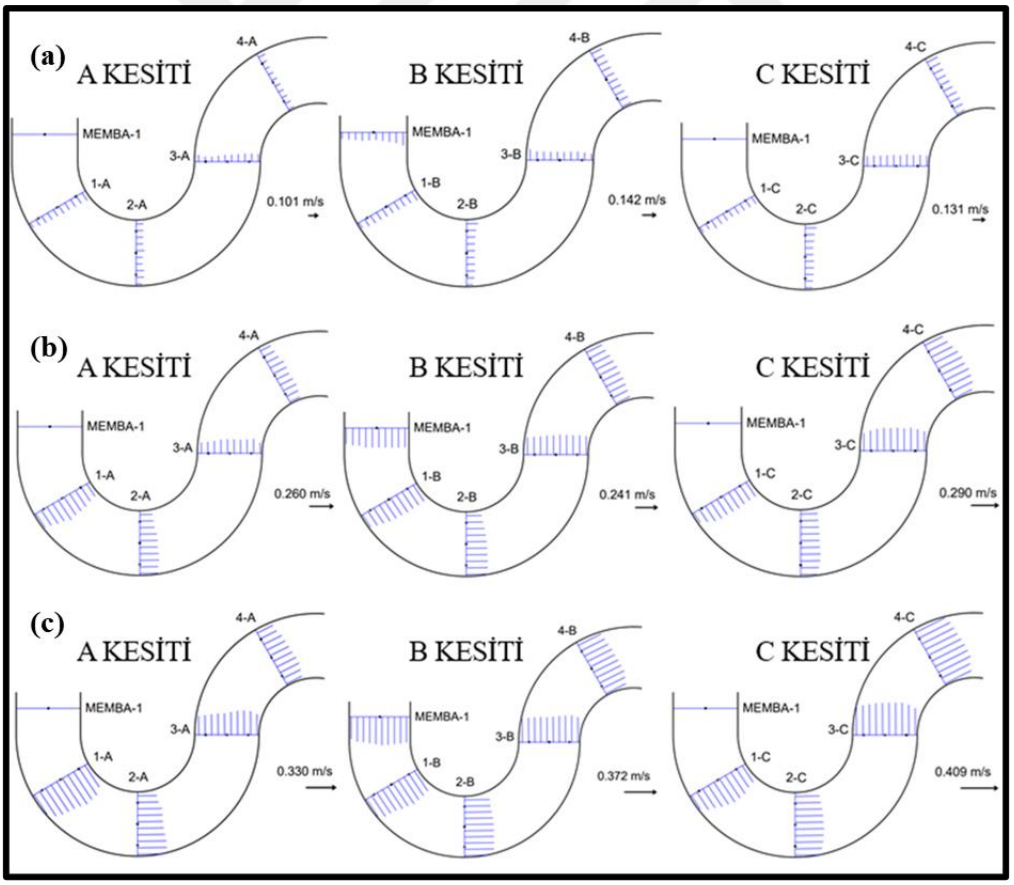
Şekil 5.14 d=20 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması

Kıvrımlı kanal boyunca iki kıvrım arası geçiş kesiti olan 3. kesitte hız değerleri dış kıvrıma (3C) doğru yaklaştıkça artmaktadır. Özellikle debinin artmasıyla 3A ile 3C konumları arasında hız profillerindeki fark artmaktadır. 3A konumu ile 3C konumu arasındaki hız farkı Q_1 debisinde 1.6 kat, Q_2 debisinde ve Q_3 debisinde 1.5 kat olduğu görülmektedir.

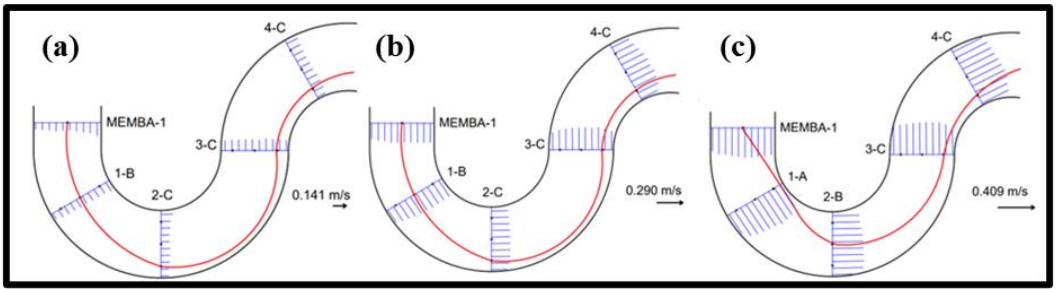
Q_1 debisi için 2. kesitte maksimum hız 2C konumunda oluşmakta ve 3. kesite geçtiğinde 3C konumunda meydana gelmektedir. 2C konumundan 3C konumuna doğru hız 1.3 kat artmıştır. Q_2 debisi için 2. kesitte maksimum hız 2C konumunda oluşmaktadır. 3. kesite geçtiğinde maksimum hız yine 3C konumunda meydana gelmektedir. İki ölçüm konumu arasında artış görülmemektedir. Q_3 debisi için ise 2. kesitte maksimum hız 2B konumunda iken 3. kesitte 3C konumunda oluşmuştur ve yine hızda önemli bir değişim gözlenmemiştir. 120°'lik ikinci kıvrım (4. kesit) merkezinde ölçülen hız değerleri tekrar iç kıvrıma doğru artmaktadır. Q_1 debisinde maksimum hız 4B ve 4C konumlarında aynı miktardadır. Fakat Q_2 ve Q_3 debisi için belirgin şekilde 4C konumunda olmaktadır. Q_1 debisinde 4C ve 4B ile 4A konumları arasındaki hız farkı yaklaşık 2 kat, Q_2 debisi için 4C ile 4A konumları arasında yine 2 kat ve Q_3 debisi için 1.8 kat olduğu görülmektedir. Kıvrımlı kanal

içerisinde ilerledikçe her kesitte iç ile dış kıvrım arasındaki hız profilleri ve dolayısıyla derinlik boyunca ortalama akım hızları farkı giderek artmaktadır. Bu durum en belirgin şekilde Q_2 ve Q_3 debisi için yine 4. kesitte görülmektedir. Tüm ölçüm konumlarında hız dağılımları incelendiğinde mansaba doğru hızların bir miktar artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu eğilim her koşul için membadan itibaren yine 4C konumuna doğru olmaktadır. Bu artış yaklaşık 1.3 kat değerindedir.

Şekil 5.15'te mansap doğrultusundaki hızların derinliğe göre dağılımları verilmiştir. Burada kanalın dışında belirtilen hız vektörü (siyah ok) referans hız vektörünü ve ilgili kesitteki maksimum hız değerini göstermektedir. Kanal içindeki hız dağılımları yine bu maksimum değerlere göre ölçekli olarak verilmiştir. Bu şekilde her üç debiye göre her ölçüm konumu için (A, B ve C) derinliğe göre oluşan hız dağılımları bir arada sunulmaktadır. Şekil 5.16'da ise farklı debiler için maksimum birim debinin kanal boyunca izlediği rota verilmektedir.



Şekil 5.15 d=20 cm derinlik için hız profillerinin kıvrımlı kanal boyunca vektör haritaları: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s

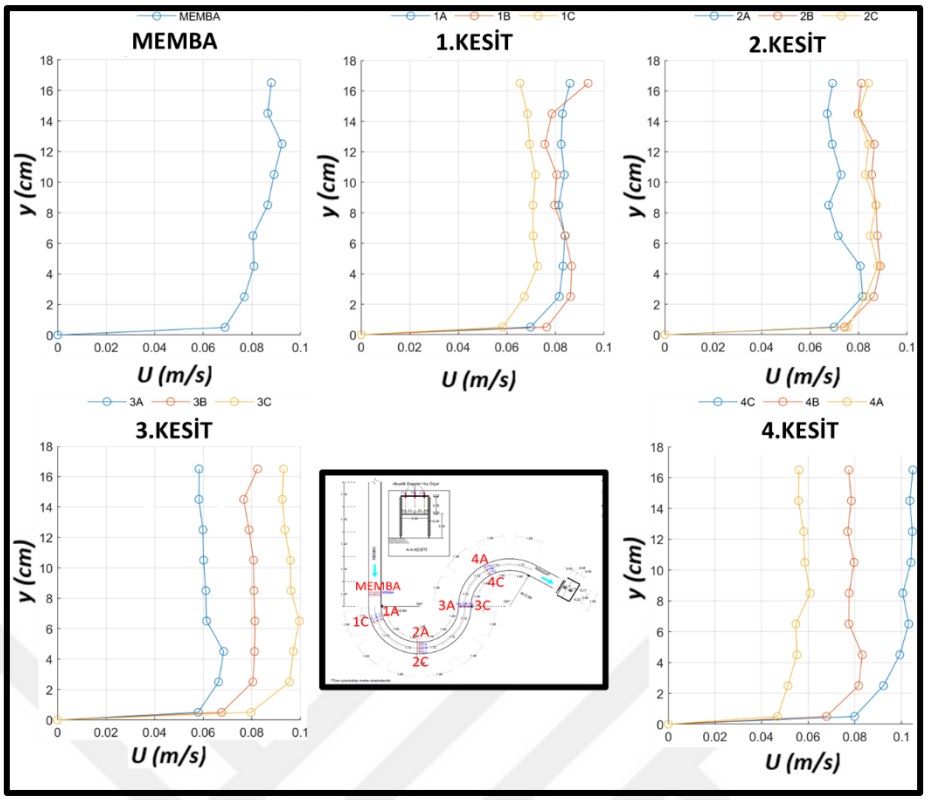


Şekil 5.16 d=20 cm derinlik için kıvrımlı kanal boyunca maksimum birim debi çizgisi: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s

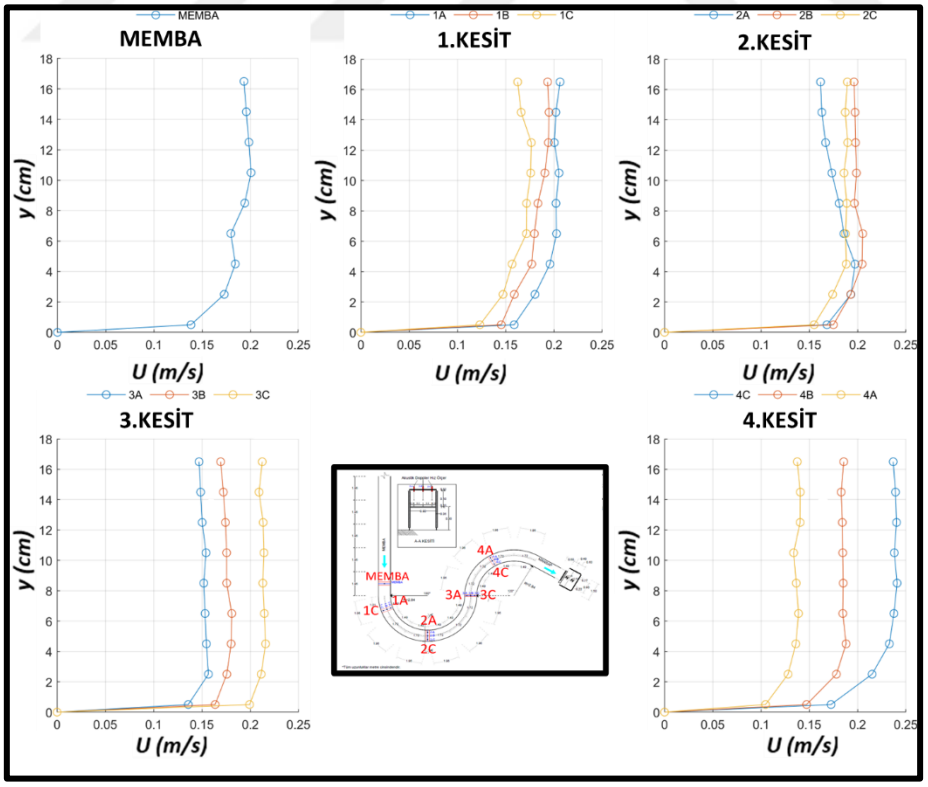
5.2.2.3 d=25 cm Su Derinliği Olması Durumu

25 cm derinlik için Şekil 5.17, 5.18 ve 5.19'da sırasıyla Q_1=0.016 m^3/s, Q_2=0.035 m^3/s ve Q_3=0.05 m^3/s debileri için ADV ile ölçülen tabana yakın hız profilleri verilmektedir. Burada her üç debi için her kesitte eksen ile iç ve dış kıvrım arasında oluşan hız farkları incelenmektedir.

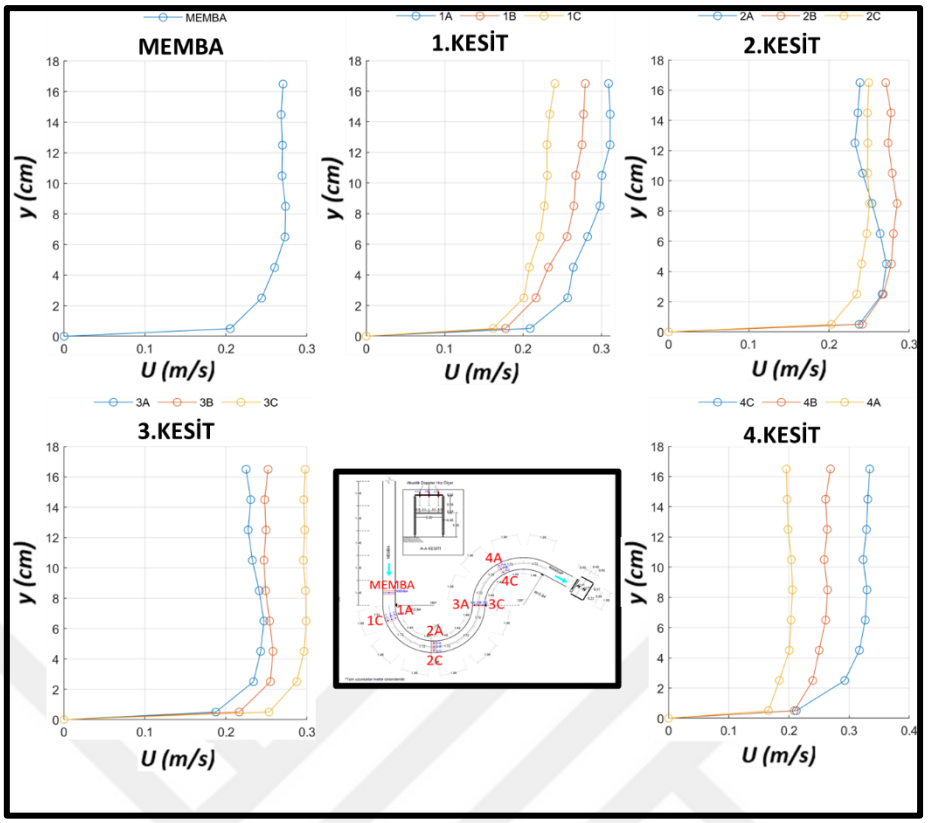
1 kesitinde (180°'lik kıvrım başlangıcında) debi arttıkça maksimum hız ve ortalama akım hızı iç kıvrımda (1A) oluşmaktadır. Q_1 debisi için 1A ile 1C konumları arasındaki fark daha az belirgin olup 1B ile 1C konumlarındaki hız profilleri birbirine oldukça yakın olmaktadır. Derinlik boyunca ortalama hızlar dikkate alındığında Q_1 debisi için 1B konumundaki hızın bir miktar daha yüksek olduğu söylenebilmektedir. Debinin artmasıyla özellikle Q_3 debisi için 1A ile 1C konumları arasındaki fark daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca 1A ile 1B konumlarındaki hız profilleri arasındaki fark açılmıştır. Dolayısıyla Q_2 debisi ile Q_3 debisi için iç kıvrımdaki (1A) hız farkları bariz şekilde daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum diğer derinlikler için de gözlenmiştir. Derinlik boyunca ortalama akım hızları dikkate alındığında, 1A konumu ile 1C konumu arasındaki hız farkının Q_1 debisinde 1.2 kat, Q_2 debisinde 1.22 kat ve Q_3 debisinde ise 1.3 kat olduğu görülmektedir. Q_1 debisi için 1. kesitte maksimum hız 1B konumunda, Q_2 debisi için 1A konumunda ve Q_3 debisi için ise yine 1A konumunda görülmektedir. Kıvrımlı kanallarda akım, eğrisel karakteristiklerin etkisiyle doğrusal kanaldan çok daha farklı olmaktadır. Enine kütle transferi veya yanal momentum (boyuna kütle transferinin yanında küçük de olsa) etkili olmaktadır. Akım kanal kıvrımlarına giriş yapmasıyla beraber sekonder akımın etkisiyle ve yanal momentumdan dolayı maksimum ana akım hızı (mansap doğrultusunda) iç kıyıdan dış kıyıya doğru yer değiştirmektedir (Blanckaert ve De Vriend, 2004).



Şekil 5.17 d=25 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması



Şekil 5.18 d=25 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması



Şekil 5.19 d=25 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debi için iç ile dış kıvrımlar arasındaki hız profillerinin tabana yakın bölgede karşılaştırılması

2. kesit incelendiğinde, her üç debi durumu için 2A, 2B ve 2C konumlarında yine ciddi farklar gözlenmemektedir. Q_1 debisi için 2B ve 2C konumunda hızın aynı ve 2A konumuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Q_2 debisi için hız belirgin şekilde 2B konumunda yüksek olmaktadır. Ancak 2B ile 2C konumlarındaki hız profilleri arasındaki fark oldukça az olduğu görülmüştür. Q_3 debisi için 2B konumunda hız yüksek olup, 2B ile 2C konumlarındaki hız profilleri arasındaki fark beklenildiği gibi daha belirgin olmaktadır. Derinlik boyunca ortalama akım hızları dikkate alındığında, 2A konumu ile 2B konumu arasındaki hız farkının Q_1 debisinde 1.2 kat, Q_2 debisinde ve Q_3 debisinde 1.12 kat olduğu görülmektedir. Q_1 debisi için 1. kesitte maksimum hız 2C konumunda, Q_2 debisi için 2B konumunda ve Q_3 debisi için ise yine 2B konumunda görülmektedir.

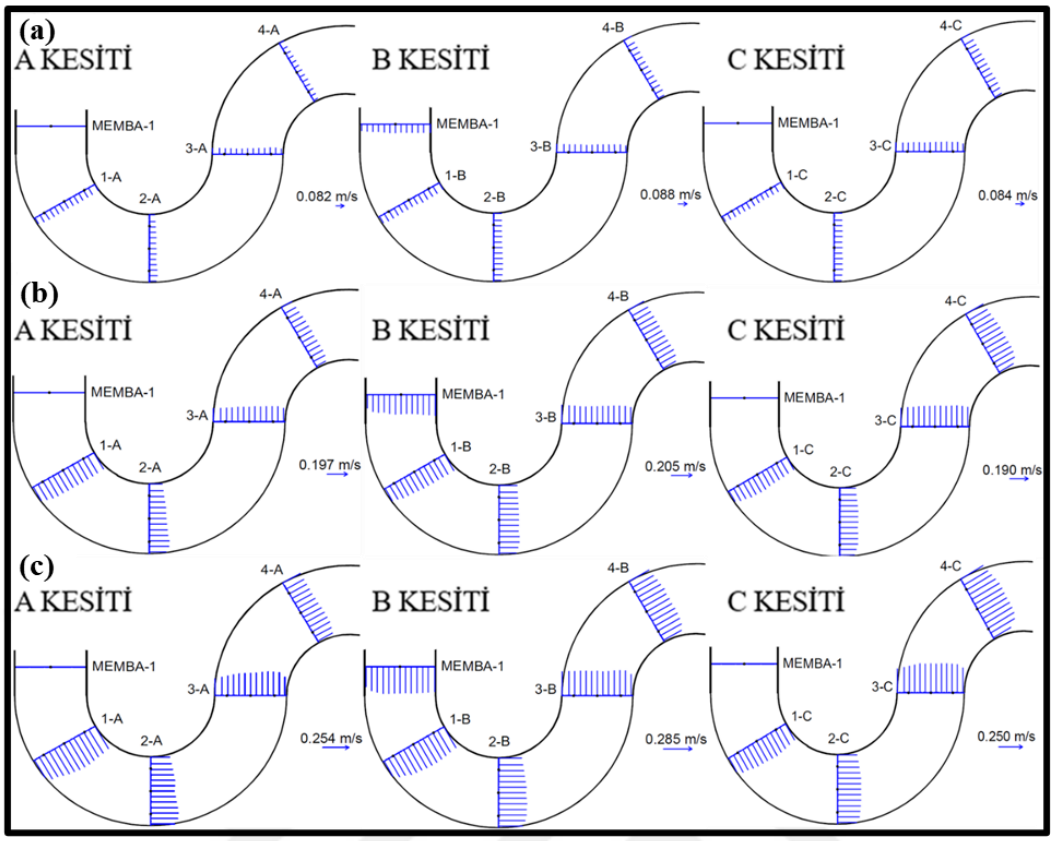
3. kesitte hız değerleri dış kıvrıma (3C) doğru yaklaştıkça artmaktadır. Özellikle debinin artmasıyla 3A ile 3C konumları arasında hız profillerindeki fark artmaktadır. Sadece 3A ile 3C konumları arasında değil 3B ile 3C konumları arasındaki fark da artmaktadır. Benzer şekilde derinlik boyunca ortalama akım hızları dikkate alındığında, 3A konumu ile 3C konumu arasındaki hız farkının Q_1

debisinde 1.5 kat, Q_2 debisinde 1.15 kat olduğu ve Q_3 debisinde 1.3 kat olduğu görülmektedir. 3. kesitte tüm debiler için maksimum hız 3C konumunda görülmektedir.

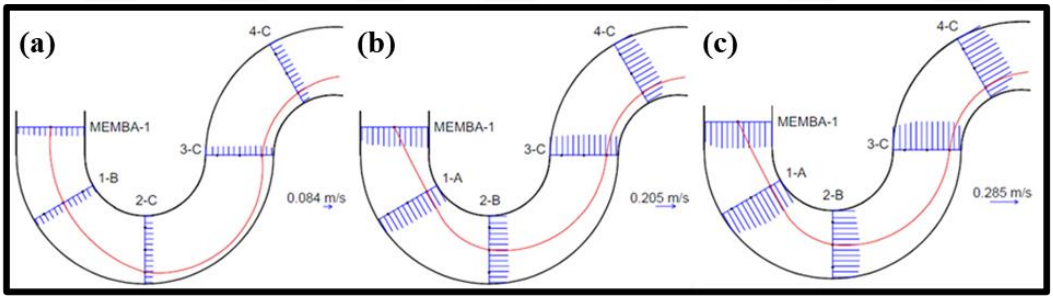
4. kesitte ölçülen hız değerleri tekrar iç kıvrıma doğru artmaktadır. Her üç debi için hız profilleri arasındaki fark belirgin ve 4C konumunda yüksek olmaktadır. Derinlik boyunca ortalama akım hızları dikkate alındığında, Q_1 debisi için 4C ile 4A konumları arasındaki hız farkı 1.85 kat, Q_2 debisi için 1.74 kat ve Q_3 debisi için 1.58 kat olduğu görülmektedir. Kıvrımlı kanal içerisinde ilerledikçe her kesitte iç ve dış kıvrım arasındaki hız profilleri ve dolayısıyla derinlik boyunca ortalama akım hızları farkı giderek artmaktadır. Burada diğer derinliklerden farklı olarak, 4C ile 4A konumları arasındaki hız profili ve ortalama hız farkı debi arttıkça artmamış hatta tam aksine bir miktar azalmıştır. 4. kesitte tüm debiler için maksimum hız yine diğer derinliklerde olduğu gibi 4C konumunda görülmektedir. Her koşul için membadan mansaba itibaren hız artışı yine 4C konumuna doğru olmaktadır. Bu artış yaklaşık 1.2 kat değerindedir.

Diğer derinliklerde olduğu gibi akım koşullarından bağımsız olarak maksimum hızların kanal boyunca en kısa rotada meydana geldiği 25 cm derinlikteki deney koşullarında da görülmektedir. Yani 1. kesitte A tarafında (iç kıvrım), 2. kesitte eksende (B), 3. kesitte C tarafında (iç kıvrım) ve yine 4. kesitte C tarafında (iç kıvrım) maksimum hızlar oluşmaktadır. Bu durum özellikle Q_2 ve Q_3 debisi için debiler arttıkça daha belirgin olarak görülmektedir.

Şekil 5.20'de mansap doğrultusundaki hızların derinliğe göre dağılımları verilmektedir. Burada kanalın dışında belirtilen hız vektörü (mavi ok) referans hız vektörünü ve ilgili kesitteki ortalama hız değerini göstermektedir. Kanal içindeki hız dağılımları yine bu ortalama değerlere göre ölçekli olarak verilmiştir. Bu şekilde her üç debiye göre her ölçüm konumu için (A, B ve C) derinliğe göre oluşan hız dağılımları bir arada sunulmaktadır. Şekil 5.21'de ise farklı debiler için maksimum birim debinin kanal boyunca izlediği rota verilmektedir. Debi arttıkça maksimum birim debi hızlarda olduğu gibi en kısa rotayı izlemektedir.



Şekil 5.20 d=25 cm derinlik için hız profillerinin kıvrımlı kanal boyunca vektör haritaları: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s



Şekil 5.21 d=25 cm derinlik için kıvrımlı kanal boyunca maksimum birim debi çizgisi: (a) Q_1=0.016 m^3/s, (b) Q_2=0.035 m^3/s, (c) Q_3=0.05 m^3/s

5.2.3 Sekonder Akımın İncelenmesi

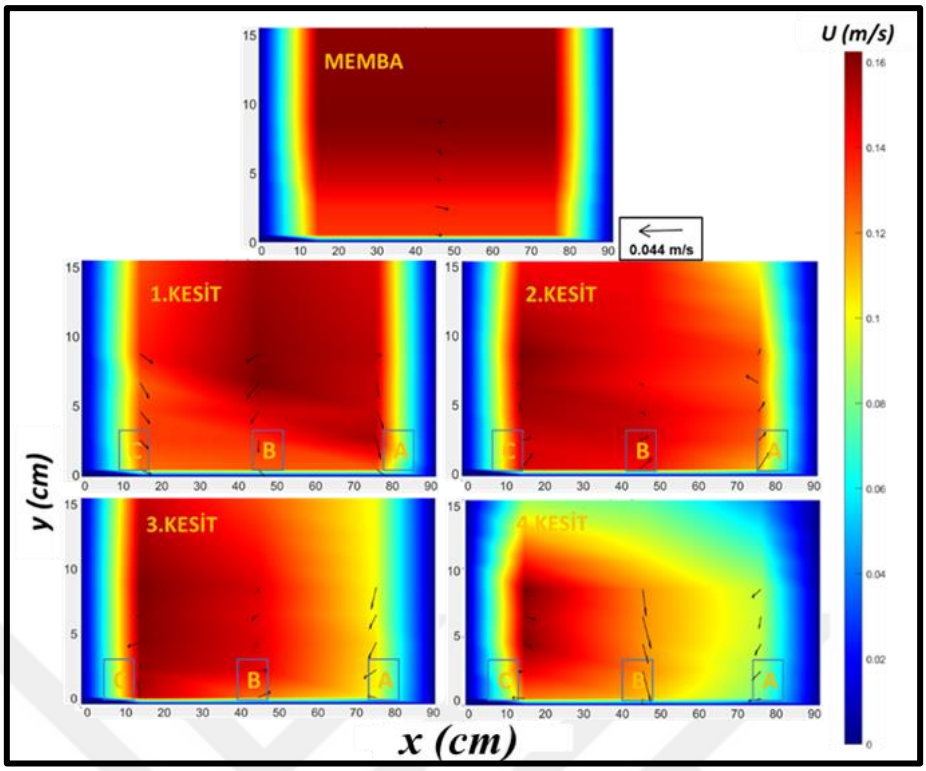
Kıvrımlı kanalda sekonder akımın incelenmesi için ADV ile gerçekleştirilen ölçümlerde akım doğrultusundaki hız bileşeninin yanında üç boyutlu olarak diğer hız bileşenleri dikkate alınarak hız vektörleri elde edilmiştir. Burada, bu vektörler kartezyen koordinat sistemine göre akım doğrultusuna dik v ve w hız bileşenlerinin vektörel toplamı olarak verilmektedir. Bu veriler u hız bileşeni ile aynı anda ADV ile 2 cm aralıklarla 15 cm derinlik için 5 farklı noktada, 20 cm derinlik için 7 farklı noktada ve 25 cm derinlik için 9 farklı noktada gerçekleştirilen hız ölçümleri ile

elde edilmiştir. Bölüm 3'te bahsedildiği üzere, ADV ölçüm tekniklerinden kaynaklı olarak derinlik boyunca ADV ile gerçekleştirilen ölçümlerde bir kesitte alınan ölçüm noktalarında kısıtlıklar mevcut olmaktadır. Bu sebeple bu bölümde sadece debilerden bağımsız olarak mevcut veri miktarından yararlanarak her kesit için kıvrımlı kanal boyunca özellikle kıvrımlarda sekonder akım yapısının yakalanması amaçlanmıştır.

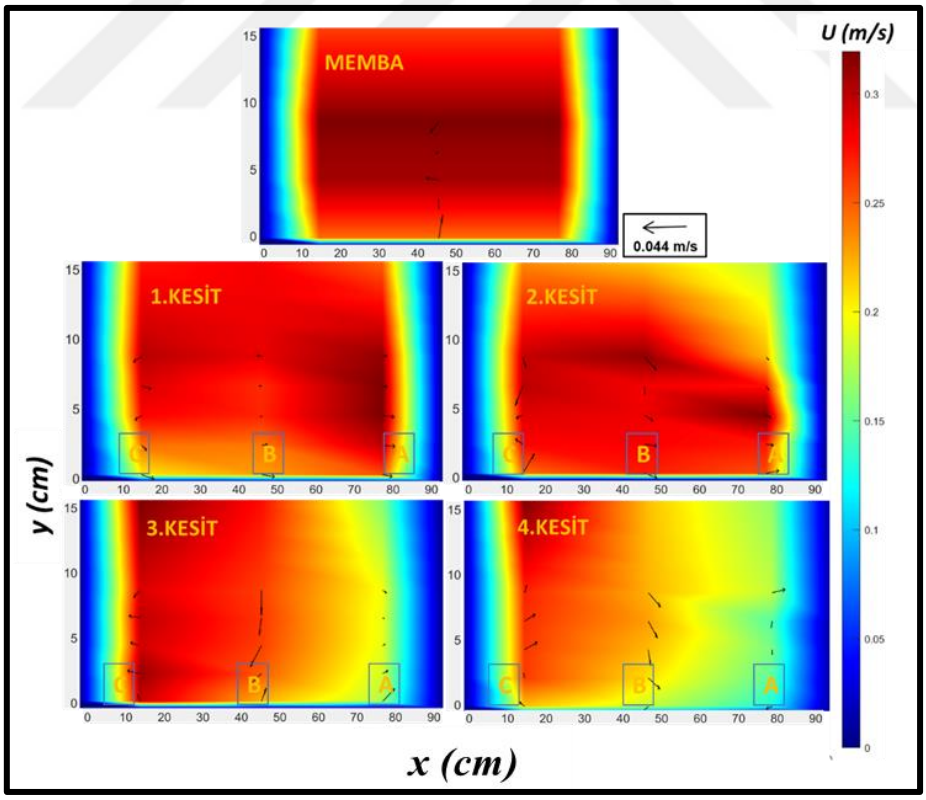
Akım doğrultusundaki u hızında olduğu gibi, her bir nokta için 1 dakika boyunca ölçüm alınarak 12000 veri elde edilmiştir. Bu veriler içerisinde yine %90 ve üzeri korelasyona sahip veriler dikkate alınmıştır. Burada, herhangi bir anda ve noktada ölçülen u ve w değeri %90 ve üzeri korelasyon değerine sahip olsa bile eğer v değeri %90 altı bir korelasyona sahip ise o andaki u ve w değerlerinin de dikkate alınmadığının belirtilmesi gerekmektedir. Bu durum bu tez çalışmasındaki deneysel çalışmada veri güvenliğini arttırmaktadır. Kıvrımlı kanalda kararlı akım olması durumunda kıvrım etkilerinin incelenmesi amacı ile bileşke enine ve düzey hız vektörleri her bir kesit için incelenmiştir. Yine sekonder akımı incelemek için akım doğrultusundaki hız bileşenleri (U) kullanılarak her kesit için hız kontörleri oluşturulmuştur.

5.2.3.1 d=15 cm Su Derinliği Olması Durumu

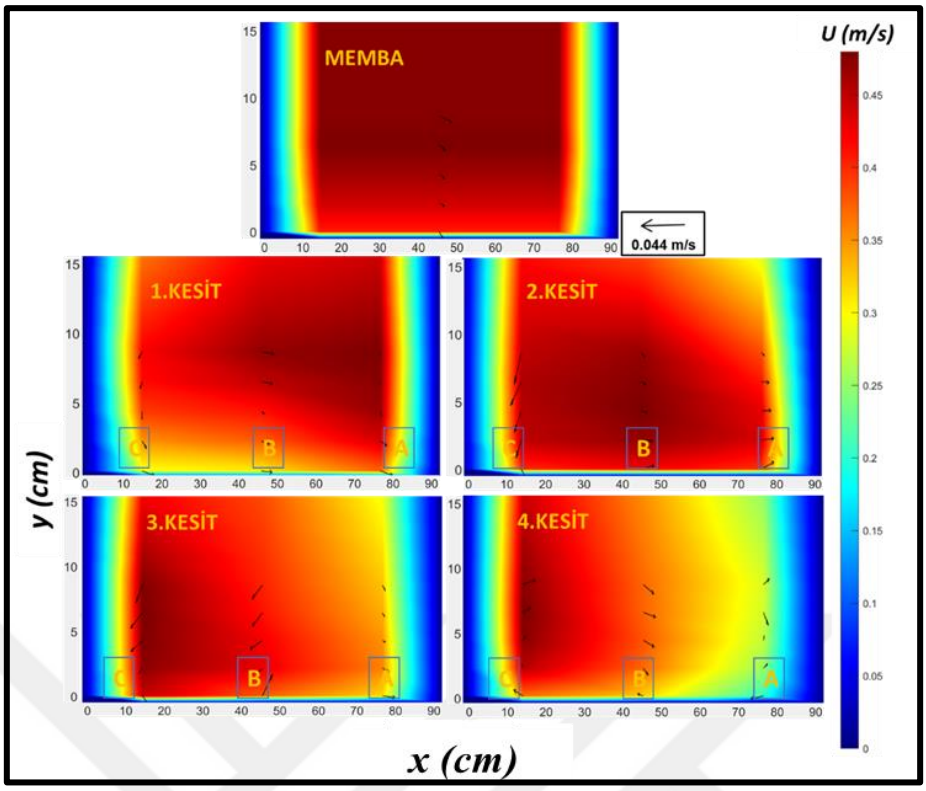
15 cm su derinliğinde sırasıyla Q_1, Q_2 ve Q_3 debisi için Şekil 5.22, 5.23 ve 5.24'te hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri ölçekli olarak verilmiştir. Mansaba doğru ilk kıvrım olan 2. kesitte dış kıvrım C konumuna, 120º'lik ikinci kıvrım olan 4. kesitte ise A konumuna denk gelmektedir. Şekil 5.22, 5.23 ve 5.24 birlikte incelendiğinde, sekonder akım sınırlı da olsa gözlenebilmektedir. 2. kesitte vektörel ok yönleri incelendiğinde kanal tabanında A konumuna doğru, orta derinliklerde C konumunda aşağı doğru, A konumunda ise yukarı doğru yöneldiği görülmektedir. İkinci kıvrımın ortası olan 4. kesitte kanal tabanında C konumuna doğru, orta derinliklerde C konumunda yukarı, A konumunda ise kısmen aşağıya doğru yöneldiği belirlenmiştir. Dolayısı ile özellikle 4. kesitte kıvrım etkisiyle meydana gelen sekonder akım, hız vektörleri yardımı ile gözlenebilmektedir.



Şekil 5.22 d=15 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri



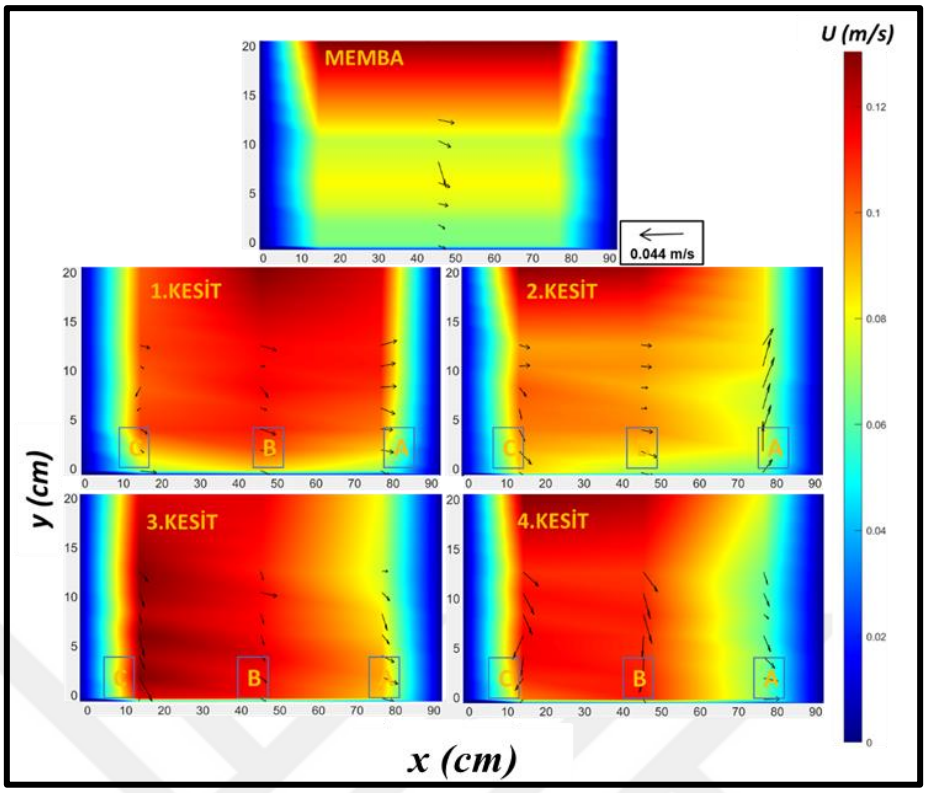
Şekil 5.23 d=15 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri



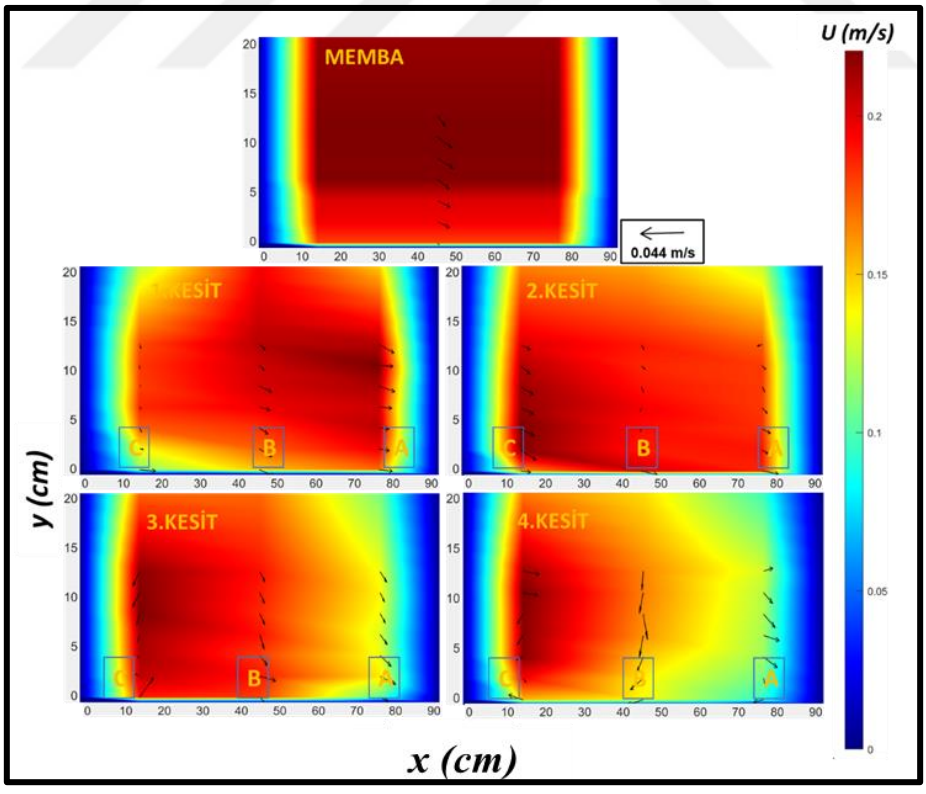
Şekil 5.24 d=15 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri

5.2.3.2 d=20 cm Su Derinliği Olması Durumu

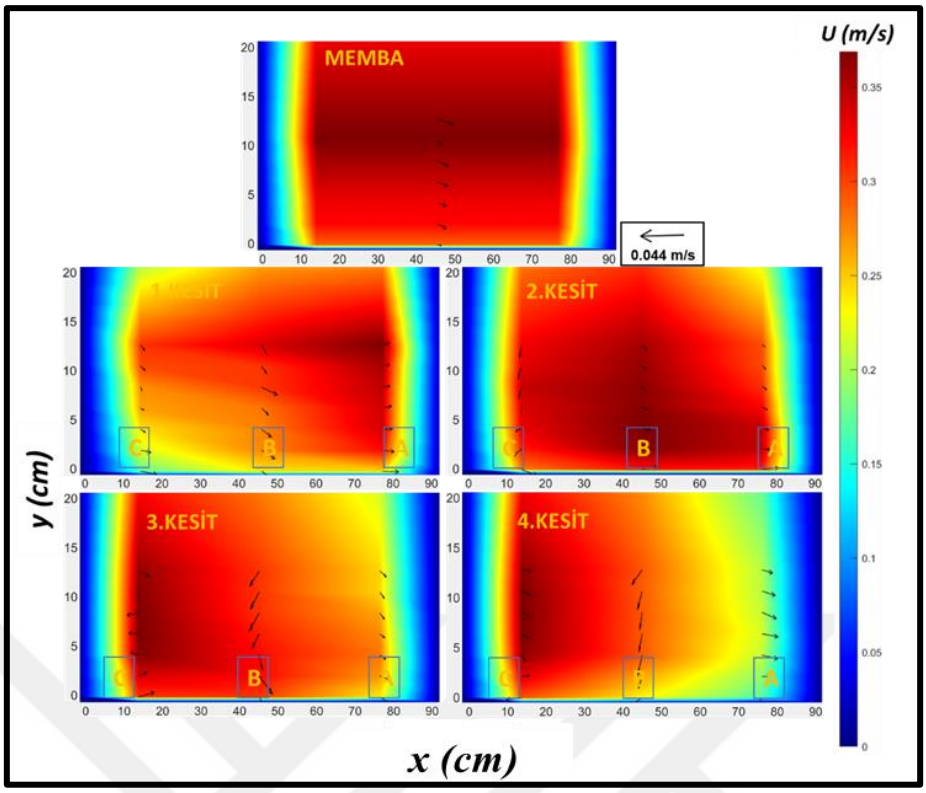
20 cm su derinliğinde sırasıyla Q_1, Q_2 ve Q_3 debisi için Şekil 5.25, 5.26 ve 5.27'de hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri ölçekli olarak verilmiştir. Memba konumuna bakılınca her üç debi durumunda da kıvrımlı kanalın etkisi hissedilmeye başlanmış ve bileşke enine ve düşey hız vektörleri kıvrımın içine doğru yönelmiştir. Benzer şekilde 1. kesite bakıldığında yine iç kıvrıma doğru yönelme görülmeye devam etmektedir. Bu iki kesitten sekonder akım oluşumu gözlemlenmektedir. 2. kesitinde Q_1 debisinde yine iç kıvrıma doğru bir eğilimle beraber bir miktar sekonder akım oluşumu gözlemlense de fakat Q_2 ve Q_3 debisi için anlamlı bir sekonder oluşumu gözlenememiştir. 3. kesitinde ise bileşke enine ve düşey hız vektörleri akım hızlarının maksimum olduğu bölgeye doğru yönelme eğilimindedir. Fakat yine de anlamlı bir sekonder oluşumu yakalanamamıştır. Bu durum iki kıvrım arası geçişten ve ADV ile ölçüm noktası kısıtlığından kaynaklanmaktadır. Son olarak 4. kesitte her üç debi durumunda özellikle B ile C konumları arasında maksimum hızın meydana geldiği bölgede diğer bir ifadeyle iç kıvrıma doğru sekonder akım oluşumu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.25 d=20 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri



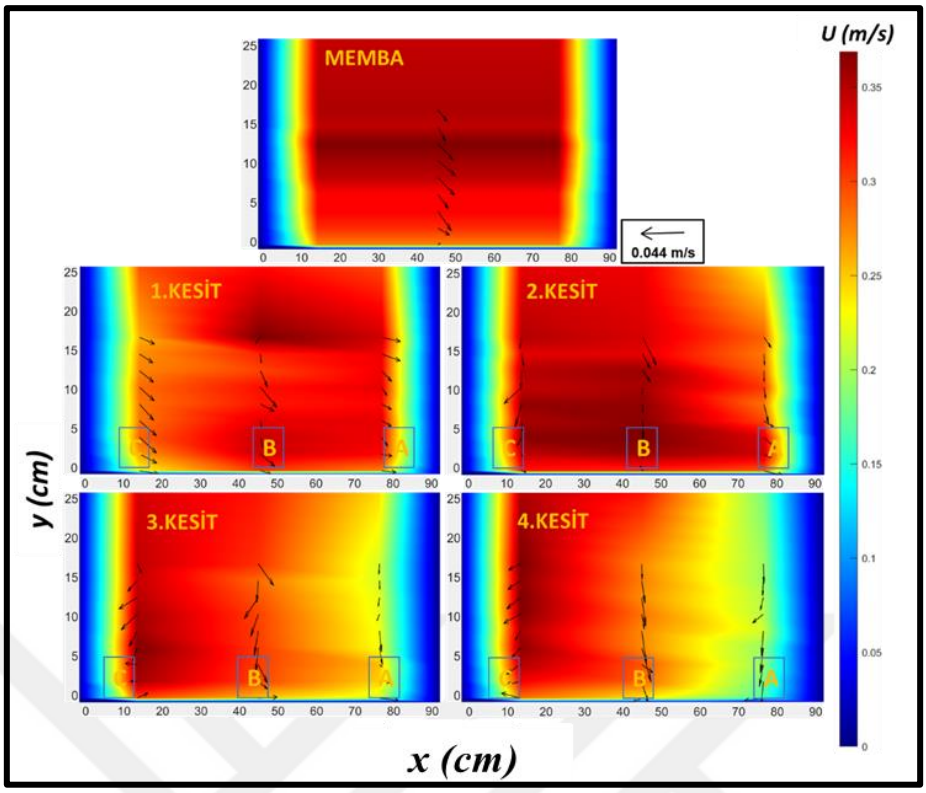
Şekil 5.26 d=20 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri



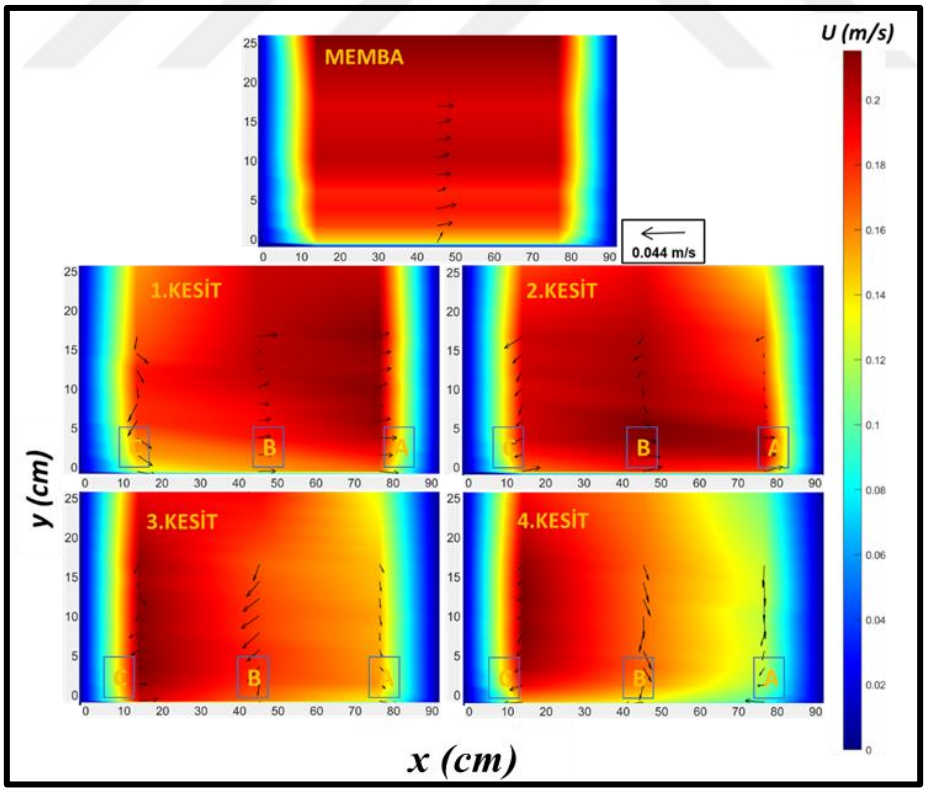
Şekil 5.27 d=20 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri

5.2.3.3 d=25 cm Su Derinliği Olması Durumu

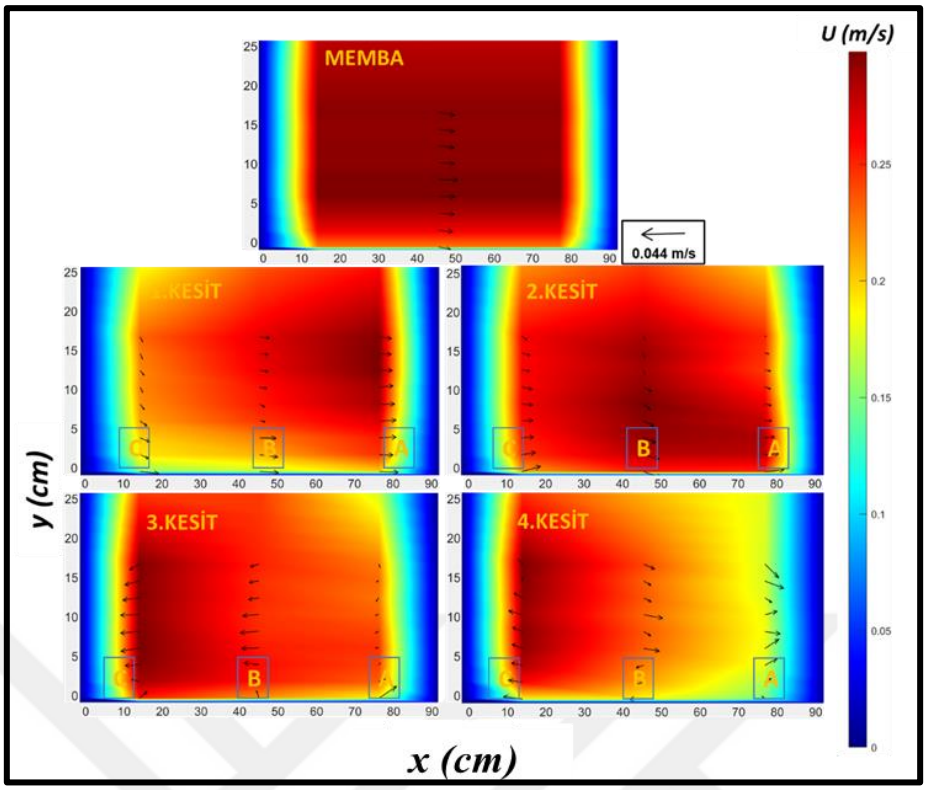
25 cm su derinliğinde sırasıyla Q_1, Q_2 ve Q_3 debisi için Şekil 5.28, 5.29 ve 5.30'da hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri ölçekli olarak verilmiştir. Her üç debi durumu için membada vektörler 1. kesitin iç kıvrımına doğru yönelmektedirler. Mansaba doğru ilk kıvrım olan (180°'lik kıvrım merkezi) 2. kesitte dış kıvrım C konumuna, ikinci kıvrım olan (120°'lik kıvrım merkezi) 4. kesitte ise A konumuna denk gelmektedir. Sekonder akım 25 cm derinlikte her debi durumu için de sınırlı bir şekilde gözlenebilmektedir. 2. kesitte ok yönleri incelendiğinde kanal tabanında A konumuna doğru, orta derinliklerde C konumunda aşağı doğru, A konumunda ise sağa doğru yöneldiği görülmektedir. İkinci kıvrım olan 4. kesitte kanal tabanında C konumuna doğru, orta derinliklerde C konumundan sola, A konumunda ise aşağıya doğru yöneldiği belirlenmiştir. Özellikle yine 4. kesitte kıvrım etkisiyle meydana gelen sekonder akım, hız vektörleri yardımı ile gözlenebilmektedir. Sadece Q_3 debisi için 4. kesitin A konumunda beklenenden farklı bir yapı gözlenmiştir. Maksimum hızın oluştuğu iç kıvrımda (4C ile 4B arası) bileşke vektörler zıt yönlü olmaktadır



Şekil 5.28 d=25 cm derinlik ve Q_1=0.016 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri



Şekil 5.29 d=25 cm derinlik ve Q_2=0.035 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri



Şekil 5.30 d=25 cm derinlik ve Q_3=0.05 m^3/s debisi için akım doğrultusundaki hız kontürleri ile bileşke enine ve düşey hız vektörleri

5.2.4 Boyutsuz Parametreler ile İnceleme

Önceki bölümde detaylandırılan deney koşulları, bu bölümde Tablo 5.4'te hidrolik parametrelerle birlikte yeniden özetlenmiştir. Bu kapsamda, deney koşulları daha sistematik bir şekilde sınıflandırılmış, her birine özgü deney adları tanımlanarak boyutsuz temel parametreler kullanılmıştır. Özellikle boyutsuz debi parametresi kullanılarak kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizmasının boyutsuz parametreler aracılığıyla incelenmesi amaçlanmıştır. Bu parametreler, yanal momentum transferi ve sekonder akım oluşumu gibi kıvrımlı kanal geometrisine özgü hidrodinamik davranışların anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca söz konusu boyutsuz parametreler ve deney sınıflandırmaları, FLOW-3D ile geliştirilen üç boyutlu sayısal modelin doğrulama sürecinde de temel kriterler olarak kullanılmıştır.

Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, bu tez çalışmasındaki deneylerde 11.000 ile 42.000 arasında olmak üzere daha geniş bir Reynolds sayısı aralığında çalışılmıştır. Bu geniş aralık farklı türbülans seviyelerinde kıvrımlı kanaldaki akım dinamiklerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Yine literatürden farklı olarak 0.05 ile 0.31 arasında olmak üzere daha geniş bir Froude sayısı aralığında

çalışılmıştır. Bütün deneyler menderesli akarsuların doğadaki akım koşullarına benzer olarak nehir rejiminde (Fr<1) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca burada kullanılan boyutsuz parametreler saha ölçümlerinden elde edilen verilerle benzerlik göstermektedir.

Q debi miktarı, d su derinliği ve g yerçekimi ivmesi olmak üzere $Q(gd^5)^{-0.5}$ ifadesi ile boyutsuz debi belirlenmiştir (Tablo 5.4). Burada, Re Reynolds sayısını, Fr Froude sayısını, U_m ise membada en kesitte ortalama akım hızını ifade etmektedir. Burada, en kesitsel ortalama akım hızı $U_m= Q/(B.d)$ (B kanal genişliği olmak üzere) ifadesi, Froude sayısı $Fr= U_m/(gd)^{-0.5}$ ifadesi ve Reynolds sayısı $Re= U_m.d/\nu$ (ν kinematik viskozite olmak üzere) ifadesi ile hesaplanmaktadır. Burada Re ve Fr sayısı yukarıda ölçümlerden elde edilen verilenlerden farklı olarak deney koşuluna bağlı değerler olmaktadır.

Tablo 5.4 Kıvrımlı kanalda kararlı akımın incelenmesi için gerçekleştirilen deneylerde kullanılan temel boyutsuz hidrolik parametreler

Deney No	**d (m)**	**Q (m^3/s)**	**Deney Adı**	**$Q(gd^5)^{-0.5}$**	**U_m (m/s)**	**Re**	**Fr**
1	0.15	0.016	Q16d15	0.034	0.119	13000	0.10
2	0.15	0.035	Q35d15	0.074	0.259	29000	0.21
3	0.15	0.050	Q50d15	0.106	0.370	42000	0.31
4	0.20	0.016	Q16d20	0.026	0.089	12000	0.06
5	0.20	0.035	Q35d20	0.056	0.194	27000	0.14
6	0.20	0.050	Q50d20	0.080	0.278	39000	0.20
7	0.25	0.016	Q16d25	0.020	0.071	11000	0.05
8	0.25	0.035	Q35d25	0.045	0.156	25000	0.10
9	0.25	0.050	Q50d25	0.064	0.222	36000	0.14

Daha önceki bölümlerde ADV ile gerçekleştirilen hız ölçümlerinden elde edilen hız profilleri verilmiştir. Burada ek olarak, boyutsuz derinlik boyunca ortalama hız, boyutsuz taban kayma gerilmesi ve türbülans kinetik enerjisi parametreleri tartışılmıştır. Şekil 5.31 boyutsuz debi ile boyutsuz derinlik boyunca ortalama hız arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada, U_d derinlik boyunca ortalama hız, kayma hızına (u_*) bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Kayma hızı, mevcut akım koşulları için Blasius yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır (Sumer ve Fuhrman, 2020).

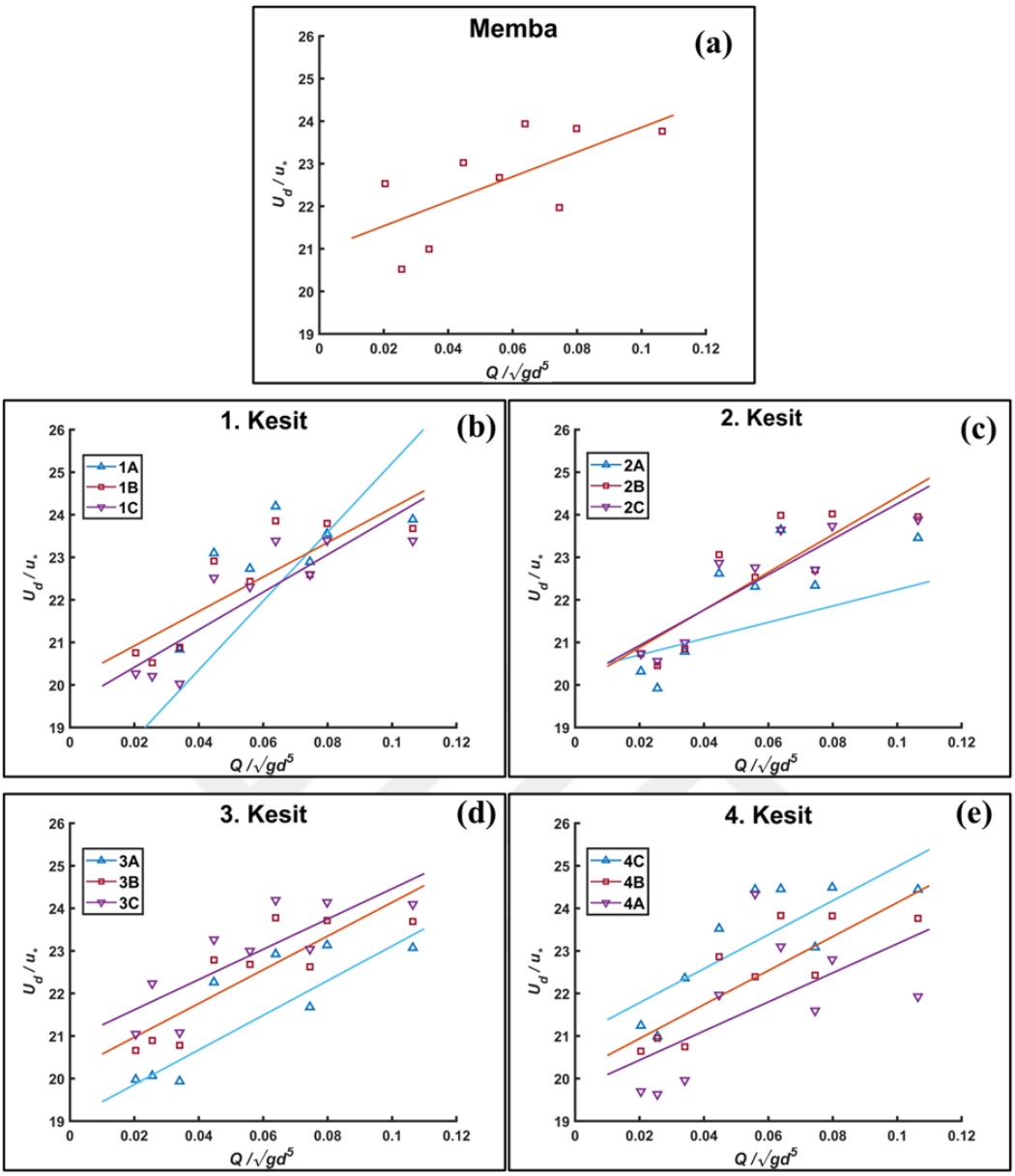
$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \tag{5.1}$$

burada; taban kayma gerilmesi (τ_b), kayma hızı ile suyun özgül kütlesi (ρ) ile hesaplanmaktadır (Denklem 5.1). 1. kesitte, iç ve dış kıvrım arasındaki hız farkı, artan boyutsuz debiyle birlikte iç kıvrım lehine önemli ölçüde artmıştır. Diğer bir ifadeyle, akımın ilk kıvrımı hissettiği kesitte, akım hızları iç kıvrıma doğru artmaktadır. Bu durum, literatürdeki deneysel çalışmalarla benzer bir sonucu göstermektedir (Blanckaert, 2009; Pradhan vd., 2018). Başka bir deyişle, kıvrımın iç yüzeyine doğru akımın ivmesi artmaktadır. Bu durumun basınç düşüşünden kaynaklandığı düşünülmektedir.

2. kesitte ise iç kıvrıma doğru hız artışı azalmaktadır. Buna karşılık, kesitin ortasındaki hız ve dış kıvrımdaki hız aynı eğilimle önemli ölçüde artmıştır. Bu nedenle, hızlar kesitin iç kıvrımında daha düşük, orta ve dış kıvrımında ise daha yüksek olmaktadır.

3. kesitte, hızların dış kıvrımda kesitin ortasına göre biraz daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, en düşük hızlar, dış kıvrım ve kesitin ortasındakine benzer bir artış eğilimi ile iç kıvrımda kaydedilmiştir. 4. kesitte, her bir deney koşulu için en yüksek hızlar iç kıvrımda, en düşük hızlar ise dış kıvrımda gözlemlenmiştir.

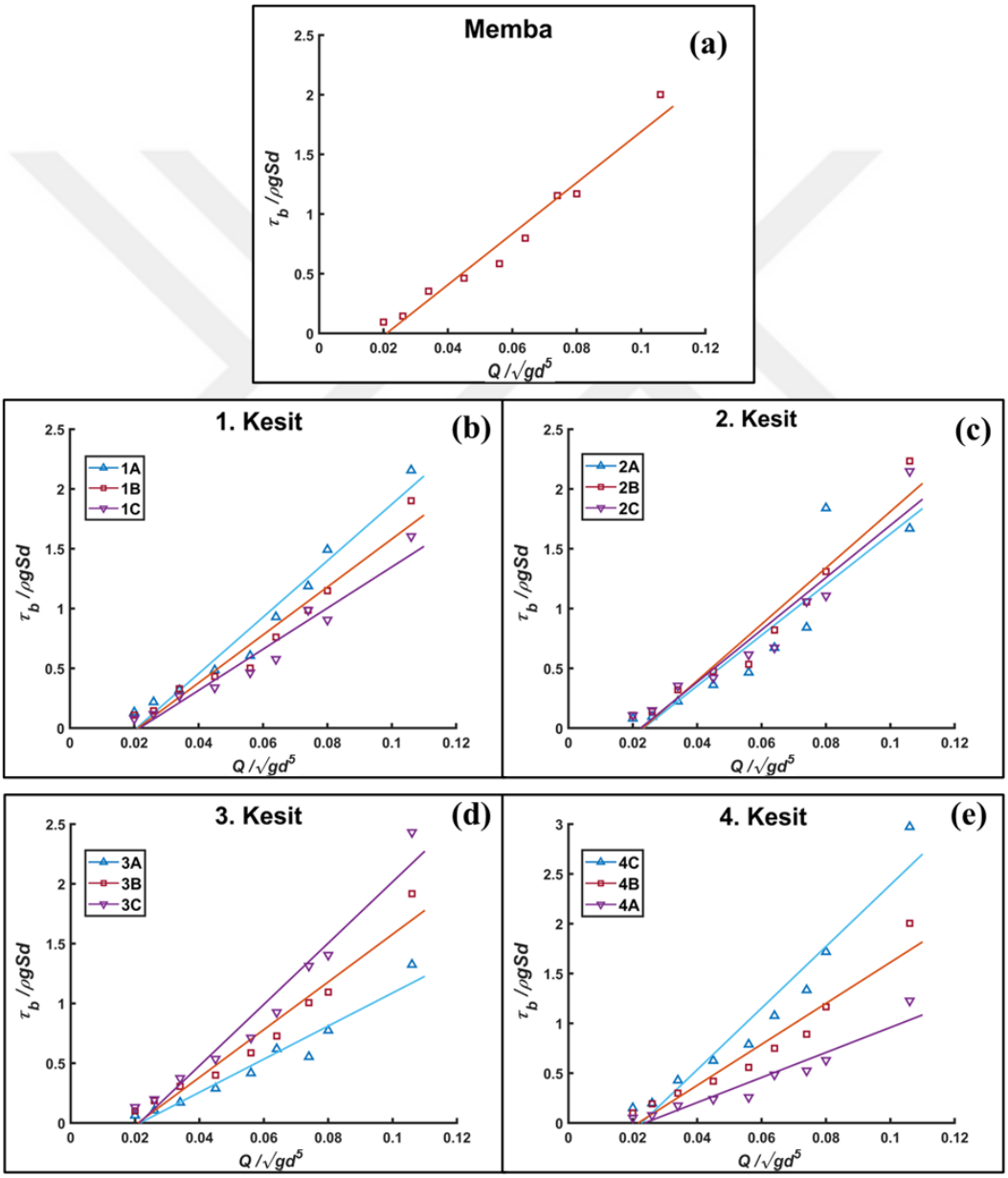
4. kesitteki her nokta için artış eğilimleri aynı olmaktadır. Kıvrımlı bir kanaldaki kararlı akımda, kıvrımlar boyunca membadan mansap yönüne doğru ilerledikçe, iç ve dış kıvrım arasındaki hız farkının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Ayrıca, tüm kesitler dikkate alındığında boyutsuz parametrelerle de hızların mansaba doğru bir miktar artma eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.31 Boyutsuz derinlik boyunca ortalama hız: (a) Memba, (b) 1. Kesit, (c) 2. Kesit, (d) 3. Kesit, (e) 4. Kesit (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

Şekil 5.32 boyutsuz debi ile boyutsuz taban kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada, τ_b taban kayma gerilmesi, d su derinliği, g yerçekimi ivmesi ve S kıvrımlı kanalın ortalama eğimini ifade etmektedir. Burada görüldüğü gibi, her bir kesitte boyutsuz olarak derinlik boyunca ortalama hız değişimlerine benzer bir davranış gözlenmektedir. Her bir kesitte iç ve dış kıvrım arasındaki taban kayma gerilmesi farkı boyutsuz debiler arttıkça daha belirgin hale gelmektedir. Benzer şekilde, akım kıvrımlı kanaldaki kıvrım kesitleri boyunca ilerledikçe bu fark artmaktadır. Kıvrımlı kanalda taban kayma gerilmesindeki artış kritik kayma gerilmesini etkileyebilir ve akarsu kenarlarında oyulma ve birikmeye neden

olabilmektedir. İncelemeler sonucunda hızlar ve taban kayma gerilmeleri açısından en belirgin farklılıkların 3. kesit ve özellikle 4. kesitte (ilk kıvrımı tamamladıktan sonra ikinci kıvrımın merkezinde) meydana geldiği anlaşılmaktadır. Buradan, kıvrımlardaki ani değişimle birlikte merkezkaç kuvvetinin etkisiyle kanaldaki akımın yapısında hidrodinamik değişiklikler meydana geldiği sonucuna varılmaktadır. Sonuç olarak, akımın ilk yarım kıvrımı geçtikten sonra kıvrımlı kanalda önemli morfolojik değişikliklere neden olabileceği sonucuna varılmaktadır.

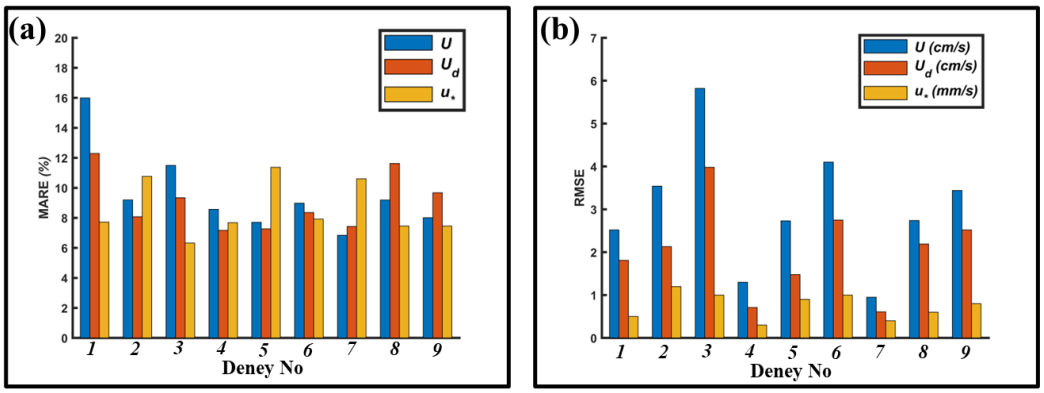


Şekil 5.32 Boyutsuz taban kayma gerilmesi: (a) Memba, (b) 1. Kesit, (c) 2. Kesit, (d) 3. Kesit, (e) 4. Kesit (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

5.3 Kıvrımlı Kanalda Kararlı Akımın Sayısal Olarak Modellenmesi

Deneysel çalışmadaki 9 koşuldan elde edilen derinlik boyunca ortalama hız, akım yönündeki hız profilleri ve kayma hızı parametreleri sayısal modeli doğrulamak için dikkate alınmıştır. Sonuçları değerlendirmek için Ortalama Mutlak Bağıl Hata (MARE, %) ve Ortalama Karekök Hata (RMSE) kullanılmıştır (sırasıyla Denklem 4.31 ve 4.32). Bu çalışmada, HAD modeli sadece hata metrikleri kullanılarak değil, aynı zamanda grafiksel olarak ve maksimum ile minimum değerleri tahmin etme açısından da değerlendirilmiştir. Başka bir ifadeyle hem niteliksel hem de niceliksel değerlendirmeler yapılmıştır. FLOW-3D'den elde edilen sonuçların hata metrikleri Şekil 5.33 ve Tablo 5.5'te verilmektedir.

Sayısal modeli değerlendirmek için kıvrımlı kanal boyunca 13 farklı noktada ölçülen akım (su) derinliği, -x, -y ve -z yönlerindeki hız bileşenleri, akım yönündeki hız profilleri, derinlik boyunca ortalama hız, kayma hızıyla ilişkili taban kayma gerilmesi ve -x, -y ve -z yönlerindeki çalkantı hızlarıyla ilişkili türbülans kinetik enerjisi parametreleri kullanılmıştır. Ayrıca bu parametreler yardımıyla kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizması tartışılmıştır. Modelin doğrulanmasında kullanılan, kıvrımlı kanaldaki akımın incelenen her bir fiziksel parametresi devam eden bölümlerde ayrıntılı olarak verilmiştir.



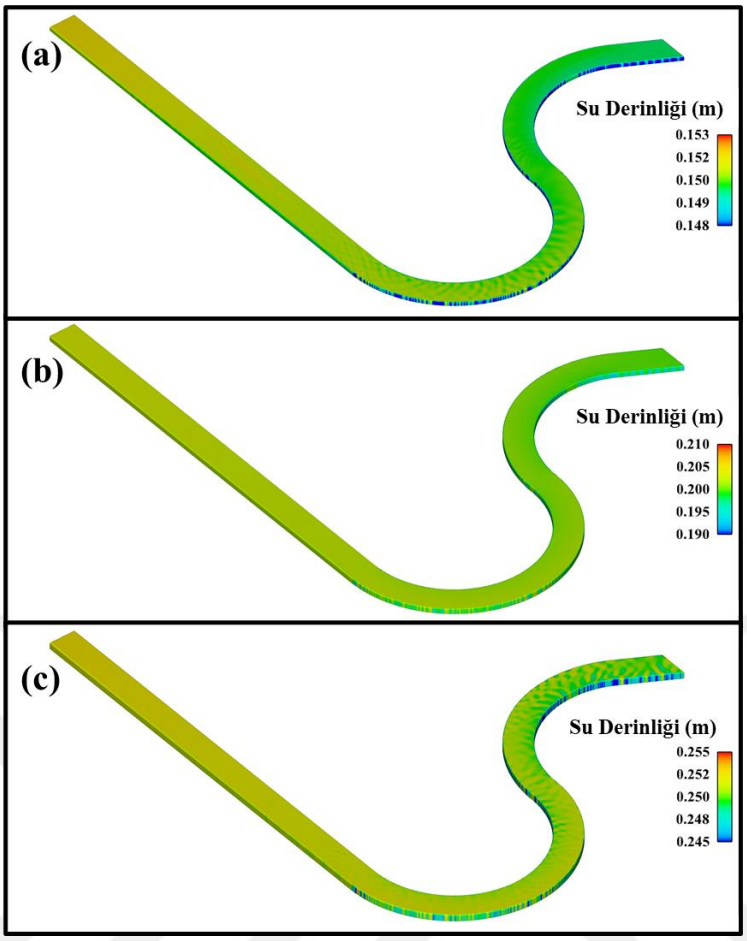
Şekil 5.33 Deney 1-9 için akım doğrultusundaki hız büyüklükleri, derinlik boyunca ortalama hızları ve kayma hızları için FLOW-3D ile deneysel verilerin ait hata metrikleri: (a) MARE (%), (b) RMSE (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

Tablo 5.5 Deney 1-9 için akım doğrultusundaki hız büyüklükleri, derinlik boyunca ortalama hızları ve kayma hızları için FLOW-3D ile deneysel verilerin ait hata metrikleri

	Akım Doğrultusundaki Hız Büyüklükleri		Derinlik Boyunca Ortalama Hızlar		Kayma Hızları	
Deney No	**MARE (%)**	**RMSE (cm/s)**	**MARE (%)**	**RMSE (cm/s)**	**MARE (%)**	**RMSE (mm/s)**
1	15.99	2.52	12.29	1.81	7.72	0.5
2	9.20	3.54	8.08	2.13	10.77	1.2
3	11.50	5.82	9.34	3.98	6.32	1.0
4	8.57	1.30	7.17	0.71	7.68	0.3
5	7.71	2.73	7.27	1.48	11.37	0.9
6	8.98	4.10	8.36	2.75	7.92	1.0
7	6.84	0.95	7.43	0.61	10.60	0.4
8	9.19	2.74	11.63	2.19	7.46	0.6
9	8.01	3.44	9.68	2.52	7.46	0.8

5.3.1 Su Derinlikleri

Deneysel ve sayısal modellemede, membada giriş koşulu olarak belirlenen su derinliği kanal boyunca kayda değer bir değişim göstermemiştir. Bu durum, kıvrımlı kanalda kararlı akım durumunu sağlamak adına önem arz etmektedir. Sadece beklenildiği gibi, özellikle kıvrımlarda, artan debiyle birlikte su yüzeyinde küçük dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Ölçüm noktalarında, kanal boyunca su derinliği deneysel model için yaklaşık 6.2/1000 ve sayısal model için yaklaşık 1.2/1000'lik anlık farklılıklar gösterebilmektedir (Şekil 5.34). Kanal boyunca su derinliğinin değişmemesi HAD modelinde de akımın kararlı olduğunu göstermektedir.

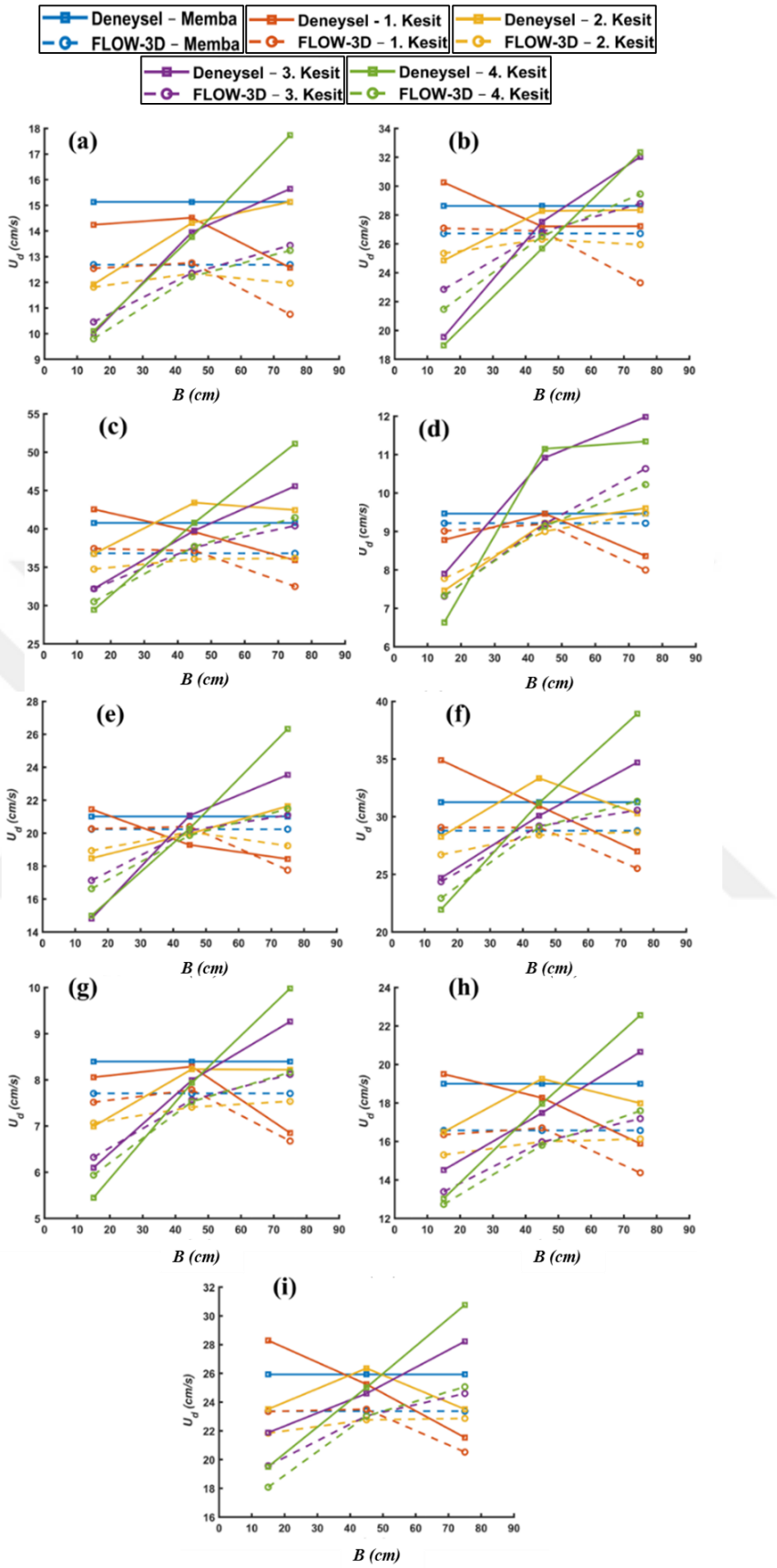


Şekil 5.34 HAD modelinden elde edilen su derinlikleri: (a) d = 0.15 m, (b) d = 0.20 m, (c) d = 0.25 m (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

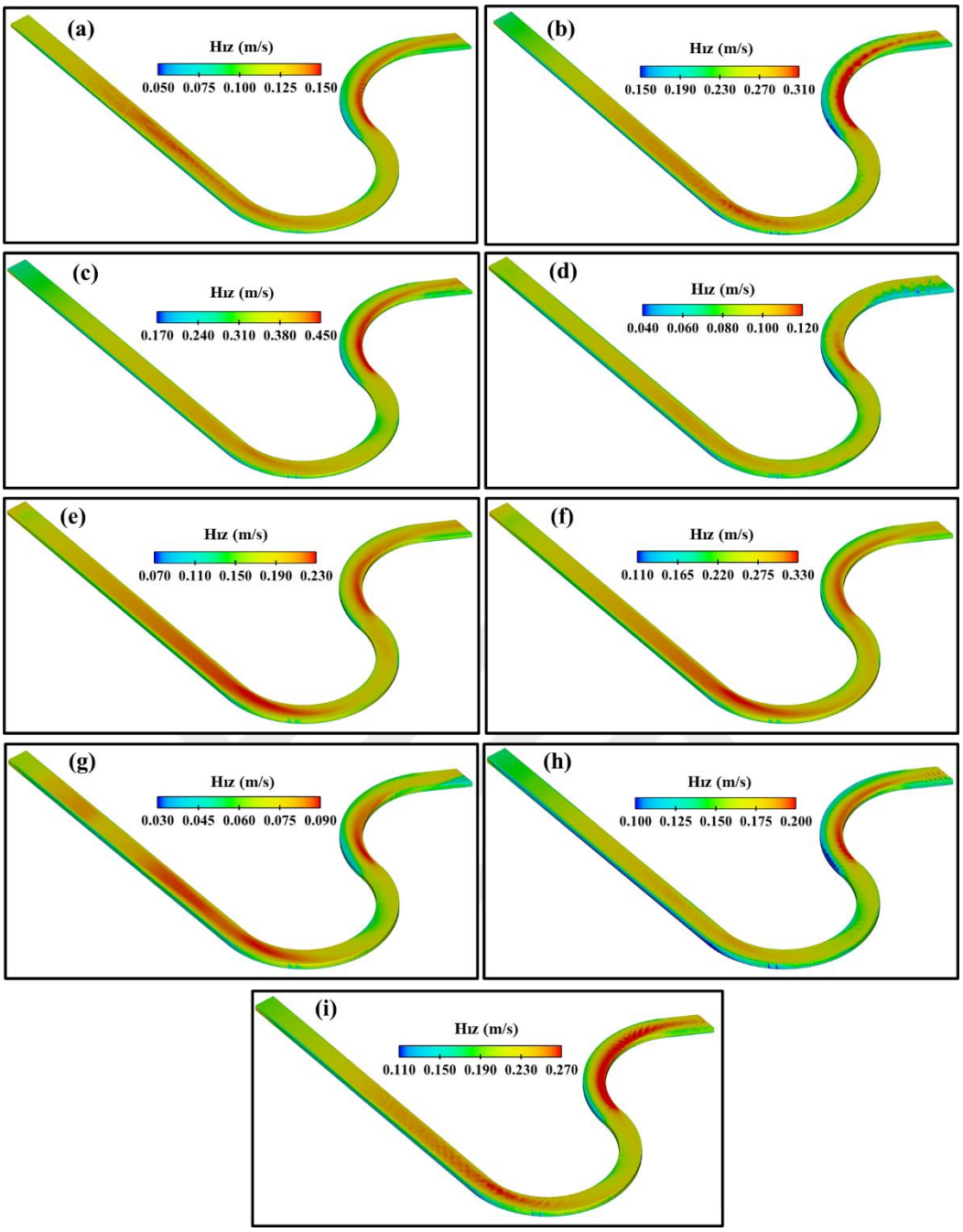
5.3.2 Derinlik Boyunca Ortalama Hız

Şekil 5.35, her bir kesit için sayısal ve deneysel modellerden elde edilen derinlik boyunca ortalama hızların karşılaştırmasını göstermektedir. Sayısal model ve deneysel modelin sonuçları karşılaştırılmış ve tüm koşullar için birbirlerine çok yakın oldukları görülmüştür. Ancak, deneysel çalışmada ölçülen iç ve dış kıvrım arasındaki hız farkının sayısal modele göre daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Başka bir ifadeyle, iç ve dış kıvrım arasındaki derinlik boyunca ortalama hız farkı sayısal modelde daha küçük bulunmuştur.

Tüm HAD modelleri için derinlik boyunca ortalama hız hataları Şekil 5.33'te ve Tablo 5.5'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. MARE için en yüksek hata Q16d15 koşulu için %12.3 ve en düşük hata Q16d20 koşulu için %7.2 olmuştur. RMSE için en yüksek hata 4 cm/s ile Q50d15 durumunda, en düşük hata ise 0.6 cm/s ile Q16d25 durumunda gerçekleşmiştir. Şekil 5.36, kıvrımlı kanaldaki sayısal modelden elde edilen hız büyüklükleri hakkında daha fazla bilgi vermektedir.



Şekil 5.35 Derinlik boyunca ortalama hızlar: (a-i) sırasıyla deney 1-9 için (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)



Şekil 5.36 HAD modelinden elde edilen hız büyüklükleri: (a-i) sırasıyla deney 1-9 için (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

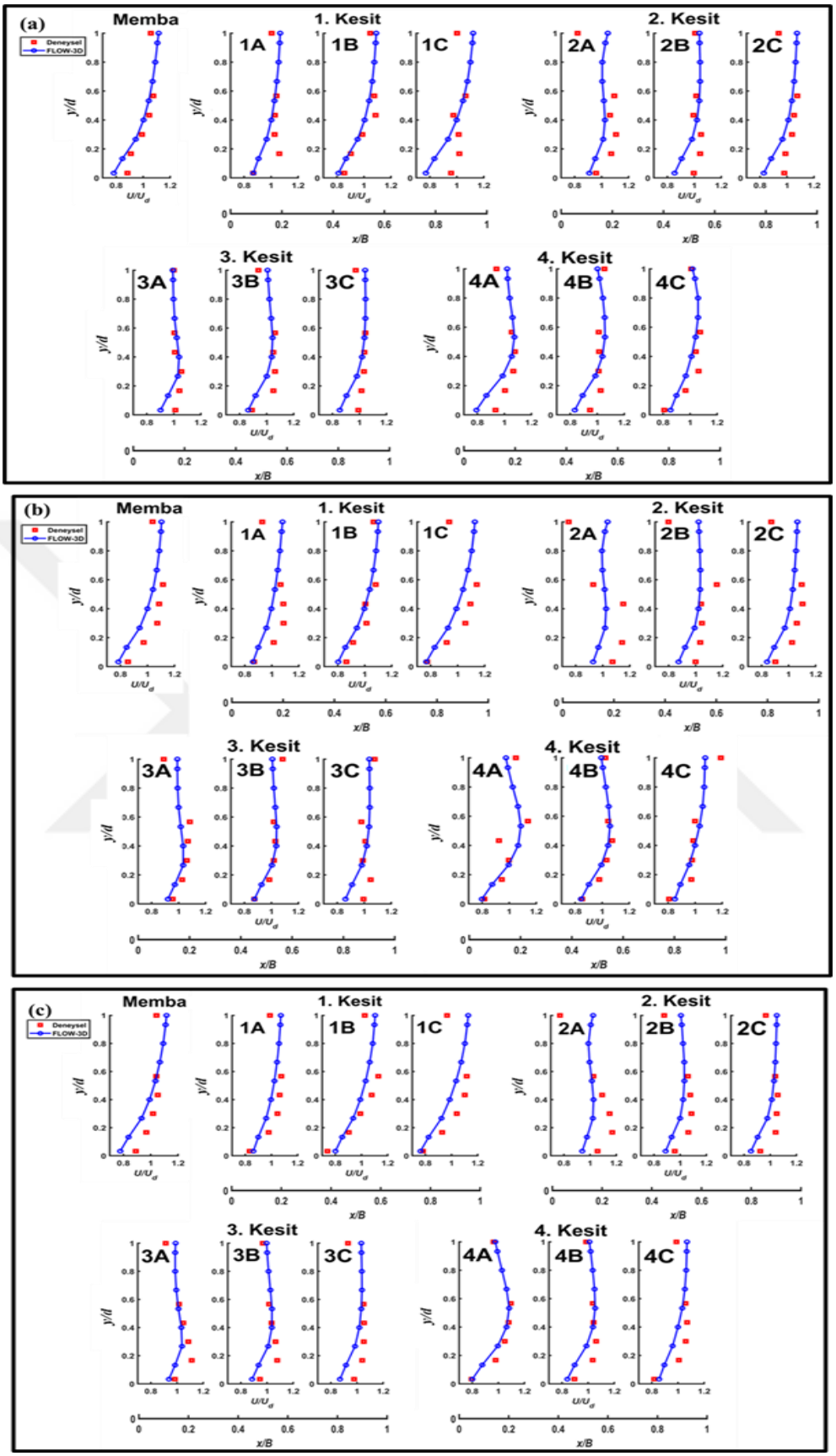
Her bir deneysel durum için, maksimum hızlar sayısal modellemede de deneysel çalışmada olduğu gibi aynı kesit ve bölgelerde gözlemlenmiştir. Tüm koşullar altında, hızın en yüksek değerlere ulaştığı bölge, ilk yarım kıvrımın (180°'lik kıvrım) tamamlanmasından sonra gelen 4. kesitte (120°'lik ikinci kıvrım) meydana gelmektedir. Aynı şekilde, bu kesitte dış kıvrım bölgesinde minimum hız değerlerinin oluştuğu da tespit edilmiştir. Deneysel çalışmadakine benzer olarak, FLOW-3D sonuçlarında da ilk kıvrıma girmeden önce (1. kesit) akım hızının iç

kıvrıma doğru artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Hem deneysel hem de sayısal modeldeki tüm koşullar için, derinlik boyunca ortalama hız, 180° açılı birinci kıvrımın iç kıvrımından 120° açılı ikinci kıvrımın iç kıvrımına kadar ortalama %30 artmıştır.

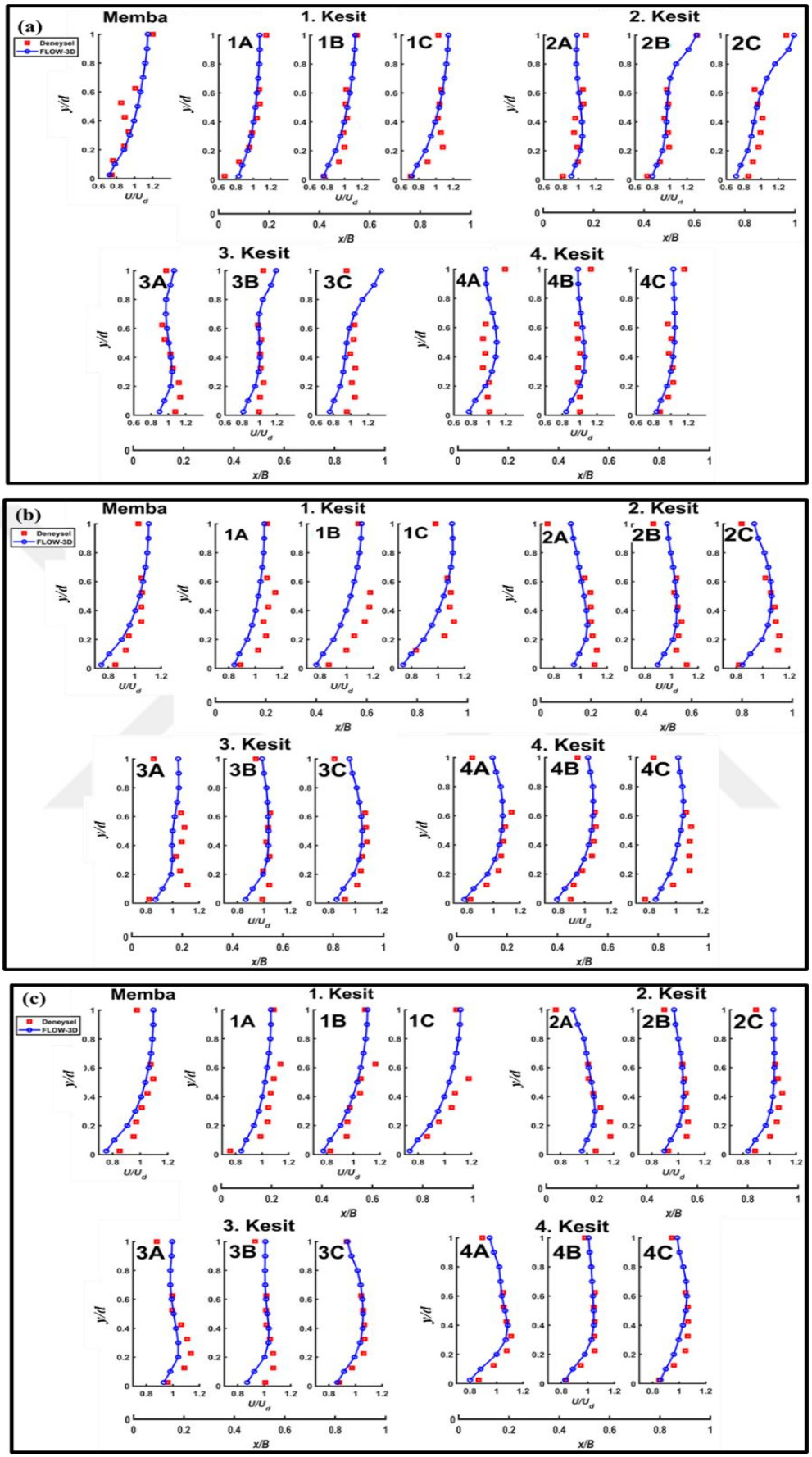
5.3.3 Akım Doğrultusundaki Hız Profilleri

Şekil 5.37, Şekil 5.38 ve Şekil 5.39, ölçümlerin gerçekleştirildiği derinliklerde tüm deney koşulları için hız profillerinin karşılaştırılmasını sunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, maksimum hızın oluştuğu derinlik, farklı boyutsuz debi değerlerine bağlı olarak her bir kesitteki iç ve dış kıvrım konumlarında sürekli değişkenlik göstermektedir. Bu durum, belirli bir eğilim ya da sistematik bir dağılımın tanımlanmasını güçleştirmektedir. Dolayısıyla, maksimum hızın meydana geldiği derinliği yalnızca boyutsuz debiyle ilişkilendirmek yeterli olmamakta, kanal geometrisinin etkisi de dikkate alınmalıdır. Özellikle kanal boyunca ardışık olarak yer alan iki kıvrımın oluşturduğu ani akım yönü değişimi, farklı boyutsuz debi koşullarında maksimum hız derinliklerinde belirgin farklılıklara yol açabilmektedir.

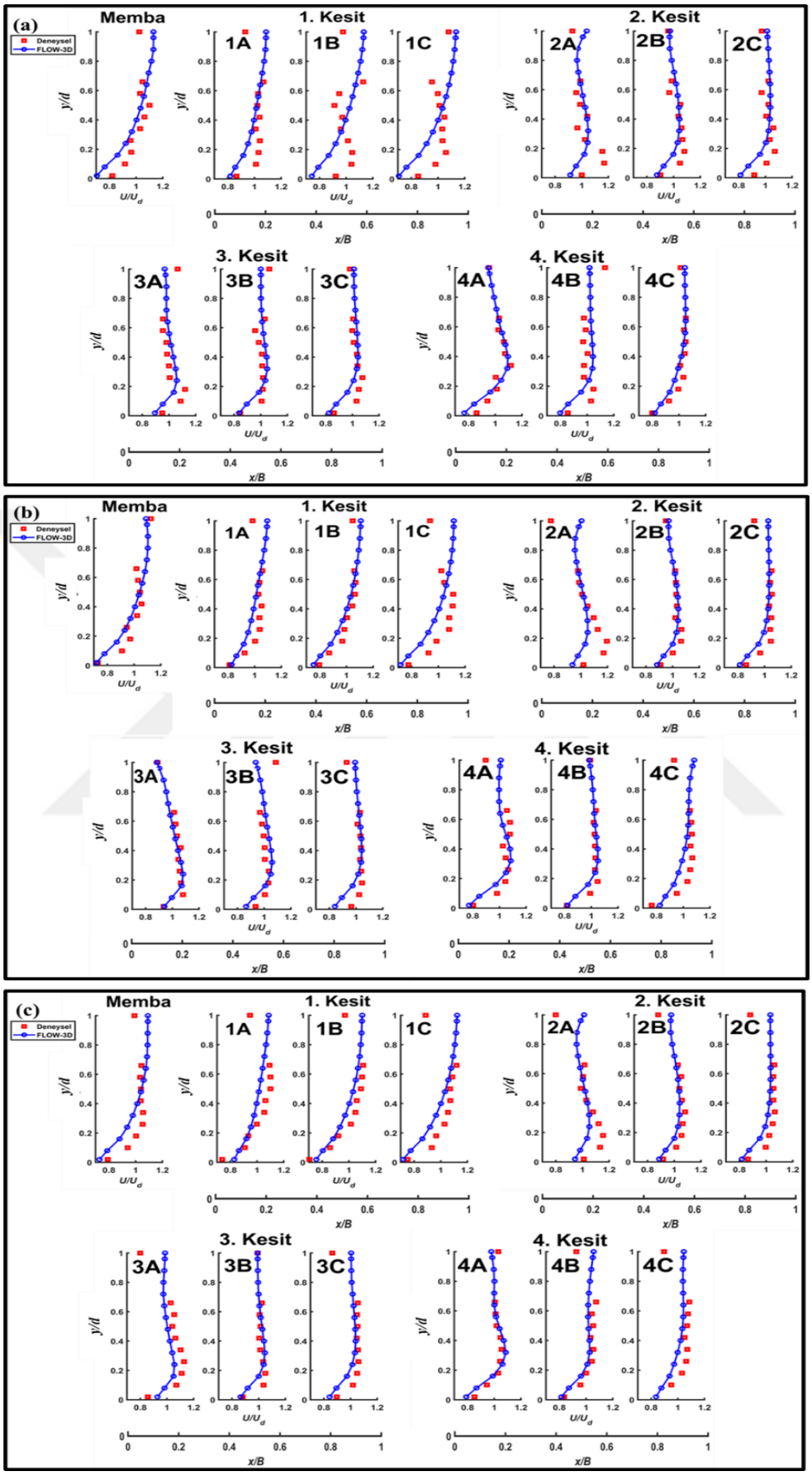
Kıvrımlı kanallarda akım yapısı, düz açık kanallara kıyasla daha karmaşık bir karakter sergilemektedir. Düz bir açık kanal için hız dağılımı esas olarak genişlik/derinlik oranına bağlı olarak değişiklik göstermekteyken, kıvrımlı kanallarda bu dağılım aynı zamanda kanal geometrisine özgü parametreler olan en-boy oranı, sinüzoidallik derecesi ve kıvrım açıklığı gibi etkenlere de bağlıdır (Jha vd., 2022). Bu bağlamda, kıvrımlı kanallardaki akım, eğrisel geometrinin etkisiyle düz kanallardan farklı hidrodinamik davranışlar göstermektedir. Özellikle yanal momentum transferi, boyuna (akım doğrultusundaki) momentum transferine göre niceliksel olarak daha küçük olmasına rağmen, kıvrımlı kanal boyunca sekonder akımların gelişimi ve akım yapısının yeniden dağılımı üzerinde belirleyici ve baskın bir rol oynayabilmektedir. Tüm HAD modelleri için akım doğrultusundaki hız büyüklüklerine ait hata metrikleri Şekil 5.33'te ve Tablo 5.5'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. MARE için en yüksek hata %16 ile Q16d15'de, en düşük hata ise %6.8 ile Q16d25'de görülmüştür. RMSE için en yüksek hata 3.5 cm/s ile Q50d15'de, en düşük hata ise 1 cm/s ile Q50d25'de görülmüştür.



Şekil 5.37 Boyutsuz hız profilleri: (a) Deney 1, (b) Deney 2 ve (c) Deney 3 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)



Şekil 5.38 Boyutsuz hız profilleri: (a) Deney 4, (b) Deney 5 ve (c) Deney 6 Yılmazer ve Arı Güner, 2024)



Şekil 5.39 Boyutsuz hız profilleri: (a) Deney 7, (b) Deney 8 ve (c) Deney 9 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

Veri analizi sürecinde, ADV cihazı ile elde edilen ham veriler üzerinde gerekli filtreleme ve düzenlemeler gerçekleştirilmiş, sonuçlar istatistiksel olarak güvenilir sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir. Ancak, deneysel koşullardan kaynaklanan çeşitli belirsizlikler nedeniyle, derinlik boyunca elde edilen hız profillerinde sayısal model çıktıları ile karşılaştırıldığında küçük sapmalar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, özellikle ölçüm tekniğinden kaynaklanan hatalar nedeniyle çoğunlukla yüzey yakınındaki hız değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen, FLOW-3D sayısal modeli, hız profilinin genel şeklinin yanı sıra maksimum ve minimum hızların derinlik içerisindeki konumlarını belirleme açısından oldukça başarılı bir performans sergilemiştir. Ayrıca sayısal modelleme sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırıldığında, tabana yakın bölgelerde akım doğrultusundaki hız büyüklüklerinde bazı bölgesel sapmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bu sapmaların temel nedenleri arasında, kullanılan türbülans modelinin (RNG k-ε) sınır tabakası bölgesinde gelişen üç boyutlu akım yapısını yeterince temsil edememesi, duvar fonksiyonlarının deneysel ortamda mevcut olabilecek yüzey pürüzlülüğünü tam olarak yansıtamaması ve kıvrımlı geometri nedeniyle ortaya çıkan ikincil akımların RANS tabanlı modellerle zayıf bir şekilde çözülmesi yer almaktadır. Kanal tabanı pürüzlülüğünün sayısal modelde sabit bir parametre olarak tanımlanması da tabana yakın hız büyüklüklerini etkileyen diğer etkenler arasında yer almaktadır.

Elde edilen bulgular, FLOW-3D tabanlı sayısal modellemenin, kıvrımlı kanal içerisindeki hız dağılımını tahmin etmede etkili ve güvenilir bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle deneysel kurulumların yüksek maliyetli ve zaman alıcı olduğu durumlar göz önüne alındığında, bu yaklaşımın önemi daha da artmaktadır. Nitekim, FLOW-3D ile elde edilen sayısal sonuçlar, bazı durumlarda menderesli akarsular gibi karmaşık morfolojilere sahip sistemlerde, deneysel verilere kıyasla daha tutarlı ve hidrodinamik açıdan daha kabul edilebilir hız dağılımları sunabilmektedir.

5.3.4 Taban Kayma Gerilmesi ve Kayma Hızı

FLOW-3D ile elde edilen taban kayma gerilmesi dağılımı, Şekil 5.40'ta verilmektedir. Burada da en kritik bölge, akımın kıvrımlı kanaldaki ilk yarım kıvrımı (180° açılı birinci kıvrım) geçmesinden sonra başlamaktadır. 4. kesitin (120° açılı ikinci kıvrım ortası) bulunduğu bu kritik bölgede, taban kayma gerilmesi, iç kıvrımda her durum için aşırı derecede artmış ve dış kıvrımda aşırı

derece azalmıştır. Taban kayma gerilmesinde benzer bir artış eğilimi 3. kesitin iç kıvrımında da gözlenmiştir. Bu yüksek miktardaki taban kayma gerilmesi akarsu etrafında erozyona neden olacağı ve menderesli akarsuların jeomorfolojik yapısını etkileyeceği için önemli bir bulgu olarak kabul edilmektedir.

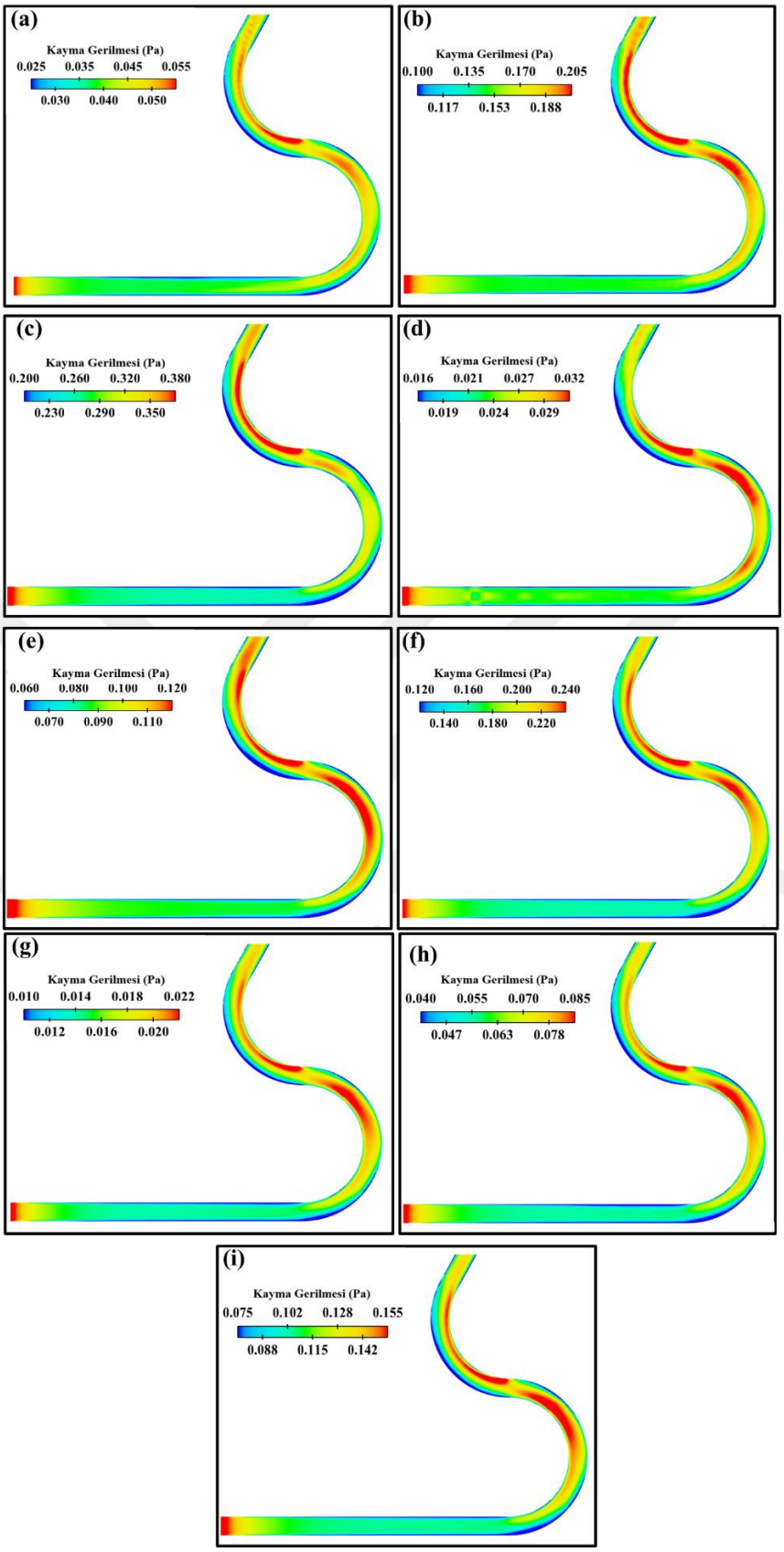
İlk kıvrımın etkisinin hissedilmesiyle bu kıvrımın dış tarafında (1. kesit) da benzer bir durum gözlemlenmektedir. Bu durum, kıvrımlı kanalın bu bölgelerinde katı madde yığılmasına yol açacaktır. Hem deneysel hem de sayısal modeldeki tüm durumlar için, taban kayma gerilmesi 180° açılı ilk kıvrımın iç kıvrımından 120° açılı ikinci kıvrımın iç kıvrımına kadar ortalama %10 artmaktadır. Taban kayma gerilmesinin doğrulanmış bir HAD modeli ile tahmin edilmesi, ilgili menderesli akarsularda meydana gelebilecek ve çevreyi etkileyebilecek değişikliklerin araştırılması için şehir ve bölge planlama açışından önem arz etmektedir.

Burada kayma gerilmeleri açışından sayısal modeli doğrulamak ve akımın hidrodinamik özelliklerini yorumlamak için kayma hızı parametresi de kullanılmıştır. Tüm HAD modelleri için kayma hızı parametresine ait hata metrikleri Şekil 5.33'te ve Tablo 5.5'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. MARE için en yüksek hata %11.4 ile Q35d20 için, en düşük hata ise %6.3 ile Q50d15 için hesaplanmıştır. RMSE için en yüksek hata 1.2 mm/s ile Q35d15'de, en düşük hata ise 0.3 mm/s ile Q16d20'de görülmüştür. FLOW-3D'nin kayma hızı için diğer parametrelere göre daha düşük bir hata oranı sergilediği görülmektedir. Böylece, sayısal modelin kayma hızının ve bununla ilişkili taban kayma gerilmesinin hesaplanmasında oldukça başarılı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

5.3.5 Türbülans Kinetik Enerjisi

Türbülans kinetik enerjisi, kıvrımlı kanaldaki akım davranışını anlamak için incelenen son parametredir (Şekil 5.41, Şekil 5.42 ve Şekil 5.43). Türbülans kinetik enerjisinin -x, -y ve -z yönlerindeki hız bileşenlerindeki çalkantı hızlarıyla ilişkili denklemi genel formda Denklem 5.2'de verilmektedir. Burada, k türbülans kinetik enerjisini ve u', v' ve w' sırasıyla -x, -y ve -z yönlerindeki hız bileşenlerindeki çalkantı hızlarını temsil etmektedir.

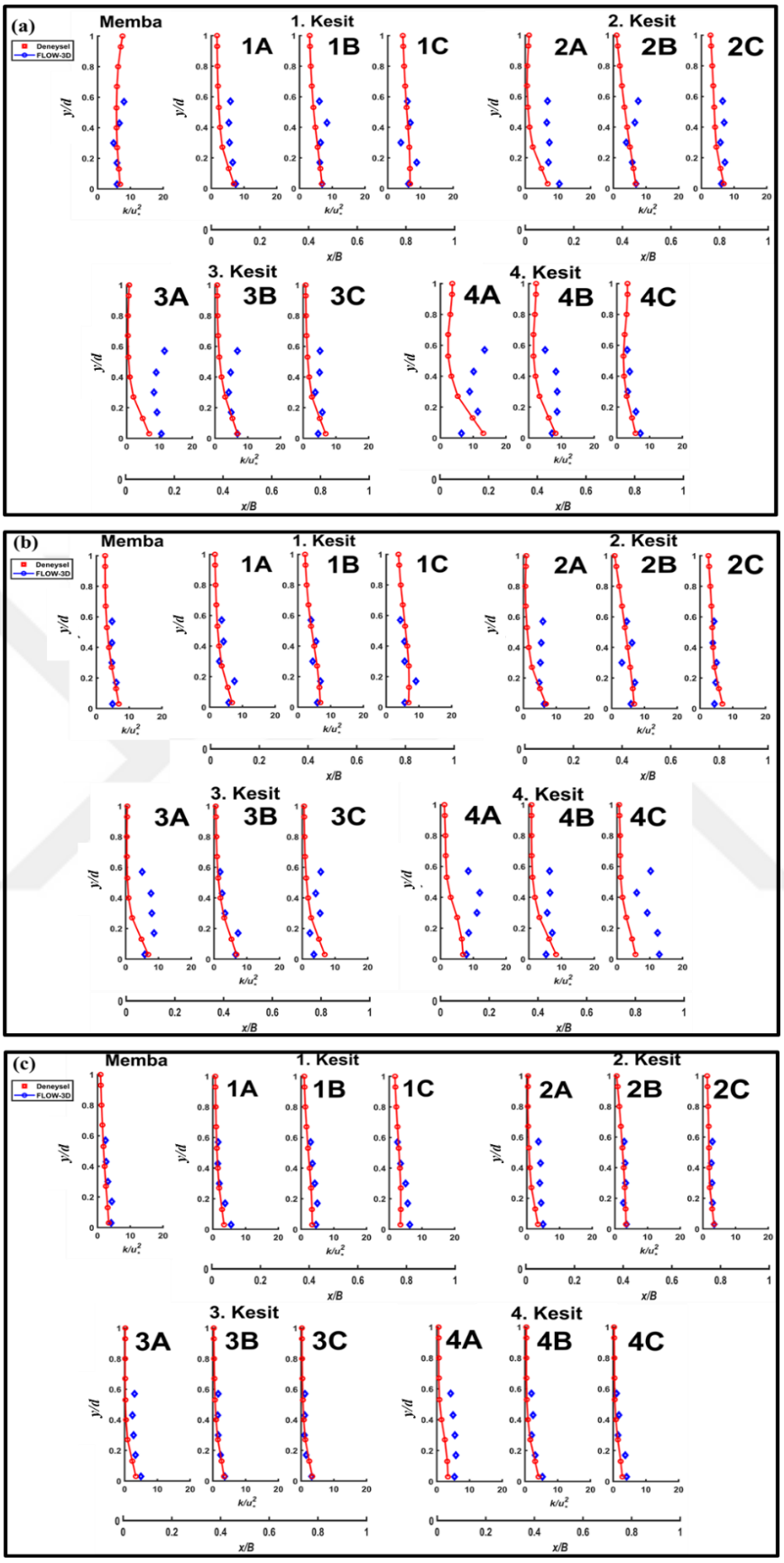
$$k = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right) \tag{5.2}$$



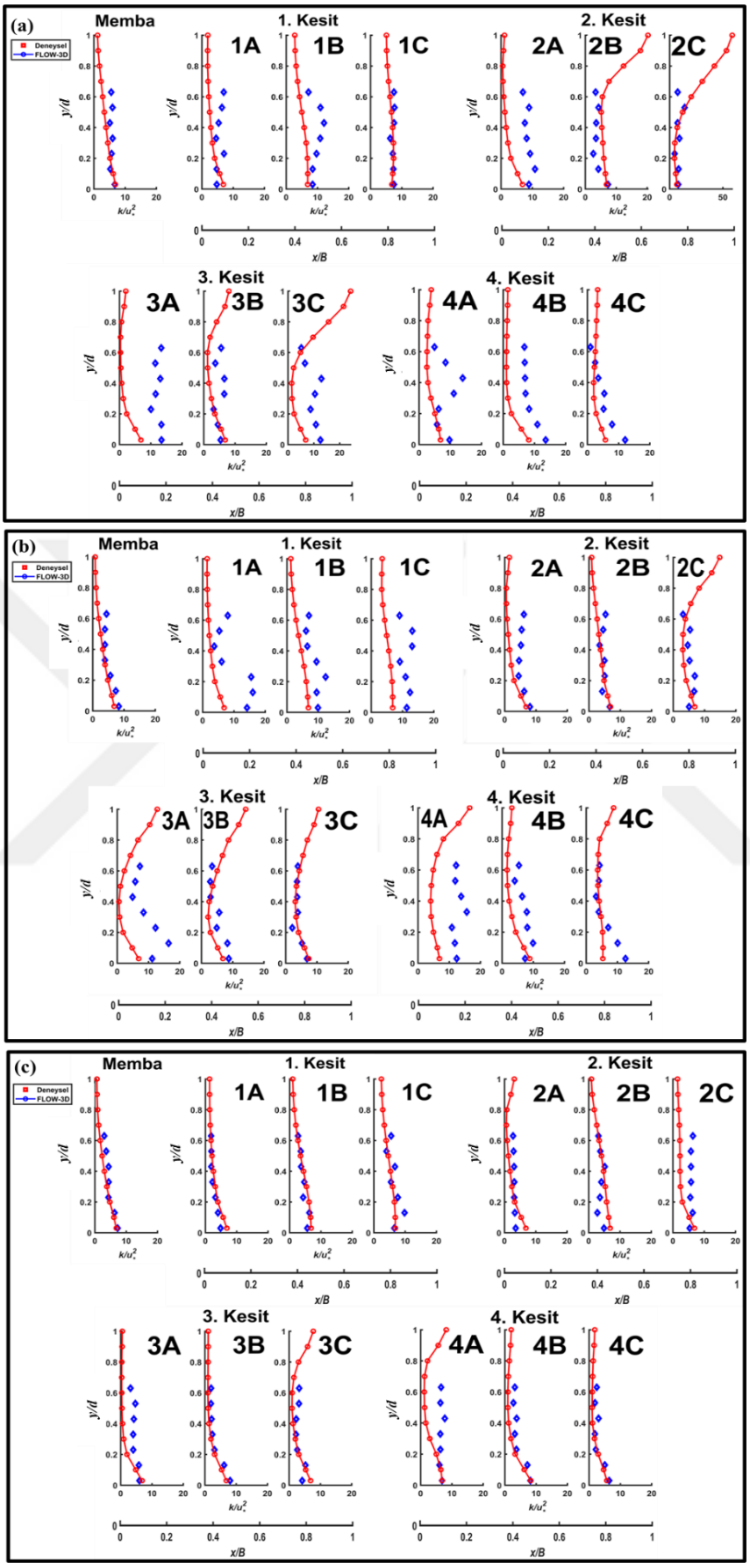
Şekil 5.40 HAD modelinden elde edilen taban kayma gerilmeleri: (a-i) sırasıyla deney 1-9 için (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

Boyutsuz debinin en yüksek olduğu Q50d15 durumu için sayısal model sonuçları deney sonuçlarıyla en iyi uyumu göstermektedir. Ancak yukarıda verilen hız profillerinde de gözlemlenen, ADV ölçüm tekniklerinden kaynaklanan ve hız bileşenlerindeki çalkantı hızlarını etkileyen anomaliler nedeniyle bazı noktalarda genel eğilimden sapmalar görülmektedir. Bununla birlikte, kullanılan RANS türbülans kapama modeli nedeniyle FLOW-3D'nin duvara yakın bölgede türbülansı çok başarılı bir şekilde modelleyebildiği ancak akımın orta bölgelerinde aynı başarıyı gösteremediğini belirtmek gerekmektedir. Kesitlerde akımın orta bölgelerine doğru olan bu sapmaların temel nedeni, kıvrımlı kanalın geometrisinden dolayı oluşan vorteks ve eddylerin olduğu anlaşılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, bu durum kıvrımlı kanalda gözlemlenmesi beklenen sekonder akımın doğal bir sonucudur. Ayrıca bu durum özellikle akımın kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi ve beklenildiği gibi merkezkaç ve yanal momentum transferi etkisine girmesi ile gözlemlenmektedir. Bu nedenle türbülans kinetik enerji parametresi için sayısal model ile deneysel veriler arasında doğrudan hata ölçümü yapılmamıştır. Bununla birlikte, FLOW-3D, özellikle menderesli akarsulardaki katı madde taşınımının anlaşılmasında, özellikle akarsu tabanına yakın bölgeler için genel bir tahmin ve iyi bir yaklaşım sağlamaktadır.

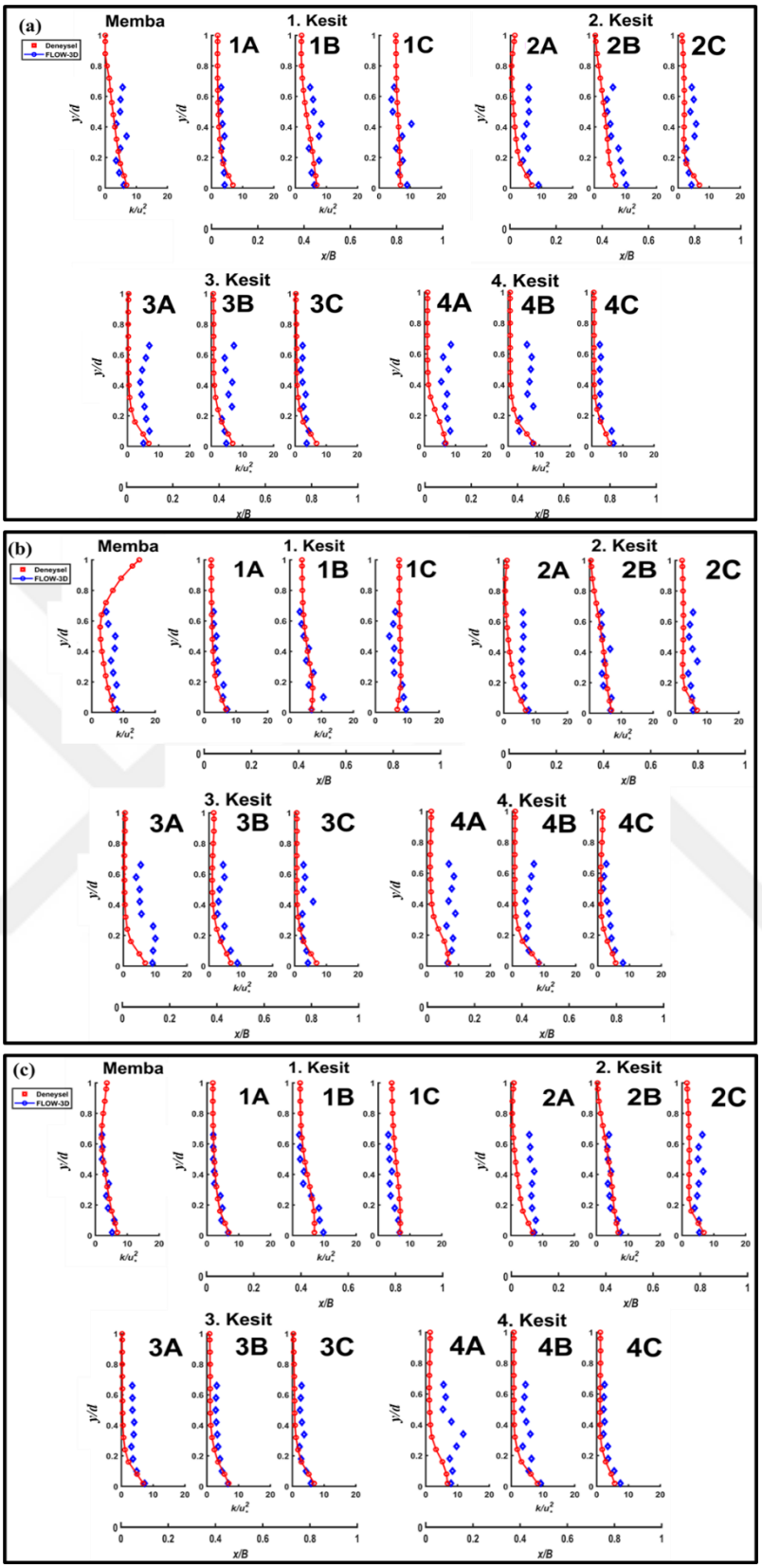
Her bir deney koşulu için, türbülans kinetik enerjisi derinlik boyunca akımın ortasında, hızın en yüksek olduğu, yani 4. kesitin iç kıvrımında (4C) aniden pik yapmaktadır. Bu artış, akımın ilk yarım kıvrımı (180^{o}'lik ilk kıvrım) geçtikten sonra artan hızlarla birlikte akım çizgilerinde bir ayrılma bölgesi oluşturabileceğini göstermektedir. Deneysel çalışmada bu durum gözlemlenirken, sayısal modelden elde edilen sonuçlarda gözlemlenememiştir. Türbülans kinetik enerjisi, Q16d20 ve Q35d20 durumları için 2. kesit ile 3. kesitte ve Q35d25 durumu için membada derinlik boyunca su yüzeyine doğru artmaktadır. Bu durum, su yüzeyinde anlık küçük vortekslerin oluşabileceğini göstermektedir. Bu oluşum sadece sayısal modelde görülmüş olup, ADV ölçüm tekniklerinin su yüzeyine yakın ölçüm noktası sınırlamaları nedeniyle deneysel verilerde elde edilememiş ve dolayısıyla bu durum sayısal model sonuçları ile karşılaştırılamamıştır.



Şekil 5.41 Boyutsuz türbülans kinetik enerjisi: (a) Deney 1, (b) Deney 2 ve (c) Deney 3 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)



Şekil 5.42 Boyutsuz türbülans kinetik enerjisi: (a) Deney 4, (b) Deney 5 ve (c) Deney 6 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)



Şekil 5.43 Boyutsuz türbülans kinetik enerjisi: (a) Deney 7, (b) Deney 8 ve (c) Deney 9 (Yılmazer ve Arı Güner, 2024)

6
KIVRIMLI KANALDA TSUNAMİ DALGASININ İLERLEMESİNİN İNCELENMESİ

6.1 Giriş

Bu bölümde 3 farklı derinlik için dalga pozitif genliğinin (a^+) derinliğe (d) oranına göre 4 farklı bore gücünde tsunami dalgası oluşturularak kanal içerisine yerleştirilen 8 prob yardımıyla dalga profillerinin kanal içerisinde değişimi (su yüzü değişimleri) incelenmiştir. Dalga profilleri sırasıyla 25 cm derinlik için a^+/d =0.24, 25 cm derinlik için a^+/d=0.48, 20 cm derinlik için a^+/d=0.69 ve 15 cm derinlik için a^+/d =0.95 oranları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Kıvrımlı kanalda su yüzü değişimlerinin incelenmesinde iki farklı tipte deney gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi kurak hava koşullarını temsilen kanalda akımın olmadığı (statik hal) deneyler (Q_0=0 m^3/s) ve ikincisi ise yağışlı hava koşullarını temsilen kanalda membadan mansaba doğru kararlı akımın olduğu üç farklı debi (Q_1= 0.016 m^3/s, Q_2= 0.035 m^3/s, Q_3= 0.05 m^3/s) ile gerçekleşen deneylerdir. En son olarak statik hal ve kararlı akım durumu için su yüzü değişimleri birlikte değerlendirilmiştir. Böylece bu tez çalışmasında, her iki durum için farklı bore gücüne sahip tsunami dalgalarının kıvrımlı kanal (mendereslenen bir akarsuda olduğu gibi) boyunca değişimi hidrodinamik açıdan deneysel olarak incelenmiştir.

Buna ek olarak, a^+/d=0.69 bore gücündeki tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşullarında ADV aracılığıyla belirli nokta ve derinliklerde hız ölçümleri gerçekleştirilerek kıvrımlı kanal boyunca tsunami dalgasına ait hız-zaman serilerinin değişimi deneysel olarak tartışılmıştır. Bu sayede hidrodinamik açıdan incelemeler sadece dalga profilleri açışından değil hız değişimleri açışından da değerlendirilmiştir.

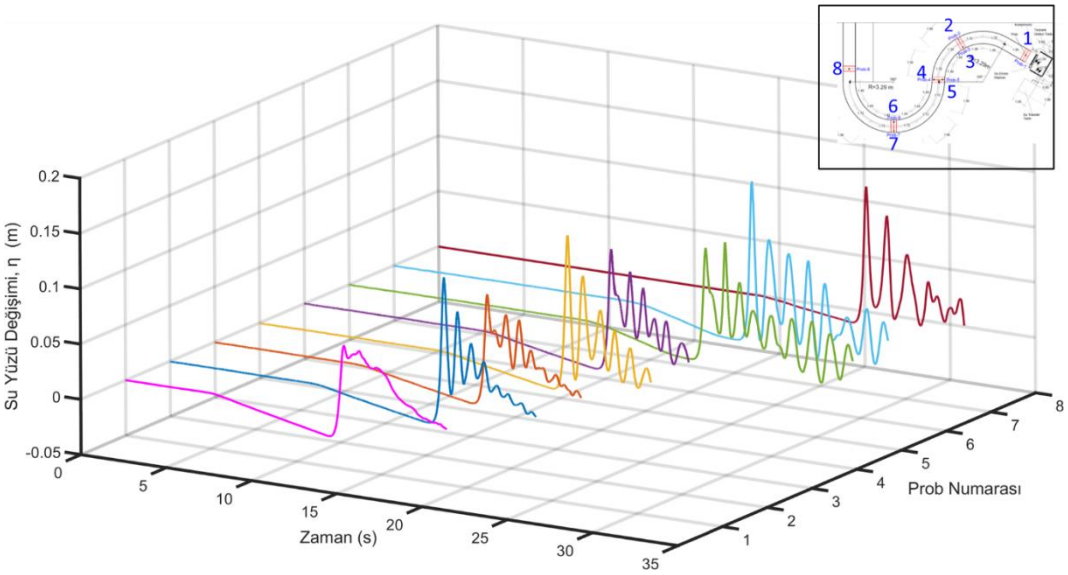
Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler sayesinde HAD yöntemi ile FLOW-3D aracılığıyla gerçekleştirilen kıvrımın kanalın 1:1 ölçekte sayısal modelinin doğrulanması hem niceliksel hem de niteliksel olarak gerçekleştirilmiştir.

6.2 Su Yüzü Değişimlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

6.2.1 Akım Olmaması Durumu (Statik Hal)

6.2.1.1 Bore Gücü $\alpha=a^{+}/d=0.24$ olan N-dalga

Şekil 6.1'de 25 cm derinlikte $a^{+}/d= 0.24$ bore gücüne sahip tsunami dalgasına ait su yüzü değişimleri verilmiştir. Burada pozitif genlik göreceli olarak derinliğe göre oldukça azdır ve dolayısıyla Favre (1935) çalışmasına göre dalgalı bore sınıfında olmaktadır. Kanal içerisine dalgalı bore şeklinde giren tsunami dalgasının kanal boyunca kırılmaya uğramayarak bore sayısında bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Prob 2 ve 4'te 2 katına çıkan pozitif genliğin Prob 7 ve 8'de 2.5 katına çıktığı görülmektedir. Burada belirgin şekilde dalga kretinde yanal momentum etkisinden kaynaklı dış problarda pozitif genliğin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 120°'lik ikinci kıvrımda (Prob 6-7) oldukça fazla miktarda ikincil dalgalanmaların oluştuğu fakat son probun (Prob 8) bulunduğu kanalın doğrusal kısmına girince dalgalanma sayısının azaldığı görülmektedir.

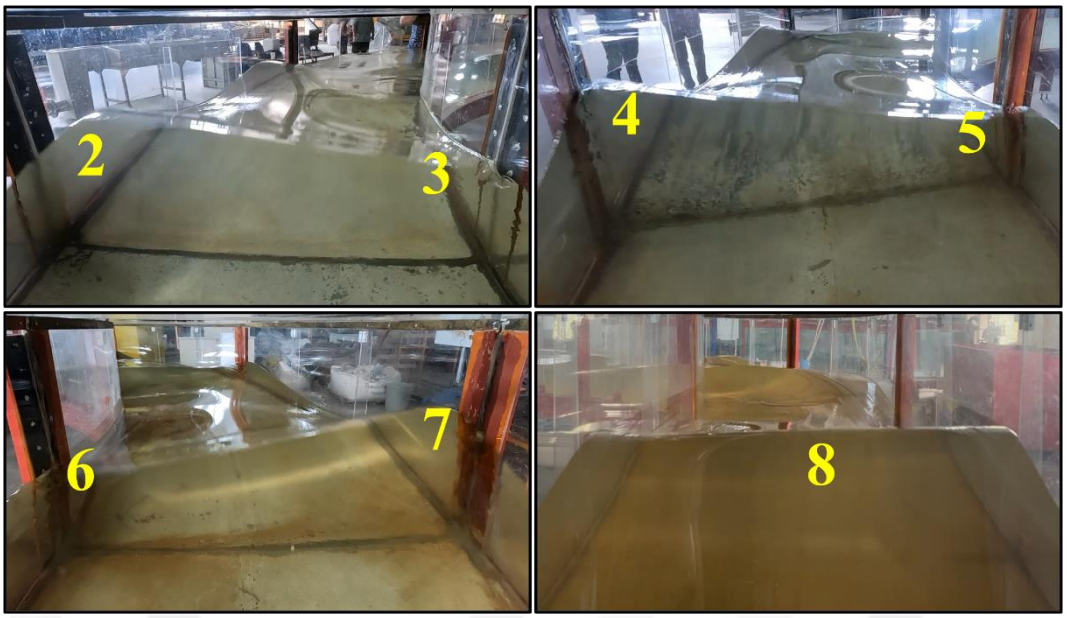


Şekil 6.1 25 cm derinlikte ve $a^{+}/d= 0.24$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi

Prob 1 ölçümüne göre kanal girişinde dalganın dalgalı bore şeklinde girdiği görülmektedir. Tsunami dalgası diğer kesitlere ulaştığında dalga yapısında ciddi değişiklikler meydana gelmektedir. Tsunami dalgası kanal içerisinde ilerledikçe dalganın pozitif ve negatif genliklerinde artışlar gerçekleşmiştir. Dalga Prob 1'i geride bırakarak Prob 2 ve 3'e ulaştığında pozitif dalga genliğinde yaklaşık %47'lik bir artış olmuştur (Tablo 6.1). Belirgin dalgalanma sayısı Prob 6 ve 7'nin bulunduğu kesitte 8 iken, Prob 8'de bu sayısı 5'e düşmektedir. Dalga kıvrımları geçtikçe yapısında dalgalanma sayısı ve dalgalanmaların formlarındaki belirginlik ciddi miktarda artmaktadır. Bore gücünün 0.24 gibi bir değerle düşük olması ve literatüre göre dalgalı bore sınıfında olması bu deney sonuçlarını desteklemektedir. Bu durum Şekil 6.2'deki deney fotoğraflarında da açıkça görülmektedir. Dalga periyotları açısından incelendiğinde, negatif genlik (çekilme) periyotlarında kanal membasına doğru azalma ve pozitif genlik periyotlarında artış meydana geldiği görülmektedir. Her bir prob için a^+/d oranında genel olarak bir artış meydana gelmiştir.

Tablo 6.1 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Pozitif Genlik (m)	0.061	0.114	0.081	0.122	0.092	0.090	0.126	0.113
Negatif Genlik (m)	0.022	0.020	0.020	0.019	0.018	0.024	0.026	0.012
Dalga Yüksekliği (m)	0.083	0.134	0.101	0.141	0.110	0.114	0.152	0.125
Çukur Periyodu (s)	7.46	7.1	7.05	6.79	6.74	6.61	6.68	5.71
Tepe Periyodu (s)	6.39	5.76	5.84	5.24	4.89	8.93	8.31	6.12
Toplam Periyot (s)	13.85	12.86	12.89	12.03	11.63	15.54	14.99	11.83
a^+/d	0.24	0.45	0.32	0.49	0.37	0.36	0.50	0.45

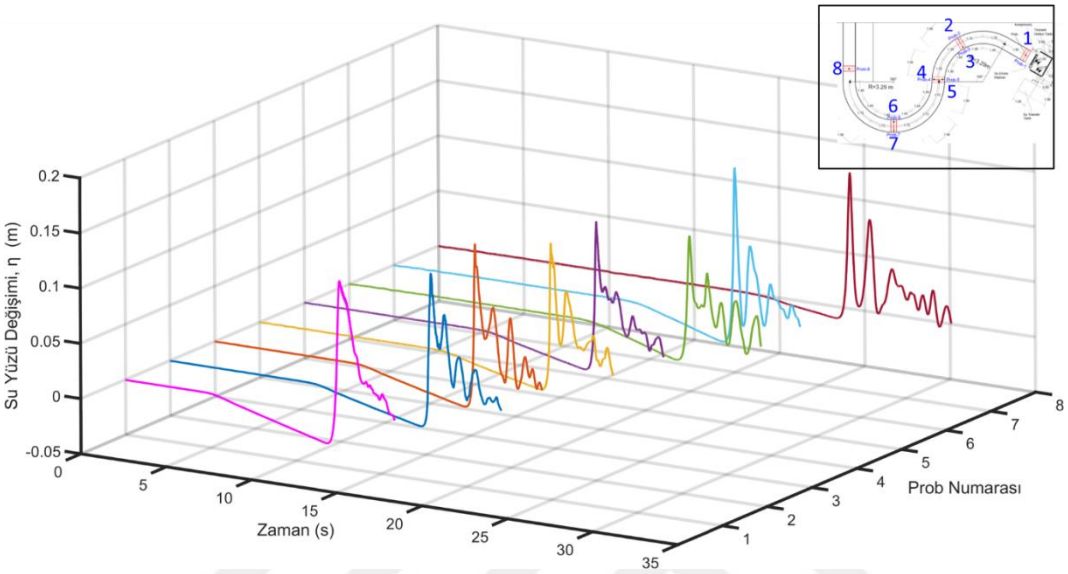


Şekil 6.2 $a^+/d=0.24$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait kesitlerdeki deney fotoğrafları

6.2.1.2 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.48$ olan N-dalga

d=25 cm su derinliği ve $a^+/d= 0.48$ bore gücüne sahip tsunami dalgasına ait su yüzü değişimleri Şekil 6.3'te verilmiştir. Bu tsunami dalgası, dalgalı bore ile güçlü bore arasında geçiş durumunda ara bir a^+/d oranına sahip olmaktadır. Dolayısıyla Favre (1935) çalışmasına göre tsunami dalgasının kanal/akarsu ağzından girişinin geçiş formunda oluşması beklenmektedir. Gerçekten de tsunami dalgası kanal içerisine Prob 1'de ölçüldüğü üzere geçiş formunda bir bore yapısı ile girmektedir. Daha sonra Prob 2 ile 3'ün bulunduğu kesitte dalgalı bore yapısı görülmekte ve Prob 4 ile 5'in bulunduğu kesitte dalga kırılmaya uğramaktadır. Buraya kadar tam bir geçiş durumu gözlemlenmekte ve fakat kanalda kıvrım geometrilerinden kaynaklı yanal momentum etkisinin aynı kesitte dalga genliklerini ciddi miktarda değiştirmediği görülmektedir. Fakat burada özel bir durum meydana gelmiş ve son kesitte (prob 6-7) dalga kırılma etkisi kaybolarak tekrar dalga katarı şekli oluşmakta dalgalı bore formunun oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.4). Dolayısıyla kıvrımlı kanal etkisi özellikle Prob 6 ve 7'nin bulunduğu kesitte belirgin şekilde görülmekte ve Prob 7'de pozitif genlik Prob 6'ya göre oldukça yüksek olmaktadır. Ayrıca Prob 7 ve 8'deki ölçümlere göre tsunami dalgasının pozitif genliğinin kanala giren tsunami dalgasının pozitif genliğine göre %14 oranında arttığı gözlenmiştir. Prob 6 ve 7'nin bulunduğu kesitin haricinde diğer kesitlerin iç ve dış kıvrımlarında pozitif genlikte ciddi bir fark meydana gelmemiştir. Kanal boyunca pozitif genlikteki değişim

incelendiğinde Prob 6 haricinde tüm problarda pozitif genliğin hemen hemen aynı değerde olduğu gözlenmiştir. Fakat tsunami dalgası kanal membasına doğru ilerlerken negatif genliğin ve çukur periyodunun sürekli olarak azaldığı görülmekte ve tepe periyotları ise sürekli artmaktadır. Dolayısıyla toplam periyotta ve a^+/d oranında ciddi bir değişim meydana gelmemiştir (Tablo 6.2).



Şekil 6.3 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi



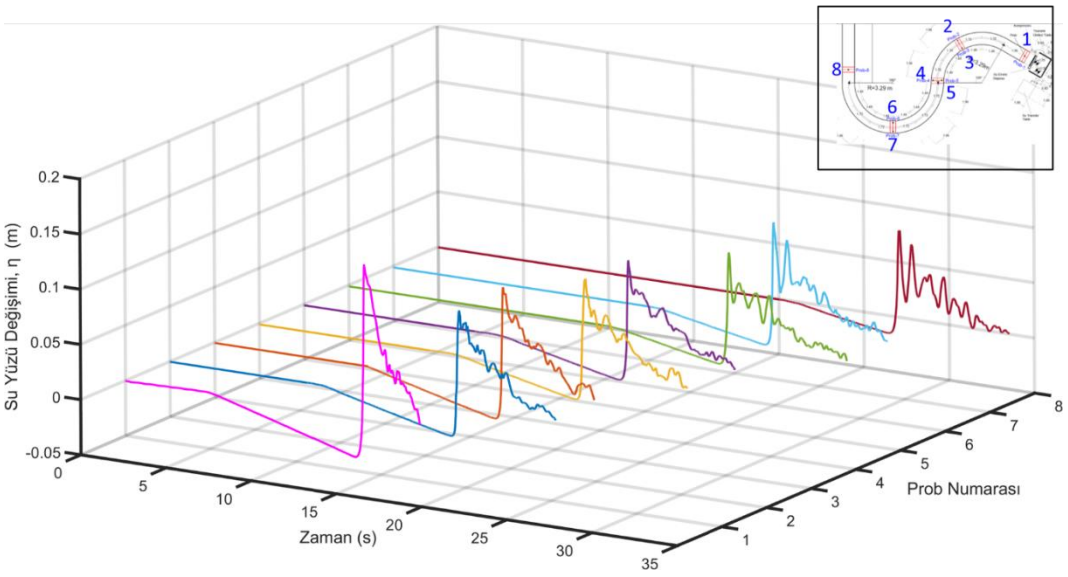
Şekil 6.4 a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait kesitlerdeki deney fotoğrafları

Tablo 6.2 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.119	0.115	0.124	0.112	0.115	0.091	0.136	0.123
Negatif Genlik (m)	0.030	0.025	0.025	0.022	0.021	0.023	0.024	0.010
Dalga Yüksekliği (m)	0.149	0.140	0.149	0.134	0.136	0.114	0.160	0.134
Çukur Periyodu (s)	7.28	6.6	6.59	6.08	5.91	5.71	5.77	4.74
Tepe Periyodu (s)	3.51	4.32	4.1	3.79	4.15	4.44	4.07	6.33
Toplam Periyot (s)	10.79	10.92	10.69	9.87	10.06	10.15	9.84	11.07
a^+/d	0.48	0.46	0.50	0.45	0.46	0.36	0.54	0.49

6.2.1.3 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.69$ olan N-dalga

Şekil 6.5'te 20 cm su derinliğinde $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının kanal boyunca oluşan su yüzü değişimleri verilmiştir. Bu bore gücü oranı Favre (1935) için yine geçiş durumunda olmaktadır fakat güçlü bore durumuna oldukça yakın bir değerde olmaktadır. Tablo 6.3'te tsunami dalgasının kanal içerisinde ilerlemesi sonucunda farklı kesitlerde bulunan dalga problarından elde edilen dalga profillerinin sahip oldukları dalga karakteristiklerine ait niceliksel bilgiler verilmiştir. Dalganın pozitif genliği 0.138 m, negatif genliği ise 0.037 m'dir. Dalganın pozitif genliğinin negatif genliğine oranı 3.7'dir. Dalganın çukuruna ait periyot 8.77 sn, dalga tepesine ait periyot ise 3.40 sn'dir. Dalga çukuru periyodunun dalga tepesi periyoduna oranı 2.58 olmaktadır. Dalga genlik ve periyot oranları literatürde bulunan Tolkava vd. (2015) çalışmalarında verilen hidrolik cilalı taban için (n=0) akarsu ağzında meydana gelen kuramsal tsunami dalgası zaman serisine uymaktadır.



Şekil 6.5 20 cm derinlikte ve a^{+}/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi

Kanal girişinde (Prob 1) dalganın bore gücü için geçiş durumunda olsa bile sınırda güçlü bore gücü (Favre, 1935) değerinde olduğundan dolayı güçlü bore şeklinde girdiği görülmektedir. Tsunami dalgası kıvrımlı kanalda ilerledikçe tsunami dalgasının karakteristik özelliklerinde ciddi değişiklikler meydana gelmektedir. Şekil 6.5'te görüldüğü üzere dalga kanal içerisinde ilerledikçe dalganın pozitif ve negatif genlikleri için azalmalar gerçekleşmektedir. Özellikle tsunami dalgası ikinci kesitte bulunan Prob 2 ve 3'e ulaştığında pozitif dalga genliğinde yaklaşık %40'lık bir azalma gerçekleşmiştir. Pozitif genliklerde prob 3 için kesitin iç kıvrımında bir miktar artış görülmüştür. Dalganın genliğindeki azalmanın dalganın kırılarak ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Deney sırasında dalgada meydana gelen kırılma net bir şekilde gözlemlenmiştir (Şekil 6.6). İki kıvrım arası geçişin bulunduğu kesitte Prob 4 ve 5'in bulunduğu kesitte bir önceki kesite göre dalganın yapısında değişiklik meydana gelmemiştir. Burada iç ile dış kıvrım arasında pozitif genlikte belirgin bir fark bulunmamaktadır. Prob 6 ve 7'nin bulunduğu kesitte pozitif genliğinde bir önceki kesittekine kıyasla artış olmaktadır. Burada dış kıvrımda (Prob 7) dalgalı bore durumunda olduğu gibi pozitif genlikte iç kıvrıma göre artış meydana gelmektedir. Kanaldaki son kesitte bulunan Prob 8'de dalganın pozitif genliğinde yeniden azalma meydana gelmiştir. Kanal boyunca en küçük pozitif ve negatif genlik değeri son kesitteki Prob 8'de görülmektedir. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere özellikle Prob 6,7 ve 8 konumlarından geçen dalganın kret yapısında değişimler oluşmuştur. Dalga kretinde meydana gelen bu değişim dalgalı bore

formunun en belirgin karakteristiği olan su yüzü değişimindeki dalgalanmalar (dalga katarı oluşumu) olmaktadır. Çünkü özellikle bu problarda a^+/d değerleri azalarak dalgalı bore formuna yaklaşmaktadır. Bu durum özellikle Prob 8 için gözlemlenmektedir. Tsunami dalgası kanal içerisinde ilerledikçe yapısındaki dalgalanma sayısı ve dalgalanmaların formlarındaki belirginlik artmaktadır. Bu durumun yanal momentum transferinden (sekonder akım doğrultusunda) kaynaklandığı ve dalganın dispersif etkilere uğrayarak pozitif genlikte de azalmalar olmaktadır.



Şekil 6.6 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait kesitlerdeki deney fotoğrafları

Öte yandan negatif genlikler Prob 1'den sonra ciddi miktarda azalmış fakat diğer problarda kanal boyunca yaklaşık aynı değerlerde kalmıştır. Her kesitte iç ile dış kıvrım arasında negatif genlik farkı bulunmamaktadır. Beklenildiği üzere Prob 8 için en düşük negatif genlik değeri görülmektedir. Dalga periyotları açısından incelendiğinde, negatif genlik (çekilme) periyotları kıvrımlı kanal boyunca giderek azalmakta ve pozitif genlik periyotları ise giderek artmaktadır.

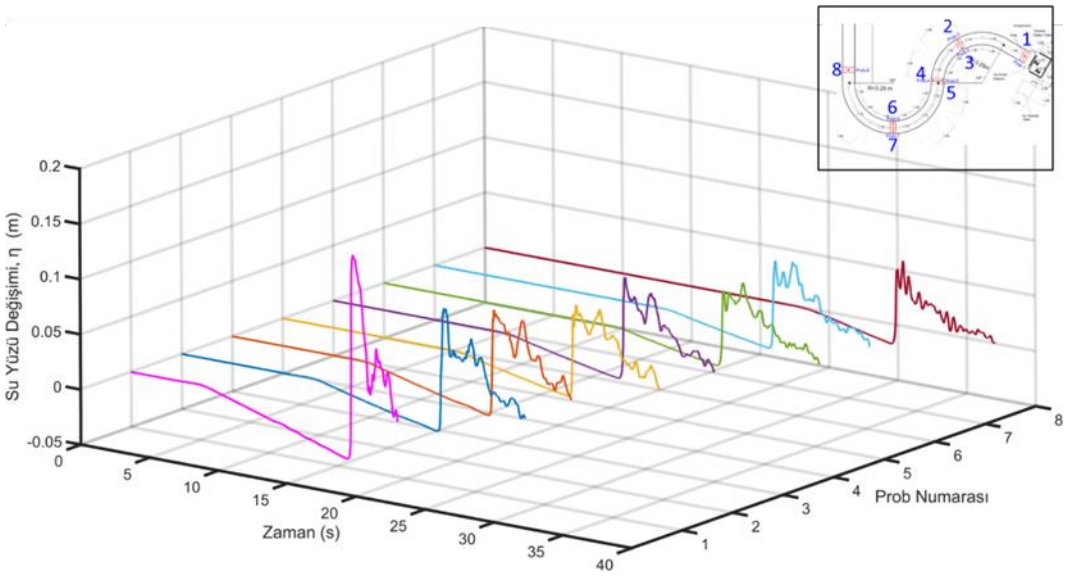
Tablo 6.3 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.138	0.086	0.090	0.085	0.085	0.082	0.092	0.079
Negatif Genlik (m)	0.037	0.029	0.030	0.025	0.025	0.020	0.020	0.016
Dalga Yüksekliği (m)	0.175	0.115	0.120	0.111	0.110	0.102	0.112	0.095
Çukur Periyodu (s)	8.91	7.82	7.82	7.91	7.91	6.84	6.69	6.35
Tepe Periyodu (s)	3.39	5.82	5.46	6.21	6.39	7.1	6.82	6.67
Toplam Periyot (s)	12.3	13.64	13.28	14.12	14.3	13.94	13.51	13.02
a^+/d	0.69	0.43	0.45	0.43	0.42	0.41	0.46	0.39

6.2.1.4 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.95$ olan N-dalga

Şekil 6.7'de 15 cm su derinliğinde a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca oluşan su yüzü değişimleri verilmiştir. Oluşturulan tsunami dalgası Favre (1935)'ye göre güçlü bore (kırılan bore-türbülanslı bore davranışı) olarak sınıflandırılmaktadır. Tsunami dalgasının kanal içerisine girerken a^+/d oranının yüksek olmasından dolayı dalga tepesinin ön yüzünde hidrolik sıçrama meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çünkü burada su derinliği ile pozitif genlik neredeyse aynı miktarda olmaktadır. Hidrolik sıçrama Şekil 6.7'de t=17 s için oluşan 2. dalga pikine karşılık gelmektedir. Kanal içerisinde dalganın ilerlemesiyle her probda dalga tepesinde iki pozitif genliğe sahip dişli bir profil şeklinde ilerlemiş ve birinci dalganı ardında ikincil pozitif genlik oluşmuştur. Hatta Prob 6, 7, 8 için ikinci pozitif genliğin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Tsunami dalgası dalga Prob 1'den sonra ikinci kesitte bulunan Prob 2 ve 3'e ulaştığında pozitif dalga genliğinde yaklaşık %45'lik bir azalma gerçekleşmiştir. Dalganın genliğindeki azalmanın sebebi yine dalganın Prob 1 sonrası dalganın kırılmasından kaynaklanmaktadır. Son proba geldiğinde ise pozitif genlik %59 azalmıştır (Tablo

6.4). Kanal girişinde güçlü bore formunda oluşan tsunami dalgasının ilk probdan sonra kırılmadan kaynaklı enerji kaybına uğramaktadır. Kıvrımlı kanalda ilerledikçe bore gücü değeri düşmüş ve geçiş durumu gözlemlenmeye başlanmıştır. Dolayısıyla $a^+/d=0.69$ bore gücü durumunda görüldüğü gibi, aynı kesitte iç ile dış kıvrım arasında pozitif genliklerde bir miktar değişim gözlemlenmiştir. Hatta burada bu değişim $a^+/d=0.69$ bore gücü durumundan daha belirgindir. Çünkü Prob 2 ve 3 için dış kıvrımda, Prob 4 ve 5 için yine dış kıvrımda ve Prob 6 ve 7 için yine dış kıvrımda pozitif genlik daha yüksek olmaktadır. Dolayısıyla burada yanal momentum ve merkezkaç kuvveti dalgalı bore durumunda olduğu gibi daha hissedilir şekilde etkili olmaktadır.



Şekil 6.7 15 cm derinlikte ve $a^+/d=0.95$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi

Tsunami dalgası kıvrımlı kanal içerisinde ilerledikçe özellikle son kesitte (Prob 8) düşen bore gücü değeri ile birlikte dalgalanmalar görülmektedir. Dalganın en küçük pozitif ve negatif genlik değeri de burada gözlemlenmiştir. Dalga kanal içerisinde ilerledikçe yapısında dalgalanma sayısı ve dalgalanmaların formlarındaki belirginlik artmaktadır. Bu durum hem su yüzü değişimlerinde hem de deney sırasında gerçekleşen görsel çekimlerde görülmektedir. (Şekil 6.8). Dalga periyotları açısından incelendiğinde, diğer deney koşullarında görüldüğü gibi kıvrımlı kanal boyunca negatif genlik (çekilme) periyotlarında bir miktar azalma olduğu ve pozitif genlik periyotlarında ise giderek artışın meydana geldiği görülmektedir. (Tablo 6.4).



Şekil 6.8 a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait kesitlerdeki deney fotoğrafları

Tablo 6.4 15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı problardaki profil karakteristikleri

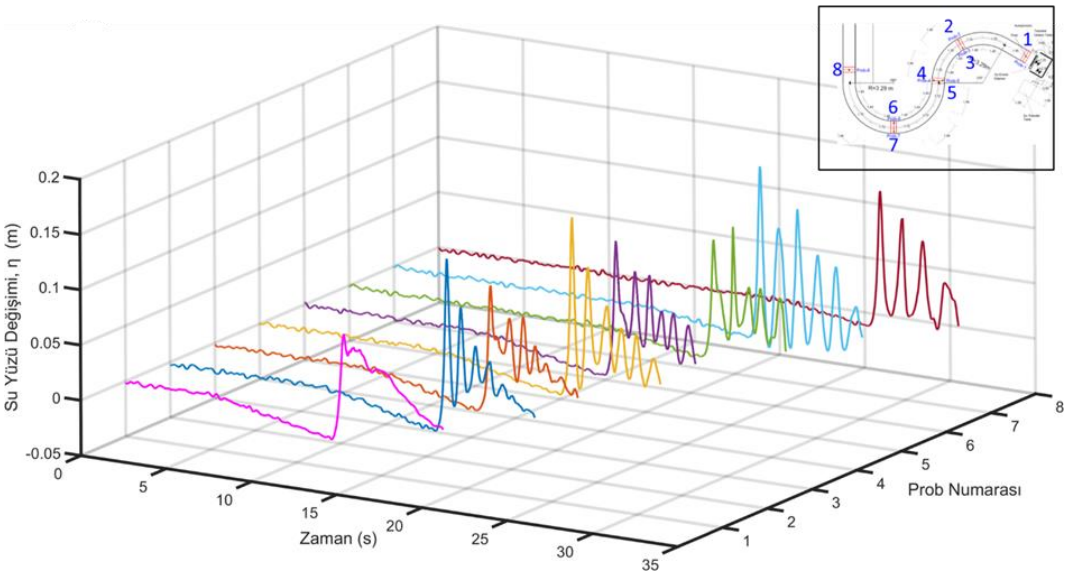
Prob No	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Pozitif Genlik (m)	0.143	0.086	0.069	0.063	0.071	0.062	0.064	0.059
Negatif Genlik (m)	0.042	0.026	0.028	0.022	0.022	0.018	0.018	0.018
Dalga Yüksekliği (m)	0.185	0.113	0.097	0.084	0.093	0.080	0.082	0.077
Çukur Periyodu (s)	10.96	9.2	9.36	8.45	8.54	7.64	7.67	6.83
Tepe Periyodu (s)	3.4	6.13	5.79	6.37	6.63	7.1	7.06	7.24
Toplam Periyot (s)	14.36	15.33	15.15	14.82	15.17	14.74	14.73	14.07
a^+/d	0.95	0.58	0.46	0.42	0.48	0.41	0.43	0.39

6.2.2 Kararlı Akım Durumu

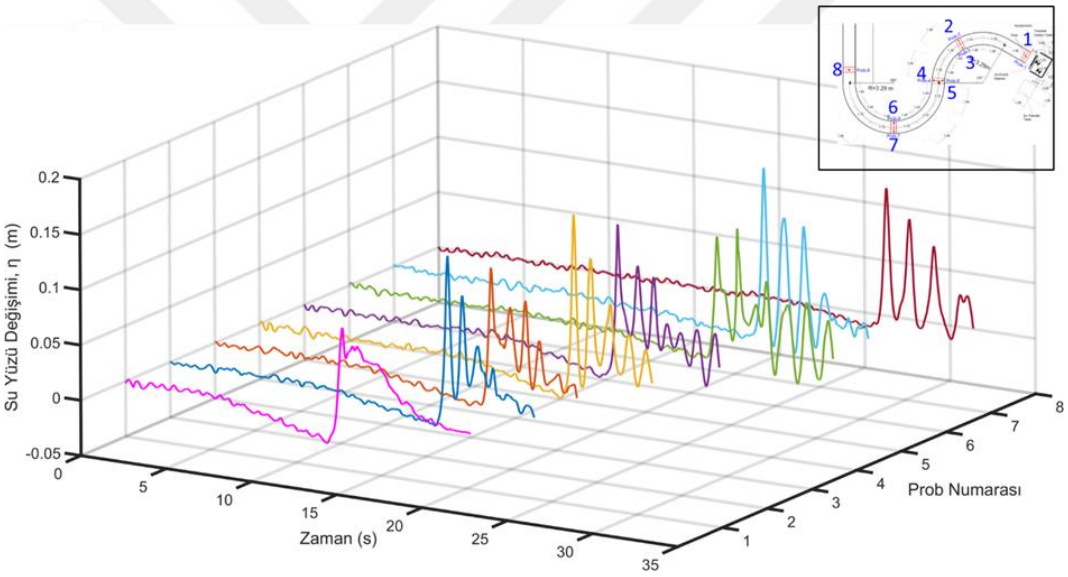
6.2.2.1 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.24$ olan N-dalga

Şekil 6.9'da ve Tablo 6.5'te d=25 cm ve Q_1= 0.016 m^3/s karşı akım debisi olması durumunda 8 farklı probdaki dalga profillerinin karakteristikleri kanal boyunca profilin değişimi verilmiştir. Prob 1'de kanalın girişinde pozitif genlik durgun sudaki profile göre %18 artarak 0.072 m ölçülmüş dolayısıyla a^+/d oranı 0.29 olarak hesaplanmıştır. Durgun su koşullarındaki profilde olduğu gibi, Prob 1'deki pozitif genlik kanal boyunca ilerlerken diğer problarda yaklaşık iki kat artmıştır. Durgun su profillerinde gözlenen yanal momentum etkisiyle aynı kesitteki problarda dış kıvrımdaki genlik artışı her üç debi koşulu için de gözlemlenmiştir. Negatif genliklerde durgun su koşullarındakine göre bir değişim görülmemiştir. Fakat Prob 8 için negatif genlik bir miktar azalmıştır. Benzer şekilde çukur ve tepe periyotlarında da önemli bir değişim meydana gelmemiştir. a^+/d oranı kanal boyunca bir miktar artmaktadır. Fakat her üç debide de durgun sudaki profillere benzer şekilde dalgalı bore formunun kıvrımlı kanal boyunca korunumu gözlemlenmiştir. Şekil 6.12'de ise deney esnasındaki dalga ilerleyişi verilmiştir.

Şekil 6.10'da ve Tablo 6.6'da d=25 cm ve Q_2= 0.035 m^3/s karşı akım debisi için 8 probda elde edilen dalga karakteristikleri ve dalga profilleri verilmiştir. Prob 1 konumunda pozitif genlik 0.078 m değerini alarak durgun sudaki profile göre %28 artmıştır. Dolayısıyla a^+/d oranı 0.31'e yükselmiştir. Diğer problarda da aynı derinlikteki durgun su koşullarına göre pozitif genlikte artışlar meydana gelmiştir. Q_1= 0.016 m^3/s debi koşuluna benzer şekilde, negatif genliklerde durgun su koşullarına göre bir değişim görülmemiştir. Fakat Prob 8 için negatif genlik ciddi miktarda azalmıştır. a^+/d oranı bir miktar artmaktadır. Yine çukur periyotlarında genellikle bir azalış ve tepe periyodunda da ise bir artış eğilimi dikkat çekmektedir.



Şekil 6.9 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi

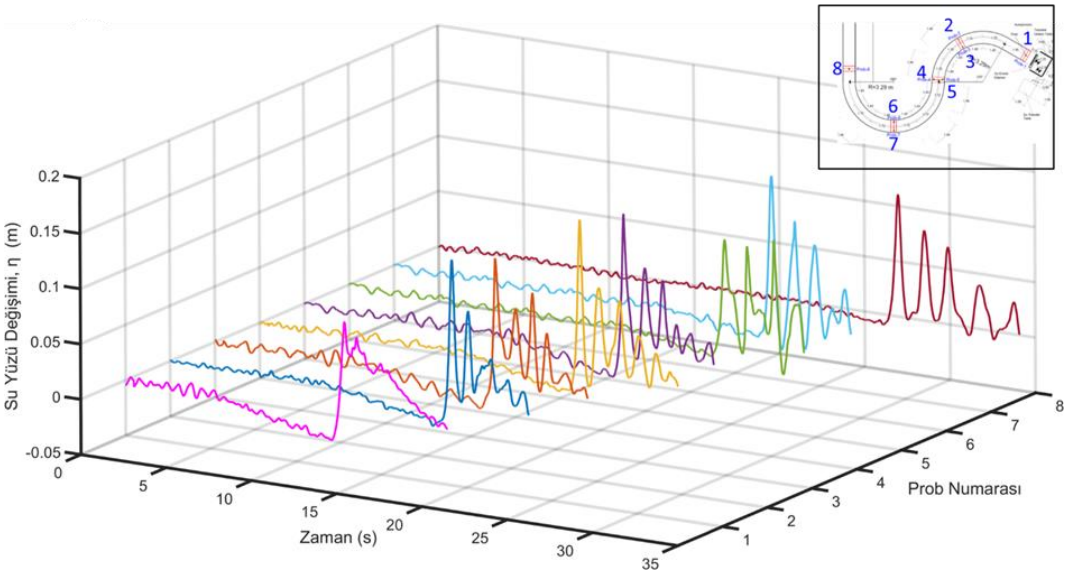


Şekil 6.10 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi

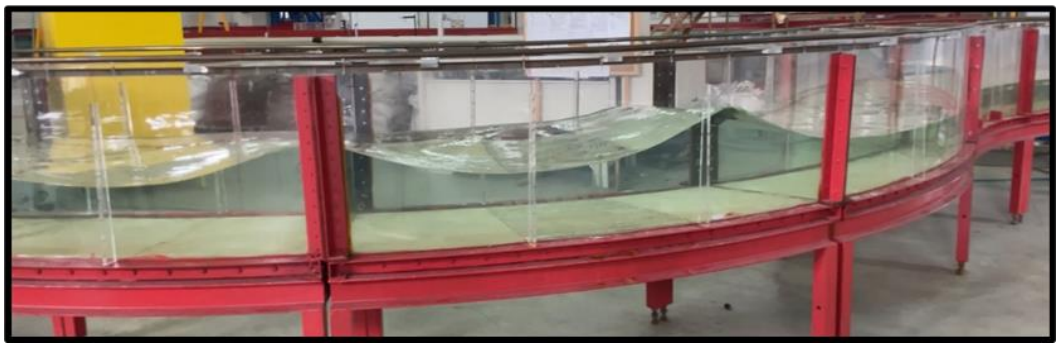
d=25 cm ve Q_3= 0.05 m^3/s'lik kararlı kanal akımına karşı ilerleyen tsunami dalgası için 8 probda görülen dalga profilleri ve dalga karakteristikleri sırasıyla Şekil 6.11'de ve Tablo 6.7'de verilmiştir. Burada kanal girişinde Prob 1 konumunda yine pozitif genliğin durgun sudaki hale göre %36 artarak 0.083 m olduğu görülmüştür. Buna karşılık gelen a^+/d oranı 0.31 olmuştur. Fakat Q_2= 0.035 m^3/s debisi ile kıyaslandığında bütün problardaki artış miktarı oldukça az olmaktadır. Negatif genliklerde ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir. Fakat diğer dalga profillerinde olduğu gibi Q_3= 0.05 m^3/s'de Prob 8'de tsunami dalgasının çukuru oldukça

küçülmektedir. Çukur ve tepe periyotlarında ciddi bir azalma görülmektedir. Prob 8'de dalgalı bore oluşumundan dolayı tepe periyodu %34 artmıştır. Debinin artmasıyla Prob 8 için negatif genlik giderek azalmaktadır. Burada negatif genlik yaklaşık 3 kat azalmıştır. Bunun temel nedeni debinin artmasıyla kanala giren su miktarının artmasıyla kütle korunumu etkisinden olmaktadır.

Burada özellikle debinin artmasıyla beraber çekilme (dalga çukuru) öncesi ve esnasında su yüzü değişim grafiklerinde görülen küçük titreşimler kıvrımlı kanal içerisindeki akım koşullarından kaynaklı olarak problarda okunan su yüzeyindeki küçük dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.11 25 cm derinlikte ve $a^+/d=0.24$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının $Q_3= 0.05\ m^3/s$ akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi



Şekil 6.12 $a^+/d=0.24$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının $Q_1= 0.016\ m^3/s$ akım koşulunda kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi

Tablo 6.5 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.072	0.132	0.090	0.140	0.101	0.106	0.141	0.112
Negatif Genlik (m)	0.024	0.026	0.025	0.023	0.023	0.017	0.022	0.013
Dalga Yüksekliği (m)	0.096	0.158	0.115	0.163	0.124	0.123	0.163	0.125
Çukur Periyodu (s)	7.46	6.94	6.41	7.02	7	5.57	6.14	4.53
Tepe Periyodu (s)	6.18	5.45	5.38	5.49	4.94	4.54	6.33	4.96
Toplam Periyot (s)	13.64	12.39	11.79	12.51	11.94	10.11	12.47	9.49
a^+/d	0.29	0.53	0.36	0.56	0.40	0.43	0.56	0.45

Tablo 6.6 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

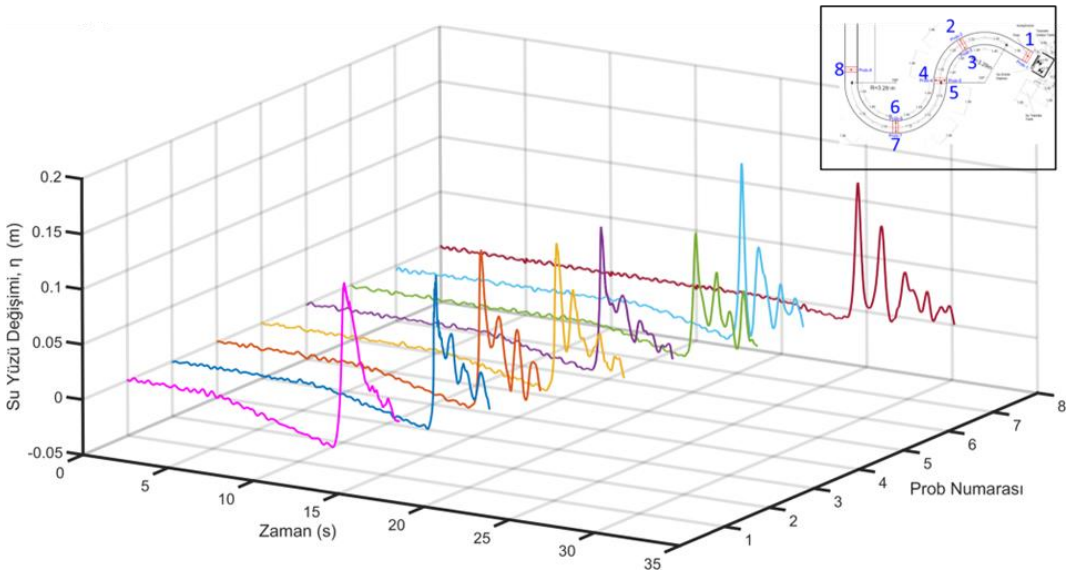
Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.078	0.135	0.106	0.142	0.116	0.105	0.140	0.116
Negatif Genlik (m)	0.028	0.021	0.021	0.026	0.025	0.027	0.023	0.014
Dalga Yüksekliği (m)	0.107	0.156	0.128	0.168	0.141	0.132	0.164	0.129
Çukur Periyodu (s)	7.37	6.91	5.88	6.20	6.09	7.99	7.8	4.87
Tepe Periyodu (s)	7.88	5.45	5.35	4.91	6.25	7.14	6.52	5.49
Toplam Periyot (s)	15.25	12.36	11.23	11.11	12.34	15.13	14.32	10.36
a^+/d	0.31	0.54	0.43	0.57	0.46	0.42	0.56	0.46

Tablo 6.7 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

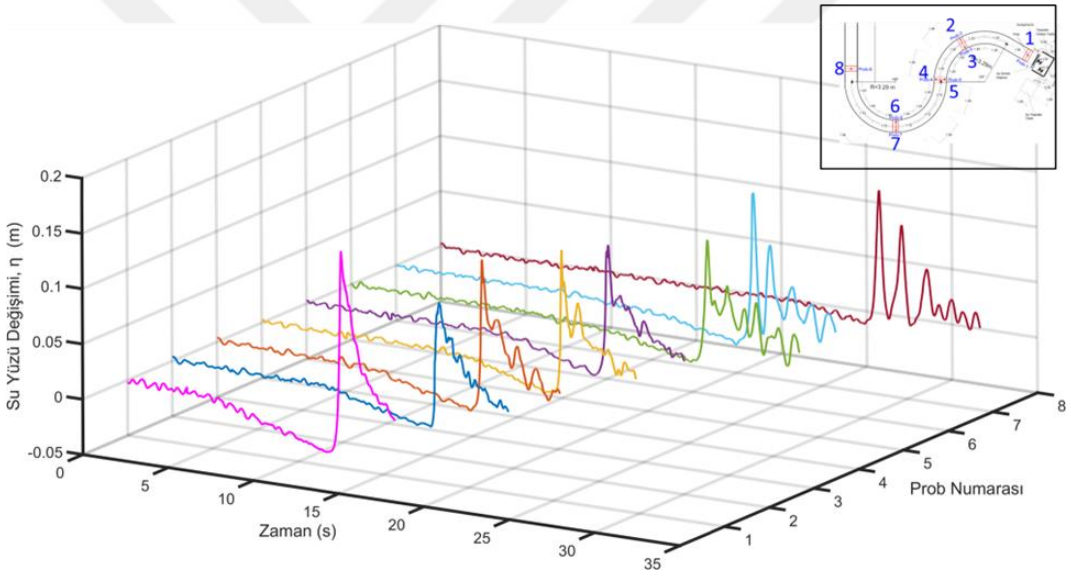
Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.083	0.131	0.115	0.138	0.126	0.099	0.133	0.110
Negatif Genlik (m)	0.026	0.023	0.023	0.021	0.024	0.022	0.023	0.009
Dalga Yüksekliği (m)	0.108	0.153	0.138	0.158	0.149	0.121	0.156	0.120
Çukur Periyodu (s)	7.47	6.18	6.65	5.34	5.48	4.61	3.35	3.58
Tepe Periyodu (s)	6.42	4.85	5.71	6.1	5.58	5.07	5.06	7.63
Toplam Periyot (s)	13.89	11.03	12.36	11.44	11.06	9.68	8.41	11.21
a^+/d	0.33	0.52	0.46	0.55	0.50	0.40	0.53	0.44

6.2.2.2 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.48$ olan N-dalga

Q_1= 0.016 m^3/s'lik kararlı akım koşullarında a^+/d=0.48 bore gücünde ilerleyen tsunami dalgasının 8 probda elde edilen dalga karakteristikleri Tablo 6.8'de ve kanal boyunca su yüzü değişimi Şekil 6.13'te verilmiştir. Problarda pozitif genlik statik haldeki duruma göre belirgin bir değişim göstermemiştir. Dolayısıyla problarda genellikle a^+/d oranları aynı kalmıştır. Dalga profilleri incelendiğinde durgun sudaki profillere göre benzer görülmektedir. Diğer dalga karakteristikleri olan çukur periyodu, tepe periyodu ve negatif genliklerde yine ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir. Yine kıvrımlı kanal boyunca tepe periyodu giderek artmış ve çukur periyotları giderek azalmıştır.

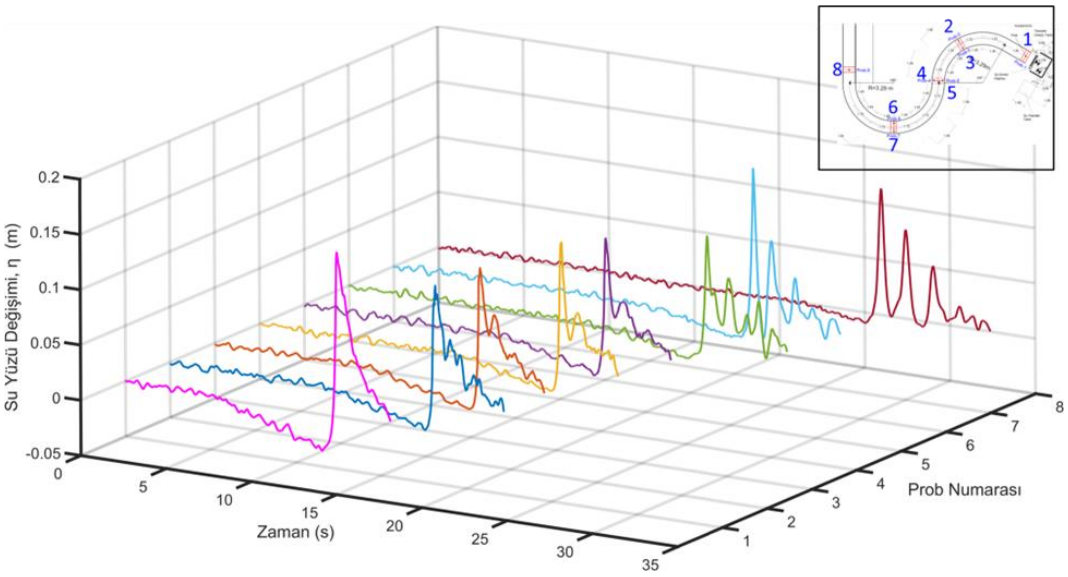


Şekil 6.13 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi



Şekil 6.14 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi

Q_2= 0.035 m^3/s için 8 probda elde edilen dalga karakteristikleri Tablo 6.9'da ve dalga profilleri Şekil 6.14'te verilmiştir. Q_1= 0.016 m^3/s debi koşulundan farklı olarak Prob 1'de pozitif genlik %23 artarak bore gücü a^+/d=0.58 olmuştur. Fakat diğer problardaki profillerde pozitif genlik artışı olmamış, aksine statik haldeki profillere göre bir miktar azalma eğilimi görülmüştür. Prob 6 ve 7'de çukur periyodunda %33'lük artış görülmüş Prob 8 için ise yine debinin artmasıyla çukur periyodunda azalma gözlemlenmiştir. Diğer probların ise çukur periyotları aynı kalmıştır. Tepe periyotlarında ise bir değişim eğilimi gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.15 25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi



Şekil 6.16 a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulunda kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi

Q_3= 0.05 m^3/s karşı akım debisi olması durumu için dalga karakteristikleri Şekil 6.15 ve Tablo 6.10'da verilmiştir. Q_2= 0.035 m^3/s debi durumu için Prob 1'deki profilde pozitif genlik tamamen aynı olmaktadır. Diğer problardaki pozitif genlik Q_2= 0.035 m^3/s debi durumuna göre bir miktar artış göstermiştir. Çukur ve tepe periyotlarında ciddi bir değişim eğilimi görülmemektedir. Fakat diğer deneylerde gözlemlendiği gibi Q_3= 0.05 m^3/s debi durumunda Prob 8'deki dalga çukurunun

küçülmesi durumu burada daha belirgin olmaktadır. Her üç debi durumu için de durgun suda görüldüğü gibi tsunami dalgası kanal içerisinde önce kırılmaya uğramakta daha sonra ise kırılma etkisi sönümlenerek dalgalı bore formuna dönüşmektedir. Bu durum Şekil 6.16'da verilen ve Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında elde edilen deney fotoğraflarında açıkça görülmektedir.

Tablo 6.8 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Pozitif Genlik (m)	0.118	0.114	0.120	0.114	0.111	0.095	0.141	0.116
Negatif Genlik (m)	0.032	0.026	0.024	0.022	0.021	0.019	0.021	0.011
Dalga Yüksekliği (m)	0.150	0.140	0.144	0.135	0.132	0.114	0.162	0.126
Çukur Periyodu (s)	7.42	7.04	6.77	6.8	6.07	5.91	5.46	4.05
Tepe Periyodu (s)	3.54	3.33	3.7	4.16	4.41	3.9	3.93	6.09
Toplam Periyot (s)	10.96	10.37	10.47	10.96	10.48	9.81	9.39	10.14
a^+/d	0.47	0.46	0.48	0.45	0.44	0.38	0.56	0.46

Tablo 6.9 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

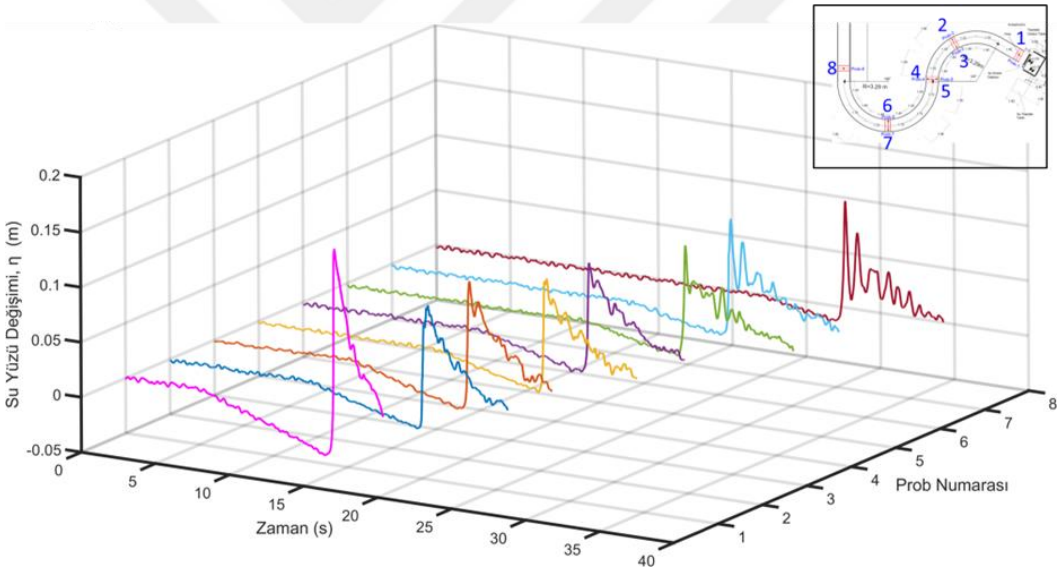
Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.146	0.090	0.111	0.107	0.095	0.090	0.115	0.111
Negatif Genlik (m)	0.037	0.024	0.027	0.024	0.025	0.023	0.024	0.012
Dalga Yüksekliği (m)	0.183	0.113	0.138	0.132	0.120	0.113	0.140	0.123
Çukur Periyodu (s)	7.33	6.38	6.39	5.46	5.44	8.1	8.18	3.84
Tepe Periyodu (s)	3.35	4.33	4.73	4.49	4.74	5.7	5.12	6.3
Toplam Periyot (s)	10.68	10.71	11.12	9.95	10.18	13.8	13.3	10.14
a^+/d	0.58	0.36	0.44	0.43	0.38	0.36	0.46	0.45

Tablo 6.10 25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.146	0.106	0.104	0.116	0.102	0.095	0.139	0.114
Negatif Genlik (m)	0.036	0.026	0.025	0.020	0.024	0.019	0.017	0.010
Dalga Yüksekliği (m)	0.181	0.132	0.129	0.136	0.127	0.114	0.156	0.124
Çukur Periyodu (s)	7.18	6.32	6.34	4.95	4.94	4.71	4.76	3.47
Tepe Periyodu (s)	3.38	4.25	4	3.6	4.06	4.98	5.43	6.9
Toplam Periyot (s)	10.56	10.57	10.34	8.55	9	9.69	10.19	10.37
a^+/d	0.58	0.42	0.42	0.46	0.41	0.38	0.56	0.46

6.2.2.3 Bore Gücü $\alpha=a^{+}/d=0.69$ olan N-dalga

Şekil 6.17 ve Tablo 6.11'de Q_1= 0.016 m^3/s akım debisi durumunda 8 farklı probdaki dalga profilleri ve sahip oldukları karakteristikler verilmiştir. Prob 1 için statik haldeki duruma göre pozitif genliğin 0.146 m'ye yükselmesiyle (a^{+}/d oranı 0.73 olmuştur) yaklaşık %6'lık bir artış olduğu görülmektedir. Prob 8 için de aynı şekilde bir artış görülmüş fakat diğer problarda pozitif genlik içim belirgin değişim gözlemlenmemiştir. Kıvrımlı kanal boyunca dalganın ilerlemesiyle dalga tepesi statik haldekine benzer şekilde kırılmaya uğrayarak pozitif genliğin %40 azaldığı gözlenmiştir (Şekil 6.20). Negatif genliklerin ise durgun sudaki profil ile karşılaştırıldığında yine ciddi bir değişime uğramadığı görülmüştür. Pozitif genlik periyotlarında ve negatif genlik periyotlarında önemli bir değişim görülmemiştir. Fakat Prob 8'deki negatif genlik periyodu bir miktar azalmıştır. Prob 7 ve 8'de statik haldeki profile benzer olarak belirgin dalgalı bore oluşumu gözlenmiştir.

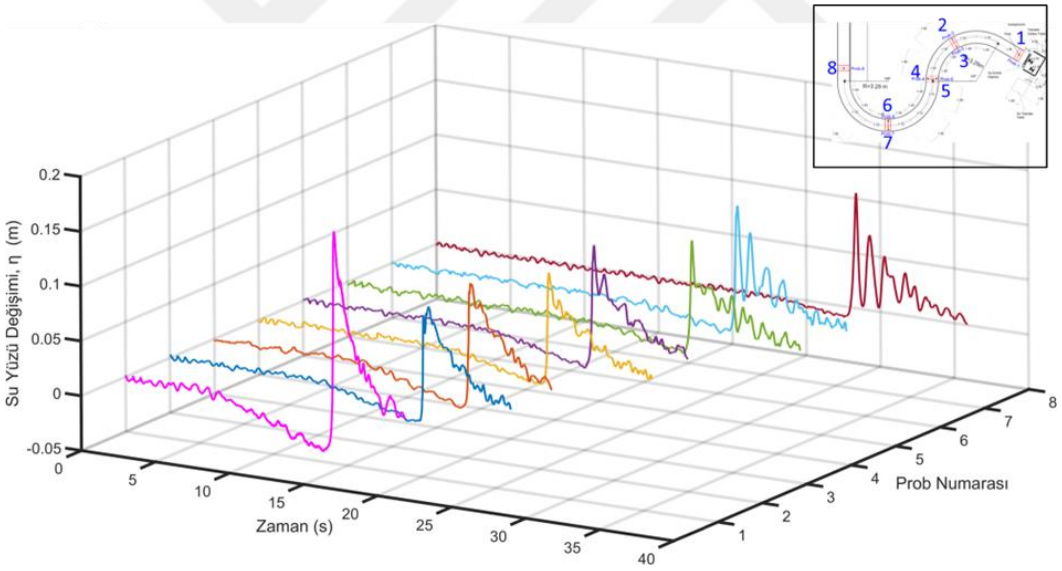


Şekil 6.17 20 cm derinlikte ve $a^{+}/d=0.69$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi

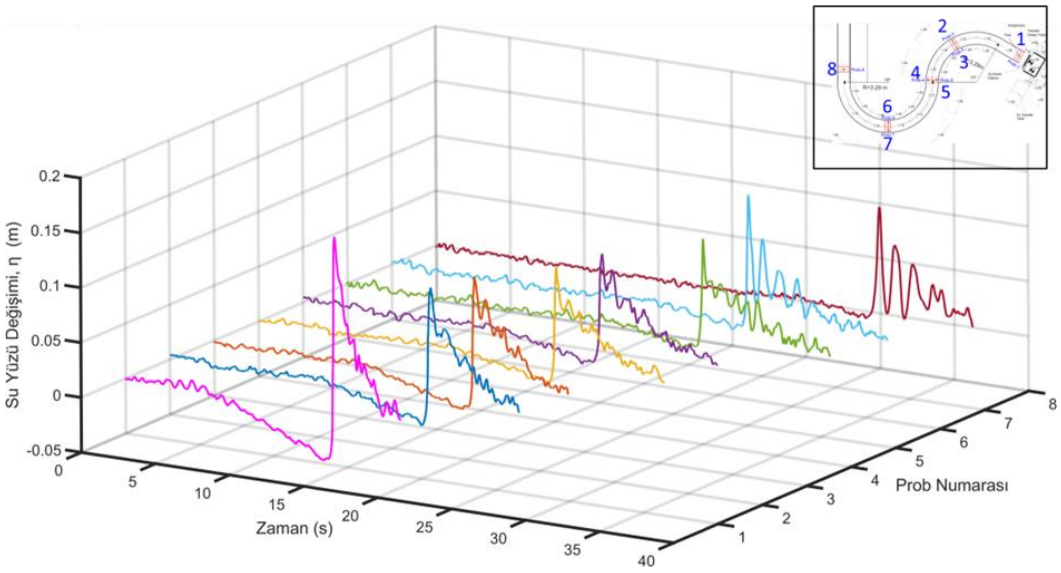
Kanalda akım debisinin Q_2= 0.035 m^3/s olması durumunda 8 probda elde edilen dalga karakteristikleri Tablo 6.12'de ve oluşan dalga profilleri Şekil 6.18'de verilmiştir. Prob 1'de tsunami dalgası kanala girerken pozitif genlik 0.161 m değerine ulaşarak a^{+}/d oranı 0.81 değerine yükselmiştir. Dolayısıyla durgun sudaki profile göre %17 oranında artış gözlenmiştir. Negatif genliklerde Prob 8 dışında yine ciddi bir fark görülmemektedir. Prob 8 için negatif genlikte yaklaşık %38 oranında azalma olduğu ve oldukça küçük bir dalga çukuruna dönüştüğü

görülmektedir. Dalga çukuru periyodunda durgun sudaki profile göre ciddi bir fark olmamakla birlikte tepe periyodu durgun sudaki profile ve Q_1= 0.016 m^3/s akım debisi olması durumuna göre artış göstermiştir. Dalga kanalda ilerledikçe kırılmalar meydana gelmiş ve pozitif genliklerle beraber a^+/d oranı azalmaktadır.

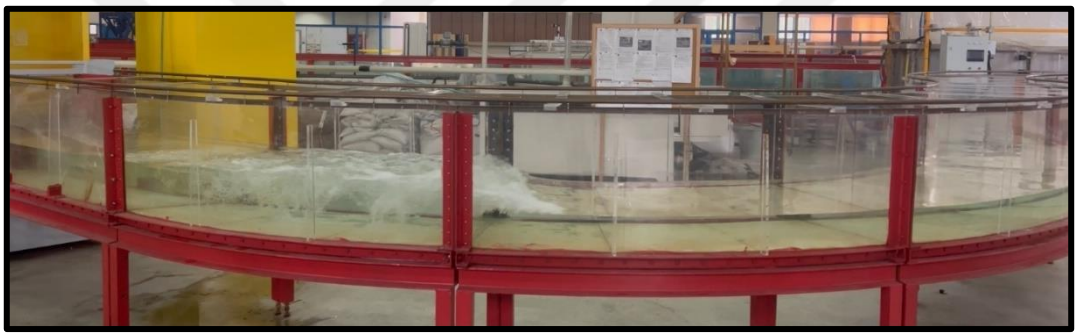
Q_3= 0.05 m^3/s akım debisi için 8 probda görülen dalga profilleri Şekil 6.19'da ve dalga karakteristikleri Tablo 6.13'te verilmiştir. Prob 1 için pozitif genliğin durgun sudaki profile göre %15 arttığı fakat Q_2= 0.035 m^3/s debisindeki duruma göre yaklaşık olarak aynı olduğu gözlenmiştir. Negatif genliğin Prob 1'de bir miktar arttığı, Prob 2 ve 3'te değişmediği fakat kanalda ilerledikçe özellikle Prob 8 için yine yapılan ölçümlerde ciddi miktarda azaldığı ve neredeyse dalga çukurunun yok olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla negatif genlik de azalmaktadır. Pozitif genlik periyotlarında diğer akım debisi durumlarına göre ciddi miktarda artış olduğu gözlenmiştir. Dalga kretinde meydana gelen dalgalanmaların ve dalgalı bore formunun oluşumu debi artışıyla beraber daha da arttığı görülmektedir.



Şekil 6.18 20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi



Şekil 6.19 20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi



Şekil 6.20 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulunda kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi

Tablo 6.11 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.146	0.085	0.089	0.079	0.076	0.081	0.088	0.097
Negatif Genlik (m)	0.042	0.029	0.028	0.026	0.026	0.020	0.019	0.015
Dalga Yüksekliği (m)	0.188	0.113	0.117	0.105	0.101	0.102	0.107	0.112
Çukur Periyodu (s)	9.01	7.52	7.06	6.69	6.89	6.62	6.68	4.85
Tepe Periyodu (s)	3.4	5.79	5.74	6.35	6.56	7.5	7.5	6.89
Toplam Periyot (s)	12.41	13.31	12.8	13.04	13.45	14.12	14.18	11.74
a^+/d	0.73	0.42	0.45	0.39	0.38	0.41	0.44	0.49

Tablo 6.12 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

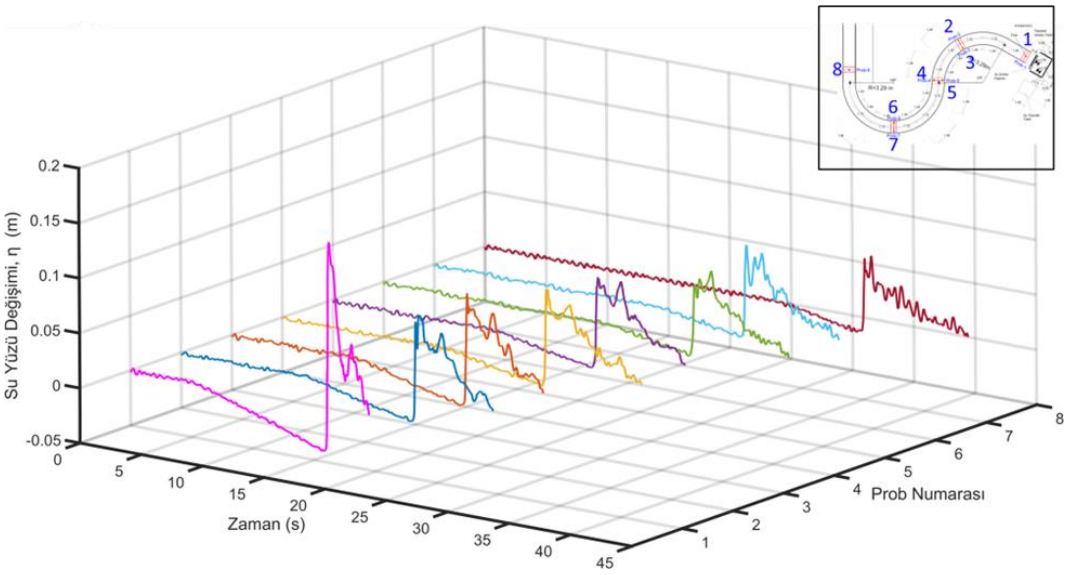
Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.161	0.083	0.087	0.084	0.091	0.086	0.101	0.105
Negatif Genlik (m)	0.040	0.024	0.029	0.019	0.022	0.018	0.018	0.010
Dalga Yüksekliği (m)	0.202	0.108	0.116	0.103	0.113	0.104	0.119	0.115
Çukur Periyodu (s)	8.96	7.56	7.81	6.94	7.42	7.54	7.07	5.46
Tepe Periyodu (s)	4.91	5.96	5.67	7.11	6.55	7.52	7.62	7.9
Toplam Periyot (s)	13.87	13.52	13.48	14.05	13.97	15.06	14.69	13.36
a^+/d	0.81	0.42	0.43	0.42	0.46	0.43	0.50	0.53

Tablo 6.13 20 cm derinlikte ve a^+/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.161	0.083	0.087	0.084	0.091	0.086	0.101	0.105
Negatif Genlik (m)	0.040	0.024	0.029	0.019	0.022	0.018	0.018	0.010
Dalga Yüksekliği (m)	0.202	0.108	0.116	0.103	0.113	0.104	0.119	0.115
Çukur Periyodu (s)	8.96	7.56	7.81	6.94	7.42	7.54	7.07	5.46
Tepe Periyodu (s)	4.91	5.96	5.67	7.11	6.55	7.52	7.62	7.9
Toplam Periyot (s)	13.87	13.52	13.48	14.05	13.97	15.06	14.69	13.36
a^+/d	0.81	0.42	0.43	0.42	0.46	0.43	0.50	0.53

6.2.2.4 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.95$ olan N-dalga

Şekil 6.21 ve Tablo 6.14'te d=15 cm ve Q_1= 0.016 m^3/s akım debisi olması durumunda 8 farklı probdaki dalga profilleri ve sahip oldukları dalga karakteristikleri verilmiştir. Prob 1 için tsunami dalgasının pozitif dalga genliğinin statik haldeki pozitif genliğe kıyasla %5 artışla biraz arttığı görülmüştür. Dalga kıvrımlı kanalda ilerledikçe statik halde olduğu Prob 1 sonrası ciddi miktarda kırılmaya uğrayarak pozitif genliklerde azalma meydan gelmiştir (Şekil 6.24). Dalganın negatif genliğinde ve çukur periyodunda dalganın kanalda ilerlemesiyle azalmalar oluşmuştur. Durgun suda yayılan dalgada olduğu gibi kıvrımlı kanal içerisinde ilerledikçe bore gücü değeri düşerek dalga katarı oluşmaya başlamıştır.

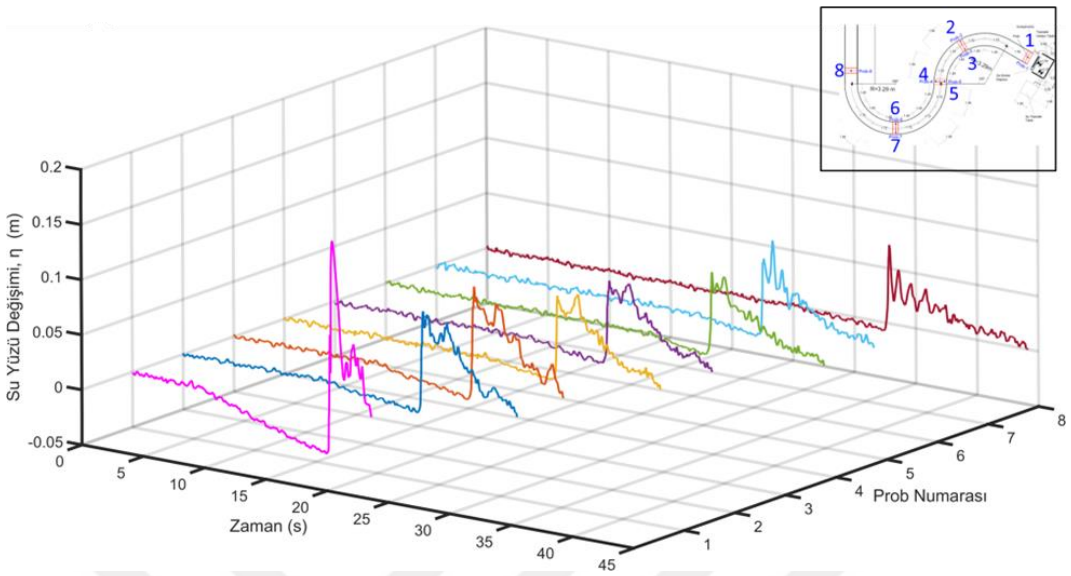


Şekil 6.21 15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi

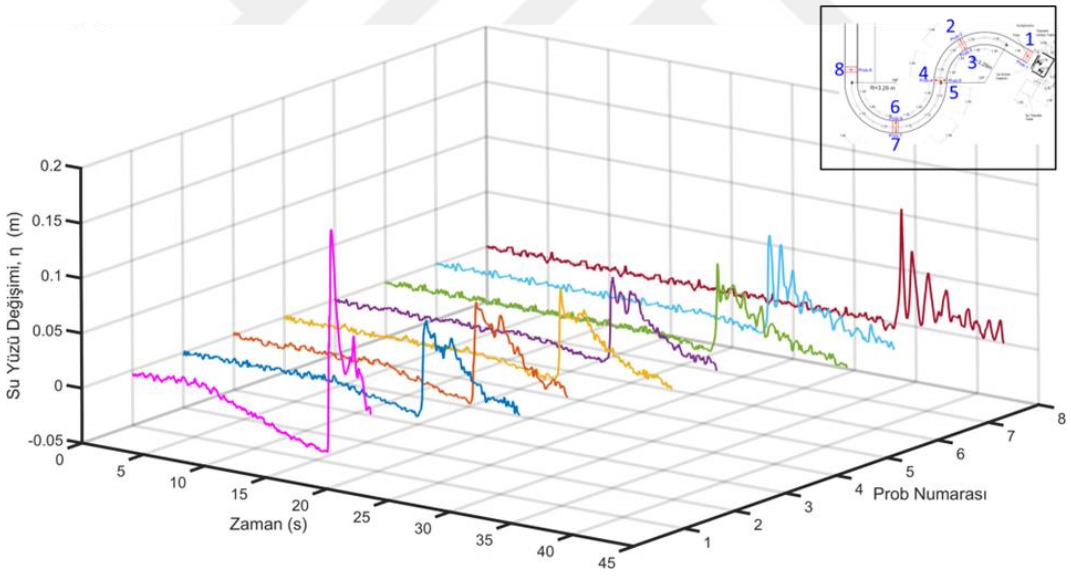
Q_2= 0.035 m^3/s akım debisi olması durumunda 8 probda elde edilen dalga profilleri Şekil 6.22'de ve dalga karakteristikleri Tablo 6.15'te verilmiştir. Prob 1 için pozitif genlik değeri hem durgun su hem de 0.016 m^3/s akım debisine göre artmaktadır. Durgun suda gözlemlenen pozitif genlik değerine göre yaklaşık %17'lik artış gerçekleşmiştir. Yine kanal girişindeki kırılmadan sonra pozitif genlikler azalmış ve dalga kretinde ikincil pozitif genlik oluşumu gözlemlenmiştir. Dalganın negatif genliğinde ve çukur periyodunda azalmalar, tepe periyotlarında ise artışlar gerçekleşmiştir. Ayrıca kıvrımlı kanal içerisinde ilerledikçe yine dalgalanmalar dalgalı bore formuna dönüşerek dalga katarı oluşumu görülmüştür.

Q_3= 0.050 m^3/s akım debisi için tsunami dalgası kanal boyunca değişimi Şekil 6.23'te ve Tablo 6.16'da verilmiştir. Tsunami dalgası Prob 1 sonrası tekrar kırılmaya uğrayarak pozitif genliklerde azalmalar gerçekleşmiştir. Prob 1 için kanal girişinde gözlemlenen pozitif genlik değeri 0.035 m^3/s akım debisi için gözlemlenen değer ile neredeyse aynı olmaktadır. Bu bore gücü için Q_2 ve Q_3 debi koşulları benzer dalga karakteristik özellikleri göstermektedir. Debi artışıyla beraber kanal girişinde pozitif genlik ve dolayısıyla bore gücü artmaktadır. Tsunami dalgasının negatif genlikleri ve çukur periyotları kanal membasına doğru azalmaktadır. Özellikle Prob 8 için artan debiyle beraber dalga çukuru oluşamamaktadır. Dalganın tepe periyotlarında ise Prob 6'ya kadar gözlemlenen artış eğilimi son Prob 7 ve 8 için azalma eğilimine dönüşmüştür. Bu duruma, artan

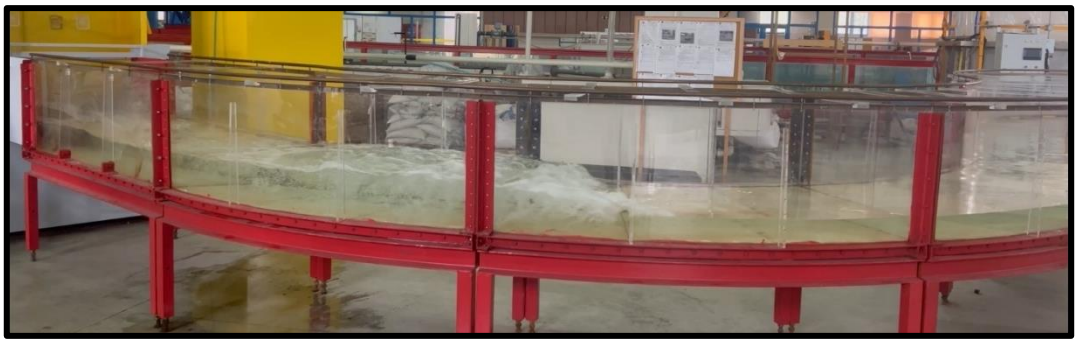
debinin tsunami dalgası ilerleyişine zıt yönde meydana getirdiği sürtünme, hidrostatik kuvvetler ve momentum kuvvetinin etkili olduğu ifade edilebilmektedir.



Şekil 6.22 15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi



Şekil 6.23 15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimi



Şekil 6.24 a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesine ait deney fotoğrafı

Tablo 6.14 15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Pozitif Genlik (m)	0.150	0.075	0.078	0.071	0.066	0.066	0.071	0.057
Negatif Genlik (m)	0.040	0.023	0.025	0.018	0.018	0.015	0.014	0.015
Dalga Yüksekliği (m)	0.190	0.098	0.103	0.089	0.084	0.081	0.085	0.072
Çukur Periyodu (s)	11.04	8.75	8.08	7.43	7.44	6.22	6.29	5.78
Tepe Periyodu (s)	3.43	6.41	6.34	7.93	7.27	7.84	7.74	8.54
Toplam Periyot (s)	14.47	15.16	14.42	15.36	14.71	14.06	14.03	14.32
a^+/d	1.00	0.50	0.52	0.47	0.44	0.44	0.47	0.38

Tablo 6.15 15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.153	0.080	0.087	0.072	0.066	0.066	0.080	0.071
Negatif Genlik (m)	0.041	0.013	0.017	0.009	0.011	0.011	0.010	0.008
Dalga Yüksekliği (m)	0.194	0.093	0.104	0.082	0.077	0.077	0.090	0.079
Çukur Periyodu (s)	11.05	7.13	7.15	4.74	4.86	4.67	3.77	4.83
Tepe Periyodu (s)	3.44	7.87	7.48	8.55	8.65	9.36	9.2	11.57
Toplam Periyot (s)	14.49	15	14.63	13.29	13.51	14.03	12.97	16.4
a^+/d	1.02	0.53	0.58	0.48	0.44	0.44	0.54	0.48

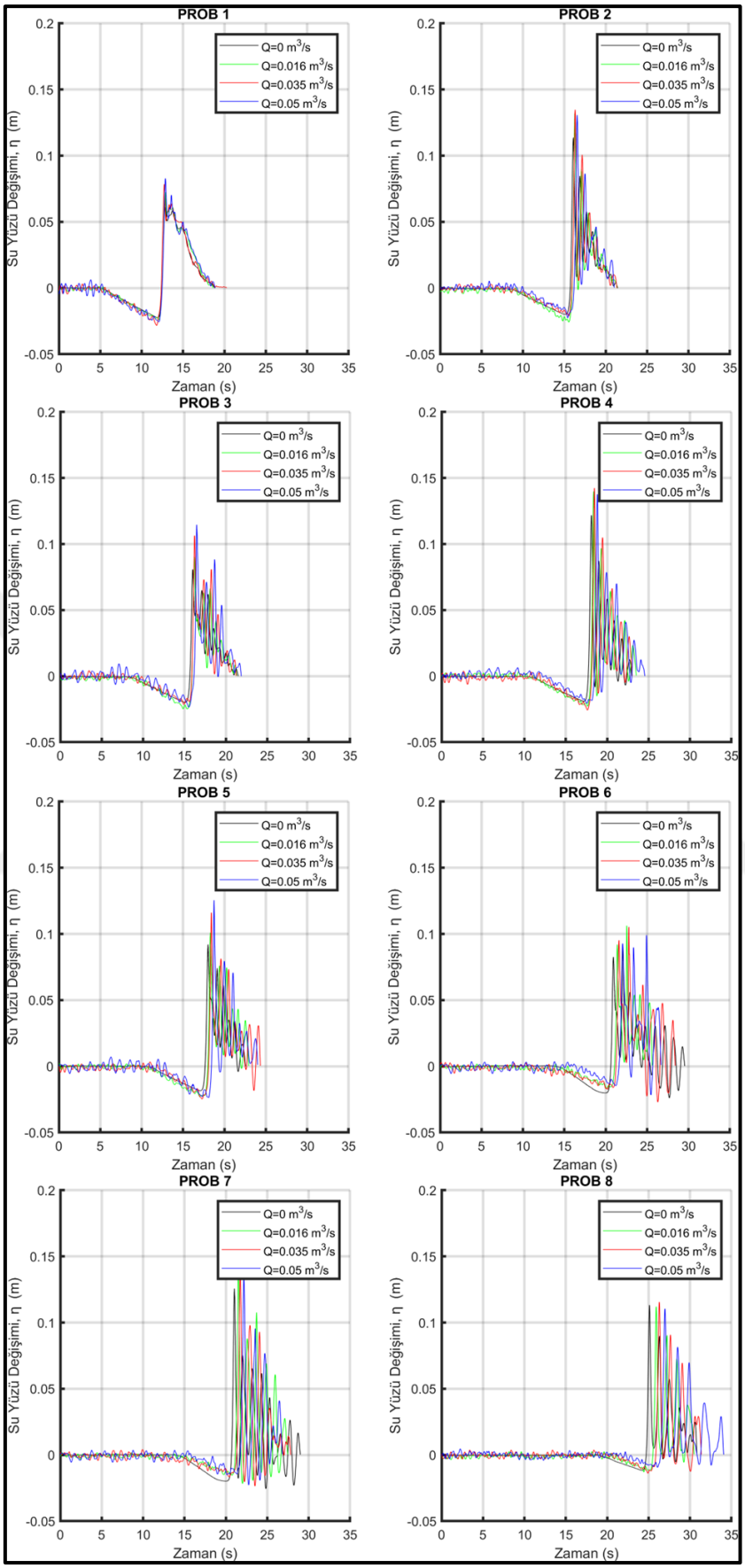
Tablo 6.16 15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşullarında farklı problardaki profil karakteristikleri

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8
Pozitif Genlik (m)	0.162	0.071	0.071	0.073	0.068	0.073	0.084	0.105
Negatif Genlik (m)	0.041	0.018	0.022	0.012	0.012	0.009	0.008	0.009
Dalga Yüksekliği (m)	0.203	0.090	0.094	0.085	0.080	0.082	0.092	0.113
Çukur Periyodu (s)	10.99	6.51	7.03	4.37	4.88	2.76	2.41	1.02
Tepe Periyodu (s)	3.45	7.92	7.7	9.22	8.76	10.86	10.45	8.84
Toplam Periyot (s)	14.44	14.43	14.73	13.59	13.64	13.62	12.86	9.86
a^+/d	1.08	0.48	0.48	0.49	0.45	0.49	0.56	0.70

6.2.3 Birlikte Değerlendirme

6.2.3.1 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.24$ olan N-dalga

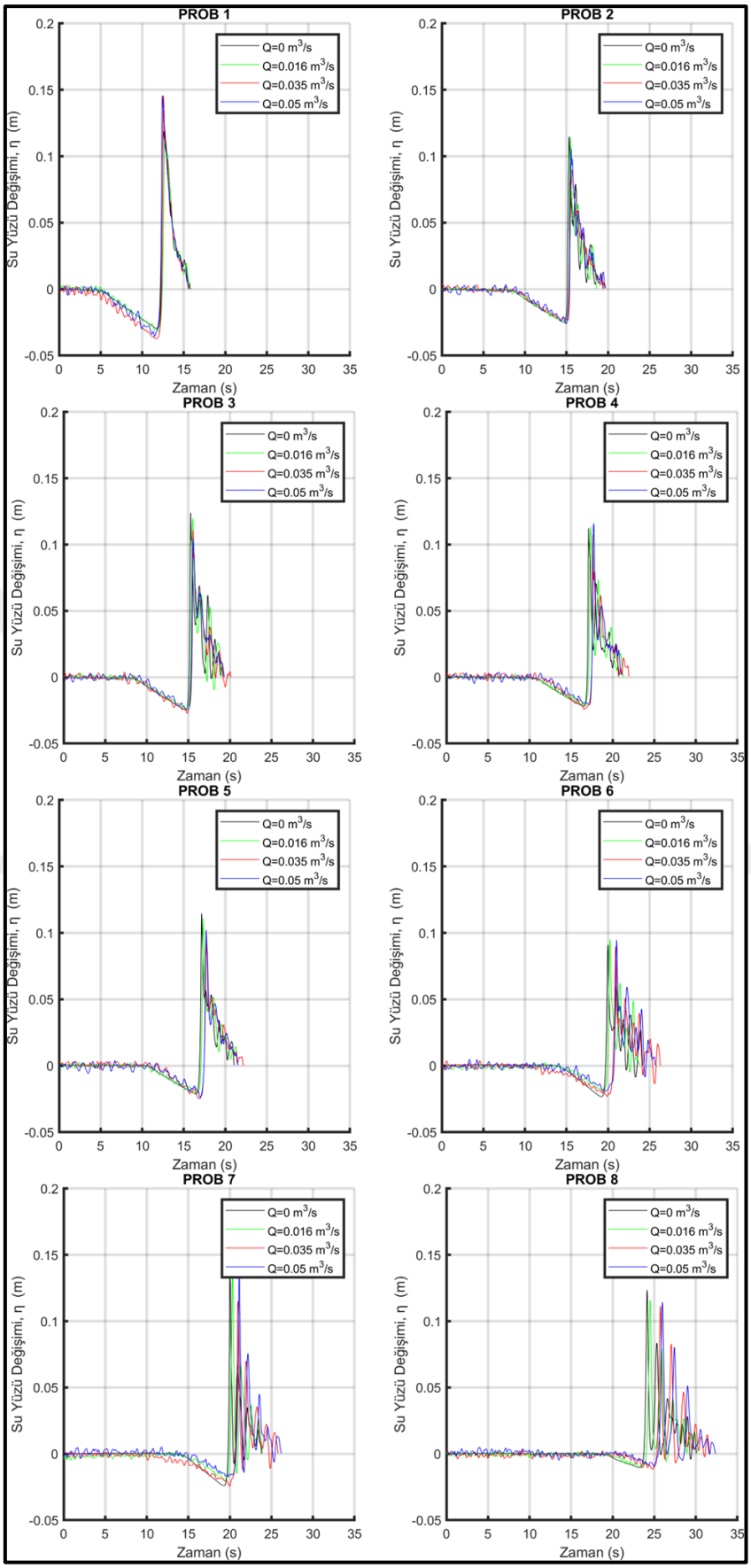
d=25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 oranında farklı debilerdeki farklı akım koşulları (Q_0=0 m^3/s, Q_1= 0.016 m^3/s, Q_2= 0.035 m^3/s, Q_3= 0.05 m^3/s) için elde edilen dalga profilleri her bir prob için sırasıyla Şekil 6.25'te verilmiştir. Bu profilin durgun su koşullarında düşük a^+/d oranından dolayı dalgalı bore yapısı oluşturduğundan bahsedilmiştir. Benzer şekilde her üç debi durumu için bu bore gücü korunmaya devam etmektedir. Hatta debinin artmasıyla dalgalı bore yapısındaki salınım sayısı ile dalgalanma oluşumu ve pozitif genlik miktarı artmaktadır. Prob 1 için gerçekleştirilen ölçümlere göre durgun su koşulunda ve her üç debi durumunda su yüzü değişimlerinin benzer olduğu görülmüştür. Çukur ve tepe periyotları yaklaşık olarak aynı değerde olmakta ve negatif genlikte ise belirgin bir fark bulunmamaktadır. Fakat debinin artmasıyla pozitif genlik doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Prob 2 ve 3'ün bulunduğu kesit incelendiğinde durgun sudaki profile göre pozitif genlikte artış görülmektedir. Fakat söz konusu artış debinin artışıyla doğru orantılı olmamaktadır. Dalgalı bore formundan dolayı kanal girişinden itibaren pozitif genlik yaklaşık olarak iki katına çıkmıştır. Her dört durumda yanal momentum etkisiyle dış kıvrımda (Prob 2) pozitif genlik iç kıvrımdakinden (Prob 3) daha fazla olmaktadır. Burada 0.03 m'lere varan belirgin bir fark bulunmaktadır. Dört durumda negatif genlikte bir değişim görülmemiştir. Durgun sudaki profile göre her üç debi durumunda çukur periyodunda bir miktar azalma eğilimi görülmekle birlikte tepe periyodunda bir değişime rastlanılmamıştır. Prob 4 ve 5'in bulunduğu kesitte Q_2 ve Q_3 için dalgalı bore formu oluşumu artmıştır. Pozitif genlikler Prob 2 ve 3'ün bulunduğu kesite göre artmış fakat debinin değişimiyle anlamlı bir artış eğilimi görülmemiştir. Dört debi durumu için iç kıvrımda (Prob 4) pozitif genlik dış kıvrımdakinden (Prob 5) daha yüksek olmaktadır. Negatif genlikte ve tepe periyodunda ise yine bir değişim görülmemektedir. Fakat debinin artmasıyla bir miktar çukur periyodu azalmıştır. Prob 6 ve 7 için debinin artmasıyla negatif genlik ve çukur periyodu azalarak daha küçük bir dalga çukuru oluşmuştur. Pozitif genlik bir önceki kesite ve farklı debi durumlarına göre artmamıştır. Burada yine dış kıvrımda (Prob 7) pozitif genlikler iç kıvrıma (Prob 6) göre yine daha yüksek olmaktadır. Son olarak Prob 8 incelendiğinde dört debi durumu için pozitif genlik, negatif genlik ve periyotlar belirgin şekilde değişmemiştir.



Şekil 6.25 d=25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı debilere göre problardaki su yüzü değişimleri

6.2.3.2 Bore Gücü $\alpha=a^{+}/d=0.48$ olan N-dalga

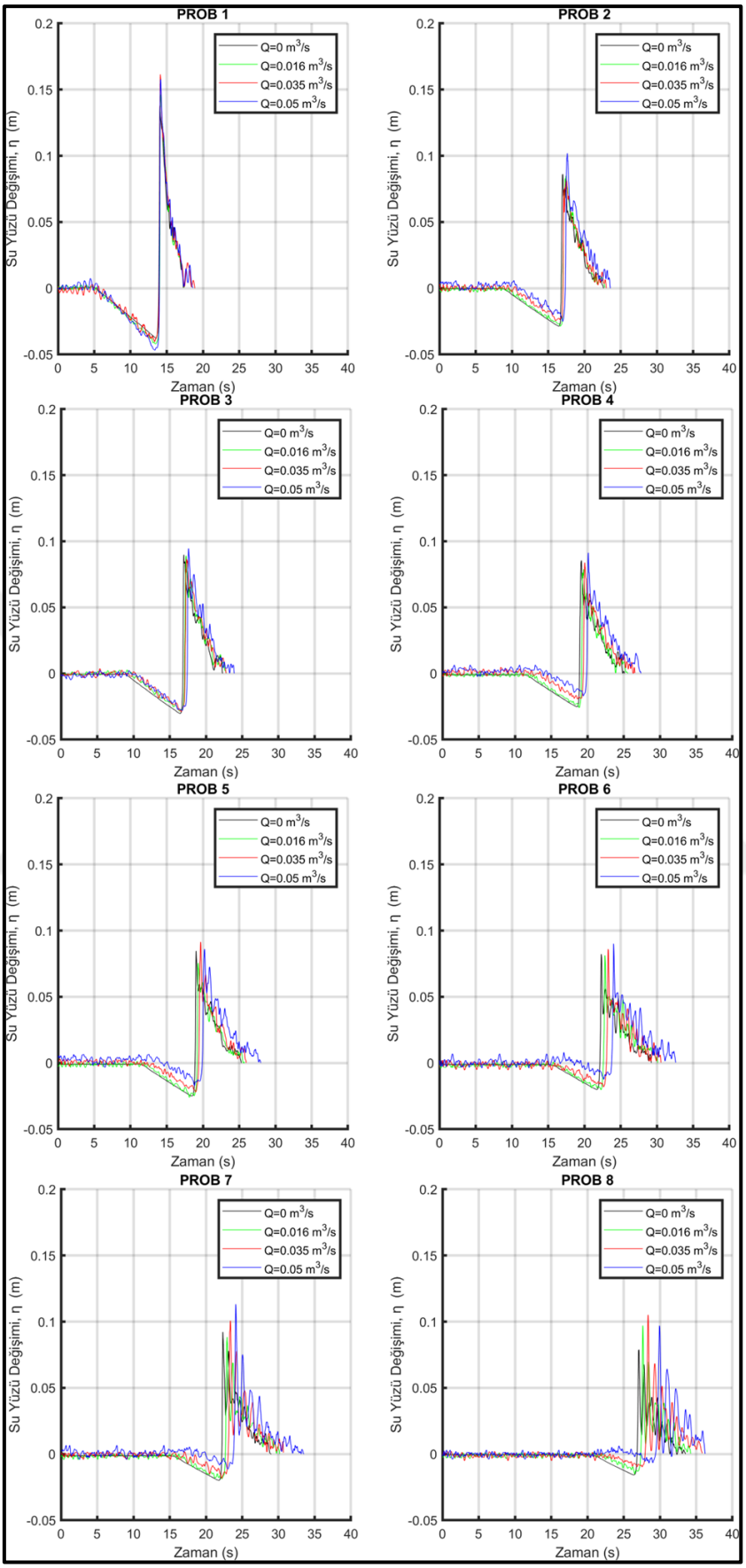
d=25 cm su derinliği ve $a^{+}/d= 0.48$ oranında farklı akım koşulları (Q_0=0 m^3/s, Q_1= 0.016 m^3/s, Q_2= 0.035 m^3/s, Q_3= 0.05 m^3/s) için elde edilen dalga profilleri her bir prob için sırasıyla Şekil 6.26'da verilmiştir. Prob 1'de her dört durum için dalga profilleri incelendiğinde Q_0 ile Q_1 debi durumları kıyaslandığında pozitif genlikte belirgin artış gözlemlenmemiş fakat Q_2 ve Q_3 debi durumlarında pozitif genlik artmaktadır. Fakat bu artış debi artısıyla aynı oranda olmamıştır. Negatif genlik ve periyotlar ise değişmeyerek dört durum için Prob 1 için yine aynı formda dalga profilleri gözlemlenmiştir. Prob 2 ve 3 için bulunduğu kesit incelendiğinde her dört durum için pozitif ve negatif genlikte değişim görülmemiştir. Benzer şekilde dış kıvrım ile iç kıvrım arasında pozitif genlik farkı da oluşmamaktadır. Her dört debi durumu için Prob 1 kesitine göre Prob 2 ve 3 kesitinde pozitif genlik bir miktar azalmıştır. Diğer dalga karakteristikleri için Prob 1 kesitine göre Prob 2 ve 3 kesitinde önemli bir değişim olmamıştır. Prob 2 ve 3 kesitinde her durumda düşen pozitif genliklerle beraber dalgalı bore formu oluşmaya başladığı görülmektedir. Prob 4 ve 5'in bulunduğu kesitte pozitif ve negatif genlikte hem bir önceki probların bulunduğu kesite göre hem de dört debi durumuna göre belirgin fark gözlemlenmemiştir. Bu kesitte Q_2 ve Q_3 debi durumlarında dalgalı bore sayısında artış görülmektedir. İç kıvrım ile dış kıvrım arasında pozitif genlik farkı burada da gözlemlenmemiştir. Öte yandan Prob 6 ve 7'nin bulunduğu kesitte durum değişmektedir. Dış kıvrım olan Prob 7'de iç kıvrıma göre pozitif genlik belirgin şekilde artmıştır. Fakat debinin değişmesiyle yanal momentum etkisinin artması arasında bir ilişki gözlemlenmemiştir. Her dört durum için de pozitif genlikler değişmemiş, Q_3 debi durumu için ise negatif genlik yine yarı yarıya azalmaktadır. Q_2 ve Q_3 debi durumları için çukur periyotları da azalarak dalga çukuru oluşumu yine küçülmektedir. Özellikle Prob 8 incelendiğinde bu durum açıkça görülmektedir. Her dört durum için Prob 8'de pozitif genlik ve tepe periyodu değişmemiştir. Prob 6,7 ve 8'de elde edilen profillerde özellikle debinin artmasıyla tsunami dalgasının ilerleyişinde dalgalı bore davranışının daha belirgin hal aldığı görülmektedir. Kısaca tsunami dalgası kıvrımlı kanal içerisine ilerlerken her dört debi durumunda kanala girdikten sonra kırılmaya uğramakta ve daha sonra kırılma etkisi sönümlenerek (pozitif genlikler ve bore gücü düşmesiyle) dalgalı bore formuna dönüşecek şekilde bir dalga katarı oluşturmaktadır.



Şekil 6.26 d=25 cm derinlikte ve a^+/d= 0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı debilere göre problardaki su yüzü değişimleri

6.2.3.3 Bore Gücü $\alpha=a^{+}/d=0.69$ olan N-dalga

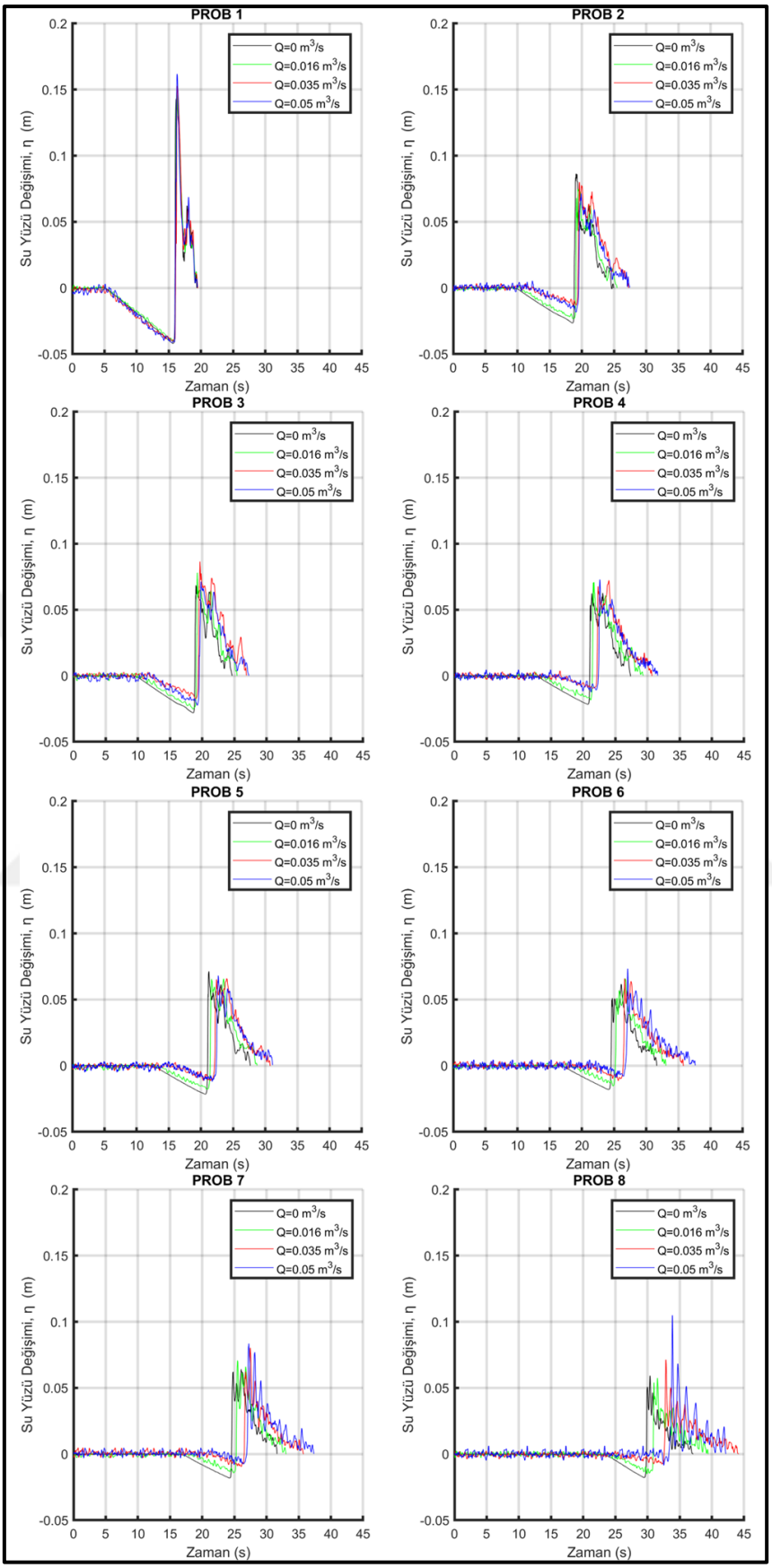
d=20 cm derinlikte ve $a^{+}/d= 0.69$ oranında farklı debilerdeki (Q_0=0 m^3/s, Q_1= 0.016 m^3/s, Q_2= 0.035 m^3/s, Q_3= 0.05 m^3/s) akım koşulları için elde edilen dalga profilleri her bir prob için sırasıyla Şekil 6.27'de verilmiştir. Dalganın kanala girdikten (Prob 1) sonra her dört debi durumunda da kırıldığı pozitif genliklerin azalmasıyla görülmektedir. Prob 1 için her dört debi durumunda su yüzü değişimleri benzer olup çukur ve tepe periyotları yaklaşık olarak aynı değerde olmaktadır. Debinin artmasıyla pozitif genlik yine artmaktadır. Q_2 ve Q_3 debileri için artış aynı oranda (%16) olmaktadır. Prob 2 ve 3 için dalga profilleri incelendiğinde Q_0 durumuna göre pozitif genlikte sadece Q_3 debi durumu için bir miktar artış görülmektedir. Dört debi durumu için dış kıvrım (Prob 2) ile iç kıvrım (Prob 3) arasında pozitif genlik farkı oldukça az olmaktadır. Negatif genlikte dört debi durumu için de değişim göstermemektedir. Yine sadece Q_3 debi durumu için diğer debi durumlarına göre çukur periyodunda azalma ve tepe periyodunda artış dikkat çekmektedir. Prob 4 ve 5'in bulunduğu kıvrımlar arası kesitte Q_3 için su yüzü değişimlerinde belirgin farklar meydana gelmiştir. Pozitif genlikte her dört debi durum için de değişim olmaz iken debinin artmasıyla negatif genlikler azalmaktadır. Prob 2 ve 3 kesitinde olduğu gibi sadece Q_3 debi durumu için çukur periyodunda azalma ve tepe periyodunda artış bulunmaktadır. Dört debi durumunda yanal momentum etkisi gözlemlenmemiş ve iç kıvrım ile dış kıvrım arasında pozitif genlik farkı oldukça düşük olmuştur. Prob 6 ve 7 için Q_2 ve Q_3 debi durumunda negatif genlik ve çukur periyodu azalmaktadır. Bu kesitte yine Q_3 debi durumunda tsunami dalgasında ciddi farklar gözlemlenmektedir. Özellikle Prob 8'de bu durum daha belirgin olarak görülmektedir. Prob 7'nin bulunduğu dış kıvrımda pozitif genlik Prob 6'nın bulunduğu iç kıvrıma göre daha yüksek olmaktadır. Bu fark debi artışıyla beraber daha yüksek olmaktadır. Sonuç olarak bu kesitte yanal momentum etkisinden bahsetmek mümkün olmaktadır. Prob 6,7 ve 8 incelendiğinde debinin artmasıyla beraber dalga tepesinin arkasında dalgalı bore form oluşumunun daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Her dört debi durumunda Prob 8 için azalan bore gücü değeriyle birlikte pozitif genlik miktarı da artmaktadır. Diğer bore gücüne sahip tsunami dalgalarında görüldüğü gibi debi miktarı arttıkça tsunami dalgası kanal içerisinde beklenildiği üzere daha yavaş ilerlemektedir. Bu durum özellikle Prob 6, 7 ve 8 için daha belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 6.27 d=20 cm derinlikte ve a^{+}/d= 0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı debilere göre problardaki su yüzü değişimleri

6.2.3.4 Bore Gücü $\alpha=a^{+}/d=0.95$ olan N-dalga

d=15 cm ve a^{+}/d= 0.95 için farklı debilerdeki (Q_0=0 m^3/s, Q_1= 0.016 m^3/s, Q_2= 0.035 m^3/s, Q_3= 0.05 m^3/s) akım koşulları için elde edilen dalga profilleri her bir prob için sırasıyla Şekil 6.28'de verilmiştir. Dalga tepesinin ardında meydana gelen hidrolik sıçrama olayı tüm akım koşullarında benzer şekilde gözlemlenmiştir. Kanal girişinde Prob 1 her dört debi durumunda tsunami dalgası benzer yapıdadır. Çukur ve tepe periyotları yaklaşık olarak aynı değerde olmakta ve negatif genlikte bir fark bulunmamaktadır. Öte yandan debinin artmasıyla pozitif genlik bir miktar artmaktadır. Prob 2 ve 3'ün bulunduğu kesit incelendiğinde Q_0 durumundaki profile göre pozitif genlikte azalma görülmektedir. Debinin artmasıyla ters orantılı bir azalma görülmemekle birlikte en yüksek debide (Q_3) maksimum azalma gözlemlenmiştir. Q_0 için yanal momentum etkisiyle dış kıvrımda (Prob 2) pozitif genlik iç kıvrımdakinden (Prob 3) daha yüksek olmaktadır. Fakat debinin artmasıyla beraber bu etki kaybolmuş iki probda pozitif genlik farkı oldukça azalmıştır. Negatif genlik için Q_2 ve Q_3 debi durumları için azalma görülmektedir. Çukur periyodunda debilerin artmasıyla birlikte bir azalma eğilimi görülmektedir. Tepe periyodunda ise Q_0 durumundaki profile göre artış bulunmaktadır. Ancak Q_1 ve Q_2 için kanal boyunca görülen artış, Q_3 için azalmıştır. Prob 4 ve 5'in bulunduğu kıvrımlar arası kesitinde Q_2 ve Q_3 debi durumları için bu değişim daha belirgin hale gelmektedir. Debinin artmasıyla çukur periyodu azalmaktadır. Benzer şekilde negatif genlik Q_2 ve Q_3 debi durumları için yarı yarıya azalmaktadır. Tsunami dalgası membaya doğru ilerledikçe diğer problarda bu etki daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Kanalda artan debi ile tsunami dalgasının ilerleyişi diğer bore gücündeki deney koşullarına göre daha yavaş olmaktadır. İç ile dış kıvrım arasındaki her dört debi durumu için pozitif genlik farkı oldukça az olmaktadır. Debinin artmasıyla çukur periyodu azalmakta ve tepe periyodu artmaktadır. Prob 6 ve 7'de debinin artmasıyla negatif genlik ve çukur periyodu azalarak oldukça küçük bir dalga çukuru görülmektedir. Pozitif genlik sadece Q_3 debi durumu için belirgin olarak artmıştır. Debinin artmasıyla dış kıvrım (Prob 7) ile iç kıvrım (Prob 6) arası pozitif genlik farkı artmaktadır. Prob 8 incelendiğinde debinin artmasıyla pozitif genlikte ciddi bir artış görülmektedir. Debinin artmasıyla negatif genlik ve çukur periyodu küçülerek Q_3 debi durumu için neredeyse dalga çukurunun oluşmadığı görülmektedir. Son üç probda dalgalanmalar görülmektedir.



Şekil 6.28 d=15 cm derinlikte ve a^+/d= 0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının farklı debilere göre problardaki su yüzü değişimleri

6.3 Tsunami Dalgasının İlerlemesi Esnasında Elde Edilen Akım Hızları

Tsunami dalgasının ilerlemesi ani değişen kararsız akım koşulu sınıfına girmektedir. Dolayısı ile kararsız akımlarda özellikle şiddetli türbülans karışımlarının oluştuğu durumlarda ADV ile hız ölçümlerini gerçekleştirmek oldukça zordur. Çünkü deneysel süreç oldukça fazla tekrar gerektirmekte ve zaman almaktadır. 5. Bölümde tartışıldığı gibi, açık kanallarda hız değişimleri ve türbülans uzun yıllar çalışılmıştır. Genellikle bu çalışmalar kararlı akımlar için gerçekleştirilmiştir. Kararsız ani değişen akımlarda ise araştırmalar oldukça sınırlıdır (Hornung vd., 1995; Koch ve Chanson, 2009; Leng ve Chanson, 2017).

Bu kapsamda ilk olarak d=20 cm derinliğinde kanalda akımın olmadığı durgun su koşullarında (Q_0=0 m^3/s) ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip dalganın ilerlemesi sırasında gerçekleştirilen hız ölçümleri Şekil 6.29b'de verilen ölçüm konumlarında gerçekleştirilmiştir. Burada tsunami dalgası mansaptan membaya doğru ilerlemektedir. Bu nedenle kararlı akım koşullarından farklı olarak kanalın mansabında yani tsunami dalgasının kanala girdiği giriş kesitinde (MANSAP-5) de ölçüm yapılmıştır. Kıvrımlı kanalda kararlı akım koşullarının incelenmesinde kullanılan 1.kesit (1A, 1B ve 1C) için burada ölçüm gerçekleştirilmemiştir. Çünkü bu kesitte su yüzü değişimi ölçümü yapılmamıştır. Ayrıca farklı akım koşullarında (Q_0=0 m^3/s, Q_1= 0.016 m^3/s, Q_2= 0.035 m^3/s, Q_3= 0.05 m^3/s) tsunami dalgasının ilerlemesinin incelenmesi için MEMBA-1 konumunda membadan mansaba kıvrımlı kanalda akım olması durumu için de ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu kesitin seçilmesinin temel sebebi su yüzü değişimlerinde tartışıldığı üzere farklı debilerde tsunami ilerleme hızı en belirgin bu konumda görülebilmektedir.

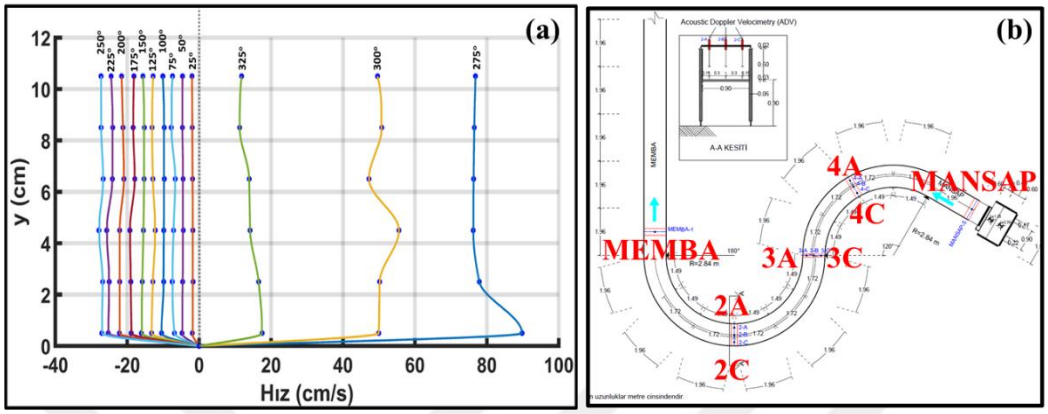
Ani değişen kararsız akımların doğası gereği hız ölçümleri hız-zaman serisi olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla ADV ile ölçümler tsunami dalgasının kanala girişten itibaren kıvrımlı kanalı geçene kadar devam ettirilmiştir. Benzer sebeple hız-zaman serisi içerisinde eksik veri sayısını azaltmak için ADV ölçüm kriterleri çerçevesinde veriler içerisinde %70 ve üzeri korelasyona sahip veriler dikkate alınmıştır. ADV ölçüm kriterlerine göre %70 ve üzeri korelasyona sahip olan veriler yüksek kaliteli veri olarak kabul edilmektedir (Nortek AS, 2018). Ayrıca d=20 cm derinliğinde a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının kanala girişten itibaren kırılmaya

uğraması dolayısıyla oluşan köpüklenme ve dolayısıyla hava kabarcıkları ADV ölçümlerinde korelasyonu düşürebilmektedir. Diğer bir ifadeyle dalganın kırılarak köpüklenmesi ise ADV ile yapılan ölçümleri zorlaştırmaktadır. Bölüm 3'te bahsedildiği üzere 20 cm derinlik için 7 farklı noktada (y=0.5, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5, 10.5, 12.5 cm) ölçüm gerçekleştirilmektedir. Fakat 7. noktada (y=12.5 cm) tsunami dalgasının çekilme esnasında oluşturduğu çukurdan dolayı ADV probu açıkta kalmaktadır. Dolayısıyla bu noktada ölçüm almak mümkün olmamaktadır. Sonuç olarak burada 20 cm derinlik için sadece 6 noktada (y=0.5, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5, 10.5 cm) alınan ölçümler dikkate alınmıştır.

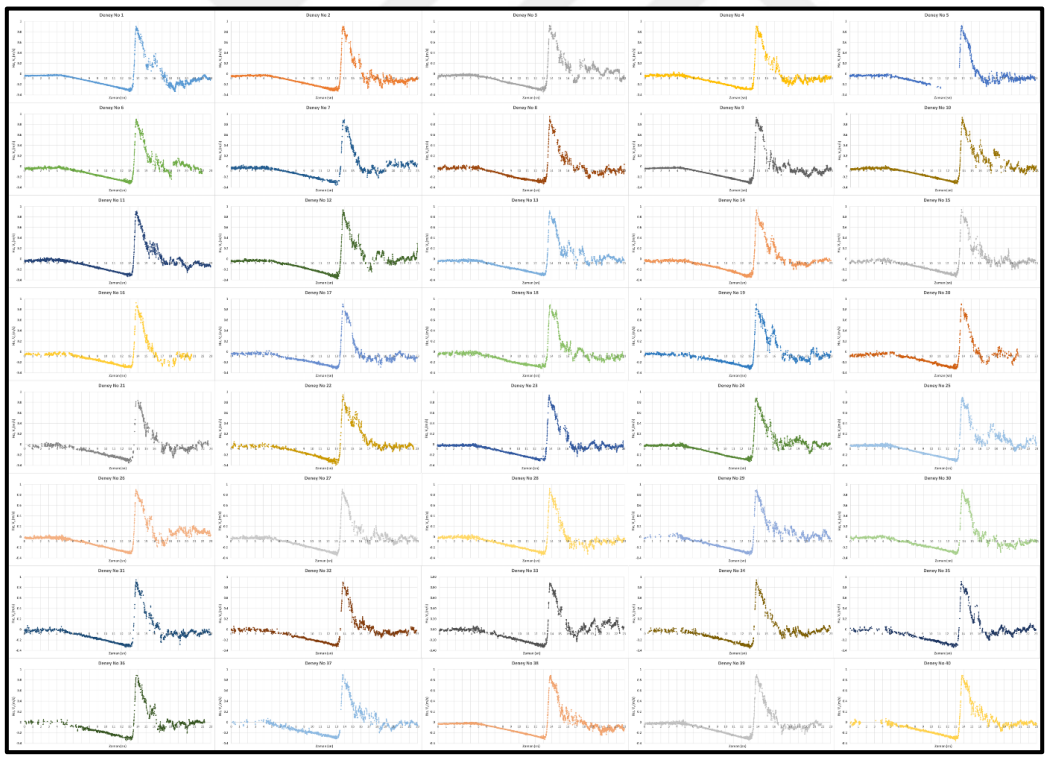
Böyle akım şartlarında türbülans niceliklerinin ve faz ortalamalı akım hızı dağılımlarının doğru belirlenebilmesi için topluluk/grup ortalamasının (ensemble averaging) belirlenmesi gerekmektedir. Zamansal ortalama akımın doğası gereği türbülans ayrışımı için kullanılamamaktadır. Leng ve Chanson (2017), bore ve pozitif kabarmalar (surge) için gerçekleştirdikleri kararsız hız ölçümleri çalışmasında, hız profillerini belirleyebilmek için 5 ile 50 arasında deney tekrarı gerçekleştirmişler ve 25 tekrarın ani değişen kararsız akımlarda topluluk/grup ortalaması (ensemble-averaging) için yeterli olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmada ise kanal girişindeki kesitte (MANSAP-5) her noktada (6 farklı nokta) 40 adet ölçüm tekrarlanmıştır. Böylece mansapta toplam 240 deney gerçekleştirilmiştir. Su yüzü değişimleri bölümünde tekrarlanabilirlik testleri bölümünde tsunami üretecinin aynı dalgaları üretebildiği ifade edilmiştir. Şekil 6.30'da tsunami dalgasının zamansal hız değişimlerinin belirlenmesi için mansap kesitinde y=0.5 cm derinlikte elde edilen 40 adet ölçüm verisi örnek olarak verilmektedir.

Tekrarlanan bu ölçümlerin topluluk/grup ortalaması (ensemble averaging) hesaplanmış ve Şekil 6.31'de $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip tsunami dalgasına ait topluluk/grup ortalamalı boyuna hız-zaman serileri verilmiştir. Dalga sınır tabakalarında kullanılan topluluk/grup ortalaması tekniğinin (Jensen vd., 1989; Sumer vd., 2010) tüm akım alanında uygulanması pratik sınırlar dahilinde olmamaktadır (Gargari vd., 2021). Bu nedenle ölçümlerin 40 defa tekrarlanarak topluluk/grup ortalamasının alınması sadece kanal girişindeki ölçümlerde uygulanabilmiştir. Kanal boyunca yapılan diğer ölçümlerde şu an için sadece birer kez ölçüm alınmıştır. Ancak eksik veri sayısının fazla olduğu ölçümlerde en iyi

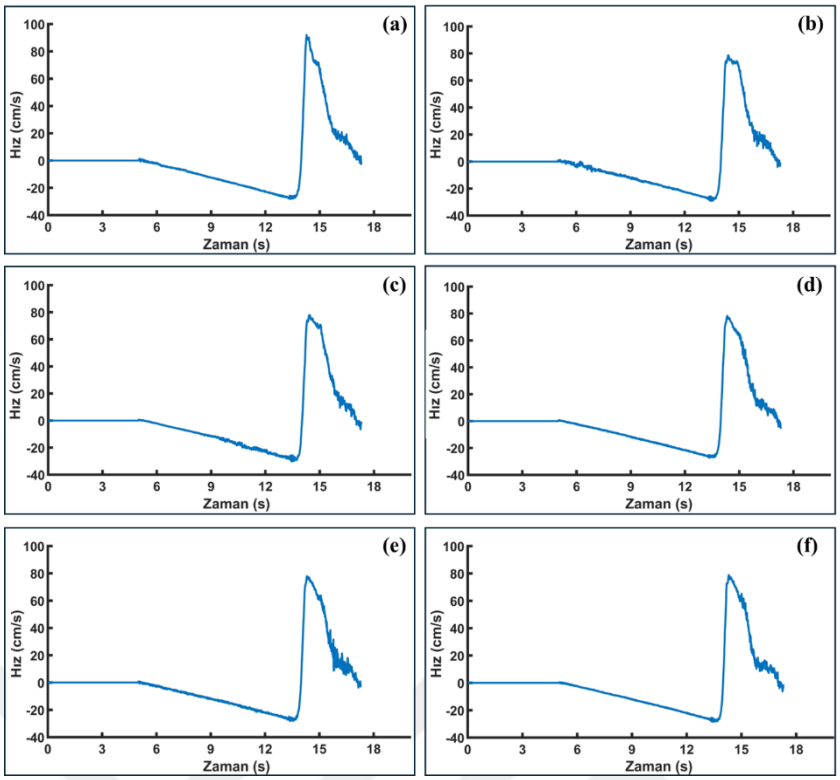
sonucu elde etmek amacı ile ölçümler birkaç defa tekrarlanmıştır. Şekil 6.29a'da bir dalga periyodu boyunca MANSAP-5 kesitinde hızın değişimi verilmiştir. Burada dalga periyodu 3600 bölünerek her 250 için derinlik boyunca hız profilinin değişimi verilmiştir.



Şekil 6.29 (a) a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın topluluk/grup ortalamalı derinlik boyunca hız profilinin dalga periyodu boyunca değişimi ve (b) tsunami dalgasının yayılımı esnasındaki hız ölçüm konumları



Şekil 6.30 a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MANSAP-5 konumu, y=0.5 cm)



Şekil 6.31 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MANSAP-5 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)

Kıvrımlı kanalda diğer ölçüm konumlarındaki tsunami dalgası boyuna hız-zaman serileri dalganın ilerleyiş yönünde sırasıyla Şekil 6.32 ve Şekil 6.41 arasında verilmektedir. Burada sadece elde edilen zaman serileri verilmiş ve ön incelemeler yapılmıştır. Bu veriler sayısal modelin doğrulanması için kullanılması amaçlanmıştır. Bu sebeple Bölüm 6.5'te hız-zaman serilerindeki eksik veriler ileri interpolasyon teknikleri ile tamamlanmış ve Reynolds ayrışımı için Savitsky-Golay tipinde filtreleme uygulanmıştır (Savitzky ve Golay, 1964; Schafer, 2011).

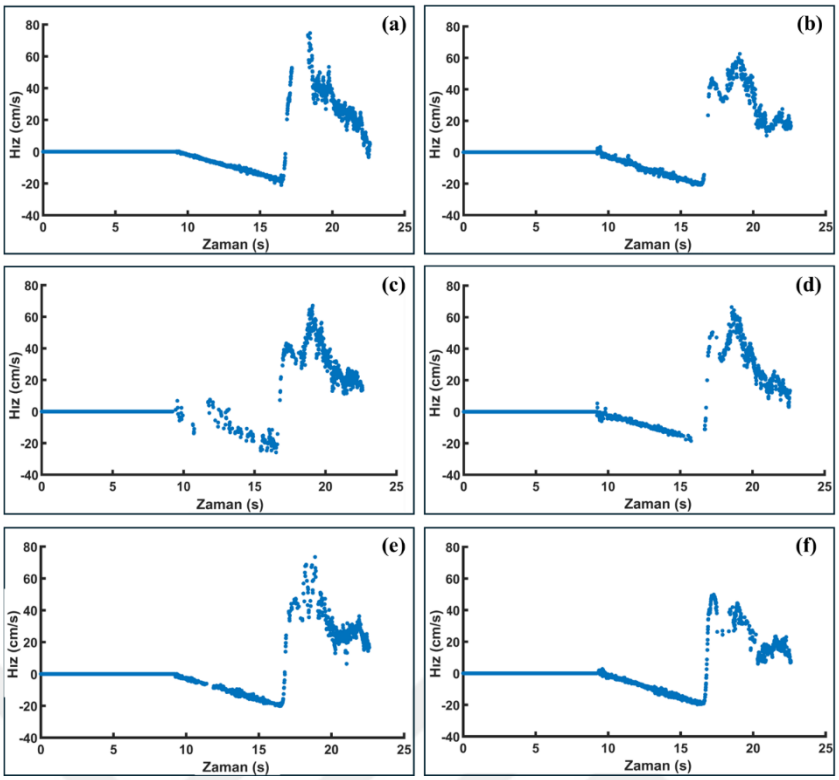
İlk olarak 4. kesitte, dalganın ilk kıvrıma girişiyle beraber kırılarak aşırı köpüklenmesinden dolayı bir takım ölçüm zorlukları yaşanmıştır. Ölçümlerin tekrarlanmasına rağmen Şekil 6.32, 6.33 ve 6.34'te görüldüğü üzere eksik veri bulunmaktadır. Özellikle sınır tabakası ve çekirdek bölge sınırı olan y=2.5 cm, y=4.5 cm ve y=6.5 cm (sadece dış kıvrımda (4A)) derinliklerinde bu durum daha belirgin olmaktadır. Bu bölgede köpüklenme ile türbülans daha fazla hissedilmekte ve ölçüm zorlukları yaşanmaktadır. Tsunami dalgasının kanala girdiği MANSAP-5 konumundaki maksimum hız dalga 4. kesite ilerlediğinde her derinlik için yaklaşık %40 oranında azalmaktadır. Bunun temel nedeni dalganın bu iki kesit

arasında kırılmaya uğramasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca dalga kreti yapısını korumaya çalıştığından dolayı dış kıvrımda (4A) hız iç kıvrımdan (4C) daha yüksek olmaktadır. Çünkü iç kıvrımdaki eğrilik yarıçapı dış kıvrımındakinden daha az olmaktadır. Bu bölgede, hız-zaman serilerinden de anlaşılabileceği gibi, kırılmanın etkisi daha belirgin olmaktadır. Bu durum da ADV sensörlerinde özellikle 4A konumu için fazladan veri kaybına sebep olmaktadır (y=2.5, 4.5, 6.5 cm için).

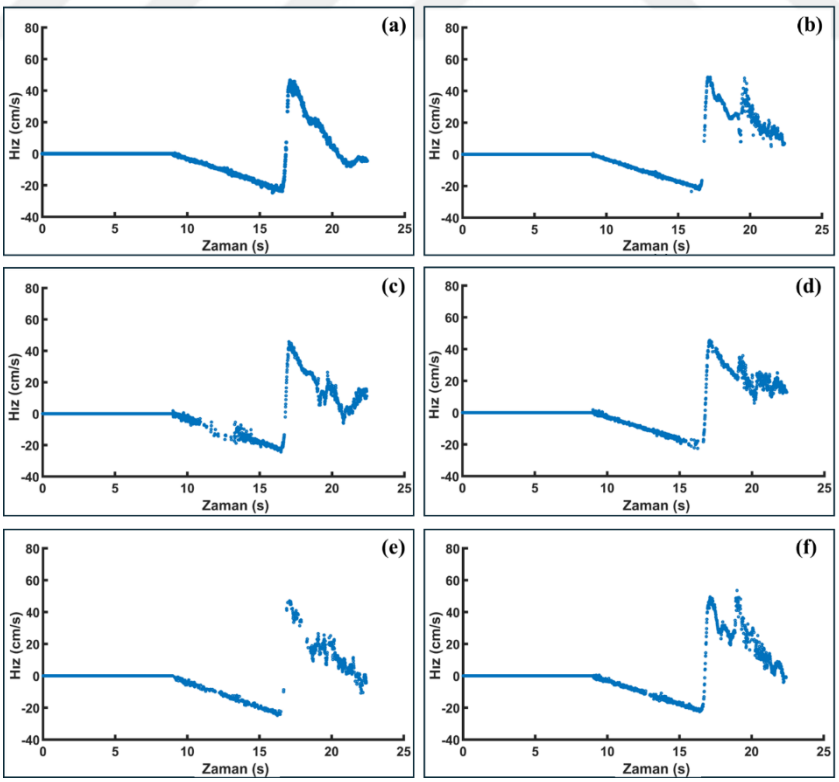
3. kesitte dalganın kırılma etkisinin ve köpüklenmenin azalmasıyla daha az veri kaybına uğramış zaman serileri elde edilmektedir. 3A ve 3B konumları için tabanda (y=0.5 cm) ölçüm zorluğu yaşanırken 3C konumunda daha kaliteli veri alınabilmiştir. 3. kesitte 4. kesite göre dalga tepesinde ölçülen maksimum hızda ciddi bir azalma olmadığı ve dalga çukurunda ölçülen minimum hızın hem mansaba hem de 4. kesite göre aynı kaldığı görülmektedir (Şekil 6.35, 6.36 ve 6.37).

Tsunami dalgası 2. kesite ilerlediğinde 3. kesite göre herhangi bir farklılığın oluşmadığı görülmektedir (Şekil 6.38, 6.39 ve 6.40). Bu durum memba için de devam etmektedir (Şekil 6.41). Ayrıca 2. kesitte ve membada diğer konumlara göre daha az ölçüm zorlukları yaşanmıştır. Fakat her ölçüm konumu için y=4.5 cm derinliğinde dalga çekilmesi durumunda (dalga çukurunda) hız ölçümünde problemler yaşanmakta ve eksik veriler bulunmaktadır. Bu derinlik için her ölçüm konumunda sistematik bir deneysel ölçüm hatasından söz etmek mümkün olmaktadır. Tsunami dalgası ilk kıvrımı (4. kesit) geçtikten sonra hız-zaman serilerinde (dalga tepesi ve dalga çukuru için) belirgin bir değişim görülmemektedir.

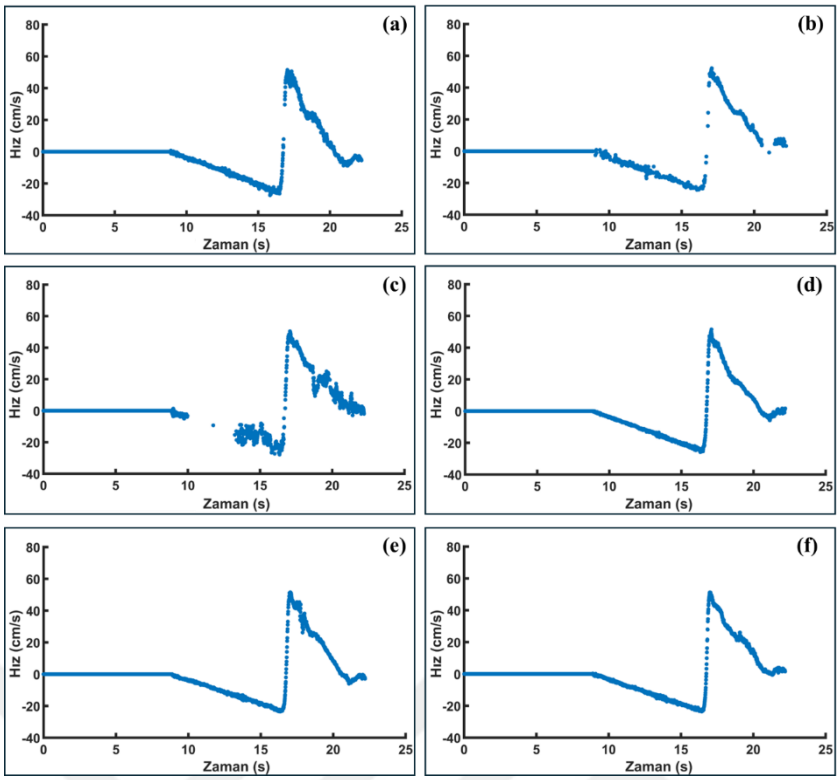
Şekil 6.41'de sırasıyla Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 debi durumları için MEMBA-1 kesitinde elde edilen tsunami dalgası hız-zaman serilerinin değişimleri verilmektedir. Tsunami dalgasının ilerleyişinin zıt yönünde akım mevcut olduğunda özellikle Q_2 ve Q_3 debileri için dalga tepesinde ölçülen hız değerleri beklenildiği gibi azalmaktadır. Su yüzü değişimlerinde görüldüğü gibi burada da özellikle Q_3 debisi için belirgin bir dalga çukurundan (çekilme hızından) söz etmek mümkün değildir. Farklı debiler için a^+/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın su seviyeleri değişimi incelendiğinde, debi miktarı arttıkça dalganın kıvrımlı kanalda ilerledikçe Prob 1'den Prob 8'e doğru varış süresinin giderek artmakta olduğu belirtilmiştir. Diğer bir ifadeyle tsunami dalgasının ilerleme hızı düşmektedir. Aynı durum hız ölçümlerinde de gözlemlenmiştir.



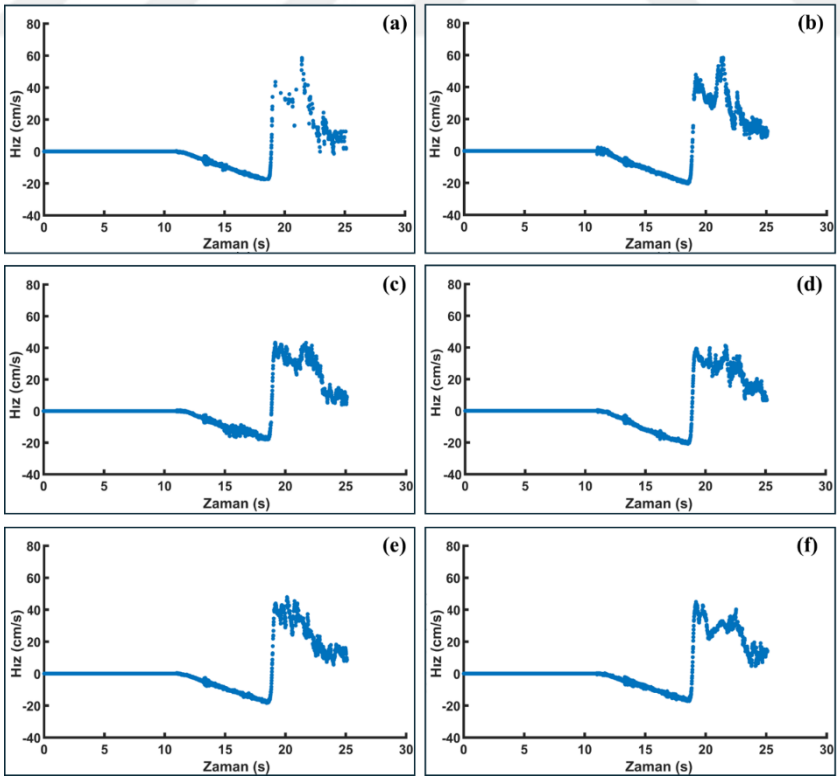
Şekil 6.32 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



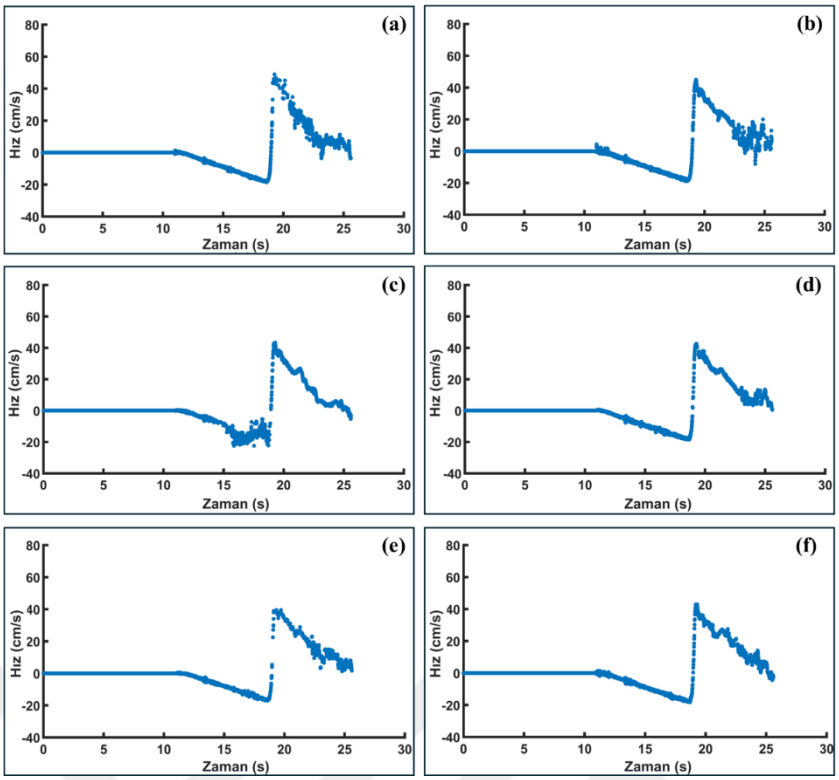
Şekil 6.33 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



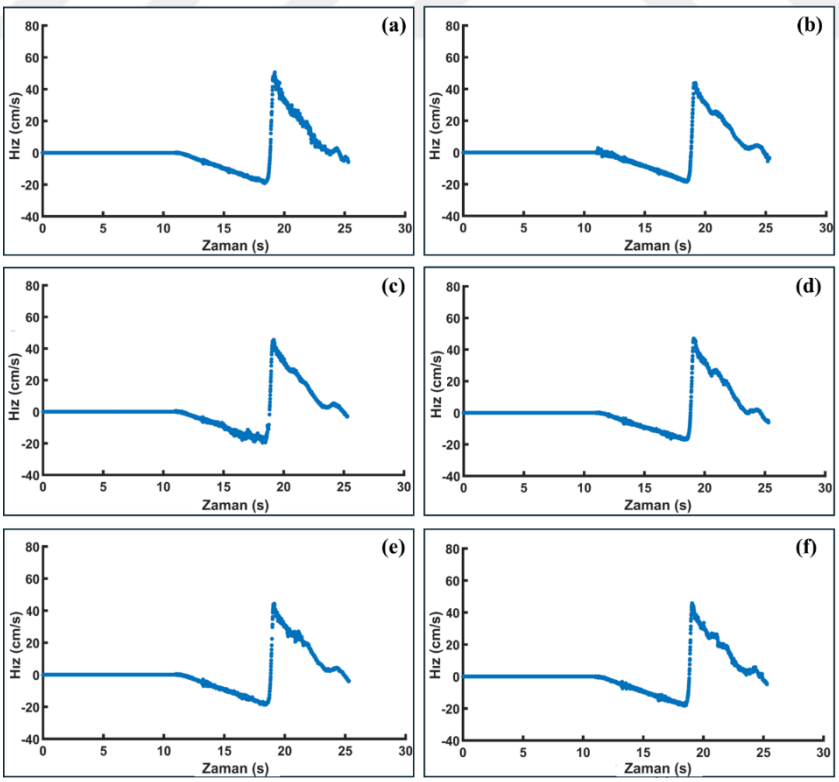
Şekil 6.34 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



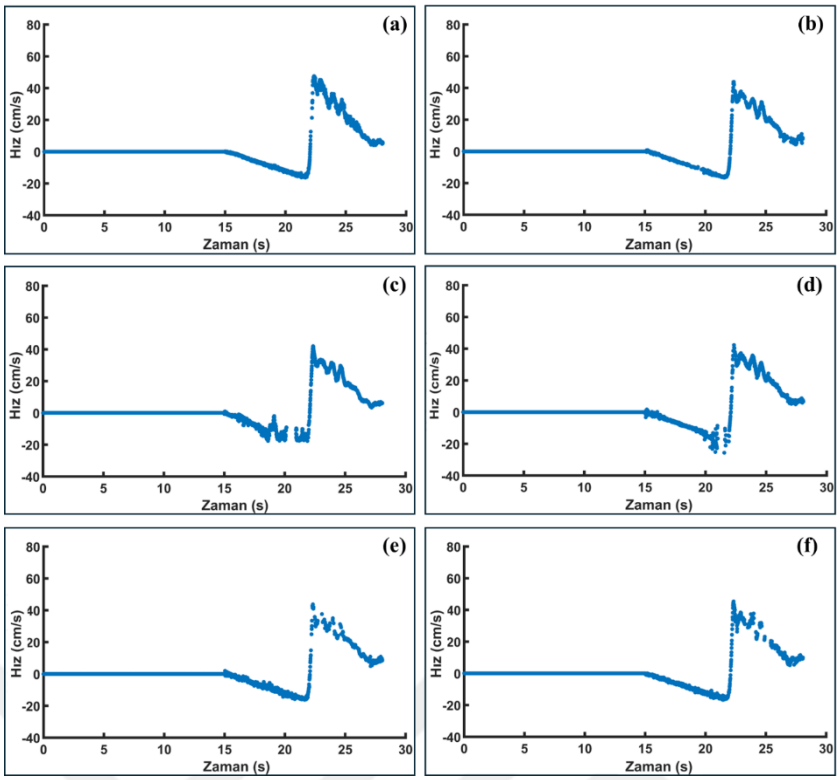
Şekil 6.35 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



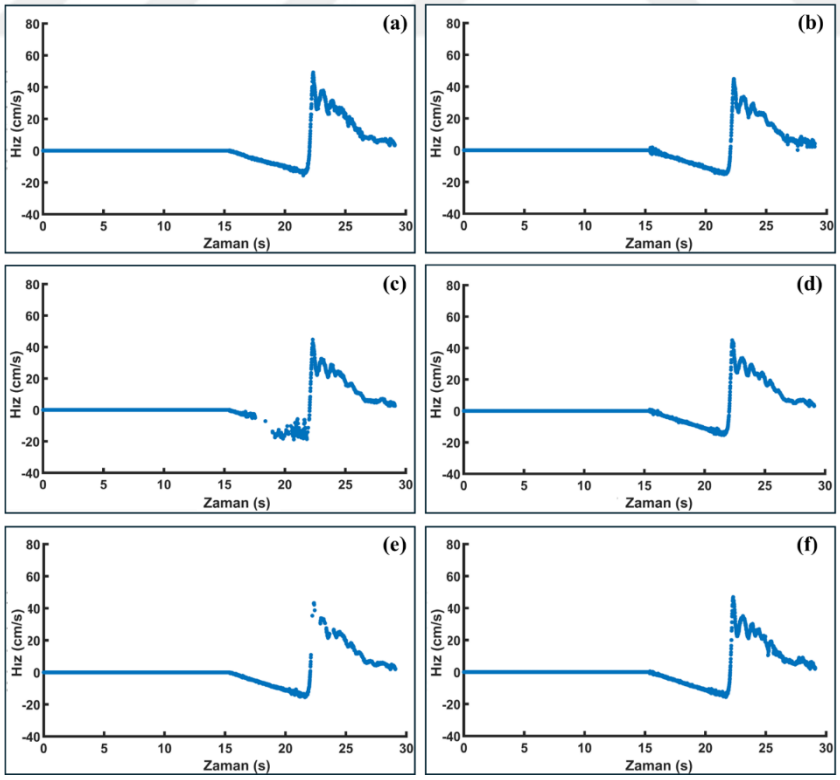
Şekil 6.36 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



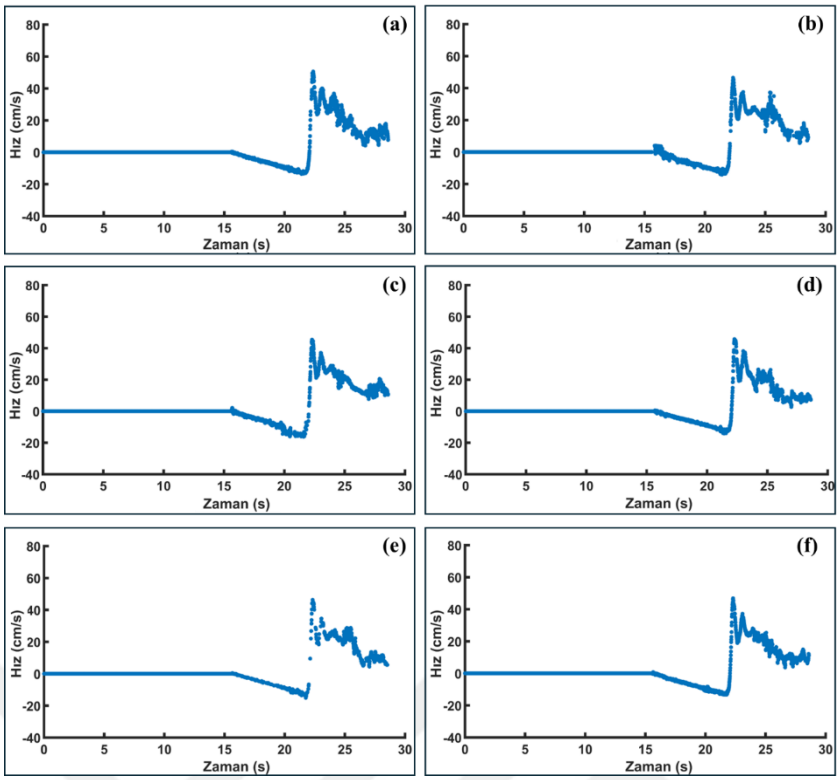
Şekil 6.37 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



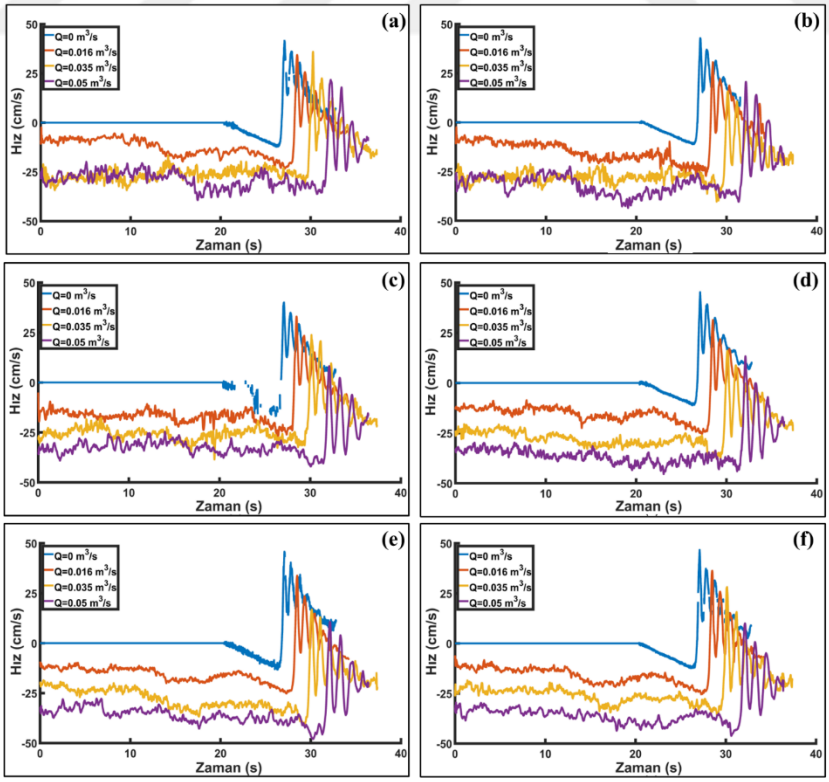
Şekil 6.38 $a^{+}/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



Şekil 6.39 $a^{+}/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



Şekil 6.40 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



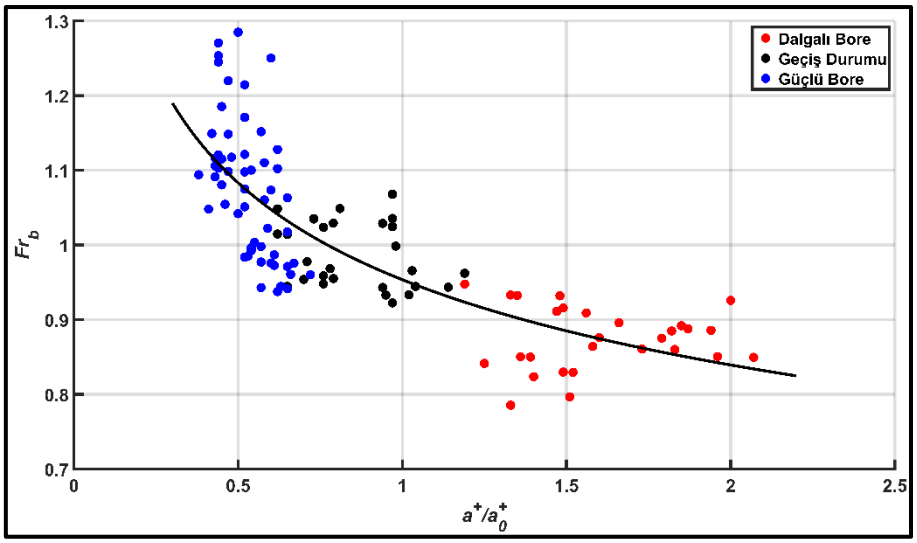
Şekil 6.41 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MEMBA-1 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)

6.4 Froude Sayısının Değişimi

Bu bölümde tsunami dalgasının ilerlemesi esnasında kıvrımlı kanal boyunca Froude sayısının değişimi verilmiştir. Bir boyutsuz büyüklük olan Froude sayısına karşı pozitif genlikler boyutsuzlaştırılarak kullanılmıştır. Bu sebeple kıvrımlı kanal boyunca ölçüm problarında ölçülen pozitif genlik değerleri, bu tez çalışmasında kullanılan dört farklı bore gücündeki (a^+/d=0.24, 0.48, 0.69 ve 0.95) tsunami dalgasının kıvrımlı kanal girişindeki pozitif genlik değerlerine (a_0^+) bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır.

Bore Froude sayısı (Fr_b), Denklem 6.1'de verildiği şekilde hesaplanmıştır. Burada, U_d derinlik boyunca ortalama hız (Bölüm 5'te kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizmasının incelenmesinden elde edilen) ve c_{exp} tsunami dalga hızı (su yüzü değişimlerinin incelenmesinde problar arasındaki mesafeler kullanılarak hesaplanan), d su derinliği, a^+ pozitif genlik ve g yerçekimi ivmesi olarak tanımlanmıştır. Şekil 6.42'de boyutsuz olarak kıvrımlı kanal boyunca Froude sayısının değişimi verilmiştir. Her farklı a^+/a_0^+ oranları için elde edilen Froude sayıları değerleri dalgalı bore, geçiş durumu ve güçlü bore olarak sınıflandırılabilmektedir.

$$Fr_b = \frac{c_{\exp} \pm U_d}{\sqrt{g\left(d + a^+\right)}} \tag{6.1}$$



Şekil 6.42 Kıvrımlı kanal boyunca değişen tsunami dalgasının pozitif genliğinin kanal girişindeki pozitif genliğine oranına göre bore Froude sayısının değişimi

Şekil 6.42'de, Fr_b 0.75 ile 1.35 arasında değişmektedir. Fr_b<0.95 olduğu durumda dalgalı bore ve Fr_b>0.95 durumunda ise güçlü bore görülmektedir. Fr_b<0.85 için dalgalı bore formunda iç kıvrımlarda yapılan ölçümlerde ve Fr_b<1.2 için güçlü bore formunda dış kıvrımlarda yapılan ölçümlerde gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışmasında kıvrımlı kanalda tsunami dalgasının ilerlemesi esnasında kıvrım etkilerinin gözlemlendiği bore Froude sayısına göre yeni bir sınıflandırma elde edilmiştir.

6.5 Kıvrımlı Kanalda Tsunami Dalgasının İlerlemesinin Sayısal Olarak Modellenmesi

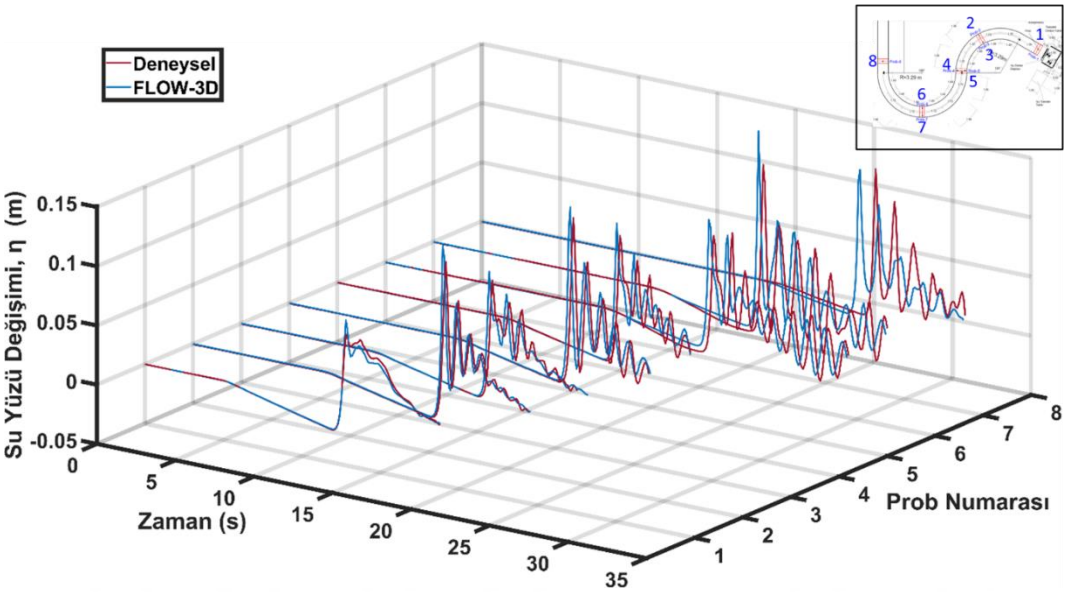
Bu bölümde, tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi FLOW-3D aracılığıyla oluşturulan sayısal model ile incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen su seviyesi değişimleri ve tsunami dalgası yayılımı esnasında elde edilen akım hızlarına ait sonuçlar önceki bölümlerde tartışılmıştır. Burada ise bu deneysel veriler aracılığıyla 1:1 ölçekte oluşturulan sayısal modelin hata metrikleri kullanılarak niceliksel ve niteliksel doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

6.5.1 Su Yüzü Değişimlerinin Sayısal Model ile İncelenmesi

6.5.1.1 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.24$ olan N-dalga

d=25 cm derinlikte, $a^+/d=0.24$ oranında ve $Q_0=0$ m^3/s akım koşulları (statik hal) altında oluşturulan tsunami dalgası ve kanal boyunca profilin değişimine ait sayısal model ile deneysel model sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.43'te verilmektedir. FLOW-3D ile oluşturulan sayısal model kanal girişinde Prob 1 kesitinde tsunami dalgasına ait su yüzü değişimlerini tahmin etmekte oldukça başarılı olmakta fakat pozitif genliği %20 daha yüksek tahmin etmektedir (Tablo 6.17). Bu deney koşulu için kanal boyunca profilin değişimi incelendiğinde deneysel model ile sayısal model arasında belirli miktar faz farkı meydana gelmektedir. Özellikle 180^o açılı kıvrımdan sonra belirgin faz farkları oluşmaktadır. Dalga karakteristikleri diğer bir ifadeyle dalga çukuru, periyodu, dalga tepesi ile ardıl dalgalar incelendiğinde FLOW-3D'in oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca sayısal model kanal boyunca ilerledikçe iç ile dış kıvrım arasında meydana gelen pozitif genlik farkını da hesaplamada oldukça başarılı olmaktadır. Fakat arada oluşan faz farkından dolayı NRMSE hata ölçümü kanal boyunca dalga ilerledikçe artmaktadır. Tüm

model için NRMSE %10 gibi bir ortalama ile kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca her probda hata miktarı kabul edilebilir sınırlarda bulunmaktadır. Öte yandan pozitif genlikler dikkate alındığında, MAX hata ölçümü ortalama %11.4 gibi bir hata oranı ile hata sınırını bir miktar geçmektedir. Prob 3, 6 ve 8 dışında her yerde FLOW-3D daha yüksek tahminlerde bulunmuştur. Kanal boyunca bütün iç kıvrımlarda daha başarılı tahminler yaptığı görülmektedir.

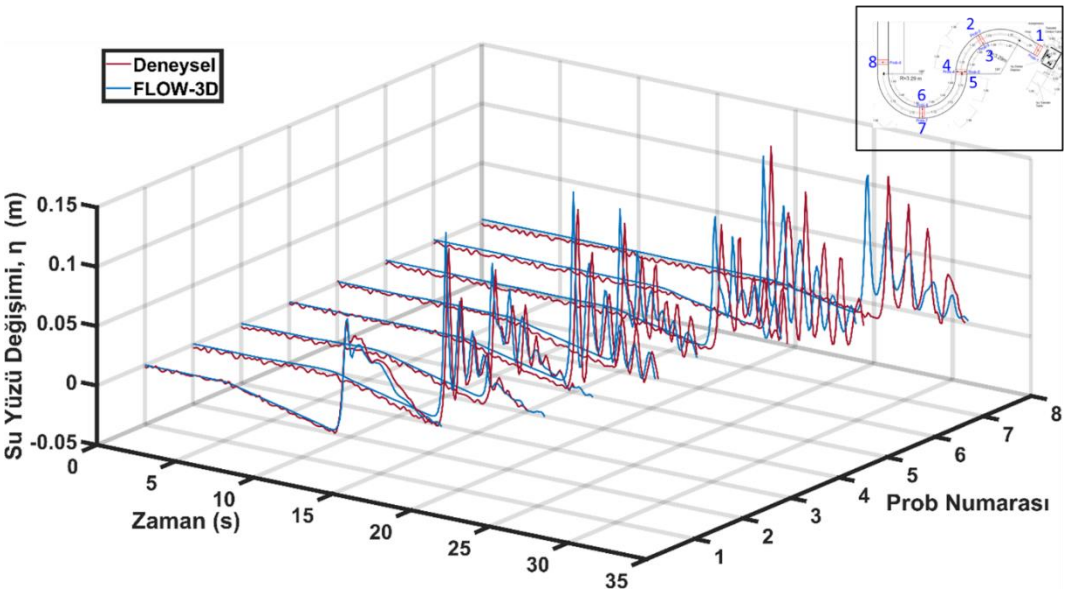


Şekil 6.43 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.17 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	2.85	19.91
2	7.41	11.63
3	7.95	8.37
4	10.85	6.99
5	10.06	10.96
6	13.82	8.11
7	14.02	22.41
8	13.11	2.77
Ort. :	10.01	11.40

d=25 cm derinlikte, $a^+/d=0.24$ oranında ve $Q_1=0.016$ m^3/s akım koşulları altında oluşturulan tsunami dalgası ve kanal boyunca profilin değişimine ait sayısal model ile deneysel model sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.44'te verilmektedir. FLOW-3D ile oluşturulan sayısal model kanal girişinde Prob 1 kesitinde tsunami dalgasına ait karakteristikleri ve pozitif genliği tahmin etmekte oldukça başarı göstermektedir (Tablo 6.18). Bu deney koşulu için kanal boyunca profilin değişimi incelendiğinde deneysel model ile sayısal model arasında yine belirli miktar faz farkları meydana gelmektedir. Özellikle 180º açılı kıvrımdan sonra belirgin faz farkları oluşmaktadır. Dalga karakteristikleri incelendiğinde FLOW-3D'in kanal boyunca dalga ilerlemesini benzeştirmede oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca dalga kanal boyunca ilerledikçe iç ile dış kıvrım arasında meydana gelen pozitif genlik farkını da oldukça yaklaşık hesaplamaktadır. Fakat arada oluşan faz farkından dolayı NRMSE hata metriği membaya doğru artmaktadır. NRMSE açısından ele alındığında model sonuçlarının, Prob 7 dışında her probda ve tüm model için %11.29 ortalama hata ile kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olduğu görülmektedir. Pozitif genlikler dikkate alındığında, MAX hata metriği ortalama olarak %7.8 hata oranı ile yine kabul edilebilir hata sınırının altında yer almaktadır. Prob 2 ile 4 için sınırda ve Prob 5 için sınırın biraz üzerinde hata hesaplanmaktadır. Prob 7 dışında her yerde FLOW-3D daha yüksek tahminlerde bulunmuştur. Ayrıca, aynı bore gücündeki dalganın statik haldeki (karşı yönden akıntı gelmemesi) durumuna göre pozitif genliği tahmin etmede daha fazla başarı göstermektedir. Hem NRMSE hem de MAX hata metrikleri dikkate alındığında sayısal modelin başarılı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



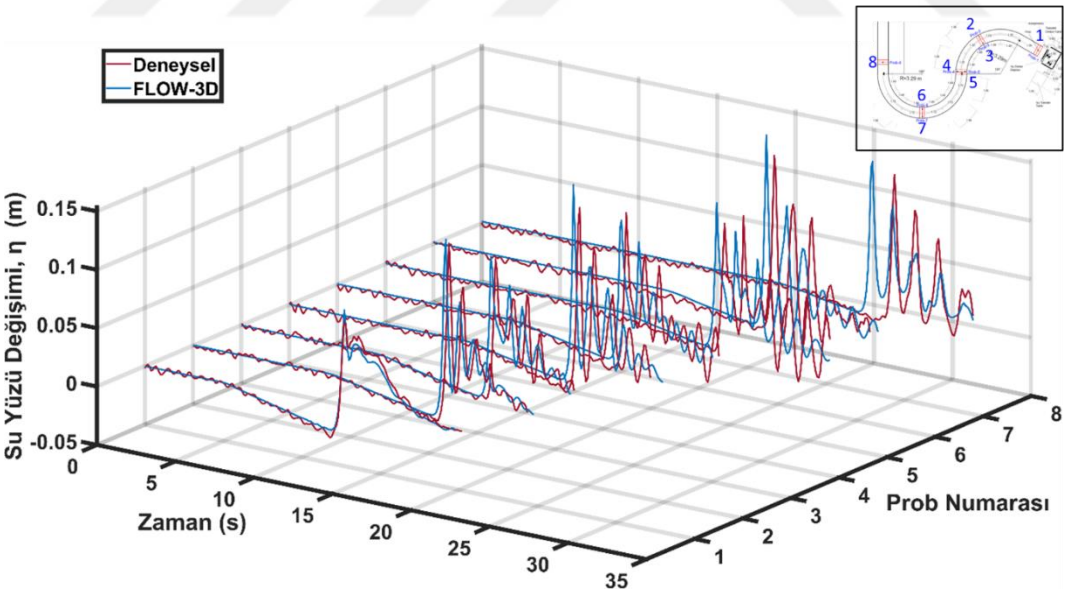
Şekil 6.44 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.18 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	3.70	4.42
2	8.29	10.44
3	9.71	5.53
4	12.34	10.66
5	12.07	11.26
6	14.88	6.04
7	16.98	6.81
8	12.34	2.25
Ort. :	11.29	7.18

d=25 cm derinlik, a^+/d=0.24 oranı ve Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında oluşturulan tsunami dalgasının kanal boyunca su yüzü değişimine ait sayısal model ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.45'te gösterilmektedir. FLOW-3D ile oluşturulan sayısal model, kanal girişindeki Prob 1 kesitinde su yüzü değişimlerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar vermektedir (Tablo 6.19). Fakat sayısal model pozitif genliği yaklaşık %12 daha büyük tahmin etmiştir. Bu deney koşulu için kanal boyunca profilin değişimi incelendiğinde deneysel model ile sayısal model arasında yine belirli miktar faz farkı meydana gelmektedir.

Özellikle 180^{o} açılı kıvrımdan sonra belirgin faz farkları oluşmaktadır. Dalga karakteristikleri incelendiğinde FLOW-3D'in oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca sayısal model kanal boyunca ilerledikçe iç ile dış kıvrım arasında meydana gelen pozitif genlik farkını hesaplamada oldukça başarılı olmaktadır. Arada oluşan faz farkından dolayı NRMSE hata miktarı artabilmekte fakat önceki deney koşullarından farklı olarak kanal boyunca ilerledikçe belirli bir eğilimle artmamaktadır. NRMSE'nin, yine Prob 7 dışında her probda ve tüm model için %12.3 ortalama hata ile kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olduğu görülmektedir. Pozitif genlikler dikkate alındığında, MAX hata metriği ortalama olarak %7.4 hata oranı ile yine kabul edilebilir hata sınırları içerisinde yer almaktadır. Prob 1, 4 ve 7 için sınırın biraz üzerinde hata hesaplanmıştır. Prob 6 dışında her yerde FLOW-3D daha yüksek tahminlerde bulunmuştur. Ayrıca, aynı bore gücündeki tsunami dalgasının statik haldeki durumuna göre pozitif genliği tahmin etmede daha fazla başarı ve Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları ile aynı başarıyı gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak, NRMSE ve MAX hata metrikleri dikkate alındığında sayısal modelin bu koşulu da başarılı bir şekilde benzeştirdiği belirlenmiştir.

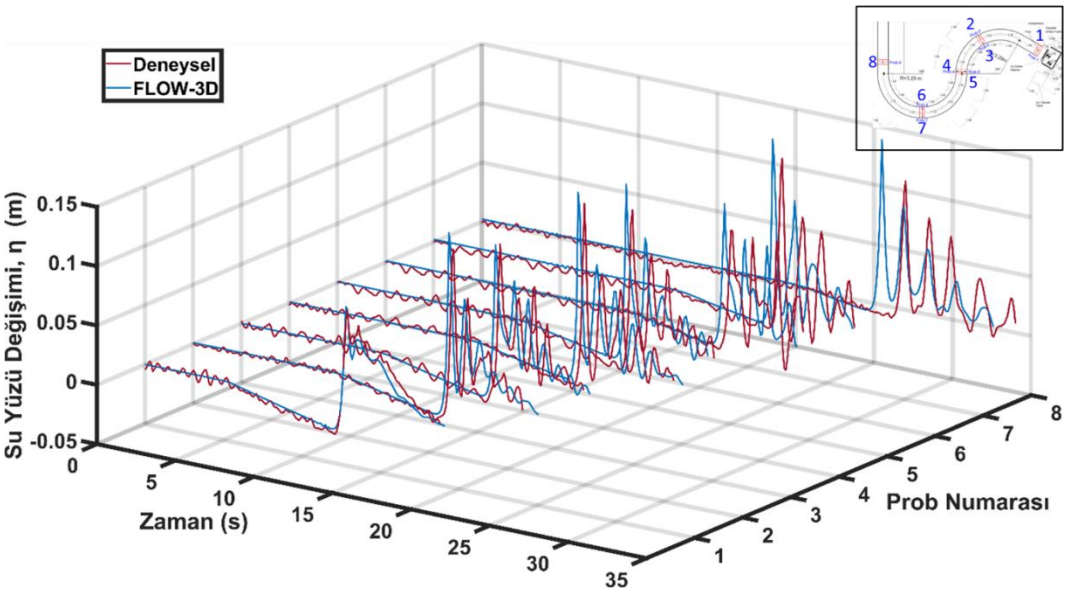


Şekil 6.45 d=25 cm derinlikte ve a^{+}/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.19 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2= 0.035 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	3.42	11.95
2	10.63	1.97
3	12.04	1.18
4	14.42	13.71
5	12.88	6.40
6	15.22	5.81
7	17.12	11.75
8	12.42	6.06
Ort. :	12.27	7.35

d=25 cm derinlik, a^+/d=0.24 oranı ve Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında üretilen tsunami dalgası ile kanal boyunca su yüzü değişimlerini gösteren sayısal ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6.46'da sunulmaktadır. FLOW-3D ile oluşturulan sayısal model, kanal girişinde (Prob 1) tsunami dalgasına ait karakteristikleri tahmin etmede bir önceki akım koşuluna göre (Q_2=0.035 m^3/s) daha az olsa da yine başarı göstermektedir (Tablo 6.20). Ancak pozitif genliği Prob 1 için yaklaşık %2.3 gibi farkla daha iyi tahmin etmiştir. Bu deney koşulu için kanal boyunca profilin değişimi incelendiğinde deneysel model ile sayısal model arasında yine önceki koşullarda olduğu gibi belirli bir miktar faz farkı meydana gelmektedir. Dalganın membaya ilerlemesi sırasında meydana gelen iç ve dış kıvrım arasındaki pozitif genlik farkını başarılı bir şekilde benzeştirmiştir. Arada oluşan faz farkından dolayı NRMSE hata metrik değeri artabilmektedir. Burada belirgin şekilde Prob 6 ile 7'nin bulunduğu 4. kesitte NRMSE'nin, hata sınırının üzerinde olduğu görülmektedir. Ancak tüm model için %12.8 ortalama hata ile kabul edilebilir hata sınırları içerisinde yer almaktadır. Pozitif genlikler dikkate alındığında, MAX hata metrik değeri ortalama olarak %12.7 hata oranı ile kabul edilebilir hata sınırları üzerinde kalmaktadır. Prob 1 ve 3 dışında FLOW-3D oldukça yüksek tahminlerde bulunmuştur. Bu deney koşulu için, aynı bore gücündeki dalganın diğer deney koşullarına göre, pozitif genliği tahmin etmede daha az başarı gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak, NRMSE hata sınırları içerisinde kalmakta ve MAX hata değeri sınırın biraz üzerinde bulunmaktadır.



Şekil 6.46 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.20 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.24 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

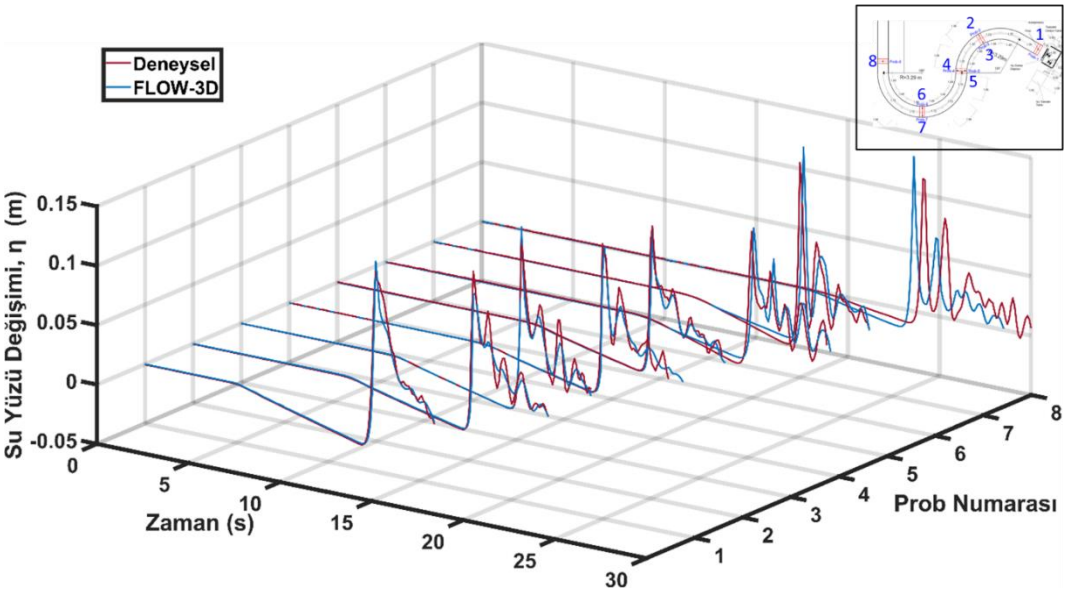
Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	4.17	2.28
2	10.30	10.72
3	12.27	1.41
4	14.32	6.09
5	13.84	18.09
6	17.26	24.14
7	17.17	11.02
8	13.37	28.07
Ort. :	12.84	12.73

6.5.1.2 Bore Gücü $\alpha=a^+/d$=0.48 olan N-dalga

d=25 cm derinlik, a^+/d=0.48 oranı ve Q_0=0 m^3/s akım koşullarında (statik hal) üretilen tsunami dalgasının kanal boyunca su yüzü değişimlerine ait model ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.47'de verilmektedir. FLOW-3D ile oluşturulan sayısal model kanal girişinde Prob 1 kesitinde tsunami dalgası karakteristiklerini ve pozitif genliği tahmin etmekte oldukça başarılı bulunmuştur (Tablo 6.21). a^+/d=0.24 oranındaki dalga profillerinden farklı olarak, bu deney

koşulunda deneysel model ile sayısal model arasında faz farkı kanal boyunca sadece bir miktar Prob 6 ile 7'de ve belirgin şekilde Prob 8'de gözlemlenmiştir.

Genel olarak tüm prob konumlarında dalga karakteristikleri incelendiğinde, FLOW-3D sayısal modelinin dalga davranışını başarıyla temsil edebildiği görülmektedir. Özellikle, kanal boyunca dalga ilerledikçe iç ve dış kıvrımlar arasında oluşan pozitif genlik farklarının hesaplanmasında modelin yüksek doğrulukla sonuç ürettiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, son prob konumu olan Prob 8'de gözlemlenen faz farkı nedeniyle normalize edilmiş kök ortalama kare hata (NRMSE) değeri diğer prob konumlarına kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Ancak bu hata düzeyi, literatürde kabul edilen eşik değerlerin altında kalmakta ve modelin genel doğruluğunu etkilemeyecek düzeydedir. Tüm model sonuçları için NRMSE'nin %5.8 gibi bir ortalama ile kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olduğu görülmektedir. Aynı şekilde pozitif genlikler dikkate alındığında, ortalama MAX hata metrik değeri, %8.1 gibi bir hata oranı ile hata sınırının altında kalmaktadır. Ancak Prob 2 ve 8'de elde edilen değerler, hata miktarı sınır değerini geçmektedir. En iyi sonuç Prob 4 ile 5 in bulunduğu 3. kesitte görülmektedir. Sonuç olarak, NRMSE ve MAX hata metrikleri dikkate alındığında sayısal modelin başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

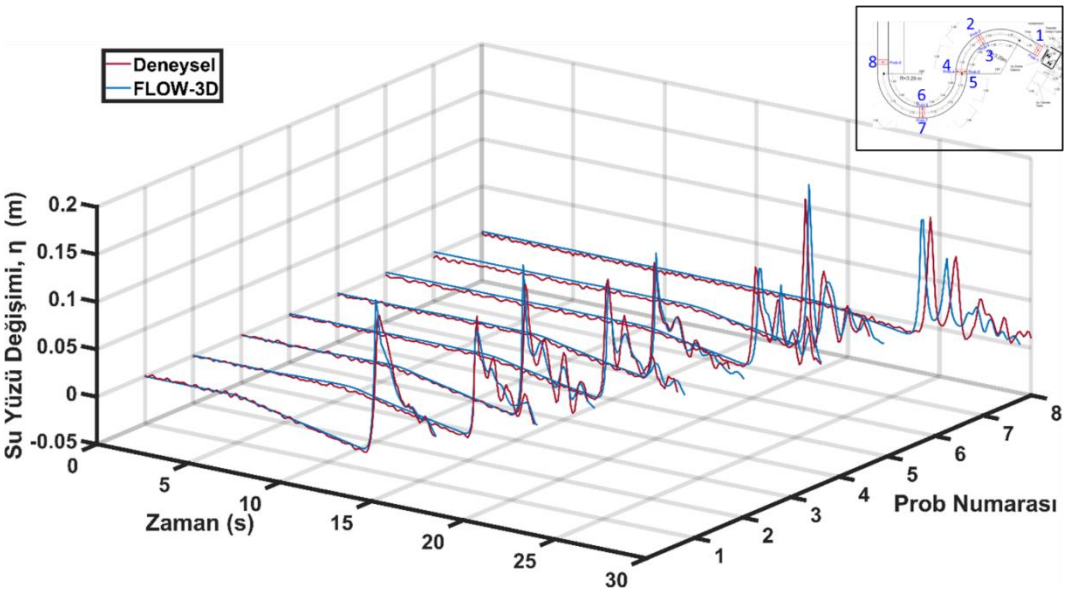


Şekil 6.47 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.21 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	3.31	6.74
2	3.92	16.54
3	2.81	5.98
4	3.35	2.33
5	3.38	3.78
6	7.28	3.73
7	7.83	10.31
8	14.72	15.10
Ort. :	5.83	8.06

d=25 cm derinlik, a^+/d=0.48 oranı ve Q_1=0.016 m^3/s akım koşullarında üretilen tsunami dalgası ve kanal boyunca su yüzü değişimlerine ait sayısal ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6.48'de gösterilmektedir. FLOW-3D ile oluşturulan sayısal model kanal girişinde Prob 1 kesitinde tsunami dalgasına ait karakteristiklerini tahmin etmekte başarı göstermiştir (Tablo 6.22). Fakat pozitif genliği hata sınırlarının üzerinde olacak şekilde yaklaşık %14 fazla tahmin etmiştir. Tüm problarda diğer dalga karakteristiklerini doğru tahmin edip, iç ile dış kıvrım arasında meydana gelen pozitif genlik farkını da doğru benzeştirmiştir. 4. kesitten sonra Prob 6, 7 ve 8 için belirgin bir faz farkı oluşmaktadır. Bu durum yine NRMSE hata değerlerini arttırmış fakat hata miktarları kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Tüm problarda yapılan karşılaştırmalar sonucunda, NRMSE %7.4 gibi iyi bir ortalama ile kabul edilebilir hata sınırları içerisinde bulunmaktadır. Pozitif genlikler dikkate alındığında, MAX hata miktarı ortalama %9.1 gibi bir hata oranı ile hata sınırının altında kalmaktadır. Fakat Prob 1, 2, 3 ve 7'de hata miktarı sınır değeri aşmaktadır. En iyi sonuçlar Prob 4, 6 ve 8'de yapılan ölçümler için görülmüştür. Sonuç olarak, NRMSE ve MAX hataları için genel ortalamalar dikkate alındığında sayısal modelin bu deney koşulu için başarılı olduğu görülmektedir.



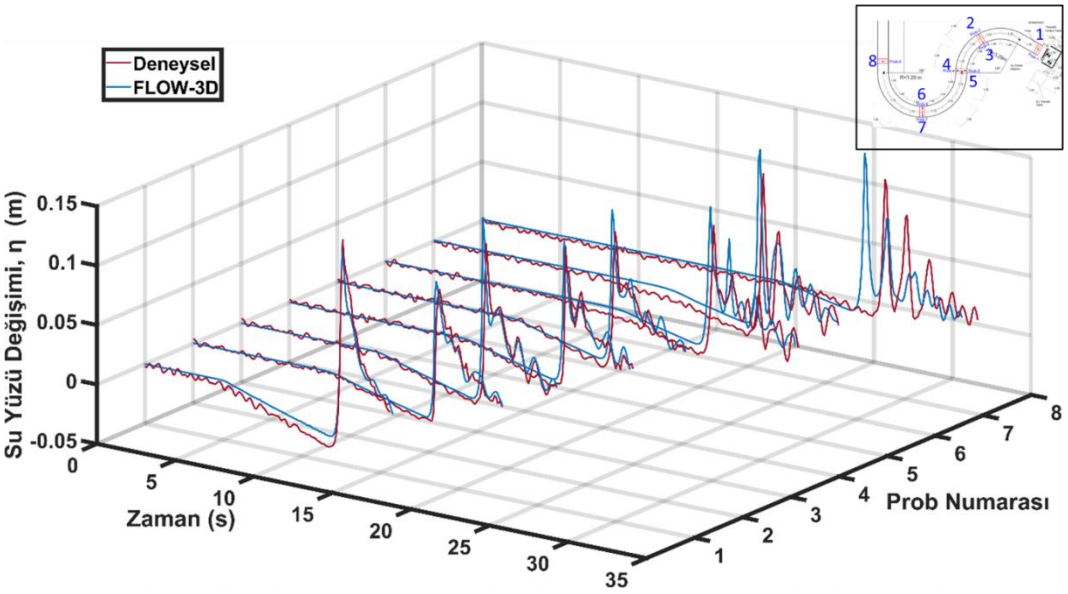
Şekil 6.48 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.22 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	4.92	13.64
2	3.66	13.39
3	6.42	16.88
4	5.78	3.27
5	4.87	10.26
6	10.10	0.68
7	9.77	11.24
8	13.63	3.50
Ort. :	7.39	9.11

d=25 cm derinlik, a^+/d=0.48 oranı ve Q_2=0.035 m^3/s akım koşullarında üretilen tsunami dalgası ve kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimlerini gösteren sayısal model ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6.49'da sunulmaktadır. Sayısal model, Prob 1 kesitinde tsunami dalgasına ait karakteristikleri ve pozitif genliği tahmin etmede oldukça başarılı bir performans sergilemiştir (Tablo 6.23). Tüm problarda dalga karakteristiğini doğru tahmin ederek iç ile dış kıvrım arasında meydana gelen pozitif genlik farkını da doğru belirlemiştir. Yine 4. kesitten sonra Prob 6, 7 ve 8 için belirgin bir faz farkı oluşmaktadır. Bu durum NRMSE hatasını

arttırmış fakat hata miktarları kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Tüm ölçüm noktaları için NRMSE, %8.4 gibi bir ortalama ile kabul edilebilir hata sınırları içerisinde bulunmaktadır. Prob 1, 2 ve 4 dışında FLOW-3D pozitif genlikleri daha büyük hesaplamıştır. Bu nedenle, MAX hata metrikleri, %13.2 gibi bir ortalamayla hata sınırından yüksek çıkmaktadır. Yine de MAX hata değerinin aşırı yüksek olmaması ve NRMSE hata değerinin uygun olmasından dolayı bu deney koşulu için sayısal modelin kısıtlı da olsa başarılı olduğu kabul edilmektedir.

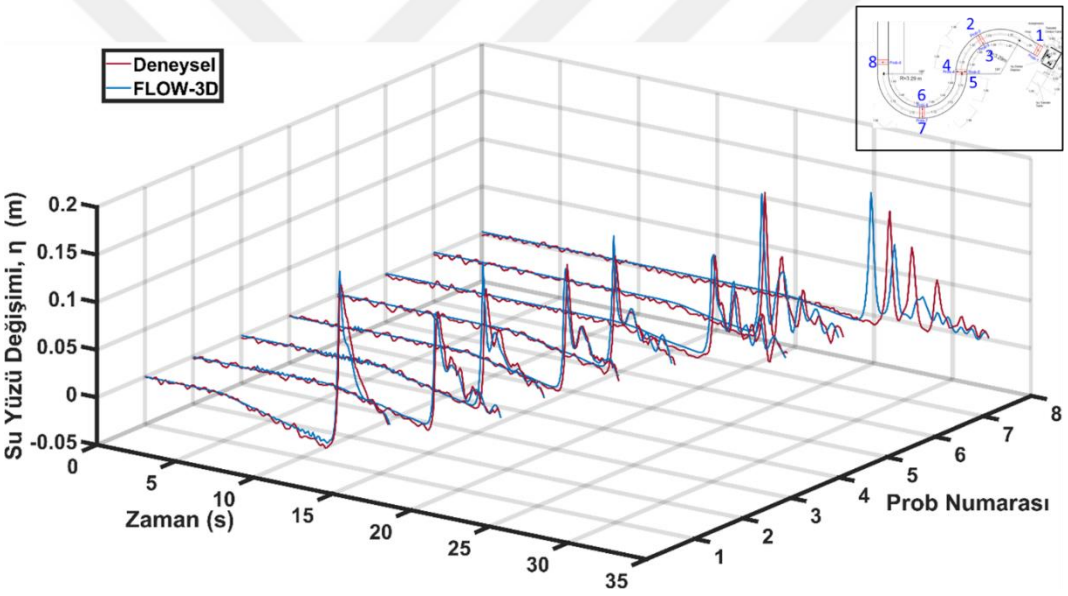


Şekil 6.49 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.23 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	3.66	3.44
2	6.09	6.74
3	8.38	19.28
4	6.52	4.43
5	7.52	20.06
6	9.90	17.27
7	11.11	17.18
8	13.78	17.46
Ort. :	8.37	13.23

d=25 cm derinlik, a^+/d=0.48 oranı ve Q_3=0.05 m^3/s akım koşullarında oluşturulan tsunami dalgası ve kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimleri için sayısal ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6.50'de verilmektedir. FLOW-3D, kanal girişindeki Prob 1 kesitinde su yüzü değişimlerini başarılı bir şekilde tahmin etmiştir (Tablo 6.24). Ancak pozitif genliği %10 daha büyük tahmin ederek hata sınırında bir sonuç vermiştir. Tüm problarda dalga karakteristiğini doğru tahmin etmiş ve iç ile dış kıvrım arasındaki pozitif genlik farkını yakalamıştır. Prob 8'de belirgin bir faz farkı bulunmuş ve NRMSE değeri yüksek çıkmıştır. Genel olarak, NRMSE %7.8 ile kabul edilebilir hata sınırları içindedir. Prob 3, 5 ve 8 hariç, FLOW-3D pozitif genlikleri doğru hesaplamıştır. MAX hata metrikleri %9.5 ortalama ile hata sınırlarının altında kalmıştır. Sonuç olarak, NRMSE ve MAX metriklerine göre sayısal model bu koşulda başarılıdır.



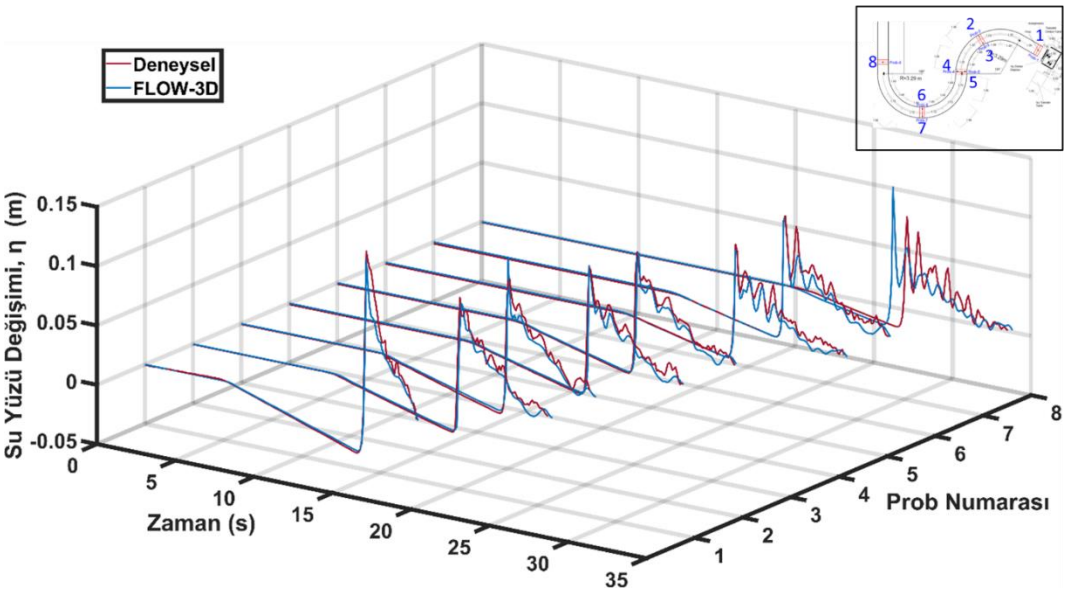
Şekil 6.50 d=25 cm derinlikte ve a^+/d=0.48 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.24 d=25 cm derinlikte ve $a^+/d=0.48$ bore gücüne sahip tsunami dalgasının $Q_3=0.05$ m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	4.44	10.20
2	5.18	1.10
3	9.03	24.56
4	6.21	3.93
5	6.81	20.32
6	8.14	0.86
7	8.11	1.64
8	14.66	13.64
Ort. :	7.82	9.53

6.5.1.3 Bore Gücü $\alpha=a^+/d=0.69$ olan N-dalga

d=20 cm derinlik, $a^+/d=0.69$ oranı ve $Q_0=0$ m^3/s akım koşullarında (statik hal) oluşturulan tsunami dalgası ve kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimleri için sayısal ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6.51'de sunulmaktadır. FLOW-3D, kanal girişindeki Prob 1 kesitinde dalga formu ve pozitif genliği tahmin etmede başarılı bir performans sergilemiştir (Tablo 6.25). $a^+/d=0.24$ ve $a^+/d=0.48$ oranındaki dalga profillerine kıyasla, bu deney koşulunda Prob 8 dışında deneysel ve sayısal model arasında belirgin bir faz farkı gözlenmemiştir. Genel olarak tüm problarda dalga karakteristikleri incelendiğinde, FLOW-3D'nin oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Prob 8'deki faz farkı nedeniyle NRMSE yüksek çıkmakta, ancak kabul edilebilir hata sınırları içinde kalmaktadır. Tüm sonuçlar için için NRMSE %5.2 gibi iyi bir ortalamaya sahiptir ve hata sınırları içerisinde kabul edilmektedir. Pozitif genlikler açısından, MAX hata oranı ortalama %8.4 ile hata sınırının altında kalmaktadır. Prob 3 ve 8'de hata oranı sınır değeri sırasıyla yaklaşık 2 ve 3 kat aşılmıştır. $a^+/d=0.48$ oranı ve $Q_0=0$ m^3/s akım koşullarında elde edilen dalga profillerinde olduğu gibi, en iyi sonuçlar Prob 4 ve 5'in bulunduğu 3. kesitte elde edilmiştir. Genel olarak, NRMSE ve MAX hata metriklerine bakıldığında sayısal model başarılı bir performans sergilemektedir.



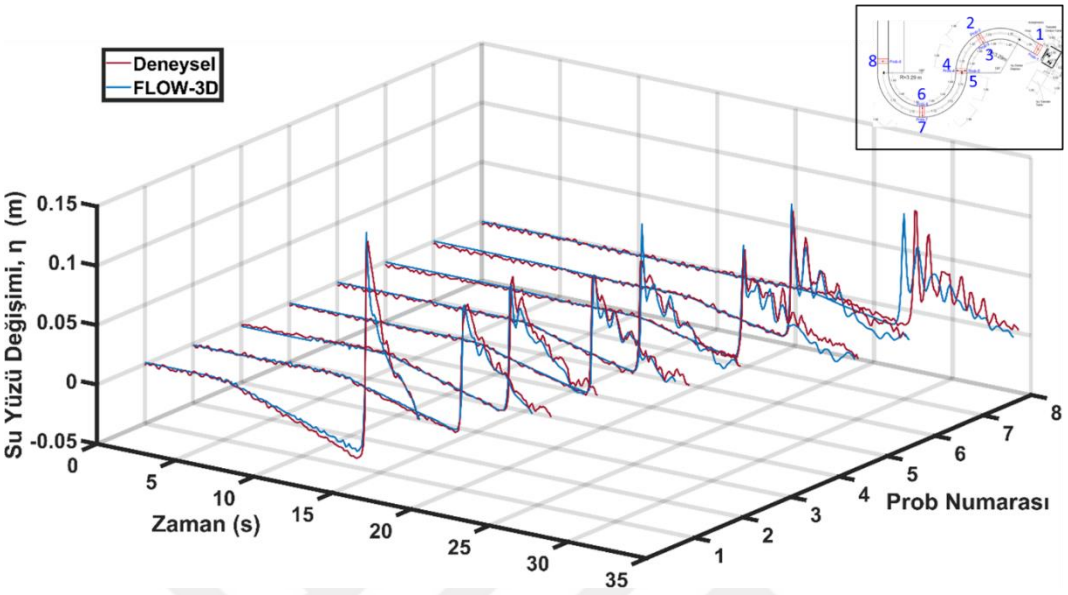
Şekil 6.51 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.25 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	3.68	4.49
2	4.24	5.65
3	4.22	19.47
4	4.41	1.12
5	4.65	1.00
6	4.06	5.42
7	4.39	1.59
8	11.85	28.45
Ort. :	5.19	8.40

d=20 cm derinlik, a^+/d=0.69 oranı ve Q_1=0.016 m^3/s akım koşullarında oluşturulan tsunami dalgası ve kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimleri için sayısal ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6.52'de gösterilmektedir. FLOW-3D, Prob 1 kesitinde tsunami dalgasını ve pozitif genliğini başarıyla tahmin etmiştir (Tablo 6.26). Genel olarak, tüm problarda dalga formları ve iç ile dış kıvrım arasındaki pozitif genlik farklarını yakalamıştır. Prob 8 dışında belirgin bir faz farkı yoktur ve bu fark, önceki deneylere göre daha düşük olmaktadır. Tüm model

sonuçları için NRMSE, %5.3 gibi iyi bir hata değeri görülmektedir. Prob 5'te marjinal bir fark olsa da, MAX hata değeri %9.5 ile kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Sonuç olarak, sayısal model bu koşulda başarılı bulunmaktadır.



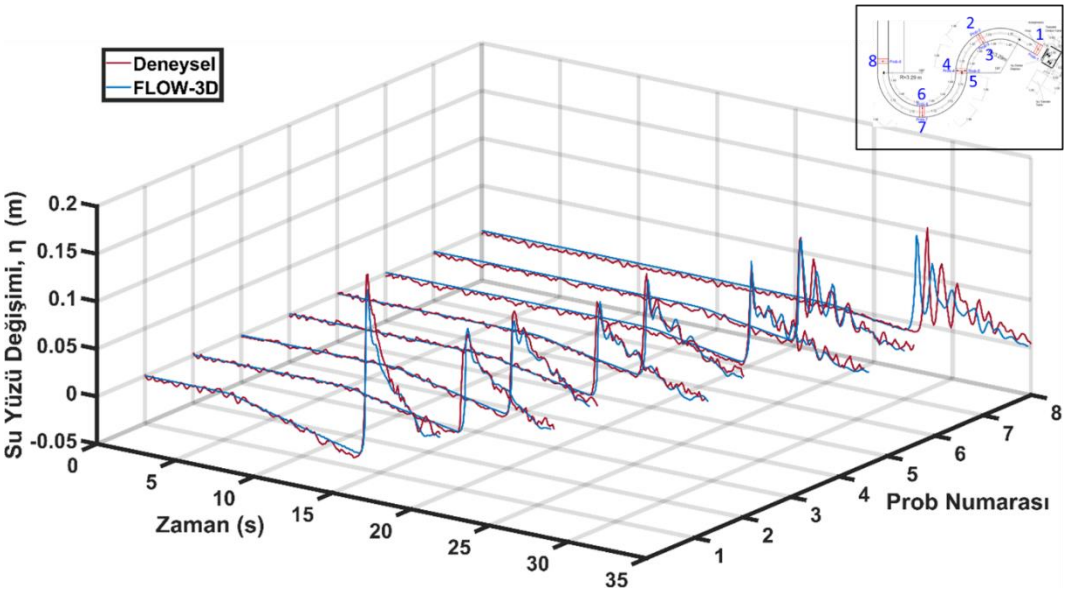
Şekil 6.52 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.26 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1=0.016 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	3.95	5.77
2	3.87	1.37
3	5.03	8.05
4	3.72	0.39
5	5.62	43.41
6	5.14	5.12
7	4.60	6.67
8	10.63	5.36
Ort. :	5.32	9.52

d=20 cm derinlik, a^+/d=0.69 oranı ve Q_2=0.035 m^3/s akım koşullarında oluşturulan tsunami dalgası ve kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimleri için sayısal ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6.53'te sunulmaktadır. FLOW-3D, Prob 1 kesitinde tsunami dalgasına ait karakteristikleri ve %10'luk hata sınırına

rağmen pozitif genliği başarıyla tahmin etmektedir (Tablo 6.27). Tüm problarda dalga karakteristikleri doğru tahmin edilmiş, kanal boyunca gerçekleştirilen ölçümlerle karşılaştırıldığında düşük NRMSE değerleri elde edilmiştir. Ancak, Prob 8'de belirgin bir faz farkı bulunmakta ve bu da NRMSE değerini artırmaktadır. Genel NRMSE, %6.1 ile hata sınırlarının altındadır. Sayısal model, Prob 2 dışında her probda pozitif genliği iyi tahmin etmiş ve MAX hata oranı %7.2 ile kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Sonuç olarak, bu deney koşulunda sayısal model, düşük NRMSE ve MAX hata değerleri ile başarılı sonuçlar vermektedir.

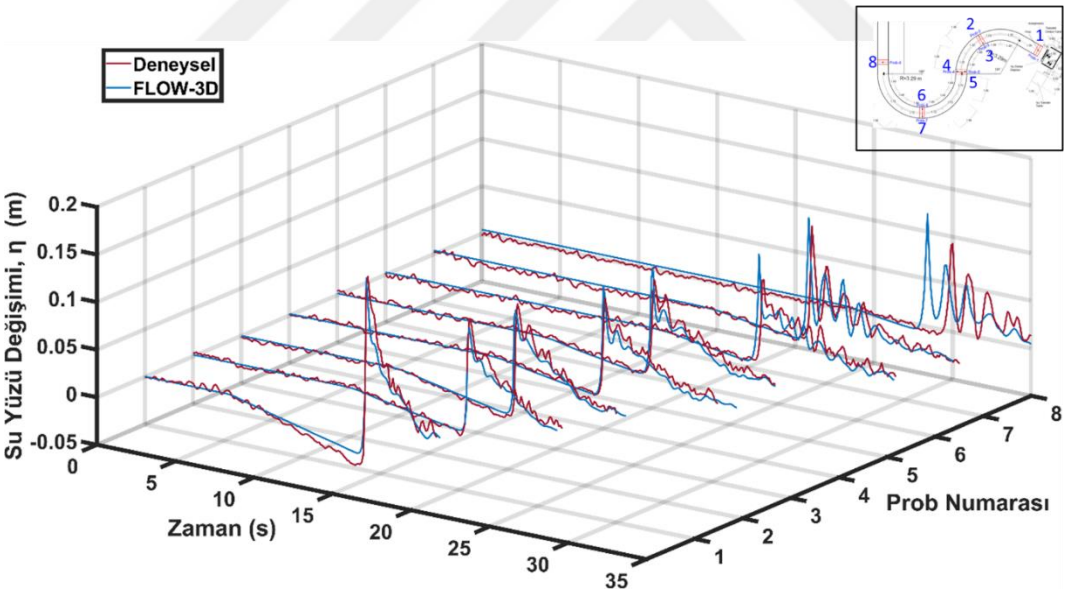


Şekil 6.53 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.27 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	3.70	10.37
2	7.17	7.08
3	3.58	12.07
4	6.54	0.69
5	5.40	7.54
6	4.40	9.28
7	5.43	0.38
8	12.43	10.06
Ort. :	6.08	7.18

d=20 cm derinlik, a^+/d=0.69 oranı ve Q_3=0.05 m^3/s akım koşullarında oluşturulan tsunami dalgası ve kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimleri için sayısal ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6.54'te verilmiştir. FLOW-3D, Prob 1 kesitinde tsunami dalgasına ait karakteristikleri ve pozitif genliği başarıyla tahmin etmiştir (Tablo 6.28). Diğer tüm problarda da dalga karakteristiklerini iyi tahmin edilerek düşük NRMSE değerleri elde edilmiştir. Ancak, Prob 8'de belirgin bir faz farkı bulunmuş ve bu fark NRMSE değerini artırmıştır. Buna rağmen bu probda da hata değeri sınırın altında kalmıştır. Prob 6 ve 7'de önceki koşullara göre faz farkının oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Tüm model için NRMSE, %7.4 ile kabul edilebilir hata sınırları içindedir. Pozitif genlikler ve MAX hata ölçümünde, özellikle Prob 6 ve 8'de yüksek hata oranları görülmüş, bu bölgelerde FLOW-3D pozitif genliği yüksek hesaplamıştır. Bu durum, tüm model için ortalama %14 hata oranına yol açmıştır. Prob 6 ve 8'deki yüksek MAX hataları dışında, genel olarak sayısal model bu deney koşulu için kabul edilebilir hata sınırlarında iyi bir performans sergilemiştir.



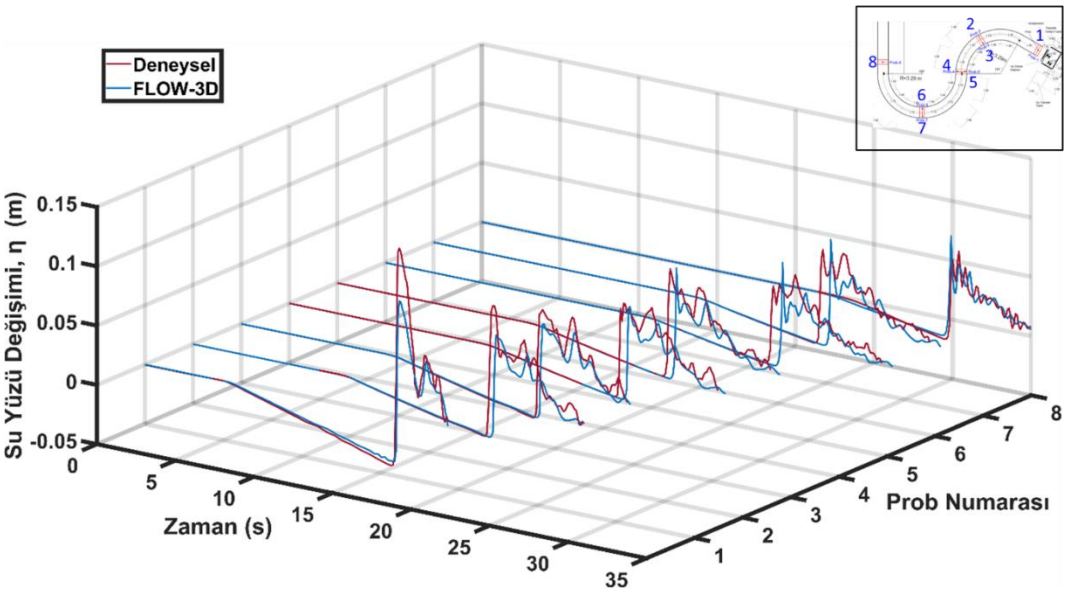
Şekil 6.54 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.28 d=20 cm derinlikte ve a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3= 0.05 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	4.22	1.47
2	3.84	8.62
3	6.07	6.85
4	5.20	11.29
5	6.58	15.02
6	10.10	33.40
7	9.24	7.01
8	14.28	27.69
Ort. :	7.44	13.92

6.5.1.4 Bore Gücü $\alpha=a^+/d$=0.95 olan N-dalga

Şekil 6.55'te, d=15 cm derinlik, a^+/d =0.95 oranı ve Q_0=0 m^3/s (statik hal) akım koşullarında oluşturulan tsunami dalgası ve kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişimlerine ait sayısal ve deneysel model sonuçları karşılaştırılmaktadır. FLOW-3D, Prob 1 kesitinde kıvrımlı kanala giriş yapan tsunami dalgasını başarılı bir şekilde tahmin etmiştir (Tablo 6.29). Ancak, sayısal model pozitif genliği yaklaşık %31 daha düşük hesaplamıştır. a^+/d=0.24, a^+/d=0.48 ve a^+/d=0.69 dalga profillerinden farklı olarak, Prob 8 dışında her kesitte faz farkı meydana gelmiş ve bu da NRMSE hata değerlerini yükseltmiştir. Yine de model genelinde ortalama NRMSE %10.2 olarak hesaplanmış ve kabul edilebilir hata sınırının altında kalmıştır. Bu deney koşulunda sayısal model, pozitif genlikleri diğer profillere kıyasla düşük hesaplamıştır. Ancak, Prob 4 ve 5'in bulunduğu 3. kesitte pozitif genlikler deney sonuçlarıyla iyi uyum sağlamıştır. Bu nedenle ortalama MAX hata değeri %16.7 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, sayısal model dalga karakteristiğini yakalamada başarılı olsa da pozitif genliklerde beklenen sonuçları tam olarak verememiştir.



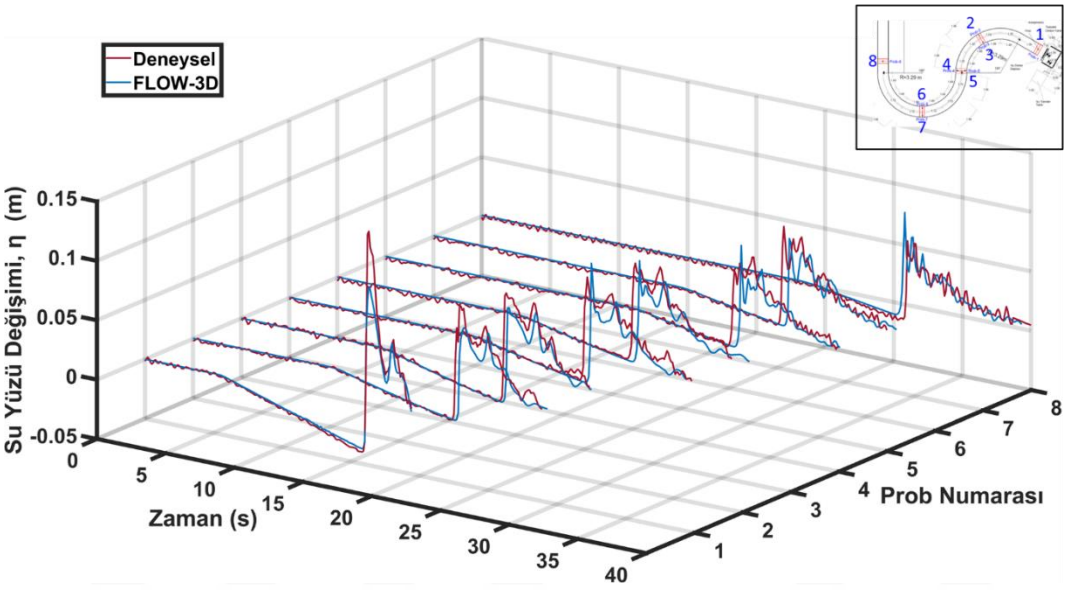
Şekil 6.55 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.29 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_0= 0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	5.67	31.25
2	10.93	28.27
3	9.04	18.51
4	13.72	5.11
5	12.70	2.49
6	11.95	12.87
7	12.87	15.39
8	4.85	19.78
Ort. :	10.22	16.71

Şekil 6.56'da, d=15 cm derinlik, a^+/d=0.95 oranı ve Q_1=0.016 m^3/s akım koşullarında oluşturulan tsunami dalgası ve kanal boyunca su yüzü değişimlerine ait sayısal ve deneysel model sonuçları karşılaştırılmaktadır. FLOW-3D, Prob 1 kesitinde tsunami dalgasının formunu başarılı bir şekilde tahmin etmiştir (Tablo 6.30). Ancak, pozitif genlik için sayısal model, statik durumda olduğu gibi, yaklaşık %32 daha düşük bir hesaplama yapmıştır. Tüm dalga profilleri, Prob 8 dahil, belirgin bir faz farkı göstermektedir. Yine de hiçbir probda NRMSE hata değerleri

sınırı aşmamıştır ve genel NRMSE ortalaması %9.7 ile kabul edilebilir hata sınırının altında kalmıştır. Pozitif genlik farkı ise Prob 5 dışında tüm problarda sınırın üzerinde olup, MAX hata değeri ortalama %20 ile hata sınırının yaklaşık iki katına çıkmıştır. Prob 1, 2, 3 ve 7'de sayısal modelin pozitif genliği düşük, Prob 4, 6 ve 8'de ise yüksek hesapladığı görülmektedir. Sonuç olarak, bu deney koşulunda sayısal model dalga karakteristiğini iyi yakalasa da pozitif genlik hesaplamalarında beklenen sonuçları vermemiştir.

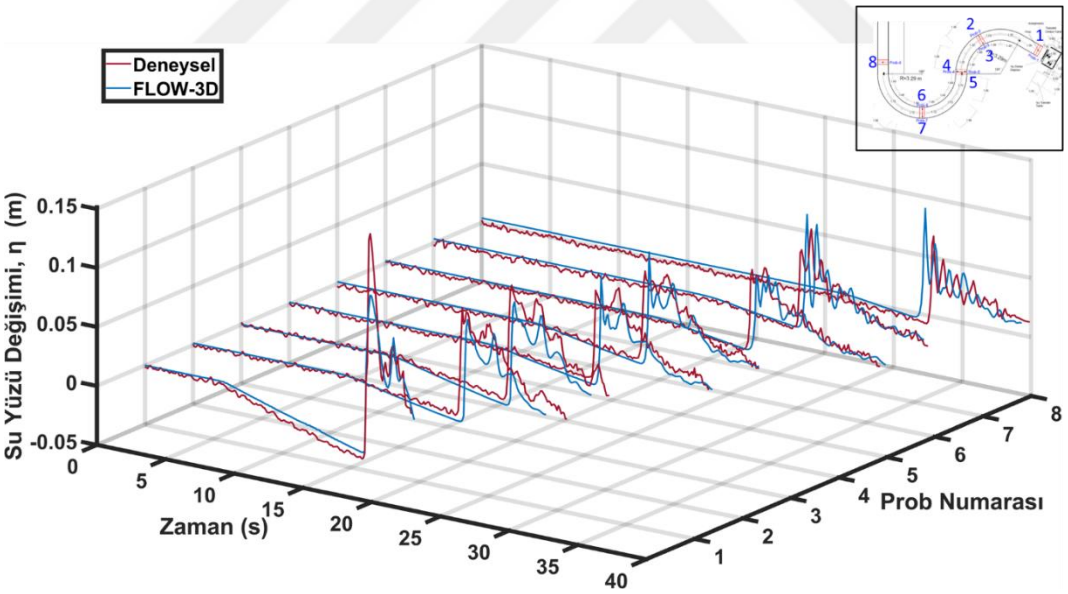


Şekil 6.56 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.30 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_1= 0.016 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	4.42	31.78
2	8.95	23.86
3	8.95	15.20
4	12.04	17.80
5	11.99	2.85
6	10.53	11.94
7	10.88	13.24
8	9.86	43.25
Ort. :	9.70	19.99

Şekil 6.57'de, d=15 cm derinlik, a^+/d=0.95 oranı ve Q_2=0.035 m³/s akım koşulları altındaki tsunami dalgası ile kanal boyunca su yüzü değişimlerine ait sayısal ve deneysel model sonuçları karşılaştırılmaktadır. Kanal girişinde, FLOW-3D ile oluşturulan sayısal model, Prob 1 kesitinde tsunami dalgasına ait karakteristiği başarılı bir şekilde tahmin etmiştir (Tablo 6.31). Ancak, pozitif genlik tahminleri yaklaşık %35 daha düşük çıkmıştır. Tüm problarda belirgin bir faz farkı gözlemlenirken, NRMSE hata değerleri hiçbir probda hata sınırını aşmamıştır. Genel NRMSE değeri %10.7 ile kabul edilebilir hata sınırının altında kalmıştır. Sayısal model, pozitif genlik tahminlerinde istenen başarıyı gösterememiştir. Prob 6 hariç her probda MAX hata değeri sınırın üzerindedir. Tüm model için MAX hata ortalaması %20 olup, bu da hata sınırının yaklaşık iki katına çıktığını göstermektedir. Ayrıca, a^+/d=0.95 oranı ve Q_1=0.016 m³/s akım koşullarındaki modelle aynı hata oranına ulaşılmıştır. Sonuç olarak, bu deney koşulunda sayısal model dalga karakteristiğini iyi yakalasa da pozitif genlik hesaplamalarında beklenen başarıyı gösterememiştir.

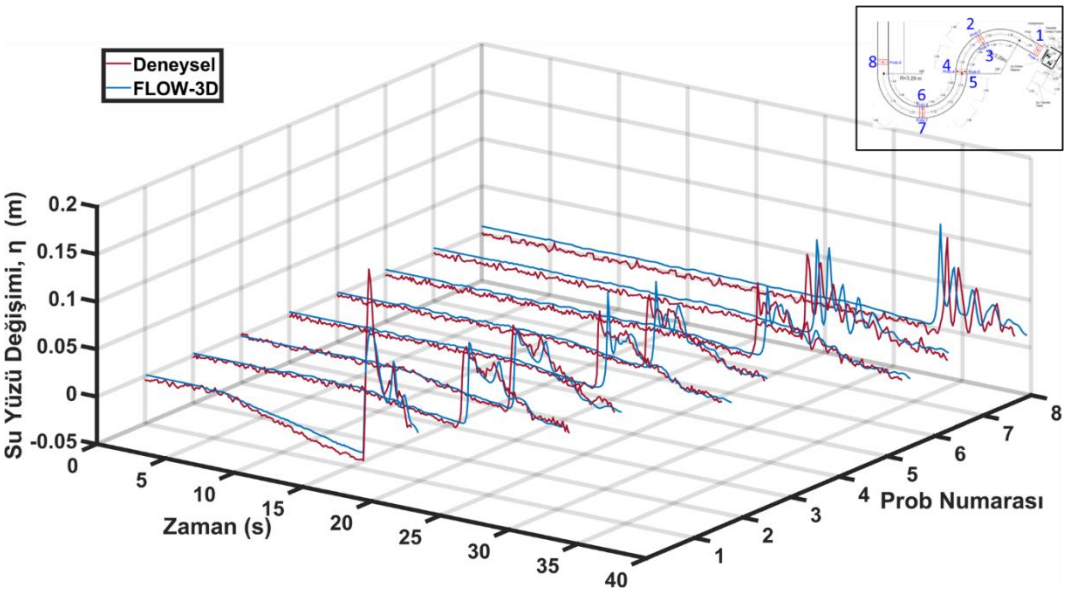


Şekil 6.57 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m³/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

Tablo 6.31 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_2=0.035 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	4.89	34.47
2	12.58	11.46
3	11.12	16.81
4	12.00	10.17
5	11.65	24.13
6	9.17	9.39
7	10.94	14.66
8	13.18	32.26
Ort. :	10.69	19.17

d=15 cm derinlik, a^+/d=0.95 bore gücünde ve Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında oluşturulan tsunami dalgası ve kıvrımlı kanal boyunca su yüzü değişiminin sayısal model ve deneysel model sonuçları Şekil 6.58'de karşılaştırılmıştır. FLOW-3D ile oluşturulan sayısal model, kanal girişinde Prob 1 kesitinde tsunami dalgasının formunu başarılı bir şekilde yakalamıştır (Tablo 6.32). Ancak, sayısal model pozitif genliği yaklaşık %39 daha düşük tahmin etmiştir. Tüm problarda, a^+/d=0.95 oranındaki diğer dalga profillerinde olduğu gibi belirgin bir faz farkı gözlemlenmiştir. NRMSE hata değerleri hiçbir probda hata sınırını aşmamış ve genel olarak %11 gibi bir ortalama elde edilmiştir. Sayısal model, a^+/d=0.95 oranındaki ve Q_1=0.016 m^3/s ile Q_2=0.035 m^3/s akım koşullarındaki diğer dalga profillerine göre pozitif genlik tahminlerinde daha fazla başarı göstermiştir. Prob 2, 3 ve 6'da oldukça düşük MAX hata değerleri gözlemlenirken, diğer problarda hata sınırının üzerinde değerler elde edilmiştir; bu da tüm model için %17.7 gibi yüksek bir hata oranına yol açmıştır. Sonuç olarak, sayısal model dalga karakteristiğini yakalamada başarılı olmuş, ancak pozitif genlik tahminlerinde beklenen performansı gösterememiştir.



Şekil 6.58 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında ölçülen ve modellenen su yüzü değişimleri

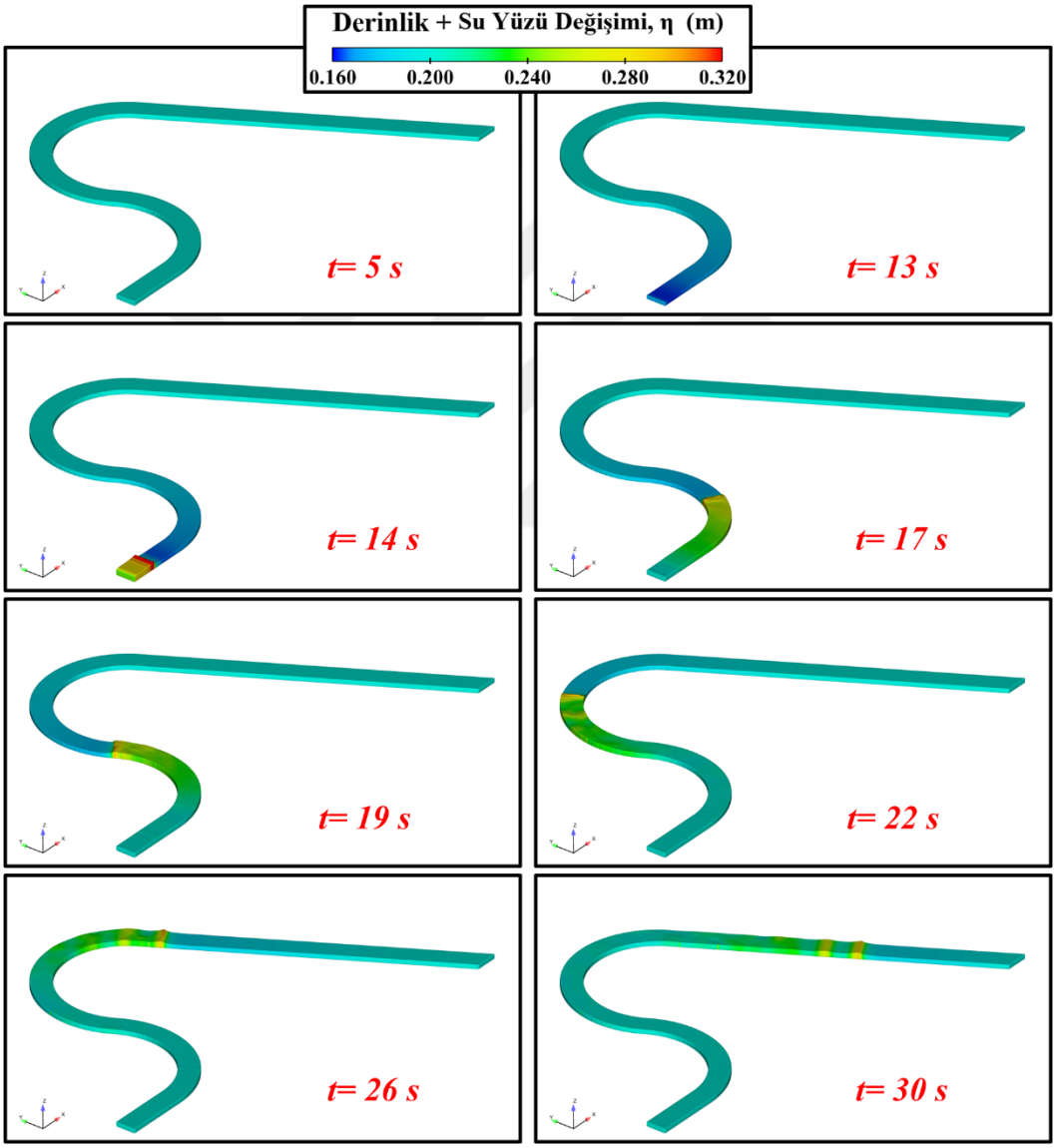
Tablo 6.32 d=15 cm derinlikte ve a^+/d=0.95 bore gücüne sahip tsunami dalgasının Q_3=0.05 m^3/s akım koşulları altında modellenen su yüzü değişimleri için hata metrikleri

Prob No.	NRMSE (%)	MAX (%)
1	4.96	38.67
2	11.48	7.14
3	8.76	5.27
4	11.78	30.37
5	12.29	22.84
6	10.82	3.03
7	14.39	21.16
8	12.89	13.15
Ort. :	10.92	17.70

6.5.1.5 Niteliksel Değerlendirme

Şekil 6.59'da, d=20 cm derinlik, a^+/d=0.69 oranı ve Q_0=0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında oluşturulan tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi sırasında su seviyesi değişimlerine ait FLOW-3D simülasyonu sunulmaktadır. Başlangıç koşulu olarak, 20 cm derinlikte 5. saniyeden itibaren çekilmeye başlamakla birlikte tsunami dalgasının oluşmaya başladığı gözlemlenmektedir. 13. saniyede kanaldan su çekilmekte ve N-dalgasının çukuru tamamen oluşmaktadır.

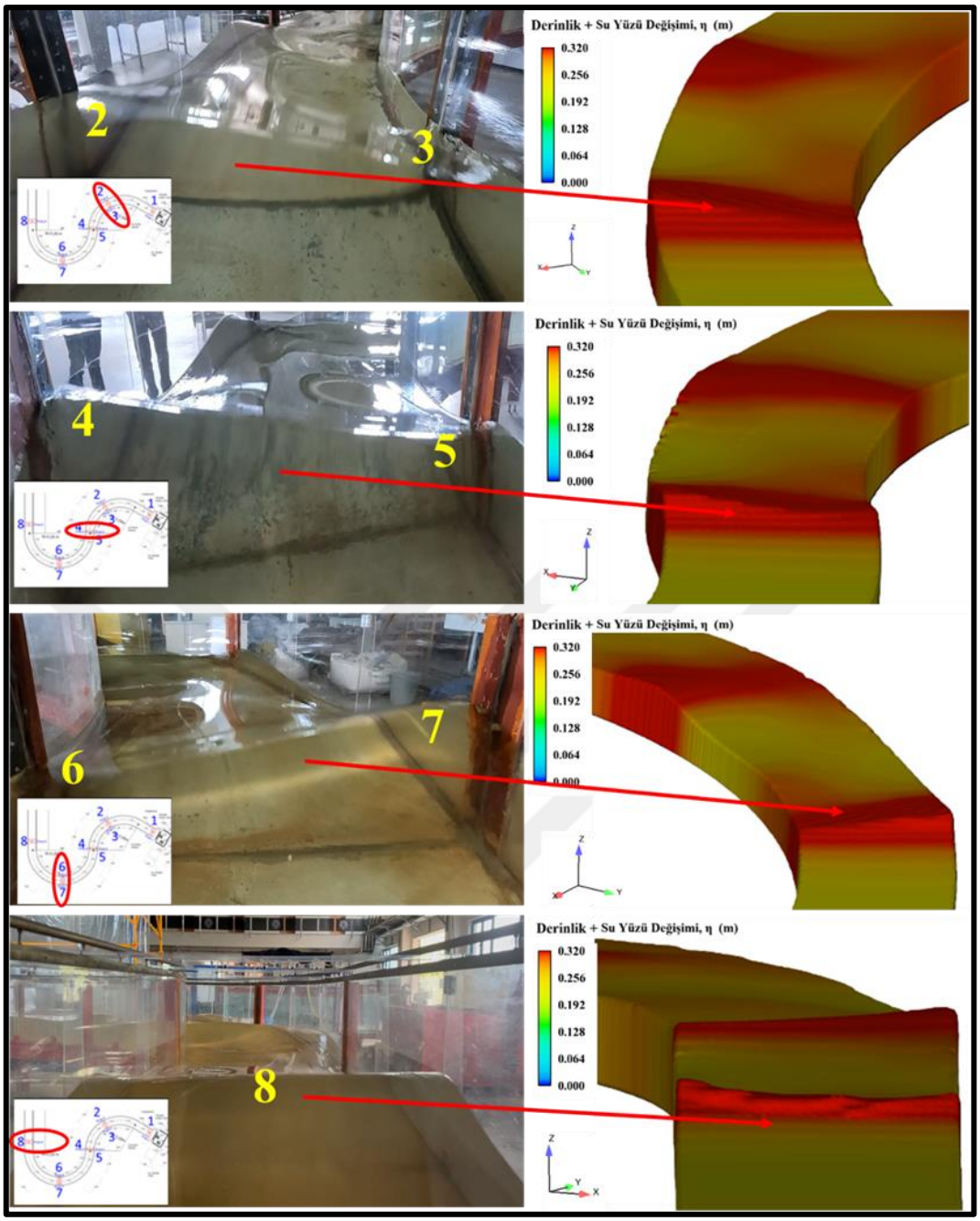
Dalganın tepe noktası, sırasıyla; 14. saniyede Prob 1 kesitinde, 17. saniyede Prob 2 ile 3'ün bulunduğu 2. kesitte, 19. saniyede Prob 4 ile 5'in bulunduğu 3. kesitte, 22. saniyede Prob 6 ile 7'nin bulunduğu 4. kesitte ve 26. saniyede Prob 8 kesitinde gözlemlenmektedir. Bu verilerden de anlaşıldığı üzere, sayısal model su seviyesi değişimlerini deneysel model sonuçlarına uyumlu bir şekilde benzeştirmektedir. Tsunami dalgasının kıvrımlı kanalda ilerlerken iç ve dış kıvrım arasında meydana gelen pozitif genlik farkı ve ayrışarak bir dalga katarı oluşturması bu simülasyonda net bir şekilde görülmektedir.



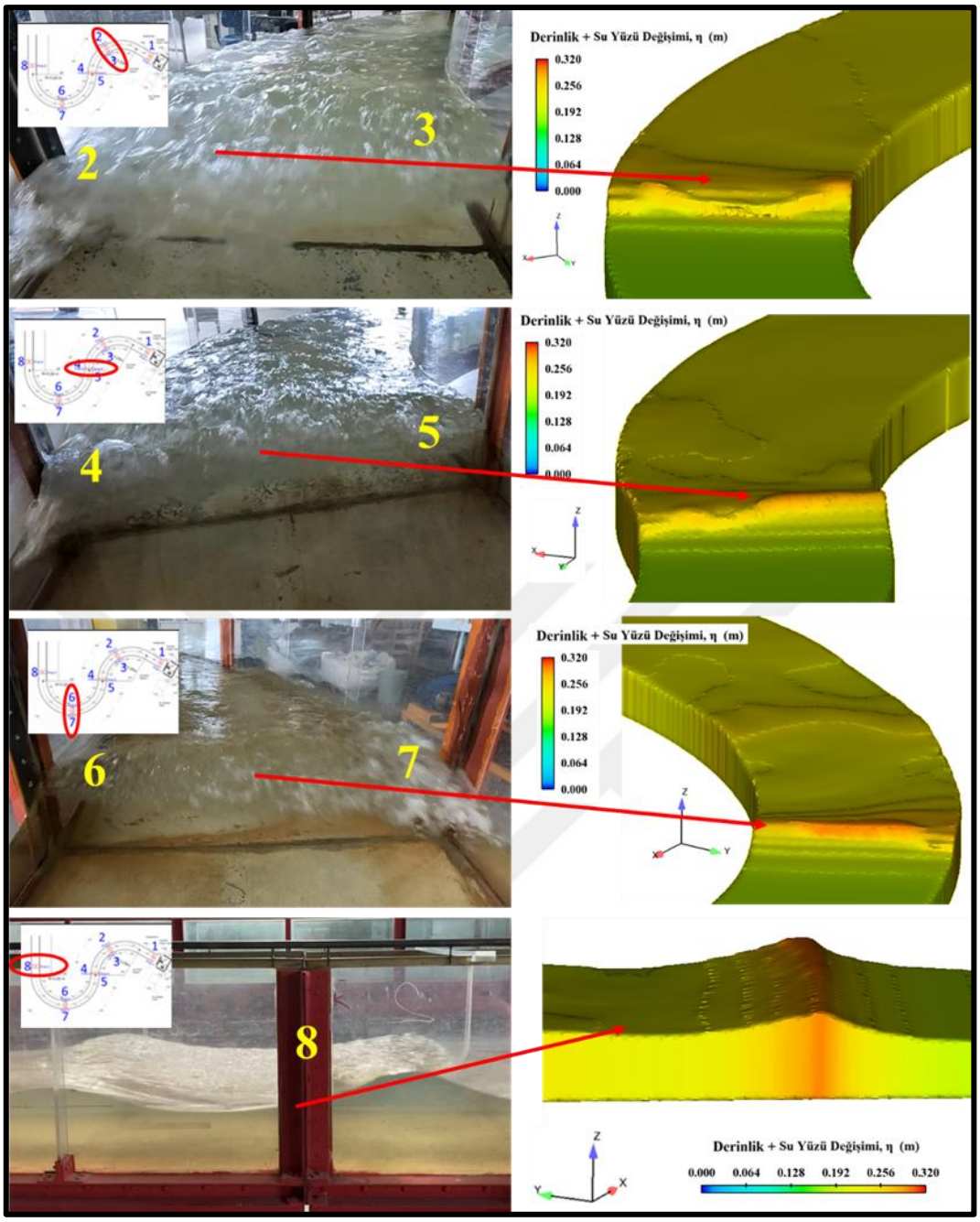
Şekil 6.59 Kıvrımlı kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasına ait FLOW-3D ile elde edilen su yüzü değişimleri (a^+/d=0.69 oranı ve Q_0=0 m^3/s akım koşulları)

Şekil 6.60'da d=25 cm derinlik ve a^+/d= 0.24 oranında Q_0=0 m^3/s akım koşulları altında tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi niteliksel olarak incelenmiştir. Her kesitte deney esnasında çekilen fotoğraflar ile sayısal modelden elde edilen üç boyutlu görsel çıktılar ile karşılaştırılmıştır. Prob 6 ve 7'nin bulunduğu kesitte tsunami dalgası kırılmaya uğramayarak dalgalı bore şeklini almaya başlamıştır. Deneyde görülen dış kıvrımda pozitif genliğin daha yüksek olması sayısal modelde de gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Prob 4 ve 5'in bulunduğu kesitte hem sayısal modelde hem deneysel fotoğraflardan pozitif genlik artmaktadır. İkisinde de iç kıvrımda pozitif genlik daha yüksek olmaktadır. Prob 6 ve 7'nin bulunduğu kesitte yine dış kıvrımda pozitif genlik hem sayısal modelde hem de deneysel modelde daha yüksek olduğu görülmektedir. Son kesitte (Prob 8)ise kıvrımları geçen tsunami dalgası her iki modelde kırılmaya uğramayarak kreti düzleşmektedir. İlk öncül dalgayı takip eden ikincil dalgaların sayısı diğer bir ifadeyle dalgalı bore oluşumu sayısal model görsel çıktıları ve deneylerden elde edilen fotoğraflar ile örtüşmektedir.

Şekil 6.61'de d=20 cm derinlik ve a^+/d=0.69 oranında Q_0=0 m^3/s akım koşulları altında tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi niteliksel olarak incelenmiştir. Her kesitte deney esnasında çekilen fotoğraflar ile sayısal modelden elde edilen üç boyutlu görsel çıktılar ile karşılaştırılmıştır. Prob 2 ve 3'ün bulunduğu kesitte tsunami dalgası kırılmaya uğradığı hem sayısal model hem de deney fotoğrafında görülmektedir. Burada sayısal modelde kullanılan hesaplama ağı hücre boyutuna bağlı olarak kırılma yapısı bir miktar farklı görülmektedir. Bunun da temel sebebi FLOW-3D sayısal modelin blok hesaplama ağı yapısı kullanılmasıdır. Benzer şekilde Prob 4,5,6 ve 7'nin bulunduğu her iki kesitte aynı davranış görülmektedir. Bu probların bulunduğu kesitlerde tsunami dalgası dış kıvrımda daha önde olmaktadır. Bu durum sayısal modelin görsel çıktılarında ve deney fotoğraflarında da görülmektedir. d=20 cm derinlik ve a^+/d=0.69 bore gücündeki tsunami dalgası için kıvrımları geçtikten sonra son probda hem sayısal model görsel çıktılarında hem de deney fotoğraflarında kırılma etkisinin azalarak dalgalı bore formunun oluşmaya başladığı görülmektedir.



Şekil 6.60 Kıvrımlı kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasına ait deney fotoğraflarının ve FLOW-3D ile elde edilen simülasyon görsellerinin karşılaştırılması ($a^+/d = 0.24$ bore gücü ve $Q_0 = 0$ m³/s akım koşulları için)



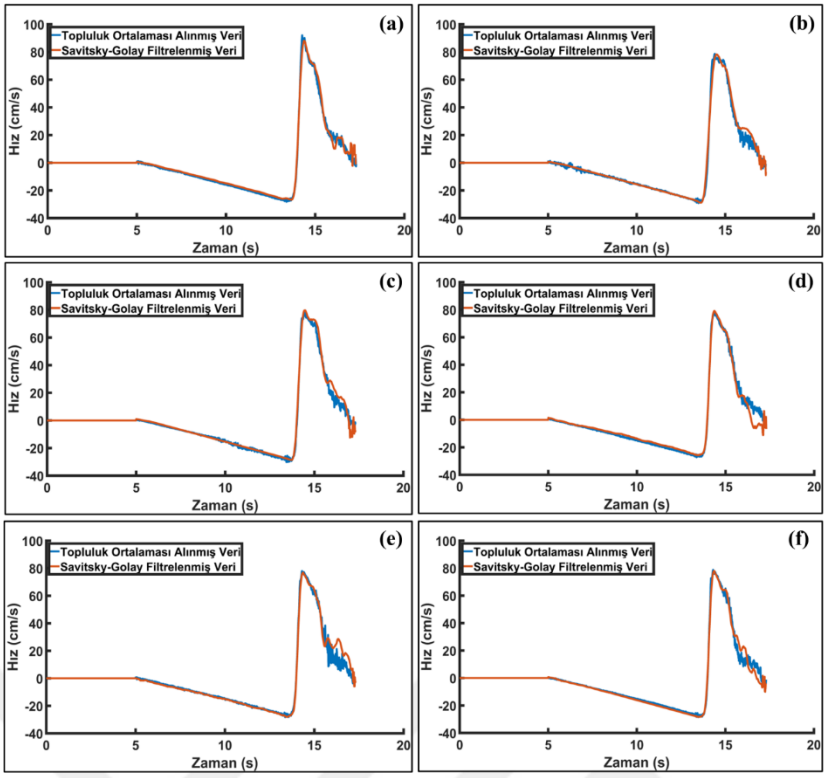
Şekil 6.61 Kıvrımlı kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasına ait deney fotoğraflarının ve FLOW-3D ile elde edilen simülasyon görsellerinin karşılaştırılması ($a^+/d = 0.69$ bore gücü ve $Q_0 = 0$ m³/s akım koşulları için)

6.5.2 Tsunami Dalgasının İlerlemesi Esnasında Elde Edilen Akım Hızlarının Sayısal Model ile İncelenmesi

6.5.2.1 Hız-Zaman Serilerinde Eksik Verilerin Tamamlanması

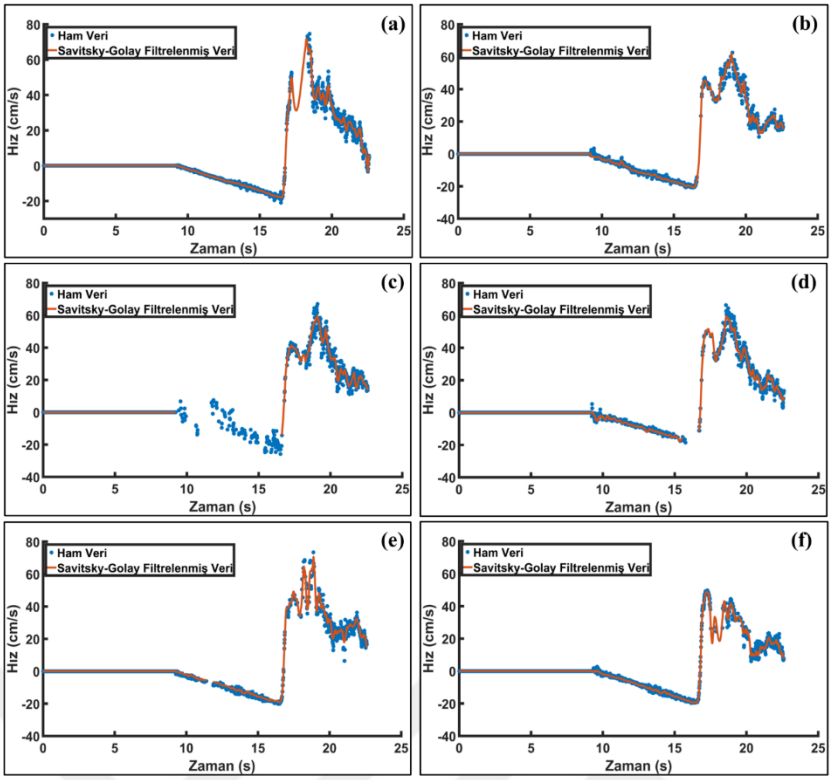
Bu bölümde kıvrımlı kanalda tsunami dalgası yayılımı esnasında ölçülen akım hızlarına ait hız-zaman verileri incelenerek sayısal modelin tsunami dalgası ilerlerken akım hızlarını tahmin etmekteki performansı tartışılacaktır. Yine su seviyesi değişimlerinde olduğu gibi NRMSE ve MAX hata metrikleri kullanılarak sayısal modelin hız-zaman serisi ile doğrulanması gerçekleştirilecektir. Fakat ani değişen kararsız akım şartlarında akım yapısından kaynaklı anlık veri kayıpları bulunabileceği ve dalganın kırılarak köpüklenmesi sonucunda ADV ile yapılan ölçümlerin zorlaşabileceği ifade edilmiştir. Bu durum, deneysel verilerle sayısal modeli doğrulamayı zorlaştırmakta ve hata metriklerinin yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, tsunami dalgasına ait hız-zaman serilerindeki eksik veriler ileri interpolasyon teknikleri ile tamamlanmış ve Reynolds ayrışımı için Savitsky-Golay tipinde filtreleme uygulanmıştır (Savitzky ve Golay, 1964; Schafer, 2011). Mansap konumunda her noktada ADV ile gerçekleştirilen ölçümler 40 defa tekrar edilerek topluluk/grup ortalaması (ensemble averaging) alınmıştır. Bu nedenle, MANSAP-5 kesitinde güvenli ölçüm verileri olarak hız-zaman serileri kullanılarak Savitsky-Golay tipinde filtreleme yönteminin bu veri setleri için kullanılabilirliği incelenmiştir (Şekil 6.62).

Burada gerçekleştirilen ölçümlere ait topluluk/grup ortalaması alınmış akım doğrultusundaki hız verileri ve her derinlikte 40 ölçümden rastgele seçilen bir ölçüm için uygulanan Savitsky-Golay tipinde filtrelenmiş hız verileri karşılaştırılmaktadır. Savitsky-Golay tipinde filtrelenmiş veriler, topluluk ortalaması verileri ile başarılı şekilde örtüşebilmektedir. Dalga profilleri incelendiğinde, kanaldan suyun çekilmesi ile oluşmaya başlayan N-dalganın çukurundan itibaren ve dalga tepesi ile onu takip eden ardıl yapıyla gayet uyumlu olmaktadır. Böylece Savitsky-Golay tipinde filtreleme yöntemi, topluluk ortalaması verileri ile doğrulanmıştır. Bu doğrulama ile Savitsky-Golay tipinde filtreleme diğer ölçüm konumlarındaki hız-zaman serileri üzerinde de uygulanabileceğini göstermektedir.

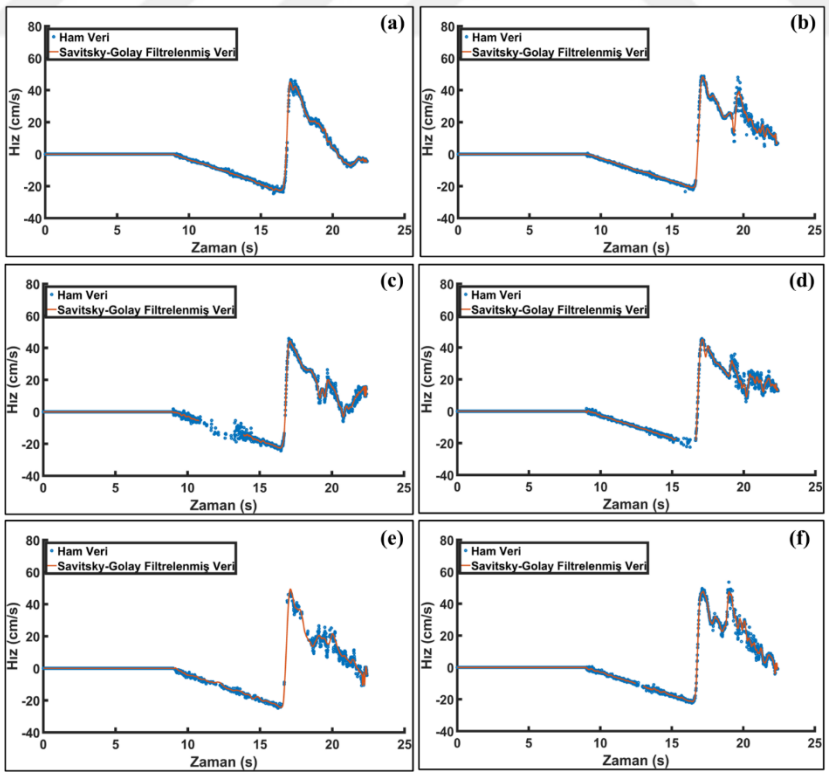


Şekil 6.62 a^{+}/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MANSAP-5 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)

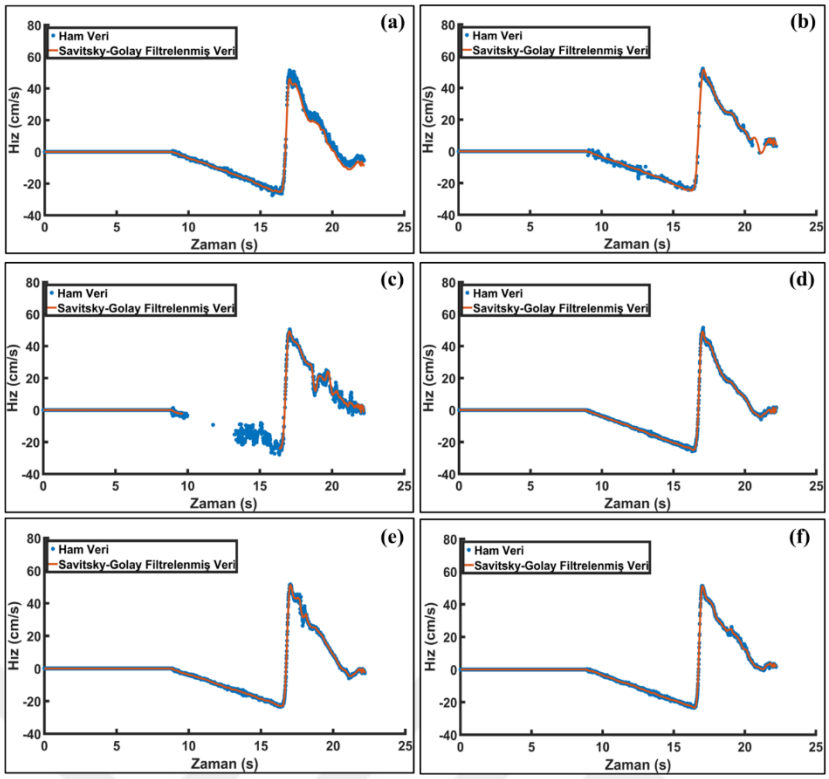
Şekil 6.63 ile 6.72 arasında sırasıyla 4A, 4B, 4C, 3A, 3B, 3C, 2A, 2B, 2C ve MEMBA-1 ölçüm konumlarındaki tsunami yayılımı esnasında elde edilen akım doğrultusundaki hız-zaman serilerine ait verilerin Savitsky-Golay tipi filtrelenmiş hali sunulmaktadır. Her hız-zaman serisinde Savitsky-Golay başarılı şekilde verileri filtrelemiştir. Savitsky-Golay filtreleme yöntemi uygulanmadan önce bir veri setindeki miktarı fazla olan eksik veri kısımları tamamlanmalıdır. Burada veri setlerindeki eksik veriler ikinci dereceden interpolasyon yöntemleri ile tamamlanmıştır. Fakat her ölçüm konumunda bilhassa tabandan itibaren y=4.5 cm derinlikte (y=4.5 cm) dalga çekilirken gerçekleştirilen ölçümlerde çok sayıda eksik veri bulunmaktadır. Bu kısımdaki eksik veriler üzerine kullanılan istatistiksel yöntemlerin homojenliği sebebiyle interpolasyon teknikleri uygulanamamıştır. Dolayısıyla Savitsky-Golay tipi filtreleme de gerçekleştirilmemiştir. Benzer şekilde bazı marjinal bölgelerde dalga çekilmesi esnasında ADV ile gerçekleştirilen akım hızı ölçümlerinde kısa süreli kayıplar bulunmaktadır. Buralar için de interpolasyon teknikleri ve Savitsky-Golay tipi filtreleme uygulanmamıştır. Bunlar 4A konumu için y=6.5 ve y=8.5 cm, 4B konumu için y=6.5 ve y=10.5 cm, 2A konumu için y=6.5 cm, 2C konumu için y=2.5 cm'de görülmektedir.



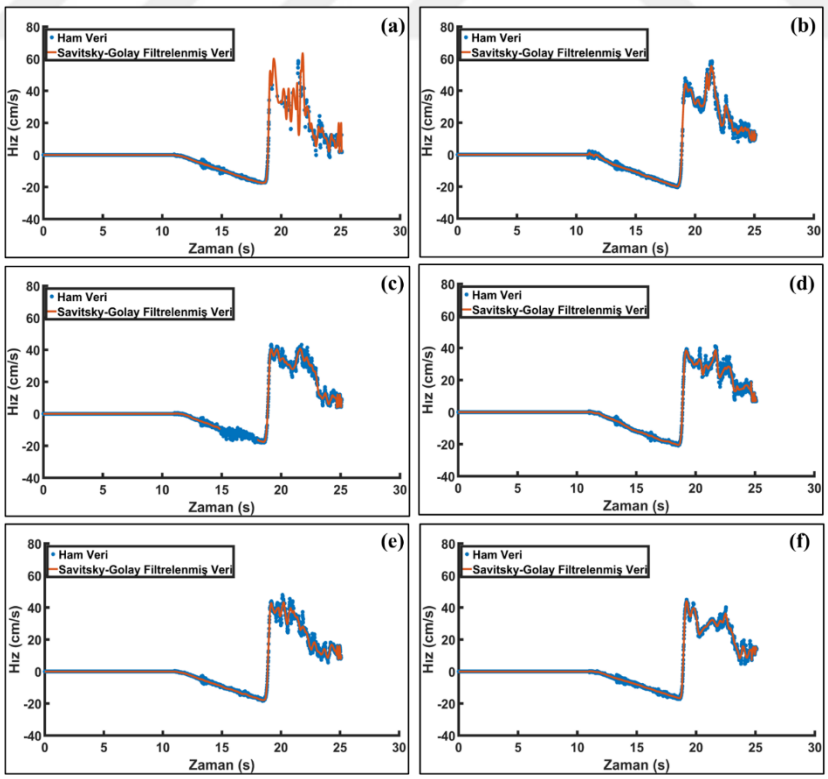
Şekil 6.63 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



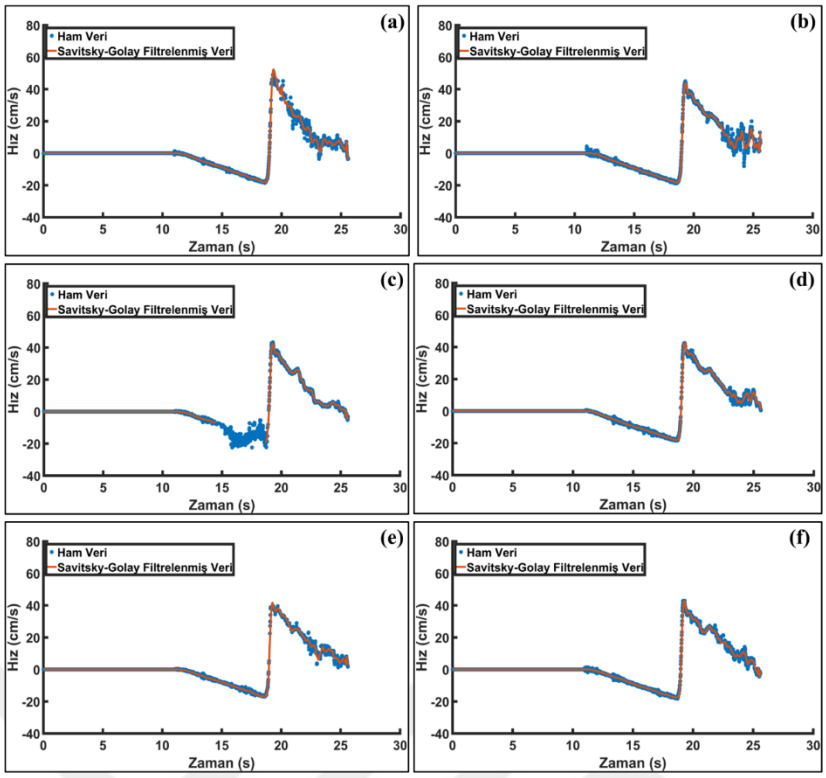
Şekil 6.64 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



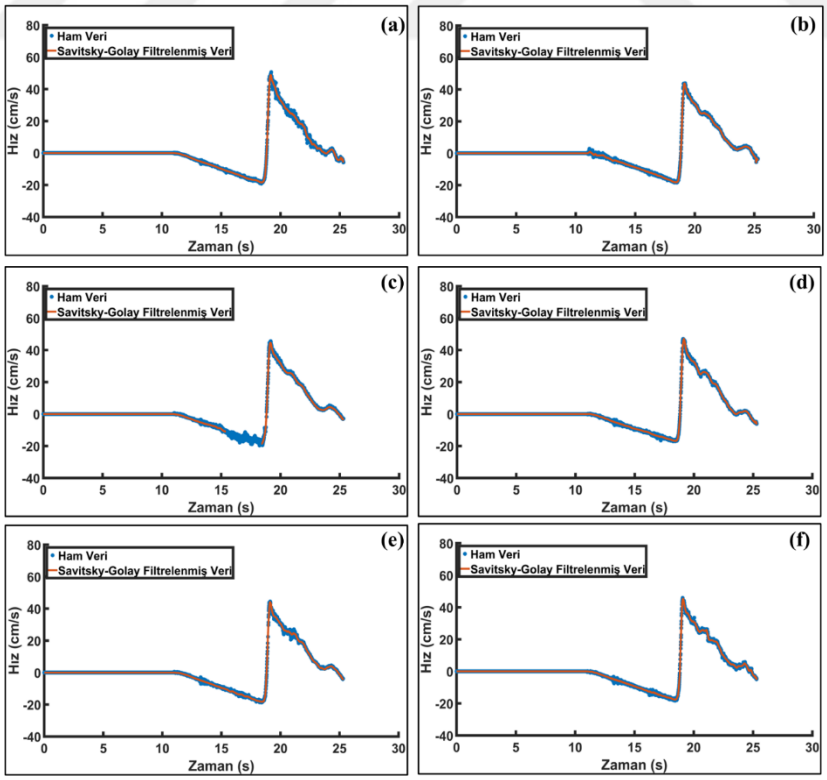
Şekil 6.65 $a^{+}/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (4C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



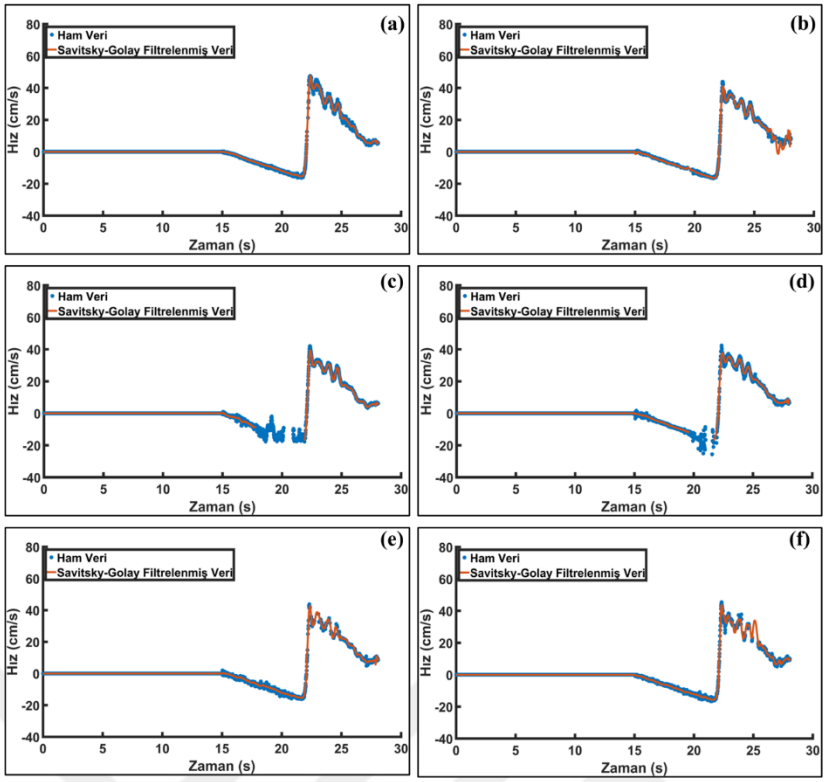
Şekil 6.66 $a^{+}/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



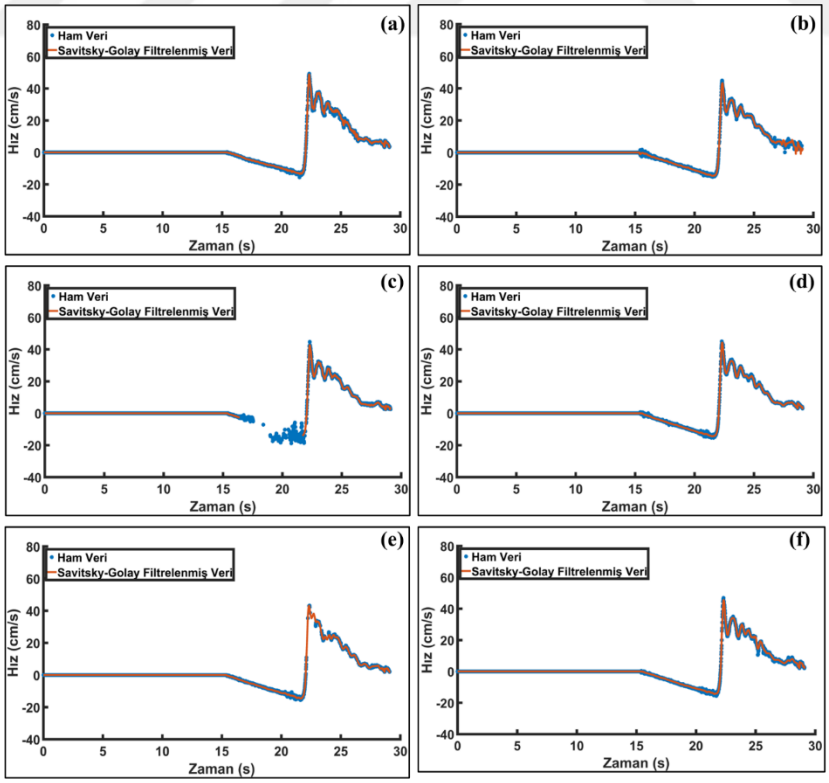
Şekil 6.67 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



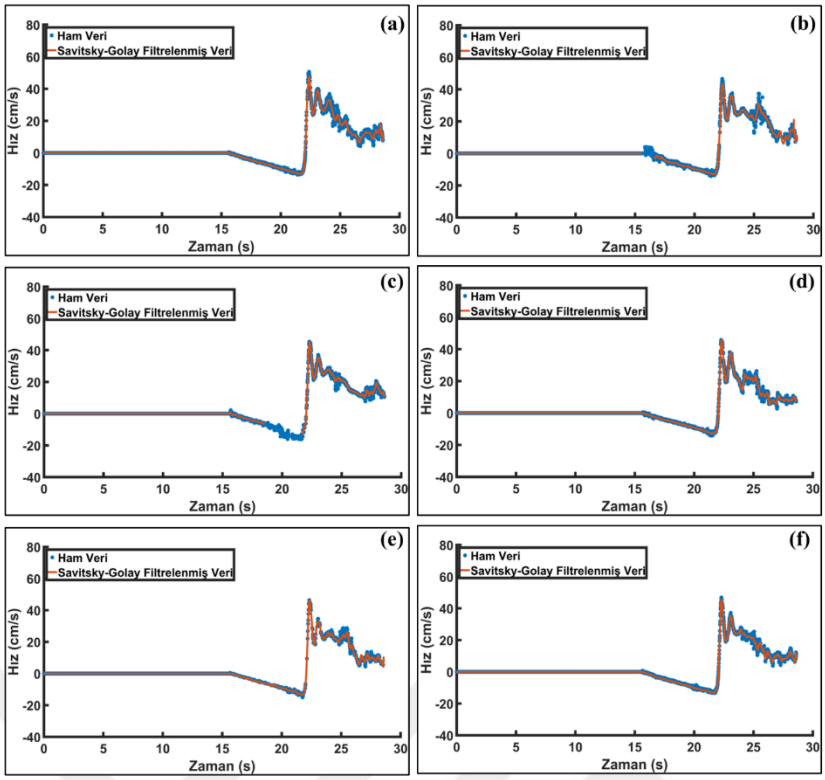
Şekil 6.68 $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (3C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



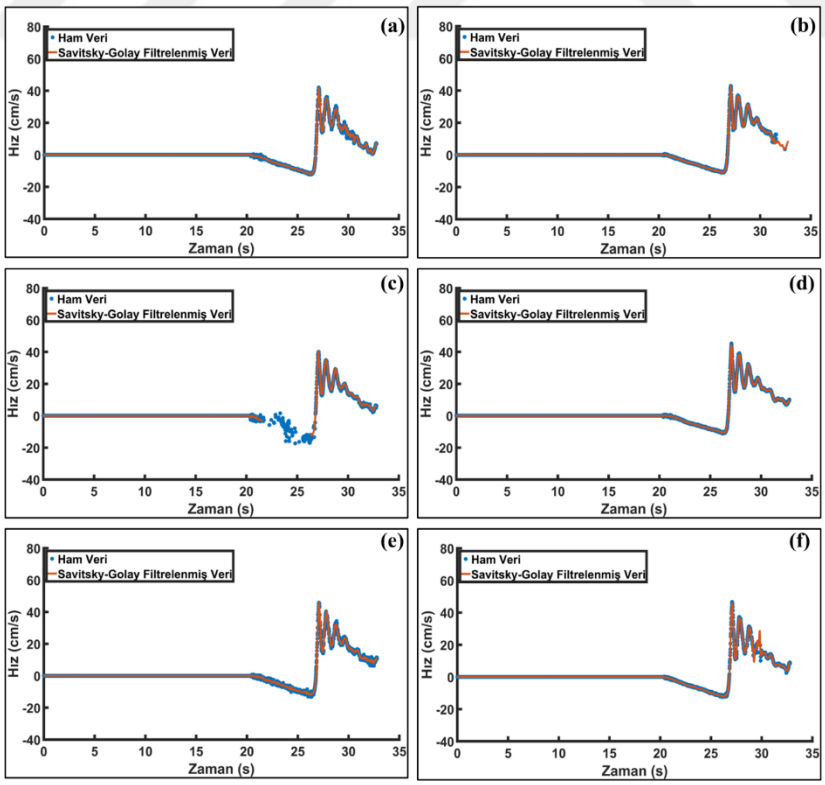
Şekil 6.69 $a^{+}/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



Şekil 6.70 $a^{+}/d=0.69$ bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



Şekil 6.71 a^{+}/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (2C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



Şekil 6.72 a^{+}/d=0.69 bore gücüne sahip N-dalganın Savitsky-Golay filtrelenmiş boyuna hız bileşeni zamansal değişimleri (MEMBA-1 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)

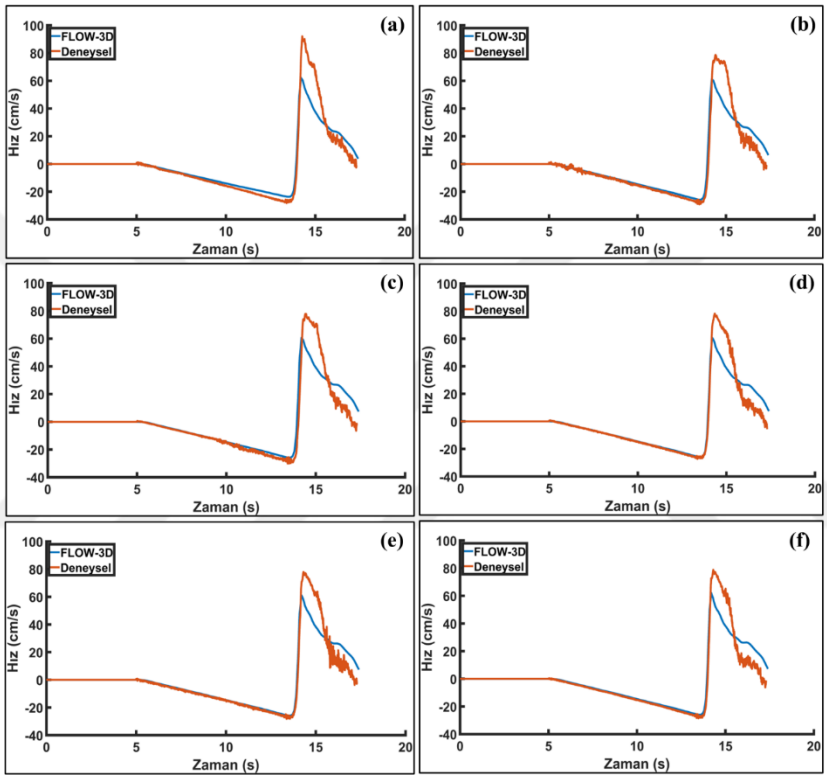
6.5.2.2 Tsunami Dalgasının İlerlemesi Esnasında Elde Edilen Akım Hızlarının Sayısal Modelleme ile İncelenmesi

MAX hata metrik değeri 4A konumu dışında her ölçüm konumunda kabul edilebilir hata sınırının (%25) altında kalmaktadır. Tüm model için %16.58 hata ortalaması ile pozitif genliklerin hızlarını tahmin etmede iyi bir performans göstermektedir (Tablo 6.33). Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerde, 4A konumunda dalganın ayrıştığı ve öncül dalganın arkasında daha yüksek hıza sahip bir ikincil dalganın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, sayısal model bu durumu simüle edememektedir. Benzer bir durum 3A konumunda de mevcuttur ve bu nedenle bu kesitte MAX hata miktarı yine yüksek çıkmaktadır. Bu durum, hız-zaman serilerinin karakteristiğini de etkilemektedir. Ancak, kanal boyunca hız-zaman serilerinde MEMBA-1 konumu (su seviyesi değişimleri için Prob 8) dışında belirgin bir faz farkı gözlemlenmemiştir. Bu sebeple, memba dışında bütün ölçüm konumlarında NRMSE hata miktarı sınır değerin (%15) altında kalmaktadır. Sayısal model, NRMSE hatası için %9.28 gibi bir ortalamaya sahip olup, hız-zaman serilerine ait karakteristikleri yakalama konusunda, su seviyesi değişimlerinde olduğu gibi, oldukça iyi bir performans sergilemiştir.

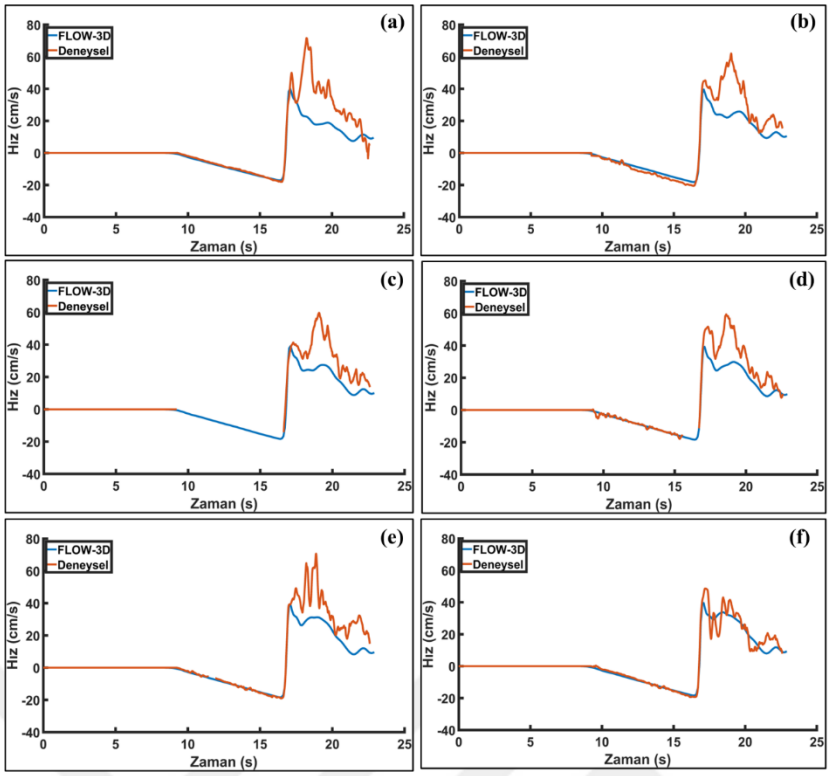
Tablo 6.33 Kıvrımlı kanalda ilerleyen tsunami dalgasına ait hız-zaman serilerinin hata metrikleri

Ölçüm Konumu	NRMSE (%)	MAX (%)
MANSAP-5	8.02	22.62
4A	11.42	34.77
4B	7.08	13.07
4C	4.14	12.32
3A	10.61	20.90
3B	9.54	11.78
3C	5.32	11.46
2A	9.73	10.54
2B	7.43	12.68
2C	8.45	16.09
MEMBA-1	20.32	16.12
Ort. :	9.28	16.58

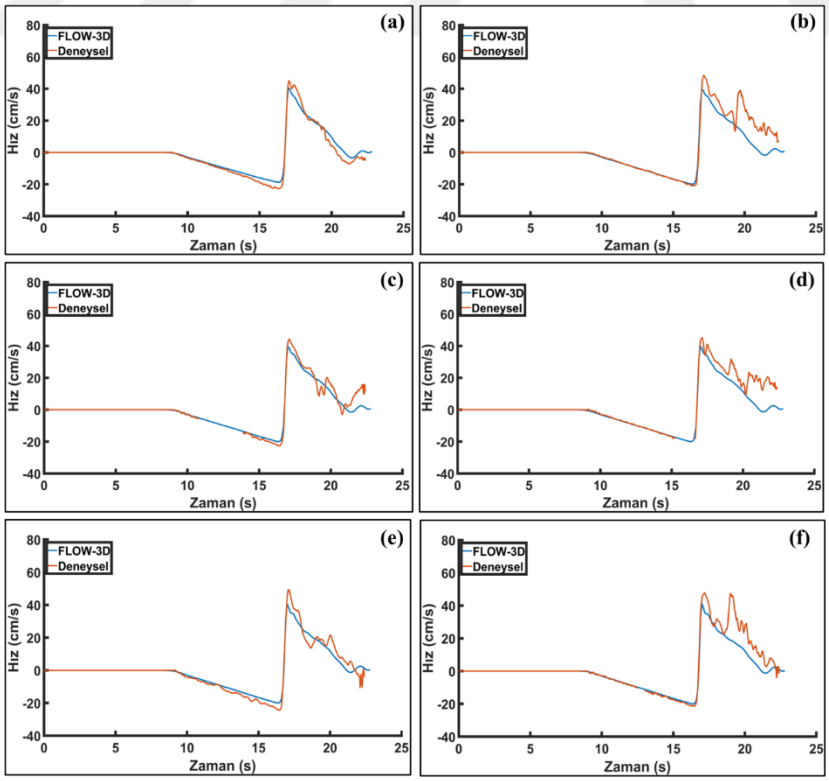
d=20 cm derinlikte, a^+/d=0.69 bore gücünde ve Q_0= 0 m^3/s akım koşulları (statik hal) altında oluşturulan tsunami dalgasına ait sayısal model ile deneysel modelden elde edilen hız-zaman serilerinin karşılaştırılması Şekil 6.73 ile 6.83 arasında verilmektedir. Burada, tabandan itibaren y=0.5, y=2.5, y=4.5, y=6.5, y=8.5 ve y=10.5 cm derinliklerde ADV ile ölçülen hız-zaman serileri (kararsız ani değişen akım koşulları) aynı noktada sayısal modelden elde edilen hız-zaman serileri ile karşılaştırılmıştır. FLOW-3D ile oluşturulan sayısal modelde kanal girişinden itibaren maksimum hızı her kesitte daha düşük hesaplanmıştır.



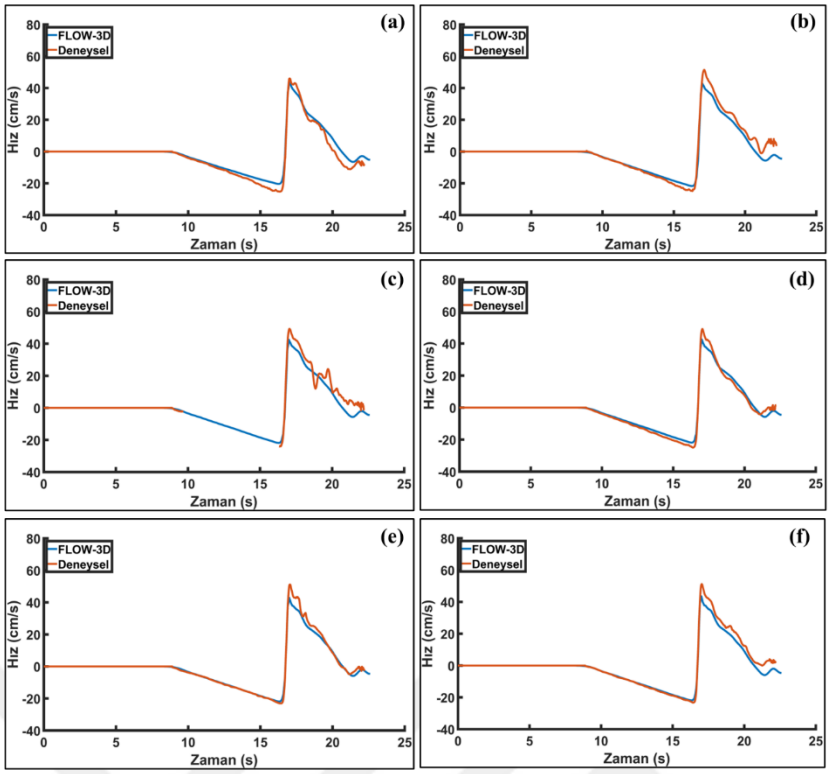
Şekil 6.73 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (MANSAP-5 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



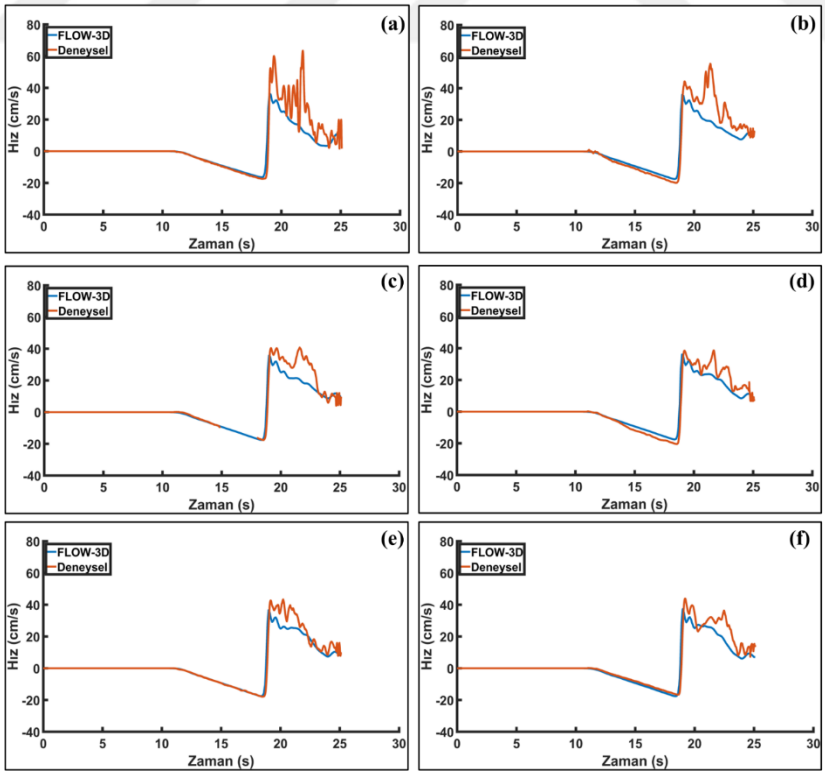
Şekil 6.74 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (4A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



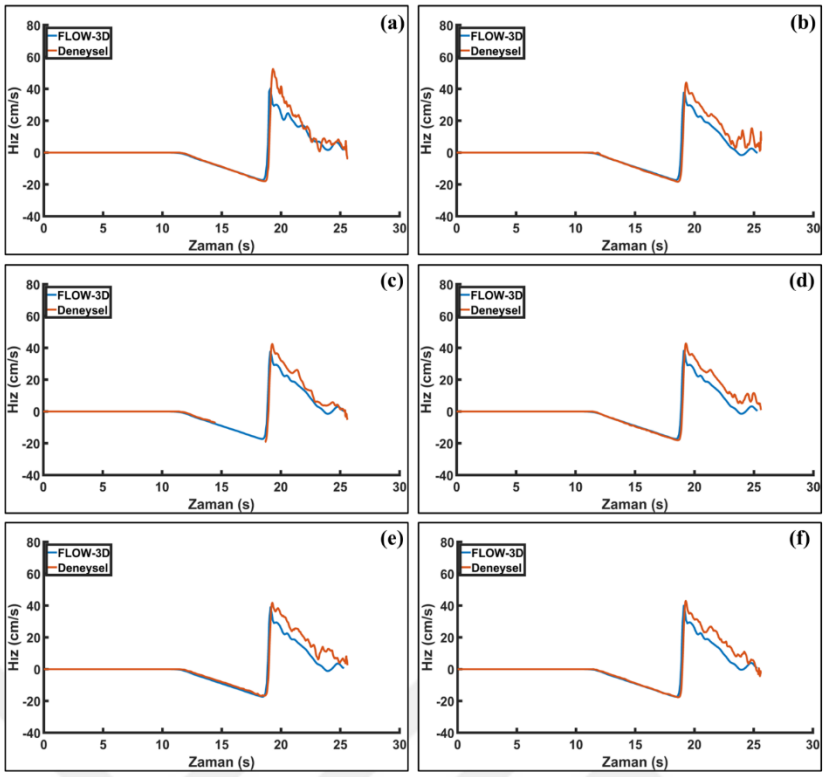
Şekil 6.75 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (4B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)cm



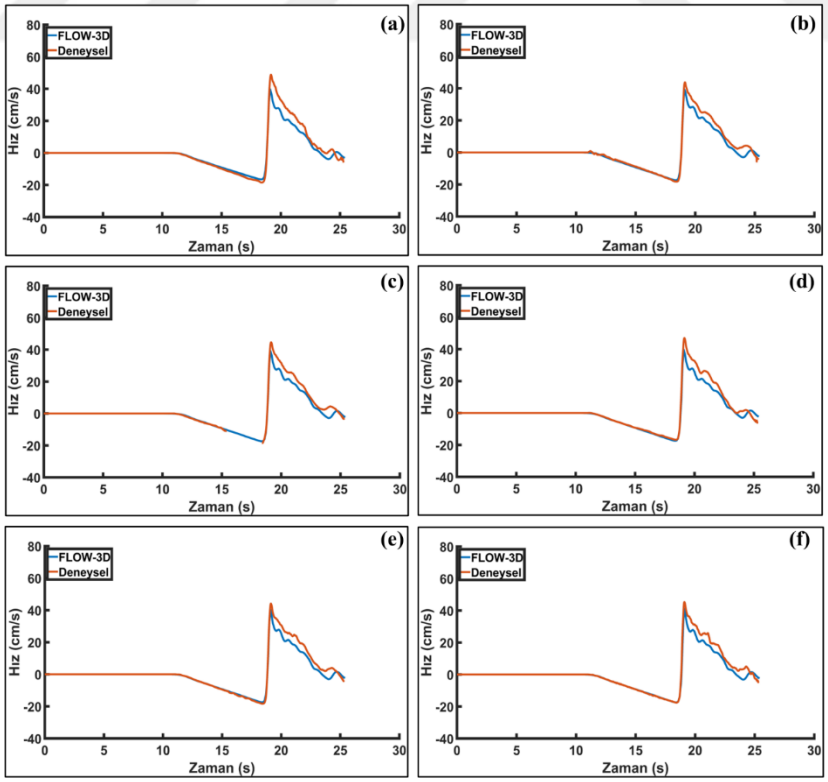
Şekil 6.76 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (4C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



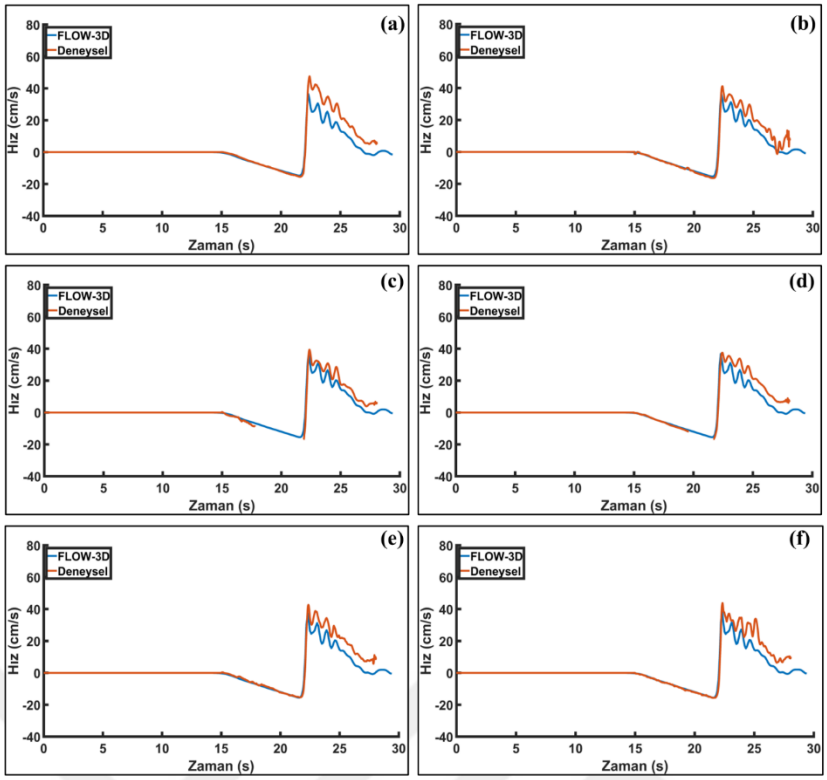
Şekil 6.77 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (3A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



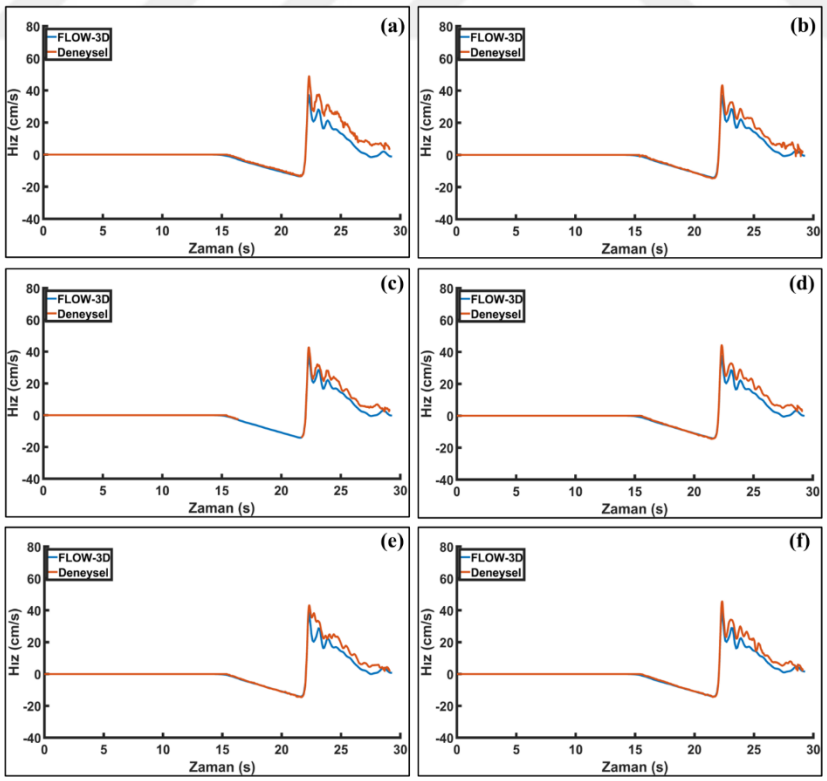
Şekil 6.78 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (3B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



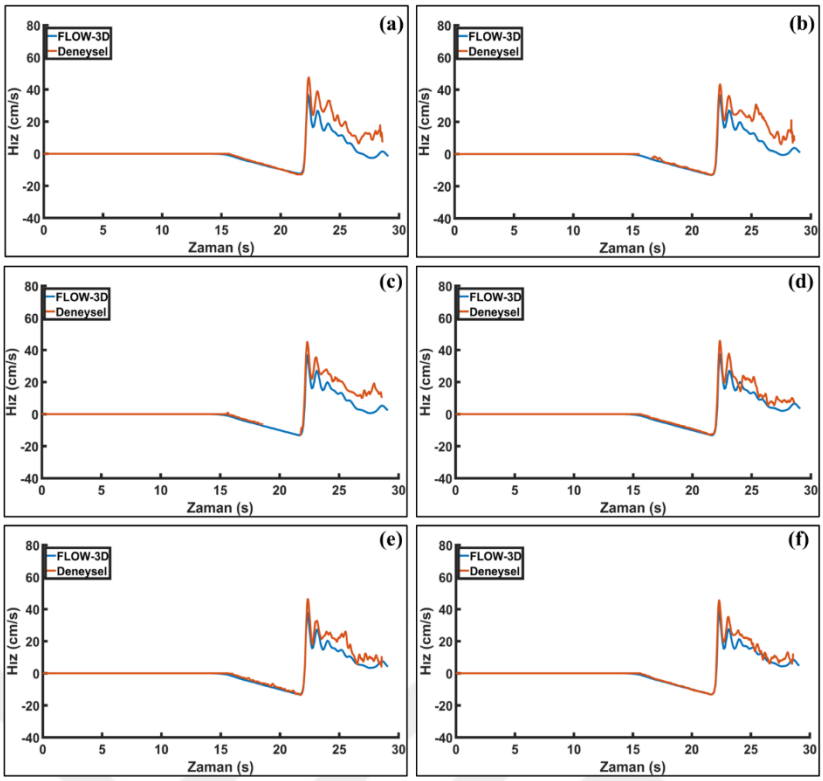
Şekil 6.79 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (3C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



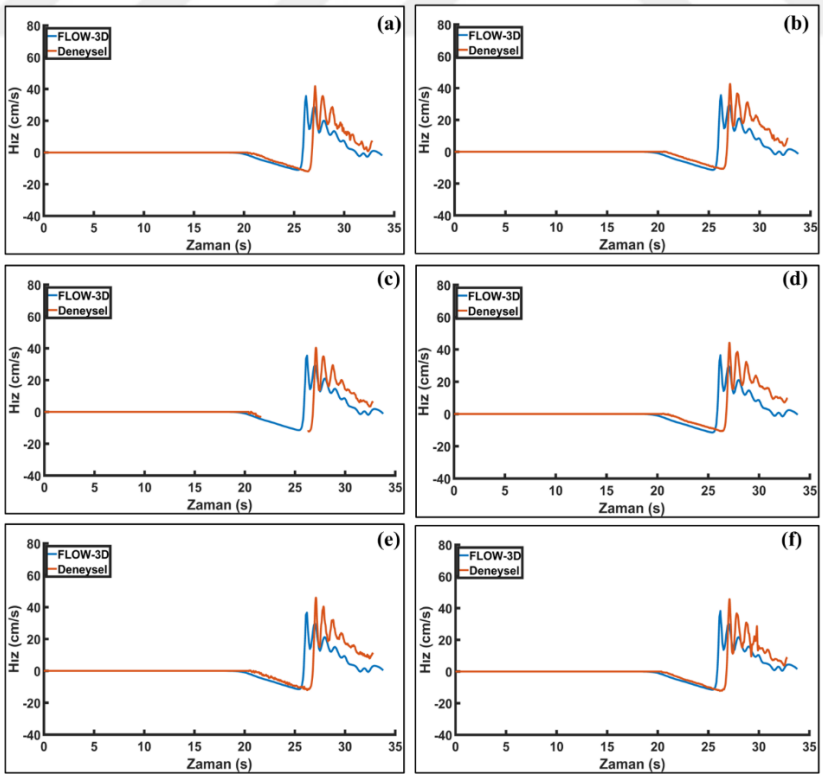
Şekil 6.80 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (2A konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



Şekil 6.81 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (2B konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



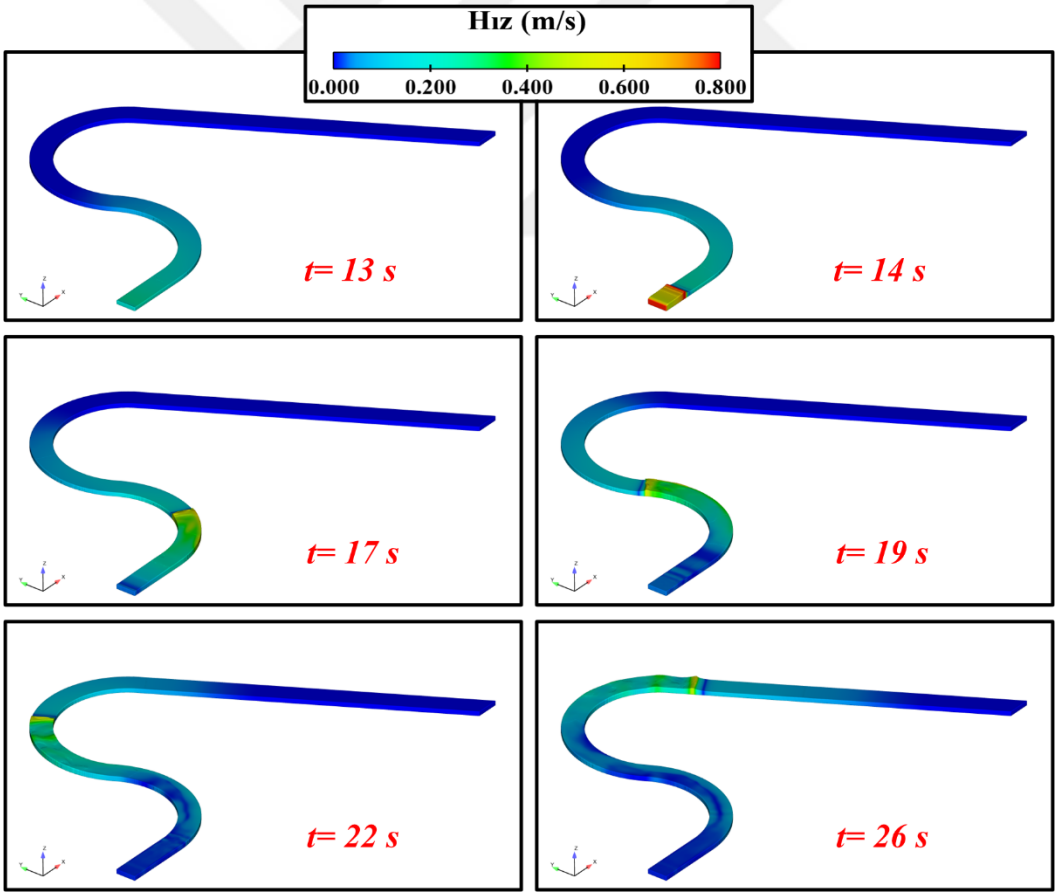
Şekil 6.82 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (2C konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)



Şekil 6.83 FLOW-3D ile deneysel verilerden elde edilen boyuna hız bileşeni zamansal değişimlerinin karşılaştırılması (MEMBA-1 konumu, a) y=0.5 cm, b) y=2.5 cm, c) y=4.5 cm, d) y=6.5 cm, e) y=8.5 cm, f) y=10.5 cm)

6.5.2.3 Niteliksel Değerlendirme

Şekil 6.84'te d=20 cm derinlikte, $a^{+}/d=0.69$ oranında ve $Q_0=0$ m^3/s akım koşulları (statik hal) altında oluşturulan tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi esnasında akım hızlarına ait FLOW-3D ile edilen simülasyon sonuçları verilmektedir. Burada, 13. saniyede kanaldan su çekilmekte ve çekilme hızları görülmektedir. Dalganın tepe noktası 14. saniyede MANSAP-5 kesitinde, 17. saniyede 4. kesitte, 19. saniyede 3. kesitte, 22. saniyede 2. kesitte ve 26. saniyede MEMBA-1 kesitinde bulunmakta ve dalganın membaya doğru ilerlemesi durumundaki hız değerleri sunulmaktadır. Simülasyon sonuçlarından görüldüğü üzere sayısal modelden elde edilen dalga yayılma hızları deneysel modelden elde edilen verilerle gayet uyumlu bulunmaktadır. Tsunami dalgasının kıvrımlı kanaldan geçerken iç ile dış kıvrım arasında meydana gelen dalga ilerleme doğrultusundaki hız büyüklükleri farkı bu simülasyonda açıkça görülmektedir.



Şekil 6.84 Kıvrımlı kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasına ait FLOW-3D ile elde edilen hız büyüklükleri

6.5.3 Sayısal Modelin Uygulanabilirliği

Bu tez çalışmasında elde edilmiş bulgular ışığında deneysel verilerle doğruluğu test edilmiş FLOW-3D sayısal modeli kullanılarak, tsunami dalgasının doğal akarsularda ilerleyişi incelenebilecektir. Böylece tsunamilerin akarsulara girdikten sonra çevresinde meydana getireceği olası tahribatlar öngörülebilecektir. Bu durum şehir ve bölge planlama açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle bu bölümde mevcut sayısal modelin uygulanabileceği bazı önemli akarsu örneklerinden bahsedilmiştir. Burada kıyı bölgelerinde yer alan ve belirli hidro-morfolojik özellikler taşıyan altı farklı akarsu kesiti verilmiştir. Akarsu seçim kriterleri arasında; belirgin menderesli (kıvrımlı) morfolojiye sahip olmaları ve çevresinde yoğun kentsel yerleşim bulunması önem arz etmektedir.

Ülkemizde bulunan Küçük Menderes Nehri ve Büyük Menderes Nehri, belirgin kıvrımlı (menderesli) morfolojik yapıları nedeniyle bu tez kapsamında yürütülen analizler açısından özel bir öneme sahiptir. Küçük Menderes Nehri denize döküldüğü mansaptan itibaren peşi sıra gelen birçok kıvrım bulundurması bu tez çalışması için önemli bir örnek olmaktadır (Şekil 6.85). Büyük Menderes Nehri de benzer şekilde kıvrımlı yapısıyla önemli olmaktadır. Aynı zamanda iki kola ayrılarak bir kolunun kıvrımlı morfolojiye sahip olması diğer kolunun ise kıvrımsız morfolojiye sahip olması incelenebilecek önemli bir akarsu örneği teşkil etmektedir (Şekil 6.86).

Kadıköy Kurbalığıdere, Bakırköy Ayamama Deresi, Sığacık Körfezi Azmak Deresi ve Alaçatı Karşıyaka Azmağı ise sayısal modelin uygulanabilirliği için diğer örnek akarsulardır. Bu bölgeler, Marmara Denizi ve Güney Ege Bölgesi'ndeki aktif tektonik sistemlerle ilişkili olmaları bakımından sismik kaynaklı tsunami tehlikelerinin değerlendirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Ayrıca, Kadıköy Kurbalığıdere ve Bakırköy Ayamama Deresi çevresinde yoğun kentleşmenin bulunması, bu alanları yalnızca hidrodinamik analizler açısından değil, aynı zamanda kentsel risk yönetimi ve mekânsal planlama açısından da öncelikli çalışma alanları haline getirmektedir. Kurbalığıdere çevresinde yoğun şehirleşme bulunmasından dolayı olası tsunami etkilerinin incelenmesi açışından oldukça önem arz etmektedir. Çevresinde Söğütlüçeşme Tren İstasyonu ve Fenerbahçe Şükrü Saraçoğlu Stadyumu gibi önemli yapılar bulunmaktadır (Şekil 6.87).

Ayamama Deresi ise yine çevresinde yoğun şehirleşme bulunmasından dolayı önemli bir akarsudur. Çevresinde oldukça yüksek katlı binaların bulunduğu yoğun bir şehirleşme mevcuttur. Atatürk Havalimanı, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Ataköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi, Dünya Ticaret Merkezi ve İstanbul Fuar Merkezi bu bölgede bulunmaktadır. Ayrıca Marmaray tren hattı bu derenin üzerinden geçmektedir (Şekil 6.88).

30 Ekim 2020'de Seferihisar (İzmir, Türkiye) açıkları ve Samos Adası (Yunanistan) arasında doğu-batı doğrultusunda normal atımlı faylanma sonucunda bir deprem meydana gelmiştir. Bu depremin Richter ölçeğine göre büyüklüğü Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne (KOERI) göre 6.9 ve Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırma Kurumu'na (USGS) göre 7.0 olarak belirlenmiştir. Deprem Türkiye'nin Ege Bölgesi'nin kuzey batısında Çeşme Alaçatı'dan güneydoğusunda ise Gümüldür'e kadar etkileyen bir tsunami yaratmıştır (Yüksel vd., 2020). Sığacık Körfezi Azmak Deresi'nin olduğu bölgede bu tsunamiden etkilenmiştir (Şekil 6.89). Benzer şekilde Karşıyaka Azmağı da bu tsunamilerden etkilenen bölgeler arasındadır (Şekil 6.90). Dolayısıyla bu bölgeler tsunamilerin mevcut akarsularda davranışının incelenmesi açışından önem kazanmaktadır. Ayrıca tüm bu akarsular morfolojik olarak kıvrımlı (menderesli) olduğu için bu tez çalışmasının konusu kapsamına girmektedir.

Sayısal modelin bu akarsu kesitlerine uygulanmasıyla, tsunami dalgasının kanal içerisine giriş yaptığı andan itibaren dalga şekli, yayılma hızı, maksimum tırmanma yüksekliği, dalga genliği, yanal taşkın davranışı ve enerji yayılımı gibi birçok kritik hidrodinamik parametre detaylı biçimde analiz edilebilecektir. Özellikle dalga-akım etkileşimi, kıvrım bölgelerinde yanal momentum transferi ile daha karmaşık hale geldiğinden, bu bölgelerde oluşabilecek su baskını alanları sayısal model aracılığıyla öngörülebilir. Böylece belirli bir tsunami senaryosu altında, hangi alanlarda riskin yüksek olduğu, kritik altyapıların (örneğin köprüler, ulaşım hatları, enerji ve su tesisleri) nasıl etkilenebileceği ve hangi bölgelerde acil tahliye ihtiyacının ortaya çıkacağı gibi bilgiler önceden elde edilebilecektir.

Akarsularda bulunan köprü gibi temel ulaşım yapılarının güvenliği de tsunami dalgalarının akarsularda ilerlemesi durumunda önemli olmaktadır. Çünkü akarsulara giren ve kilometrelerce ilerleyen tsunami dalgaları köprü ayaklarında oyulmaya sebep olarak köprülerin yıkılmasına neden olabilmektedir. Aynı

zamanda afet anında ulaşım açışından önemli olan bu yapılar tsunami esnasında sular altında kalabilmektedir. Akarsular üzerinde bulunan ve tsunami dalgasının akarsuya girişi ile beraber tehlike altında kalabilen diğer önemli yapılar da su yapılarıdır. Önemli su kütlelerini rezervuarlarında barındıran ve taşkın koruma, elektrik üretimi ile içme suyu sağlama gibi temel ihtiyaçları karşılayan barajlar akarsu içerisinde tsunami dalgasının ilerlemesi durumunda tehlike altında kalmaktadır. Her ne kadar barajlar yıkılmaya karşı mukavemeti yüksek de olsa bünyesinde bulunduran birçok tesis böylesi bir afet durumunda tahribata uğrayabilmektedir. Dolayısıyla sayısal modeller aracılığıyla elde edilen analizler buna benzer felaketlerin önceden öngörülerek tedbir alınması için önem arz etmektedir.

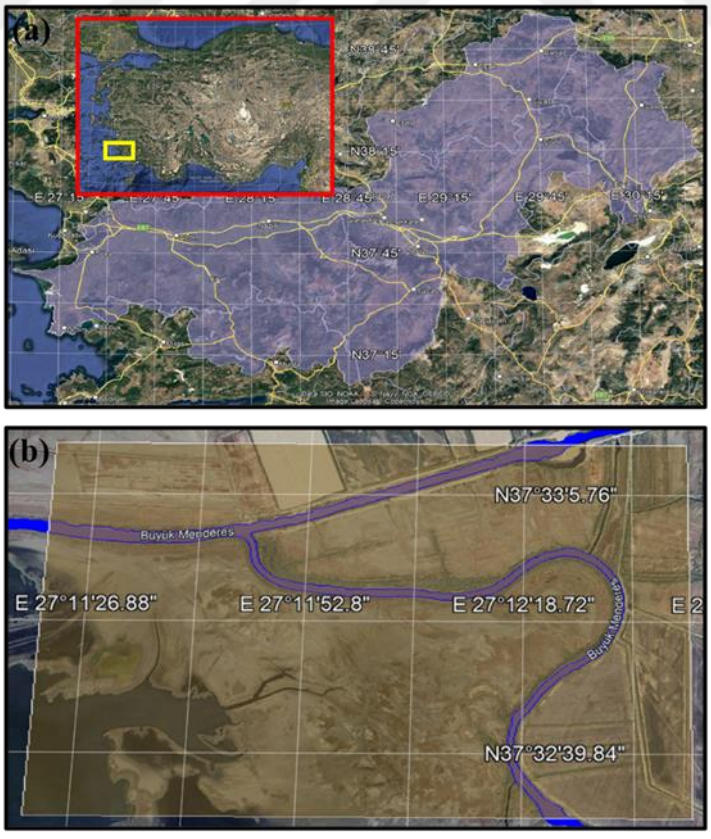
Bu analizler aynı zamanda afet risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesine de katkı sağlar. Sayısal modelleme sayesinde, tsunami etkisinin yoğunlaştığı bölgelerde koruyucu yapılar (setler, ters eğimli duvarlar, geçici bentler vb.) için yer seçimi optimize edilebilir ve yerel ölçekte kentsel planlama kararları alınabilir. Ayrıca, bu modeller ile afet sonrası müdahale ve kurtarma planlarının oluşturulması için senaryo bazlı risk haritaları üretilebilir. Özellikle Kadıköy Kurbalığıdere ve Ayamama Deresi gibi yoğun kentleşmenin olduğu alanlarda, dalga etkisinin bina temelleri, yol alt yapısı ve altyapı tesislerine olan etkisi modellenerek, afetin ikincil sonuçları daha iyi anlaşılabilir.

Buna ek olarak, model sonuçlarının coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile entegre edilmesi sayesinde, gerçek zamanlı veriyle çalışan erken uyarı sistemleri ve dinamik tahliye planları geliştirilebilir. Sayısal model ile elde edilen su yüksekliği ve akım hızı dağılımları, bölgesel direnç haritaları ile birleştirilerek bina hasar öngörüleri yapılabilir. Bu da şehir planlamacılarına, sigorta şirketlerine ve kamu otoritelerine bilimsel temelli karar alma olanağı sunar.

Sonuç olarak, FLOW-3D temelli bu sayısal model, yalnızca akademik düzeyde kıvrımlı kanallarda tsunami davranışını anlamakla kalmayıp, gerçek dünyada kritik kararların alınmasında etkin rol oynayabilecek bir mühendislik aracı olarak işlev görebilecektir. Böylece hem mevcut risklerin azaltılması hem de gelecekteki afetlere daha dirençli yerleşimlerin oluşturulması açısından önemli bir altyapı sağlayacaktır.



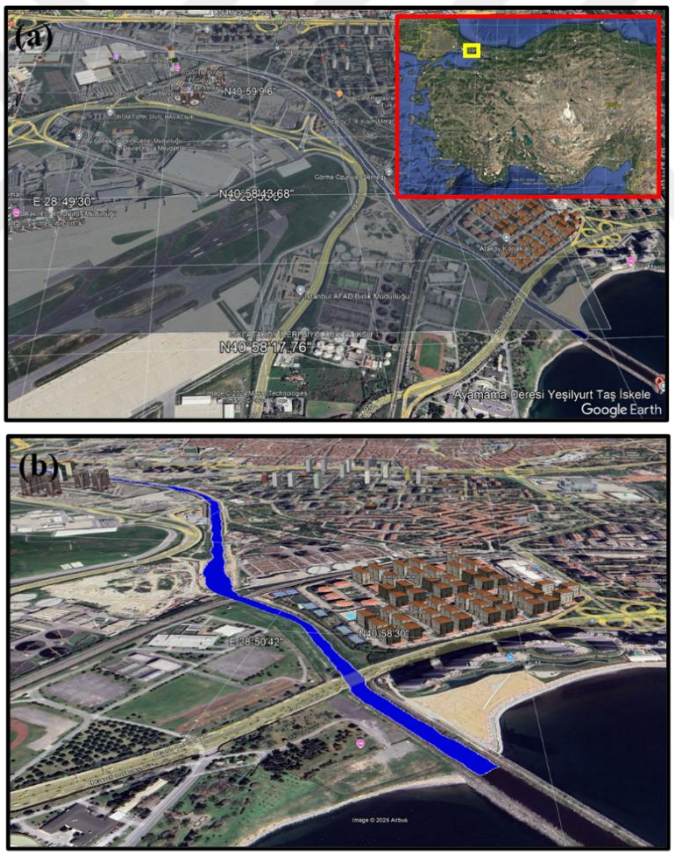
Şekil 6.85 (a) Küçük Menderes Havzası Google Earth görüntüsü ve (b) Küçük Menderes Nehri incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü



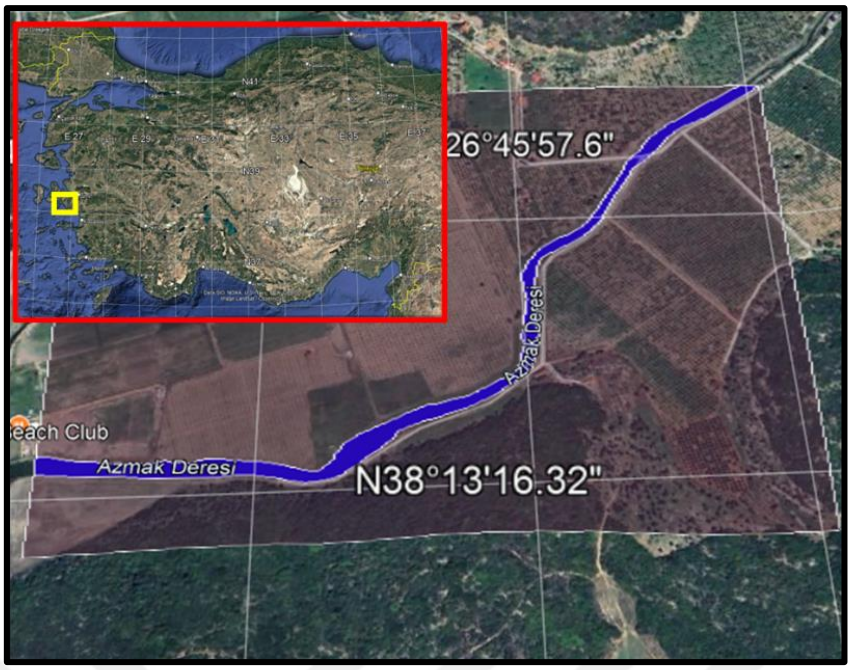
Şekil 6.86 (a) Büyük Menderes Havzası Google Earth görüntüsü ve (b) Büyük Menderes Nehri incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü



Şekil 6.87 (a) Kadıköy Kurbalığıdere incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü ve (b) Kadıköy Kurbalığıdere çevresindeki yerleşimin Google Earth görüntüsü



Şekil 6.88 (a) Bakırköy Ayamama Deresi incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü ve (b) Bakırköy Ayamama Deresi çevresindeki yerleşimin Google Earth görüntüsü



Şekil 6.89 Sığacık Körfezi Azmak Deresi incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü



Şekil 6.90 Alaçatı Karşıyaka Azmağı incelenebilecek kesitin Google Earth görüntüsü

7
SONUÇ

Bu tez çalışmasında ilk olarak laboratuvar ortamında üç farklı derinlikte (d=15, 20, 25 cm) ve üç farklı debide (Q=16, 35, 50 l/s) kıvrımlı kanalda kararlı akım koşulları incelenmiştir. ADV ile hız ölçümleri gerçekleştirilmiş ve akım doğrultusundaki hız profilleri elde edilmiştir. Kıvrımlı kanalda 13 farklı noktada hız ölçümü gerçekleştirilerek iç ile dış kıvrım arasında hız farkları incelenmiştir. Akım doğrultusunda hız profilleri, derinlik boyunca ortalama hız, kayma hızı, taban kayma gerilmesi ve türbülans kinetik enerjisi parametreleri incelenmiştir. Deneysel çalışmada kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizmasının incelenmesi için 9 farklı deney koşulu boyutsuzlaştırılmış ve kıvrımlı kanalda kararlı akımın hidrodinamik yapısı boyutsuz parametrelerle incelenmiştir. Deney koşullarının tamamı sayısal modelde kullanılmıştır. Sayısal modelleme FLOW-3D aracılığıyla HAD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal model, deney sisteminin 1:1 ölçeğinde oluşturulmuştur. MARE ile RMSE hata metrikleri kullanılarak sayısal model başarı ile doğrulanmıştır.

Bu tez çalışmasının ana konusu olarak kıvrımlı kanalda tsunami dalgasının ilerlemesi hem deneysel çalışmayla hem de sayısal modellemeyle incelenmiştir. Bu amaçla laboratuvar ortamında pnömatik dalga üreteci ile dört farklı bore gücünde (a^+/d=0.24, 0.48, 0.69, 0.95) N-dalga formunda tsunami dalgaları üretilmiştir. Tsunami dalgaları akarsularda kurak hava koşullarını temsilen kanalda akımın olmadığı statik hal durumunda ve yağışlı hava koşullarını temsilen kanalda tsunami dalgasının ilerleme yönüne zıt yönlü üç farklı debi için (Q=16, 35, 50 l/s) kararlı akım koşullarında gerçekleştirilmiştir. 16 farklı deney koşulunda kıvrımlı kanalda 8 farklı noktada dalga probları vasıtasıyla su yüzü değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, a^+/d=0.69 bore gücünde statik halde oluşturulan tsunami dalgası için ADV

aracılığıyla hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tsunami dalgasının yayılımı esnasında elde edilen akım hızları zamana bağlı kararlı olmayan ani değişen akım koşullarındadır. Bu tez çalışmasında kıvrımlı kanalda tsunami dalgasının kanal boyunca ilerlemesi FLOW-3D aracılığıyla HAD yöntemi kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel çalışmada oluşturulan 16 farklı deney koşulunun tamamı 1:1 ölçekte modellenmiştir. Hem kıvrımlı kanalda kararlı akımın olmadığı statik hal için hem de membadan mansaba doğru kararlı akım durumu için modellemeler gerçekleştirilmiştir. 16 farklı sayısal model için temel parametre olarak su yüzü değişimi dikkate alınmıştır. Ayrıca $a^{+}/d=0.69$ bore gücünde statik hal için tsunami dalgasının ilerlemesi esnasında sayısal modelde hız parametreleri göz önüne alınmıştır. Deneysel veriler yardımıyla sayısal model NRMSE ile MAX hata metrikleri kullanılarak hem niceliksel hem de niteliksel olarak doğrulanmıştır.

Kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizmasının incelenmesine yönelik deneysel bulgular aşağıda sunulmuştur:

- Akım doğrultusundaki derinlik boyunca hız dağılımı, kanal tabanında taban kayma gerilmelerinin etkisiyle sıfırdan başlayarak, akım ve kanal geometrisine bağlı olarak su yüzeyinde ya da yüzey altındaki bir bölgede maksimum değere ulaşmaktadır. Bu tez kapsamında elde edilen deneysel bulgular, maksimum hız değerinin bazı durumlarda akımın çekirdek bölgesinde, bazı durumlarda ise su yüzeyine yakın bölgelerde gerçekleşebildiğini göstermektedir.
- Genel olarak, serbest yüzeyde hava ve su arasındaki etkileşim nedeniyle, yüzey hızının maksimum hızdan bir miktar daha düşük olması beklenmektedir. Ancak bu çalışmada, kanalın özgün geometrik özellikleri nedeniyle bu durum her deneysel koşulda ve her ölçüm noktasında gözlemlenememiştir.
- Kanalın ilk kıvrımını hissettiği 1. kesitte yapılan hız ölçümleri, akımın iç kıvrım yönünde ivmelendiğini ve bu bölgede hız bileşenlerinin dış kıvrıma kıyasla belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, bu kesitte iç kıvrım bölgesindeki akım hızları, her deneysel durumda dış kıvrımdakilerden daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, kıvrımlı kanallarda akımın kıvrımı ilk algıladığı bölgede gelişen merkezkaç etkisi ve basınç gradyanları ile açıklanabilir. Özellikle kıvrımın iç kenarında meydana gelen

basınç düşüşü, akımın bu bölgeye doğru yönelmesine ve ivmelenmesine neden olmaktadır. Bu gözlem, Blanckaert (2009), Park ve Ahn (2019) ile Pradhan (2018) gibi önceki çalışmalarda rapor edilen deneysel bulgularla uyumlu olup, kıvrımlı kanal geometrisinin akım yapısını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.

- Tüm ölçüm konumlarında hız dağılımları incelendiğinde her deney koşulu için mansaba doğru hızların artış eğiliminde olduğu görülmektedir.
- Üç farklı debi koşulu altında yapılan ölçümler, kanal boyunca maksimum akım hızının tüm durumlarda tutarlı biçimde 4. kesitin iç kıvrımında meydana geldiğini göstermektedir. Detaylı analizler, maksimum hız noktalarının sırasıyla 1. kesitte iç kıvrıma yakın bölgede, 2. kesitte akım ekseni üzerinde, 3. kesitte tekrar iç kıvrımda ve 4. kesitte yine iç kıvrım bölgesinde konumlandığını ortaya koymuştur. Bu durum, kanal boyunca akımın kıvrım geometrisine verdiği tepkinin sistematik olduğunu ve kıvrımların iç taraflarında gelişen düşük basınç bölgeleri ile merkezkaç kuvveti etkilerinin hız alanını önemli ölçüde şekillendirdiğini göstermektedir. Bu durum özellikle akım debisinin artmasıyla daha belirgin hale gelmektedir.
- Maksimum hızın meydana geldiği derinliğin yalnızca debi değişimine değil, aynı zamanda kanal geometrisine de bağlı olduğu belirlenmiştir. Özellikle 3. kesitte yapılan gözlemler, kanal boyunca birbirini takip eden ve ani yön değişimi gösteren iki ardışık kıvrımın, farklı debi koşullarında maksimum hızın derinlik içerisindeki konumunu değiştirebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, akımın yön değiştirme eğilimi, basınç gradyanları ve ikincil akımların etkileşimi gibi dinamiklerin hız profilini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, kıvrımlı kanallarda akım yapısının karmaşıklığına ve bu yapı üzerinde kanal geometrisinin belirleyici rolüne dikkat çeken literatür ile uyum içerisindedir (Jha et al., 2022).

Boyutsuzlaştırılmış hidrolik parametreler yardımıyla incelenen kıvrımlı kanalda kararlı akım davranışına ait sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Boyutsuz debinin artmasıyla boyutsuz maksimum hızlar ve birim debiler, merkezkaç kuvveti etkisiyle ilk kıvrımın hissedildiği 1. kesitin iç kıvrımına doğru artmaktadır.

- Boyutsuz debi arttıkça ilk kıvrımın hissedildiği 1. kesitte iç kıvrımda hız artış eğimi oldukça yüksek olmaktadır. Diğer kesitlerde ise boyutsuz debi arttıkça boyutsuz hızın artışı tüm kesitlerde daha düşük eğilimle olsa da artmaktadır (Yılmazer ve Güner, 2024).
- Boyutsuz debinin artmasıyla her kesitte iç ile dış kıvrım arasındaki kayma gerilmesi farkı daha önemli hale gelmektedir. Bu durum kıvrımlı kanal boyunca ilerledikçe her kesitte daha belirgin olmaktadır. Boyutsuz debinin artmasıyla kanaldaki akım davranışının daha kritik hale geldiği saptanmıştır (Yılmazer ve Güner, 2024).
- Kıvrımlı kanalda taban kayma gerilimindeki artış, kritik kayma gerilimini etkileyebilir ve nehir kenarlarında oyulmaya ve birikmeye neden olabilmektedir (Yılmazer ve Güner, 2024). Bu durum nehir morfolojisini ve dolayısıyla çevresindeki şehirleşmeyi ve ekolojik çevreyi etkileyebilmektedir.

Kıvrımlı kanalda kararlı akımın sayısal olarak modellenmesi ilgili sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Yapılan hata analizlerine göre, sayısal modelin doğruluğu akım doğrultusundaki hız bileşenleri, derinlik boyunca ortalama hızlar ve kayma hızları açısından genel olarak kabul edilebilir düzeydedir. En yüksek hata değerleri akım doğrultusundaki hızlar için Q16d15 senaryosunda (MARE: %16.0) ve Q50d15 için (RMSE: 5.82 cm/s), ortalama hızlar için Q16d15'te (MARE: %12.3) ve yine Q50d15'te (RMSE: 3.98 cm/s), kayma hızları içinse Q35d20'de (MARE: %11.37) ve Q35d15'te (RMSE: 1.2 mm/s) gözlemlenmiştir. Buna karşılık, en düşük hata değerleri tüm parametreler için Q16d20 ve Q16d25 senaryolarında elde edilmiş olup, en düşük MARE değeri %6.32 (Q50d15 – kayma hızı), en düşük RMSE ise 0.3 mm/s (Q16d20 – kayma hızı) olarak belirlenmiştir. Özellikle Q16d20 senaryosu, sayısal modelin en yüksek doğrulukla temsil edildiği koşul olmuştur.
- Sayısal modelin performans analizi, akım doğrultusundaki hız bileşenlerinin düşük debi ve yüksek su derinliği koşullarında daha yüksek doğrulukla hesaplandığını ortaya koymuştur. Buna karşın, kayma hızları açısından deney koşullarına bağlı olarak belirgin bir eğilim tespit edilememiştir. Ancak, tüm deney senaryoları için elde edilen hata

değerlerinin oldukça düşük olması, sayısal modelin kayma gerilmesi tahmininde de genel anlamda güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

- Sayısal model kıvrımlı kanal boyunca gözlemlenen ve katı madde taşınımını etkileyerek akarsu morfolojisi üzerinde değişimler yaratabilecek kritik bölgelerin belirlenmesinde de deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Gerek deneysel bulgular gerekse sayısal modelleme sonuçları, kıvrımlı kanal boyunca mansaptan önce 120^{o} açılı ikinci kıvrımın merkezi olan 4. kesitin iç kıvrım bölgesinin hidrodinamik açıdan en kritik bölge olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kesitte hem akım hızlarında hem de taban kayma gerilmelerinde belirgin bir artış gözlemlenmiş, bu durum bölgenin enerji yoğunluğu ve potansiyel erozyon riski açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir.
- Doğruluğu deneysel verilerle teyit edilmiş sayısal model, kıvrımlı kanal boyunca hidrolik parametrelerin ekstrem değerlerinin konumlarını başarılı şekilde öngörebilmektedir. Deneysel kurulumların maliyet ve zaman açısından sınırlayıcı olması ve saha verilerine erişimde yaşanan zorluklar dikkate alındığında, FLOW-3D temelli bu modelin, uzun vadede akarsu morfolojisindeki değişimlerin ve potansiyel taşkın etkilerinin öngörülmesinde etkin bir araç olarak kullanılabileceği değerlendirilmiş ve literatüre katkı sağlanmıştır.

Kıvrımlı kanalda kararlı akım mekanizmasının incelenmesinde deneysel ve sayısal modellerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Her iki modelde literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak, kıvrımlı kanaldaki akımın ilk kıvrımı hissetmesiyle beraber etkili olmaya başlayan merkezkaç kuvveti ve yanal momentum transferi sonucunda sekonder akımın oluştuğu görülmüştür. Bunun sonucunda akımın ilk kıvrımın dışına doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum artan boyutsuz debi ile daha belirgin şekilde gözlemlenmektedir.
- Membaya kıyasla akım kanal boyunca kıvrımları geçtikçe tüm deney koşullarında hız artmaktadır. Kıvrımlı kanalda akım 180° açılı ilk kıvrımı geçtikten sonra hızların ve taban kayma gerilmesinin kritik şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Sayısal ve deneysel modeldeki tüm durumlar göz önüne

alındığında, 180° açılı ilk kıvrımın iç tarafından 120° açılı ikinci kıvrımın iç kıvrımına kadar hızın ortalama %30 arttığı görülmüştür.

- Birbirini takip eden ters yönlü kıvrımlardan sonra bulunan 4. kesitin iç kıvrımına doğru (120° açılı ikinci kıvrımın ortasında) hız artmış ve taban kayma gerilmesi yükselmiştir. Ancak, taban kayma gerilmesi daha küçük bir miktarda, yaklaşık %10 oranında artmıştır. Ayrıca benzer şekilde bu kesitte türbülans kinetik enerjisi artmıştır. Akım doğrultusunda kanal kesitinde girdaplar oluşmaya başlamış ve ayrılma bölgeleri oluşmuştur. Öte yandan, aynı kesitte, dış kıvrımda akım doğrultusundaki hız azalmış ve taban kayma gerilmesi aşırı derecede düşmüştür.

Tsunami dalgalarının kıvrımlı kanala girdikten sonra ilerlemesi ile ilgili deneysel sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Tsunami dalgası bir açık kanala giriş yaptığında tıpkı gelgit dalgaları gibi uzun dalga olduklarından bore özelliği göstermektedirler. Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda da bu doğa olgusu açıkça görülmüştür. Açık kanalda bore olarak yayılan tsunami dalgaları güçlü veya dalgalı bore formu şeklinde ya da ara geçiş formu olarak yayılmaktadır.
- Bu çalışmada yapılan deneylerde de dalgalı bore, geçiş durumu ve güçlü bore gözlemlenmiştir. Favre (1935)'in gerçekleştiği laboratuvar deneyleri sonucunda elde ettiği kritik bore gücü değerine göre yapılan bore türleri sınıflandırılması bu çalışmada yapılan tüm deneyler için karşılaştırılmıştır. Bu sebeple dalgalı bore için $a^+/d=0.24$, geçiş formunda olan $a^+/d=0.48$ ile $a^+/d=0.69$ ve güçlü bore $a^+/d=0.95$ bore gücünde N-dalgası formunda dört farklı tsunami dalgası incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda gözlemlenen bütün bore güçleri Favre (1935)'in sınıflandırmasına uymaktadır.
- Her bore gücünde tsunami dalgası kıvrımları geçtikten sonra dalga katarı ile dalgalı bore oluşumu gözlemlenmektedir.
- Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle kıvrımlı kesitlerin dış kısımlarında tsunami dalgasının pozitif dalga genliklerinin iç kısımlara kıyasla daha büyük olduğu, dalgalı formunun daha rahat oluşup geliştiği, dalga kretindeki dalgalanmaların daha büyük yüksekliklere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum özellikle düşük bore gücü değerlerinde görülmüştür. Bu tez çalışmasında incelenen $a^+/d=0.24$ bore gücündeki tsunami dalgasında bu

durum belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu bore gücündeki tsunami dalgası kanal içerisinde ilerledikçe salınım sayısı ve dalgacık sayısı giderek artmaktadır. Dolayısıyla en belirgin dalga katarı oluşumu diğer bore gücündeki deney koşullarına göre bu deney koşulunda görülmüştür.

- Kıvrımlı kanal boyunca tsunami dalgasının su yüzü değişimleri incelendiğinde, $a^+/d=0.24$ bore gücü için pürüzsüz ve serbest yüzeye sahip dalgalı bore formu gözlemlenmiştir. İlk kıvrımdan itibaren ilerleme doğrultusuna göre çapraz dalgaların (cross waves) oluşmaya başladığı görülmüştür. 0.24 bore gücü için pozitif genlik ilk dış kıvrımda ve son dış kıvrımda sırasıyla 1.9 ve 2.1 kat artmaktadır. Kıvrımlı kanal boyunca ilerledikçe dalgalı bore formunda beklenildiği gibi dalga katarı oluşmaktadır.
- $a^+/d=0.24$ bore gücü artan pozitif genlikleri ve oluşturduğu dalga katarı ile tsunami dalgasının akarsuya girdikten sonra akarsu çevresinde yaratabileceği taşkın tehlikesinden dolayı en tehlikeli durumu oluşturmaktadır.
- $a^+/d=0.48$ bore gücü için göreceli olarak zayıf bir dalga kırılması meydana gelmektedir. $a^+/d=0.48$ için, ilk dalga tepesinde hafif bir kırılma gözlenmiş ve ikincil dalgalar daha düz hale gelmektedir. Diğer bir ifadeyle dalga kanala girişiyle güçlü bore olarak kırılmış daha sonra dalgalı bore davranışına dönüşmüştür. Dolayısıyla bu sebeple tam bir geçiş formunu temsil etmektedir.
- $a^+/d=0.48$ bore gücü (geçiş durumu) için ise pozitif genlikte önemli bir değişme gerçekleşmemektedir. Fakat kırılma etkisiyle pozitif genlikler girişten itibaren bir miktar azalmaktadır dolayısıyla kıvrımlı kanalda ilerleyen tsunami dalgası geçiş durumunda dalgalı bore durumuna yaklaşmaktadır. Bu nedenle son kıvrım ve sonrasında bir miktar pozitif genlik artışı görülmektedir. Benzer sebeple son kıvrımda iç kıvrımda pozitif genlik dış kıvrımdan bir miktar yüksek olmaktadır.
- Yüksek bore gücüne sahip olan $a^+/d=0.95$ ve $a^+/d=0.69$ bore gücüne sahip tsunami dalgaları için köpürme, belirgin çevriler ve yoğun türbülans oluşumu gözlemlenmiştir. Fakat diğer bore gücü durumlarında olduğu tsunami dalgası kıvrımlı kanaldaki rotasını tamamladıktan sonra son

kıvrımdan itibaren çapraz dalgalar (cross waves) ve dolayısıyla dalga katarı oluşmaya başlamıştır. Burada $a^+/d=0.69$ bore gücü 0.75 sınır değere yakın olduğu için daha çok güçlü bore davranışı sergilemektedir.

- $a^+/d=0.95$ ve $a^+/d=0.69$ bore gücü için pozitif genliklerde dalga kırılmasından dolayı girişten itibaren sırasıyla yaklaşık %50 ve %40 azalma olmaktadır. Fakat kıvrımlı kanal boyunca pozitif genlikler dikkate değer şekilde değişmemektedir. Dolayısıyla a^+/d oranı yani bore gücü arttıkça aynı kesitte iç ve dış kıvrım arasındaki fark belirgin olmamaktadır.
- Bore gücü arttıkça girişten itibaren dalganın hemen kırılmaya uğrayarak çevrilerin ve türbülans oluşumunun arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bore gücü arttıkça akarsu ağzındaki tsunami dalgasının pozitif genliği azalmakta ve akarsu çevresinde taşkın riski dalgalı bore formuna göre daha az olmaktadır. Fakat her koşulda tsunami dalgası kanal içerisindeki kıvrımları geçerek ilerledikçe dalgalı bore formuna dönüşmektedir. Yine de akarsu ağzındaki tsunami dalgasının pozitif genliğinden daha düşük dalga yüksekliğinde ilerlemektedir.
- Bütün deney koşullarında, mansaptan membaya doğru her kesitte negatif genlik ve çukur periyodu azalmaktadır. Kararlı akım olması durumunda akım debisi arttıkça bu azalma miktarı artmaktadır. Bu durum özellikle kıvrımlar sonrası bulunan Prob 8 için görülmektedir. Akım debisinin artmasıyla özellikle dalga çukuru neredeyse oluşmamaktadır.
- Kararlı akım koşullarında akım debisinin artışı özellikle bore gücü arttıkça her deney koşulu için tsunami dalgasının ilerleyişini yavaşlatmaktadır. Bu durum kıvrımlı kanalın girişinden itibaren ilerleyen kesitlerde daha belirgin bir şekilde faz farkı olarak görülmektedir. Özellikle kıvrımlardan sonra Prob 8'in bulunduğu son kesitte oldukça belirgindir.
- Gerek durgun su koşullarında gerekse kararlı akım durumunda, tsunami dalgası kıvrımlı kanala girdikten sonra ilerledikçe tepe periyotlarında kademeli bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Ancak akım debisindeki artış ile tepe periyotlarındaki değişim arasında belirgin bir korelasyon saptanamamıştır. Bore gücü $a^+/d=0.24$ olan deneylerde hem statik hem de kararlı akım koşullarında, kanal girişinden sonraki ilk ölçüm noktası olan Prob 1'den itibaren tepe periyotlarında kısa süreli bir azalma meydana

gelmiş, ardından dalga kanal boyunca ilerledikçe bu periyotların yeniden artış gösterdiği tespit edilmiştir.

- Kıvrımlı kanal girişinde (Prob 1) $a^+/d=0.24$ bore gücü için akım debisi arttıkça pozitif genlik artarak a^+/d oranları artmaktadır. Bu durum $a^+/d=0.95$ bore gücü için de görülmektedir. Fakat $a^+/d=0.48$ ve $a^+/d=0.69$ (geçiş durumu) için debi artışı ile anlamlı bir ilişki gözlemlenmemiştir.
- Hem durgun su koşullarında (statik hal) hem de kararlı akım koşullarında dört farklı a^+/d oranına sahip tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerleyişi dikkate alındığında a^+/d oranı azaldıkça kırılmanın azaldığı, daha fazla dalgalı bore şeklinde dalga katarları oluştuğu ve yanal momentum etkisinin artarak aynı kesitlerde dalga kretinde pozitif genlik farklılıkları oluşturduğu görülmüştür. Bunun tersine a^+/d oranı arttıkça yanal momentum etkisinin kaybolduğu aynı kesitlerdeki dalga kretinde pozitif genlik farklılıkları oluşmadığı gözlemlenmiştir. Çünkü burada dalga kırılma etkisiyle enerji harcanımı söz konusu olmakta ve yanal momentum etkisi baskın olamamaktadır. Kısaca güçlü bore (türbülanslı bore) yapısının kıvrımlardaki enine değişimlerin etkisini azalttığı düşünülmektedir.
- Daha yüksek pozitif genlikte üretilen dalga formlarında (a^+/d oranının yüksek olması; $a^+/d=0.69$ ve $a^+/d=0.95$ için) kanal boyunca ilerlerken pozitif genlikte dramatik bir şekilde azalma gözlenmiş (kırılma etkisi), daha düşük pozitif genlikte üretilen dalga formlarında ise (a^+/d oranının düşük olması; $a^+/d=0.24$ için) pozitif genlikte artış gözlenmiştir.
- Güçlü bore durumunda ($a^+/d=0.95$) tsunami dalgasının kanal içerisinde ilerledikçe özellikle ilk iki kıvrımın merkezini geçtikten sonra a^+/d oranın azalması ile beraber kanal boyunca dalgalı bore oluşumu önemli bir şekilde artmıştır.
- Geçiş formu değeri için ($a^+/d=0.48$) pozitif genlikte ciddi farklar gözlenmemiştir. Fakat hem statik hal hem de kararlı akım durumu için 180^o'lik kıvrımın merkezinde Prob 7 (dış kıvrım) ve Prob 8 için pozitif genlik artışı görülmektedir. Dolayısıyla burada iç ile dış kıvrım arasında pozitif genlik farkı meydana gelmektedir.
- Her durumda kanal içerisinde ilerledikçe dalgalı bore oluşumu görülmektedir. Bore Froude sayısı, 0.95'ten küçük olduğu durumda dalgalı

bore ve 0.95'ten büyük olduğu durumunda ise güçlü bore görülmektedir. Bore Froude sayısı bütün deney koşullarında 0.75 ile 1.35 arasında değişmektedir. Fr_b<0.85 ait değerler genel olarak dalgalı bore formunda iç kıvrımlarda, Fr_b>1.2 ait değerler ise güçlü bore formunda dış kıvrımlarda yapılan ölçümlerde elde edilmiştir.

a^+/d=0.69 bore gücüne sahip tsunami dalgasının yayılımı esnasında durgun su koşullarında (statik halde) ADV ile gerçekleştirilen hız ölçümlerindeki sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Pozitif genlikli dalganın hızı, kanal girişinden itibaren gerçekleşen kırılma olayı sonrasında yaklaşık %40 oranında azalma göstermiştir. Dalga kırılmasının ardından, kanal boyunca hız değerlerinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Tsunami dalgasının ilk kıvrımı algıladığı kesitte, dış kıvrım bölgesinde dalganın ayrıştığı ve bu ayrışma sonucu oluşan ikincil dalganın hızının, öncül dalgadan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Aynı kesitte dış kıvrımdaki hız değerleri, iç kıvrıma kıyasla daha yüksek ölçülmüştür. Bu durum, dalga tepesinin formunu koruyarak eğrisel kanal geometrisinde farklı uzunluktaki yolları aynı sürede kat etme eğiliminden kaynaklanmaktadır.
- Kıvrımlı kanal boyunca diğer kesitlerde kanal girişinde kırılma sonrası iç ile dış kıvrım arasında belirgin bir hız farkı gözlemlenmemiştir. Beklenildiği üzere debinin artmasıyla tsunami dalgasına ait hız-zaman serilerinde dalga tepesi için azalma meydana gelmektedir.

Tsunami dalgasının kıvrımlı kanallarda ilerlemesinin sayısal olarak modellenmesi ile ilgili inceleme sonuçları aşağıda verilmiştir:

- Sayısal ve deneysel modelden elde edilen su yüzü değişimleri incelendiğinde, kanal boyunca bazı problarda bir miktar faz farkları görülmüş fakat dalga profillerinin karakteristikleri uyumlu çıkmıştır. Dolayısıyla bütün deney koşullarında NRMSE hata metriği kabul edilebilir sınırların (%15) altında kalmıştır.
- FLOW-3D marjinal olarak kıvrımlı kanaldaki bazı problarda pozitif genlikleri daha düşük hesaplamıştır. Fakat genel olarak ortalamalar

hesaplandığında MAX hata miktarları limit değerin altında (%10) veya limit değere yakın elde edilmiştir.

- Güçlü bore koşullarında, sayısal model pozitif genlikleri kanal girişinden itibaren belirli ölçüde farklı tahmin etmektedir. $a^+/d = 0.95$ değerine sahip tsunami dalgası, fiziksel deneylerde hidrolik sıçrama gibi karmaşık ve ekstrem akış davranışları sergilemektedir. Bu durum, FLOW-3D tabanlı sayısal modelin bu bore gücündeki dalga parametrelerini hassas biçimde simüle etmesinde zorluk yaşamasını açıklamaktadır.
- Sayısal modelde en uyumlu sonuçlar geçiş durumu ($a^+/d=0.48$ ile $a^+/d=0.69$) için görülmüştür. Sayısal model geçiş durumundaki dalga profillerinde genlikleri oldukça başarılı hesaplamıştır.
- Deneysel çalışmada gözlemlenen dalgalı bore durumu ($a^+/d=0.24$) için tsunami dalgasının kıvrımlı kanal içerisinde kırılmayarak ilerlemesi ve bir dalga katarı şeklini alması sayısal model tarafından başarıyla benzeştirilmiştir. Fakat dalgalı bore ve geçiş durumunda tsunami dalgası kıvrımlı kanal boyunca ilerledikçe sayısal model ile deneysel veriler arasındaki dalga profillerinde faz farkı artmaktadır.
- Sayısal modelde, dalganın ilerlemesiyle yani simülasyon süresi arttıkça hata miktarında artış gözlemlenmektedir. Bu hata artışı özellikle kararlı akım debisinin yükselmesiyle belirginleşmektedir. Genel olarak, artan debi koşullarında sayısal modelin doğruluk performansında bir miktar azalma meydana gelmektedir.

Kıvrımlı kanal içerisinde tsunami dalgasının ilerlemesi esnasında sayısal olarak modellenen hız-zaman serisi sonuçları aşağıda verilmektedir:

- Hız-zaman serilerinin karşılaştırılmasında limit değerler NRMSE için %15 ve MAX için %25 kabul edilmektedir. FLOW-3D tsunami dalgasına ait hız-zaman serilerini kabul edilebilir hata limitleri altında kalarak başarılı şekilde tahmin etmiştir.
- Kıvrımlı kanalda kıvrımlardan sonra bulunan son ölçüm konumu olan MEMBA-1 konumu dışında her ölçüm konumunda NRMSE hata miktarı kabul edilebilir sınırların altında kalmıştır. MEMBA-1 konumunda belirgin faz farkından ötürü NRMSE hata sınırın yukarısında kalmaktadır. Sayısal

model bütün ölçüm konumlarında çekilme hızını neredeyse bire bir tahmin etmiştir.

- Tsunami dalgasının kanala giriş yaptığı mansaptan sonra 120^{o} açılı ikinci kıvrımın merkezi olan 4. kesitin dış kıvrımının dışında sayısal model bütün kesitlerde maksimum hızları başarılı tahmin etmiştir. MAX hata miktarları sınır değerin aşağısında kalmaktadır. 4. Kesitin dış kıvrımında, deneysel modelde ADV sensörleri dalga kırılmasından kaynaklanan aşırı kabarcıklar nedeniyle veri kaybına maruz kalmıştır ve bu sebeple sayısal model ile deneysel model arasında farklar bulunmaktadır.

Bu sonuçlar ışığında ileride yapılabilecek çalışmalar için öneriler aşağıda ifade edilmiştir:

- Bu tez çalışmasında, literatürden farklı olarak, kıvrımlı kanallarda tsunami dalgasının ilerlemesi dört farklı bore gücünde oluşturulan N-dalgalarıyla incelenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı derinliklerde ve çeşitli pozitif genliklerde dalgalar oluşturularak daha geniş bir aralıkta bore gücünün davranışları detaylı bir şekilde incelenebilir. Benzer şekilde ileride gerçekleştirilecek çalışmalarda farklı kanal eğimleri dikkate alınarak eğim etkisinin kıvrımlı kanallarda tsunami dalgasının ilerlemesi üzerine etkileri tartışılabilir.
- Bu çalışmada, FLOW-3D yazılımı kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile sayısal modelleme gerçekleştirilmiş ve RNG k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir. Gelecek araştırmalarda, farklı türbülans modelleri ve sayısal simülasyon araçları kullanılarak mevcut sonuçların karşılaştırmalı analizi yapılabilir; böylece modelleme doğruluğu ve uygunluğu daha kapsamlı şekilde değerlendirilebilir.
- Kıvrımlı kanallarda tsunami dalgasının ilerleyişi sırasında katı madde taşınımı ve davranışı detaylı olarak incelenebilir. Laboratuvar ortamında benzetilen akarsu koşulları altında, çeşitli tsunami dalga profilleri ve farklı katı madde özelliklerine göre katı madde taşınım mekanizmaları ve etkileşimleri analiz edilerek, gerçek akarsulardaki süreçlere yönelik çıkarımlar yapılabilir.
- Deneysel ve sayısal modelleme çalışmalarında, kıvrımlı kanal geometrisine köprü veya diğer su yapıları uyarlanarak, tsunami

dalgasının yapı etkileşimleri ile ilerleyişi incelenebilir. Bu sayede, kıyı ve nehir yapılarının tsunami dalgası üzerindeki hidrodinamik etkileri detaylı biçimde ortaya konabilir ve yapıların tasarımına yönelik mühendislik değerlendirmeleri geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

Abe, K. (1986). “Tsunami propagation in rivers of the Japanese Islands”, Continental Shelf Research, vol. 5 (6), pp. 655–677.

Adityawan, M. B., Kayane, K., Tanaka, H. (2006). “Influence of river bed slope for tsunami propagation into rivers”, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 Coastal Engineering, vol. 68 (2), pp. 176-180.

Adityawan, M.B., Roh, M., Tanaka, H., (2012). “Investigation of tsunami propagation characteristics in river and on land induced by the Great East Japan Earthquake 2011”, Journal of Earthquake and Tsunami, 6 (3).

Allen, R., Davies, T., Horn, C., (1992). “The design of a control system for small hydraulic models”, Measurement Science and Technology, vol. 3, pp. 1098–1102.

Allsop, W., Hettiarachchi, S. S. L., (1988). “Reflections from coastal structures”, In: Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering, June 1988, Malaga, Spain.

Allsop, W., Robinson, D, Charvet I, Rossetto, T., Abernethy, R. (2008). “A unique tsunami generator for physical modelling of violent flows and their impact”, Proc. 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 2008, Beijing, China.

Allsop, W., Chandler, I., Zaccaria, M. (2014a). “Improvements in the physical modelling of tsunamis and their effects”, Proceeding of the 5th International Conference on Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Coastlab14, September-October 2014, Varna, Bulgaria.

Allsop, W., Chandler, I., Zaccaria, M. (2014b). “Improving the generation of tsunami waves in physical modelling”, HR Wallingford report DDS0336-RT001, HR Wallingford for HYDRALAB IV.

Aoyama Y., Adityawan M.B., Widiyanto W., Mitobe Y., Komori D., Tanaka H. (2016). “Numerical study on tsunami propagation into a river”, Journal of Coastal Research, SI (75), pp. 1017-1021.

Bağcı, T. (2015). “Kesit daralmasının soliter dalgalara olan etkisinin ve sınır tabakasının deneysel olarak incelenmesi”, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Bai R., Zhu D., Chen H., Li D. (2019). Laboratory study of secondary flow in an open channel bend by using PIV, Water, vol. 11 (4), 659.

Barkhudarov, M. R. (2004). “Lagrangian VOF Advection method for FLOW-3D”, Flow Science Inc, vol. 1 (10).

Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., Valles-Moran, F.J., Lopez-Jimenez, P.A. (2016). "Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump", Environmental Modelling & Software, vol. 80, pp. 322-335.

Bjørkavåg M., Kalisch H. (2011). "Wave breaking in Boussinesq models for undular bores", Physics Letters A, vol. 375 (14), pp. 1570-1578.

Blanckaert, K., Graf, W. H. (2001a). "Mean flow and turbulence in an open-channel bend", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 127 (10), pp. 835–847.

Blanckaert, K., Graf, W. H. (2001b). "Experiments on flow in a strongly curved channel bend", In: Proceedings of the 29th IAHR World Congress, pp. 371–377, Beijing, China.

Blanckaert, K., Graf, W. H. (2004). "Momentum transport in sharp open-channel bends", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 130 (3), pp. 186-198.

Blanckaert, K., de Vriend, H. J. (2004). "Secondary flow in sharp open-channel bends", Journal of Fluid Mechanics, vol. 498, pp. 353-380.

Blanckaert, K. (2009). "Saturation of curvature-induced secondary flow, energy losses, and turbulence in sharp open-channel bends: Laboratory experiments, analysis, and modeling", Journal of Geophysical Research, vol. 114, F03015.

Borthwick, A.G.L., Ford, M., Weston, B.P., Taylor, P.H., Stansby, P.K. (2006). "Solitary wave transformation, breaking and runup at a beach", Maritime Engineering, vol. 159 (MA3), pp. 97-105.

Briggs, M.J., Synolakis, C.E., Harkins, G., Green, D.R. (1995). "Laboratory experiments of tsunami runup on a circular island", Pure and Applied Geophysics, vol. 144 (3/4), pp. 569-593.

Brun M. K., Kalisch H. (2018). "Convective wave breaking in the KdV equation", Analysis and Mathematical Physics, vol. 8, pp. 57-75.

Bukreev, V.I. (1999). "Correlation between theoretical and experimental solitary waves", Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, vol. 40, pp. 399–406.

Chandler, I., Allsop, W., Barranco Granged, I., McGovern, D. J. (2016). "Understanding wave generation in pneumatic tsunami simulators", In: Proceedings of the 6th International Conference on the Applicatio of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab16), May 2016, Ottawa, Canada.

Chandler, I., Allsop, W., Robinson, D., Rossetto, R. (2021). "Evolution of pneumatic tsunami simulators–from concept to proven experimental technique", Frontiers in Built Environment, vol. 7, pp. 1-16.

Chanson, H. (2006). "Tsunami surges on dry coastal plains: application of dam break wave equations", Coastal Engineering Journal, vol. 48 (4), pp. 355–370.

Chanson, H., (2010). "Undular tidal bores: basic theory and free-surface characteristics", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 136 (11), pp. 940-944.

Chanson, H. (2011). "Tidal Bores, Aegir, Eagre, Mascaret, Pororoca", World Scientific.

Charvet, I. (2012). “Experimental modelling of long elevated and depressed waves using a new pneumatic wave generator”, Doktora Tezi, University College London, Londra, England.

Charvet, I., Eames, I., Rossetto, T. (2013). “New tsunami runup relationships based on long wave experiments”, Ocean Model, vol. 69, pp. 79–92.

Choi B. H., Kim D. C., Pelinovsky E., Woo S. B. (2007). “Three-dimensional simulation of tsunami run-up around conical island”, Coastal Engineering, vol. 54 (8), pp. 618–629.

Chow, V.T. (1959). “Open Channel Hydraulics”, New York: McGraw-Hill.

Christensen, B., Gislason, K., Fredsoe, J. (1999). “Secondary turbulent flow in an infinite bend. 1st RCEM Symposium”, vol. 1, pp. 543–553. University of Genova, Genova, Italy.

Cox, D. (2007a). “Tsunami wave basin”, Oregon University.

Cox, D. (2007b). “Large Wave Flume”, Oregon University.

Das, K., Janetzke, R., Basu, D., Green, S., Stamatakos, J. (2009). “Numerical simulations of tsunami wave generation by submarine and aerial landslides using RANS and SPH models”, In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 43451, pp. 581-594.

De Vriend, H. J., (1977). “A mathematical model of steady flow in curved shallow channels”, Journal of Hydraulic Research, vol. 15, pp. 37–53.

De Vriend, H. J., Geldof, H. J. (1983). “Main flow velocity in short and sharply curved river bends”, TU Delft Report 1983, vol. 83 (6), Delft University of Technology.

Dietrich, W. E., Smith, J. D. (1983). “Influence of the point bar on flow through curved channels”, Water Resources Research, vol. 19 (5), pp. 1173-1192.

Doğan, G., Yalçıner, A.C., Yüksel, Y., Polat, O., Güler, I., Ulutaş,E., Sahin, C., Ozbahceci, B., Necmioğlu, Ö., Kanoğlu, U., Kalligeris, N., Charalampakis, M., Skanavis, V., Melis, N., Synolakis, C. (2020). “Tsunami effects and performance of port structures”, (Bölüm 2 Editörleri: Çetin, Ö., Mynolakis, G., Sextos, A., Stewart, J.A., ETAM, TDV, EERI, GEER).

Dogan, G.G., Pelinovsky, E., Zaytsev, A., Metin A.D., Tarakcioglu G.O., Yalcıner A.C., Yalciner B., Didenkulova I. (2021). “Long wave generation and coastal amplification due to propagating atmospheric pressure disturbances”, Natural Hazards, vol. 106, pp. 1195–1221.

Dombroski, D. E., Crimaldi, J. P. (2007). “The accuracy of acoustic doppler velocimetry measurements in turbulent boundary layer flows over a smooth bed”, Limnology and Oceanography: Methods, vol. 5, 2007, pp. 23–33.

Engelund, F., Hansen, E. (1967). “A Monograph on sediment transport in alluvial streams”, Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.

Engelund, F. (1974). “Flow and bed topography in channel bends”, Journal of Hydraulic Division, vol. 100, pp. 1631-1648.

ERCOFTAC. (2002). “Quality and trust in industrial CFD- An European initiative, best practice guidelines, version 1.0”, EROCFTAC Special Iinterest Group.

Eze C. L., Uko D. E., Gobo A. E., Sigalo F. B., Israel-Cookey C. (2009). "Mathematical modelling of tsunami propagation", Journal of Applied Sciences and Environmental Management, vol. 13 (3), pp. 9-12.

Fargue, L. (1868). "Etude sur la corre`lation entre la configuration du lit et la profoundeur d'ean dans les rivie`res a` fond mobile", Annales des Ponts et Chausse`es, vol. 38, pp. 34–92.

Favre, H., (1935). "Etude Théorique et Expérimentale des Ondes de Translation dans les Canaux Découverts (Theoretical and Experimental Study of Travelling Surges in Open Channels)", Paris: Dunod Edition.

Ferdos, F., Dargahi, B. (2016). "A study of turbulent flow in large scale porous media at high reynolds numbers: Part I: numerical validation", Journal of Hydraulic Research, vol. 54 (6), pp. 663-677.

Ferguson, R.I., Parsons, D.R., Lane, S.N., Hardy, R.J. (2003). "Flow in meander bends with recirculation at the inner bank", Water Resources Research, 39 (11).

Flow Science, (2019). "FLOW-3D User Manual", Flow Science, Inc., Santa Fe, NM, USA.

Flow Science, (2002). "FLOW-3D User's Manual", Flow Science, Inc., Santa Fe, NM, USA.

Franco, A., Moernaut, J., Schneider-Muntau, B., Strasser, M., Gems, B. (2020). "The 1958 Lituya Bay tsunami–pre-event bathymetry reconstruction and 3D numerical modelling utilising the computational fluid dynamics software Flow-3D", Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 20 (8), pp. 2255-2279.

Fritz, H.M., Petroff, C.M., Cataln, P., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Weiss, R., Barrientos, S.E., Meneses, G., Valderas-Bermejo, C., Ebeling, C., Papadopoulos, A., Contreras, M., Almar, R., Dominguez, J.C., Synolakis, C.E., (2011). "Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami", Pure and Applied Geophysics, 168 (11), pp. 1989-2010.

Frothingham, K.M., Rhoads, B.L. (2003). "Three dimensional flow structure and channel change in an asymmetrical compound meander loop, Embarras River, Illinois", Earth Surface Processes and Landforms, vol. 28 (6), pp. 625-644.

Gargari, M. K., Kirca, V. O., Yagci, O. (2021). "Experimental investigation of gradually-varied unsteady flow passed a circular pile", Coastal Engineering, vol. 168 (103926).

Goring, D.G. (1978). "Tsunamis – the propagation of long waves onto a shelf". Doktora Tezi, Kaliforniya Teknik Enstitüsü, Kaliforniya, Amerika Birleşik Devletleri.

Goseberg, N., Wurpts, A., Schlurmann, T. (2013). "Laboratory-scale generation of tsunami and long waves", Coastal Engineering, vol. 79, pp. 57-74.

Goto C. (1984). "Non-linear dispersive wave equation for large ursell number", Journal of Hydraulics, Coastal and Environment Engineering, vol. 351, pp. 193-201.

Güngör, M., (1997). "Akarsu kıvrımlarına yerleştirilen köprü kenar ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliğinin araştırılması". Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hammack, J.L. (1972). Tsunamis – A model for their generation and propagation. Doktora Tezi, Kaliforniya Teknik Enstitüsü, Kaliforniya, Amerika Birleşik Devletleri.

Hammack, J.L., Segur, H. (1978). "Modelling criteria for long water waves", Journal of Fluid Mechanics, vol. 84, pp. 359–373.

Harlan, D., Natakusumah D. K., Adityawan M. B., Mahfudz H., Adinata F. (2018). "3D numerical modeling of flow in sedimentation basin", In: MATEC Web of Conferences, vol. 147 (03012).

Heinrich, P. (1992). "Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 118 (3), pp. 249–266.

Helmi, A.M. (2019). "Assessment of CFD turbulence models for free surface flow simulation and 1-D modelling for water level calculations over a broad-crested weir Floodway", Water, 45 (3), pp. 420-433.

Hirt, C. W., Nichols, B. D. (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", Journal of Computational Physics, vol. 39 (1), pp. 201-225.

Hirt, C.W., Sicilian, J.M. (1985). "A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes", In: 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Washington, DC, USA.

Honarmand, M., Shanehsazzadeh, A., Zandi, S. M. (2020). "3D numerical simulation of tsunami generation and propagation, case study: Makran tsunami generation and penetrating in Chabahar Bay", Ocean Engineering, vol. 218 (108109).

Hornung, H.G., Willert, C., Turner, S. (1995). "The flow field downstream of a hydraulic jump", Journal of Fluid Mechanics, vol. 287, pp. 299–316.

Hu, H., Zhang, J., Li, T. (2018). "Dam-break flows: comparison between Flow-3D, MIKE 3 FM, and analytical solutions with experimental data", Applied Sciences, vol. 12 (2456).

Hughes, S.A. (1993). "Physical models and laboratory techniques in coastal engineering", Volume 7 of Advances in Ocean Engineering, Singapur: World Scientific.

Hunt, A.C. (2003). "Extreme waves, overtopping and flooding at sea defences". Doktora Tezi, Oxford Üniversitesi, Oxford, İngiltere.

Hussein, K., Smith, V. H. (1986). "Flow and bed deviation angle in curved open channels", Journal of Hydraulic Research, vol. 24, pp. 93–108.

Ishigaki, T., Shiono,K., Rameshwaran, P. (2002). "PIV and LDA measurements of secondary flow in a meandering channel for overbank flow", Journal of Visualization, vol. 5 (2), pp. 153-159.

Jensen, B. L., Sumer, B. M., Fredsøe, J. (1989). “Turbulent oscillatory boundary layers at high Reynolds numbers”, Journal of Fluid Mechanics, vol. 206, pp. 265-297.

Jha, R., Singh, V.P., Singh, V., Roy, L.B., Thendiyath, R. (2022). River Hydraulics, Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering Vol. 2, Chapter 6, Review on Hydraulics of Meandering Rivers. Water Science and Technology Library, Springer International Publishing.

Julien, Pierre Y. (2002). “River Mechanics”. New York: Cambridge University Press.

Kalmbacher, K. D., Hill D. F. (2015). “Effects of tides and currents on tsunami propagation in large rivers: Columbia River, United States”, Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering, vol. 141 (5), pp. 04014046.

Kayane, K., Min, R., Tanaka, H., Tinh, N.X. (2011). “Influence of river mouth topography and tidal variation on tsunami propagation into rivers”, Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B2 (Coastal Engineering), vol. 67 (2), pp. 246-250.

Kim, S.D., Lee, H.J., An, S. D. (2010). “Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model”, International Journal of the Physical Sciences, vol. 5 (6), pp. 774-780.

Kim, K. O., Choi, B. H., Pelinovsky, E., Jung, K. T. (2013). “Three-dimensional simulation of 2011 East Japan-off Pacific coast earthquake tsunami induced vortex flows in the Oarai port”, Journal of Coastal Research, vol. 65, pp. 284-289.

Kobayashi, N., Lawrance, R. (2004). “Cross shore sediment transport under breaking solitary waves”, Journal of Geophysical Research, vol. 109, C03047.

Koch, C., Chanson, H. (2009). “Turbulence measurements in positive surges and bores”, Journal of Hydraulic Research, vol. 47, pp. 29–40.

Kulkarni, K. H., Hinge, G. A. (2022). “Comparative study of experimental and CFD analysis for predicting discharge coefficient of compound broad crested weir”, Water Supply, vol. 22 (3), pp. 3283-3296.

Lau, T. L., Ohmachi, T., Inoue, S., Lukkunaprasit, P. (2011). “Experimental and numerical modeling of tsunami force on bridge decks”, Rijeka: InTech, pp. 105-130.

Le Mehaute, B. (1976a). “Similitude in coastal engineering”, Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering, vol. 102 (WW3), pp. 317-335.

Le Mehaute, B. (1976b). “An Introduction to hydrodynamics and water waves”, New York: Springer Verlag.

Leng, X., Chanson, H. (2017). “Unsteady velocity profiling in bores and positive surges”, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 54, pp. 136-145.

Leopold L.B., Wolman M.G. (1957). “River channel patterns: braided, meandering and straight”, US Goverment Printing Office.

Le Quéré P.A., Nistor I., Mohammadian A. (2020). “Numerical modeling of tsunami-ınduced scouring around a square column: performance assessment of

FLOW-3D and Delft3D", Journal of Coastal Research, vol. 36, 6, pp. 1278-1291.

Li, J., Kong, X., Yang, Y., Deng, L., Xiong, W. (2022). "CFD investigations of tsunami-induced scour around bridge piers", Ocean Engineering, 244, 110373.

Li, J., Kong, X., Yang, Y., Hu, J., Jin, R. (2023). "Numerical modeling of solitary wave-induced flow and scour around a square onshore structure", Journal of Marine Science and Engineering, vol. 11 (1), 198.

Lide, D. R. (2004). Handbook of Chemistry and Physics. Press 85, CRC Press.

Lima, V.V., Avilez-Valente, P., Baptista, M. A. V., Miranda, J. M. (2019). "Generation of N-waves in laboratory", Coastal Engineering, vol. 148, pp. 1-18.

Liu, P.L.-F., Synolakis, C.E., Yeh, H.H. (1991). "Report on the international workshop on long-wave run-up", Journal of Fluid Mechanics, vol. 229, pp. 675–688.

Liu, P. L.F., Wu, T.R., Raichlen, F., Synolakis, C. E., Borrero, J. C., (2005). "Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses", Journal of Fluid Mechanics, vol. 536, pp. 107–144.

Liu, P.L.F., (2008). "Advanced numerical models for simulating tsunami waves and runup", Volume 10 of Advances In Coastal And Ocean Engineering. World Scientific.

Liu, H., Shimozono, T., Takagawa, T., Okayasu, A., Fritz, H.M., Sato, S., Tajima, Y. (2013). "The 11 March 2011 Tohoku Tsunami Survey in Rikuzentakata and Comparison with Historical Events", Pure and Applied Geophysics, vol. 170, pp. 1033-1046.

Lloyd T.O., Rossetto T. (2010). "New Facility for Physical Modelling of Tsunami Impact on Buildings", In: 14th European Conference on Earthquake Engineering, August-September 2010, Ohrid, Macedonia.

Lohrmann, A., Cabrera, R., Kraus, N.C. (1994). "Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use", In: Proceedings of the Joint Conference on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experiments, vol. 351-365, August 1994, New York, USA.

Lotfollahi-Yaghin, M. A., Nassiraei, H. (2016). "Numerical simulation of tsunami waves forces on coastal structures", Journal of Oceanography, vol. 6 (24), pp. 23-30.

Luettich Jr. R. A., Westerink, J. J. (1991). "A Solution for the vertical variation of stress, rather than velocity, in a three-dimensional circulation model", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 12 (10), pp. 911–928.

Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., Schäffer, H.A. (2008). "On the solitary wave paradigm for tsunamis", Journal of Geophysical Research C: Oceans, vol. 113 (12), pp. 1–22.

Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., Schäffer, H.A. (2009). "A critical discussion of the solitary wave paradigm for tsunamis", In: Proceedings of the International Conference on Coastal engineering, 2. World Scientific, pp. 1262-1274.

Maguire, A. E. (2011). “Hydrodynamics control and numerical modelling of absorbing wavemakers”, Doktora Tezi, Edinburgh Üniversitesi, Edinburgh, İngiltere.

Man, C., Zhang, G.G., Hong, V., Zhou S., Feng Y.L. (2019). “Assessment of turbulence models on bridge-pier scour using Flow-3D”, World Journal of Engineering and Technology, vol. 7, pp. 241-255.

Markov, I. I., Khrynina, E. I., Kamenichenko, E. I., Ivanov, M. N. (2008). “The character of the temperature dependence of the surface tension coefficient of a liquid phase”, Russian Journal of Physical Chemistry A, vol. 82 (6), pp. 1056-1060.

MARNET, (2002). “Best practice guidelines for marine applications of computational UID Dynamics”, Technical report, WS Atkins Consultants and Members of the NSC, MARNET-CFD Thernatic Network.

Maurya, O.P., Nandi, K.K., Modalavalasa, S., Dutta, S. (2022). “Flow hydrodynamics ınfluences due to flood plain sand mining in a meandering channel”, In North-East Research Conclave; Springer: Singapore, 2022; pp. 245–251.

McGovern D.J., Robinson T., Chandler I.D., Allsop W., Rossetto T. (2018). “Pneumatic long-wave generation of tsunami-length wave form sand their runup”, Coastal Engineering, vol. 138, pp. 80-97.

Miles, J.W. (1980). “Solitary waves”, Annual Review Fluid Mechanics, vol. 12, pp. 11-43.

Moon, W. C., Lau, T. L., Puay, H. T., (2019). “Conservative and oscillationless semi-Lagrangian schemes for tsunami modelling”, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol. 63 (2), pp. 274-286.

Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., Yanagisawa, H. (2011). “Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up”, Geophysical Research Letters, vol. 38 (7).

Nelson, J. M., Smith, J. D. (1989). “Evolution and stability of erodible channel beds”, River Meandering, vol. 12, pp. 321-377.

Muiruri, P. I., Motsamai, O. S. (2018). “Three dimensional CFD simulations of a wind turbine blade section; validation”, Journal of Engineering Science & Technology Review, vol. 11 (1).

Nikuradse, J. (1933). “Stromungsgesetze in rauhen Rohren”, VDI-forschungsheft, vol. 361 (1).

Nielsen, L. P. (1992). “Denitrification in sediment determined from nitrogen isotope pairing”, FEMS Microbiology Letters, vol. 86 (4), pp. 357-362.

Nortek AS, (2018). “The comprehensive manual for velocimeters”, Nortek AS, Norway.

Odgaard, A. J. (1981). “Transverse bed slope in alluvial channel bends”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 107, pp. 1677-1694.

Olsen, N. R. B. (2003). “Three-dimensional CFD modeling of self-forming meandering channel”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 129, pp. 366-372.

Pari, Y., Ramana Murthy, M. V., Jaya kumar, S., Subramanian, B. R., Ramachandran, S. (2008). "Morphological changes at Vellar estuary, India-impact of the December 2004 Tsunami", Journal of Environmental Management, vol. 89, pp. 45-57.

Park S. W., Ahn J. (2019). "Experimental and numerical investigations of primary flow patterns and mixing in laboratory meandering channel", Smart Water, 4 (2019).

Pelinovsky, E. N. (2006). "Tsunami wave hydrodynamics", Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia.

Pelinovsky, E. N., Shurgalina, E. G., Rodin, A. A. (2015). "Criteria for the transition from a breaking bore to an undular bore", Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics, vol. 51(5), pp. 530-533.

Parsaie, A., Haghiabi, A. H., Moradinejad, A. (2015). "CFD modeling of flow pattern in spillway's approach channel", Sustainable Water Resources Management, vol. 1, pp. 245-251.

Peregrine, D. H. (1967). "Longwaves on a beach", Journal of Fluid Mechanics, vol. 27, pp. 815–827.

Pradhan, A., Khatua, K. K., Sankalp, S. (2018). "Variation of velocity distribution in rough meandering channels", Advances in Civil Engineering, vol. 2018 (1), pp. 1-12.

Ran, D., Wang W., Hu, X. (2018). "Three-dimensional numerical simulation of flow in trapezoidal cutthroat flumes based on FLOW-3D", Frontiers of Agricultural Science and Engineering, vol. 5 (2), pp. 168-176.

Reeve, D., Chadwick, A., Fleming, C. (2004). Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice. CRC Press.

Robinson, D. (2009). "Development of the HRW Tsunami Generator: Conceptual design and preparatory modelling studies (IT585)", HR Wallingford.

Roh, M., Tinh, N.X., Tanaka, H. (2011). "Effect of river mouth morphology on tsunami propagation ascending rivers", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics), vol. 67, 2, pp. 607-614.

Rossetto, T., Allsop, W., Charvet, I., Robinson, D. (2011). "Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator", Coastal Engineering, vol. 58 (6), pp. 517-527.

Rozovskii, I. L. (1957). "Flow of water in bends of open channels", Academy of Science of the Ukrainian SSR., Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering, Kiev, Ukraine.

Sabeti, R., Heidarzadeh, M. (2022). "Numerical simulations of tsunami wave generation by submarine landslides: validation and sensitivity analysis to landslide parameters", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 148 (2), 05021016.

Saito, T. (2019). "Tsunami generation and propagation", Tokyo: Springer Japan.

Samir, S., Nistor, I., Gottlieb, J., Murty, T.S., Al-Riffai, M. (2010). "Method of lines simulations of tsunami and undular bore propagation in rivers", In:

Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. 25-29 July 2010, Toronto, Ontario, Canada.

Savitzky, A., Golay, M. J. E. (1964). "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures", Analytical Chemistry, vol. 36 (8), pp. 1627-1639.

Seelam, J. K., Baldock. T.E. (2011). "Comparison of bed shear under non-breaking and breaking solitary waves", The International Journal of Ocean and Climate Systems, vol. 2, 4, pp. 259-278.

Schafer, R. W. (2011). "What is a Savitzky-Golay filter?", IEEE Signal Processing Magazine, 28 (4), pp. 111-117.

Schimmels, S., Sriram, V., Didenkulova, I., Fernandez, H. (2014). "On the generation of tsunami in a large scale wave flume", Coastal Engineering Proceedings, vol. 1 (34), pp. 1-14.

Scurlock, S.M., Cox, A.L.,, Baird, C.L., Thornton, C.I., Abt, S. (2015). "Hybrid hydraulic modeling of river-training structures in sinuous channels", Bureau of Reclamation Technical Service Center: Denver, CO, USA, 2015.

Shen, J. (1981). "Discharge characteristics of triangular-notch thin-plate weirs. Studies of flow of water over weirs and dams", Washington D. C.: Geological Survey Water-Supply Paper 1617B.

Shimosako, K., Takahashi, S., Suziki, K., Kang, Y.K. (2002). "Large hydro-geo flume and its use for coastal engineering research", Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, vol. 41, pp. 81-89.

Silva, A. F. T. d., Peregrine, D. H. (1990). "Nonsteady computations of undular and breaking bores", Coastal Engineering Proceedings, pp. 1019-1032.

Sogut, D. V., Yalciner, A. C. (2018). "Effect of friction in tsunami inundation modeling", Coastal Engineering Proceedings, vol. 36, pp. 75-75.

Spence, R., Palmer, J., Potangaroa, R. (2009). "Eyewitness reports of the 2004 indian ocean tsunami from Sri Lanka, Thailand and Indonesia", Amsterdam: Springer.

Sukhodolov, A. (2012). "Structure of turbulent flow in a meander bend of a lowland river", Water Resources Research, vol. 48.

Sumer, B. M., Jensen, P. M., Sørensen, L. B., Fredsøe, J., Liu, P. L. F., Carstensen, S. (2010). "Coherent structures in wave boundary layers. Part 2. Solitary motion", Journal of Fluid Mechanics, vol. 646, pp. 207-231.

Sumer, B.M., Fuhrman, D.R. (2020). "Turbulence in coastal and civil engineering", Advance Series on Ocean Engineering, Vol. 51. World Scientific.

Stive, M. J. F. (1985). "A scale comparison of wave breaking on a beach", Coastal Engineering, vol. 9, pp. 151-158.

Struiksma, N., Olesen, K. W., Flokstra, C., de Vriend, H. J. (1985). "Bed deformation in curved aluvial channels", Delft Hy. Lab.

Synolakis, C.E. (1986). "The runup of long waves". Doktora Tezi, Kaliforniya Teknik Enstitüsü, Kaliforniya, Amerika Birleşik Devletleri.

Synolakis, C. E., Bernard, E. N., Titov, V. V., Kanoglu, U. Gonzalez, F. (2007). “Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models”, Washington: NOAA/OAR/PMEL.

Tadepalli, S., Synolakis C. E. (1994). “The run-up of N-Waves on sloping beaches”, In: Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, vol. 445, 1923, pp. 99-112.

Tanaka, H., Ishino, K., Nawarathna, B., Nakagawa, H., Yano, S., Yasuda, H., Watanabe, Y., Hasegawa, K. (2008). “Field investigation of disaster in Sri Lankan rivers caused by the 2004 Indian Ocean Tsunami”, Journal Hydroscience and Hydraulic Engineering, vol. 26 (1), pp. 91-112.

Tanaka, H., Tinh, N.X. (2012). “The 2010 Chilean and the 2011 Tohoku Tsunami waves impact to rivers in the Tohoku Region, Japan”, In: Proceedings of 33rd International Conference on Coastal Engineering.

Tanaka, N., Yagisawa, J., Yasuda, S. (2012). “Characteristics of damage due to tsunami propagation in river channels and overflow of their embankments in Great East Japan Earthquake”, International Journal of River Basin Management, vol. 10 (3), pp. 269-279.

Tanaka, H., Kayane, K., Adityawan, M.B., Roh, M., Farid, M. (2014). “Study on the relation of river morphology and tsunami propagation in rivers”, Ocean Dynamics, vol. 64 (9), pp. 1319-1332.

Tanaka, H., Tinh, N. X., Hiep, N. T., Kayane, K., Roh, M., Umeda, M., Tsuchiya, M. (2020). “Intrusion distance and flow discharge in rivers during the 2011 Tohoku Tsunami”, Journal of Marine Science and Engineering, vol. 8 (11), 882.

Thomson, W. (1876). “On the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes”, In: Proceedings of the Royal Society of London, vol. 25, pp. 5-8.

Thusyanthan, N.I., Madabhushi, S.P.G., (2008). “Tsunami wave loading on coastal houses: a model approach”, Proceedings of ICE, vol. 161, pp. 77-86.

Tolkova, E. (2013). “Tide-Tsunami interaction in Columbia River, as implied by historical data and numerical simulations”, Pure and Applied Geophysics, vol. 170 (6), pp. 1115-1126.

Tolkova, E., Tanaka, H., Roh, M. (2015). “Tsunami observations in rivers from a perspective of tsunami interaction with tide and riverine flow”, Pure and Applied Geophysics, vol. 172, pp. 953-968.

Tolkova, E., Tanaka, H. (2016). “Tsunami bores in Kitakami River”, Pure and Applied Geophysics, vol. 173, pp. 4039-4054.

Tolkova, E. (2018). “Tsunami Propagation in tidal rivers”, Springer Briefs in Earth Sciences, Springer.

Tomiczek T., Prasetyo A., Mori N., Yasuda T., Kennedy A. (2016). “Physical modelling of tsunami on shore propagation, peak pressures, and shielding effects in an urban building array”, Coastal Engineering, vol. 117, pp. 97-112.

Treske, A. (1994). “Undular bores (favre-waves) in open channels-experimental studies”, Journal of Hydraulic Research, vol. 32 (3), pp. 355-370.

Tsuji, Y., Yanuma, T., Murata, I., Fujiwara C. (1991). "Tsunami ascending in rivers as an undular bore", Natural Hazards, vol. 4, pp. 257-266.

USGS (2013a). Magnitude 9.1-Off The West Coast Of Northern Sumatra. USGS Earthquake Hazards Program.

USGS (2013b). Magnitude 9.0-Near The East Coast Of Honshu. USGS Earthquake Hazards Program.

Van Rijn, L. C. (1984). "Sediment transport, Part I: bed load transport", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 110 (10), pp. 1431-1456.

Van Rijn, L.C. (1990). "Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries", Seas and Oceans. Aqua Publications.

Velioglu, D., Yalciner, A. C., Kian, R., Zaytsev, A. (2015). "Validation and performance comparison of numerical codes for tsunami inundation", AGU Fall Meeting, 2015, NH23A-1848, San Francisco, USA.

Velioglu, D., Kian, R., Yalciner, A. C., Zaytsev, A. (2016). "Performance assessment of NAMI DANCE in tsunami evolution and currents using a benchmark problem", Journal of Marine Science and Engineering, vol. 4 (3), 49.

Velioğlu, D. (2017). "Advanced two-and three-dimensional tsunami models: benchmarking and validation", Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

Viana-Baptista, M. A., Soares, P. M., Miranda, J. M., Luis, J. F. (2006). "Tsunami propagation along Tagus estuary (Lisbon, Portugal) preliminary results", Science of Tsunami Hazards, vol. 24 (5), pp. 329-338.

Vries, M. (1989). "Rivers", Delft: I.H.E.

Wilkie, M.J., Young, G.A.J. (1952). "Pneumatic tide generator", The Engineer 11.

Wilson, K. M., Power, H. E. (2020). "Tsunami modelling with static and dynamic tides in drowned river valleys with morphological constrictions", Pure and Applied Geophysics, vol. 177 (3), pp. 1595-1616.

Wilson, B.W., Torum, A. (1972a). "Runup heights of the major tsunami on North American Coasts, In The Great Alaska Earthquake of 1964", Oceanography and Coastal Engineering (Committee on the Alaska Earthquake, National Research Council), National Academy of Sciences, Washington, D.C., USA, pp. 158–180.

Wilson, B.W., Torum, A. (1972b). "Effects of the tsunamis - an engineering study, in The Great Alaska Earthquake of 1964", United States, National Academy of Sciences - Engineering, Washington, D.C., USA, pp. 361- 526.

Wuppukondur A., Baldock T. E. (2020). "Modelling of tsunami wave overtopping in a converging channel", In: 22nd Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC2020), 7-10 December 2020, Brisbane, Australia.

Wuppukondur A. (2021). "Physical and numerical modelling of tsunami propagation, overtopping and bridge pier scour in coastal rivers", Doktora Tezi, Queensland Üniversitesi, Queensland, Avustralya.

Wuppukondur A., Baldock T. E. (2022). “Physical and numerical modelling of representative tsunami waves propagating and overtopping in converging channels”, Coastal Engineering, vol. 174, 104120.

Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., Speziale, C.G. (1992). “Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique”, Physics of fluids. A: Fluid dynamics, vol. 4, pp. 1510–1520.

Yalçıner, A. C., Süzen, M. L., Enginar, D. T. (2018). İstanbul İli Marmara Kıyıları Tsunami Modelleme, Hasar Görebilirlik ve Tehlike Analizi Güncelleme Projesi Sonuç Raporu, İstanbul, Türkiye.

Yalçıner, A. C., Pelinovsky, E.N. (2007). “A short cut numerical method for determination of periods of free oscillations for basins with irregular geometry and bathymetry”, Ocean Engineering, vol. 34 (5-6), pp. 747-757.

Yasuda, H., Yamada, T., Goto, C. (2003). “Experimental and numerical study on hydraulic bore generated by gate-operation”, Journal of Hydraulics, Coastal and Environment Engineering (JSCE), vol. 733, pp. 89-105.

Yasuda, H., Watanabe, Y., Fujima, K. (2004). “Report on river propagation of tsunami generated by the Tokachi-oki Eartquake on 26 September, 2003”, Journal of Hydraulics, Coastal and Environment Engineering (JSCE), vol. 768, pp. 209-218.

Yasuda, H. (2010). “One-dimensional study on propagation of tsunami wave in river channels”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 136 (2), pp. 93-105.

Yeh, H., Ghazali, A., Marton, I. (1989). “Experimental study of bore run-up”, Journal of Fluid Mechanics, vol. 206, pp. 563-578.

Yeh, H., (1991). “Tsunami bore runup”, Natural Hazards, vol. 4, pp. 209-220.

Yeh, K. C., Kennedy, J.F. (1993). “Moment Model of nonuniform channel-bend flow. II: erodible beds”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 119 (7), pp. 796-815.

Yeh, H., Liu, P.L.F., Synolakis, C. (1995). “Long-wave runup models”, New York: World Scientific.

Yeh, H., Tolkova, E., Jay, D., Talke, S., Fritz, H. (2012). “Tsunami hydrodynamics in the Columbia River”, Journal of Disaster Research, vol. 7 (5), pp. 604–608.

Yen, B. (1991). “Hydraulic resistance in open channels: channel flow resistance: centennial of Manning’s formula”, Water Resources Publications.

Yeung, P. K., Sreenivasan, K. R. (2014). “Direct numerical simulation of turbulent mixing at very low schmidt number with a uniform mean gradient”, Physics of Fluids, vol. 26, 015107.

Yılmazer, C., Arı Güner, H.A. (2024). “Physical and numerical modeling of flow in a meandering channel”, Water, 2024 (16), 1547.

Yim, S., Yeh, H., Cox, D., Pancake, C. (2004). “A shared-used large-scale multidirectional wave basin for tsunami research”, In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1-6 August 2004, Vancouer, Canada.

Yüksel, Y., Ağaççıoğlu, H. (1995). “Kıvrımlı kanallarda yanal akımın kıvrım hız dağılımına etkisi”, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler II. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı, pp. 203-211, 18-20 Eylül, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Yüksel, Y., Çevik, E. (2016). “Kıyı Mühendisliği”, 2. Baskı, Beta Yayınları, İstanbul, Türkiye.

Yüksel, Y., Yalçıner, A.C., Ersoy, Ş., Şahin, C., Güler, I., Öztürk, M., Çelikoğlu, Y., Güner, A. A., Aykut, O., Doğan, G. G., İşlek, F., Sarı, Ş. (2020). Türkiye Acil Afet İzleme Projesi, TÜBİTAK MAM, Proje No: 5200101.

Yüksel, Y. (2020). “İleri Akışkanlar Mekaniği”, 3. Baskı, Beta Yayınları, İstanbul, Türkiye.

Zhou, Z., Wang, J. (2019). “Numerical modeling of 3D flow field among a compound stilling basin”, Mathematical Problems in Engineering, 2019, pp. 1-17.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Güner, H.A., Yüksel, Y., Yalçıner, A.C., Öztürk, M., Şahin, C., Ersoy, Ş., Yılmazer, C., Altıntaş, O., Aydın, B., Ayaz, M. (2022). "Akarsularda tsunami dalgasının ilerlemesinin deneysel incelenmesi", Türkiye İnşaat Mühendisliği 18. Teknik Kongre ve Sergisi, 7 Kasım 2022, İstanbul, Türkiye.

2. Güner, H.A., Yüksel, Y., Öztürk, M., Şahin, C., Doğan, G.G., Ersoy, Ş., Yılmazer, C., Aydın, B., Altıntaş, O., Ayaz, M., Yalçıner, A.C. (2023). "Kıvrımlı kanalda tsunami dalgası ilerlemesinin incelenmesi", 75. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 10-14 Nisan 2023, Ankara, Türkiye.

3. Altıntaş, O., Öztürk, M., Güner, H.A., Yüksel, Y., Yalçıner, A.C., Şahin, C., Ersoy, Ş., Yılmazer, C., Aydın, B., Ayaz, M. (2023). "Bir kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasının değişiminin incelenmesi", In: 4th International Symposium of Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences 2023 (IEACES2023), 31 May-2 June 2023, pp. 511-519, Karabuk, Turkiye.

4. Güner, H.A., Yüksel, Y., Öztürk, M., Şahin, C., Doğan, G.G., Yılmazer, C., Aydın, B., Altıntaş, O., Ayaz, M., Ersoy, Ş., Yalçıner, A.C. (2023). "Laboratory observations of tsunami wave propagation in a meandering Channel", In: 10th Short Course/Conference on Applied Coastal Research (SCACR 2023), 4-6 September 2023, pp. 75, İstanbul, Turkiye.

5. Yılmazer, C., Arı Güner, H.A., Yüksel, Y., Öztürk, M., Şahin, C., Doğan, G.G., Aydın, B., Altıntaş, O., Ayaz, M., Ersoy, Ş., Yalçıner, A.C (2023). "Tsunami dalgasının kıvrımlı bir kanal boyunca ilerlemesinin deneysel olarak incelenmesi", 10. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 16-17 Kasım 2023, İzmir, Türkiye.

6. Arı Güner, H.A., Yılmazer, C., Yüksel, Y., Öztürk, M., Şahin, C., Doğan, G.G., Yalçıner, A.C. (2024). "Physical modeling of tsunami wave propagation in a meandering channel", In: 38th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2024), 8-14 September 2024, Rome, Italy.

Makaleler

1. Yılmazer, C., Arı Güner, H.A. (2024). "Physical and numerical modeling of flow in a meandering channel", Water, 2024 (16), 1547.

Projeler

1. Tsunami Dalgasının Akarsularda İlerlemesinin Modellenmesi, Proje Yürütücüsü: Havva Anıl GÜNER, TÜBİTAK MAG- Mühendislik Araştırma Destek Grubu, 1001 - Araştırma, ARDEB, Proje Numarası: 121M858, 01.10.2021-01.10.2024, BİDEB Burslusu.