

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Evren TURHAN

**BARAJ YIKILMASI AKIMININ DENEYSEL VE
İTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ (SPH)
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2017

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BARAJ YIKILMASI AKIMININ DENEYSEL VE İNTERPOLASYONLU
PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ (SPH) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Evren TURHAN

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez .././2017 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....
Doç.Dr. Hatice ÇAĞATAY
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Recep YURTAL
ÜYE

.....
Doç. Dr. Neslihan SEÇKİN
ÜYE

.....
Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN
ÜYE

.....
Yrd. Doç. Dr. Naime Filiz ÖZDİL
ÜYE

.....
Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından
Desteklenmiştir.

Proje No: FDK-2015-4887

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

ÖZ

DOKTORA TEZİ

**BARAJ YIKILMASI AKIMININ DENEYSEL VE İNTERPOLASYONLU
PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ (SPH) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Evren TURHAN

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Doç. Dr. Hatice ÇAĞATAY
Yıl: 2017, Sayfa: 393
Jüri : Doç. Dr. Hatice ÇAĞATAY
: Prof. Dr. Recep YURTAL
: Doç. Dr. Neslihan SEÇKİN
: Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN
: Yrd.Doç. Dr. Naime Filiz ÖZDİL

Yapılan çalışmada baraj yıkılması akım problemi farklı yoğunluklu akışkanların davranışlarını ele alabilmek amacı ile deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmiştir. Yatay bir düzlem üzerinde dikdörtgen yapıdaki bir kanalda mansabın kuru olduğu durum ile birlikte iki ayrı durgun haldeki akışkanları birbirinden ayıran düşey bir kapak mekanizmasının aniden kaldırılması ile oluşan şok dalgasının mansapta oluşturduğu etkiler irdelenmiştir. Deneyler sonucu elde edilen görüntüler görüntü işleme teknikleri kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Farklı yoğunluklu akışkan olarak su, yağ ve tuzlu su tercih edilmiştir. Modellemelerde ağ yapısına dayanan Flow-3D ve parçacık esaslı İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (SPH) yöntemi uygulanmıştır. Akışkanların mansapta yayılımı sırasında belirli anlardaki görüntüleri ve kanal boyunca noktasal akışkan serbest yüzey derinlik değişimleri incelenen fiziksel özelliklerdir. Ayrıca Kocaman (2007)'nin çalışmasında elde ettiği deney ve nümerik model sonuçları SPH yönteminde incelenerek, bu yöntemin akışkan davranışlarını ölçmedeki hassasiyeti test edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda tüm yöntemler için elde edilen sonuçların birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmekte, özellikle baraj yıkılması başlangıç safhalarında parçacık tabanlı Lagrange yöntemi olan SPH'ın değişken açık kanal akım problemlerini çözme konusunda gelişen yazılım ve bilgisayar teknolojileri desteği ile iyi bir alternatif olabileceği öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: Baraj Yıkılması, Farklı Yoğunluklu Akım, Görüntü İşleme, Flow-3D, SPH

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

THE INVESTIGATION OF DAM-BREAK FLOW USING WITH EXPERIMENTAL AND SMOOTHING PARTICLE HYDRODYNAMICS (SPH) METHODS

Evren TURHAN

**CUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hatice ÇAĞATAY

Year: 2017, Page:393

Jury : Assoc. Prof. Dr. Hatice ÇAĞATAY

: Prof. Dr. Recep YURTAL

: Assoc. Prof. Dr. Neslihan SEÇKİN

: Assoc. Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN

: Asst. Prof. Dr. Naime Filiz ÖZDİL

In this study, dam-break flow problem was investigated with experimental and numerical methods in order to observe behaviors of different density fluids. The effects of shock waves which were generated by abrupt lifting of a vertical gate mechanism in a horizontal and rectangular tank have been researched. This mechanism separates two different stagnant fluids or sections (for dry downstream), so dam-break flow conditions emerge. The images obtained from experimental were digitized using image processing techniques. Water, oil and salty water were preferred as different density fluids. Flow-3D based on mesh blocks and particle-based Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method were applied for numerical methods. The snapshots at certain moments during propagation and free-surface point level changes of fluids along the channel were examined as the physical properties. In addition, the results of experiments and numerical models obtained by Kocaman (2007) were tried to be examined in SPH method to test the sensitivity of this method in solving fluid behaviors. As a result of this study, it has been observed that the results obtained for all the methods are very compatible with each other. Especially, it is predicted that SPH method could be a good alternative with the software and computer technology support for solving changing variety open channel flow problems of particle-based Lagrange approach.

Keywords: Dam-break, Different Density Flow, Image Processing, Flow-3D, SPH

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Baraj yıkılması akım problemi, çözümünün oldukça zor olduğu kompleks akım özellikleri taşımaktadır. Barajlar yıkılmaları halinde rezervuarındaki büyük boyutlu akışkan mansaptaki canlı yaşamını tehlikeye sokabilecek etki yaratabilmektedir. Geçmişte bu konuda çeşitli vakalar gözlenmiş olup, yapısal kusurlar da dahil olmak üzere birçok nedenden barajlar yıkılma durumunda kalmıştır. Dolayısı ile barajlar her durumda içerisinde risk barındıran yapılar olarak değerlendirilmektedir. Barajların yıkılması halinde oluşan karmaşık akım davranışının ölçülmesi ileride oluşabilecek olumsuz etkileri önleyebilmek adına çok önemlidir. Şok dalgasının mansapta oluşturacağı fiziksel etkilerin incelenmesi taşkın öncesi ve sonrası acil eylem planları oluşturulmasına ciddi katkılar sağlayabilecektir.

Bu tip problemlerin çözümünde gerçek arazi verisi kullanımının oldukça güç olması sayısal modellerin uygulanmasını zorunlu hale getirmiştir. Geçmişte çözüm odaklı birçok analitik yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Genellikle kuru ve ıslak yatakta baraj yıkılması akımını sembolize eden akım şartları oluşturularak çok sayıda araştırma ortaya konulmuştur. Fakat analitik yöntemlerin çözümünde sayısal işlemlerin yükünün epeyce artıyor olması bu alanda bilgisayar teknolojisinin kullanımını gerektirmiştir. Son yıllarda yazılım ve bilgisayar donanımlarındaki baş döndürücü atılımlar söz konusu hesaplamaları kolaylaştırmak açısından faydalı bir araç haline gelmiştir. Literatürde son zamanlarda çeşitli yazılımlardan faydalanılarak baraj yıkılması akım problemi değişik yönlerden ele alınmaya çalışılmaktadır. Bilgisayar programları çok farklı yaklaşımları benimsemekle birlikte bu çalışma kapsamında irdelenen parçacık hidrodinamiği daha yeni yeni hesaplamalı akışkanlar dinamiği alanında kendine yer bulmaktadır. Parçacık esaslı bir yöntem olması çeşitli avantaj ve dezavantajları beraberinde getirebilmektedir.

Görsel nitelikli simülasyonlara imkan vermesi önemli bir avantaj olarak sayılırken, birkaç dezavantajından birisi güçlü bilgisayar özellikleri gerektirebilmesidir.

Yukarıda sayılan koşullar düşünüldüğünde baraj rezervuarında farklı yoğunluklu akışkanları ele alan sınırlı sayıda çalışmanın bulunması ve de son yıllarda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (SPH) yönteminin akışkanlar dinamiği özellikle baraj yıkılması gibi karmaşık akımlarda uygulanabilirliğini sınamak için bu çalışmada su, yağ ve tuzlu su gibi üç farklı yoğunluğa sahip akışkan yatay dikdörtgen bir kanalda baraj yıkılması akım şartları oluşturularak incelenmiştir. Tasarlanan kapak mekanizması barajı göstermektedir ve ani yıkım şartları neticesinde rezervuardaki akışkanın mansapta yayılması sağlanmıştır. Mansapta oluşturduğu serbest yüzey profili anlık görüntüleri elde edilmiş, ayrıca kanal boyunca belirli noktadaki derinlik değişim eğrileri çizilmiştir. Amaç taşkın öncesi ve sonrası çeşitli sebeplerle meydana gelebilecek baraj yıkılması halinde mansaptaki fiziksel etkileri birçok parametre yönünden irdelemek ve taşkın zararlarından korunmak adına eylem planları oluşturabilmektir.

Sadece nümerik yöntemlerin incelenmesi akım davranışlarını kestirebilmek için yeterli görülmemekte laboratuvar şartlarında deneysel yönlerden ele alabilmek de büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda laboratuvarında oluşturulan kanal düzeneği ve gerekli sistem altyapısı sayesinde yüksek hızlı kamera ile yapılan çekimlerle elde edilen görüntüler görüntü işleme teknikleri kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Bununla birlikte güvenilirliği kanıtlanmış Flow-3D modellemesinden de faydalanılarak üç yöntem için sonuçları mukayese etme ortamı yakalanmıştır. Çalışma dahilinde kuru mansap koşulları yanında karışabilen ve karışamayan akışkanların üç ayrı derinlik oranında (0.10, 0.20 ve 0.40) yıkılma sonrası taşkın şok dalgasının ilerlemesi durumu araştırılmıştır. SPH yöntemi ile ilgili detaylı bilgiler verilerek, kullanılan yöntemler açısından geniş bir açılım

sunulmuştur. Membra yönünde bir, mansapta üç noktada olmak üzere toplam dört noktada zamanla meydana gelen derinlik değişimi ölçülen parametrelerden bir tanesidir. Ayrıca çalışmaya bir altlık teşkil etmesi düşüncesi ile Kocaman (2007) çalışmasındaki deney ve nümerik sonuçlar SPH yöntemi ile test edilerek yöntemin farklı baraj yıkılması problemini çözebilme hassasiyeti ölçülmüştür. Kuru, ıslak ve değişik geometrilerde eşiklerle daha önceden irdelenen durumlar SPH ile tanımlanarak anlık simülasyon görüntüleri ve membada bir, mansapta iki olmak üzere toplamda üç farklı noktadaki seviye değişimleri incelenmiştir.

Çalışma sonucunda SPH yönteminin parçacık tabanlı Lagrange yaklaşımını benimseyen bir yöntem olması sebebiyle birtakım zorluklara sahip olmasına rağmen ileride bilgisayar teknolojisinin daha da gelişmesi ile birlikte oldukça iyi çözümler ortaya koyabileceği tartışmasız bir gerçek durumundadır. Parçacık yöntemli yaklaşımların HAD problemlerinin çözümü için iyi bir alternatif olabileceği öngörülmektedir. Ayrıca SPH yönteminin gerçeğe yakın simülasyon görüntüleri oluşturabilmesi baraj yıkılması akımları gibi çözümü zor olabilen problemlerin çok yönlü ele alınmasını sağlayabileceği ve ciddi katkılar sunabileceği düşünülmektedir.



TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile bana daima yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hatice ÇAĞATAY'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca gerek nümerik gerekse de deneysel çalışmalarda değerli katkılarından ötürü hocam Sayın Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ve her türlü yardım ve desteklerinden dolayı Sayın hocam Doç. Dr. Neslihan SEÇKİN'e de teşekkürlerimi iletmek isterim.

Deneysel çalışmalardaki önemli katkılarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Naime Filiz ÖZDİL ve sayısal çalışmalardaki fikir ve desteklerinden ötürü Sayın Yrd. Doç. Dr. Buse Melis ÖZYILDIRIM, donanım konularındaki yardımlarından dolayı da Öğr. Gör. Abdülvahap SAYGIN hocalarıma teşekkürü bir borç bilmekteyim.

Laboratuvar çalışmalarında her daim çok değerli katkılarını gördüğüm değerli arkadaşlarım Ali DEMİRKIRAN, Arş. Gör. Yavuz Çetin CUMA, Arş. Gör. Bahadır OK, Arş. Gör. Behzat Ergi ÖNGEL, Arş. Gör. Atakan TANTEKİN, Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi personelleri Cevdet YILDIRIM, Hasan DAŞ, Hakan TUNA, Çukurova Üniversitesi'nden Arş. Gör. Dr. Süleyman POLAT, DSİ'den İnşaat Mühendisi Fatih ARSLAN ve burada isimlerini sayamadığım tüm arkadaş ve dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kapak mekanizmasının tasarım ve imalatında değerli yardımlarını gördüğüm büyüğüm Sayın Mahmut SOMUNCU'ya da ayrıca teşekkürlerimi bildiririm.

Tezim süresince hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili eşim Emel ÜNAL TURHAN, annem, babam, kardeşim ve kızım Eylül'e sonsuz teşekkürlerimi iletmek isterim.

Ayrıca, doktora çalışmamı maddi yönden destekleyen Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi yöneticilerine ve çalışanlarına çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA NO

ÖZ.....	I
ABSTRACT	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR	XXVIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Barajlar ve Yapılış Amaçları	1
1.2. Baraj Yapısını Oluşturan Tesisler ve Tipleri	2
1.3. Barajların Çevreye Etkileri ve Baraj Yıkılması Problemi	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	35
2.1. Baraj Yıkılması (Dam-break) ve Flow-3D Çalışmaları	35
2.2. SPH Yöntemi ve Baraj Yıkılması Çalışmaları	68
2.3. Farklı Yoğunluklu SPH ve Dam-break Çalışmaları	90
3. MATERYAL VE METOD	123
3.1. Denklem Takımları.....	123
3.2. İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (SPH).....	130
3.2.1. Kernel Fonksiyonu	136
3.2.2. Momentum Denklemi	137
3.2.3. Süreklilik Denklemi.....	140
3.2.4. Hal Denklemi.....	140
3.2.5. Delta SPH	141
3.2.6. Değişken Algoritma.....	142
3.3. DualSPHysics Programı	145

3.3.1. DualSPHysics Pre-processing (İşlem Öncesi).....	156
3.3.2. DualSPHysics Processing (İşlem Kısmı).....	161
3.3.3. DualSPHysics Post-Processing (İşlem Sonrası)	162
3.4. Flow-3D Yazılımı.....	174
3.5. Görüntü İşleme Yöntemi	180
3.5.1. Görüntü İşleme Unsurları	186
3.5.2. Görüntü İşleme Analizi.....	193
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	199
4.1. Deney Düzenegi ve Yöntemi	199
4.2. Deney ve Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması	219
4.2.1. Kuru Hal Sonuçları	221
4.2.2. Karışabilen Akışkanların Islak Hal ($\alpha=0.10$) Sonuçları	244
4.2.3. Karışabilen Akışkanların Islak Hal ($\alpha=0.20$) Sonuçları	265
4.2.4. Karışabilen Akışkanların Islak Hal ($\alpha=0.40$) Sonuçları	284
4.2.4. Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.10$) Sonuçları.....	306
4.2.5. Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.20$) Sonuçları.....	313
4.2.6. Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.40$) Sonuçları.....	328
4.2.7. Deney Doğrulama Çalışması	336
4.2.8. Kocaman (2007) Sonuçlarının SPH ile Karşılaştırılması	337
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	355
KAYNAKLAR.....	363
ÖZGEÇMİŞ.....	385
EKLER	386

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA NO

Çizelge 1.1.	Baraj Yıkılması Sebeplerinin Yüzde Oranları.....	8
Çizelge 1.2.	Çok Sayıda Ölümün Gerçekleştiği Baraj Yıkılması Örnekleri	14
Çizelge 2.1.	Islak Yatakta Baraj Yıkılması Parametreleri (Gomez-Gesteira ve ark., 2012).....	76
Çizelge 2.2.	SPH Formülasyonu ve Parametreler (Dominguez ve ark., 2012).....	78
Çizelge 2.3.	SPH Formülasyonu ve Parametreler (Cunningham ve ark., 2014).....	83
Çizelge 3.1.	Farklı Biçimdeki Saint-Venant Denklemleri (Soares-Frazao, 2002).....	129
Çizelge 3.2.	Donanım Özellikleri (Dominguez ve ark., 2013).....	147
Çizelge 3.3.	Performans Sonuçları (Dominguez ve ark., 2013).....	147
Çizelge 3.4.	Farklı İşlemci Üniteleri (Turhan ve ark., 2016)	148
Çizelge 4.1.	SPH Kullanılan Parametreler.	219
Çizelge 4.2.	Çalışma Kapsamındaki Deneyler	221



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA NO

Şekil 1.1.	Atatürk Barajı ve HES Yapısı.....	2
Şekil 1.2.	Barajın Kısımları.....	4
Şekil 1.3.	Baraj Yıkılmasında Üstten Aşma Nedenleri.....	6
Şekil 1.4.	Baraj Yıkılmasında Temel Kayma Nedenleri.....	7
Şekil 1.5.	ABD Baraj Hasarlarının Nedenleri (1975-2001)	9
Şekil 1.6.	Malpasset Baraj Yıkılması Olayı (1959)	11
Şekil 1.7.	Teton Dolgu Barajı'nın Yıkılması (1976).....	11
Şekil 1.8.	Yakın Tarihte Gerçekleşmiş Baraj Yıkılması Örnekleri.....	12
Şekil 1.9.	Gökdere Baraj Kapağının Patlaması (2012)	13
Şekil 1.10.	Sayano/Shushenskaya Barajı'nın Yıkılması (2009).....	15
Şekil 1.11.	Los Frailes Barajı Yıkılması Hali	16
Şekil 1.12.	Borulanma Başlangıç ve Gelişim Safhaları	18
Şekil 1.13.	Merriespruit Harmony Barajı'nın Yıkılması (1994)	19
Şekil 1.14.	Surigao Del Norte Barajı'nın Yıkılması (1999).....	20
Şekil 1.15.	İtalya Stava Fluorit Barajı'nın Yıkılması (1985)	20
Şekil 1.16.	Kütahya Gümüş Maden Atık Barajı'nın Göçmesi (2011)	21
Şekil 1.17.	Brezilya Minas Gerais Atık Barajı'nın Yıkılması (2015)	22
Şekil 1.18.	Mississippi Nehri Taşkını	24
Şekil 1.19.	Baraj Yıkılması Akım Probleminin Tanımı.....	25
Şekil 1.20.	Baraj Yıkılması Acil Eylem Plan Örneği.....	27
Şekil 1.21.	Baraj Emniyeti Bileşenleri.....	28
Şekil 1.22.	Teori-Deney ve Modelleme Çalışma Sistematiği	29
Şekil 1.23.	Deney Düzenegi (Kocaman, 2007).....	30
Şekil 1.24.	Deney düzenegi şematiği (Akışkanlar: Su, Yağ ve Tuzlu Su).....	32
Şekil 1.25.	Deney düzenegi şematiği, Su-Yağ, Yağ-Su, Tuzlu Su-Yağ Yağ-Tuzlu Su	32
Şekil 1.26.	Düzenlenen Laboratuvar Ortamı.....	33

Şekil 1.27.	Deney Çekim Anı	34
Şekil 2.1.	Deney Kanalı (Bell ve ark., 1992)	36
Şekil 2.2.	Deney Düzeneği ve Ölçüleri (Bellos ve ark., 1992)	37
Şekil 2.3.	Deney Düzeneği ve Ölçüm Noktalarının Konumu (Soares-Frazao ve ark., 2003)	41
Şekil 2.4.	Deney Geometrisi (Janosi ve ark., 2004).....	43
Şekil 2.5.	Kullanılan Deney Düzeneği (Kocaman, 2007)	45
Şekil 2.6.	Üçgen Eşik Durumunda Deney ve Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması (Vazquez ve Roncal, 2009)	47
Şekil 2.7.	Üç Boyutlu Model Sonuçları ile Deney Görüntülerinin Karşılaştırılması (Biscarini ve ark., 2010)	48
Şekil 2.8.	Model Şematiği (Gao ve ark.,2010).....	49
Şekil 2.9.	Deney ve Modellemelerin Seviye Değişimi Grafiği (Gao ve ark.,2010)	49
Şekil 2.10.	Deney Düzeneği ve Ölçüm Noktaları (Yang ve ark., 2010)	50
Şekil 2.11.	Değişik Zaman Adımlarındaki Anlık Görüntülerin Karşılaştırılması51(Kocaman ve Güzel, (2011a)).....	51
Şekil 2.12.	Sonuçların Karşılaştırılması (Kocaman ve Güzel, (2011b))	53
Şekil 2.13.	Farklı Zamanlardaki Su Yüzü Profili Sonuçlarının Karşılaştırılması (Kocaman ve Özmen-Çağatay, 2012)	54
Şekil 2.14.	Deney Düzeneği Görünümü (Oertel ve Bung, 2012).....	56
Şekil 2.15.	Fiziksel Model Yapısı (Haltaş ve ark., 2013)	58
Şekil 2.16.	Farklı Zaman Adımlarında Su Seviyesi Değişimleri Sonuçlarının Karşılaştırılması (Özmen-Çağatay ve ark., 2014)	60
Şekil 2.17.	Deney düzeneği Görünümü (Nicholas, 2015).....	61
Şekil 2.18.	Farklı Noktalarda Su Seviyesi Değişimlerinin Modellenmesi (Robb ve Vazquez, 2015).....	62
Şekil 2.19a.	$\alpha=0.20$ için P2, P4 ve P5 Noktalarında Zamanla Su Seviyesi Değişimi Grafiği (Kocaman ve Özmen-Çağatay, 2015).....	63

Şekil 2.19b. $\alpha=0.40$ için P2, P4 ve P5 Noktalarında Zamanla Su Seviyesi Değişimi Grafiği (Kocaman ve Özmen-Çağatay, 2015).....	64
Şekil 2.20. Baraj Yıkılması Akım Problemi Şematiği (Ye ve ark., 2016)	65
Şekil 2.21. H1 Noktasının Seviye Değişiminin Karşılaştırılması (Ye ve ark., 2016)	65
Şekil 2.22. Sonuçların Karşılaştırılması (Zhang ve ark.,2017)	66
Şekil 2.23. Deney Düzeneği Şematiği (He ve ark., 2017)	67
Şekil 2.24. Deney ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması (He ve ark., 2017)	67
Şekil 2.25. Deney Düzeneği (Gomez-Gesteira ve Dalrymple, 2004)	69
Şekil 2.26. SPHysics Web Sitesi.....	70
Şekil 2.27. Baraj Yıkılması Analizi Deney Düzeneği (Crespo,2008).....	70
Şekil 2.28. Kullanılan Deney Düzeneği (Muthu, 2008).....	71
Şekil 2.29. Model Geometrisi (Amanifard ve ark., 2011).....	72
Şekil 2.30. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması (Amanifard ve ark., 2011).....	74
Şekil 2.31. Farklı Viskozite Durumlarında Baraj Yıkılması Akımının Zamanla Gelişimi (Gomez-Gesteira ve ark., 2012)	75
Şekil 2.32. Islak Yatakta Baraj Yıkılması Deney Düzeneği (Gomez-Gesteira ve ark., 2012).....	75
Şekil 2.33. DualSPHysics ile Baraj Yıkılması Akımının Zamanla Değişimi (Dominguez ve ark., 2012)	77
Şekil 2.34. Belirli Zamanlardaki Akışkanın Yayılımı Durumunun Deneysel ve Sayısal Kıyaslanması (Canelas ve ark., 2012)	78
Şekil 2.35. Baraj Yıkılması Problemi Başlangıç Koşulları ve Geometrisi (Özbulut,2013).....	79
Şekil 2.36. Üç Adet GPU Kullanılarak Oluşturulan Çoklu GPU-SPH Modelleme Görüntüsü (Valdez-Balderas ve ark., 2013)	80

Şekil 2.37. Baraj Yıkılması Akımının Deney Düzeneği (Dominguez ve ark., 2013)	81
Şekil 2.38. Parçacık Sayılarına Göre Akışkanın Yayılımı ve Kuvvet Hesap-Uygulama Zaman Adımları (Dominguez ve ark., 2013)	81
Şekil 2.39. Deney Düzeneği Başlangıç Koşulları (St. Germain ve ark., 2014) ...	82
Şekil 2.40. Düşey Bir Duvar da Tsunami Dalga Yayılımı Örnek Çalışması (Cunningham ve ark., 2014)	83
Şekil 2.41. DualSPHysics Programı ile Dalga Yayılması ve Silindire Etkisinin Modellenmesi (Cunningham ve ark., 2014)	84
Şekil 2.42. Deney Düzeneği Planı (Aureli ve ark., 2015)	85
Şekil 2.43. Üç Boyutlu SPH Modeli ile Baraj Yıkılması Akım Görüntüleri (Aureli ve ark., 2015)	86
Şekil 2.44. Düzleştirilmiş Tanecik Hidrodinamiği'nin Deneysel ve Analitik Sonuçlarla Karşılaştırılması (Dinçer ve Bozkuş, 2015)	87
Şekil 2.45. Baraj Yıkılması Akım Simülasyon Görüntüleri (Xu, 2016)	88
Şekil 2.46. Baraj Yıkılması Akımı Deney Düzeneği Şematiği (Gu ve ark., 2017)	89
Şekil 2.47. Baraj Yıkılması Akımının Deneysel ve Sayısal Olarak Karşılaştırılması (Gu ve ark., 2017)	90
Şekil 2.48. Modelin Şematik Görünümü (Hieu ve ark., 2004)	91
Şekil 2.49. Su Seviyesi Değişiminin Deneysel ve Nümerik Olarak Karşılaştırılması (Hieu ve ark., 2004)	92
Şekil 2.50. İki Farklı Yoğunluklu Akışkanın Yayılımı (Gladstone ve ark., 2004)	94
Şekil 2.51. Deney Düzeneği (Hu ve Sueyoshi, 2010)	95
Şekil 2.52. Sayısal Veriler ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Hu ve Sueyoshi, 2010)	96
Şekil 2.53. İki Fazlı Baraj Yıkılması Problem Geometrisi (Shakibaeini ve Jin, 2011)	97

Şekil 2.54. İki Fazlı Baraj Yıkılması Akım Gelişiminin Sayısal ve Deneysel Karşılaştırılması (Shakibaeini ve Jin, 2011)	97
Şekil 2.55. İki Akışkanın Tabakalaşma Davranışı için Deney Düzeneği (Li ve ark., 2013)	98
Şekil 2.56. İki Akışkanın Tabakalaşma Davranışı için Deney Aparatları (Li ve ark., 2013)	99
Şekil 2.57. Kuru Yataktaki Baraj Yıkılması Çalışma Şematiği (Mokos, 2013).	100
Şekil 2.58. Deneysel ve Nümerik Sonuçlar Arasındaki Farklılıklar (Mokos, 2013).....	100
Şekil 2.59. Aynı Çözünürlük Oranında Tek Fazlı SPH (Crespo, 2008) ile Çok Fazlı SPH Yönteminin Karşılaştırılması (Mokos, 2013)	100
Şekil 2.60. Deney Düzeneğinin Şematik Görünümü (Kunugi ve ark., 2013)....	101
Şekil 2.61. Baraj Yıkılması Simülasyonu (Shao, 2013).....	102
Şekil 2.62. İki Fazlı Baraj Yıkılması Problemi Geometrisi (Razavitoosi ve ark., 2014)	103
Şekil 2.63. Deney Kanalının Görünümü (Furuya ve ark., 2014)	103
Şekil 2.64. Uygulanan Metodun Deneysel Verilerle Karşılaştırılması (Paredes ve Imas, 2014).....	105
Şekil 2.65. Model Şematiği Deney-Nümerik Karşılaştırması (Fourtakas, 2014)	106
Şekil 2.66. İki Farklı Çözünürlükte Baraj Yıkılması Modellemesinin Anlık Görünümleri (Adami, 2014)	106
Şekil 2.67. Deney ve Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması (Adami, 2014).....	107
Şekil 2.68. $t(g/H)^{0.5}=3.2$ için çok fazlı akım modellemesi (Chen ve ark., 2015).....	108
Şekil 2.69. Basınç Değerlerinin Boyutsuz Olarak Zaman Değişiminde Birçok Yönden Karşılaştırılması (Chen ve ark., 2015).....	108
Şekil 2.70. Deney Düzeneği ve Ölçüleri (Mokos ve ark., 2015)	109

Şekil 2.71. Sonuçların Karşılaştırılması (Mokos ve ark., 2015)	110
Şekil 2.72. Belirli Bir Noktadaki Su Seviyesinin Zamanla Değişiminin Karşılaştırılması (Douglas ve ark., 2015)	111
Şekil 2.73. Mikro Deney Düzeneği (Kunz ve ark., 2015).....	112
Şekil 2.74. Deney ve Nümerik Model Sonuçlarının Karşılaştırılması (Memarzadeh ve ark., 2015)	113
Şekil 2.75. Sayısal Data ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Sun ve Sakai, 2016)	115
Şekil 2.76. Islak Bir Yataktaki Baraj Yıkılması Deney Düzeneği Gösterimi (Cubos-Ramirez ve ark., 2016)	116
Şekil 2.77. Deneysel ve Nümerik Serbest Yüzey Profili Sonuçlarının Karşılaştırılması (Cubos-Ramirez ve ark., 2016).....	116
Şekil 2.78. Deney Düzeneği Şekli (Gong ve ark., 2016)	117
Şekil 2.79. Nümerik ve Deneysel Su Seviyesi Değişimleri Grafiği (Gong ve ark., 2016)	117
Şekil 2.80. Tabanı Parçacık Kaplı Baraj Yıkılması Problem Çizimi (Park ve ark., 2016).....	118
Şekil 2.81. Baraj Yıkılması Deneysel ve Nümerik Karşılaştırması (Fourtakas ve Rogers, 2016)	119
Şekil 2.82. Baraj Yıkılması Deney Düzeneği ve Şematiği (Ye ve Zhao, 2017)	120
Şekil 2.83. Serbest Yüzey Profili Sonuçlarının Deneysel ve Nümerik Karşılaştırması (Ye ve Zhao, 2017)	120
Şekil 2.84. Farklı Nokta ve Koşullarda Deney ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması (Ye ve Zhao, 2017)	121
Şekil 3.1. Euler Tabanlı Metot ve Langrange Metodu	131
Şekil 3.2. $W(r)$ Kernel Fonksiyonu	133
Şekil 3.3. Yüzey Parçacıkları	135

Şekil 3.4.	dp Değişkenliklerine Göre Çözüm Süresi Grafiği (N=351- 753750) (Turhan ve ark., 2016)	149
Şekil 3.5.	DualSPHysics Dizin Ağacı ve Gerekli Dosyalar	150
Şekil 3.6.	CPU ve GPU Uygulamalarının Akış Diyagramı	152
Şekil 3.7.	DualSPHysics Çalışma Akış Şeması	153
Şekil 3.8.	GenCASE İşleminin Giriş ve Çıkış Dosyaları	157
Şekil 3.9.	GenCASE İşlemi Üçgen Şeklinin Oluşturulması	158
Şekil 3.10.	Üç Boyutlu Bir Örneğin GenCASE işlemi ile DualSPHysics'e ve Parçacıklara Dönüştürülmesi (Crespo ve ark., 2013).....	159
Şekil 3.11.	DPI ile Tanımlanan Objelerin Özelliklerinin Girildiği Arayüz	160
Şekil 3.12.	DPI ile Tanımlanacak Objenin Geometrisinin Girildiği Arayüz	161
Şekil 3.13.	DualSPHysics Kodu ile Giriş ve Çıkış Verileri	162
Şekil 3.14.	PartVTK Kodu Giriş ve Çıkış Dosyaları	164
Şekil 3.15.	MeasureTool Kodunun Giriş ve Çıkış Dosyaları.....	166
Şekil 3.16.	BoundaryVTK Kodunun Giriş ve Çıkış Dosyaları	167
Şekil 3.17.	Noktalardan Yüzeylere Dönüşüm Şekli.....	168
Şekil 3.18.	IsoSurface Kodunun Giriş ve Çıkış Dosyaları	168
Şekil 3.19.	Paraview Programında Görselleştirme.....	169
Şekil 3.20.	CaseDambreak Modelleme Görüntüsü	170
Şekil 3.21.	CaseTwoPhases Modelleme görüntüsü	171
Şekil 3.22.	CaseDambreak Akışkan Tanımlama Algoritması.....	171
Şekil 3.23.	Case_Def.xml-GenCASE-Case.xml Akış Şeması	172
Şekil 3.24.	İşlem Öncesi ve Sonrası SPH Akış Şeması	173
Şekil 3.25.	Flow-3D ile Baraj Yıkılması Örneği.....	175
Şekil 3.26.	Hesaplama Yapılan Hücreye Etkiyen Değişkenler	176
Şekil 3.27.	VOF Metodu Örneği	178
Şekil 3.28.	Flow-3D Modelleme Süreci.....	179
Şekil 3.29.	Farklı Mesh Aralığı Görüntüsü.....	179
Şekil 3.30.	Flow-3D Modelleme Sonrası Görselleştirme	180

Şekil 3.31. Görüntü İşleme Mantığı.....	181
Şekil 3.32. Sayısal Görüntülerin Kullanıldığı Alanlar	182
Şekil 3.33. Görüntü İşleme Öğeleri.....	182
Şekil 3.34. Yoğunluk Değerleri (Intensity).....	183
Şekil 3.35. Sayısal Görüntü Nitelikleri	184
Şekil 3.36. Piksel (x,y) Fonksiyonu ve Izgaralı Görünüm	185
Şekil 3.37. Çalışmada Kullanılan Dijital Video Kamera ve Fotoğraf Makinesi.....	189
Şekil 3.38. Çalışmada Oluşturulan Aydınlatma Sistemi	192
Şekil 3.39. Çalışmada Kullanılan Güçlü Donanım Özellikli Bilgisayar	193
Şekil 3.40. Görüntü Sayısallaştırma Deney Görüntüsü.....	195
Şekil 3.41. Farklı Açık ve Uzaklıklardaki Kalibrasyon Panosu Örneği (Kocaman, 2007).....	196
Şekil 3.42. Metrik Kalibrasyon İşlemlerinin Uygulanması.....	197
Şekil 4.1a. Deney Kanalı Demonte Ölçüleri-I	199
Şekil 4.1b. Deney Kanalı Demonte Ölçüleri-II.....	200
Şekil 4.2. Deney Kanalı'nın Pleksiglas Malzemeden Teşkili.....	201
Şekil 4.3. Pleksiglas Kelepçelerin Oluşturulması ve Konumlandırılması.....	201
Şekil 4.4. Kapak Yuvaları ve Üst Kısımın Teşkil Edilmesi.....	202
Şekil 4.5. Deney Düzenegi Yerleşim Plan ve Kesiti.....	203
Şekil 4.6. Deney Düzeneginin Genel Bir Şematiği.....	204
Şekil 4.7. Makara ve Yük Sistemi.....	205
Şekil 4.8. Yük Teşkili.....	206
Şekil 4.9. Aydınlatma Sistemi Bileşenleri	207
Şekil 4.10. Deney Kanalı'nın Ölçülendirilmesi.....	208
Şekil 4.11. Dip Çekme Aparatı	208
Şekil 4.12. Ortam Sıcaklığı ve Nem Ölçümü.....	209
Şekil 4.13. Yağ ve Tuzlu Suyun Viskozitesinin Brookfield Viskozimetre ile Ölçülmesi	210

Şekil 4.14.	Tuzlu Suyun Yoğunluğunun Tespit Edilmesi	211
Şekil 4.15.	Tuzlu Suyun Homojen Dağılımı için Tornada Karıştırılması.....	211
Şekil 4.16.	Su-Yağ Karışımının Ayrıştırılması	212
Şekil 4.17.	Yağın Deney Kanalına Huni ile Aktarılması	213
Şekil 4.18.	Su-Su ($\alpha=0.20$) Deneyinde Akışkanların Gıda Boyası ile Renklendirilmesi	213
Şekil 4.19.	Enstantane ve ISO Ayarları	214
Şekil 4.20.	Kalibrasyon Ayarı.....	215
Şekil 4.21.	Orijinal Görüntü ve Kalibre Edilmiş Görüntü	215
Şekil 4.22.	Yapay Viskozite Tayini	218
Şekil 4.23.	Su Kuru Durum Şematik Gösterimi.....	222
Şekil 4.24.	Su Kuru Durum Deney Başlangıç Anı ($t=0$).....	222
Şekil 4.25.	Akışkan Seviye Değişimlerinin Ölçüldüğü Noktalar.....	223
Şekil 4.26a.	Su Kuru hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s).....	224
Şekil 4.26b.	Su Kuru Hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s).....	225
Şekil 4.27.	Bir Sanal Derinlik Ölçer Örneği	226
Şekil 4.28.	Su Kuru Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi	227
Şekil 4.29.	Su Kuru Durum için $D=1.00$ m Yüzey Profili Farklılıkları	229
Şekil 4.30.	Yağ Kuru Durum Şematik Gösterimi	230
Şekil 4.31.	Yağ Kuru Durum Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	230
Şekil 4.32a.	Yağ Kuru Hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s).....	232
Şekil 4.32b.	Yağ Kuru Hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s).....	233
Şekil 4.33.	Yağ Kuru Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi	234
Şekil 4.34.	Yağ Kuru Durum için $C=0.70$ m Noktası Görüntü Farklılıkları.....	235
Şekil 4.35.	Tuzlu Su Kuru Durum Şematik Gösterimi	236

Şekil 4.36. Tuzlu Su Kuru Durum Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	236
Şekil 4.37a. Tuzlu Su Kuru Hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)	237
Şekil 4.37b. Tuzlu Su Kuru Hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s)	238
Şekil 4.38. Tuzlu Suyun Kuru Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi .	239
Şekil 4.39. Tuzlu Su Kuru Durum için $D=1.00$ m Görüntü Farklılıklarına Bir Örnek	241
Şekil 4.40. Su, Yağ ve Tuzlu Su Kuru Durum Deneylerinin Belirlenen Noktalardaki Seviye Değişimleri	242
Şekil 4.41. Su-Su ($\alpha=0.10$) Islak Durum Şematik Gösterimi.....	245
Şekil 4.42. Su-Su ($\alpha=0.10$) Durumu Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	245
Şekil 4.43a. Su-Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s).....	246
Şekil 4.43b. Su-Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s).....	247
Şekil 4.44. Su-Su $\alpha=0.10$ Islak Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	249
Şekil 4.45. Su-Su $\alpha=0.10$ Islak Durum $B=0.45$ m Görüntü Farklılıkları	251
Şekil 4.46. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) Islak Durum Şematik Gösterimi.....	252
Şekil 4.47. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$).....	252
Şekil 4.48a. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s).....	253
Şekil 4.48b. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s).....	254
Şekil 4.49. Yağ-Yağ $\alpha=0.10$ Islak Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	256
Şekil 4.50. Yağ-Yağ $\alpha=0.10$ Islak Durum $D=1.00$ m Görüntü Farklılıkları	257
Şekil 4.51. Tuzlu Su-Tuzlu Su Islak Durum Şematik Gösterimi	258

Şekil 4.52. Tuzlu Su-Tuzlu Su Islak Durum ($\alpha=0.10$) Deney	
Başlangıcı ($t=0$).....	258
Şekil 4.53a. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık	
Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)	259
Şekil 4.53b. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık	
Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s)	260
Şekil 4.54. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.10$ Islak Durum A,B,C ve D	
Noktasal Seviye Değişimi	262
Şekil 4.55. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.10$ Islak Durum C=0.70 m	
Görüntü Farklılıkları	263
Şekil 4.56. Su, Yağ ve Tuzlu Su 0.10 Derinlik Oranı Deneylerinin	
Belirlenen Noktalardaki Seviye Değişimleri	264
Şekil 4.57. Su-Su Islak Durum ($\alpha=0.20$) Şematik Gösterimi.....	265
Şekil 4.58. Su-Su Islak Durum ($\alpha=0.20$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$).....	265
Şekil 4.59a. Su-Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	
($t=0.0-0.2839$ s).....	267
Şekil 4.59b. Su-Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	
($t=0.4509-2.9893$ s).....	268
Şekil 4.60. Su-Su $\alpha=0.20$ Islak Durum A,B,C ve D Noktasal	
Seviye Değişimi	269
Şekil 4.61. Su-Su $\alpha=0.20$ Islak Durum A=0.15 m Görüntü Farklılıkları.....	270
Şekil 4.62. Yağ-Yağ Islak Durum ($\alpha=0.20$) Şematik Gösterimi.....	271
Şekil 4.63. Yağ-Yağ Islak Durum ($\alpha=0.20$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$).....	271
Şekil 4.64a. Yağ-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	
($t=0.0-0.2839$ s).....	272
Şekil 4.64b. Yağ-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	
($t=0.4509-2.9893$ s).....	273
Şekil 4.65. Yağ-Yağ $\alpha=0.20$ Islak Durum A,B,C ve D Noktasal	
Seviye Değişimi	274

Şekil 4.66a. Yağ-Yağ $\alpha=0.20$ Islak Durum $C=0.70$ m Görüntü Farklılıkları-I....	275
Şekil 4.66b. Yağ-Yağ $\alpha=0.20$ Islak Durum $C=0.70$ m Görüntü Farklılıkları-II ..	276
Şekil 4.67. Tuzlu Su-Tuzlu Su Islak Durum ($\alpha=0.20$) Şematik Gösterimi	276
Şekil 4.68. Tuzlu Su-Tuzlu Su Islak Durum ($\alpha=0.20$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	277
Şekil 4.69a. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)	278
Şekil 4.69b. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s)	279
Şekil 4.70. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.20$ Islak Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi	280
Şekil 4.71. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.20$ Islak Durum $B=0.45$ m Görüntü Farklılıkları	282
Şekil 4.72. $\alpha=0.20$ için A,B,C ve D Noktalarındaki Akışkan Derinlik Değişimi.....	283
Şekil 4.73. Su-Su Islak Durum ($\alpha=0.40$) Şematik Gösterimi.....	284
Şekil 4.74. Su-Su Islak Durum ($\alpha=0.40$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$).....	285
Şekil 4.75a. Su-Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s).....	286
Şekil 4.75b. Su-Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s).....	287
Şekil 4.76. Su-Su $\alpha=0.40$ Islak Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	288
Şekil 4.77a. Su-Su $\alpha=0.40$ Islak Durum $A=0.15$ m Görüntü Farklılıkları-I	289
Şekil 4.77b. Su-Su $\alpha=0.40$ Islak Durum $A=0.15$ m Görüntü Farklılıkları-II	290
Şekil 4.78. Yağ-Yağ Islak Durum ($\alpha=0.40$) Şematik Gösterimi	290
Şekil 4.79. Yağ-Yağ Islak Durum ($\alpha=0.40$) Deney Başlangıcı ($t=0$).....	291
Şekil 4.80a. Yağ-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s).....	292

Şekil 4.80b. Yağ-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s).....	293
Şekil 4.81. Yağ-Yağ $\alpha=0.40$ Islak Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	294
Şekil 4.82a. Yağ-Yağ $\alpha=0.40$ Islak Durum C=0.70 m Görüntü Farklılıkları-I....	295
Şekil 4.82b. Yağ-Yağ $\alpha=0.40$ Islak Durum C=0.70 m Görüntü Farklılıkları-II ..	296
Şekil 4.83. Tuzlu Su-Tuzlu Su Islak Durum ($\alpha=0.40$) Şematik Gösterimi	296
Şekil 4.84. Tuzlu Su-Tuzlu Su Islak Durum ($\alpha=0.40$) Deney Başlangıcı ($t=0$).....	297
Şekil 4.85a. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)	298
Şekil 4.85b. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s)	299
Şekil 4.86. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.40$ Islak Durum A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi	300
Şekil 4.87a. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.40$ Islak Durum A=0.15 m Görüntü Farklılıkları-I.....	301
Şekil 4.87b. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.40$ Islak Durum A=0.15 m Görüntü Farklılıkları-II	302
Şekil 4.88. $\alpha=0.40$ için A,B,C ve D Noktalarındaki Akışkan Derinlik Değişimi.....	303
Şekil 4.89. Farklı Derinlik Oranlarında Suyun A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	305
Şekil 4.90. Su-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney Şematik Gösterimi	306
Şekil 4.91. Su-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	306
Şekil 4.92. Su-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler.....	307
Şekil 4.93. Su-Yağ $\alpha=0.10$ A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	308
Şekil 4.94. Yağ-Su ($\alpha=0.10$) Deney Şematik Gösterimi	309
Şekil 4.95. Yağ-Su ($\alpha=0.10$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	310

Şekil 4.96. Yağ-Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler.....	311
Şekil 4.97. Yağ-Su $\alpha=0.10$ A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	312
Şekil 4.98. Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney Şematik Gösterimi	313
Şekil 4.99. Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	313
Şekil 4.100. Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	315
Şekil 4.101. Su-Yağ $\alpha=0.20$ A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	316
Şekil 4.102. Yağ-Su ($\alpha=0.20$) Deney Şematik Gösterimi	317
Şekil 4.103. Yağ-Su ($\alpha=0.20$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$).....	317
Şekil 4.104. Yağ-Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	319
Şekil 4.105. Yağ-Su $\alpha=0.20$ A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	320
Şekil 4.106. Tuzlu Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Durumu Şematik Gösterimi	321
Şekil 4.107. Tuzlu Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	321
Şekil 4.108. Tuzlu Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	322
Şekil 4.109. Tuzlu Su-Yağ $\alpha=0.20$ A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	323
Şekil 4.110. Yağ-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Durumu Şematik Gösterimi	324
Şekil 4.111. Yağ-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$)	325
Şekil 4.112. Yağ-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	326
Şekil 4.113. Yağ-Tuzlu Su $\alpha=0.20$ A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	327
Şekil 4.114. Su-Yağ ($\alpha=0.40$) Durumunun Şematik Gösterimi	328
Şekil 4.115. Su-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$).....	329
Şekil 4.116. Su-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	330
Şekil 4.117. Su-Yağ $\alpha=0.40$ A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	331
Şekil 4.118. Yağ-Su ($\alpha=0.40$) Durumunun Şematik Gösterimi	332
Şekil 4.119. Yağ-Su ($\alpha=0.40$) Deney Başlangıç Anı ($t=0$).....	332
Şekil 4.120. Yağ-Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH Anlık Görüntüler	334
Şekil 4.121. Yağ-Su $\alpha=0.40$ A,B,C ve D Noktasal Seviye Değişimi.....	335
Şekil 4.122. Deney Doğrulama Yapılması	336

Şekil 4.123. Deney Doğrulama Sonucu Elde Edilen Eğriler.....	337
Şekil 4.124. Kocaman (2007) Deney Kanalı.....	338
Şekil 4.125. Kuru Hal ($\alpha=0$) Deney Şematiği (Kocaman, 2007)	339
Şekil 4.126. Su Kuru Hal ($\alpha=0$) Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırılması	340
Şekil 4.127. Kocaman (2007) Kuru Hal ile SPH Noktasal Seviye Değişimi	341
Şekil 4.128. Islak Hal ($\alpha=0.10$) Deney Şematiği (Kocaman, 2007).....	342
Şekil 4.129. Islak Hal ($\alpha=0.10$) Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırılması.....	343
Şekil 4.130. Kocaman (2007) Islak Hal ($\alpha=0.10$) ile SPH Noktasal Seviye Değişimi	344
Şekil 4.131. Islak Hal ($\alpha=0.40$) Deney Şematiği (Kocaman, 2007).....	345
Şekil 4.132. Islak Hal ($\alpha=0.40$) Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırılması.....	346
Şekil 4.133. Kocaman (2007) Islak Hal ($\alpha=0.40$) ile SPH Noktasal Seviye Değişimi	347
Şekil 4.134. Mansapta Üçgen Eşik Olması Deney Şematiği (Kocaman, 2007)...	348
Şekil 4.135. Üçgen Eşik Durumunda Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırması ..	349
Şekil 4.136. Kocaman (2007) Üçgen Eşik ile SPH Noktasal Seviye Değişimi Karşılaştırması.....	350
Şekil 4.137. Mansapta Trapez Eşik Olması Deney Şematiği (Kocaman, 2007) ..	351
Şekil 4.138. Trapez Eşik Durumunda Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırması ..	352
Şekil 4.139. Kocaman (2007) Trapez Eşik ile SPH Noktasal Seviye Değişimi Karşılaştırması.....	353



SİMGELER VE KISALTMALAR

A,B,C ve D	: Seviye Değişimlerinin Ölçüldüğü Noktalar
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASCII	: American Standard Code for Information Interchange
ASDSO	: Association of State Dam Safety Officials
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
CCD	: Charged Coupled Device
CFL	: Courant Friedrichs Lewy- Courant Koşulu Katsayısı
CIP	: Constrained Interpolation Profile-Sınırlı İnterpolasyon Profili
cm	: santimetre
CMC	: Carboxymethyl Sodyum Selüloz
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	: Central Processing Units-Merkezi İşlemci Ünite
CUDA	: Compute Unified Device Architecture
DCDEM	: Distributed Contact Discrete Element Method- Ayrık Eleman Metodu
DPI	: DualSPHysics Pre-processing Interface
DSİ	: Devlet Su İşleri
DTH	: Düzleştirilmiş Tanecik Hidrodinamiği-SPH
dp	: Parçacıkları Arası Mesafe
FAVOR	: Fractional Area/Volume Obstacle Representation
F(r)	: Düzleştirilmiş Ortalama
fps	: frame per second
g	: Yerçekimi İvmesi
GPU	: General Processing Units-Grafik İşlemci Ünite
GIU	: Graphical User Interface
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HES	: Hidroelektrik Santral

h_0	: Memba Akışkan Yüksekliği
h_1	: Mansap Kuyruk Akışkan Yüksekliği
H	: Boyutsuz yükseklik ($=h/h_0$)
ISPH	: Sıkıştırılmayan SPH Yöntemi
kg	: SI Birim Sistemi kilogram
km/sa	: kilometre/saat
L	: Karakteristik boy
LED	: Light Emitting Diode
LES	: Large Eddy Simulation-Büyük Girdap Simülasyonu
m	: SI Birim Sistemi metre
MAC	: Marker and Cell
mm	: milimetre
MPS	: Moving Particle Simulation- Hareketli Parçacık Metodu
N	: Maksimum Parçacık Sayısı
NTSC	: National Television Standards Committee
NWS	: National Weather Service
s	: SI Birim Sistemi saniye
sa	: saat
SPH	: İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği
p	: Basınç
PAL	: Phase Alternate Lines
PEO	: Polietilen Oksit
PIV	: Parçacık Görüntülemeli Hız Tekniği
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
Re	: Reynolds
RGB	: Red (Kırmızı) Green (Yeşil) Blue (Mavi)
RNG	: Renormalized Group

SWE	: Shallow Water Equations- Sığ Su Denklemleri
T	: Boyutsuz Zaman ($=t(g/h_0)^{1/2}$)
UBBK	: Uluslararası Büyük Barajlar Komitesi
V	: Hız Vektörü
vb.	: ve benzeri
VOF	: Volume of Fluid-Akışkan Hacmi
XML	: Extensible Markup Language
WCSPH	: Zayıf Sıkıştırılabilir SPH Yöntemi
W(r)	: Kernel Fonksiyonu
α	: Derinlik oranı (h/h_0)
ρ	: Yoğunluk
m	: Kinematik Viskozite
η	: Türbülans Viskozitesi



1. GİRİŞ

1.1. Barajlar ve Yapılış Amaçları

İnsanlık tarihi boyunca suyun vazgeçilmez bir öneminin olması taşkın, sel,...vb. gibi doğal afetlerde insanoğlunun suyu kontrol etme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Suyun biriktirilmesi ve kontrollü bir şekilde kullanılması amacından yola çıkılarak ele alınan “*Baraj Mühendisliği*” kavramı çok eski yıllardan beri önemini yitirmeyen konulardan biri olmuştur. Kısaca barajları suyun birikmesi sonucu oluşan rezervuar, göl veya hazne yapısı ile suyun akışını engelleyen, geciktiren veya suyun akışına yön veren yapılar olarak tanımlamak mümkündür. Ayrıca barajları farklı tip malzemelerden değişik şekillerde inşa edilebilen devasa boyutlu dayanma yapıları olarak da ifade edebiliriz (Berkün, 2007). Şekil 1.1’de Fırat Nehri üzerinde enerji ve sulama amaçlı olarak kullanılan toprak dolgu baraj tasarımı ve dolgu hacmi açısından dünyada inşa edilen barajlar arasında beşinci durumda bulunan Atatürk Barajı ve Hidroelektrik Santral (HES) yapısı görülmektedir (www.dsi.gov.tr/).

Barajlar yapımı yıllarca sürebilen, maliyetli ve yıkılmaları durumunda çok ciddi can ve mal kayıpları oluşturabilen mühendislik yapılarıdır. Dolayısı ile her türlü faktörün göz önüne alınarak barajların güvenli bir şekilde inşa edilmeleri çok büyük bir önem taşımaktadır. Özel amaçlı olarak yapılanlar haricinde 15 m’den yüksek su depolayan yapılara “*Baraj*” denilmektedir. Yükseklikleri 15 m ve daha az olup su depolayan yapılara ise “*Gölet*” adı verilmektedir. Barajlar yapılış gayelerine göre tek veya çok amaçlı olarak inşa edilebilmektedirler. Çoğunlukla içme suyu, tarımsal sulama, endüstriyel amaçlı kullanım, elektrik enerjisi üretimi ve taşkın koruma gibi amaçlara yönelik yapılmakta birlikte akışın düzenlenmesi, yeraltı suyunun yükseltilmesi, rekreasyon alanlarının oluşturulması, sürüntü maddelerinin kontrol edilmesi, canlı yaşamının korunması, endüstriyel atıkların tutulması, su taşımacılığının geliştirilmesi,...vb. hedeflere hizmet etmek amacı ile de yapılabilmektedirler (Devlet Su İşleri (DSİ) Performans Programı, 2016).



Şekil 1.1. Atatürk Barajı ve HES Yapısı (www.dsi.gov.tr/)

Barajların faydaları genellikle tarım alanlarının zamanında sulanabilmesi, hidroelektrik enerji üretiminin gerçekleştirilmesi, içme-kullanma suyunun düzenli ve sürekli olması, yerleşim ve tarım alanlarının taşkın gibi doğal afetlerden korunması olarak sayılabilir. Bunun yanında barajların balıkçılığın gelişmesi, erozyonun önlenerek toprağın korunması, iklim ve milli güvenlik üzerindeki olumlu etkileri yanı sıra su kalitesi ve kirlenme kontrolü gibi dolaylı faydaları da mevcuttur (Ormancılık ve Su Şurası, 2017).

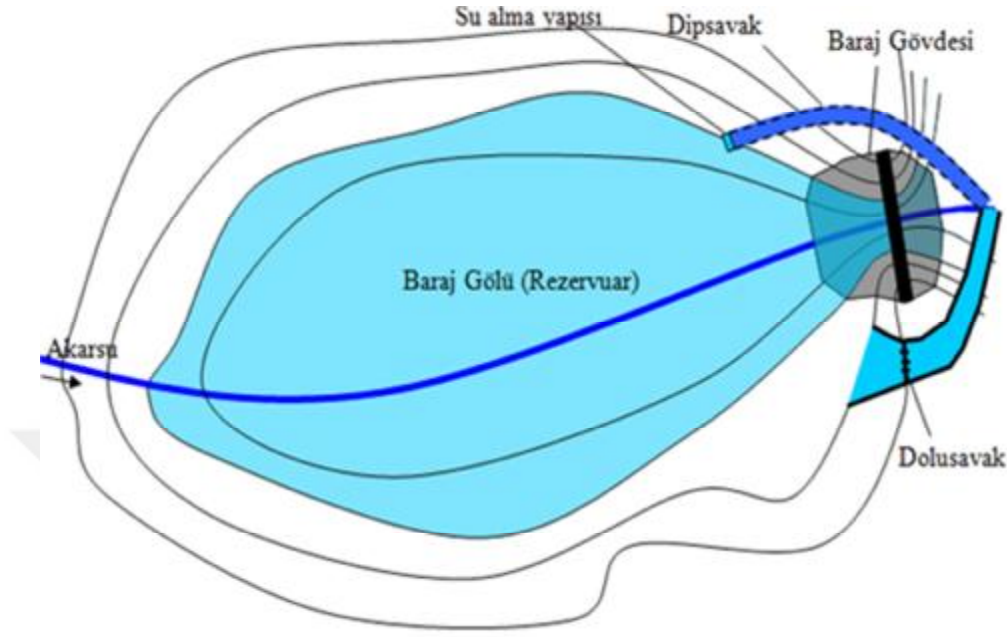
1.2. Baraj Yapısını Oluşturan Tesisler ve Tipleri

Barajları meydana getiren başlıca tesisleri aşağıda belirtildiği şekilde gruplara ayırabiliriz:

- Gövde Yapısı
- Baraj Gölü
- Su Alma Yapısı
- Dolusavak Yapısı
- Derivasyon Tesisleri
- Dipsavak Yapısı
- Baraj Sitesi
- Enerji İletim Tesisleri ve Diğer Tesisler

(Enerji santralleri, içme suyu arıtma tesisleri, balık geçitleri,...vb.)

Barajlar gövde yapıları, gövdede kullanılan malzeme özelliği ve bundan faydalanma şekillerine göre dolgu barajlar, beton barajlar ve çoğunlukla dolgu ve beton ağırlık gövde çeşitlerinden oluşan karma tipli barajlar olarak sınıflandırılabilir. Buna ilaveten kendi içerisinde gövde malzemesinin cinsine göre kargir baraj, taş ve tuğla beton baraj, betonarme baraj, öngerilmeli beton baraj olarak da ele alınabilmektedir. Dolgu barajlar ise toprak dolgu ve kaya dolgu baraj olarak ikiye ayrılmaktadır. Gövdenin statik projelendirilmesine göre ise ağırlık barajlar, kemer ağırlık barajlar, kemer barajlar, payandalı barajlar, toprak barajlar ve kaya dolgu barajlar olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca barajları çerçeveli barajlar başlığı altında çelik ve ahşap barajlar şeklinde kategorize edebilmek mümkündür. Şekil 1.2’de baraj yapısını oluşturan başlıca kısımlar görülmektedir (Yurtal, 2004).



Şekil 1.2. Barajın kısımları (Yurtal, 2004)

1.3. Barajların Çevreye Etkileri ve Baraj Yıkılması Problemi

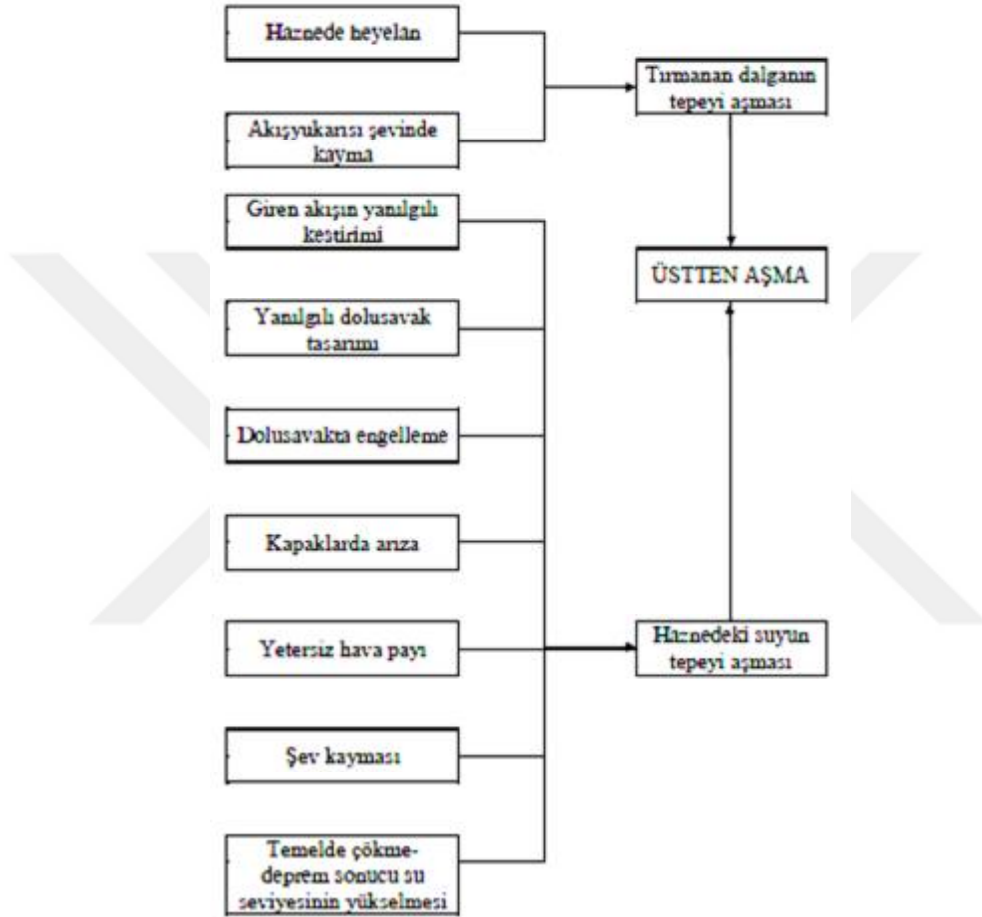
Suyun canlı yaşamı için çok önemli bir unsur olması su kaynaklarının kullanımına dair çalışmaların insanlık tarihi başlangıcından bugüne kadar uzanmasını sağlamıştır. İlk kurulan barajların bir kısmının yaklaşık 7000 yıl önce hüküm süren Mezopotamya dönemine rastladığı düşünülmektedir. Yirminci yüzyıl ile birlikte su kaynaklarının kontrolü ve kullanılması ile ilgili çalışmalar ciddi oranda gelişme göstermeye başlamış, dünya nüfusunun hızlı bir artış içerisinde olması canlı yaşamı için suyu vazgeçilmez bir noktaya ulaştırmıştır. Fakat barajların yapılış amaçları açısından tartışmasız faydalarının yanında doğal dengenin korunması, tarım alanlarının zarar görmemesi, mansap kısmında yer alan yerleşim yerleri ve sanayi birimlerinin olumsuz etkilenmemesi,...vb. gibi durumların da göz ardı edilmemesi gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Baraj yapımı esnasında yeraltı su seviyesinin yükselmesi, su yükünün artması sonucunda heyelan ve jeolojik olayların oluşabilme ihtimali, buharlaşma ile su miktarlarının

azalabilmesi, kıyı erozyonunun artması,...vb. gibi sebepler olumsuz etkiler olarak mutlaka değerlendirilmesi gereken noktalardır (Berkün, 2007).

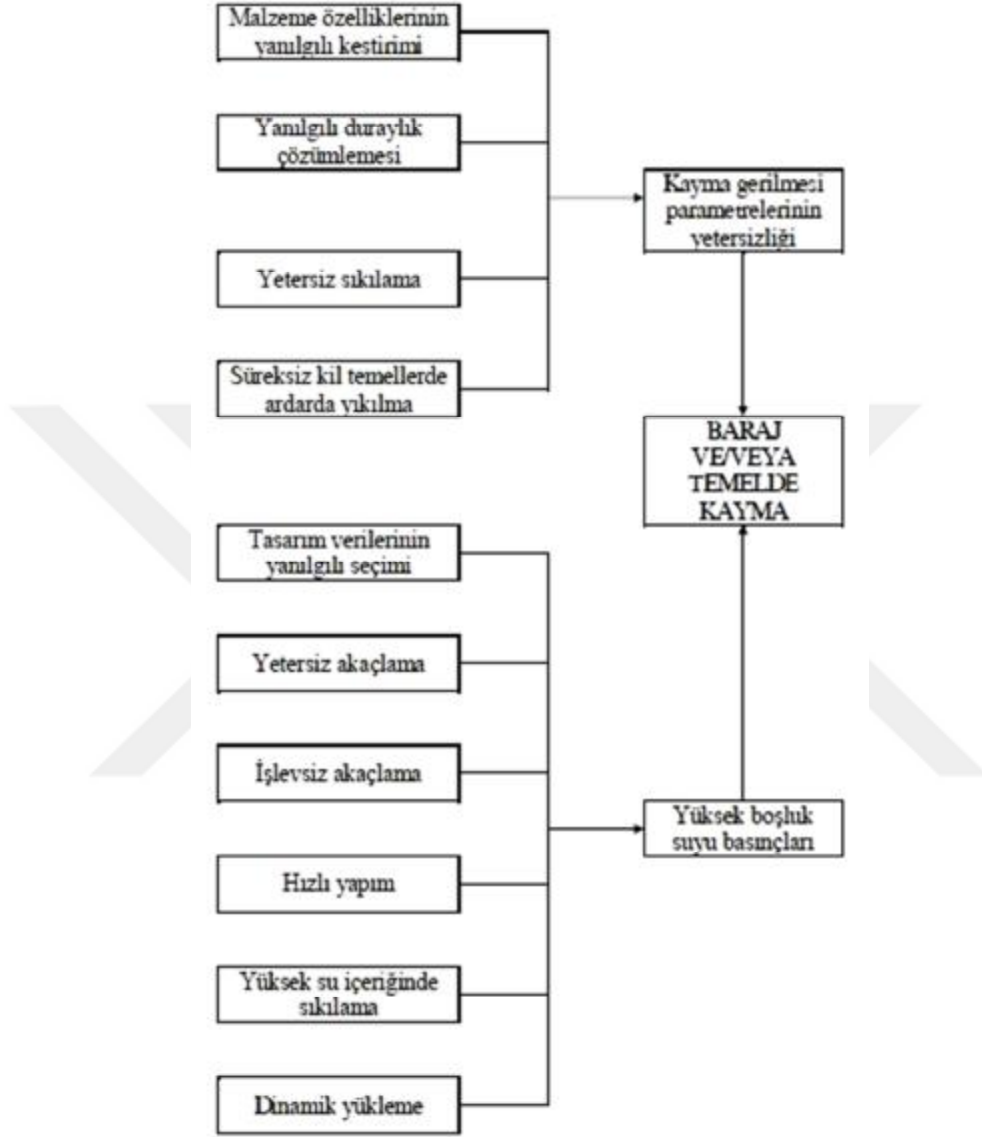
Son yıllarda teknolojinin çok hızlı bir şekilde ilerlemesi baraj yapımında her türlü etkenin göz önüne alınmasını kolaylaştırmıştır. Fakat yaşanması muhtemel doğal afetler bize barajların yıkılma riskinin her zaman için mevcut olduğunu göstermektedir. Birçok baraj yapısının mansabında şehirler, yerleşim yerleri, tarım alanları, sanayi birimleri,...vb. gibi yaşam alanları yer almaktadır. Dolayısı ile çeşitli sebeplerle barajların yıkılmaları durumunda rezervuarında tuttuğu devasa miktardaki su kütlesi yıkılan nokta veya açılan gedikten akarak mansaptaki söz konusu yaşam noktalarına zarar verebilecek duruma gelebilmektedir. Bu durum da çok sayıda can ve mal kaybı, maddi hasarlara yol açabilmektedir. İşte bu noktada ciddi tehlikeler oluşturabilecek söz konusu baraj yıkılmalarının nedenleri aşırı yağışlar neticesinde meydana gelebilecek taşkınlar ve yapım hatalarından kaynaklanabilecek etkiler olarak sayılabilir. Nedenlerden birisi olan aşırı, uzun yıllar ortalamaların üzerinde seyreden yağışların kısa bir zaman periyodu içerisinde gerçekleşmesi '*ani taşkın*'lar olarak değerlendirilmektedir. Ani taşkınların beraberinde meydana getirdiği baraj yıkılması hali ise mansaptaki canlı yaşamını ciddi bir tehdit ile baş başa bırakabilmektedir. Ani gerçekleşiyor olması zarar görmesi muhtemel noktalardaki yerleşimlerin tahliye edilebilmesi için gereken zamanı oldukça kısaltmaktadır (Kocaman, 2007).

19. yüzyılın başlarında İspanya'da yaklaşık 50 m yüksekliğine sahip Puentes Barajı'nın göçmesi baraj tasarımı yeni esasların ele alınmasını zorunlu kılmıştır. Barajların planlama ve tasarım aşamalarında baraj yeri ve tipinin doğru seçilememesi, uygun olmayan temel özelliklerinin ele alınması, aşırı sızma durumu yapısal riskleri çok daha fazla artırmaktadır. Taşkınlar, depremler ve toprak kayması gibi doğal afetler risk kaynakları sınıfında olup yapı malzemelerinin yetersizlikleri, yapım hataları, hazne işletmesindeki uygunsuzluklar ve savaş durumları ayrıca tehdit unsurları olarak değerlendirilmektedir. Sonuç olarak taşkın sebebi ile baraj gövdesinden suyun aşması, temel hataları ve baraj gövdesinde

oluşabilecek borulanma genel yapısal kusurlar olarak görülmektedir (Rudvan, 2002). Şekil 1.3'te baraj yıkılma nedenlerinden üstten aşma ve Şekil 1.4'te ise temel kayma durumları genel bir şema şeklinde görülmektedir (Abay, 2015).



Şekil 1.3. Baraj yıkılmasında üstten aşma nedenleri (Abay, 2015)



Şekil 1.4. Baraj yıkılmasında temel kayma nedenleri (Abay, 2015)

Barajlar gibi hidrolik yapıların yıkılmaları genelde yapısal yıkılma ve performansa yönelik yıkılma olarak iki tipte ele alınmaktadır. Yapısal yıkılma yapının özelliklerinin değişimini tanımlamakta, performansa yönelik yıkılma ise

performans sınırlarının aşılmasını ifade etmektedir (Tung ve Yen, 1993). Baraj yıkılma sebeplerini Çizelge 1.1'deki gibi gösterebiliriz (Abay, 2015).

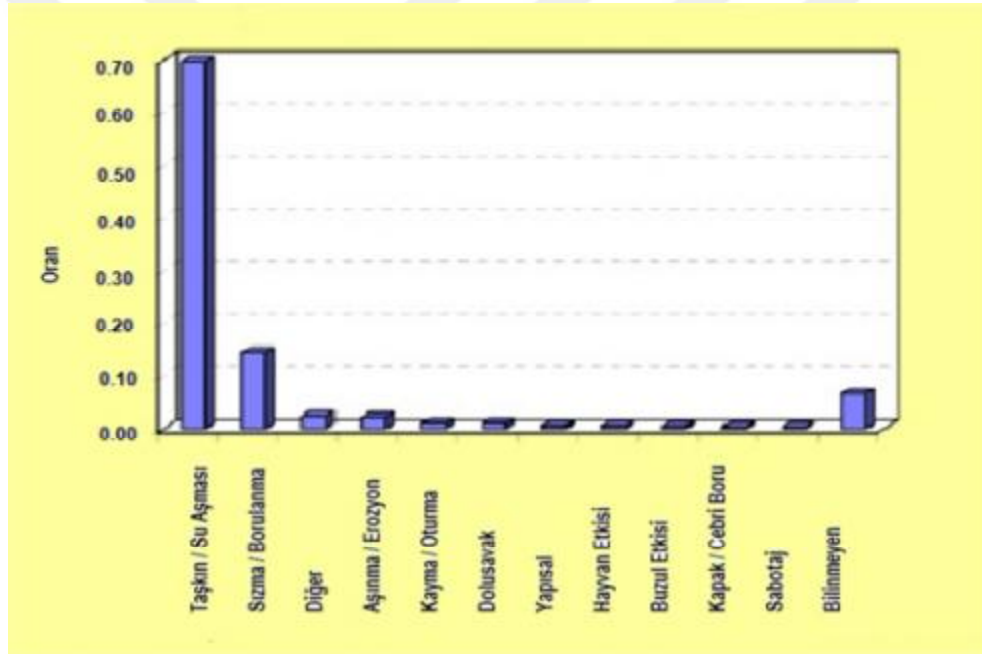
Çizelge 1.1. Baraj yıkılma sebeplerinin yüzde olarak oranları (Abay, 2015)

<i>Yıkılma Şekli</i>	<i>Yüzdesi (%)</i>	<i>Sebepler</i>
Üstten akışkan yapının aşması durumu	34	Dolusavak tasarımı yanlışlıkları, Sürüntü maddesinin birikmiş olması, Baraj gövde üst kısmının oyulmuş olması
Temel problemleri	30	Oturmadaki dengesizlikler, Şev stabilitesi sorunları, Taban suyu basıncının yüksek olması, Sızma problemleri
Borulanma ve sızma durumları	20	Gövdedeki çökmeler, Hidrolik yapı boyunca oluşan sızma ve göçmeler, Gövdedeki çatlak veya gedikler
Boru ve vana durumları	10	Düğüm ve bağlantı noktaları ile gediklerden dolgu malzemesinin girişi
Diğer birçok sebep	6	Hayvan etkileri,...vb. gibi

Baraj tipi açısından değerlendirildiğinde dolgu ve beton barajlar için yıkılma şekli farklı olabilmektedir. Örneğin dolgu barajlarda zamanla değişen bir yıkılma söz konusudur. Yıkılma aşama aşama gerçekleşmekte, akışkan-zemin etkileşiminden kaynaklı kompleks bir problem özelliği göstermektedir. Dolayısı ile çözümü oldukça zordur. Dolgu barajlardaki yıkılmanın analizi yapıldığında ise baraj gövdesinde oluşan bir noktadan çıkan akımın, hidrograf parametrik yaklaşım ile matematiksel olarak akarsu boyunca ötelenmesi şeklinde bir değerlendirilmeye gidilmektedir. Beton barajlarda ise kısmi veya tam ani yıkılmalarından bahsedilebilir (Kocaman, 2007). Beton barajlardaki hasarların büyük bir bölümü temel oturma problemleri ve üstten aşma gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır.

Her barajın planlanma ve uygulama aşamaları kendine has özellikler taşımakta, yıkılmaların seyrinin aynı tip barajlarda dahi çeşitlilik gösterebildiği görülebilmektedir. Yapılan araştırmalar yıkılmalarda baraj yaşının, tipinin, büyüklüğünün etken olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yıkılma ve hasarların yarısına

yakını barajın işletmeye açılmasını takip eden beş yıllık zaman zarfı içerisinde gerçekleşmektedir. 15 m'den daha alçak barajların yıkılma olasılıklarının 50 m'den yüksek barajlara göre daha fazla olduğu düşünülmektedir. Sebep olarak ise diğerine göre yüksek olan barajların tasarımından işletilmesine kadar olan süreçlerde daha dikkatli ve titiz çalışmaların etkili olduğu öngörülmektedir (Yenigün ve Sepetçioğlu, 2012). Şekil 1.5'te Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde 1975-2001 yılları arası yapılmış olan baraj güvenliği araştırması sonucu elde edilen baraj hasarlarının nedenleri görülmektedir (ASDSO, 2012).



Şekil 1.5. ABD baraj hasarlarının nedenleri, 1975-2001 (ASDSO, 2012)

Bütün tiplerdeki hasar ve yıkılma süreci; temel problemleri, üstten aşma gibi sebepler, ayrıca borulanma ve sızma kaynaklı nedenlerden oluşmuştur. Tüm araştırmalar aşırı yağış-taşkın durumlarının ve dolusavak ile ilgili yetersiz kapasite, engel, erozyon ve çıkış yapısı deformasyonlarının yıkılmalarda çok büyük etkilerinin olduğunu göstermektedir. Dolusavak yetersizliği suyun baraj gövdesi

üzerinden aşmasına neden olmakta, dolayısı ile ekstrem taşkın ihtimalleri göz önünde bulundurularak taşkın tahminlerinin yapılmasının ve bunun sonucunda barajların tasarımılandırılmasının hayati bir önemi bulunmaktadır (Yenigün ve Sepetçioğlu, 2012).

Daha önce bahsedildiği üzere 1802 yılında İspanya'daki Puentes Barajı büyük baraj yıkılma örneklerinin ilki olma özelliğini taşımaktadır. Temel uygulama hataları sonucu oluşan şekil bozukluğu barajın göçmesine neden olmuştur. Fakat kayıtlardaki ilk baraj yıkılması örneği 575 yılında sebebi bilinmeyen nedenlerle yıkılan Yemen'deki Marib Barajı'dır. Bu şekilde geçmişte birçok sebepten ötürü meydana gelen yaklaşık 100'e yakın baraj yıkılması örneği kaydedilmiştir.

Şekil 1.6'da 1959 yılında Fransa'daki Malpasset Kemer Barajı yıkılması fotoğrafı görülmektedir (Nicholas, 2015). İnşaat uygulaması sırasında geoteknik stabilite sorunları baş göstermiş, ilk zemin incelemeleri kapsamlı bir şekilde ele alınamamıştır. İki köy yok olmak durumunda kalmıştır. Şekil 1.7'de görüldüğü gibi ABD'de 1976 yılında Teton Dolgu Barajı hem yapısal kusurlar hem de borulanma sonucu yıkılmıştır (<http://www.geol.ucsb.edu/>). Toprak dolgu kısmında su sızıntısı meydana gelmiş, bu da barajın yıkılmasına neden olmuştur. Çok sayıda can ve mal kaybı oluşmuştur.



Şekil 1.6. Malpasset baraj yıkılması olayı-1959 (Nicholas, 2015)



Şekil 1.7. Teton dolgu barajının yıkılması-1976 (<http://www.geol.ucsb.edu/>)

2002 yılında ülkemiz sınırları içerisinde denize dökülen Asi Nehri üzerinde bulunan Suriye'deki Zeyzoun Barajı'nın yıkılması sonucu Hatay'daki bazı verimli tarım arazileri sular altında kalmıştır. 2006 yılında Hawai'deki Ka Loko Barajı, 2008 yılında Çin'deki Zipingpu Barajı, 2010 yılında ABD'nin Iowa Eyaleti'ndeki Lake Delhi Barajı, 2010 yılında Kazakistan'daki Kyzyl-Agash, ABD'deki Hope Mills ve Polonya'daki Niedow, 2011 yılında Japonya'daki Fujinuma ve Vietnam'daki Dakrong-3, 2014 yılında Zimbabwe'deki Tokwe Mukorsi barajlarının yıkılmaları yakın tarihte oluşmuş en fazla dikkat çeken baraj yıkılması örnekleri arasındadır. Şekil 1.8'de yakın zamanda gerçekleşmiş baraj yıkılması örnekleri ile ilgili fotoğraflar görülmektedir (Yenigün ve Sepetçioğlu, 2012).



Şekil 1.8. Yakın tarihte gerçekleşmiş baraj yıkılması örnekleri (Yenigün ve Sepetçioğlu, 2012)

24 Şubat 2012 yılında Adana ilindeki Göksu Nehri üzerinde inşa edilen Gökdere Köprü Barajı'nda derivasyon tünel kapağının patlaması sonucunda membadaki devasa su kütlesi taşkın şok dalgası şeklinde önüne çok sayıda işçi ve iş makinelerini alarak mansap boyunca yayılmıştır. Facia ciddi oranda can ve mal kaybına sebebiyet vermiştir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Gökdere baraj kapağının patlaması-2012 (<http://www.hurriyet.com.tr/>)

Çok sayıda ölümlle sonuçlanan baraj yıkılması örnekleri toplu bir şekilde Çizelge 1.2'de gösterilmektedir. Çeşitli tiplerdeki baraj yıkılma örneklerinde ölü sayıları ile ekonomik zararlar arasında anlamlı düzeyde bir ilişki bulunmamaktadır. ABD'de gerçekleşen South Fork ve Buffalo Creek Barajları'nın yıkılmalarında sırası ile 2209 ve 125 kişi hayatını kaybetmiş, South Fork Barajı'nın yıkımı ile yaklaşık 17 milyon dolar zarar oluşurken, Buffalo Creek Barajı'nın yıkılması ile yaklaşık 400 milyon dolar zarar meydana gelmiştir (Abay, 2015).

Çizelge 1.2. Çok sayıda ölümün gerçekleştiği baraj yıkılması örnekleri
(Abay, 2015)

Yılı	Baraj Adı	Ülke	Ölü Sayısı (Kişi)	Yıkılma Sebebi
1802	Puentes	İspanya	608	Gevşek zemin yapısı
1852	Bilberry	İngiltere	81	Aşırı yağış
1864	Dale Dike	İngiltere	244	Yapım hatası
1874	Mill Nehri	ABD	139	Tasarım hatası
1884	Bouzey	Cezayir	150	Temel kayması
1889	South Fork	ABD	2209	Aşırı yağış
1911	Austin	ABD	78	Tasarım hatası
1916	Desna	Avusturya-Macaristan İmparatorluğu	62	Yapım hatası
1917	Tigra	Hindistan	1000	Temele su sızması
1923	Gleno	İtalya	356	Tasarım ve inşaat hataları
1928	St. Francis	ABD	600	Geoteknik stabilite sorunu
1935	Sella Zerbino	İtalya	111	Geoteknik stabilite sorunu ve taşkın durumu
1943	Eder ve Möhne	Almanya	70	Bombalanma sonucu
1953	Tangiwai	Yeni Zelanda	151	Krater gölünün taşması
1959	Malpasset	Fransa	423	Gevşek zemin yapısı
1959	Vega de Tera	İspanya	144	İnşaat uygulaması sırasında
1961	Panshet	Hindistan	1000	Gövdenin yıkılması sonucu
1963	Vajont	İtalya	2000	Üstten aşma
1966	Vratsa	Bulgaristan	107	Taşkın sonucu
1967	Sempor	Endonezya	2000	Üstten aşma
1971	Certej	Romanya	89	Gövdenin yıkılması sonucu
1972	Canyon Lake	ABD	238	Taşkın durumu

Çizelge 1.2 (Devamı)

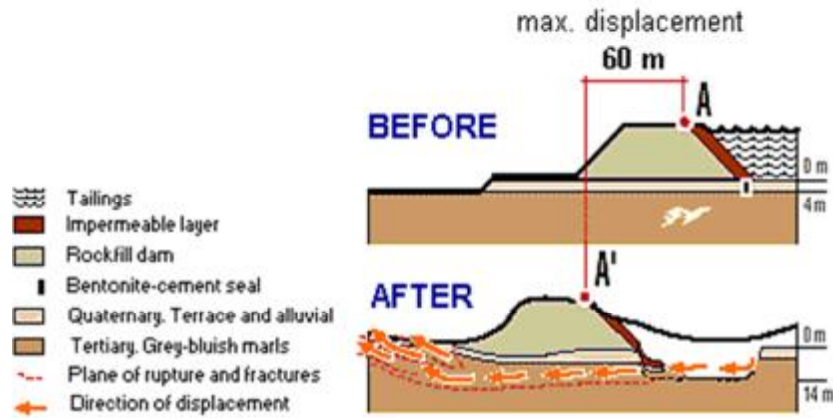
1972	Buffalo Creek	ABD	125	Aşırı yağış
1975	Banqiao/Shimantan	Çin	171000	Katastrofik yağış
1979	Machu II	Hindistan	5000	Üstten aşma
1985	Val di Stava	İtalya	268	Tasarım ve inşaat hataları
1986	Kantale	Sri Lanka	180	İşletme hataları
2000	Zeyzoun	Suriye	50	Filtre tabakası problemi
2005	Shakidor	Pakistan	70	Aşırı yağış
2008	Koshi	Nepal	250	Aşırı yağış
2009	Situ Gintung	Endonezya	98	Aşırı yağış ve işletme hataları
2009	Sayano/Shushensk aya	Rusya	75	Türbinin kopması neticesinde

Türbin kopması sonucu yıkılan Rusya'daki Sayano/Shushenskaya Barajı fotoğrafı Şekil 1.10'da görülmektedir (<http://www.dailymail.co.uk/>).



Şekil 1.10. Sayano/Shushenskaya Barajı'nın yıkılması-2009
(<http://www.dailymail.co.uk/>)

Barajlar önceden vurgulandığı üzere çok değişik amaçlara hizmet edebilen yapılar olup, bunlardan birisi de dünyada milyarca ton hacme sahip ve çoğunlukla maden işlemelerinden kaynaklı çok sayıdaki atık barajlarıdır. Atık barajları madenlerin işlenmesi ile ortaya çıkan atıkların, üretiminden nihai olarak uzaklaştırılmasına kadarki süreçte çevre ve insan sağlığına zararı olmayacak şekilde tutulmasını sağlayan mühendislik yapıları olarak değerlendirilmektedir (www.mittomaden.com.tr/). Atık barajlarını hayati hale getiren en önemli konu ise herhangi bir sebeple hasar gördüğü anda yıkıcı etkisi büyük olan Maden Atıkları Yönetmeliği'nde şlam/sulu çamur şeklinde belirtilen akışkan yapının boşalabilmesi ve zehirli kimyasal yapının çevreye yayılması durumudur. Örneğin İspanya'daki Los Frailes Barajı zemin yapısının gevşekliği nedeni ile göçmek durumunda kalmıştır. Bu tür yıkılma tasarım, uygulama ve işletilme süreçlerinde ortaya çıkan yapısal kusurlardan kaynaklanmaktadır (Şekil 1.11). Bunun haricinde tespit edilen diğer yıkılma örneklerinin depremler sırasında atıkların sıvılaşarak çamur dalgası şeklinde mansapta ilerlemesi sonucu oluştuğu ifade edilmektedir.

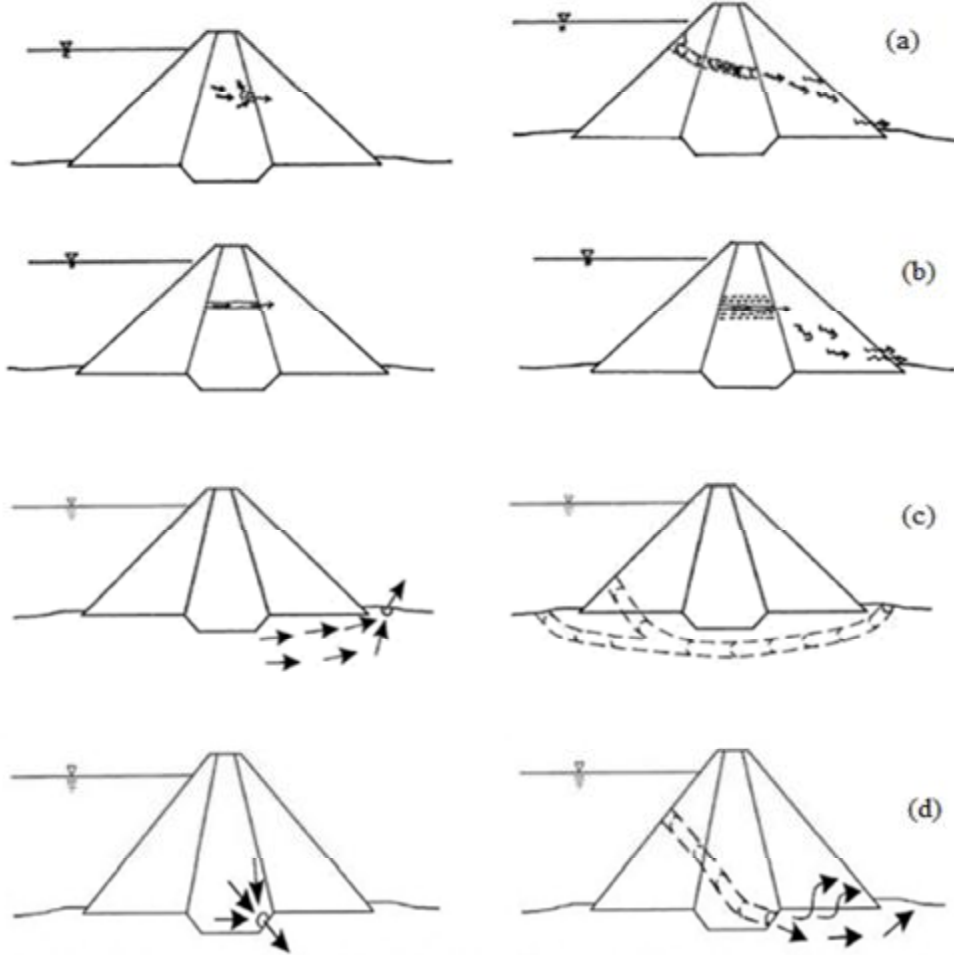


Şekil 1.11. Los Frailes Barajı yıkılması hali (<http://www.wise-uranium.org/>)

Yapılan çalışmalar çamur dalgasının en az 8 km/sa, en fazla 40 km/sa'lik hızlarla ilerlediğini göstermektedir. Şili'de bu şekilde çok sayıda atık barajının

yıkıldığı gözlemlenmiştir. Uluslararası Büyük Barajlar Komitesi (UBBK) raporunda dünyada 200'ü aşkın atık barajının depremlerden hasar gördüğünü açıklamıştır. Rezervuardaki akışkan seviyesinin hızlı bir şekilde yükselmesi baraj gövdesinden suyun aşmamasına karşın barajı yıkım tehlikesi ile karşı karşıya bırakabilmektedir. Dolayısı ile bu durum gövdedeki freatik düzeyi belirli seviyelere getirmekte, barajın topuk kısmında düzensizlikleri ortaya çıkarabilmektedir.

Baraj yıkılması süreçlerinde etkili olan borulanma durumları toprak dolgu barajların gövde ve temel kısımlarında meydana gelebilmektedir. Borulanma sonucunda çözümü çok zor olabilen sızıntı suyu problemleri oluşabilmekte, akışkan zemin parçacıklarını harekete geçirebilmektedir. Dolayısı ile dolgu içerisinde ve temel zemininde ilerleyen akışkan gövde kısmında çatlaklara sebebiyet verebilmektedir (Zorluer, 1999). Şekil 1.12'de görüldüğü gibi gedikten akan akışkan neticede mansapta tehlikeli koşullar oluşturabilmektedir (De Wraichen ve Mambretti, 2009).



Şekil 1.12. Borulanma başlangıç ve gelişim safhaları: (a) Geriye doğru borulanma, (b) Yoğun sızıntı borulanması, (c) Temel içerisindeki borulanma, (d) Gövdeden temel içersine doğru borulanma (Wrachien ve Mambretti, 2009)

1971 yılından bugüne değin iri ufaklı 25'ten fazla atık baraj yıkım kaydı tespit edilmiştir. 1975 yılında Bulgaristan'daki Madjarevo Barajı atıklarının tasarımı öngörülen değerin üzerinde yükselmesi nedeni ile hasar görerek yaklaşık 250.000 m³ atık boşalarak çevreye yayılmıştır. 1978 yılında Japonya'daki Mochikoshi Barajı'nın deprem etkisi ile sınılaşması sonucu 80.000 m³ atık

boşalarak vadide yaklaşık 8 km kadar ilerlemiştir. 1985 yılında ABD'nin Nevada eyaletindeki Wadsworth Barajı doygunluk sebebi ile çökmüş, yaklaşık 25.000 m³ atık vadide 2 km'ye yakın akmıştır. Şekil 1.13'te görüldüğü üzere 1994 yılında Güney Afrika'daki Meriespruit Harmony Barajı'nın aşırı yağışlar sonucu gövdesi yıkılmış, 600.000 m³ atık boşalarak yerleşim yerlerine zarar vermiş, çok sayıda can ve mal kaybı oluşmuştur (<http://blogs.agu.org/>). 1999 yılında Filipinlerdeki Surigao Del Norte Placer Barajı'nın yıkımı sonucu eskimeye yüz tutmuş bir boru kısmından atıkların boşalması ile 700.000 ton siyanürlü atık çevreye yayılmış, birçok ev ve yerleşim yerleri zarar görmüş, çok sayıda hasar meydana gelmiştir (Şekil 1.14).



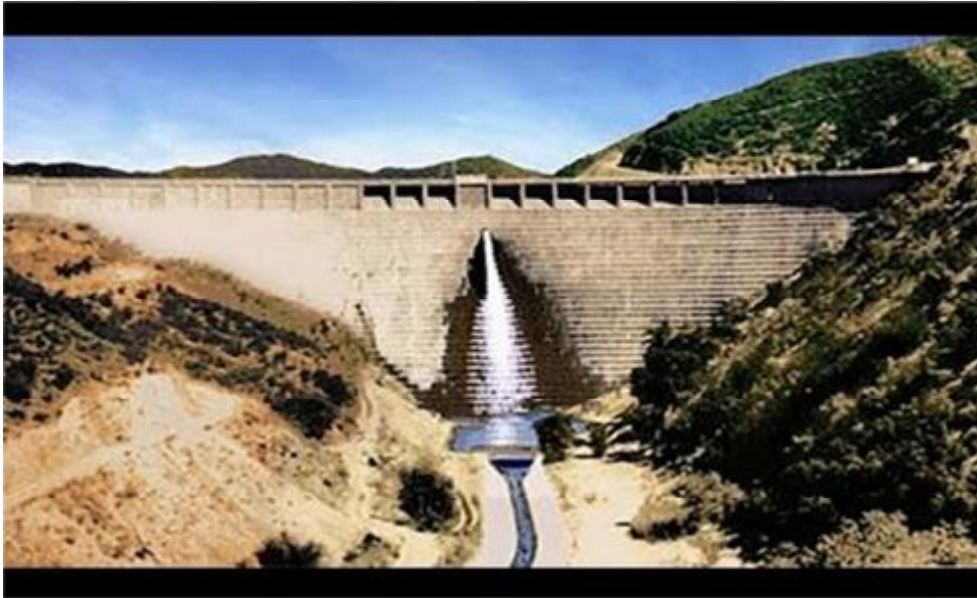
Şekil 1.13. Meriespruit Harmony Barajı'nın yıkılması-1994 (<http://blogs.agu.org/>)

2000 yılında Romanya'daki Baia Mare Barajı'nın şiddetli yağışlar neticesinde taşması ve gövde kısmından yıkılması ile 100.000 m³ siyanürlü akışkan Tizsa ve Tuna ırmaklarına boşalmak durumunda kalmıştır. Bu durum çevre kirliliği açısından ciddi bir risk oluşturmuştur. En fazla can kaybı ise 1985

yılında İtalya’da fluorit işletmesi barajının yıkılması ile gerçekleşmiştir. Yaklaşık 300 kişi hayatını kaybetmiştir (Şekil 1.15).



Şekil 1.14. Surigao Del Norte Barajı’nın yıkılması-1999
(<http://pt.slideshare.net/farahsevilla/>)



Şekil 1.15. İtalya Stava Fluorit Barajı’nın yıkılması-1985
(<http://tinytu.be/w/FlrsnoSkbfo>)

Ülkemizde 2011 yılında Kütahya’da özel bir firmaya ait olan gümüş maden işletme tesisindeki atık depolama baraj set yapısı göçmüş, siyanür çevreye yayılmış ve canlı yaşamını tehdit etme ihtimali göz önüne alınarak üretimi durdurulmuştur. Yerleşim yerlerinde tahliye işlemleri hızlandırılarak köyler boşaltılmıştır. 2015 yılında Brezilya’daki Minar Gerais Barajı patlama sonucunda yıkılmıştır. Ani yıkım ile birlikte zehirli atıklar Rio Doce Nehri’ne karışarak 500 km kadar akıntı yönünde sürüklenmiştir. Çok sayıda hasar oluşmuş, yüklenici firma tazminat ödemeye mahkum edilmiştir. Sonuçta ciddi boyutta hasar meydana gelmiştir. Şekil 1.16’da Kütahya Gümüş Maden İşletmesi atık baraj setinin göçmesi (<http://www.sabah.com.tr/>) ve Şekil 1.17’de Brezilya-Minas Gerais Atık Barajı’nın çökmesi ile ilgili fotoğraflar görülebilmektedir (<http://tr.euronews.com/>).



Şekil 1.16. Kütahya Gümüş Maden Atık Barajı’nın göçmesi-2011
(<http://www.sabah.com.tr/>)



Şekil 1.17. Brezilya Minas Gerais Atık Barajı'nın yıkılması-2015
(<http://tr.euronews.com/>)

Atık barajı yıkılma örnekleri incelendiğinde yıkılmaların büyük bir kısmının taşkın sebebiyle olduğu, ayrıca yapısal kusurlar sebebi ile oluşan yıkımların da yadsınamayacak derecede fazla olduğu göze çarpmaktadır. Yapısal kusurların çoğunlukla savak ve diğer hidrolik yapıların yapım koşullarından kaynaklandığı ifade edilmektedir. Bütün bu durumlar atık barajlarının tehlike sınıfı içerisinde yer alan yapılar olarak değerlendirilip; tasarım, uygulama ve işletme aşamalarında titiz çalışmalar yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Zemin koşulları, yapım malzemeleri, stabilite, işletme koşulları, sızdırmazlık analizleri, taşkın durumları, denetim ve gözlemler, acil durum eylem planları,...vb. gibi birçok konu üzerinde hassasiyetle durulması gereken noktalardır (Yenigün ve Sepetçioğlu, 2012).

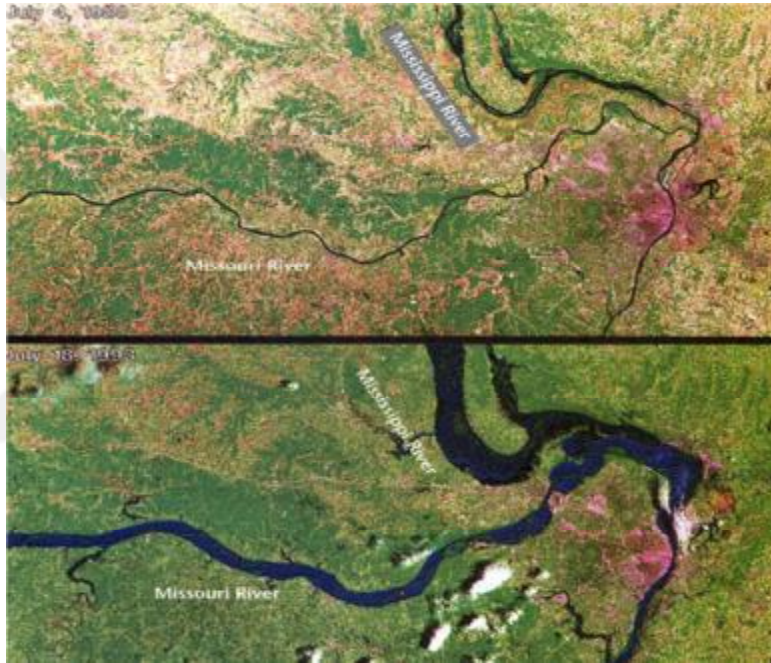
Ülkemizde 1936 yılından 1997'ye kadar işletmeye açılan ve inşa halindeki barajların yarısına yakını hidrolojik güvenlik kontrolü yönünden ele alınmış ve kritik seviyede olduğu tespit edilmiştir (Kulga, 1997). Bu durumlar aslında barajlarımızın güvenlik yönünden tekrar ele alınmasını ve mevcut durum tespitlerinin yapılmasını zorunluluk haline getirmiştir. Baraj yıkılması gerçekte

daha uzun bir zaman periyodu içerisinde meydana gelebilecek bir durum olmasına rağmen, en zor koşullar göz önüne alınarak yapılabilecek çözümler uygulamalar açısından çok büyük kolaylıkları beraberinde getirebilecektir.

Değişik amaçlarla, farklı tiplerde inşa edilen çok fazla sayıda barajımızın mevcut olması ve güvenilirlik analizi konusunda detaylı araştırmaların yapılabilmesi amacı ile DSİ Genel Müdürlüğü bünyesinde Aralık 2005'te Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı'na bağlı Baraj Güvenliği Birimi kurulmuştur. İlerleyen süreçlerde birimin görev tanımları artırılarak "*Baraj Emniyeti ve Ölçüm Tesisler Şube Müdürlüğü*" adı ile çalışmalarına devam etmesi sağlanmıştır. Müdürlüğün görevleri; baraj yıkılma analizlerinin yapılarak baraj güvenliği dosyalarının oluşturulması, her türlü saha çalışmaları ve analizler sonucu tüm mühendislik kolları ile beraber koordineli bir şekilde baraj güvenliği raporlarının hazırlanması, işletmedeki barajların risk grupları şeklinde sınıflandırılarak erken uyarı sistemlerinin kurulabilmesi çalışmalarının yürütülmesi, acil eylem hazırlık planlarının oluşturulması, barajlar ve bağlı hidrolik yapıların stabilize ve boyutlandırma konularında uygun modelleme ve analiz programları aracılığı ile güvenilirliğinin kontrol edilmesi olarak sayılabilir (Encon, 2006).

DSİ tarafından hazırlanmış olan "*Baraj Emniyeti Rehberi*" potansiyel risklerin tanımlanması, gereken önlemlerin alınabilmesi ve iyileştirme çalışmaları için 2014 yılında revize edilerek tekrar yayımlanmıştır. Rehberde yıkılma analizi çalışmaları çerçevesinde olası yıkılma senaryolarına ait parametreler tanımlanmakta ve nümerik olarak mansapta oluşması muhtemel etkiler değerlendirilmektedir. Analizlerde taşkın dalgasının mansaptaki davranışını tahmin etmeye yönelik hesaplamaların yapılabilmesi amacı ile su yüzü profili, noktasal seviye değişimleri (derinlikler), taşkın dalgasının hareketi ve ilerleme zamanları irdelenmektedir. Rehberde baraj yıkılması analizlerinde normal akım durumları etkisinde membranın tam olduğu şartlar ve de muhtemel maksimum taşkın durumları düşünülerek yıkılma parametreleri ele alınmaktadır. Belirtilen analizler yapıldıktan sonra taşkından etkilenme olasılığı yüksek bölgeler belirlenmekte, bu

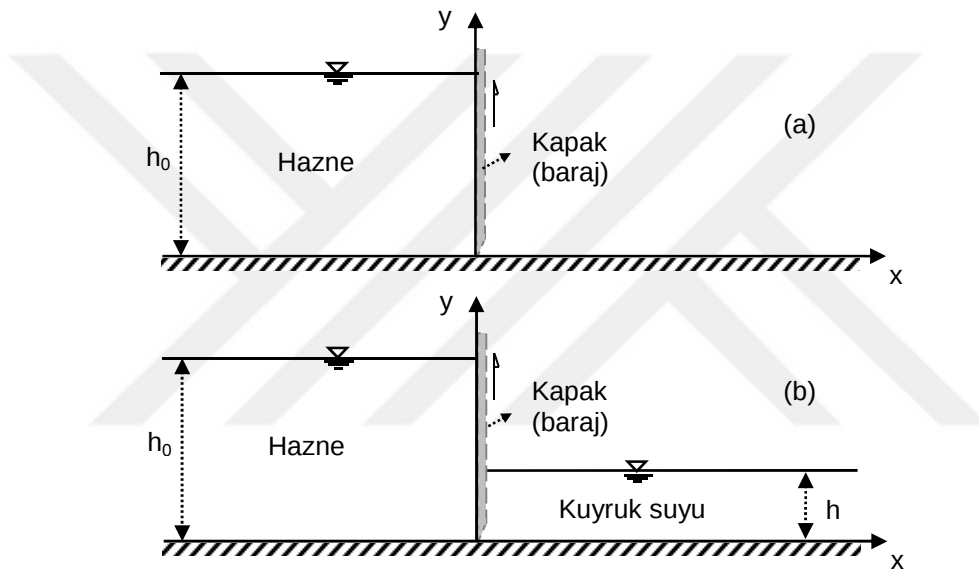
bölgelerin haritaları çıkarılmakta, mansaptaki etkiler dikkate alınarak Bölge Taşkın Planları hazırlanmaktadır. Böylece su altında kalabilecek bölgeler ve tahliye edilmesi gerekli yerler planlarda gösterilmektedir (DSİ Baraj Emniyeti Rehberi, 2014). Şekil 1.18’de ABD’de 1988 yılında normal seyrinde akmakta olan Mississippi Nehri’nin 1993 yılında meydana gelen taşkın sonucu oluşan uydu görüntüsü yer almaktadır (Eren, 2013).



Şekil 1.18. Mississippi Nehri taşkını (Eren, 2013)

Şekil 1.19’da baraj yıkılması akım probleminin genel tanımını gösteren bir çizim görülmektedir. Baraj yıkılması sonucunda durgun olan akışkan kütesinin taşkın şok dalgası olarak mansapta ilerlemesi ile akım birtakım değişimlere maruz kalabilmektedir. Söz konusu bu değişimler mansapta ilerleyen akışkanın geri tutulup tutulmamasına göre az veya çok farklılıklar gösterebilmektedir. Barajın ani olarak yıkılması halinde mansap ve memba yönünde ilerleyen mansapta pozitif, membada ise negatif dalga oluşumu görülmektedir. Mansap kısmında kuyruk

akışkan yapının bulunup bulunmamasına göre pozitif şok dalgasının ilerlemesi farklı olabilmektedir. Mansapta kuyruk akışkanının bulunması durumu “*Islak*” hal iken, bulunmaması durumu “*Kuru*” hali tanımlamaktadır. Baraj yıkılması taşkın şok dalgasının yayılması literatürde hızlı değişen değişken açık kanal akımı problemi olarak ele alınmaktadır. Her ne kadar değişken açık kanal akım problemi olsa da serbest yüzeyli akımlarda kullanılan yazılımlar bu tür problemler için de çoğu zaman çözümleyici olabilmektedir (Kocaman, 2007).



Şekil 1.19. Baraj yıkılması akım probleminin tanımı (a) Kuru hal (b) Islak hal (Kocaman, 2007)

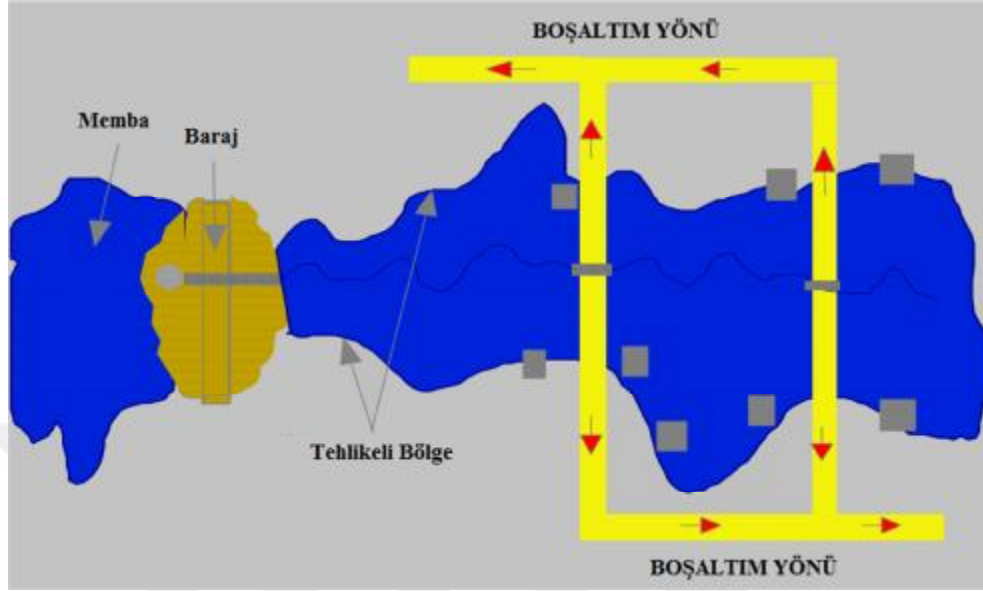
Taşkın şok dalgalarının yayılımı topoğrafyadan oldukça etkilenmektedir. Dalgaların geçişi sırasındaki daralmalar, düzensiz yatak eğimleri, akımın ilerleyişi sırasında karşılaştığı engeller, kıvrımlar,...vb. durumlar hidrolik açıdan sıçramalara, dalgaların yansımalarına ve akımın birçok fiziksel davranışında değişimlere sebebiyet verebilmektedir. Dolayısı ile mansapta akışkan seviyelerinde değişimler ve yayılma hızı farklılıkları oluşabilmektedir.

Yıkılma sonrasında dalganın pik debi değeri çok büyük olmakta ve bu değer oluşmasına kadar geçen süre kısa bir zaman dilimini kapsamaktadır.

Ayrıca taşkın dalgasının beraberinde sürükleyeceği katı madde, sediment arazide oyulma ve yığılmaları meydana getirebilmektedir. Bu durum da mansapta ciddi oranda morfolojik değişimleri tetiklemektedir. Oluşması muhtemel taşkın şok dalgasının hızı, yüksekliği, basıncı,...vb. gibi birçok fiziksel özellik taşkın kontrol çalışmaları için kritik parametreler olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda taşkın etkilerinin görülebileceği bölgelerin belirlenmesi ve acil eylem planlarının hazırlanması olumsuz etkileri minimum seviyelere düşürülebilmek adına oldukça önemli olmaktadır. Bu amaçla mevcut barajların güvenilirlik analizlerinin yapılması ve planlanan barajların bu çerçevede değerlendirilip inşa edilmesi yıkılma risklerini oldukça azaltabilecektir (Kocaman, 2007).

Acil eylem planları tehlike anında baraj mansap kısmında riskli bölgelerdeki insanların haberdar edilmesi, uyarılması amacıyla yola çıkılarak gerekli talimatların takip edilmesini sağlayan bir araç olmaktadır. Şekil 1.20’de örnek bir baraj yıkılması senaryosu çerçevesinde hazırlanan taşkın acil eylem planı gösterilmektedir (ftp://ftp.mde.state.md.us/outgoing/Dam_Safety/).

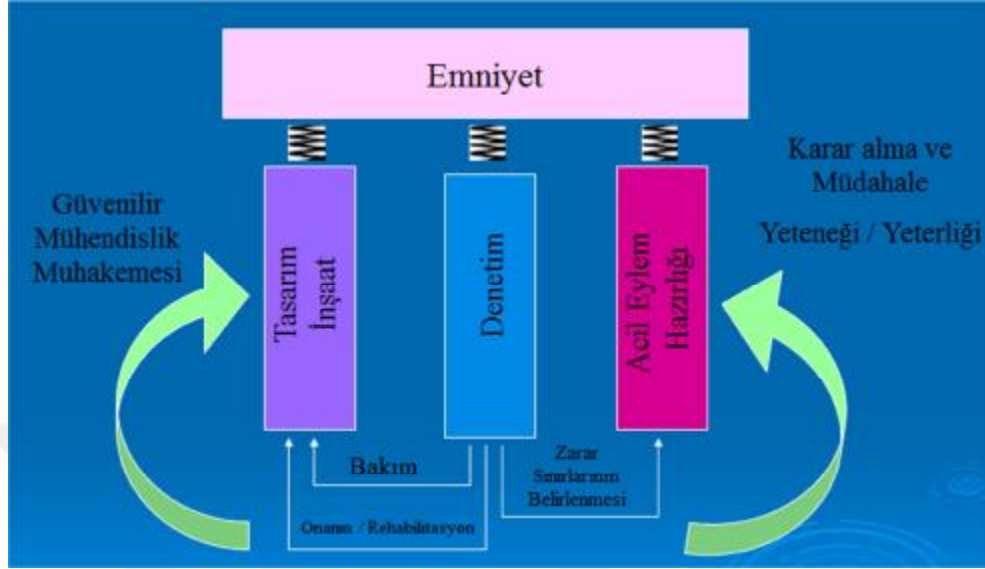
Genellikle alınacak önlemler acil durum öncesi, acil durum ve acil durum sonrası şeklinde üç aşamada incelenmektedir (DSİ Baraj Emniyeti Rehberi, 2014). Taşkınlara karşı alınacak önlemler mansap kısmına yapılan çelik kapılı taşkın duvarları, geciktirme havuzları, boşaltımı hızlandırıcı kanalizasyon, fırtına kanal sistemi,...vb. gibi fiziksel engeller şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 1.20. Baraj yıkılması acil eylem plan örneği
(ftp://ftp.mde.state.md.us/outgoing/Dam_Safety/)

Şekil 1.21’de baraj emniyeti için gerekli bileşenler görülmektedir (Melbinger, 2005). Tüm bu anlatılanlar ışığında yapılan çalışmada her ne kadar gerçek yıkılma daha uzun zaman periyodunda gerçekleşiyor olsa bile ani yıkılma durumu göz önüne alınmıştır. Baraj yıkılması akım probleminin kanal boyunca durgun haldeki aynı ve farklı yoğunluktaki akışkanların düşey bir kapağın kaldırılması sonucunda kuru ve ıslak hal durumunda oluşturduğu taşkın şok dalgası yayılımı incelenmiştir. Mansaptaki yayılımın noktasal akışkan seviyesi yani derinlik değişimleri, serbest yüzey profillerine etkileri, anlık görünimleri araştırılmıştır.

Literatürde aynı yoğunluktaki akışkan özellikle akışkanın su olarak ele alındığı birçok çalışma mevcut olup, farklı yoğunluktaki akışkan ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır.

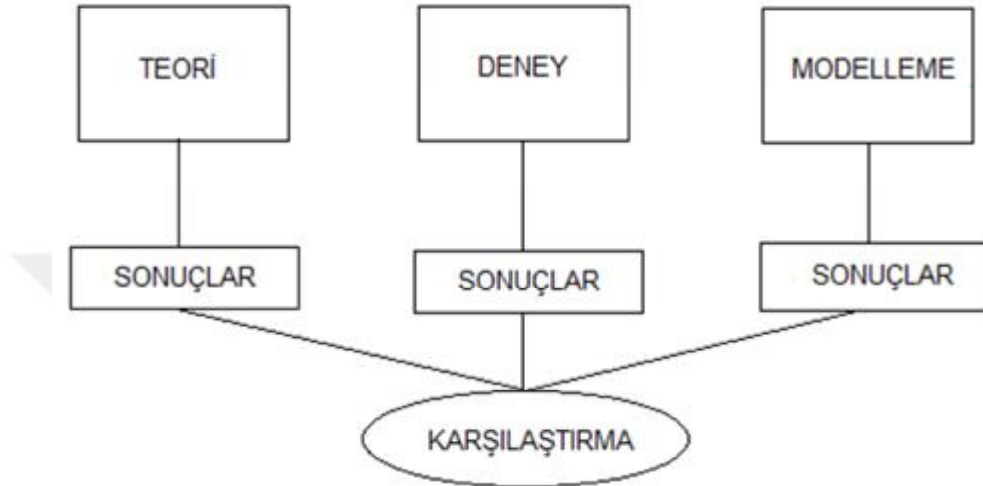


Şekil 1.21. Baraj emniyeti bileşenleri (Oberhuber ve ark., 2005)

Fakat gerek aynı gerekse de farklı yoğunluktaki akışkanların baraj yıkılması sonrasında davranışları değişebildiğinden, bu durumları gözlemleyebilmek adına baraj yıkılması akım problemi ile ilgili bilimsel anlamdaki araştırmaların teorik, sayısal ve özellikle de deneysel yönlerden desteklenmesi ve birbirlerini tamamlayıcı özellikte olması çok önemli olmaktadır. Yöntemlerin birbirleri ile doğrulanması, kıyaslanması çalışmaların tutarlılığı açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden çalışmalar gerçek baraj yıkılmalarına ait gözlemlerle birlikte nümerik analiz ve deneylerle de desteklenmelidir.

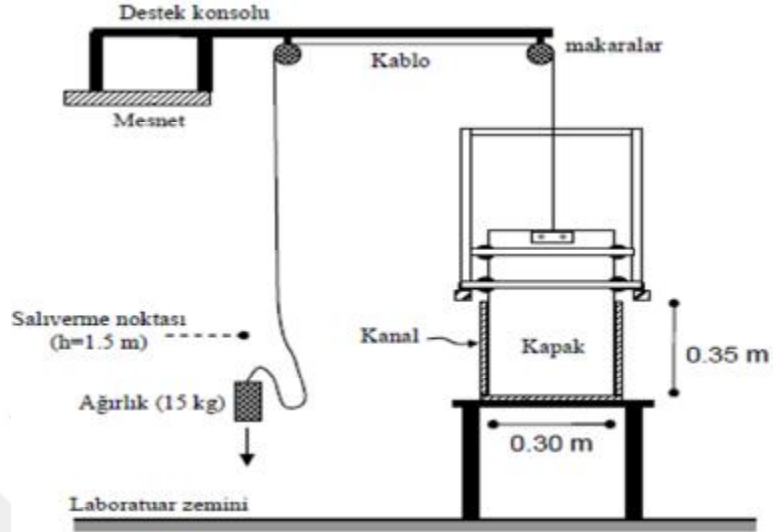
Son yıllarda gelişen yazılım teknolojileri sayısal modellemelerin önemini büyük ölçüde artırmıştır. Ayrıca laboratuvar çalışmaları da akımın davranışlarını gözlemlemede kolaylık sağlaması açısından çözüm noktasında ciddi bir katkı sağlamaktadır (Şekil 1.22). Bu çalışmada literatür taraması sonucu elde edilen bilgiler ölçüsünde son yıllarda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan fakat hâlâ ülkemizde kullanımı çok sınırlı olan İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği-Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) yöntemi ile baraj yıkılması sonucu

oluşan taşkın şok dalgasının mansapta yayılımı ve akışkanların fiziksel açıdan davranışları nümerik olarak modellenmeye çalışılmıştır.



Şekil 1.22. Teori-Deney ve Modelleme çalışma sistematığı

Davranışın daha iyi açıklanabilmesi adına sayısal analiz sonuçlarının deneysel çalışmalar ile karşılaştırılması gerektiğinden Kocaman (2007) yaptığı tez çalışmasındaki bazı deneysel ve nümerik sonuçlar SPH yöntemi ile elde edilen sonuçlarla mukayese edilmiştir. Kocaman (2007) deney çalışmasında Şekil 1.23'te görüldüğü üzere yatay dikdörtgen bir kanalda iki farklı bölümü ayıran düşey bir kapağın ağırlıklar vasıtası ile ani olarak kaldırılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının mansaptaki farklı kuyruk suyu koşullarında yayılması şeklinde ele alınmıştır. Deney sonucunda su yüzü profilleri ve herhangi bir noktadaki su seviyesi değişimleri incelediği parametrelerdir. Ayrıca baraj mansabında farklı geometrilerde düzensiz arazi koşulları oluşturularak, su yüzü profilleri ve su seviyesi değişimleri üzerinde de durmuştur. Aynı zamanda deneysel verileri, Flow-3D yazılımında modelleyerek elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır.



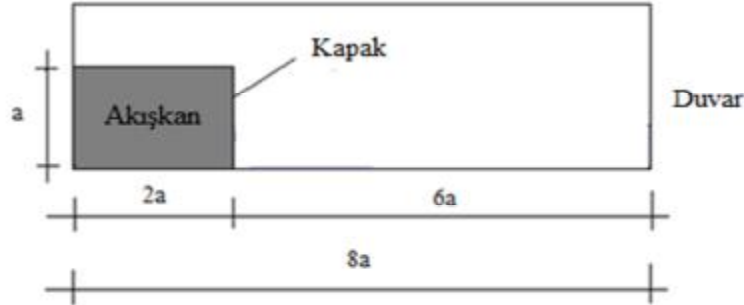
Şekil 1.23. Deney düzeneği (Kocaman, 2007)

Kocaman (2007) tez çalışmasındaki bazı verilerin SPH yöntemi ile modellenmesine ek olarak bu çalışmanın özgünlüğü ve literatürdeki farklı yoğunluklu akışkanların baraj yıkılması akım problemleri şeklinde incelenmesinde sınırlı sayıda kaynağın bulunması, ayrıca bu konuda deneysel çalışmaların yok denecek kadar az olması sebebiyle daha küçük ölçekli bir kanalda farklı yoğunluktaki su, yağ ve tuzlu suyun mansaptaki davranışları ve atık barajlar kısmında belirtildiği gibi yıkım sonrası akışkanların mansapta karşılaşmaları yani girişimleri ve yayılmaları durumundaki davranışları deneysel ve nümerik olarak ele alınmaya çalışılmıştır. Söz konusu eksiklikler göz önüne alındığında baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının fiziksel davranışının daha iyi açıklanabilmesi amacı ile güvenilir deneysel veriler elde edilmesi zorunluluk arz etmekte olup, bunu oluşturabilmek için de görüntü işleme tekniklerinden faydalanılmıştır.

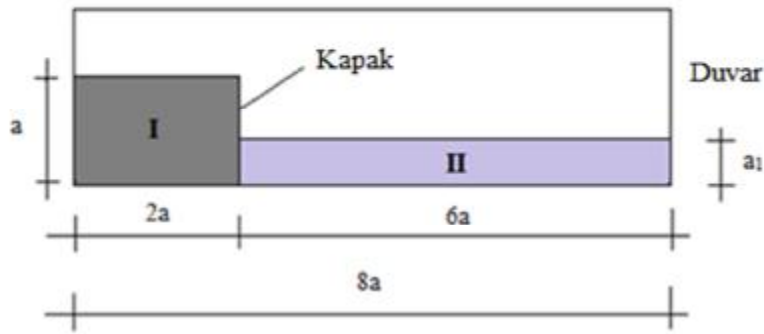
Çözünürlüğü yüksek kamera ile çekilen deney görüntüleri görüntü işleme analizi sonucu sayısallaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar SPH yöntemi ve Flow-3D modellemeleri ile elde edilen sonuçlarla mukayese edilmiştir. Böylece SPH yönteminin akışkanlar dinamiği problemlerini çözmedeki doğruluğu ve hassasiyeti test edilmeye çalışılmıştır.

Çalışmadaki deney düzeneği şematiği Şekil 1.24 ve 1.25'te gösterilmektedir. Rezervuar yüksekliği 0.15 m olarak sabit bir değer alınmış; memba uzunluğu 0.30 m, mansap uzunluğu ise 0.916 m olarak belirlenmiştir. Akışkanlar su, yağ ve tuzlu su olarak değerlendirilmiş, mansap/memba (rezervuar) derinlik oranları (α) 0 (kuru), 0.10, 0.20 ve 0.40 oranlarında ele alınmıştır. Söz konusu deneysel veriler SPH ve Flow-3D sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Ayrıca kapak kaldırıldıktan sonra farklı yoğunluktaki akışkanların geçişlerindeki davranışları görebilmek adına Su-Yağ ve Yağ-Su karşılaşmaları $\alpha=0.10$, 0.20 ve 0.40 oranları için araştırılmıştır. Tuzlu Su- Yağ ve Yağ- Tuzlu Su karşılaşmaları ise sadece $\alpha= 0.20$ oranı için incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar SPH ve Flow-3D modelleme sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 1.24. Deney düzeneği şematiği (Akışkanlar: Su, Yağ ve Tuzlu Su), $a=h_0$



Şekil 1.25. Deney düzeneği şematiği, Su-Yağ, Yağ-Su, Tuzlu Su-Yağ ve Yağ-Tuzlu Su (I: Memba, II: Mansap) $a_1=h=0.015; 0.030$ ve 0.060 m

Laboratuvar ortamı belirli ölçülerdeki deney kanalının bir tezgah üzerine yerleştirilmesi ve ip yardımıyla makara sisteminin çekilmesi şeklinde oluşturulmuştur. Ağırlık yaklaşık 12 kg olup, tespit edilen bir yükseklikten serbest bırakılarak ani yıkılma şartları meydana getirilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmanın en önemli hedefi baraj yıkılması nihayetinde oluşan akım problemini fiziksel özellikler yönünden ele almak, nümerik modellemeler yapmak, çalışmaların tutarlılığını sorgulayabilmek için güvenilir deneysel verilerle mukayese etmek ve farklı yöntemlerin problemi çözme hassasiyetini sınamaktır. Şekil 1.26'da deney ortamı görünüşleri yer almaktadır. Şekil 1.27'de ise deney çekimlerinden bir enstantane görülmektedir.



Şekil 1.26. Düzenlenen laboratuvar ortamı



Şekil 1.27. Deney çekim anı

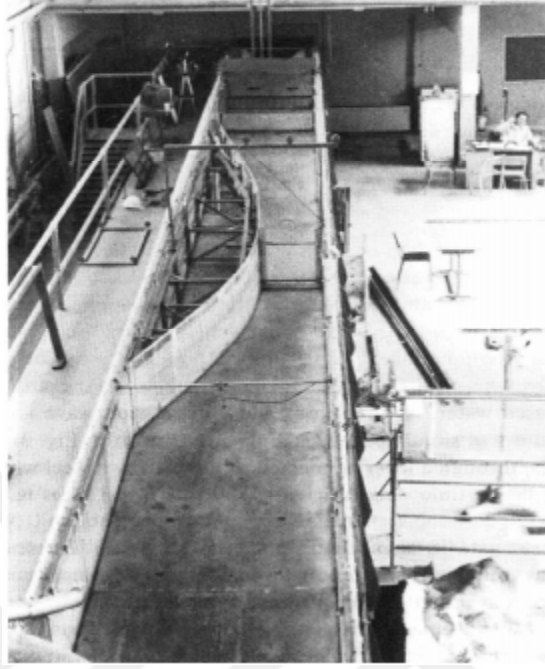
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Baraj Yıkılması (Dam-break) ve Flow-3D Çalışmaları

Baraj yıkılması ile ilgili çalışmalarda ele alınan matematiksel ifadeler ilk olarak De Saint-Venant (1871) tarafından Ek A'da görüleceği üzere ortaya atılmıştır (Chanson, 2004a). Tek boyutlu akımlarda süreklilik ve momentum denklemlerini içeren ve hiperbolik kısmi diferansiyel denklem takımı şeklinde ele alınan ifadeler hız dağılımının üniform ve basınç dağılımının hidrostatik olduğu kabulüne dayanmaktadır. Taşkın şok dalgalarının baraj ani yıkılmaları neticesinde oluştuğuna ilişkin ilk akım problemini Ritter (1892) yılında incelemiştir. Yatay, dikdörtgen ve sürtünmesiz bir kanalda ani yıkılma problemini çözmek için Saint-Venant denklemlerini kullanmış, mansap kısmının kuru olduğu varsayımı ile rezervuarı sonsuz uzunlukta ele almıştır (Vischer ve Hager, 1998; Chanson, 2005).

Stoker (1957) yaptığı çalışmada, mansapta kuyruk suyu bulunması durumu olan ıslak hali incelemiş, yatay ve sonsuz uzunluklu sürtünmesiz prizmatik bir kanal için üniform ve hidrostatik kabulü noktasında analitik çözüm oluşturmuştur. Sonuçta su yüzü profil eğrilerine elde ettiği çözümlerle ulaşmıştır.

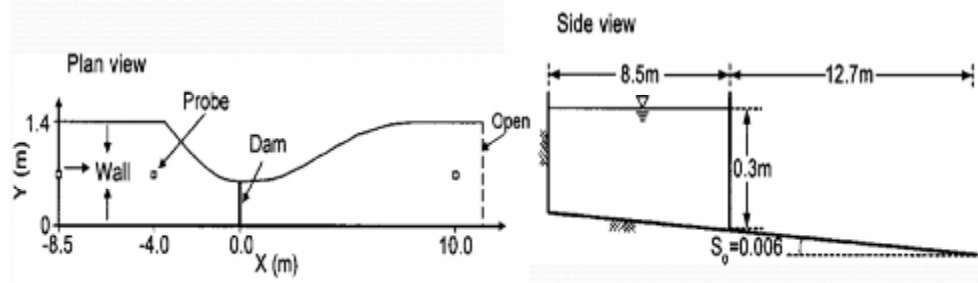
Bell ve ark. (1992) yaptıkları çalışmada, Şekil 2.1'de görüldüğü üzere yatay ve kıvrımlı bir kanal düzeneğinde ani kapak kaldırılması sureti ile oluşan taşkın şok dalgasının yayılımı üzerine yoğunlaşmışlardır. Farklı mansap taban koşulları oluşturarak yayılımı açıklamaya çalışmışlardır. Ayrıca 180° kavisin olduğu pleksiglas malzemeden bir kanalda deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deney düzeneği 0.30 m eninde ve yüksekliğinde, 4.32 m uzunluğa sahip dikdörtgen yapıdaki bir kanal şeklindedir. Kanal tabanındaki pürüzlülüğü tel ızgaralar ve ahşap materyallerle sağlamışlardır. Su seviyesinin nokta bazında değişimini ve dalga önünün ilerleme aşamalarını video kamera ile kayıt altına almışlardır. Çalışma sonucunda kavisin dış kısmında dalga hareketinin iç kısmına nazaran daha hızlı ilerleyip, daha yüksek su seviyesine ulaştığını ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.1. Deney kanalı (Bell ve ark., 1992)

Bellos ve ark. (1992) ele aldıkları çalışmalarında taban eğiminin sabit olduğu, daralma ve genişlemelere sahip çeşitli ebatlardaki bir kanalda mansap kısmının kuru ve ıslak olması koşullarına göre birtakım deneyler yapmışlardır (Şekil 2.2). Farklı eğimler oluşturarak belirli aralıklarla kanal üzerine monte edilen ve elektrik ileten metal çubuklar aracılığı ile su seviyesinin zamanla değişimini test etmişlerdir. Deney sonuçları ile sayısal modelleme sonuçlarını karşılaştırarak aralarındaki uyumluluğu gözlemlemişlerdir.

Jovanovic ve Djordjevic (1995) çalışmalarında baraj yıkılması problemi ile ilgili deneyler yapmışlar ve MacCormack şemasından yararlanarak elde ettikleri nümerik çözümlerle mukayese etmişlerdir. Ölçüm için mansap kısmında dört ayrı noktada bulunan seviye ölçerlerden faydalanmışlar, yüksek çözünürlük ve hıza sahip video kameralar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda sayısal sonuçlar ile deney sonucu elde edilen verilerin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.2. Deney düzeneği ve ölçüleri (Bellos ve ark., 1992)

Mohapatra ve Bhallamudi (1996) ele aldıkları çalışmalarında baraj mansap doğrultusundaki kesit farklılıklarının baraj yıkılması akım problemindeki etkilerini nümerik olarak ele almışlardır. Islak ve kuru hal durumlarını dört ayrı tasarım şeklinde modellemişlerdir. Dönüşüm tekniği ile denklem takımlarının çözümünde MacCormack şemasını kullanmışlardır. Akım derinliği ve su seviyesi değişimleri gibi çalışma sonucu elde edilen parametreleri literatürde yer alan sonuçlarla mukayese etmişlerdir. Bunun haricinde kanal genişleme ve daralma durumlarının baraj yıkılması akım problemindeki etkilerini araştırmışlardır.

Laigle ve Coussot (1997) yaptıkları çalışmada Saint-Venant denklemlerinin kullanıldığı çamurlu akımlar için nümerik bir yöntem üzerinde durmuşlardır. Farklı kanal eğimi, malzeme hacimleri, başlangıç rezervuar derinliklerinin farklı değerlerde ele alındığı deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını 4.0 m uzunluğa ve 0.60 m enine sahip dikdörtgen bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda su seviyesi değişimlerini incelemişlerdir. Ölçümleri üç değişik noktada ultrasonik cihazlar yardımı ile yapmışlardır. Çalışma sonucunda sayısal ve deney sonuçlarının birbirine yakın olduğu çıkarımını yapmışlardır.

Lauber ve Hager (1997) ele aldıkları çalışmalarında 14.0 m uzunluğa ve 0.50 m yüksekliğe sahip, yatay ve pürüzsüz dikdörtgen bir kanalda deneysel çalışmalar yapmışlar ve Ritter'in analitik çözümü ile mukayese etmişlerdir. Deney ve analitik sonuçlar arasında dalga yayılma hızlarının farklı olduğu kanaatine

varmışlardır. Negatif dalganın gerçekte analitik çözümden elde edilen sonuca göre memba yönünde daha hızlı yayılmasına rağmen pozitif dalganın mansap kısmında analitik çözümden elde edilen sonuca göre daha yavaş ilerlediğini gözlemlemişlerdir.

Lauber ve Hager (1998) yaptıkları çalışmada yatay ve eğimli dikdörtgen bir kanalda düşey bir kapağın ani olarak kaldırılması ile baraj yıkılması akım problemini bir dizi deney çalışması ile ele almışlardır. Eğimleri değiştirip, mansabın kuru halde olmasını sağlayarak araştırmalarını gerçekleştirmişlerdir. Başlangıç aşamasında su seviyesinin en az 0.30 m olması halinde, baraj yıkılması akımının Froude benzerlik kanununa yakın olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca kapağın kaldırılma zamanının $1.25(h_0/g)^{1/2}$ ’den küçük bir değer olması durumunda baraj yıkılmasının ani yıkılma olabileceğini belirtmişlerdir. Akım derinliği, belirlenen enkesitlerdeki ortalama hızlar, debi, pozitif ve negatif dalga önü hızları, maksimum akım derinliği ve bu derinliğe ulaşma zamanları ölçülmüş olan fiziksel parametrelerdir. Deney sonuçları ile literatürde bulunan analitik çözümleri mukayese etmişler, başlangıç durumları haricinde sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu kanaatine varmışlardır.

Stansby ve ark. (1998) çalışmalarında, değişik yüksekliklerdeki iki farklı su seviyesini ayıran düşey bir kapağın yatay, pürüzsüz ve dikdörtgen bir kanalda ani olarak kaldırılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasını deneysel olarak ele almışlardır. İki farklı başlangıç memba derinliği için mansap/memba derinlik oranlarını değiştirerek su yüzü profillerini incelemişler ve akımın davranışlarındaki değişiklikleri gözlemlemişlerdir. Deney düzeneği 15.24 m uzunluğuna, 0.40 m enine ve 0.40 m yüksekliğine sahiptir. Kapak yapısı 3 mm kalınlıkta metalden teşkil edilmiş ve kapak membadan 9.60 m uzaklıkta oluşturulmuştur. Su seviyesi ölçümlerini video kameradan aldıkları görüntüler yardımı ile yapmışlardır. Deney sonuçlarını kuru ve ıslak haller için analitik çözüm sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Özellikle kuru halde kapağın kaldırılmasına müteakiben kısa bir zaman içerisinde yatay bir jet oluşumundan bahsetmişlerdir. Islak halde ise art

arda dalga kırılmalarının olduğunu, bu durumun da düşey bir jet oluşumuna sebebiyet verdiğini açıklamışlardır.

Aureli ve ark. (1999) ele aldıkları çalışmalarında baraj aks ve mansabında trapez geometrili bir eşik olması durumu için birtakım deneyler yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını 1.0 m enine, 7.0 m uzunluğuna ve 0.50 m yüksekliğine sahip dikdörtgen, yatay bir kanalda gerçekleştirmişler ve kanal boyunca dört değişik noktada aldıkları video görüntülerden su seviyesi değişimlerini ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda sayısal sonuçlar ile deney sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Blaser ve Hager (1999) çalışmalarında pürüzlü taban yapısı olan dikdörtgen bir kanal düzeneğinde baraj yıkılması problemini ele almışlardır. Dalga önünün yayılma halini deneyel yöntemlerle araştırmaya çalışmışlardır. Üç ayrı eğim seçerek mansap kısmının kuru olması halinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarını literatürdeki nümerik yöntemler sonucu elde edilen verilerle mukayese etmişlerdir.

Liem ve Köngeter (1999) yaptıkları çalışmada, dijital ölçüm sistemlerini kullanarak 14.0 m uzunluğa, 0.50 m enine sahip dikdörtgen bir kanalda birtakım deneyler yapmışlar ve parçacık görüntülemeli hız (PIV) tekniğinin hızlı değişken bir yapıda olması sebebiyle baraj yıkılması akım problemleri için uygulanabilme durumlarını ele almışlardır. Başlangıç aşamalarındaki dalga önü akım hızları, yayılma hızları ve su seviyesi değişimleri inceledikleri başlıca fiziksel özelliklerdir.

Nsom ve ark. (2000) çalışmalarında baraj yıkılması akım problemini 5.0 m uzunluğa, 0.30 m enine ve 0.08 m yüksekliğe sahip eğimli bir kanal düzeneğinde deneyel ve nümerik olarak ele almışlardır. Farklı taban eğimleri oluşturarak, Nevtoniyen akışkanlar üzerinde denemişlerdir. Ultrasonik cihaz ve video ekipmanları kullanmışlardır. Teorik analizlerde bir boyutlu Navier-Stokes denklemleri üzerine yoğunlaşmışlardır. Sonuçta dalga önünün daha uzağındaki noktalarda, akımın davranışının kinematik dalga teorisi ile tanımlanabileceğini ifade etmişlerdir.

Soares-Frazao ve ark. (2002) ele aldıkları çalışmalarında, kanal tabanında üçgen bir eşik engelin bulunması halinde baraj yıkılması akım probleminin yayılımını ve davranışını deneysel açılardan ele almışlardır. Deneylerini 5.60 m uzunluğa ve 0.50 m enine sahip dikdörtgen, yatay ve kanal kenarlarının camdan teşkil edildiği bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Sığ su denklemlerinin nümerik çözümü ile elde edilen sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu kanaatine varmışlardır.

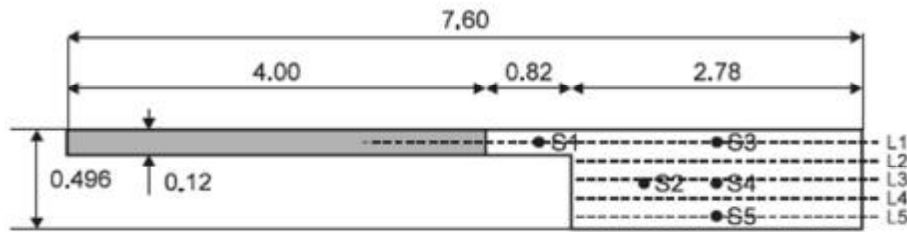
Nsom (2002) yaptığı çalışmada, viskozitesi yüksek saydam akışkanlarla baraj yıkılması akım problemini deneysel açıdan ele almıştır. Deneylerini pürüzsüz, yatay dikdörtgen bir kanalda gerçekleştirmiş ve mansaptaki su yüzü profilini, ayrıca da dalga ön kısmının gelişimini incelemiştir. Sonuç olarak akımın hızlı olduğunu, baraj yıkılmasının olduğu ilk anlarda gelişen ataletli rejimi ve sonraki zaman periyodu içerisinde viskoz rejimi şeklinde oluşan iki ayrı rejimi gözlemlemiştir. İlk zamanlarda mansaptaki su seviyesinin ani olarak maksimum değere çıktığını ve sonra da yavaşlayan bir trendte azalma gösterdiğini ifade etmiştir.

Valiani ve ark. (2002) ele aldıkları çalışmalarında 1959 yılında Fransa'da meydana gelen Malpasset Barajı'nın yıkılması olayı sonrasında gözlem sonuçlarından elde ettikleri detaylı verileri model deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Bu sayede modellemenin hassasiyetini, stabilitesini, güvenilirliğini inceleme imkanı bulmuşlardır. Sonuç olarak Malpasset Barajı'nın yıkılmasının sayısal analiz sonuçlarını gerçek arazi gözlem ve laboratuvar deney sonuçları ile mukayese etmişlerdir. Gözlenen su seviyeleri ile analiz sonuçlarının oldukça uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

Bukreev ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada baraj mansabının kuru ve ıslak hali için baraj yıkılması akım problemini deneysel olarak ele almışlar ve sığ su denklemlerinin nümerik çözümleri ile mukayese etmişlerdir. Ölçümlerde belirli noktalara konulmuş dalga ölçer ve video kameralardan yararlanmışlardır. Çok

büyük oranda deney sonuçlarının mevcut denklemlerle tanımlanabildiğini açıklamışlardır.

Soares-Fraza ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada baraj yıkılması akımlarının genellikle sığ su denklemleri aracılığı ile türbülans gerilmeleri ihmal edilerek modellendiğini, ani bir genişlemeye sahip akım durumlarında sıkıntılar oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu tip durumlarda sayısal sonuçların iyileştirilmesi noktasında türbülans gerilmelerinin sığ su denklemlerine ilave edip edilmemesi gerektiği sonucuna cevap vermeyi amaçlamışlardır. Ani genişlemeye sahip bir kanalda laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişler ve çeşitli ölçüm yöntemleri ile akımı dikkatli bir şekilde takip etmişlerdir (Şekil 2.3). Denklemleri çözmek için sonlu hacim yöntemlerini kullanmışlar, sayısal modelleme sonuçlarını hem sabit akım durumu hem de baraj yıkılması akımındaki ölçümlerle karşılaştırma imkanı bulmuşlardır. Çalışma sonucunda baraj yıkılması akımının yayılımını doğru modelleyebilmek konusunda türbülans gerilmelerinin gerekli olup olmadığı konusuna bir açıklık getiremediklerini belirtmişlerdir.



Şekil 2.3. Deney düzeneği ve ölçüm noktalarının (m) konumu
(Soares-Fraza ve ark., 2003)

Shige-eda ve Akiyama (2003) ele aldıkları çalışmalarında iki boyutlu taşkın şok dalgasının yayılımı, davranışı ve yapılar üzerine uyguladığı hidrodinamik kuvvetleri teorik ve deneysel olarak ele almışlardır. Yapılara uygulanan hidrodinamik kuvvetlerin yanı sıra taşkın dalgası önünün durumunu, su seviyelerini ve yüzey hızlarının zamanla değişimini araştırmışlardır. İki boyutlu

taşkın akımları için deney sonuçlarının ve nümerik analizlerin birbirleri ile uyumlu olduğu kanaatine varmışlardır.

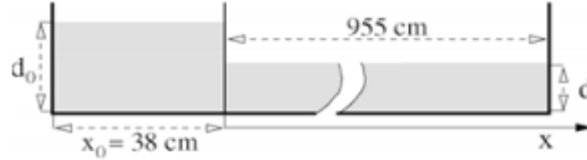
Aureli ve ark. (2004) yaptıkları çalışmalarında düşey bir kapağın ani hareketi ile oluşan hızlı, değişken akımın geniş dikdörtgen bir kanalda yayılmasını, mansapta engel olması ve bulunmaması halleri için iki değişik deney gerçekleştirmek sureti ile incelemişlerdir. Deneylerinde su içerisine boya ilave ederek su kalınlığının değişmesini sağlamışlardır. Böylece kanal üzerinden alınan görüntülerde renk yoğunluğunu arttırmış olmaktadırlar. Elde ettikleri deney sonuçları ile kendilerinin ürettiği iki boyutlu sonlu hacimler yöntemini içeren sayısal metotlarla karşılaştırma imkanı bulmuşlardır. Sayısal sonuçların bazı farklılıklara rağmen temel parametreler açısından tatmin edici sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Chanson (2004b) çalışmasında basamaklı yapıya sahip bir kanalda baraj yıkılması taşkın şok dalgasının yayılması neticesinde oluşabilecek enerji kayıplarını irdelemiştir. Dalga yayılmasının beklenenden daha hızlı oluştuğunu belirlemiş, düzenli akım durumu ile kıyaslandığında taşkın şok dalgasının daha az enerji kaybına uğradığını gözlemlemiştir.

Soares-Frazao ve ark. (2004) çalışmalarında, mansapta bulunan bir engel yapısının baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgası üzerindeki olası etkilerini deneysel olarak ele almışlardır. Sonuç olarak akım gözleminde şok dalgasının yapıya şiddetli bir biçimde çarpması neticesinde akımın doğrultu değiştirdiğini ve bu noktada hidrolik sıçramaların gözlemlendiğini ifade etmişlerdir.

Janosi ve ark. (2004) ele aldıkları çalışmalarında, Şekil 2.4'te görüldüğü üzere dikdörtgen bir kanalda belirli bir alana yerleştirilen su kütlesinin aniden serbest bırakılması neticesinde oluşan baraj yıkılması problemindeki türbülans etkisini incelemişlerdir. Ölçümleri video görüntülerden yararlanarak yapmışlardır. Akışkan seçiminde su ve polietilen-oksit (PEO) çözeltisi tercih etmişlerdir. Kuru halde baraj yıkılması akımının hızlı olduğu ama sürtünme etkisinin daha bariz bir

etkiye sahip olduğu çıkarımına ulaşmışlardır. PEO çözeltisi kullanıldığında türbülans etkisinin azaltılmasının kuru halde olumlu bir etki yarattığına fakat ıslak koşullarda etkinin önemsenmeyecek derecede az olduğuna dikkat çekmişlerdir.



Şekil 2.4. Deney geometrisi (Janosi ve ark., 2004)

Shigematsu ve ark. (2004) yaptıkları çalışmalarında baraj yıkılmasının başlangıç kısımlarını Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerini kullanmak sureti ile sayısal yönden araştırmışlardır. Türbülans kapatma yöntemi olarak k- ϵ yöntemini seçmişlerdir. Çalışma sonucunda baraj yıkılması gibi oldukça etkin bir hız değişiminin olduğu kompleks akım hesaplamalarında k- ϵ türbülans modelinin en uygun yöntem olduğu kanaatine varmışlardır. Analitik çözümü ele aldıklarında kuru hal olması durumunda pozitif dalga önünün yavaş harekete sahip olduğunu, buna karşın negatif dalganın ise daha hızlı ilerlediği sonucunu ortaya çıkarmışlardır. Deney sonuçları ile modelleme sonuçlarının oldukça uyumlu olduğunu gözlemlemişler, değerlendirmelerinde kuru halde dalga yayılması durumunda taban yüzeyi kaynaklı türbülansın etkin olduğu, fakat ıslak hal olması durumunda ise dalga sıçramasının ve kırılmasının ortaya çıkardığı türbülansın en önemli unsur olduğu çıkarımına ulaşmışlardır.

Bozkuş (2004) yaptığı çalışmada, Kestel Barajı'nın nümerik yıkılma analizlerini farklı senaryolar altında ele almış, kullandığı nümerik modelin adını DAMBRK olarak belirlemiştir. Simülasyonlarında, maksimum olası taşkın hidrografının baraj gölüne girerek, yetersiz dolusavak kapasitesi nedeniyle baraj kret kotunu aştığını ve baraj gövdesinde gedikler oluşturduğunu varsaymıştır. Sonuç olarak en olumsuz etkilenen bölgelerin baraja en yakın olan bölgeler olduğunu belirtmiştir.

Bukreev (2005) çalışmasında dikdörtgen, yatay bir kanal tabanına monte edilen bir eşik üzerindeki düşey bir kapağın ani bir şekilde kaldırılması ile kısmi bir baraj yıkılması akım problemi oluşturmuş, taşkın şok dalgasının davranışını deneysel olarak incelemiştir. Deney düzeneğinin duvarları cam malzemeden olup; 7.20 m uzunluğa, 0.20 m enine ve 0.24 m yüksekliğe sahiptir. Sonuç olarak eşik üzerinde $(4h_0/9)$ kritik akım koşulları oluşması sebebi ile eşik üzerindeki su yükünü kullanarak akım debisinin kolaylıkla elde edilebileceğini belirtmiştir.

Bukreev ve Gusev (2005) ele aldıkları çalışmalarında, baraj yıkılması taşkın şok dalgası yayılımını mansap kısmının kuru ve ıslak halleri için deneysel olarak ele almışlardır. Deneylerini 0.20 m eninde yatay, dikdörtgen yapıdaki bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucu pozitif dalga önünün nümerik çözümlerden elde edilen sonuçlara göre daha yavaş ve negatif dalganın daha hızlı ilerlediğini ifade etmişlerdir. Sığ su denklemlerinin elde edilmesinde akımın çevrintisiz olduğu kabulünün tam tersi şekilde başlangıç aşamalarında belirgin çevrintiler gözlemlendiğini ortaya koymuşlardır.

Chanson (2005) yaptığı çalışmada baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının analizi üzerine yoğunlaşmıştır. Analitik yöntemlerle serbest yüzey profili ve akım özelliklerini deney verileri ile karşılaştırmıştır. Saint-Venant denklemleri ve karakteristik yöntemleri kullanarak baraj yıkılması akım problemini çözmeye çalışmıştır. Ayrıca tsunami dalgalanmalarına analitik çözümler geliştirerek felaket durumlarında tahmin modeli oluşturup acil eylem planı üretmeye çalışmıştır.

Leal ve ark. (2006) yaptıkları çalışmalarında sürtünme ve atalet kuvvetinin baraj yıkılması taşkın şok dalgası önünün yayılma hızı üzerindeki olası etkilerini araştırmışlardır. Kuru veya ıslak mansap koşulları, yatay veya eğimli taban durumları gibi çok farklı deneysel çalışmalar üzerine yoğunlaşmışlardır. Çalışma sonucunda sürtünme etkilerinin ihmal edilmediği ıslak halde küçük farklılıklar dışında deneysel ve nümerik sonuçların Stoker (1957) analitik sonuçları ile uyumlu

olduğunu gözlemlemişlerdir. Memba ve mansap yatak yükseklik farkları arttıkça dalga yayılma hızının da aynı oranda arttığını ifade etmişlerdir.

Kocaman (2007) yaptığı çalışmada baraj yıkılması problemini deneysel, teorik ve sayısal olarak ele almıştır. Yatay dikdörtgen bir kanalda, iki farklı durgun su seviyesini ayıran düşey bir kapağın ani olarak kaldırılmasıyla elde edilen baraj yıkılması taşkın şok dalgasının mansap boyunca yayılmasını, farklı kuyruk suyu derinlikleri için incelemiştir (Şekil 2.5). Ayrıca, baraj mansabında farklı geometriye sahip taban eşikleri kullanarak ve daralmalar oluşturarak akarsu yatağındaki ve enkesit genişliğindeki değişimlerin baraj yıkılması taşkın dalgası yayılımına etkilerini araştırmıştır. Deneylerde, su yüzü profilleri ve kanal boyunca istenilen noktalarda zamana bağlı su seviyesi değişimlerini sayısal görüntü işleme teknikleri kullanarak belirlemiştir. Elde ettiği deney sonuçlarını, analitik çözüm ve sayısal çözüm sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Sayısal çözümler için Flow-3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımını kullanmıştır. Deney sonuçları ile sayısal model sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum olduğunu gözlemlemiştir.



Şekil 2.5. Kullanılan deney düzeneği (Kocaman, 2007)

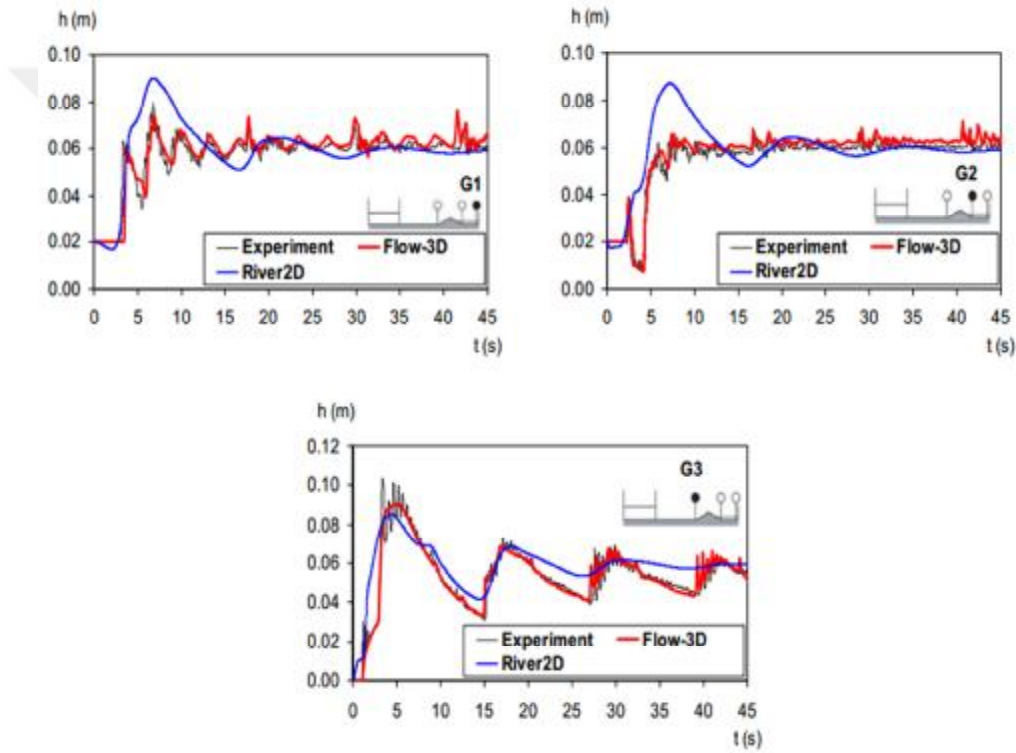
Bukreev ve ark. (2008) çalışmalarında, iki model barajın yıkılması sonucu oluşan şok dalgalarını deneysel yönlerden ele almışlardır. Literatürde önerilen hesaplama yöntemlerini daha da geliştirmişler, deneysel verilerle mukayese etmişlerdir. Çalışma sonucunda mansaptaki kuyruk suyunda oluşan dalga yayılma hızının gedikten akan akışkan kaynaklı enerji kayıplarından önemli derecede etkilendiği kanaatine varmışlardır.

Yusuf ve ark. (2009) çalışmalarında proje kapsamında ele aldıkları 41 adet barajın yıkılmaları halinde oluşabilecek taşkın durumunu (su baskını) Flow-3D programı ile modellemişlerdir. Taşkın modellemesi ve haritalandırması süreçlerini detaylı anlatmışlardır. Sonuçta taşkın harita örneği oluşturarak, çalışmalarının efektif bir eylem planı oluşturulması ve yönetilmesinde güçlü bir kaynak olduğunu vurgulamışlardır.

Özmen-Çağatay ve Kocaman (2009) yaptıkları çalışmada her baraj yapısının yıkılma riski ile karşı karşıya olduğuna ve barajın yıkılması durumunda devasa miktardaki su kütlelerinin mansapta ciddi boyutta can ve mal kaybına neden olacağına dikkat çekmişlerdir. Dolayısı ile potansiyel taşkın koşullarını belirlemenin ve acil eylem planları hazırlamanın çok büyük bir öneminin olduğunu ifade etmişlerdir. Baraj yıkılması sonucu oluşabilecek taşkın şok dalgasının büyüklüğünü dinamik dalga yöntemi ile belirlemeye çalışmışlardır. Mansap kısmı için farklı zaman adımları ve değişik Manning pürüzlülük değerlerine göre su yüzü profillerini incelemişlerdir. Kozan Barajı üzerinde bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. Pürüzlülüğün artması ile akım hızının düştüğünü buna bağlı da taşkın hidrografının ilerleme süresinin arttığını açıklamışlardır. Öteleme mesafesi süresince de su seviyelerinde artışlar olduğunu belirtmişlerdir. Su yüzü profillerinin farklı pürüzlülük değerlerinde birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır.

Vazquez ve Roncal (2009) yaptıkları çalışmada deneysel verileri kullanarak baraj yıkılması başlangıç aşamalarını hem iki boyutlu River2D hem de HAD yazılımı olan Flow-3D ile modellemişlerdir. Modellemelerini kuru yatak

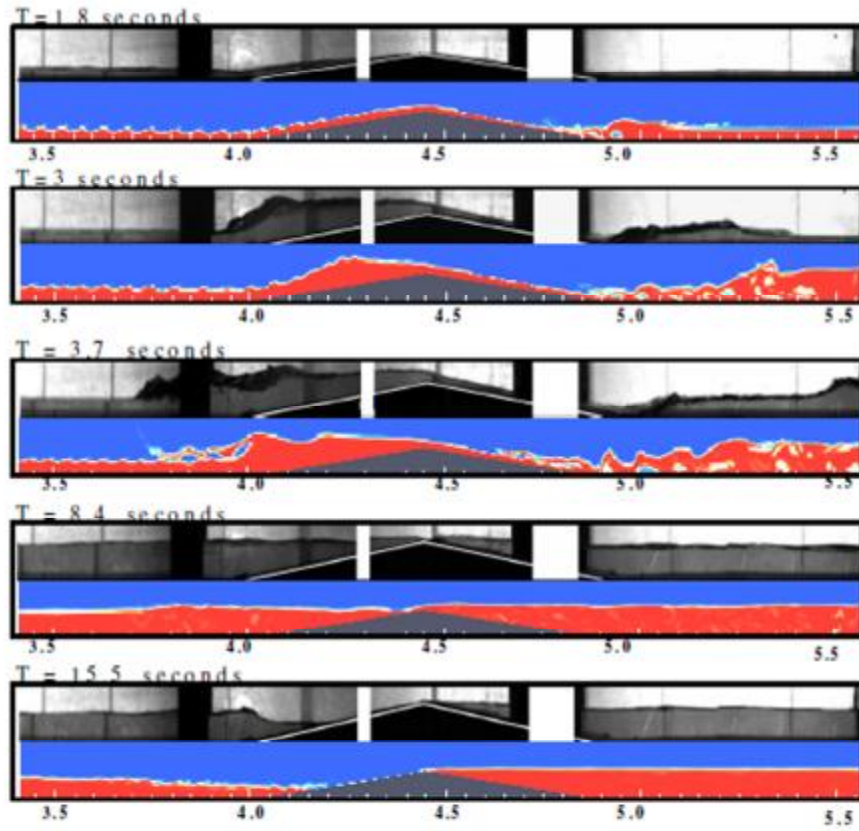
koşullarında, engel ve eğimli mansap olması durumlarında ele almışlardır. River2D'nin taşkın şok dalgasının düz bir yatakta ilerlemesi durumunda iyi sonuçlar ortaya koyduğunu, fakat kuru koşullarda akımın hızlı değişkenlik göstermesi halinde tatmin edici sonuçlar vermediğini belirtmişlerdir. Flow-3D'nin ise her bir örnekte aşırı modelleme zamanı handikapı dışında uyumlu sonuçlar ortaya koyduğunu ifade etmişlerdir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Üçgen eşik durumunda deney ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması (Vazquez ve Roncal, 2009)

Biscarini ve ark. (2010) ele aldıkları çalışmada baraj yıkılması sonucu oluşan serbest yüzey akım problemini üç boyutlu sıg su yaklaşımına dayanan nümerik modelleme yöntemleri ile ele almışlardır. Bunun haricinde Akışkan Hacmi-Volume of Fluid (VOF) yöntemi ile bağlantılı RANS denklemlerinin

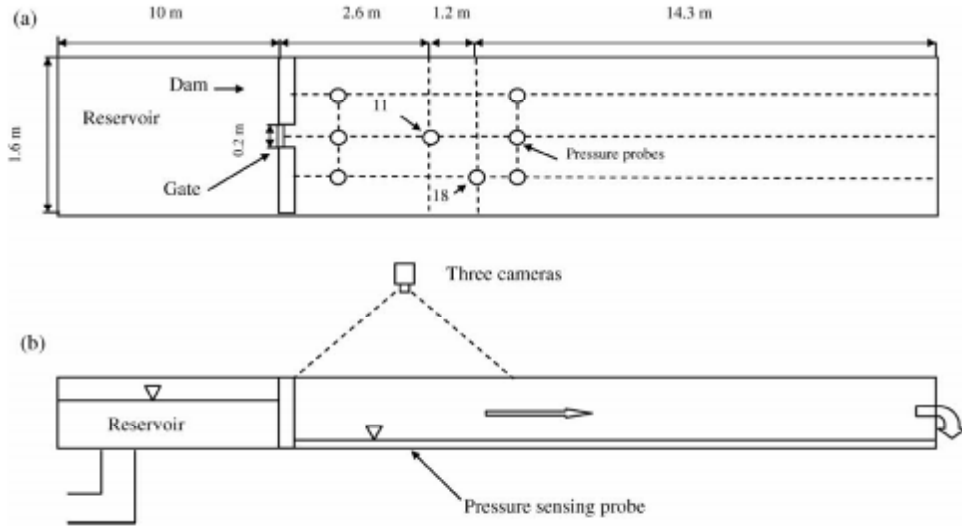
çözümü üzerine de yoğunlaşmışlardır (Şekil 2.7). Çalışmalarını sürtünmesiz düz bir yatak üzerinde baraj yıkılması akımı, mansapta üçgen bir taban eşliğinin bulunması durumundaki koşullarda incelemişlerdir. Sayısal modelleme sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmışlar, üç boyutlu modelin kararsız akım davranışlarını oldukça iyi temsil etme kabiliyetine sahip olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.7. Üç boyutlu model sonuçları ile deney görüntülerinin karşılaştırılması (Biscarini ve ark., 2010)

Gao ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada taşkın davranışını simüle edebilmek için Navier-Stokes çözücü olan ve VOF yaklaşımını uygulayan bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modeli doğrulamak için de iki ve üç boyutlu baraj yıkılması akım probleminde test etmişlerdir (Şekil 2.8). Çalışma sonucunda

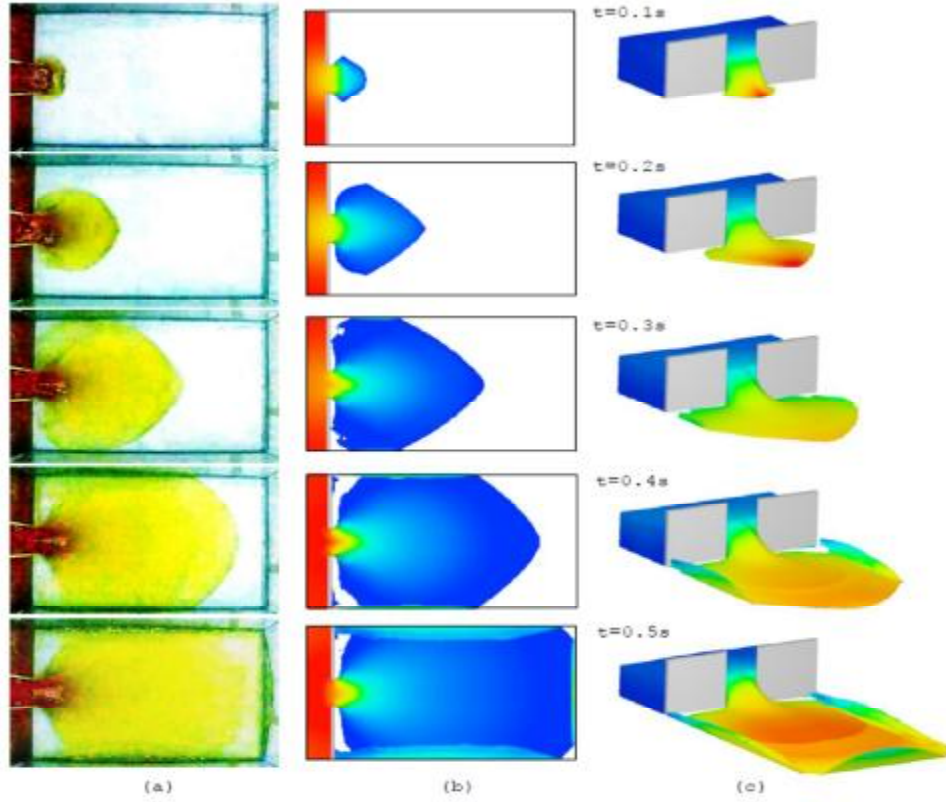
kıyaslamışlardır. Sonuçların genel olarak birbirlerine yakın olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 2.10. Deney düzeneği ve ölçüm noktaları: (a) üst görünüş ve (b) yan görünüş (Yang ve ark., 2010)

Kocaman ve Güzel (2011a) çalışmalarında baraj yıkılması akım probleminin kompleks bir yapıda olması sebebiyle çözüme yönelik çalışmaların ancak deneysel ve nümerik model çalışmaları ile olabileceğini vurgulamışlardır. Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının mansapta yayılımını incelemişlerdir. Dalga önü gelişimini takip ederek elde ettikleri sonuçları RANS temeline dayanan Flow-3D yazılımı sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deney sonuçları ile model sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.11).

Bozkuş ve Bağ (2011) yaptıkları çalışmada, önceden belirledikleri bir dizi senaryo ışığında sanal bir baraj yıkılmasının muhtemel etkilerini bir durum çalışması kapsamında incelemişlerdir. Bursa ilinde yer alan Çınarcık Barajı'nı örnek uygulama yeri olarak ele almışlar ve baraj mansabındaki taşkın düzeyini zamana bağlı olarak öngörmeye çalışmışlardır.



Şekil 2.11. Değişik zaman adımlarındaki; (a) deney, (b) nümerik ve (c) üç boyutlu nümerik anlık görüntülerin karşılaştırılması (Kocaman ve Güzel, (2011a))

Analizler sırasında Çınarcık Barajı'nın mansabında gerçekleşen su yüzü profillerini, seviye değişimlerini ve deşarj değerlerini, tanımlanan senaryolar çerçevesinde uzamsal ve zamansal olarak tahmin edebilmek amacıyla, ABD'de "National Weather Service (NWS)" tarafından geliştirilmiş FLDWAV yazılımını kullanmışlardır. Bu analizleri baz alarak, gösterge düzeyinde taşkın haritaları ve bunlara göre risk altında olan yerleşim yerlerini tespit etmişler ve alınması gerekli bazı önlemleri de sıralamışlardır.

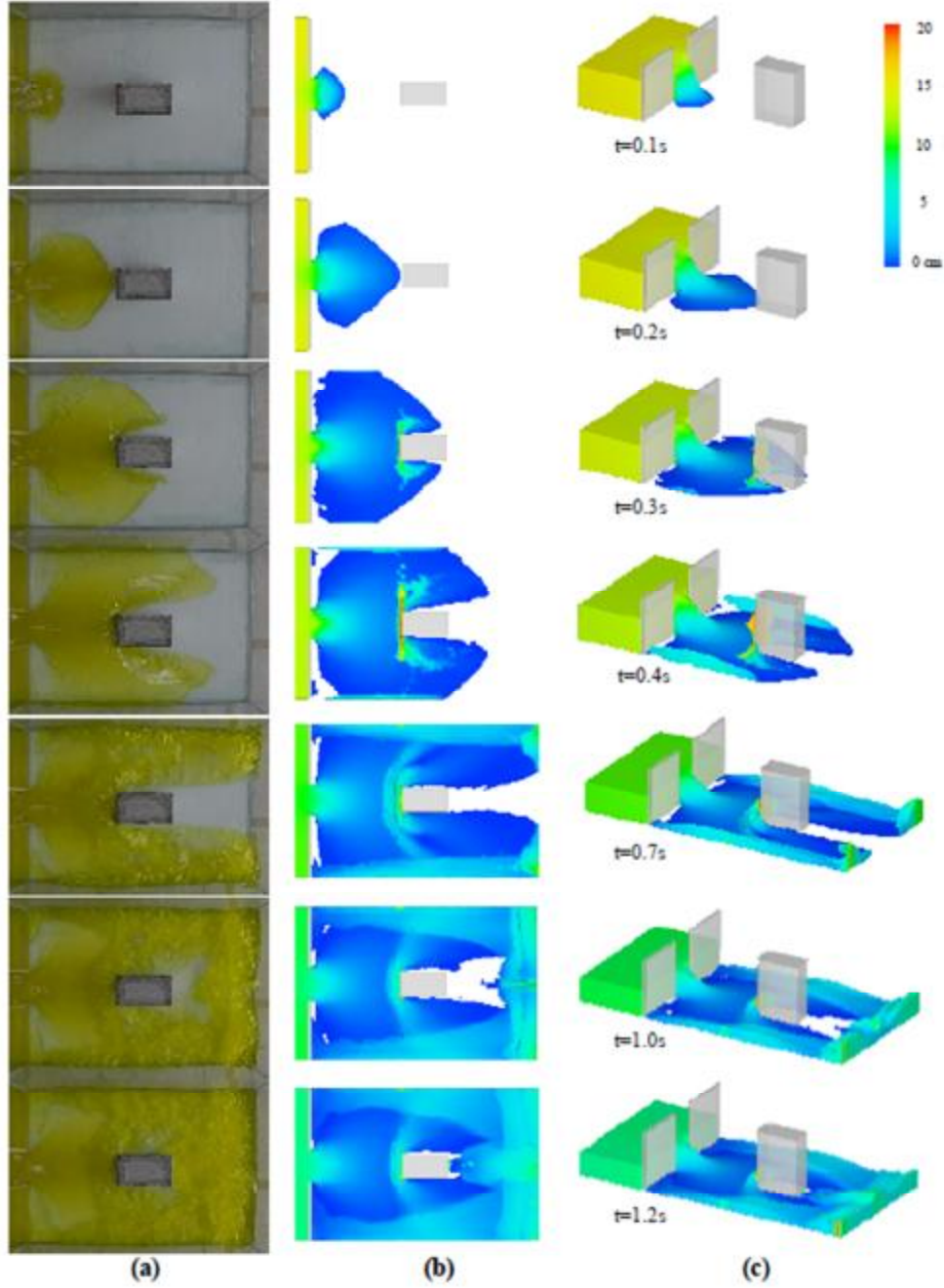
Kocaman ve Güzel (2011b) yaptıkları çalışmada baraj yıkılması sonucu oluşan akım problemini mansapta engel bulunması durumunda ele almışlardır.

Yıkılma sonrası oluşan şok dalgasının mansaptaki bir engele çarpması durumundaki yayılımını ve su seviyesi değişimlerini yüksek hızlı ve çözünürlüklü kamera ile kayıt altına almışlar, görüntü işleme teknikleri yardımı ile de sayısallaştırmışlardır. Üç boyutlu RANS temeline dayanan k- ϵ türbülans modelini kullanan Flow-3D programı sonucu elde ettikleri verileri deneysel çalışma sonuçları ile mukayese etmişlerdir. Sonuçların birbirleri ile iyi bir uyum yakaladığını belirtmişlerdir (Şekil 2.12).

Goutiere ve ark. (2011) çalışmalarında ani genişleyen kanalda hareketli bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akım problemini deneysel olarak ele almışlardır. Yatak malzemesini kumdan teşkil etmişler, baraj yıkılması sonrasında akımın davranışını incelemişlerdir. Akışkan davranışını ultrasonik sensörler ve dijital görüntü işleme tekniklerini kullanarak gözlemlemişlerdir. Sonuçta elde ettikleri ölçümlerin sayısal modellemelerin doğrulanması çalışmalarında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

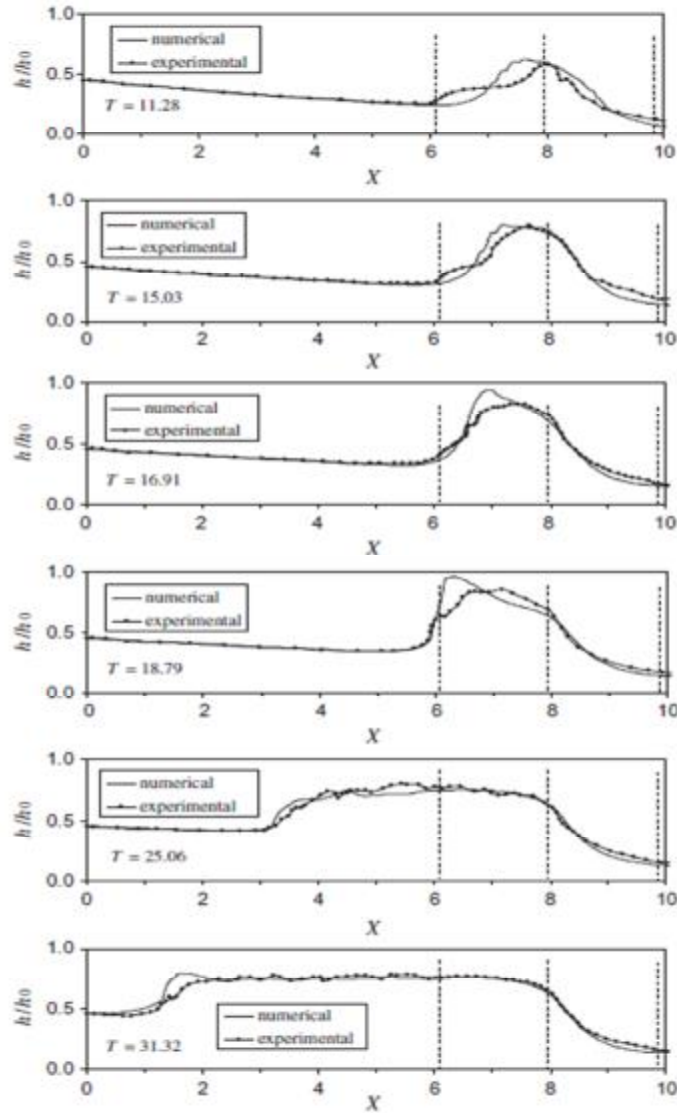
Duarte ve ark. (2011) çalışmalarında baraj rezervuarındaki büyük miktarda sedimentin baraj yıkılması sonrası oluşan taşkın şok dalgası yayılımında önemli bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Rezervuarların siltlenme dereceleri ve dane dağılımlarının dalga yükseklikleri ve hızları üzerindeki etkilerini incelemek için deneysel araştırmalar yapmışlardır. Oluşan dalga durumunu tanımlayabilmek için birçok faktörün göz önüne alınması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Kocaman ve Özmen-Çağatay (2012) yaptıkları çalışmada dikdörtgen bir kanaldaki baraj yıkılması akımlarında yanal daralmaların etkisini araştırmışlardır. Mansap yatak koşulunu kuru hal olarak değerlendirmişler, iki simetrik üçgen biçimli yanal daralma etkisi yaratacak engelleri teşkil etmişlerdir. Böylece ani topoğrafya düzensizlikleri oluşturmuşlar, üç farklı video ile senkronize kayıtlar elde etmişlerdir. Kayıtları dijital görüntü işleme teknikleri ile sayısallaştırmışlardır.



Şekil 2.12. Sonuçların karşılaştırılması (Kocaman ve Güzel, (2011b))

Dolayısı ile serbest su yüzü profillerini ve birim hidrografları akıma zarar vermeden elde edebilmişlerdir. Çalışma sonucunda RANS tabanlı sayısal simülasyon sonuçlarının deney sonuçları ile iyi bir yaklaşıklık sağladığını ifade etmişlerdir (Şekil 2.13).

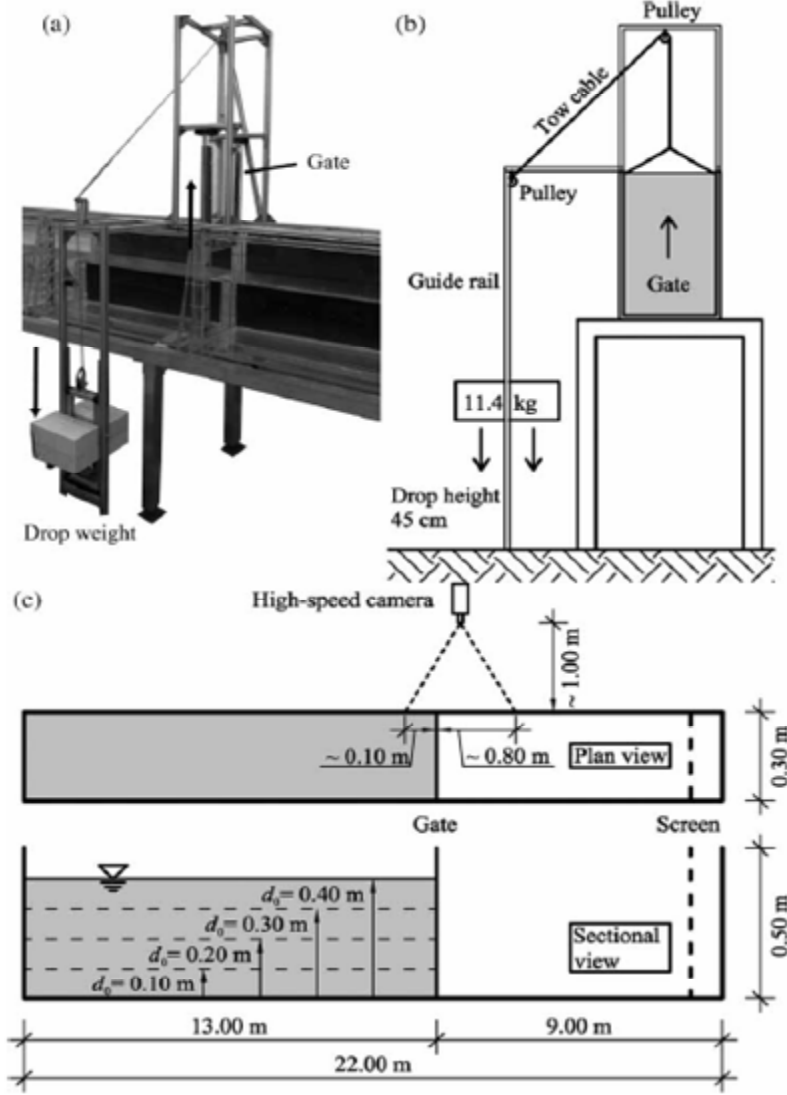


Şekil 2.13. Farklı zamanlardaki su yüzü profili sonuçlarının karşılaştırılması (Kocaman ve Özmen-Çağatay, 2012)

Soares-Fraza ve ark. (2012) çalışmalarında taşkın tehlikelerini modelleme ve baraj hasarları üzerine yoğunlaşmışlardır. Kum kaplı, hareketli bir yatakta iki boyutlu baraj yıkılması akım problemlerini deneysel açıdan ele almışlardır. Karşılaştırmada kullandıkları sayısal modelleri açıklamışlar, modelleme yönteminin problemi çözme yeteneğini değerlendirmişler ve sonraki çalışmalarda ortaya çıkabilecek sorunlar üzerine yorum yapmışlardır. Sonuç olarak modelleme çalışmalarının yoğun sediment taşınımı ve morfolojik değişimleri içeren hızlı değişken akımlarda daha fazla sayıda araştırma yapılması gerekliliğini açığa çıkardığını vurgulamışlardır.

Oertel ve Bung (2012) yaptıkları çalışmada baraj yıkılması sonucu oluşan dalgaların başlangıç durumunu iki boyutlu olarak sayısal, deneysel ve analitik olarak değerlendirmişlerdir (Şekil 2.14). Sayısal modellemeleri VOF metoduna dayalı Flow-3D yazılımı ile test etmişlerdir. Deneysel olarak elde ettikleri verileri nümerik yöntem sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Mansap kısmında oluşturdıkları engeller vasıtası ile su yüzü profillerini incelemişlerdir. Sayısal modellemelerin deneysel verilerle özellikle kapaktaki hız profilleri başta olmak üzere birçok yönden uyum sağladığını görmüşlerdir.

LaRocque ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada idealize edilmiş baraj yıkılması deneylerini ve bu deneylerden elde ettikleri hız profili ölçümelerini sayısal modelleme sonuçları ile mukayese etmişlerdir. Söz konusu deneylerin akım alanının zamanına bağlı olmayan bir durumu üzerine kararsız akım koşulları ile ilgili veriler sağladığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında ultrasonik hız profili ölçerleri kullanmışlar ve iki boyutlu deneyleri akışkanlar dinamiği çözücülerini kullanarak simüle etmeye çalışmışlardır. Özellikle yıkılmanın başlangıç kısımlarında baraj yıkılması akımı için analitik çözüm, Large Eddy Simulation-Büyük Girdap Simülasyonu (LES) ve ölçülen su yüzeyi profili sonuçlarının tatmin edici bir uyum yakaladığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.14. Deney düzeneği; (a) kapak ve çekme aparatları, (b) çekme aparatlarının kesit görünümü, (c) plan görünümü ve kanal yapısının kesit görünümü (Oertel ve Bung, 2012)

Sonuç olarak da LES modellemesinin baraj yıkılması akım problemlerinde davranışı tanımlamak için uygulanabilir bir yaklaşım olduğu çıkarımını yapmışlardır.

Kovyorkina ve Ostapenko (2013) çalışmalarında dikdörtgen bir kanalın kesit alanındaki hidrolik sıçrama durumunu baraj yıkılması probleminde teorik ve deneysel açıdan ele alarak mukayese etmişlerdir. Deney koşullarını üst bölümün alt bölüme nazaran daha geniş olması varsayımı ile oluşturmuşlardır. Çözümlerde kesit alanındaki sıçramada kaybolan toplam enerjinin miktarı ile ilgili sezgisel bir parametre üretmişlerdir. Sonuçta dalga türlerinin, yayılma hızlarının ve mansaptaki su seviyesi değişimlerinin sayısal model sonuçları ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Sarno ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada baraj yıkılması akımı ve yıkılmanın başlangıç safhalarında basınç katsayısını hesaplayabilmek için yeni düzenleyici bir fonksiyon olan Savage-Hutter type modelinin kullanıldığını açıklamışlardır. Sayısal olarak oluşturdukları modelin laboratuvar deney verilerine göre pürüzlü yatak durumunda baraj yıkılması başlangıç safhalarını tanımlamada belirgin bir gelişme gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca söz konusu modelin orijinal Savage-Hutter type modeline göre basınç katsayısını hesaplama noktasında benzer çözümler ürettiği sonucuna varmışlardır.

Souders ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada HAD yazılımlarının gittikçe yaygınlaşmakta olduğunu ve hidrolik yapıların tasarım süreçlerinde çok etkin rol oynadıklarını ifade etmişlerdir. Bu tip yazılımların hesaplama yükünü önemli ölçüde azalttığını ve özellikle üç boyutlu baraj yıkılması taşkın durumlarını simüle etmede ciddi avantajlar sağladığını belirtmişlerdir. Literatürdeki deneysel verilerle yaptıkları karşılaştırmada nümerik modellemenin deneye göre %6'nın altında bir hata ile çözümlediği sonucuna varmışlardır.

Haltaş ve ark. (2013) çalışmalarında baraj yıkılması taşkın dalgasının sayısal ve deneysel analizi üzerine yoğunlaşmışlardır. Sayısal modeli mevcut barajlara Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yardımı ile uygulamışlardır. Çalışma kapsamında üç adet barajın durumunu ele almışlardır. Bunları Ürkmez Barajı- İzmir (toprak dolgu), Porsuk Barajı- Eskişehir (beton) ve Alibey Barajı- İstanbul (toprak dolgu) şeklindedir. Fiziksel model oluşturarak sayısal sonuçlarla

yakınsaklığını irdemişlerdir (Şekil 2.15). Sonuçta sayısal ve fiziksel model sonuçlarının belirlenen derinlik değerlerinde birbirleri ile uyumlu olduğu kanaatine varmışlardır.

Özmen-Çağatay ve ark. (2014) ele aldıkları çalışmalarında baraj yıkılması probleminin mansaptaki canlı yaşamı için bir tehdit olduğunu ve bu durumun olası bir taşkın tehlikesini beraberinde getirdiğini söylemişlerdir. Çalışmada kuru bir kanalda baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının mansaptaki yayılımı ve fiziksel etkilerini incelemişlerdir. Mansapta üçgen engeller teşkil ederek ani değişim ve düzensizlikler yaratmışlar, böylece mansaptaki belirli noktalarda su seviyesi değişimi ve su yüzü profillerini hem nümerik hem de deneysel yonden araştırmışlardır. Nümerik analizleri VOF tabanlı Flow-3D yazılımı yardımı ile yapmışlardır. Flow-3D programında k-ε türbülans kapatma modelini uygulamışlardır.



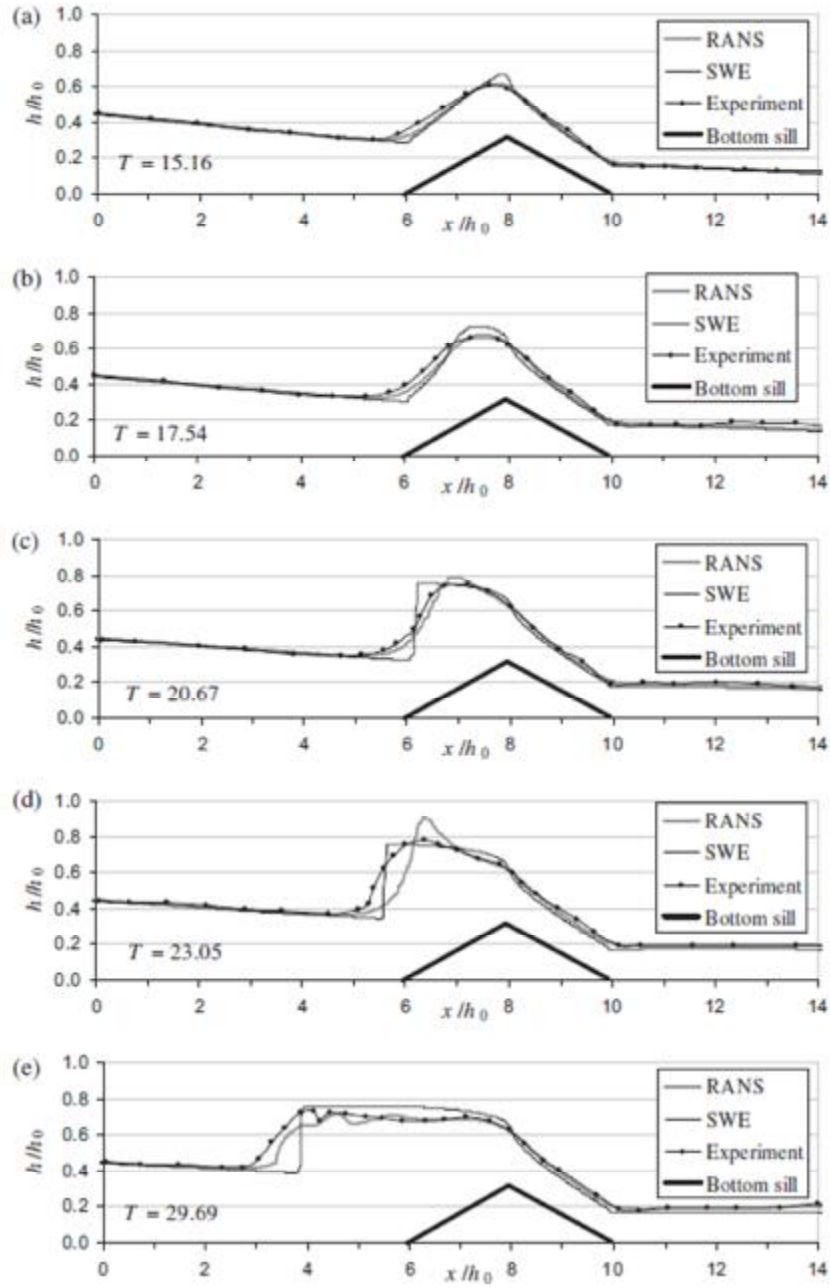
Şekil 2.15. Fiziksel model yapısı (Haltaş ve ark., 2013)

Sonuç olarak her iki sayısal modelin de akım davranışını makul bir doğrulukla çözümlediğini, fakat sığ su denklemlerine göre RANS modelinin biraz daha iyi sonuçlar verdiği kanaatine varmışlardır. Deneysel verilerin diğer analiz

sonuçlarının doğrulanması bakımından çok geçerli bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.16).

Degtyarev ve ark. (2014) çalışmalarında, mansap kısmına göre memba bölümü daha geniş olan bir kanalın dikdörtgen kesit alanı içerisindeki ani bir değişim sonucu oluşan baraj yıkılması kaynaklı dalga akım problemini teorik ve laboratuvar çalışmalarında elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Kesit alanının ani değişimi sonrasında kaybolan akımın toplam enerjisine bağlı olarak sezgisel parametre içeren bir çözümü sıg su denklemlerini içeren bir yaklaşımla ele almışlardır. Sonuçta dalga türlerine göre bunların yayılma hızlarını, mansapta oluşan su seviyesi değişimlerini teorik çözümle elde etmişler, ortaya çıkan verilerle deney sonuçlarının oldukça iyi bir uyum gösterdiğini ifade etmişlerdir.

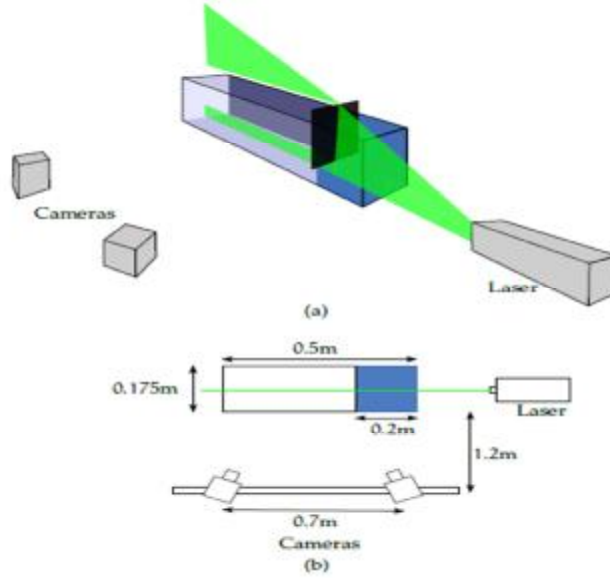
Marsooli ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, düzensiz bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımını modelleyebilmek için üç boyutlu bir sayısal model geliştirmişlerdir. Modeli sonlu hacimler yöntemini kullanarak RANS denklemleri ile çözmeye çalışmışlardır. Smagorinsky Eddy viskozite modelini, RANS denklemlerinin türbülans kapatmasında kullanmışlardır. Doğruluğunu sınayabilmek için de baraj yıkılması akımı için küçük ve büyük ölçekli laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Mevcut modeli, hesaplanmış sonuçlar ve literatürdeki diğer modellerle karşılaştırmışlardır. Yıkılmanın başlangıç aşamalarında mevcut modelin iyi bir yaklaşım sağladığını, sadece ıslak yatak başlangıç safhasında ve akarsu yapılarının yakınında hidrostatik koşulları sağlamadığını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.16. Farklı zaman adımlarında belirli noktalardaki su seviyesi değişimleri sonuçlarının karşılaştırılması (Özmen-Çağatay ve ark., 2014)

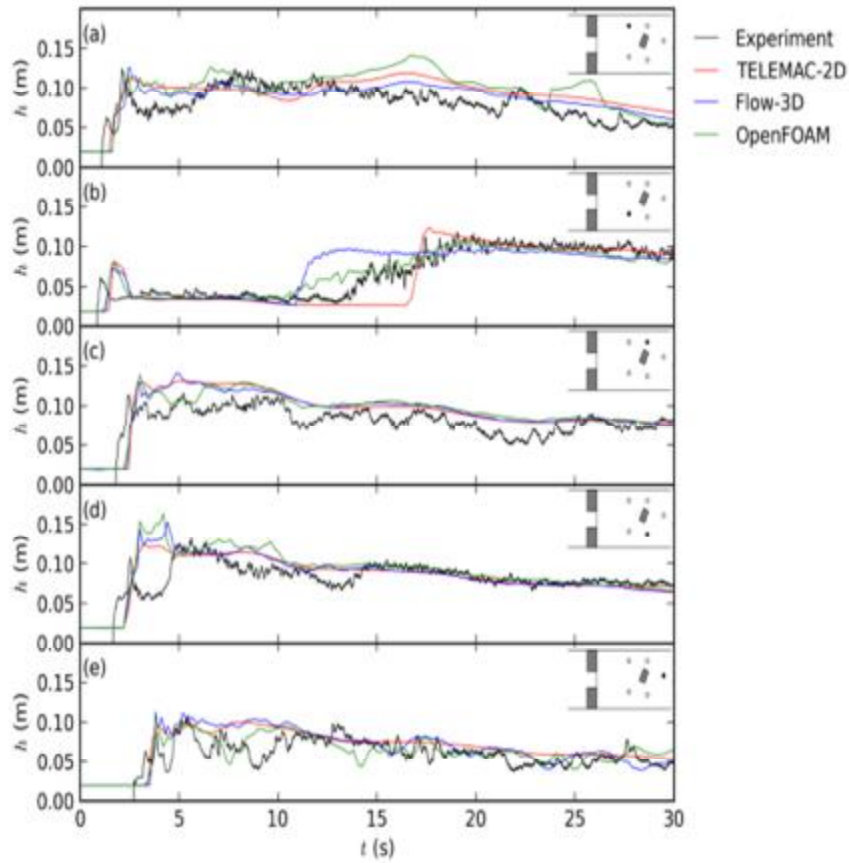
Postacchini ve ark. (2014) çalışmalarında baraj yıkılması deneyinde ölçülen sediment taşınımını daha önceden yaptıkları sayısal hidro-morfodinamik çalışmalar sonucu öngördükleri kıyı modeli ile karşılaştırmışlardır. Öncelikle hidrodinamik modeli tanımlamışlar ve sonuçları hem sürtünme faktörü hem de türbülanslı viskoziteyi kalibre etmek için kullanmışlardır. Sonuç olarak laboratuvar verileri ile nümerik sonuçlar arasında hidrodinamik açıdan iyi bir tahmin oluştuğunu göstermişlerdir.

Nicholas (2015) çalışmasında baraj yıkılması sonucu pürüzlü bir mansap durumundaki kıyı şeridi morfodinamiğini modellemiştir. Modelleme noktasında mansap yatak koşulları ve akışkan arasındaki sediment geçişlerinde kütlenin korunumuna yönelik yeni bir metot tanımlamıştır. Modeli doğrulamak amacı ile de baraj yıkılmasını kuru ve ıslak hal durumları için test etmiştir (Şekil 2.17). Çalışma sonucunda deney ortamında üç boyutlu stereoskopik PIV ölçümleri almış ve sayısal çalışmanın modelleme sonuçları ile benzer olduğunu belirtmiştir.



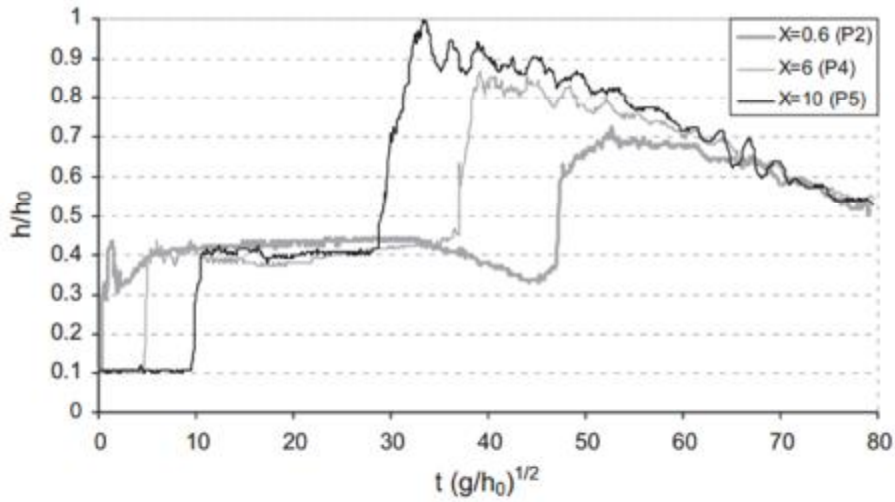
Şekil 2.17. Deney düzeneği (a) üç boyutlu görünüm (b) plan görünümü
(Nicholas, 2015)

Robb ve Vazquez (2015) çalışmalarında mansapta engel yapısının bulunduğu baraj yıkılması akımını üç farklı sayısal model üzerinde test etmişlerdir. Uyguladıkları sayısal modellerin Telemac, Flow-3D ve OpenFOAM olduğunu belirtmişlerdir. Modellerden Telemac'ın Saint-Venant denklemlerine dayalı olduğunu, diğerlerinin ise VOF metodunu kullandığını ifade etmişlerdir. Çalışma sonucunda belirli zamanlarda su seviyesi değişimlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiğini söylemişlerdir (Şekil 2.18).

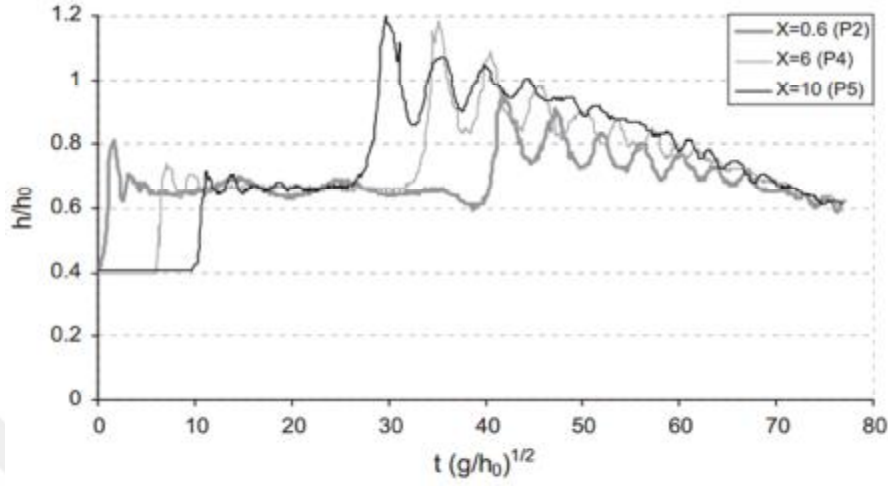


Şekil 2.18. Farklı noktalarda belirli zamanlardaki su seviyesi değişimlerinin modellenmesi (Robb ve Vazquez, 2015)

Kocaman ve Özmen-Çağatay (2015) yaptıkları çalışmada baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgalarının mansapta oluşturduğu fiziksel etkileri hem deneysel hem de VOF tabanlı HAD simülasyonları şeklinde ele almışlardır. İki farklı kuyruk suyu seviyesinde ıslak yatakta baraj yıkılması akım problemini araştırmışlardır. Akım ölçümü ve su seviyesinin zamanla değişimi için görüntü işleme tekniğini kullanmışlardır. Ayrıca memba yönünde negatif bir dalga oluşumunu incelemişlerdir. Sayısal analizlerde RANS ve sıg su yaklaşımına dayanan, $k-\epsilon$ türbülans modelini uyguladıkları Flow-3D yazılımını kullanmışlardır. Görüntü işleme yöntemleri ile elde ettikleri sonuçları simülasyon verileri ile karşılaştırmışlardır. Sonuçta laboratuvar sonuçları ile RANS çözümünün uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. RANS çözümlerinin sıg su sonuçlarına göre daha tatmin edici sonuçlar ürettiğini açıklamışlardır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19a. $\alpha=0.20$ oranı için P2, P4 ve P5 noktalarında zamanla su seviyesi değişimi grafiği (Kocaman ve Özmen-Çağatay, 2015)



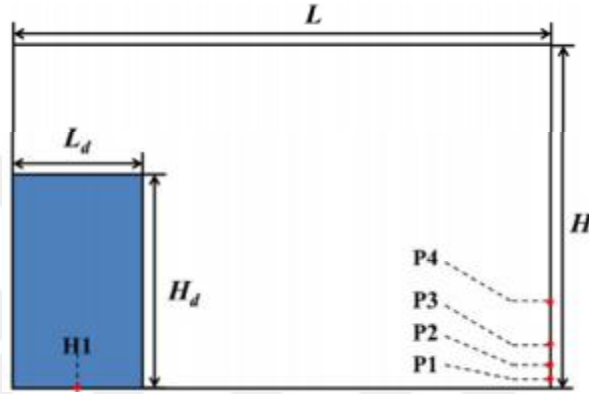
Şekil 2.19b. $\alpha=0.40$ oranı için P2, P4 ve P5 noktalarında zamanla su seviyesi değişimi grafiği (Kocaman ve Özmen-Çağatay, 2015)

Rostami ve Siosemarde (2015) baraj yıkılması analizinin risk değerlendirme çalışmalarında çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmalarında örnek uygulama yeri olarak İran'da bulunan Gotvand Barajı'nı seçmişlerdir. Analizlerinde sıg su denklemlerini kullanan Flow-3D yazılımından faydalanmışlardır. Çalışma sonucunda Gotvand Barajı'nın yıkılması durumunda taşkın şok dalgası hızının yayılım haritasını ve acil eylem planı taslağını oluşturmuşlardır.

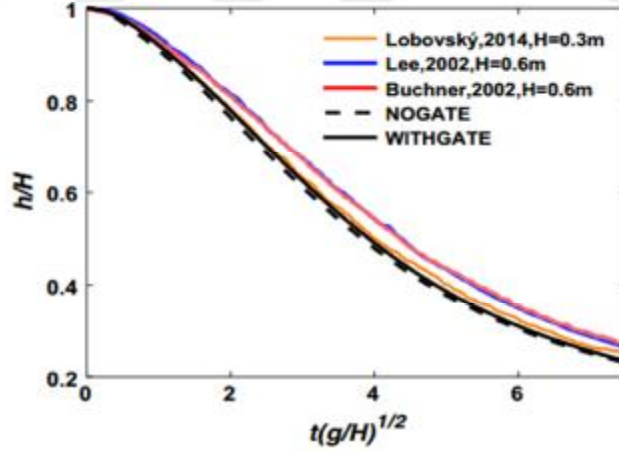
Javadian ve ark. (2016) ele aldıkları çalışmalarında baraj yıkılması akım problemi üzerinde durmuşlardır. Mansabı kuru olan bir kanalda kapak mekanizmasının kaldırılması neticesinde söz konusu akım problemini deneysel olarak araştırmışlardır. Hız, su seviyesi ve debi gibi parametreleri teorik ve deneysel yönlerden karşılaştırmışlardır. Analitik yani teorik çözümlmeleri Saint-Venant denklemleri yardımı ile yapmışlardır. Çalışma sonucunda teorik ve deney sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğunu ifade etmişlerdir.

Ye ve ark. (2016) çalışmalarında baraj yıkılması akım problemlerinde hareketli bir kapak mekanizmasının etkilerini sayısal olarak modellemişlerdir

(Şekil 2.20). Su seviyesi ve basınç değişimi ele aldıkları parametrelerdir. Ayrıca kapaklı durum ve kapak olmadan baraj yıkılması başlangıç safhalarını araştırmışlardır (Şekil 2.21). Sonuçta kapaklı yıkılma modellemesinin deneysel verilerle oldukça yakın değerler ürettiğini gözlemlemişlerdir. Dolayısı ile kapak hareketinin yayılımı etkileyen önemli bir faktör olduğu çıkarımına ulaşmışlardır.



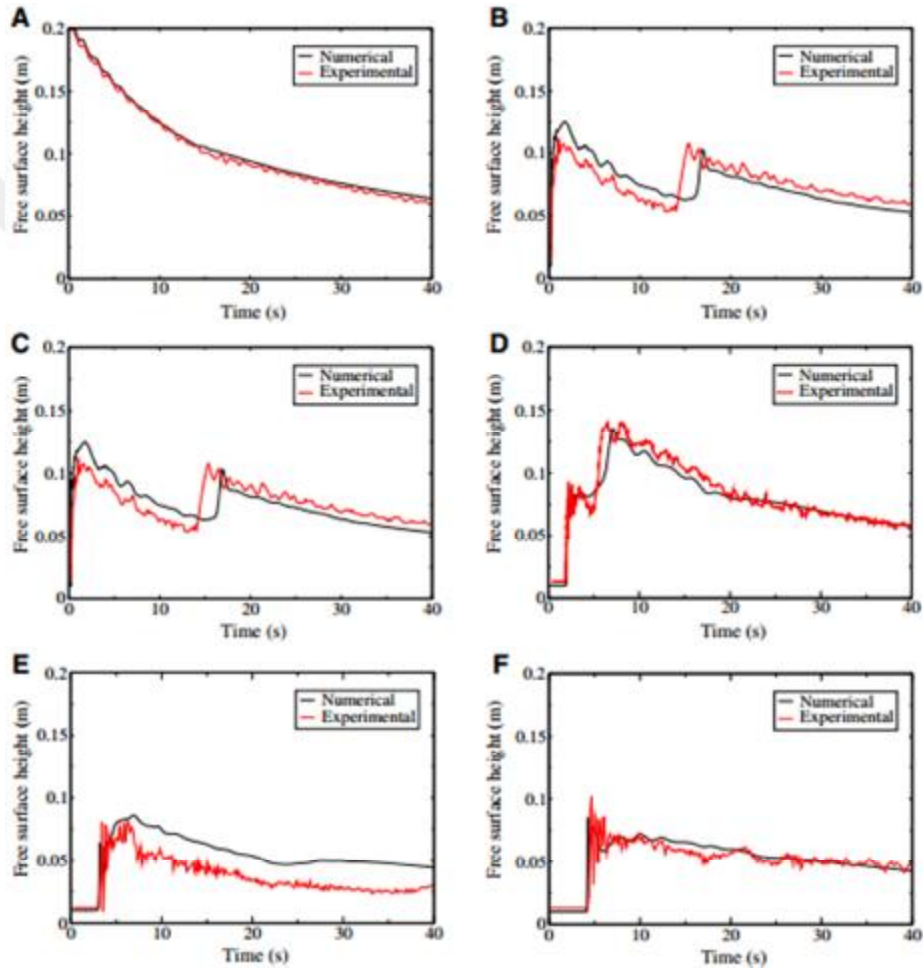
Şekil 2.20. Baraj yıkılması akım problemi şematigi (Ye ve ark., 2016)



Şekil 2.21. H1 noktasının seviye değişiminin karşılaştırılması (Ye ve ark., 2016)

Zhang ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada baraj yıkılması akım probleminin çözümlenebilmesi amacı ile farklı modelleme tekniklerinin uygulanmasının kentsel alanlarda can ve mal kaybını en aza indirebilecek bir unsur

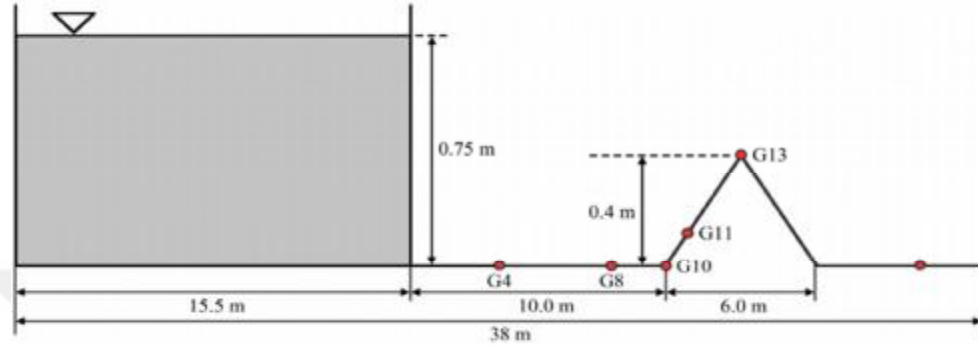
olduğu yorumunu yapmışlardır. Uyguladıkları nümerik modeli üç boyutlu ağ yapısına dayanan bir model olarak tanımlamışlardır. Modelin doğruluğu için de deneysel verilerle mukayese etmişlerdir. Sonuçların deneysel verileri iyi bir yaklaşıklıkla yakaladığını belirtmişlerdir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Sonuçların karşılaştırılması (Zhang ve ark.,2017)

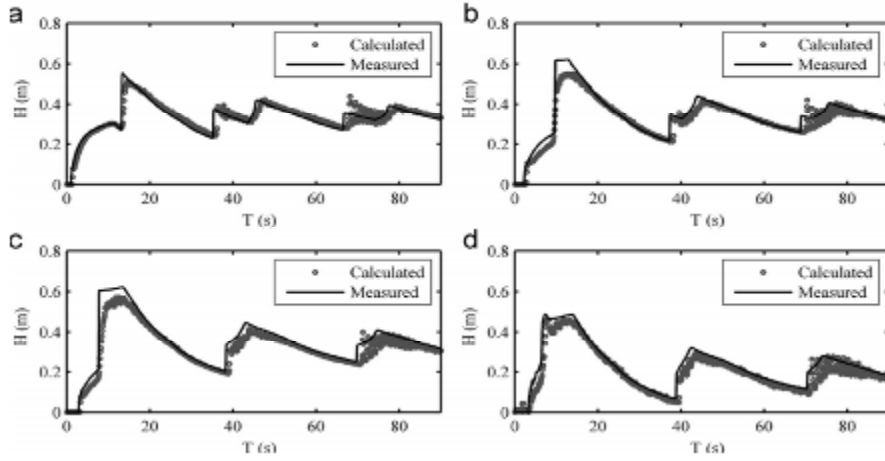
He ve ark. (2017) çalışmalarında baraj yıkılması akım problemi için ortalama derinlikli iki boyutlu bir model önermişlerdir. Dört adet örnek deneysel

çalışma yapmışlar, farklı mansap koşullarında nümerik model ile deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Deney düzeneği şematığı (He ve ark., 2017)

Deney ve nümerik sonuçların mansaptaki su derinliği, hızı,...vb. gibi parametreler yönünden tatmin edici bir performans ortaya koyduğunu açıklamışlardır (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Deney ve nümerik sonuçların farklı ölçüm noktaları için karşılaştırılması (He ve ark., 2017)

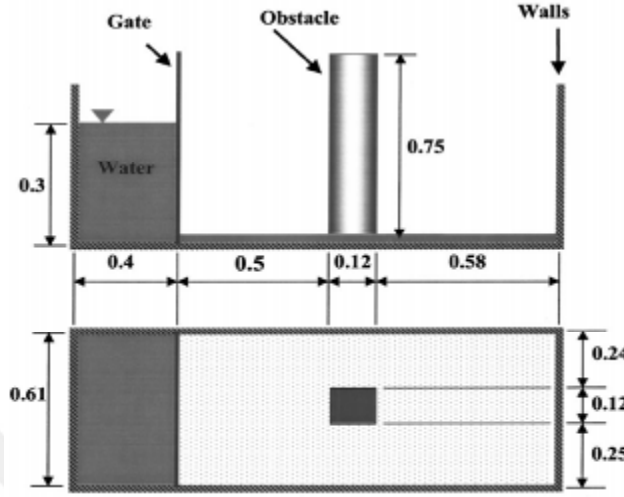
2.2. SPH Yöntemi ve Baraj Yıkılması Çalışmaları

İlk olarak Gingold ve Monaghan (1977), Lucy (1977), Liu&Liu (2003) tarafından “*astrofizik problemleri*” için geliştirilmiş olan SPH yöntemi parçacık sistemleri kullanımını esas almakta ve günümüzde birçok alanda uygulanabilen kullanışlı yeni bir metot özelliği taşımaktadır.

Shao ve Lo (2003) çalışmalarında serbest yüzeyli Nevtoniyen ve Nevtoniyen olmayan akım problemlerini modellemek için SPH yöntemini kullanmışlardır. Kütle korunumu ve Navier-Stokes denklemlerinden faydalanmışlar, ayırıklaştırma işlemleri sırasında çeşitli SPH formülasyonlarını uygulama imkanını bulmuşlardır. Akışkan olarak hem su hem de çamur öngörmüşler ve iki boyutlu baraj yıkılması akım probleminde SPH yöntemini test etmişlerdir. Çalışma sonucunda mevcut deneysel verilerle elde ettikleri çözümlerin oldukça iyi bir uyum yakaladığını ifade etmişlerdir.

Gomez-Gesteira ve Dalrymple (2004) yaptıkları çalışmada baraj yıkılması sonucu oluşan dalga yayılımını ve mansaptaki uzun bir yapıya çarpması durumunu parçacık yöntemi olan SPH yöntemi ile modellemeye çalışmışlardır. Dalga ilerlemesi ve dalganın yapıya uyguladığı kuvvet etkisi inceledikleri başlıca fiziksel özelliklerdir (Şekil 2.25). Sayısal modelleme sonucu elde ettikleri verileri deneysel ölçüm sonuçları ile mukayese etmişler, sonuçların birbirleri ile iyi bir uyum oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Deneylerde ıslak yatak durumlarını göz önüne almışlardır.

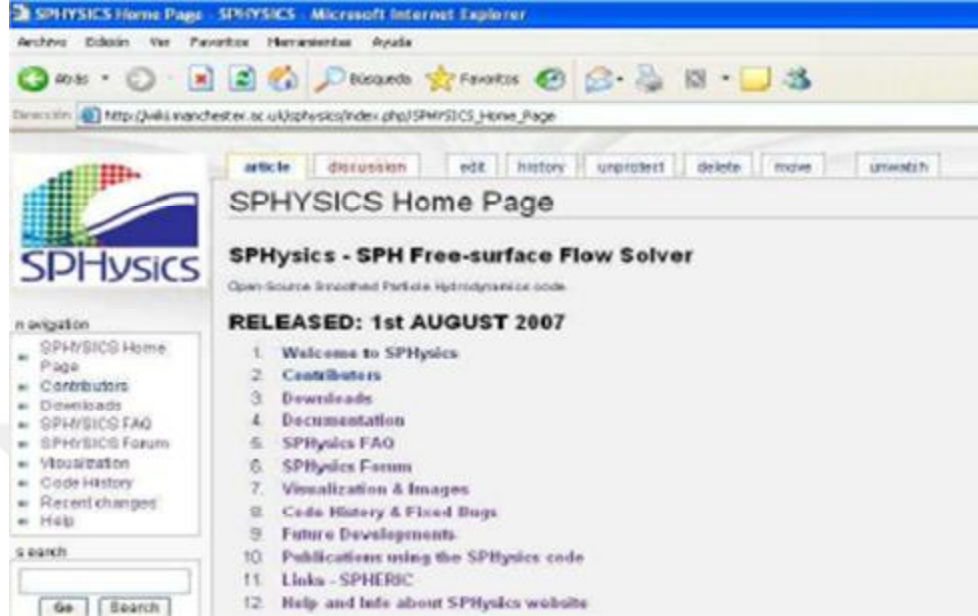
Dalrymple ve Rogers (2006) çalışmalarında ağsız, doğrusal olmayan SPH yöntemini dalgaların yayılımını incelemek üzere kullanmışlardır. Daha az sayıda parçacık kullanan yöntemlere göre bu yöntemi daha detaylı çözümleyebilmek amacı ile geliştirmeye çalışmışlardır. Türbülans, viskozite ve yoğunluk ele aldıkları parametreler olup birçok iyileştirme sunmuşlardır. Farklı zaman adımlarında algoritmalar üretmişler ve modellemelerini baraj yıkılması ve dalga-yapı etkileşim problemlerinde ele almışlardır.



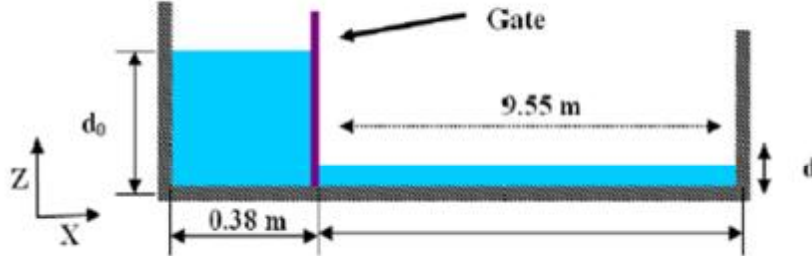
Şekil 2.25. Deney düzeneği (Gomez-Gesteira ve Dalrymple, 2004)

Özbulut (2008) ele aldığı çalışmasında SPH yönteminin metodolojisini açıklamış ve uygulanması yönünde giriş niteliği taşıyan bilgiler üzerine yoğunlaşmıştır. Yöntemin temel yaklaşımlarını, momentum denklemlerinin bu yaklaşım ile ifade ediliş biçimlerini anlatmıştır. Sınır elemanların tanımlanması, sayısal stabilite sorunlarının giderilmesi, denge denklemleri üzerinden tanımlanan basınç değerlerinin irdelenmesi, interpolasyon uzunluğu ve zaman adımı gibi akışkan dinamiği problemlerinin çözümünü direkt olarak etkileyen parametrelerin doğru olarak tayin edilmesi sorununun hâlâ tam olarak çözülemediğini, ayrıca yöntemin bilim dünyasında geliştirilmekte olan bir süreçten geçtiğini ifade etmiştir. İlerleyen zamanlarda öncelikle sayısal stabilite sorunlarının giderilmesi üzerinde çalışılması gerektiği sonucuna varmıştır.

Crespo (2008) yaptığı çalışmada, SPHysics olarak adlandırılan SPH yönteminin bir kod versiyonu üzerine odaklanmıştır (Şekil 2.26). Çalışmasını söz konusu metodun geliştirilmesine ve dalga mekaniğine uygulanmasına yoğunlaştırmıştır. Modeli baraj yıkılması ve dalga-yapı etkileşimi gibi konularda farklı deneysel yöntemlerle ele almış, sonuçları iki ve üç boyutlu versiyon ile karşılaştırmıştır (Şekil 2.27).



Şekil 2.26. SPHysics web sitesi (<https://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>)

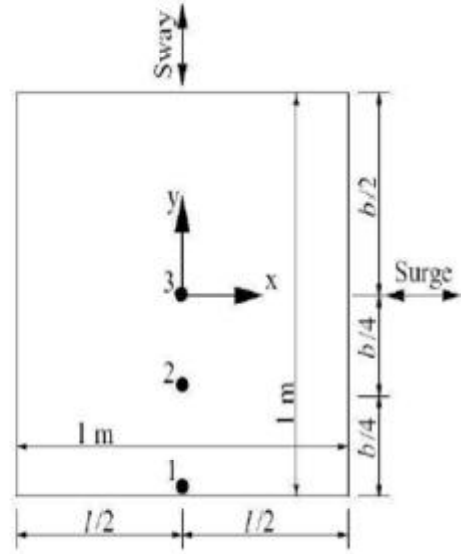


Şekil 2.27. Baraj yıkılması analizi deney düzeneği (Crespo,2008)

Sonuç olarak SPH metodunun çok farklı dalga problemlerinin simülasyon çözümlerinde çok iyi sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmiştir.

Muthu (2008) çalışmasında serbest yüzeyli dalgaların önemli mühendislik problemleri oluşturacak etkilerini incelemiştir. Serbest yüzeyli dalga etkilerini FUNWAVE adı verilen tam doğrusal olmayan Boussinesq yöntemi ve Lagrange yaklaşımı ile ifade edilen SPHysics yöntemi ile modellemiş, deneysel verilerle karşılaştırmıştır (Şekil 2.28). Her iki tekniğin de farklı alanlarda başarı ile

uygulanabileceği sonucuna varmıştır. SPH yönteminin serbest yüzeyli dalgaların en son bölgesi ve run-up içerisinde dönüşümü oluşturmada iyi bir model olduğunu ifade etmiştir.



Şekil 2.28. Kullanılan deney düzeneği (Muthu, 2008)

Rui Xu (2009) ortaya koyduğu çalışmasında Sıkıştırılmayan SPH (ISPH) metodunu incelemiştir. SPH yönteminin farklı bir kod şekli olan ISPH modelini hız alanı, yoğunluk ve bunların kombinasyonu şeklinde Standart Taylor-Green ve Spin-down vorteks problemlerinde ele almıştır. Ayrıca kapak durumlu kavitasyon şartları ile kıyaslamıştır. Sonuç olarak ISPH yönteminin düzenli dalga lineer teori durumları için tatmin edici sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir.

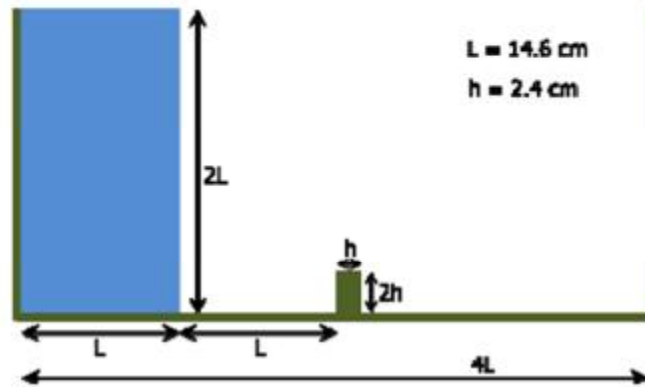
Munoz (2010) çalışmasında 2004 yılında meydana gelen Sumatra tsunami felaketinin yıkıcı etkilerini ele almıştır. Tsunami etkisinin görüldüğü bölgelerin Grafik İşlemci Ünite-SPHysics (General Processing Units (GPU)) adı verilen serbest yüzey hidrodinamik modelleme kodu kullanarak, taşkın yayılım modellerini oluşturmuştur. Deney setleri sonucu elde ettiği verileri GPU-SPHysics

ile karşılaştırmıştır. Ayrıca söz konusu yöntemin risk analizi çalışmalarında rahatlıkla kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Vacondio (2010) yaptığı çalışmada, hızlı değişken açık kanal akımlarının Lagrange nümerik yöntemlerle modellemesini incelemiştir. Çalışmanın ilk bölümünde SPH yöntemini ele alarak sıg su denklemleri üzerinde uygulamıştır. Ayrıca yöntemi farklı bir ve iki boyutlu baraj yıkılması problemleri ile test etmiş ve tatmin edici sonuçlar elde ettiğini ifade etmiştir.

Burger ve Rauch (2011) çalışmalarında, akışkan davranışını kestirebilmek için SPH yönteminin oldukça başarılı bir metot olduğunu belirtmişlerdir. Fakat boru hidrodinamiği konularında herhangi bir uygulamanın olmadığı düşüncesi ile SPH uygulamalarını bu yöne kaydırma ihtiyacı hissetmişlerdir. Türbülans ve hesaplama yüklerindeki artışların ana problemleri oluşturduğunu açıklamışlardır. Sonuç olarak da SPH yönteminin geliştirilmesi sureti ile yakınsama düzeyi yüksek verilerin elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır.

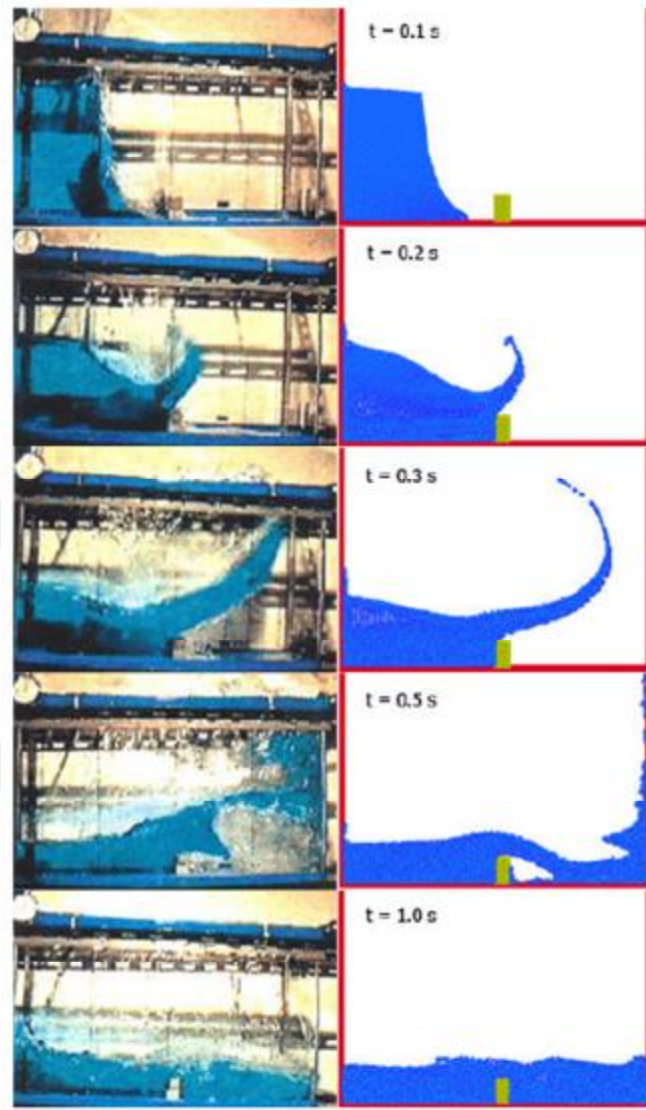
Amanifard ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada, serbest yüzey akışlarında akışkan-hipoelastik etkileşim problemlerinin analizi için yeni bir sayısal yöntem üzerine yoğunlaşmışlardır. Yöntemi üç aşamadan oluşturmuş, ilk iki aşamayı tahmin modeli şeklinde ele alırken son aşamayı Poisson denkleminin çözülmesi olarak düşünmüşlerdir (Şekil 2.29).



Şekil 2.29. Model geometrisi (Amanifard ve ark., 2011)

Engel, hipoeplastik bölme ve yanal bir çubuk bulunan baraj yıkılması düzeneklerinde yöntemlerini test etme imkanı bulmuşlar, elde ettikleri verileri deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır (Şekil 2.30). Böylece nümerik metodun çözüm hassasiyetini değerlendirmişlerdir.

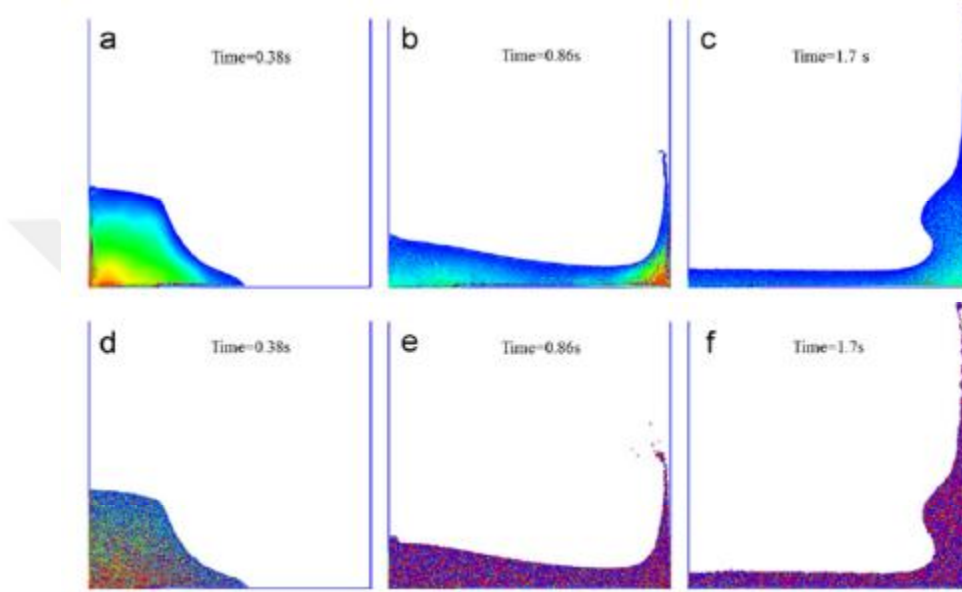
Gomez-Gesteira ve ark. (2012) çalışmalarında, serbest yüzeyli akışkan problemlerinde kullanılmak üzere çözüm yöntemlerinden birisi olan SPHysics üzerine yoğunlaşmışlardır. SPH teorisine dayanan temel denklemlerin tanımlarını yapmışlar, parçacıkların aralarındaki etkileşimleri Riemann çözüm yöntemi şeklinde ele alıp, opsiyonel Langrange- Euler tasarımı, yoğunluk gibi konularda klasik SPH formülasyonlarını içeren kodları genişletmişlerdir. Söz konusu akışkan-yapı etkileşimini çözümleyebilmek için yüzen nesneleri ele aldıkları örneklerde sınır koşullarının ikinci derece zaman adımlarını ortaya koymuşlardır. Bir sonraki kısımda çeşitli deneme yöntemleri ile kodların yeterliliği üzerinde sonuçları karşılaştırmışlardır.



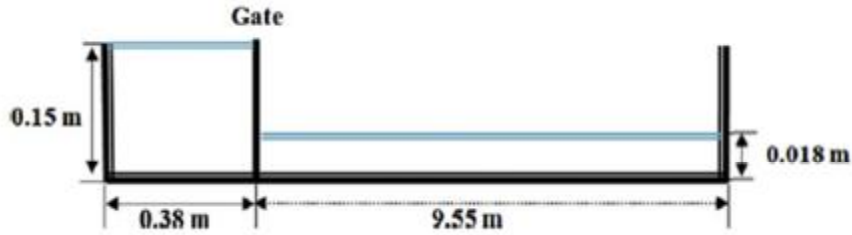
Şekil 2.30. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması
(Amanifard ve ark., 2011)

Çalışma sonucunda farklı SPH formülasyonlarının sadece tanımlamalarda değil aynı zamanda farklı problemlere zaman adımlı algoritmalar ve sınır koşulları oluşturarak uygulanabileceğine dikkat çekmişlerdir. Toprak kayması kaynaklı dalgalar, ıslak yatak üzeri baraj yıkılması yayılımı, dalga-yapı etkileşimi ile ilgili

örnek deneysel çalışmalar yapmışlardır (Şekil 2.31 ve 2.32). Ayrıca DualSPHysics programını kullanarak GPU destekli yeni simülasyon imkanları üzerine araştırma yapmışlardır.



Şekil 2.31. Farklı viskozite durumlarında baraj yıkılması akımının zamanla gelişimi (Gomez-Gesteira ve ark., 2012)



Şekil 2.32. Islak yatakta baraj yıkılması deney düzeneği (Gomez-Gesteira ve ark., 2012)

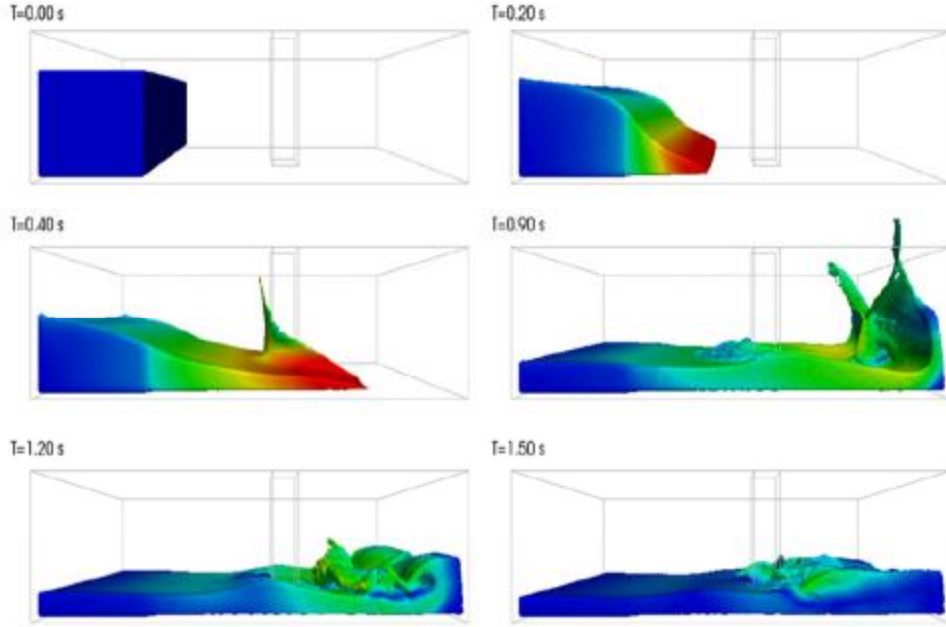
Bu durumu ise rezervuar içine kayan nesne ve bir deniz fenerine dalga çarpması gibi konular üzerinde denemişlerdir. Farklı değerler kullanarak SPHysics yönteminde karşılaştırma yapmışlardır. Çizelge 2.1’de çalışmada ele alınan ıslak

yatakta baraj yıkılması parametreleri görülmektedir. Sonuç olarak çeşitli görsel örneklerin GPU-SPH yönteminde uygulanabilirliğini test etmişler, birbiriyle uyumlu sonuçlar olduğunu gözlemlemişlerdir.

Çizelge 2.1. Islak yatakta baraj yıkılması parametreleri (Gomez-Gesteira ve ark., 2012)

Proses	Parametreler
Versiyon	Serial SPHysics
Boyut	2D
Alanın Büyüklüğü	9.55x0.38 (m ²)
Kernel Çeşidi	Cubic Spline
Zaman Adımı	Verlet
Density Filter	Yok
Kernel Doğrulaması	Yok
Viskozite Davranışı	Yapay Viskozite ($\alpha=0.08$)
Hal Denklemi	Zayıf Sıkıştırılabilir
Sınır Koşulları	Dinamik
İnterpolasyon Uzunluğu	0.006
Akışkan Parçacığı Sayısı	9844
Sınır Parçacık Sayısı	3879

Dominguez ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, akışkanlar dinamiğinin yüksek performanslı çözümünde ızgara tabanlı yöntemler üzerine yoğunlaşmışlardır. Bununla birlikte yeni ağırsız bir parçacık yöntemi olan SPH gibi az çalışılmış paralel uygulamaları ele almışlardır. Lagrange SPH metodu odaklı GPU ve Merkezi İşlemci Ünite-Central Processing Units (CPU)'nun optimizasyonlarını sunmuşlardır. DualSPHysics kodlarını kullanarak CPU ve GPU için en etkili uygulamalar arasında karşılaştırma yaparak, elde ettikleri performans sonuçlarını göstermişlerdir (Şekil 2.33 ve Çizelge 2.2).

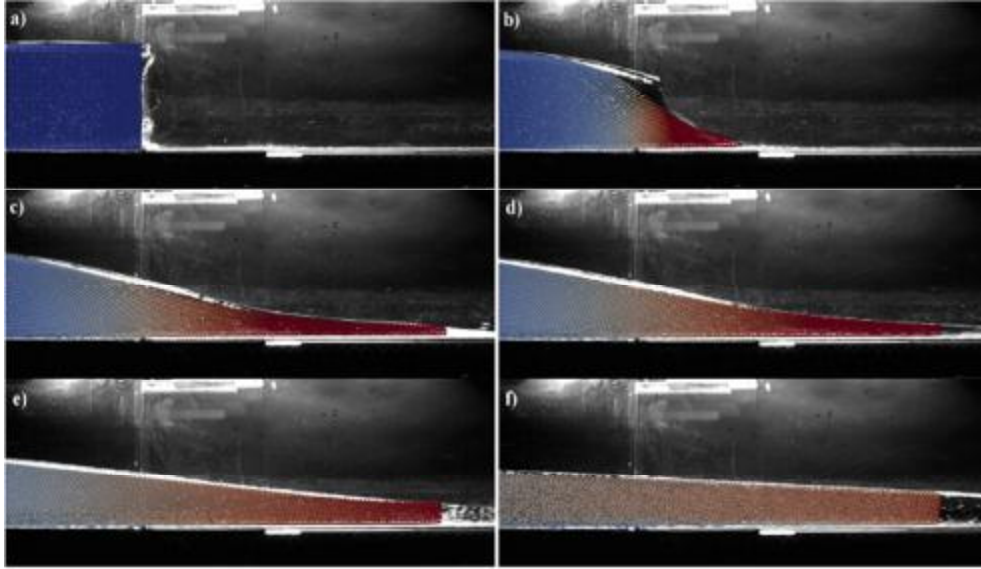


Şekil 2.33. DualSPHysics ile baraj yıkılması akımının zamanla değişimi
(Dominguez ve ark., 2012)

Canelas ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, baraj yıkılması probleminin matematiksel olarak bir Riemann problemi olduğunu belirtmişlerdir. Bu problemi ideal akışkan yaklaşımı ile çözümleyebilmek için modellemelerden faydalanılması gerektiğini açıklamışlardır. Dolayısı ile GPU-Nvidia destekli C⁺⁺, Hibrid Compute Unified Device Architecture (CUDA) üzerinde SPH yöntemini uygulayarak baraj yıkılması problemini simüle etmişlerdir. Elde ettikleri verileri literatürdeki deneysel sonuçlarla mukayese etmişlerdir (Şekil 2.34). Sonuç olarak birçok parametre bakımından ele aldıkları modelin akışkanın davranışını tanımlamada başarılı olduğunu ifade etmişlerdir.

Çizelge 2.2. SPH formülasyonları ve parametreler (Dominguez ve ark., 2012)

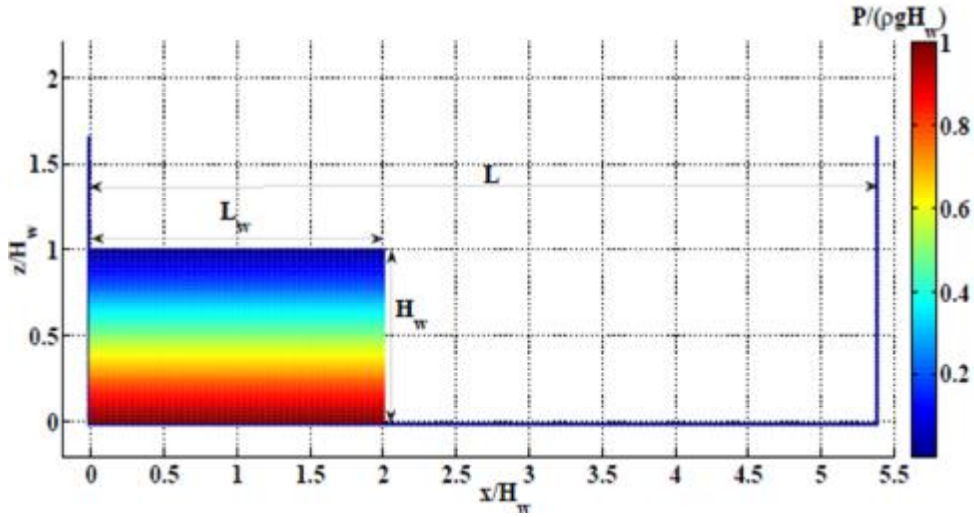
Proses	Parametreler
Zaman Adımı Tablosu	Verlet
Zaman Adımı	Değişken
Kernel Fonksiyonu	Cubic Spline
Viskozite Davranışı	Yapay Viskozite ($\alpha=0.25$)
Hal Denklemi	Tait Equation
Sınır Koşulu	Dinamik



Şekil 2.34. Belirli zamanlardaki akışkanın yayılımı durumunun deneysel ve sayısal kıyaslanması (Canelas ve ark., 2012)

Özbulut (2013) çalışmasında SPH yöntemi ile serbest su yüzeyli, şiddetli akım problemlerini iki boyutlu olarak incelemiştir. Bu problemleri baraj yıkılması, kısmi olarak sıvı ile doldurulmuş dikdörtgen kesitli bir tankın yatay yönde çalkantı hareketi (sway-sloshing) ve serbest su yüzeyine yakın bir cisim etrafında oluşan

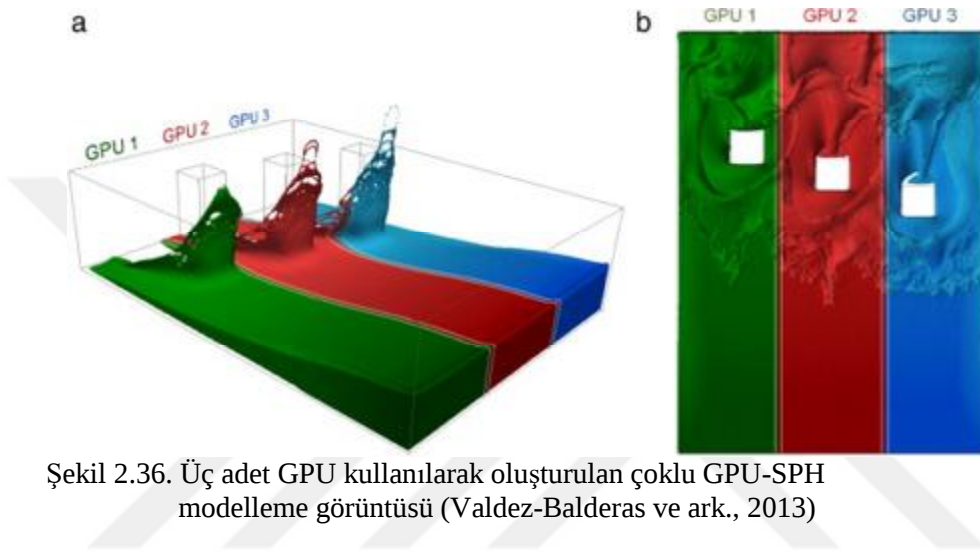
akımın incelenmesi problemleri şeklinde ele almıştır. Tüm problemlerin çözümlerinde hareketi temsil eden denklemler Euler ve süreklilik denklemleridir. Bu denklemlere sistemin sayısal stabilitesini arttırmak amacıyla yapay viskozite terimini de eklemiştir. Çalışmada ele aldığı baraj yıkılması problemini Euler hareket denklemlerinin Zayıf Sıkıştırılabilir SPH (WCSPH) yaklaşımı ile ifade ederek çözümlmeye çalışmıştır. Sonuç olarak baraj yıkılması problemi üzerinde yaptığı sistematik karşılaştırmalarda serbest su yüzeyindeki parçacık saçılmalarını önlemek için geliştirdiği birleşik serbest su yüzeyi ve suni parçacık öteleme düzeltme teriminin literatürde verilen deneysel verilerle en uyumlu sonuçları verdiğini gözlemlemiştir (Şekil 2.35).



Şekil 2.35. Baraj yıkılması problemi başlangıç koşulları ve geometrisi (Özbulut,2013)

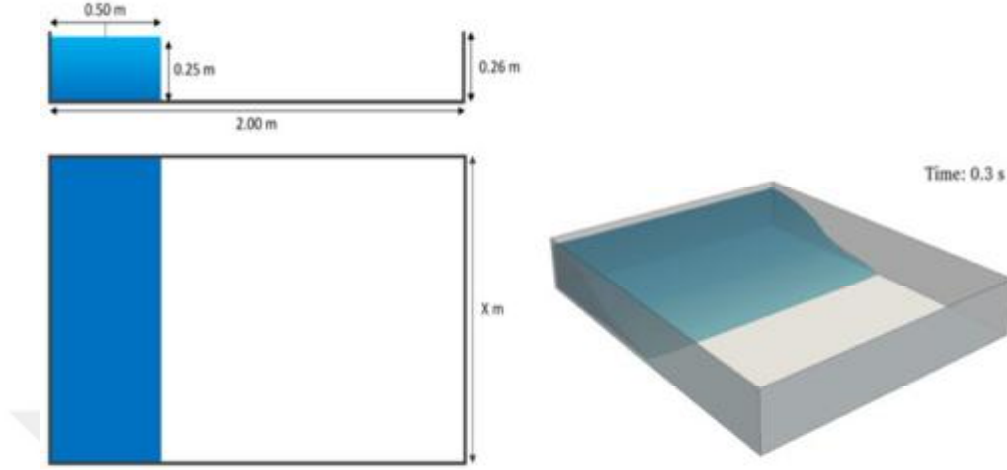
Valdez-Balderas ve ark. (2013) ele aldıkları çalışmalarında SPH kodlarını içeren DualSPHysics'in tek grafik işleme ünitesi olan GPU versiyonunu çoklu GPU-SPH programı şeklinde ele alarak serbest yüzeyli akımlar için geliştirmişlerdir. Mekansal ayrışım mantığına dayanan yaklaşımı, çalışma içerisinde fiziksel sistemin farklı parçalarında değişik GPU yapıları kullanarak Şekil 2.36'da görüldüğü üzere atamışlardır. Çalışma sonucunda çoklu GPU-SPH

programının tekli GPU-SPH programına göre daha başarılı sonuçlar verdiği, fakat parçacık sayısı arttıkça çözümün zorlaştığını belirtmişlerdir. Oluşturdukları yazılımların çeşitli mühendislik problemlerine rahatlıkla uygulanabileceğini ifade etmişlerdir.

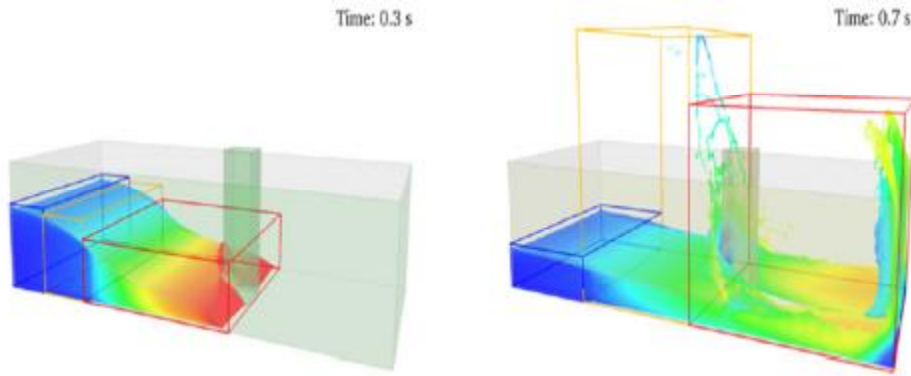


Şekil 2.36. Üç adet GPU kullanılarak oluşturulan çoklu GPU-SPH modelleme görüntüsü (Valdez-Balderas ve ark., 2013)

Dominguez ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada Lagrange metoduna dayalı GPU ve CPU'nun her ikisi için de optimizasyon yöntemlerini sunmuşlardır. Çalışma sonucunda DualSPHysics kodlarını kullanarak en etkili uygulamalar arasında karşılaştırma yapmışlar ve elde edilen performansları incelemişlerdir. İlerleyen dönemlerde CUDA bileşimli çok çekirdekli GPU kümeleri üzerine kurulu kod uygulamalarını geliştirerek başarılı çalışmalar yapılabileceğini öngörmüşlerdir. Ayrıca GPU ve CPU birimlerinin farklı kümelerini kullanarak tek parça halinde paralel SPH uygulamasını geliştirmişlerdir. Baraj yıkılması akımı için de deney düzeneği oluşturarak test etmişlerdir (Şekil 2.37 ve 2.38).



Şekil 2.37. Baraj yıkılması akımının deney düzeneği (Dominguez ve ark., 2013)

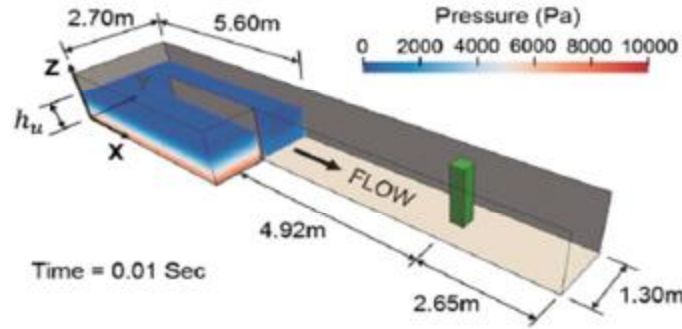


Şekil 2.38. Parçacık sayılarına göre akışkanın yayılımı ve kuvvet hesap-uygulama zaman adımları (Dominguez ve ark., 2013)

Barreiro ve ark. (2013) ele aldıkları çalışmalarında dalga kırılması, akışkan-yapı etkileşimi, lineer olmayan akışkan davranışları gibi HAD problemlerinin çözümü için DualSPHysics programını kullanmışlardır. Parçacık boyutu, interpolasyon uzunluğu, parçacık sayısı, yapay viskozite, speed of sound (ses hızı), CFL (Courant Friedrichs-Lewy yani Courant koşulu katsayısı) gibi değişkenlerin etkilerini incelemişlerdir. Programın gerçek akışkanlar dinamiği problemlerini simüle etmede ciddi kolaylıklar sağladığını ifade etmişlerdir.

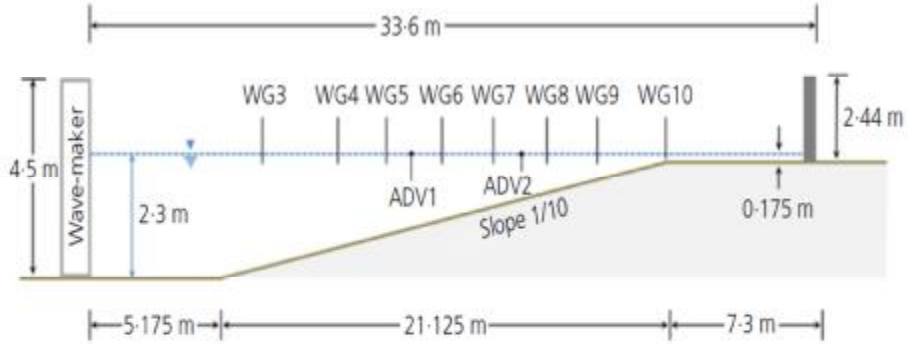
Çalışma sonucunda deney ve nümerik analiz sonuçlarını karşılaştırmışlar, sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

St. Germain ve ark. (2014) çalışmalarında, tsunami dev dalgalarının yapılara etkilerini SPH yöntemi ile incelemişlerdir. Dev dalgaların oluşturduğu birçok fiziksel etkiyi ölçerek yapıların tasarımında ele alınacak parametreleri oluşturmaya çalışmışlardır. WCSPH modelini kullanarak tsunami etkisi ile oluşan hidrodinamik kuvvetleri araştırmışlardır. Deneylerini tsunami dev dalgaları ve baraj yıkılması benzetimlerini temel alarak yapmışlar ve sonuç olarak da deney verileri ile modelleme sonuçlarının uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.39).



Şekil 2.39. Deney düzeneği başlangıç koşulları (St. Germain ve ark., 2014)

Cunningham ve ark. (2014) ele aldıkları çalışmalarında tsunami dalga-yapı etkileşimi konusunu SPH yöntemi ile incelemişler, yapısal etkiyi değerlendirebilmek için sonlu eleman metodu ile oluşturulan dalga basınç yayılımının zaman adımlarını üretmişlerdir. İki adet örnek çalışma üzerine yoğunlaşmışlardır. Bunlardan birisi de düşey bir duvara çarpan tsunami dalgası çalışmasıdır (Şekil 2.40).

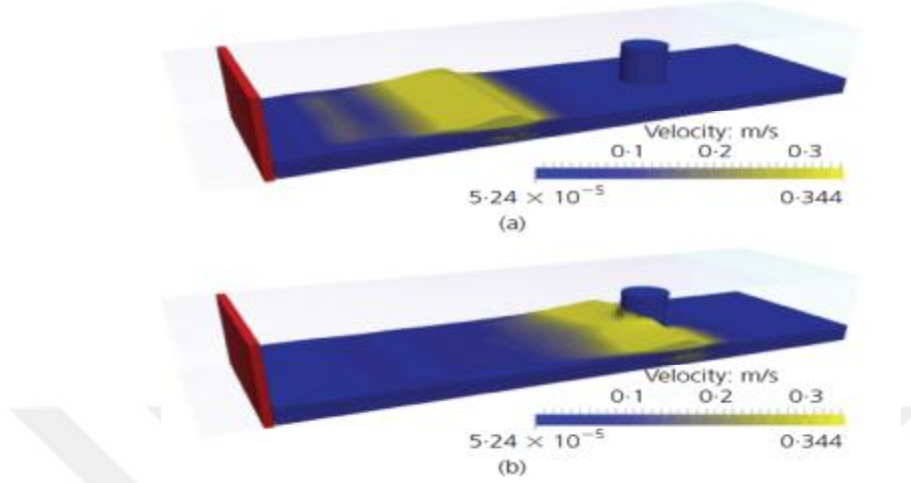


Şekil 2.40. Düşey bir duvarda tsunami dalga yayılımı örnek çalışması (Cunningham ve ark., 2014)

SPH simülasyonunda CFL sayısını 0.20, ses hızı katsayısını 10.0, step algoritmasını Symplectic, Kernel fonksiyonunu Wendland, yapay viskozite değerini 0.10, Shepard filter değerini 30.0 almışlardır (Çizelge 2.3). Diğer çalışma silindirik yapıya çarpan tsunami dalga simülasyonudur (Şekil 2.41). Çalışma sonucunda fiziksel model sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Çizelge 2.3. SPH formülasyonları ve parametreler (Cunningham ve ark., 2014)

Proses	Parametreler
Zaman Adımı Tablosu	Verlet
Zaman Adımı	Courant Koşulu ve Viskoz Etkiler
Kernel Fonksiyonu	Wendland
Viskozite Davranışı	Yapay Viskozite ($\alpha=0.10$)
Hal Denklemi	Tait Equation
Sınır Koşulu	Dinamik



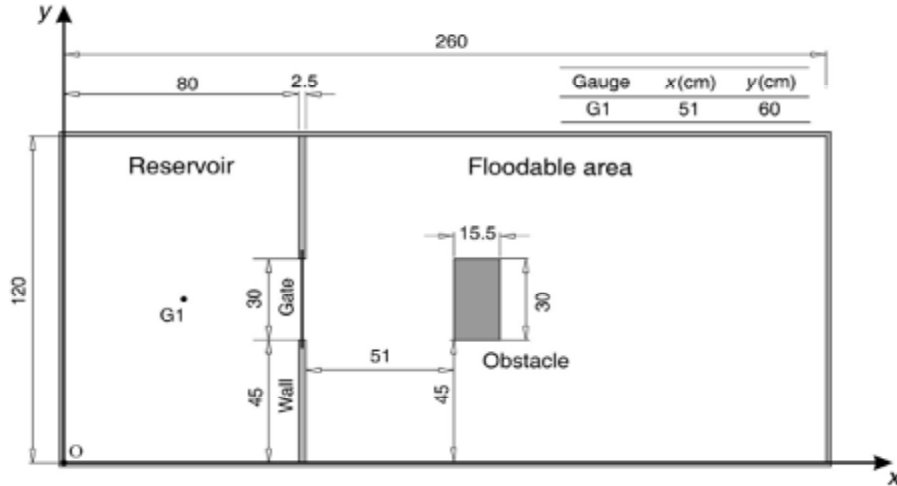
Şekil 2.41. DualSPHysics programı ile dalga yayılması ve silindire etkisinin modellenmesi (Cunningham ve ark., 2014)

Altomare ve ark. (2014) çalışmalarında, dalgaların bir mendirek yapısına çarpması neticesinde oluşan akışkan-yapı etkileşimini SPH yöntemi ile çözmeyi denemişlerdir. Parçacık yöntemi kullanmışlar, akışkanın yeterli sayıda parçacık ile oluşturulması, çok fazla partikül ile çalışılması gerektiği kanaatine varmışlardır. Açık kaynak kodlu GPU tabanlı DualSPHysics programını ele alarak milyonlarca sayıdaki parçacık ile işlem yapmışlardır. Ampirik çözüm ile deneysel verileri karşılaştırmışlardır. Sonuçta SPH yönteminin kıyı mühendisliğindeki pratik uygulamalar için uygun bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir.

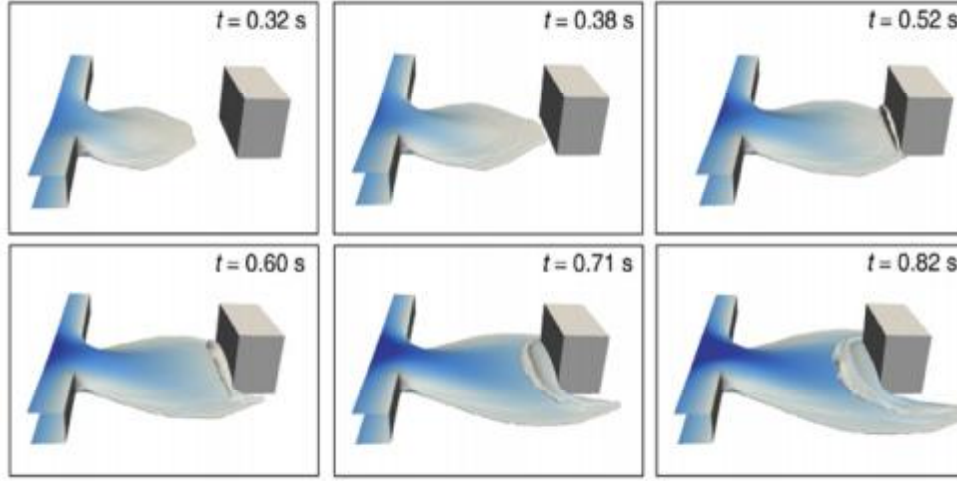
Altomare ve ark. (2015) ele aldıkları çalışmalarında kıyı yapıları ve dalgaların etkileşimlerini incelemişlerdir. DualSPHysics programını sayısal olarak ele alarak modellemedeki etkisini araştırmışlardır. Dalga etkileri üzerine yoğunlaşarak deney verileri ile karşılaştırmışlardır. Modellemede düzenli ve gelişigüzel dalga yapılarını kullanmışlardır. Sonuçta söz konusu modelin klasik çoğu yaklaşıma alternatif teşkil ettiğini ve tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. SPH tabanlı DualSPHysics programının kıyı

yapıları uygulamalarında kullanılabilirliği yönünde olumlu bir kanaate varmışlardır.

Aureli ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada baraj veya taşkın önleme yapılarının çökmesi sebebi ile oluşan taşkın olaylarının mansap kısmındaki yerleşim birimlerine vereceği zararları değerlendirmişlerdir. Bu bağlamda yapılara gelen hidrodinamik yüklerin iyi bir şekilde tahmin edilmesinin taşkın zararlarını değerlendirmede ve potansiyel etkilerin ele alınmasında çok büyük bir önemi olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında iki boyutlu ortalama derinlik modelini, üç boyutlu Euler iki fazlı modelini ve üç boyutlu SPH modelini bir engel üzerindeki baraj yıkılması taşkın dalgasının oluşturduğu etki kuvvetini tahmin edebilmek amacı ile kullanmışlardır. Bu amaçla bir deney düzeneği oluşturmuşlar, etki olayının dinamik durumlarını analiz etmişler ve yük zaman geçmişi ölçüm sonuçlarını irdelemişlerdir (Şekil 2.42 ve 2.43). Çalışma sonucunda SPH modelinin uzun dönemde dinamik yük etkisini tahmin etmede güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Diğer modelleme yöntemlerinin de SPH metoduna yakın sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.42. Deney düzeneği planı (Aureli ve ark., 2015)



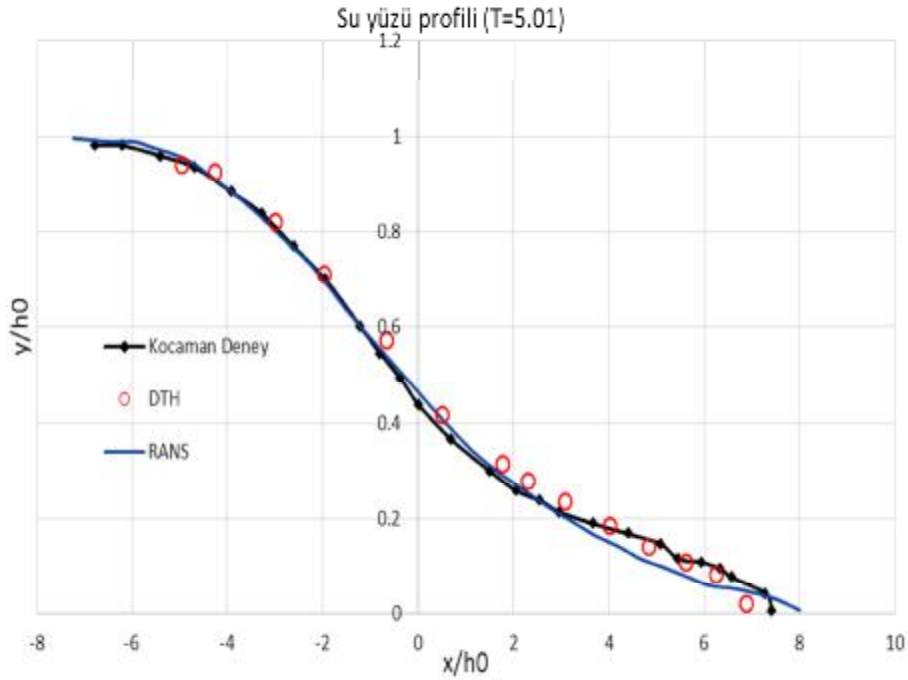
Şekil 2.43. Üç boyutlu SPH modeli ile baraj yıkılması akım görüntüleri (Aureli ve ark., 2015)

Dinçer ve Bozkuş (2015) yaptıkları çalışmada, baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının yayılımını nümerik olarak ele almışlardır. Durgun haldeki su kütesinin ani kapak kaldırılması varsayımı ile oluşturduğu dalganın yayılımını Lagrange yaklaşımını kullanan SPH yöntemi ile simüle etmişlerdir. Literatürdeki deneysel sonuçları kullanarak RANS tabanlı paket programından elde ettikleri verileri SPH verileri ile mukayese etmişlerdir. Sonuçların birbirleri ile iyi bir uyum yakaladığını ifade etmişlerdir (Şekil 2.44).

Jonsson ve ark. (2015) ele aldıkları çalışmalarında dolusavak akım ve enerji dağılımı problemlerini modelleyebilmenin serbest yüzeyli akışkanların dinamik davranışlarını belirleyebilmek açısından çok önemli olduğunu açıklamışlardır. Bu amaçla SPH yöntemi gibi Lagrange yaklaşımına dayanan model üzerine yoğunlaşmışlardır. Islak yatakta baraj yıkılması örneğini karşılaştırma ve doğrulama yapmak için kullanmışlardır. Çalışma sonucunda sayısal analizlerde dalga önü ilerlemesinin deney verilerine göre daha hızlı olduğu kanaatine varmışlardır. Ayrıca yapay viskozite ile parçacıklar arası mesafenin

akışkan davranışında önemli bir etkisinin olduğunu ve bu konunun daha fazla incelenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

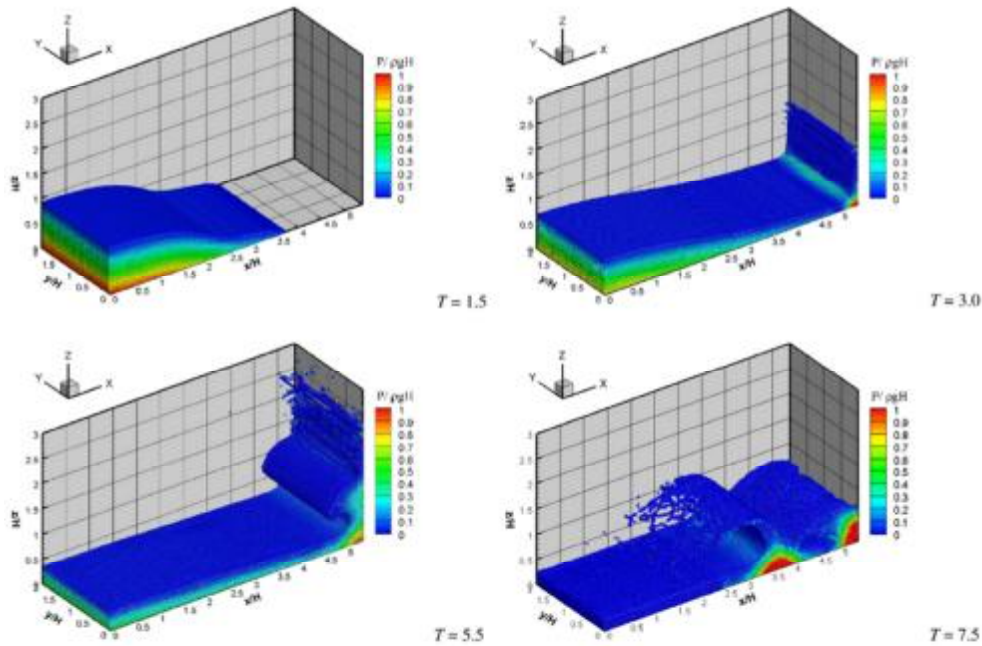
Heller ve ark. (2016) çalışmalarında deneysel ve sayısal modelleme yaklaşımının birlikte ele alındığı toprak kayması ve tsunami hareketini ele almışlardır. Afet durumlarını değerlendirdiklerinde genel geçer denklemlerin genellikle iki boyutlu bir dalga geometrisi şeklinde veya üç boyutlu bir dalga havzası şeklinde idealize edilmesinin eksiklik olduğu kanaatini belirtmişlerdir. Bu amaçla iki farklı dalga senaryosunda deney yapmışlar, her iki senaryoda da SPH temeline dayanan DualSPHysics programını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda toprak kayması-tsunami gibi doğal afet problemlerinde DualSPHysics programının rahatlıkla kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.44. Düzleştirilmiş Tanecik Hidrodinamiği'nin (DTH-SPH) deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırılması (Dinçer ve Bozkuş, 2015)

Canelas ve ark. (2016) ele aldıkları çalışmalarında ağ yapısı olmayan bir çerçevede akışkan-katı faz simülasyonlarının elde edilmesinde rijit katıların ve akışkanların bütünleştirilerek ayrıklaştırılması durumlarını ortaya koymuşlardır. Birbirleri ile etkileşimlerini SPH ve Ayrık Eleman (DCDEM) yöntemleri ile modellemişlerdir. Literatürdeki deneysel çalışmalarla mukayese etme imkanı bulmuş ve baraj yıkılması sonucu oluşan akım probleminin geniş ölçekli katı-akışkan davranışlarını modellemişlerdir. Böylece birbirleri ile tutarlılıklarını ele almışlardır. PIV tekniği ile akışkan bölgesini sayısallaştırarak elde ettikleri veriler ile diğer model sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonuçta oluşturdukları model yapısının iyi bir yaklaşıklıkla çözüm sağladığını ifade etmişlerdir.

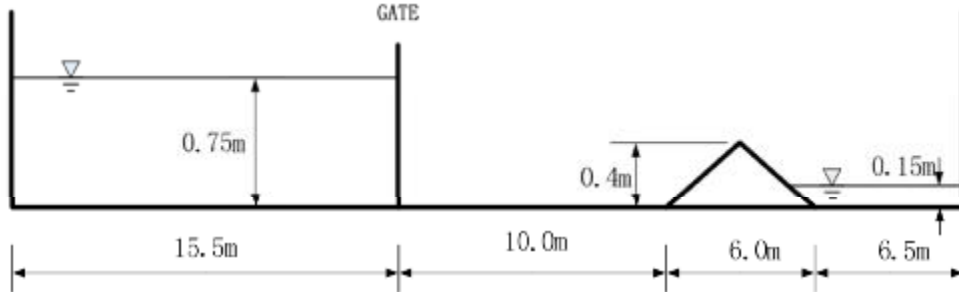
Xu (2016) çalışmasında baraj yıkılması sonucu oluşan dalga yayılımını üç boyutlu olarak SPH yöntemi ile ele almıştır. Üç farklı örnek üzerinde yöntemi sayısal olarak test etmiştir (Şekil 2.45).



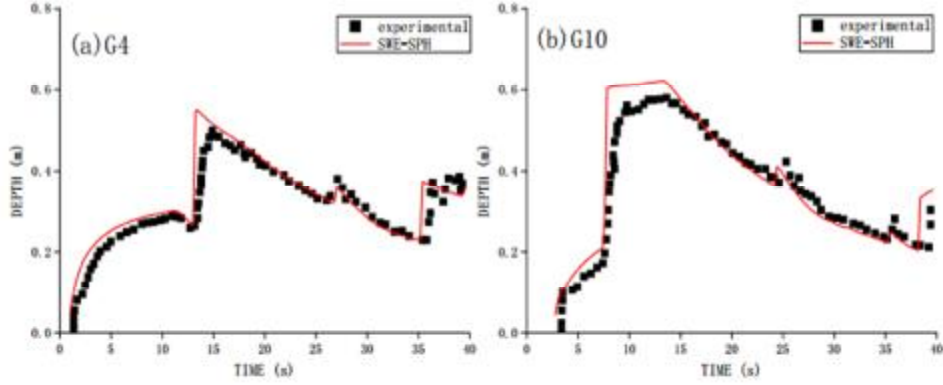
Şekil 2.45. Baraj yıkılması akım simülasyon görüntüleri (Xu, 2016)

Literatürdeki mevcut deneysel verilerle elde ettiği sonuçları karşılaştırarak nümerik yöntemin akışkan davranışını tanımlamadaki yakınsama düzeyini incelemiştir. Geliştirdiği SPH metodunun serbest yüzeyli akışkanların davranışını modellemede birçok parametre bakımından olumlu sonuçlar ortaya koyduğunu açıklamıştır.

Gu ve ark. (2017) yaptıkları çalışmalarında baraj yıkılması akım problemi uygulamalarında Sığ Su (Shallow Water-SWE) denklemlerini çözmek için SPH yaklaşımı üzerinde durmuşlardır. Katı sınır davranışını çözebilmek amacı ile sanal sınır parçacık metodunu benimsemişlerdir. Modellerini uygulayabilmek için de Çin'deki Qinghai yakınlarında bulunan South-Gate Gorges Rezervuarında oluşabilecek bir prototip baraj yıkılması senaryosunu ele almışlardır (Şekil 2.46). Çalışma sonucunda SWE-SPH modelinin pratik baraj yıkılması akım çalışmalarında uygulanmasının uygun olabileceği yönünde çıkarım yapmışlardır (Şekil 2.47).



Şekil 2.46. Baraj yıkılması akımı deney düzeneği şematiği (Gu ve ark., 2017)



Şekil 2.47. Baraj yıkılması akımının farklı noktalardaki derinlik değişiminin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması (Gu ve ark., 2017)

2.3. Farklı Yoğunluklu SPH ve Dam-Break Çalışmaları

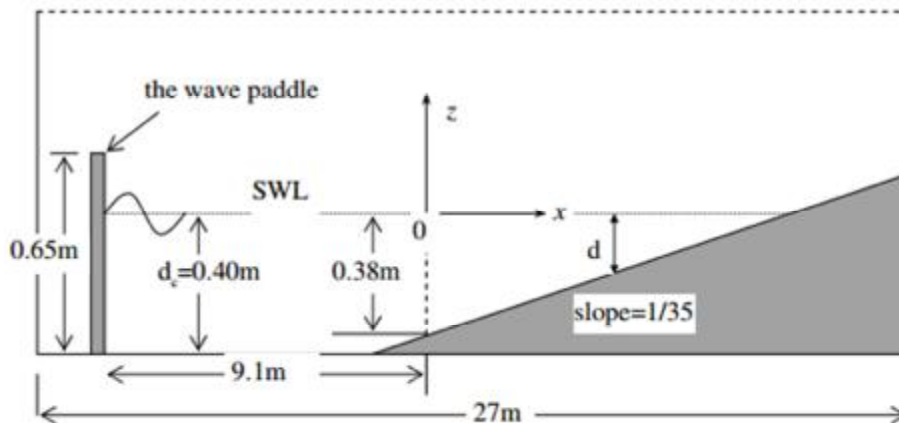
SPH yöntemi ile çok fazlı akımların davranışını modelleme çalışmalarını ilk kez Monaghan ve Kocharyan (1994) ele almışlardır. Çalışma sonucunda çok fazlı akım olarak katı, sıvı ve gaz gibi her türlü akışkanlarda bu yöntemin uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Landrini ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada, SPH yöntemini geliştirerek iki fazlı akışkan problemlerinde uygulamışlardır. Yöntemi sıg su ve gemilerin oluşturduğu dalga kırılması durumlarında incelemek amacı ile kullanmışlardır. Elde ettikleri verileri deneysel gözlemler ile karşılaştırmışlardır. İki fazlı akışkanların arayüz etkileşimleri ile ilgili yeni bir formülasyon ortaya koyarak, örnek çalışmalar ile geliştirdikleri metodun uygunluğunu denetlemişlerdir. Sonuç olarak da yeni SPH yönteminin dalga hareketindeki özellikle hava etkisinin göz önüne alındığı iki fazlı akışkan problemlerinde başarılı olduğu kanaatine varmışlardır.

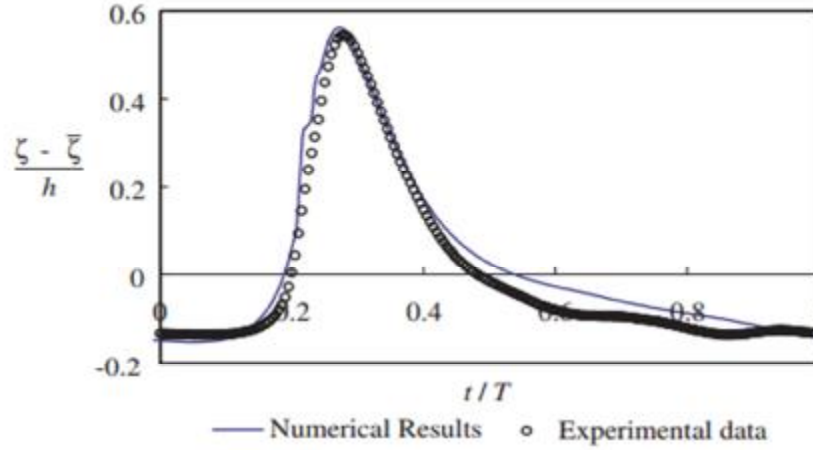
Colagrossi ve Landrini (2003) çalışmalarında iki boyutlu akışkan arayüz davranışını modelleyebilmek amacı ile SPH yöntemini sunmuşlardır. Düşük yoğunluk durumlarında sundukları örneklerin diğer metotlarla iyi bir yaklaşıklık gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir. Daha sonra klasik baraj yıkılması probleminde

iki fazlı akım yaklaşımının yoğunluk oranı etkisini araştırmışlar ve hava fazının davranış üzerindeki rolünü tartışmışlardır.

Hieu ve ark. (2004) çalışmalarında sığ sudaki dalga yayılımını modellemek için sıkışmayan, viskoz bir akışkanın iki fazlı akım şeklinde modellenmesini ele almışlardır. Bu süreçlerin dalganın yayılımı, kırılması, yansıması ve hava ile etkileşimi gibi kısımlardan oluştuğunu açıklamışlardır. Modeli; süreklilik denklemi, Navier-Stokes denklemleri, VOF ve yoğunluk-viskozite denklemlerinden oluşturmuşlardır. Türbülans Eddy viskozitesini Smagorinsky'nin alt ızgaralı ölçek modelini kullanarak elde etmişlerdir. Baraj yıkılması akım problemi ile ilgili sayısal bir analiz yapmışlar, modelin geçerliliği üzerine deneysel verilerle karşılaştırarak doğrulama imkanını yakalamışlardır (Şekil 2.48). Eğimli bir yapıya çarparak kırılan dalgayı modellemişler ve deneysel sonuçlarla mukayese etmişlerdir (Şekil 2.49). Sonuçta oluşturdukları modelin sığ sudaki dalga deformasyonunu kolaylıkla simüle edebildiğini ve dalga kırılma problemlerinde uygulanabileceğini göstermişlerdir.



Şekil 2.48. Modelin şematik görünümü (Hieu ve ark., 2004)



Şekil 2.49. Su seviyesi değişiminin deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması
x=7.275 m (Hieu ve ark., 2004)

Chanson (2004c) çalışmasında baraj yıkılması sonucu oluşan ani taşkınların yayılımını kararsız su-hava akım özellikleri noktasında ele almıştır. Yeni bir teknik geliştirerek akımdaki ani boşluk durumları, kabarcık sayıları ve hızları gibi parametreleri deneysel olarak incelemiştir. Sonuç olarak dalgaın ilk oluşum anında güçlü bir havalandırma durumunun olduğunu belirtmiş, dolayısı ile de ani hız ölçümleri sonucu potansiyel akım üzerinde kararsız türbülanslı bir sınır tabakasının oluştuğunu açıklamıştır.

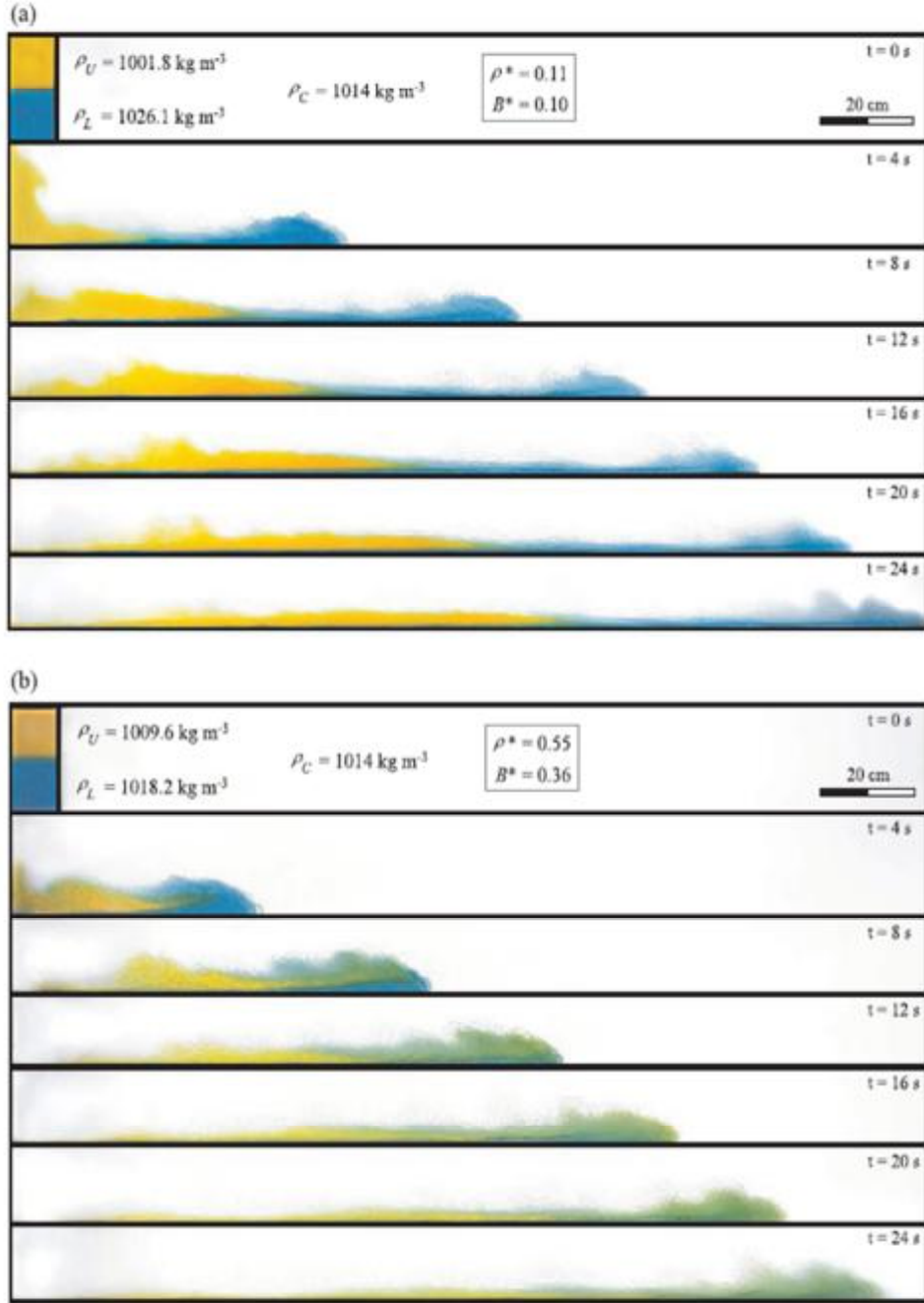
Gladstone ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada tabakalı akışkan davranışlarını deneysel olarak zaman adımları şeklinde ele almışlardır. Her biri dört ayrı deney dizisinden oluşan farklı yoğunluklu akışkanların tabakalaşma durumlarını incelemişlerdir. Yoğunluk değişkenlikleri oranında dalga yayılımını zamana bağlı olarak ölçmüşlerdir. Sonuç olarak tabakalaşmanın doğal akımlarda vazgeçilmez bir durum olduğunu, yoğunluk farklılıklarının akımın gelişiminde ve davranışında önemli bir etkisinin olduğunu açıklamışlardır (Şekil 2.50).

Valizadeh ve ark. (2008) çalışmalarında, ağırsız bir Lagrange yaklaşımı olan yarı-sıkıştırılabilir SPH yöntemini serbest yüzeyli akışkan temel denklemlerinde kullanmışlardır. Serbest yüzeyli akımların modellenmesinde başarılı bir şekilde

uygulanan SPH yönteminin arayüz parçacık kütlelerinde düzeltme yapılarak da yüksek yoğunluk oranlarına sahip çok fazlı akışkanların davranışlarını tanımlamada rahatlıkla kullanılabileceği çıkarımını yapmışlardır. DeneySEL ve nümerik çalışmalar sonucunda serbest yüzeyli çok fazlı akışkanların karakteristiklerini öngörmede SPH yönteminin güvenilir bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

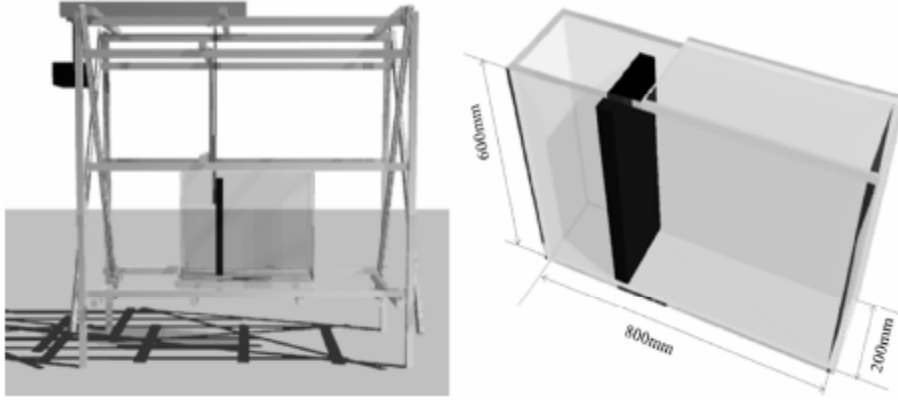
Ancey ve Cochard (2009) çalışmalarında, eğimli bir kanalda Herschel-Bulkley viskoplastik akışkanının baraj yıkılması problemindeki davranışını incelemişlerdir. Analitik çözüm ve nümerik modellemeler sonrası uzun bir kanal yapısında problemi deneySEL olarak ele almışlardır.

Abid ve ark. (2010) çalışmalarında enerji üretimi ve sulama amaçlı kullanılan dünyadaki sayılı barajlardan biri olan Tarbela Barajı'nın rezervuarındaki sediment durumunu üç boyutlu modelleme şeklinde ele almışlardır. Maksimum akım koşullarını göz önüne alarak çok fazlı (su-hava) akışkan yaklaşımı ile modellemeleri oluşturmuşlardır. Basınç, hız, akış oranı ve su seviyesi gibi parametreleri incelemişlerdir. Analitik çözümleri mevcut modelleme sonuçları ile karşılaştırmışlar, aralarında iyi bir uyum olduğunu belirtmişlerdir. Dolusavak çıkışı ve tünel girişlerinde kuvvetli bir vorteks hareketleri gözlemlediklerini ifade etmişlerdir. Farklı eğim değerlerinde sistemi oluşturmuşlar, en düşük eğim durumlarında teorik tahminlerin deney verilerinden çok büyük oranda saptığını göstermişlerdir.

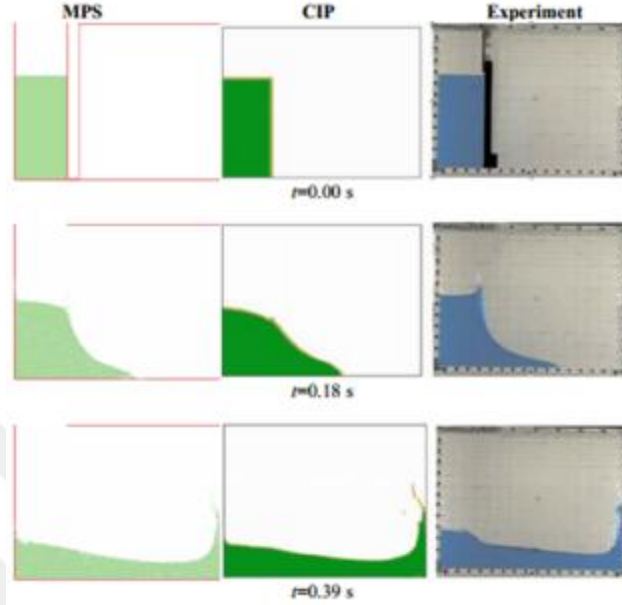


Şekil 2.50. İki farklı yoğunluklu akışkanın yayılımı (Gladstone ve ark., 2004)

Hu ve Sueyoshi (2010) yaptıkları çalışmada şiddetli ve nonlinear dalga-yapı etkileşim problemleri için yeni sayısal yöntemler üzerine yoğunlaşmışlardır. Bunlardan birisi serbest yüzey akışkan hareketinin kartezyen ağ yaklaşımli çok fazlı bir akım olarak ele alındığı Sınırlı İnterpolasyon Profili (CIP) metodu olup, diğeri de parçacık yöntemi olarak adlandırılan ağırsız bir yöntem olan Hareketli Yarı Parçacık Yöntemi (MPS)'dir. Sayısal modellemelerin özellikleri ve formülasyonlarını ele almışlar, ayrıca deney sonucu elde ettikleri sonuçlarla kıyaslamışlardır (Şekil 2.51). Verilerin birbirleri ile büyük ölçüde yakınlık gösterdiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.52).



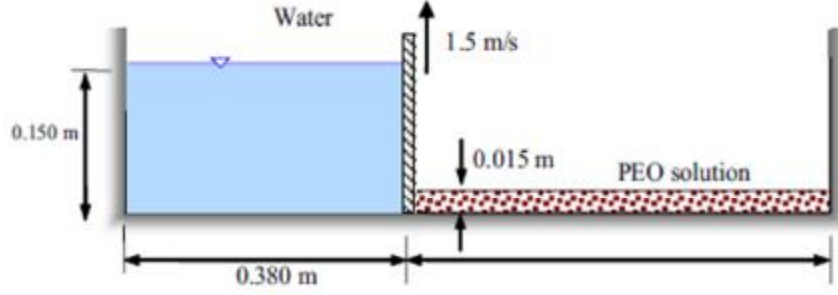
Şekil 2.51. Deney düzeneği (Hu ve Sueyoshi, 2010)



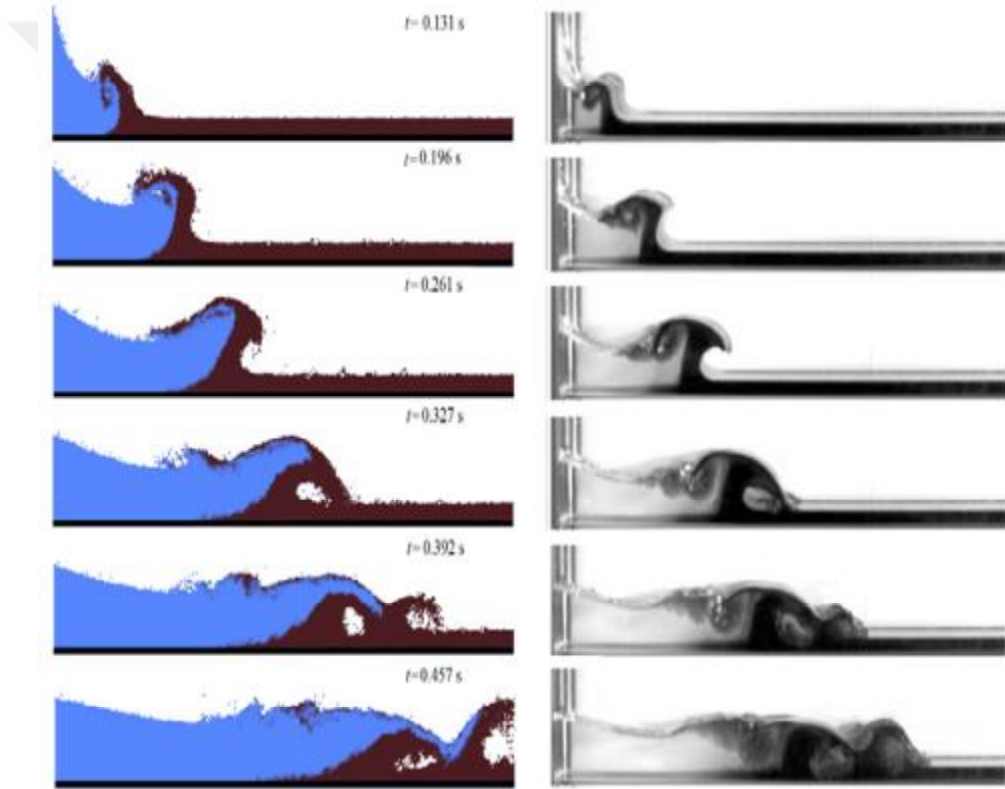
Şekil 2.52. Sayısal veriler ve deney sonuçlarının karşılaştırılması
(Hu ve Sueyoshi, 2010)

Shakibaeini ve Jin (2011) ele aldıkları çalışmalarında, hareketli bir yapıdaki yatak koşullarında baraj yıkılması akım problemini simüle edebilmek için ağsız bir yaklaşım olarak sunulan SPH yönteminden yararlanmışlardır. Yoğunluk ve viskozite parametrelerinin etkin olduğu sediment kısmını Newtoniyen özellikli akışkan olarak değerlendirdikleri sayısal bir model oluşturmuşlardır (Şekil 2.53). Modelleme sonucu elde ettikleri verileri literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırmışlar, modelin HAD çalışmalarında kolaylıkla kullanılabileceği sonucuna varmışlardır (Şekil 2.54).

Li ve ark. (2013) çalışmalarında, tabakalaşma davranışının nükleer işlemlerinde çekirdek kısmının erimesi halinde büyük bir öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. Genellikle serbest yüzey ve çok fazlı akışkanları ampirik yaklaşımlar olmadan hesaplayabilen MPS metodunun akışkanların tabakalaşma durumlarını analiz etmek için uygulanabileceğini ifade etmişlerdir.



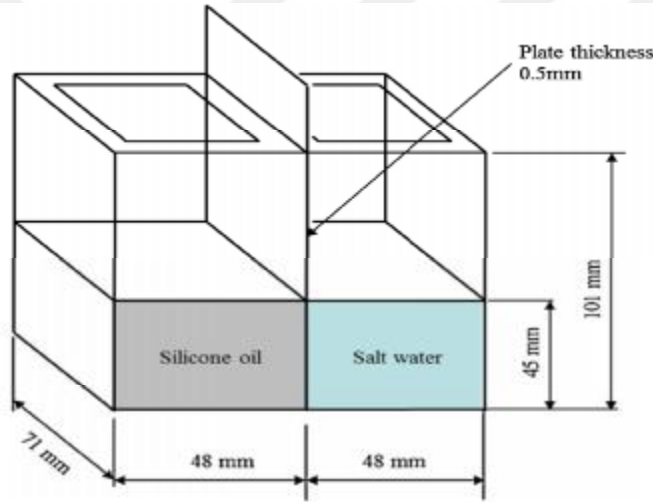
Şekil 2.53. İki fazlı baraj yıkılması problem geometrisi (Shakibaeini ve Jin, 2011)



Şekil 2.54. İki fazlı baraj yıkılması akım gelişiminin sayısal ve deneysel karşılaştırılması (Shakibaeini ve Jin, 2011)

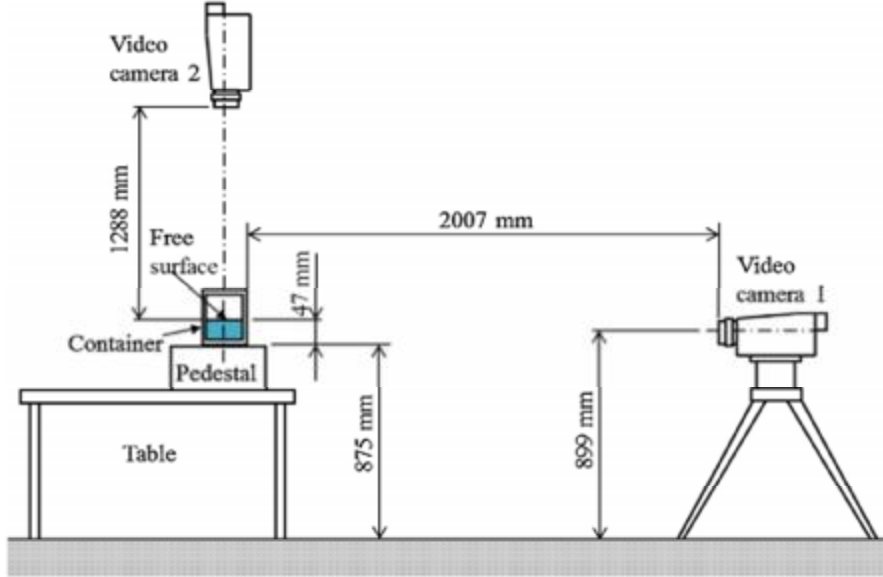
Orijinal MPS yöntemini birbirleri ile karışmayan sıvıların tabakalaşma davranışlarını oluşturabilmesi amacı ile geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu yöntemi

baraj yıkılması problemi ekseninde doğrulamaya çalışmışlardır. Tabakalaşma davranışları üzerine silikon yağı ve tuzlu su kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. Akışkan viskozitesi ve yoğunluk farkının tabakalaşma davranışı üzerindeki etkilerini modelleme yolu ile araştırmışlardır. Sonuç olarak iki akışkan arasındaki viskozite ve yoğunluk farkının akışkan davranışlarını ve birbirleri ile karşılaşma sonrası sabit duruma geçmek için ulaşılması gereken zamanı önemli derecede etkilediğini fark etmişlerdir. Modelleme sonuçlarının deneylerle iyi bir uyum yakaladığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.55 ve 2.56).



Şekil 2.55. İki akışkanın tabakalaşma davranışı için deney düzeneği
(Li ve ark., 2013)

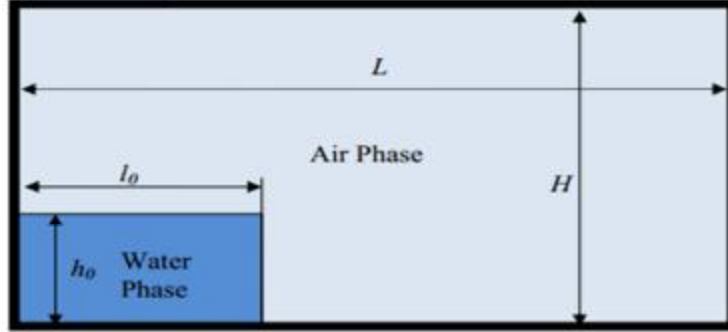
Mokos (2013) yaptığı çalışmada, iki ve üç boyutlu şiddetli hava-su akımını modelleyebilmek için GPU'ları paralel mimariler şeklinde oluşturmuş ve hızlandırılmış SPH modelini kullanmıştır. SPH yönteminin HAD modelleri için ağırsız bir Lagrange tekniği olduğunu ve çok fazlı akışkan problemlerinde arayüz kısımlarının lineer olmayan davranışlarının çözülmesinde çok büyük avantajlar sağladığını ifade etmiştir.



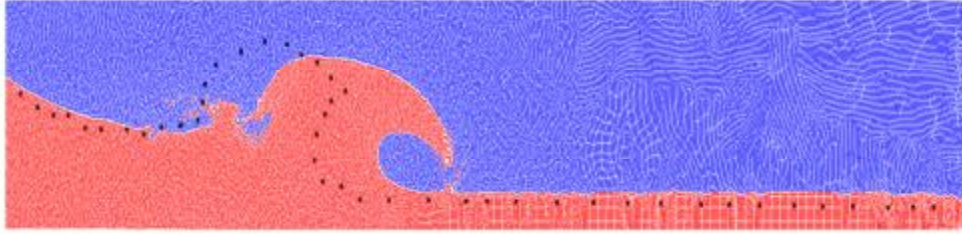
Şekil 2.56. İki akışkanın tabakalaşma davranışı için deney aparatları
(Li ve ark., 2013)

Modelleme konusunda DualSPHysics programından faydalanmış, milyonlarca parçacık kullanarak simülasyonunu zenginleştirmiştir. Hesaplama zamanlarında farklı GPU algoritmaları ile %12'ye varan bir iyileştirme ortaya koymuştur. Ayrıca çok fazlı akışkan problemi için yeni bir değişken algoritma tanımlamış, kuru ve ıslak bir yataktaki baraj yıkılması davranışını modelleyerek doğrulama yoluna gitmiştir (Şekil 2.57). Sonuçta farklı noktalardaki su seviyesi değişimi ve basınç gibi parametreleri deneysel verilerle karşılaştırmış, yüksek çözünürlük etkisi ile yakın bir uyum sağlamıştır (Şekil 2.58 ve 2.59).

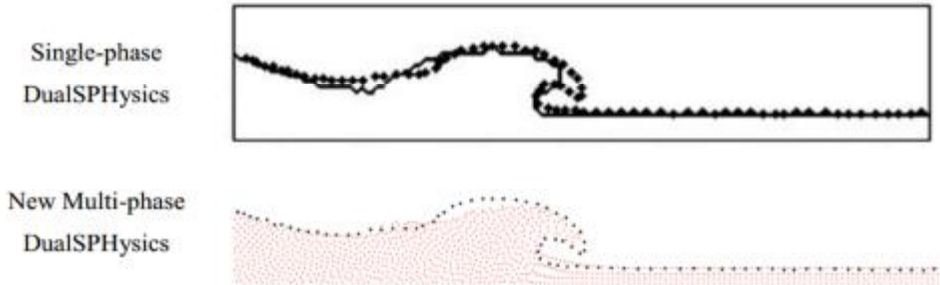
Yılmaz ve ark. (2013) çalışmalarında iki karışmayan akışkanın iki boyutlu olarak etkin akım davranışlarını potansiyel akım teorisi çerçevesinde incelemişlerdir. Başlangıçta farklı derinlik ve yoğunluklarda durgun haldeki akışkanları ince bir plaka ile ayırmışlardır. Plakayı aniden çekerek, ağırlık etkisi ile akışkanlardaki hareketleri gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.57. Kuru yataktaki baraj yıkılması çalışma şematiği (Mokos, 2013)



Şekil 2.58. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki farklılıklar (Mokos, 2013)

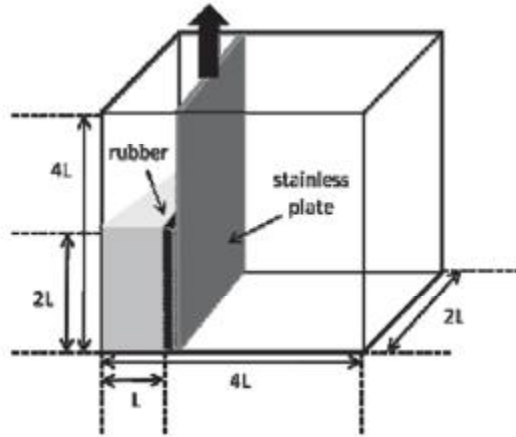


Şekil 2.59. Aynı çözünürlük oranında tek fazlı SPH (Crespo, 2008) ile çok fazlı SPH yönteminin karşılaştırılması (Mokos, 2013)

Lineer yapıdaki problemi Fourier serisi yöntemi ile çözmeye çalışmışlardır. Akışkanların yoğunluklarına bağlı olarak hızlarının değişkenliklerini araştırmışlardır. Sınır eleman yöntemi ile nümerik olarak ele aldıkları çözümü

karşılaştırmışlardır. Akışkan bölgesindeki jet oluşumuna özellikle dikkat çekmişler ve literatürde bulunan verilerle mukayese etmişlerdir.

Kunugi ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada, akışkan yayılımı problem çözümünün çok fazlı akım problemleri için iyi bilinen doğrulama yöntemlerinden biri olduğunu ifade etmişlerdir. Söz konusu problemlerin çözümüne yönelik birçok deneysel verinin mevcut olduğundan bahsetmişlerdir. Doğrulama süreçlerinde hem deney hem de nümerik modellemelerin sınır ve başlangıç koşul farklılıklarının dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında akışkanın yayılımı ile ilgili gaz-sıvı akışkan bölgesinin dalga önü ve merkezini yüksek hızlı kamera ve görüntü işleme teknikleri yardımı ile ölçmüşlerdir (Şekil 2.60). Ölçüm sonuçlarını sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak elde edilen verilerin birbirleri ile uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

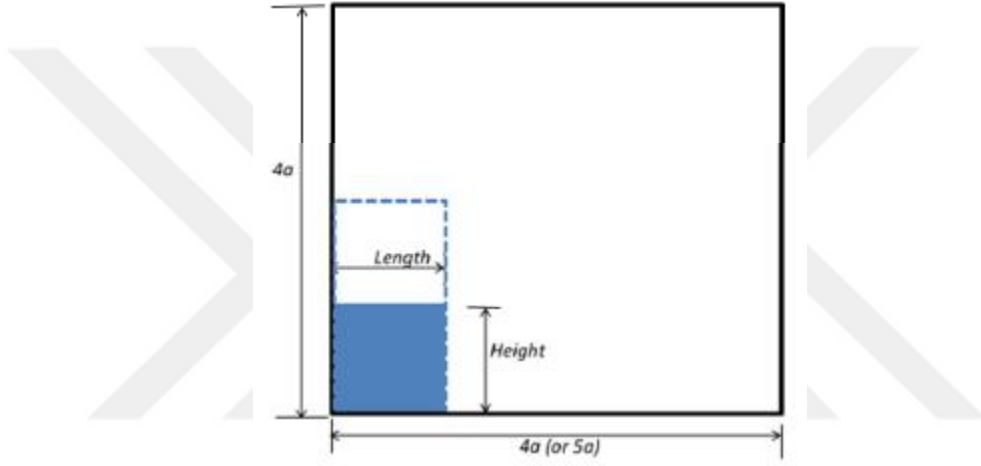


Şekil 2.60. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Kunugi ve ark., 2013)

Shao (2013) çalışmasında Navier-Stokes denklemlerini çözen iki fazlı nümerik modeli gayzer olayını anlayabilmek adına geliştirmiştir. Denklemi çözebilmek için modele VOF yöntemini uygulamıştır. Sayısal modellemelerde birçok doğrulama adımı üzerinde yoğunlaşmış, özellikle iki fazlı dinamik doğrulama kısmında baraj yıkılması örnek çalışmasını ele almıştır (Şekil 2.61).

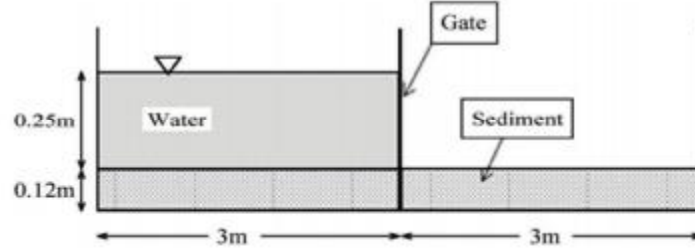
Sayısal sonuçları deneysel veriler ve analitik çözümlerle karşılaştırmıştır. Sonuç olarak modelin tatmin edici bir performans ortaya koyduğunu belirtmiştir.

Razavitoosi ve ark. (2014) çalışmalarında iki boyutlu hareketli bir yataktaki baraj yıkılması taşkın şok dalgasının yayılımını modellemek için SPH yöntemini kullanmışlardır (Şekil 2.62). Navier-Stokes denklemlerini çözebilmek için iki fazlı SPH yöntemini geliştirmişlerdir. Hem akışkanı hem de sedimenti zayıf sıkıştırılabilir akışkan olarak tanımlamışlardır.



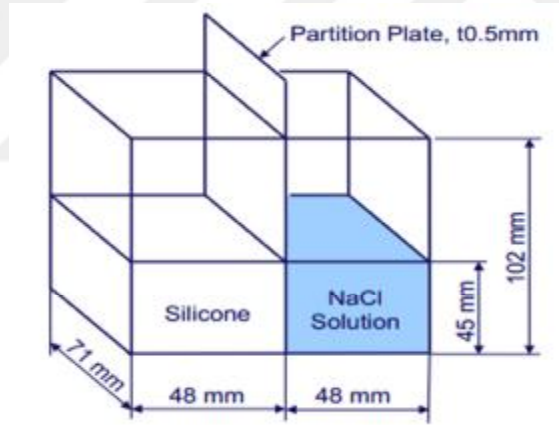
Şekil 2.61. Baraj yıkılması simülasyonu başlangıç koşulu, $a=0.05175$ m (Shao, 2013)

Sediment fazını yapay viskozite ve Bingham modelinin üç alternatif yaklaşımını kullanarak Nevtoniyen olmayan akışkan olarak modellemişlerdir. İki fazlı akışkan için yeni formülasyonlar üreterek, deneysel verilerle kıyaslamışlardır. Böylece modelin doğruluğunu kanıtlamışlardır.



Şekil 2.62. İki fazlı baraj yıkılması problemi geometrisi (Razavitoosi ve ark., 2014)

Furuya ve ark. (2014) çalışmalarında, üç fazlı akışkan içeren (iki akışkan ve bir gaz) baraj yıkılması akım probleminde birbirine karışmayan akışkanların ağırlıkları ile hareket etmeleri sonucundaki tabakalaşma süreçlerini ele almışlardır. İki akışkanı silikon yağı ve tuzlu su olarak seçmişlerdir (Şekil 2.63).



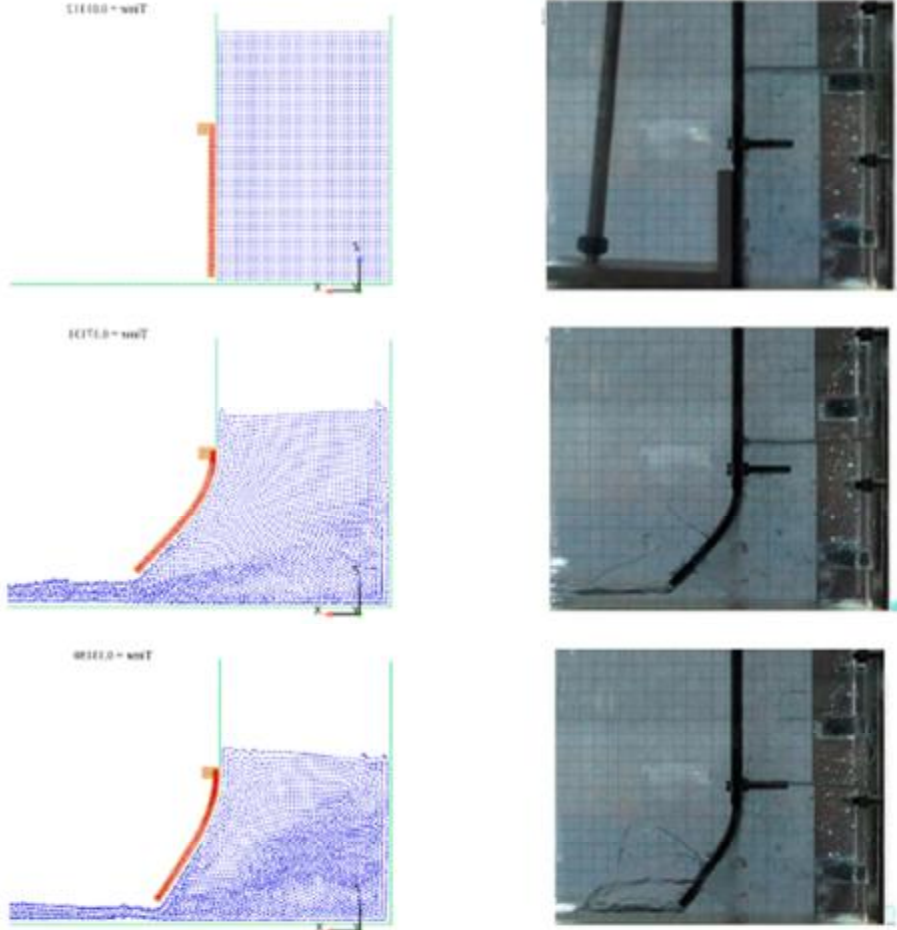
Şekil 2.63. Deney kanalının görünümü (Furuya ve ark., 2014)

Bu akışkanları dikdörtgen bir kanalda düşey bir kapak mekanizması ile ayırmışlardır. Deney düzeneğini 0.96 m eninde, 0.071 m uzunluğunda ve 0.102 m yüksekliğinde dikdörtgen bir yapıdan teşkil etmişlerdir. Akışkanların hareketini, senkronize edilen dört adet video kamera ile gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında iki anahtar akışkan özelliğinin davranışa önemli oranda etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu özellikleri kinematik viskozite ve yoğunluk olarak

belirtmişlerdir. Oluşturdıkları deney düzeneğinde düşey kapak mekanizmasının aniden çekilmesi ile akışkanların karşılaşması neticesindeki davranışları üzerine yoğunlaşmışlardır. Söz konusu anahtar özelliklerinin karşılaşma ve tabakalaşma süreçlerini etkilediğini ifade etmişlerdir. Akışkanların belirli parametrik değerlerini değiştirerek hidrodinamik davranışlarını incelemişlerdir.

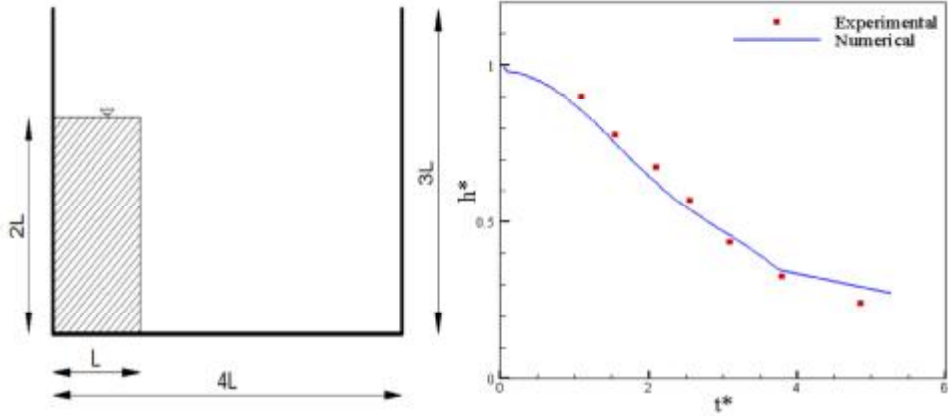
Paredes ve Imas (2014) çalışmalarında, hem tek hem de çok fazlı akışkan içeren akışkan-yapı etkileşim problemlerini çözebilmek için SPH yönteminin bir alternatif formülünü geliştirmişlerdir. Metodu mevcut deneysel ve sayısal verilerle doğrulamaya çalışmışlardır (Şekil 2.64). Sonuç olarak da uygulanan metodun deneysel ölçümlerle iyi bir uyum yakaladığını belirtmişlerdir.

Fourtakas (2014) çalışmasında parçacık kaynaklı SPH yöntemini kullanarak katı-sıvı iki fazlı akışkan hareketinin sayısal modellemesini yapmıştır. Tasarımını endüstriyel tanklarda çok fazlı akışkan davranışını incelemek amacı ile geliştirmiştir. Katı sediment ve sıvı akışkan arayüz değişimini ve büyük deformasyon durumunu araştırmıştır. SPH yönteminin ağırsız bir Lagrange ayrıklaştırması olduğunu, lineer olmayan akımlar için bu metodun uygun sayılabilecek avantajlarının söz konusu olduğunu açıklamıştır. Modellemeyi verimlilik ve reolojik özellikler açısından irdelemiştir. Kuru mansap koşullarındaki baraj yıkılması akım probleminde yöntemi test etmiş, tatmin edici sonuçlar elde ettiklerini ifade etmiştir. Sayısal modeli GPU destekli bilgisayar ile epey hızlı bir şekilde çözümlemiş, modeli daha da geliştirme imkanını yakalamıştır. SPH yönteminin en büyük dezavantaj noktalarının ince ayrıklaştırma gereksinimi ve üç boyutlu uygulamalar için hesaplama yükünün çok fazla olması olarak dile getirmiştir. DualSPHysics programını uygulama ve optimizasyon işlemleri için tercih etmiştir. Denklemlerin uygulama kolaylığının ciddi bir avantaj sağladığını ve deney sonuçları ile modelden elde ettiği verileri karşılaştırdığında özellikle serbest yüzeyli HAD problemlerini çözme konusunda modelin tatmin edici sonuçlar ortaya koyduğunu ifade etmiştir.



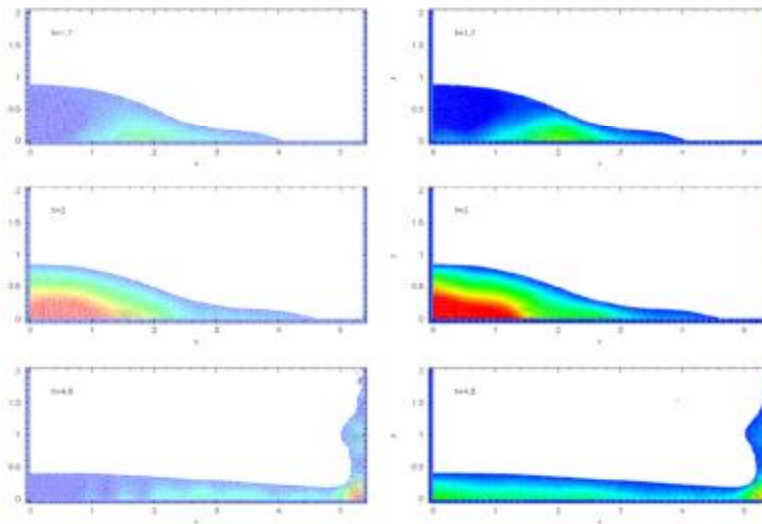
Şekil 2.64. Uygulanan metodun deneysel verilerle karşılaştırılması (Paredes ve Imas, 2014)

Şekil 2.65'te örnek baraj yıkılması modelleme şematiğini, ayrıca $dx=0.01$ m partikül aralığı için nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması yer almaktadır.



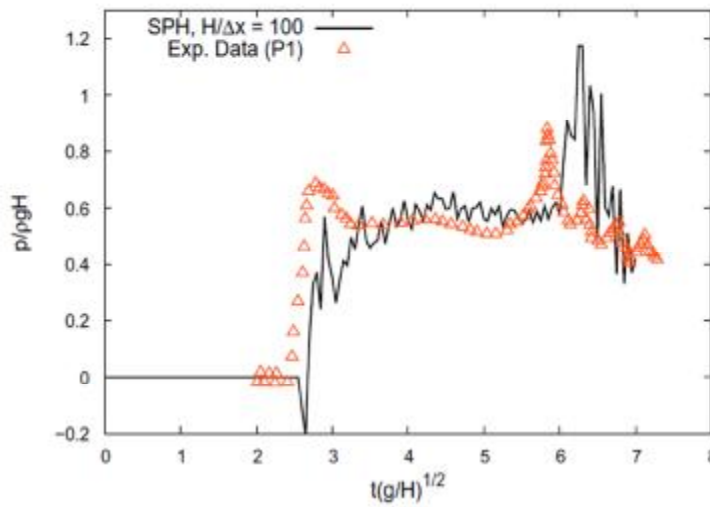
Şekil 2.65. Model şematiği $L= 1\text{m}$ (solda) ve deney-nümerik karşılaştırması (sağda) (Fourtakas, 2014)

Adami (2014) çalışmasında ağırsız Lagrange yaklaşımına dayalı SPH yöntemini ele almış; yöntemdeki genel sınır şartları, adveksiyon şeması, yüzey gerilme modeli ve birçok yeni uygulama adımlarını HAD problemlerinde test etmiştir (Şekil 2.66).



Şekil 2.66. İki farklı çözünürlükte baraj yıkılması modellemesinin $t=1.7$, $t=2.0$ ve $t=4.8$ s zamanlarındaki anlık görüntüleri (Adami, 2014)

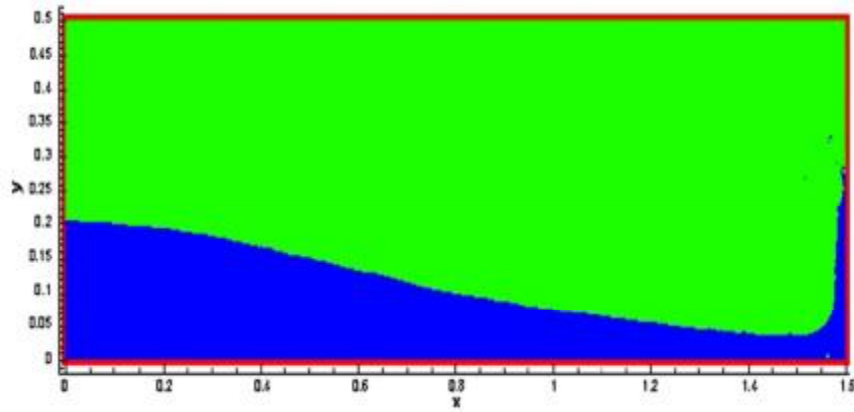
Yöntemin yapay viskozite, yoğunluk ve parçacık hareketini düzleştirmede Shepard filtreleme gibi teknikleri kullanmasının simülasyonlarda kararlı bir yapı oluşturduğunu açıklamıştır. Tek ve çok fazlı akışkan davranışını modellemek için yeni bir adveksiyon şeması sunmuştur. Söz konusu yöntemin özellikle yüksek Reynolds sayısına sahip akım modellemelerinde doğruluk açısından önemli avantajlar ortaya koyduğunu ifade etmiştir (Şekil 2.67).



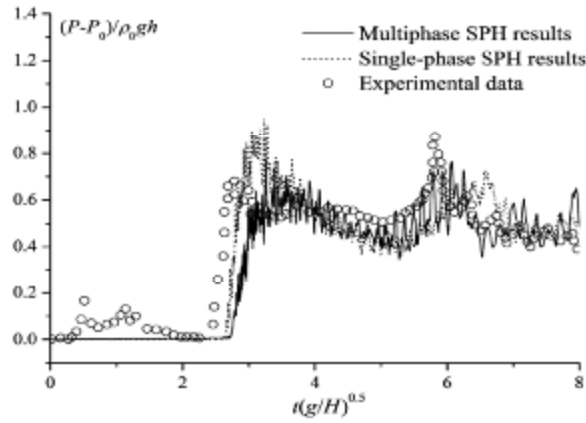
Şekil 2.67. Deney ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması (Adami, 2014)

Chen ve ark. (2015) çalışmalarında karmaşık yapıdaki arayüzler ve büyük yoğunluk farklılıklarına dayanan çok fazlı akımların geliştirilen SPH modeli ile çözümlenmesine yönelik araştırma yapmışlardır. Çok fazlı SPH modelini arayüz üzerindeki basınç devamlılığının tahminine dayandırmışlar ve asıl denklemlerin çözümü içerisindeki komşu parçacıkların bilgilerini kütle ve yoğunluk açısından direkt olarak kullanmaktan kaçınmışlardır. Hesaplamalarda hassasiyeti sağlamak ve pürüzsüz basınç alanı elde etmek için doğrulanmış bir yeniden başlatım uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Hem sayısal düzensizlikleri düşürmek hem de

sınır alanındaki fiziksel olmayan parçacık yer değişimlerini önlemek amacı ile birleştirilmiş dinamik katı sınır davranışını uygulamışlardır. Rayleigh-Taylor kararsızlık testi, Boussinesq olmayan problem ve baraj yıkılması simülasyonu gibi üç temsili nümerik örneği ele almışlar, analitik sonuçlar ve deneysel verilerle karşılaştırma imkanını yakalamışlardır (Şekil 2.68 ve 2.69). Sonuçta uyguladıkları SPH modelinin çok fazlı akışkan problemlerinde etkili bir modelleme yapısı oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

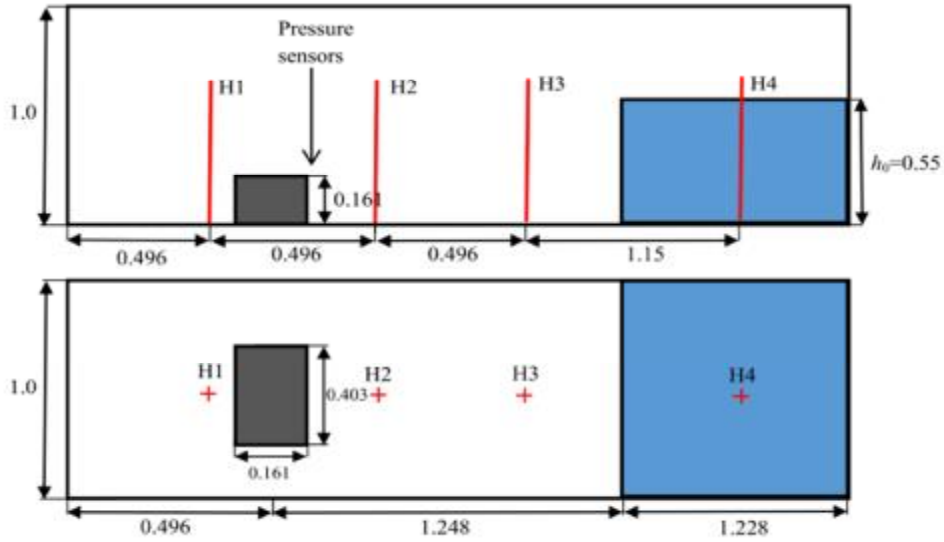


Şekil 2.68. $t(g/H)^{0.5}=3.2$ için çok fazlı akım modellemesi (Chen ve ark., 2015)



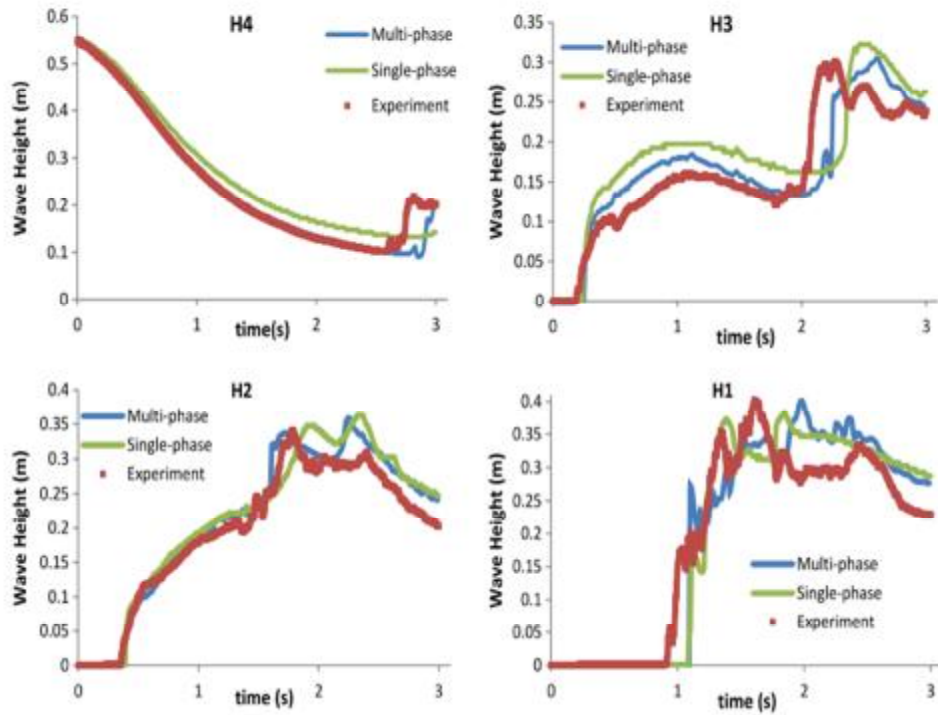
Şekil 2.69. Basınç değerlerinin boyutsuz olarak zaman değişiminde birçok yönden karşılaştırılması (Chen ve ark., 2015)

Mokos ve ark. (2015) çalışmalarında 10-20 milyon parçacıktan oluşan ve GPU yapısına sahip grafik kartlarını kullanarak çok fazlı akışkan davranışını SPH yöntemi ile modellemişlerdir. Verimliliği arttırmak adına dört farklı algoritma üzerine düzenleme yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Bu dört farklı algoritmayı koşul ifadeleri, binary operatörleri, ayrı parçacık listeleri ve orta küresel fonksiyon şeklinde belirtmişlerdir. Sonuçta optimum yaklaşım olarak değerlendirildiğinde her faz için ayrı bir hücre ve komşu listelerin kullanılması gerektiğini açıklamışlardır. Ayrıca dört farklı algoritmayı verimlilik bakımından tek fazlı GPU kodu, çok fazlı akışkan işlevselliğinin yeterli olup olmadığını belirleyen iki ve üç boyutlu DualSPHysics yöntemi ile mukayese etmişlerdir. Bu durumu bir engele çarpan üç boyutlu bir baraj yıkılması örneği ile göstermişlerdir (Şekil 2.70).



Şekil 2.70. Deney düzeneği ve ölçüleri (m) (Mokos ve ark., 2015)

Sonuçta tek fazlı koda nazaran deney sonuçlarının iyi bir uyum yakaladığını belirtmişlerdir. Çok fazlı GPU kodunun yüksek çözünürlük ve çok sayıda parçacık ile çalışma gibi konularda tek fazlı GPU durumuna göre daha çok yakınsama sağladığını vurgulamışlardır (Şekil 2.71).

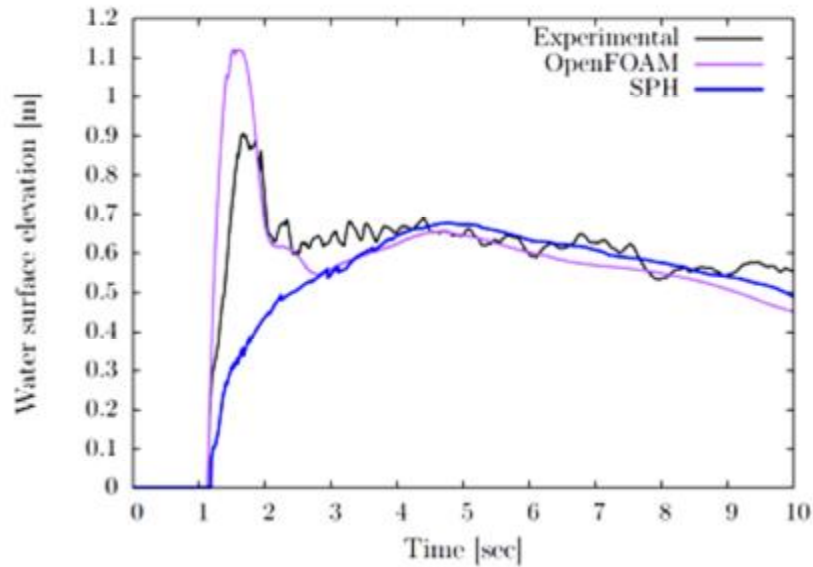


Şekil 2.71. Sonuçların karşılaştırılması (Mokos ve ark., 2015)

Razavand ve Taeibi-Rahni (2015) çalışmalarında, SPH yönteminin Lagrange yapısı nedeniyle arayüz yakalama algoritmasına gerek duymadan iki farklı akışkan arasındaki arayüz hareketini tanımlamada kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu özelliğin SPH yöntemini kompleks akımların modellenmesi süreçlerinde uygulanabilir kıldığını ifade etmişlerdir. Çok fazlı SPH yöntemini arayüz kesitinde yüzey gerilme etkilerinin özel bir gösterim şekli olarak

Nevtoniyen akışkanlar için sunmuşlardır. Yöntemin performansını test etmişler, özellikle Rayleigh-Taylor değişkenliği ve viskoz bir akışkandaki kabarcık artışı konularında detaylı olarak incelemişlerdir. Literatürde bulunan analitik ve diğer nümerik modelleme sonuçları ile karşılaştırmışlar, sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu kanaatine varmışlardır. Ayrıca yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip çok fazlı akışkan problemlerinde daha fazla araştırma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

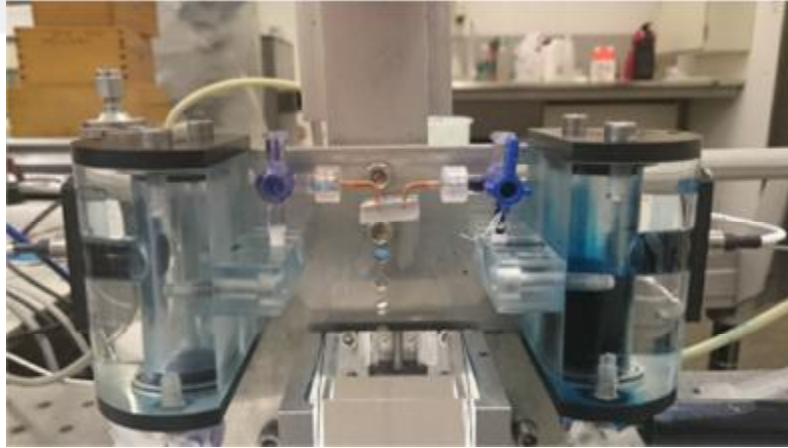
Douglas ve ark. (2015) çalışmalarında tsunami kaynaklı birçok yapının ağır hasar gördüğünü ve dolayısı ile tsunami-yapı etkileşimini anlayabilmek için mevcut tasarım ve modelleme yöntemlerinin gözden geçirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu doğrultuda OpenFOAM yöntemini kullanarak çok fazlı akışkan problemini çözebilmek adına üç boyutlu sayısal bir model geliştirmişlerdir. Kapsamlı laboratuvar deneyleri sonucu hidrodinamik yükü analitik ve nümerik model sonuçları ile mukayese etmişlerdir (Şekil 2.72).



Şekil 2.72. Belirli bir noktadaki su seviyesinin zamanla değişiminin karşılaştırılması (Douglas ve ark., 2015)

Analitik çözümler için sıg su teorisinden faydalanmışlar, OpenFOAM sonuçları ile aralarında iyi bir uyum olduğunu açıklamışlardır. Bununla birlikte WCSPH model sonuçları ile de analiz etmişlerdir. Özellikle sonuçlar açısından dalgaların yayılımında pik noktalarda dikkate değer bir yakınsaklık olduğunu vurgulamışlardır.

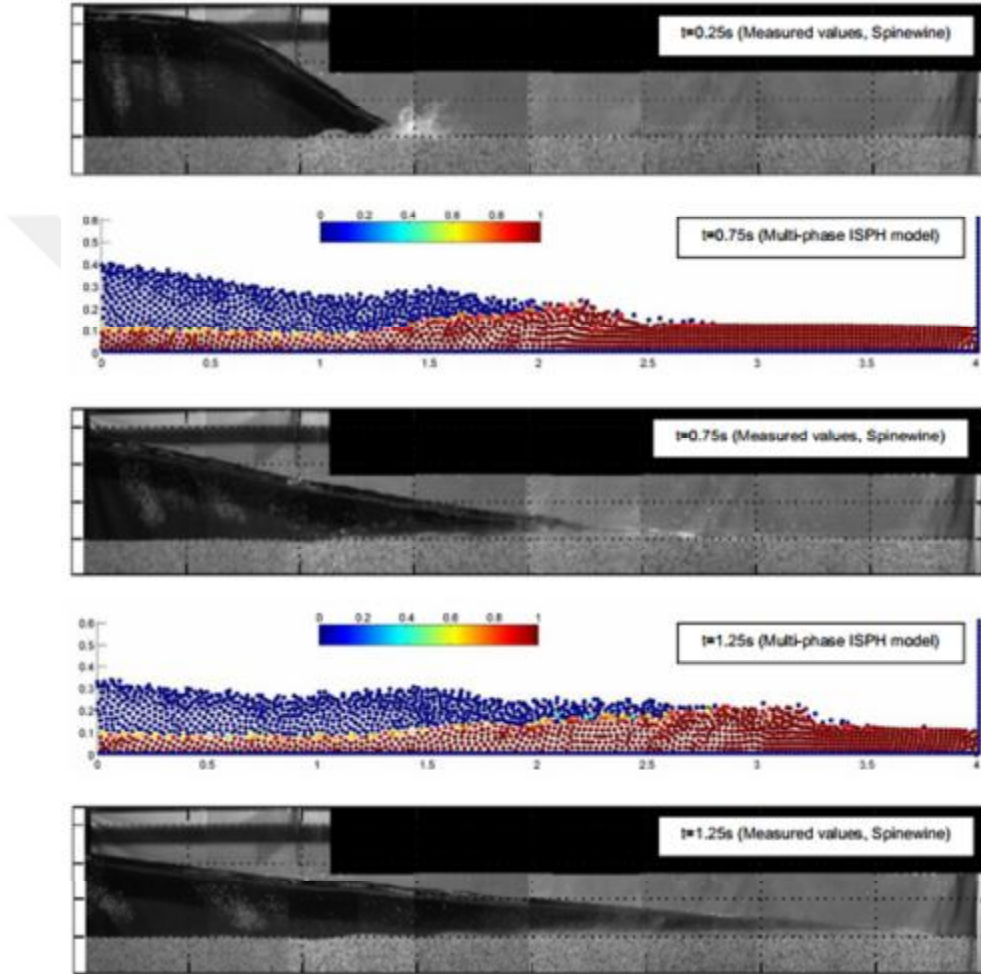
Kunz ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada, drenaj süreçlerini küçük ölçekli bir modelde nümerik ve deneysel yönlerden ele almışlardır. SPH yöntemine dayalı sayısal bir model geliştirerek, birbirine karışmayan iki fazlı akış hareketini simüle etmek için kullanmışlardır. Deneylerinde akışkanların arayüz bölgesi ve giriş-çıkış kısımlarındaki basınç durumlarını gözlemlemişler, görüntü işleme tekniklerinden yararlanarak bilgisayar ortamına aktarmışlardır (Şekil 2.73). Sonuç olarak SPH yönteminin yüzey gerilme etkilerini tanımlamada oldukça başarılı olduğunu, fakat yüzey pürüzlülüğü ve kapiler etkilerin incelenmesi noktasında daha fazla araştırma yapılması gerektiğini açıklamışlardır.



Şekil 2.73. Mikro deney düzeneği (Kunz ve ark., 2015)

Memarzadeh ve ark. (2015) çalışmalarında; baraj yıkılması veya taşkın durumlarında oluşan şok dalgalarının fiziksel özellikleri, sediment taşınımı ve mansap yatak koşulları bakımından değişiklikleri beraberinde getirdiğini ifade

etmişlerdir. Dolayısı ile akımın karmaşık bir yapıya büründüğünü, bu tür problemleri çözebilmek için de birçok deneysel ve sayısal çalışmanın yapıldığını belirtmişlerdir (Şekil 2.74).



Şekil 2.74. Deney ve nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması (Memarzadeh ve ark., 2015)

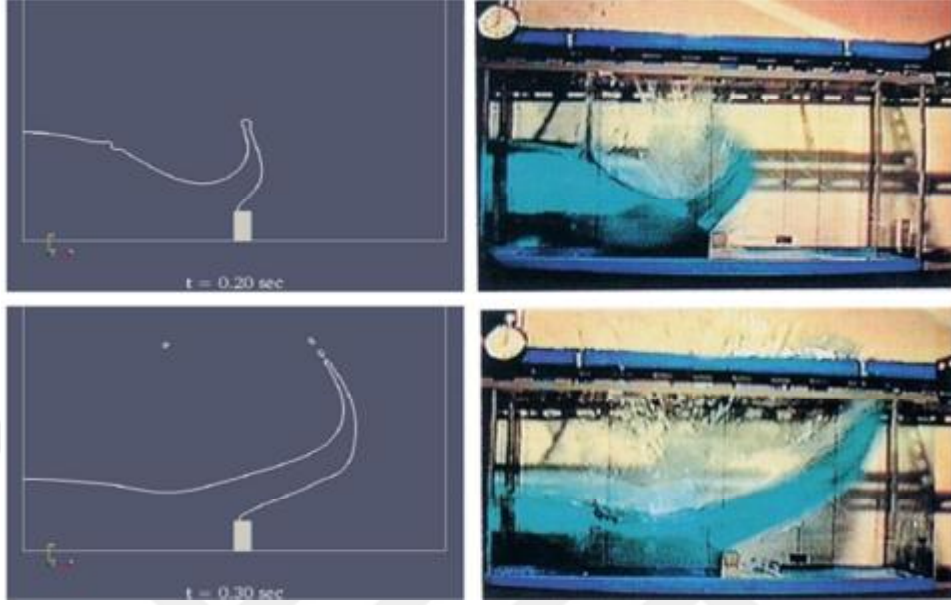
Bu doğrultuda hareketli bir yatak yapısındaki baraj yıkılması taşkın dalgasının sayısal modellemesi için çok fazlı bir model şekli önermişlerdir. Modellemede kullanılan denklemlerin çözülmesi noktasında Euler ve sonlu

hacim yaklaşımlarından istifade etmişlerdir. Sıkıştırılamayan SPH yöntemi olan ISPH yöntemini daha da geliştirerek, yoğunluk ve viskozitesi yüksek akışkan davranışları için modellemişlerdir. Sonuç olarak akım deformasyonları açısından bazı zorluklar oluşmasına rağmen HAD problemleri için yöntemin uygulanabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Meister (2015) yaptığı çalışmada, kentsel su yönetimi alanında Lagrange yaklaşımına dayalı SPH yöntemini ilk defa uygulamıştır. Çok fazlı akışkan davranışının su yönetimi konularında olmazsa olmaz bir durum olduğundan bahsetmiş ve geliştirdiği algoritmaları bu konu üzerinde değerlendirmiştir. Atıksu arıtma tesisi hidrolik sisteminde mevcut yöntemi modelleyerek, yöntemin akışkan davranışını çözümleme konusundaki hassasiyetini test etmiştir.

Sun ve Sakai (2016) çalışmalarında özellikle iki fazlı akımların kompleks geometrilerde nümerik olarak modellenmesinin birçok endüstriyel uygulamalarda büyük bir önem taşıdığını ifade etmişlerdir. Akışkanların arayüzey hareketlerini belirlemek açısından çokça kullanılan VOF yaklaşımını benimsemişler, hava-su akışkan simülasyonlarında uygulamışlardır. Sayısal modellemelerinde bir engele çarpan baraj yıkılması akımını hız değişkenliklerini göstermek üzere VOF metodu ile üç boyutlu olarak ele almışlardır. Sayısal modelleme ile deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır (Şekil 2.75). Sonuçta kullandıkları yöntemin makul sonuçlar ortaya koyduğunu ifade etmişlerdir.

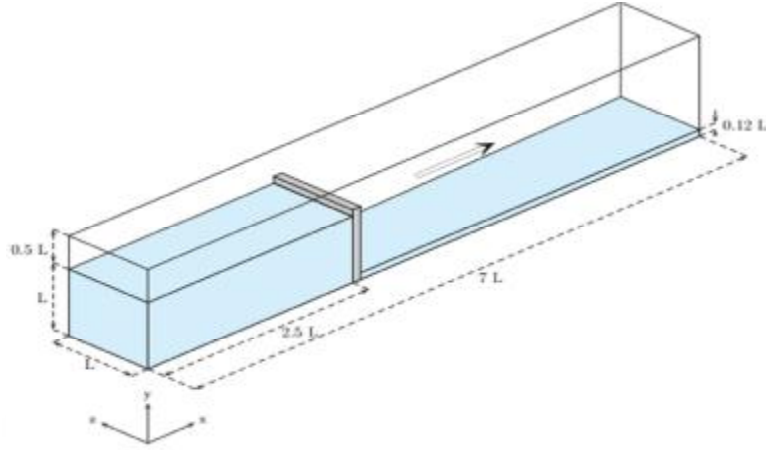
Ikebata ve Xiao (2016) ele aldıkları çalışmalarında yüksek çözünürlüklü grafik işlemci ünitesi güçlü bir bilgisayarda çok fazlı akışkanları simüle etmek ve arayüz hareketlerini belirlemek için yeni geliştirdikleri nümerik bir modeli kullanmışlardır. Büyük ölçekli paralel işlemci özelliği olan, CUDA destekli bilgisayar ile çok sayıda ağ elemanlarına sahip modelleme yapısı oluşturmuşlardır. Sonuç olarak sayısal simülasyonların birçok ürün tasarımında ve pratik uygulamalarda rahatlıkla kullanılabileceğini öngörmüşlerdir.



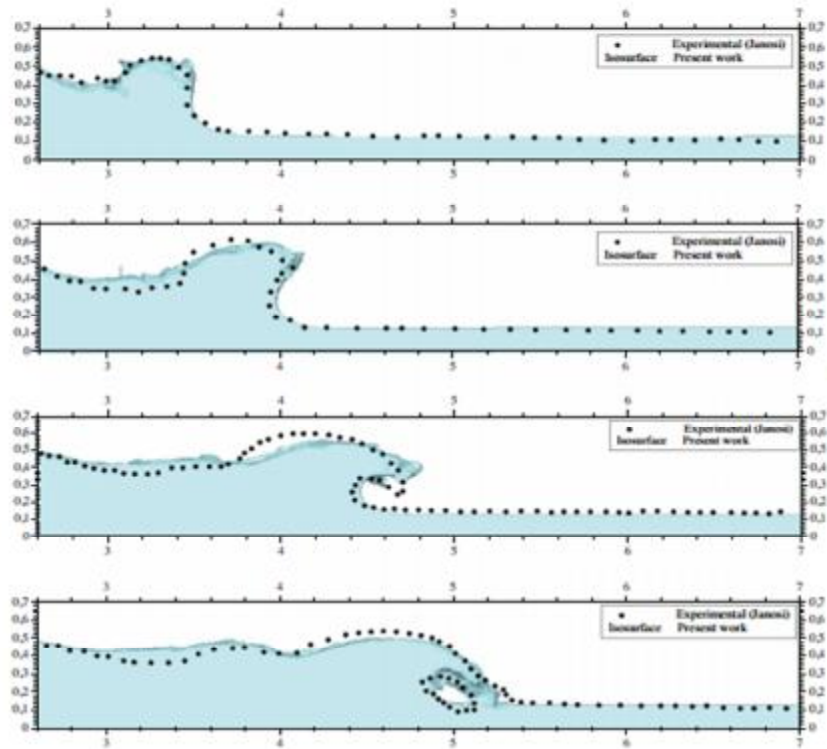
Şekil 2.75. Sayısal data ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (Sun ve Sakai, 2016)

Cubos-Ramirez ve ark. (2016) çalışmalarında, serbest yüzeyli akımların modellenmesi için etkin üç boyutlu iki fazlı akışkan modeli geliştirmişlerdir. Yöntemi sıkıştırılamayan akışkanlar için Navier-Stokes denklemlerinin çözümü üzerine yoğunlaştırmışlardır. Kütlemin korunumunu sağlamak için de VOF yaklaşımını ele almışlardır. Nümerik modellemeleri bazı serbest yüzey akım problemleri ile doğrulamaya çalışmışlardır (Şekil 2.76 ve 2.77). Sayısal ve deneysel verilerin birbirleri ile uyum içerisinde olduğunu ifade etmişlerdir.

Gong ve ark. (2016) çalışmalarında iki boyutlu hareketli bir yatak üzerinde baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının SPH yöntemi ile modellenmesini incelemişlerdir.

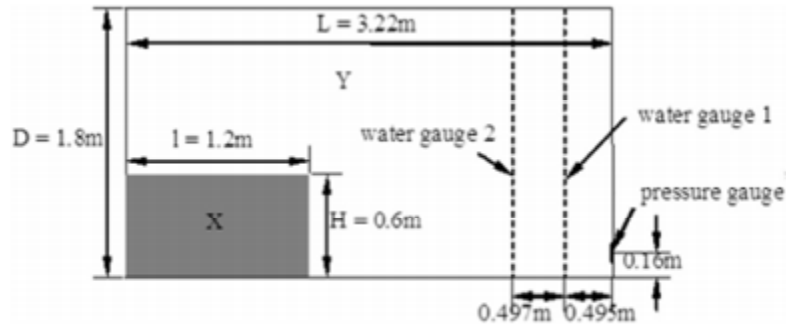


Şekil 2.76. Islak bir yataktaki baraj yıkılması deney düzeneğinin şematik gösterimi (Cubos-Ramirez ve ark., 2016)

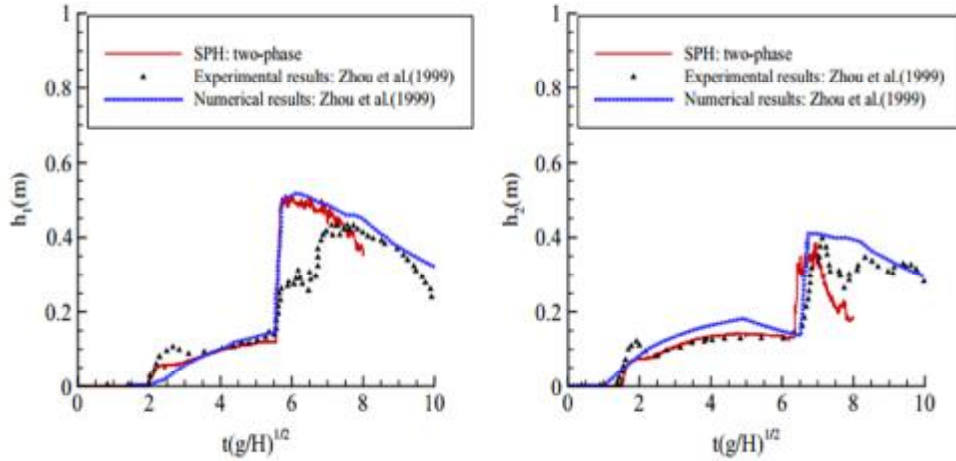


Şekil 2.77. DeneySEL ve nümerik serbest yüzey profili sonuçlarının karşılaştırılması (Cubos-Ramirez ve ark., 2016)

Navier-Stokes denklemlerini çözmek amacı ile iki fazlı SPH metodunu geliştirmişlerdir. Hal denklemlerini bu çerçevede sıkıştırılamayan, zayıf sıkıştırılabilen akışkan ve sediment kısımları için uygulamışlardır. Sediment kısmını Newtoniyen olmayan akışkan gibi Bingham modeli ve yapay viskozitenin üç alternatif yaklaşımını kullanarak simüle etmişlerdir. Ayrıca iki fazlı akışkan durumu için yeni formülasyonlar üretmişlerdir. Sayısal sonuçları deneysel verilerle karşılaştırarak kabul edilebilir bir uyum yakaladıklarını göstermişlerdir (Şekil 2.78 ve 2.79).



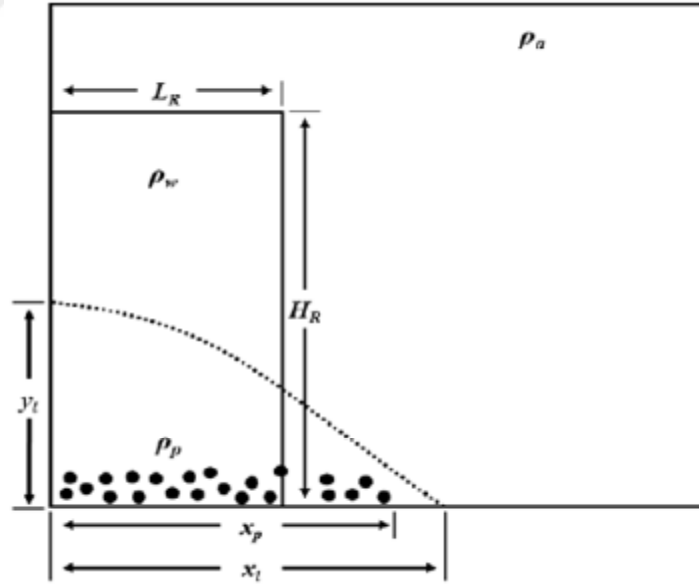
Şekil 2.78. Deney düzeneği şekli (Gong ve ark., 2016)



Şekil 2.79. Nümerik ve deneysel çalışmalardan elde edilen su seviyesi değişimleri grafiği (Gong ve ark., 2016)

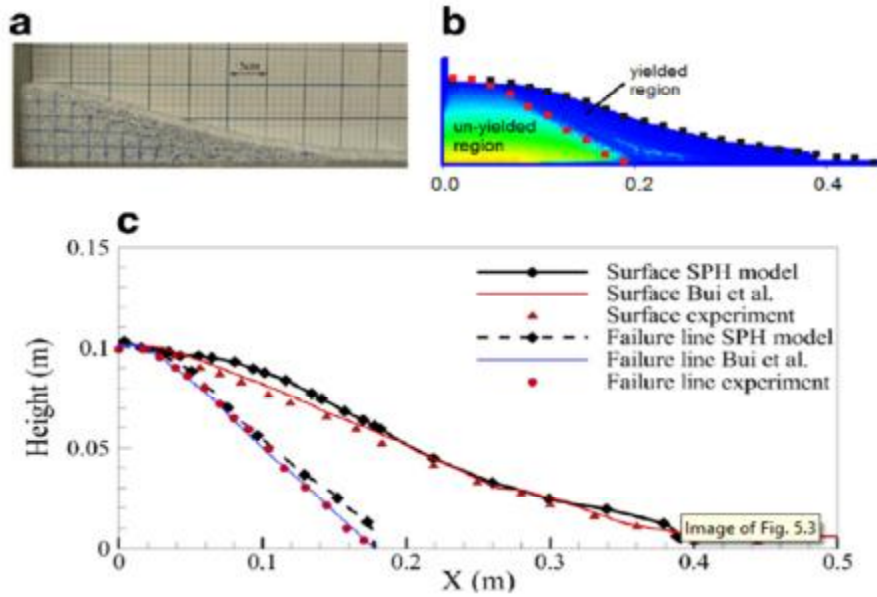
Pathak ve Raessi (2016) ele aldıkları çalışmalarında iki akışkan arasındaki etkileşimi belirlemek için üç boyutlu ve Euler yaklaşımına dayanan bir çalışma ortaya koymuşlardır. Akışkanların arayüz davranışlarını VOF tabanlı bir metodoloji yardımı ile çözmüşlerdir. Ayrıca davranış ile birlikte akışkanın hareketli bir katı cisimle etkileşimini inceleme imkanı bulmuşlardır. Sonuçta etkileşimle oluşan titreşim hareketini araştırmışlar ve bu hareketin okyanuslardaki dalga enerjisini araştırmak için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Park ve ark. (2016) çalışmalarında katı-sıvı-gaz karışımı üç fazlı parçacık içeren baraj yıkılması problemini ele almışlardır (Şekil 2.80). Üç fazlı karışımı modelleyebilmek için de DCDEM ve HAD metotlarını benimsemişlerdir. Akışkanların yoğunluğunu parçacıkların davranışları ve serbest yüzeydeki etkisine bağlı olarak çok geniş bir aralıkta göz önüne almışlardır. Parçacıkların dağılımını ve serbest yüzeydeki üç boyutlu etkisini farklı akışkan rejimlerinde değerlendirmişlerdir.



Şekil 2.80. Tabanı parçacık kaplı baraj yıkılması problem çizimi (Park ve ark., 2016)

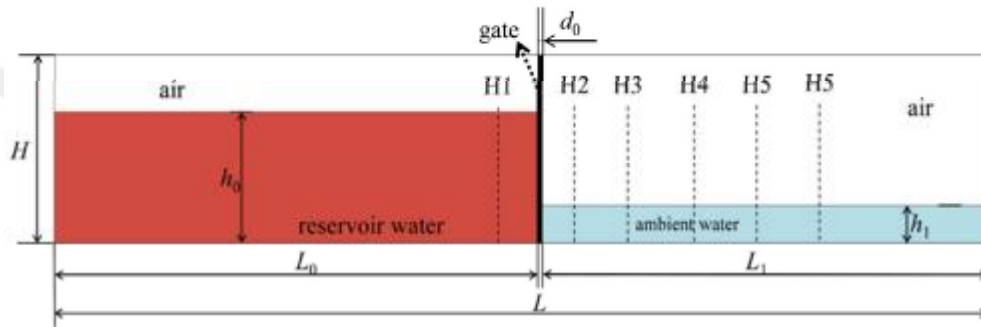
Fourtakas ve Rogers (2016) yaptıkları çalışmada, iki fazlı akışkan-sediment akım problemlerinde SPH yöntemini kullanarak sayısal bir model geliştirmişlerdir. Çok fazlı modeli literatürdeki mansap koşulu kuru olan erozyon durumundaki baraj yıkılması çalışmaları ile mukayese etmişlerdir (Şekil 2.81). Çok sayıda parçacık içeren üç boyutlu simülasyonları açık kaynak kodlu GPU destekli DualSPHysics programında yapmışlardır. Sonuç olarak dört milyonu aşkın parçacıktan oluşan baraj yıkılması örneklerinde ele aldıkları modeli değerlendirme imkanı bulmuşlar ve deneysel veriler ile modelleme sonucu elde ettikleri su yüzü profillerinin yakın sonuçlar ortaya koyduğunu ifade etmişlerdir.



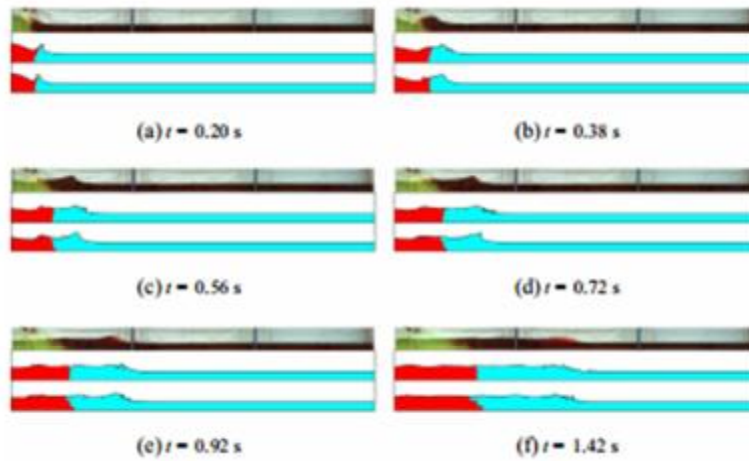
Şekil 2.81. Baraj yıkılması çalışmasının deneysel ve nümerik karşılaştırması (Fourtakas ve Rogers, 2016)

Ye ve Zhao (2017) yaptıkları çalışmada baraj yıkılması akım problemini rezervuar ile mansap durumunun ıslak olması koşuluna dayanarak arayüz hareketinin değişimini VOF yaklaşımına göre incelemişlerdir. Literatürdeki

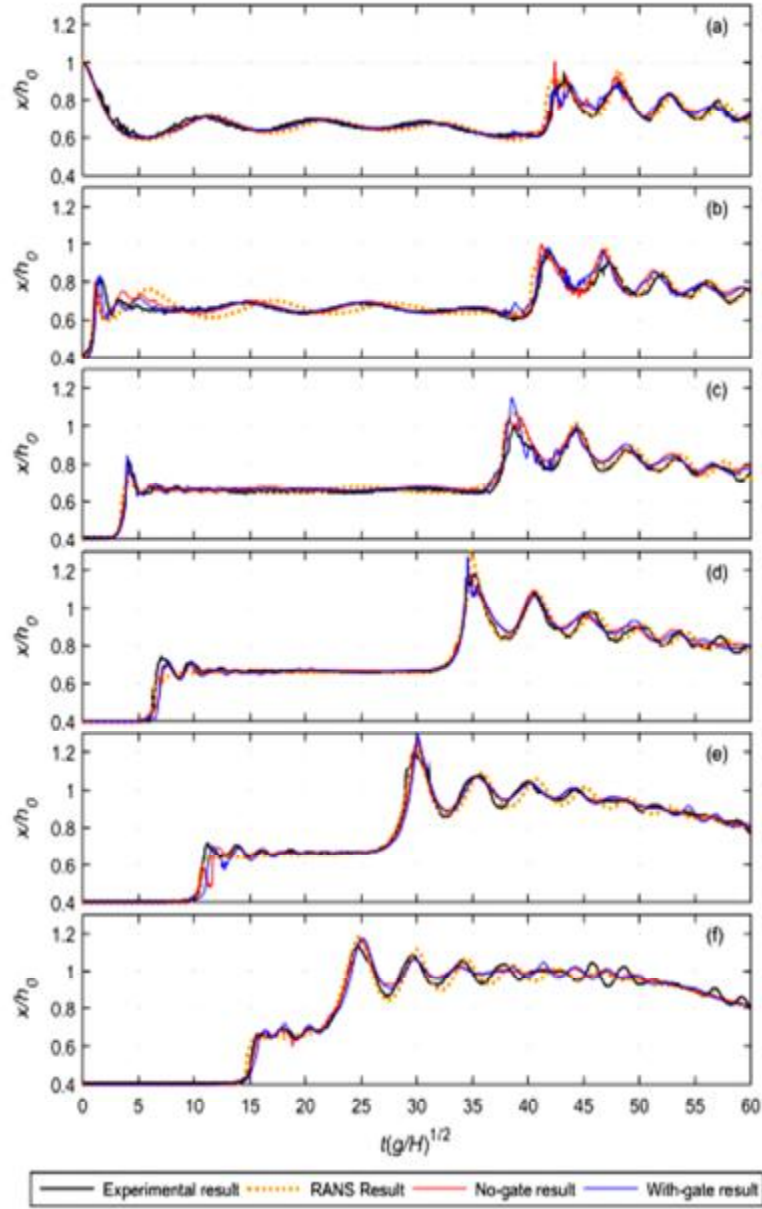
deneysel verileri kullanarak elde ettikleri nümerik sonuçlarla mukayese etmişlerdir (Şekil 2.82). İnceledikleri konuları baraj yıkılması başlangıç safhası arayüz gelişimi, kapak kalınlığı, kapağın kaldırılma hızı ve dalga yayılımında derinlik değişimi olarak belirtmişlerdir. Ayrıca uzun bir kanal yapısında baraj yıkılması akımının oluşturduğu şok dalgasını incelemişler, yıkılma anındaki su-su arayüzü ve dalga önü arasındaki zaman farkını araştırmışlardır (Şekil 2.83 ve 2.84).



Şekil 2.82. Baraj yıkılması deney düzeneği ve ölçüm noktaları şematigi (Ye ve Zhao, 2017)



Şekil 2.83. Serbest yüzey profili sonuçlarının deneysel ve nümerik karşılaştırması (Ye ve Zhao, 2017)



Şekil 2.84. Farklı nokta ve koşullarda deney ve nümerik sonuçların karşılaştırılması
(Ye ve Zhao, 2017)



3. MATERYAL VE METOD

3.1. Baraj Yıkılması Akımını İdare Eden Denklemler

Baraj yıkılması akım problemi, çözümünün oldukça zor olduğu karmaşık bir yapı göstermektedir. Bu sebeple yıkılma sonrası meydana gelen taşkın şok dalgasının mansapta oluşturacağı fiziksel etkileri modellemek amacı ile bazı matematiksel denklem takımları kullanılmaktadır. Akım aslında gerçek arazi koşullarında üç boyutta, zamanla değişen, sıkışmayan, serbest yüzeyli açık kanal akımı özelliği gösteren akışkanlar dinamiği problemidir. Bu özellik nedeniyle olayı en iyi idare eden denklem takımının üç boyutlu *Navier-Stokes* denklemleri olduğu düşünülmektedir. Bunun haricinde bir başka denklem takımı da Navier-Stokes denklemlerinin indirgenmesi sonucu elde edilen *Saint-Venant* veya *Sığ Su (SWE)* denklemleridir. Sığ su denklemlerinde akım derinlik ölçüsünün uzunluk ifadesine göre ihmal edilecek boyutta küçük olduğu göz önüne alınmaktadır. Ayrıca düşeydeki ivmenin ihmal edilmesi ile akımın hidrostatik koşulları sağladığı öngörülmektedir.

Navier-Stokes denklemlerinin çözümlerinde istenene yakın sonuçlar alınmasına rağmen özellikle hava ile temas eden arakesitlerde türbülans ve serbest yüzey etkileri gibi önemli noktalar çözümlenmesi gereken belirleyici faktörler olarak düşünülmektedir. Bu durum çoğunlukla serbest yüzey sınırlarının hareketli olması nedeniyle konum tanımlamadaki zorluklardan kaynaklanmaktadır. Serbest su yüzeyi sınırını tayin edebilmek için birçok yöntem kullanılmakta olup, Harlow ve Welch (1965) yılında oluşturdukları “*MAC (Marker and Cell)*” diye tabir edilen akışkan ile aynı anda hareket eden parçacıkların takip edilmesine imkan veren işaretleyici yöntemi bunlardan biri olmaktadır. Ayrıca Hirt ve Nichols (1981)’in ortaya çıkardıkları ağ yapısına dayanan çözümün oluşturulduğu hücre kısmının ne kadarlık bir kısmının su veya akışkan ile dolu olduğunu belirten VOF ve de Sethian (1999), Osher ve Fedkiw (2012)’in geliştirdikleri iki akışkan ara yüzey

kısının sıfır şeklinde sabitlendiği bir göstergenin oluşturulduğu “*Level Set*” olarak ifade edilen sabitlenmiş seviye yöntemlerinden de bahsedilebilir.

Serbest yüzeyli açık kanal akım problemlerinin nümerik olarak ele alınması aşamalarında değişik metotlar kullanılmaktadır. Bunları Versteeg ve ark. (1999) ortaya çıkardığı problem yapısının mesh (ızgara) ağı ile çözümlendiği Euler yöntemini içeren sonlu hacimler metodu; Zienkiewicz ve Taylor (2000) üzerinde çalıştığı sonlu elemanlara dayanan metodu; Chung (2002) ele aldığı sonlu farklar metodu diye bir kategoride, ayrıca Thürey (2003)’ün çalıştığı akışkan yapısının parçacıklar şeklinde ele alındığı Lattice-Boltzman metodu; Monaghan ve Kocharyan (1994) ve Liu ve Liu (2003)’ün geliştirdiği bu çalışmada da kullanılan SPH metodu şeklinde diğer bir kategoride sınıflandırmak mümkündür. Genelde en bilindik yöntem VOF yöntemidir. Baraj yıkılması problemlerinin çözüm adımlarında en çok kullanılan denklem takımları ise Navier-Stokes, Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) ve Saint-Venant denklemleridir (Kocaman, 2007).

Navier-Stokes denklemlerinden bahsedecek olursak bu denklemler süreklilik ve momentum denklemlerinin oluşturduğu akışkanlar mekaniğinin temel sayılabilecek matematiksel ifadelerinden birisidir. Basıncın p , hız vektörünün V ve üç bileşeninin u, v, w ; yoğunluk ifadesinin ρ , yerçekimi ivmesinin g ve bileşenlerinin g_x, g_y, g_z ; zamanın t olarak gösterildiği Navier-Stokes denklemleri kartezyen koordinatlarda açık şekilde denklem (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) ’teki gibi gösterilmektedir (Flow-3D v11 Academic WatEnv Intro Lectures, 2014):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemlerde kütesel kuvvet olarak sadece yerçekimi ifadesi bulunmaktadır. Bu g_x ve g_y ifadelerinin sıfır olduğu anlamına gelmektedir. Denklem takımında bir adet süreklilik ve üç adet de lineer yapıya sahip momentum ifadeleri yer almaktadır. Bilinmeyen sayısı ile denklem sayısı aynıdır fakat denklem çözülebilir görünmesine rağmen sıkışmayan, viskozitesi değişmeyen akışkanlarda bu denklem takımının genel bir çözümlenme şekli bulunmamaktadır. Yine de uygun başlangıç ve sınır şartlarında nümerik analiz metotları ile çözümü gerçekleştirilebilmektedir. Yoğunluk, viskozite ve yerçekiminin bilinmesi çözüm açısından gerekli ve yeter koşuldur. Ayrıca denklem (3.2), (3.3) ve (3.4) 'teki açık denklem yapısı kapalı form şeklinde (3.5)'te görüldüğü gibi ele alınabilmektedir (Kocaman, 2007):

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (3.5)$$

Navier-Stokes denklemlerinde viskoziteler ihmal edilirse, denklem (3.6)'da gösterildiği gibi Euler denklemleri ortaya çıkmaktadır:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho g \quad (3.6)$$

Söz konusu denklem yapısında viskozite terimleri haricinde sınır koşullarında da önemli farklılıklar görülmektedir. Viskoz yapıdaki bir akışkanın

katı sınırdaki hızı sıfır olduğundan akışkan katı sınırı ne geçebilmekte ne de sınır üzerinde kayabilmektedir. Viskoz olmayan bir akışkan ise katı sınırı geçemese de sınır üzerinde kayma özelliğine sahip olabilmektedir.

Akışkanların hareketi esnasında gerçekte akım Reynolds sayısına (Re) bağlıdır ve laminar veya türbülanslı şekilde ele alınabilmektedir (Kırkgöz, 2013):

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3.7)$$

(3.7) denkleminde; V ortalama hız ifadesini, L karakteristik boyu temsil etmektedir. Reynolds sayısının artması akımın türbülans etkisine karşı dayanıklılığını ifade etmekte olup, açık kanal akım durumlarında laminar türbülanslıya geçişte Reynolds sayısının eşik değeri 500 olarak belirlenmiştir. Baraj yıkılması akım problemi çoğu mühendislik problemlerinde olduğu gibi türbülansın etkin olduğu ve kompleks yapısı nedeniyle matematiksel olarak çözümü zor olan problemler arasında yer almaktadır (Kocaman, 2007). Genellikle kullanılan bir diğer denklem takımı olan RANS denklemlerinin tansör notasyonlu genel gösterim şeklini ise denklem (3.8) ve (3.9)'da görmek mümkündür (Kırkgöz, 2013):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.8)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{\partial (\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.9)$$

(3.9) denklemini Navier-Stokes denklemleri ile karşılaştırdığımızda ek olarak bir ifadenin yer aldığını görebiliriz. Bu $\partial(\rho \overline{u_i' u_j'}) / \partial x_j$ ifadesi olup, türbülans etkisi kaynaklı gerilmeleri veya genel-geçer adıyla Reynolds

gerilmelerini tanımlamaktadır. RANS denklemlerinde akımın tüm fiziksel özelliklerinin skaler değerleri ortalama büyüklükler olarak değerlendirilmektedir.

Laminer akım şartlarında bilinmeyen sayısı ile denklem sayısı aynı olurken; RANS denklemlerinde farklı terimlerin dahil olması nihayetinde mevcut denklemlere yenilerinin eklenmesi söz konusudur. Dolayısı ile eklenecek denklemlerde türbülans kapatma modellerinden faydalanılmaktadır. Bu konuda farklı türbülans kapatma modelleri üzerinde halen çalışmalar yapılmaktadır. Ancak zamanla değişen RANS denklemlerinin çözüm adımlarında türbülans viskozitesi olarak kullanılan μ_t değerinin bulunması gerekmekte, birbirinden ayrı birçok türbülans modelinden faydalanılarak çözüme ulaşılabilmektedir. Ayrıca Reynolds gerilmelerinin elde edilebilmesi amacı ile Boussinesq, Von Karman ve Prandtl'ın üzerinde çalıştığı, ampirik yöntemler haricinde nümerik olarak çözülebilen türbülans modelleri de söz konusu olabilmektedir. Kapatma işlemlerinde çoğunlukla k- ϵ türbülans modeli tercih edilen modellerden birisidir (Kocaman, 2007).

Akışkan davranışının matematiksel ifadeleri genellikle kütle, momentum ve enerjinin korunumunu gösteren diferansiyel denklemler ile temsil edilmektedir. Denklemlerin ögelerini viskozite, yoğunluk, hız,...vb. gibi fiziksel parametreler oluşturmaktadır. Problem çeşidine bağlı olarak birçok türbülans modelleri bulunmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan Flow-3D yazılımındaki türbülans modellerini şu şekilde sıralamak mümkündür (Karkınlı ve ark., 2011):

- ü Prandtl Karışma Boyu Modeli
- ü Bir Denklemlili Türbülans Enerji Modeli
- ü İki denklemlili k- ϵ Modeli
- ü Renormalized Group (RNG) Modeli
- ü İki Denklemlili k-w Modeli
- ü Large Eddy Simülasyon (LES) Modeli

Türbülans modellerinin en önemli özelliği Reynolds gerilmelerini ve ek ilave terimleri olabildiğince minimum hata ile elde edebilecek hesaplama metodunu oluşturabilmesidir (Çalışır, 2011). Bu çalışmada genel kabul görmüş ve çokça kullanılan k-ε modeli uygulanmıştır. Söz konusu model yüksek Reynolds sayısına sahip akışkanlarda uygun olmakta ve sınır tabakası haricinde uygulanabilmektedir.

İki denklemlilik olarak da tabir edilen k-ε modelinde türbülans viskozitesi (μ_t) (3.10) denklemi ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Kocaman, 2007):

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

Denklemden k kinetik enerjiyi, ε sönmelenme oranını ve C_μ ise 0.09 olarak bilinen kapatma katsayısını göstermektedir. Kapatma denklemleri ise denklem (3.11) ve (3.12)'de görülebilmektedir:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.11)$$

Burada τ_{ij} Reynolds gerilme tansörünü, ν dinamik viskoziteyi temsil etmektedir.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3.12)$$

(3.12) denkleminde $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$, $\sigma_k=1.0$ ve $\sigma_\varepsilon=1.3$ olarak sabit değerlerdir.

Saint-Venant denklemleri ise baraj yıkılması akım problemlerinin çözümünde sıg su denklemleri adı altında, Navier-Stokes denklemlerinin indirgenmesi suretiyle oluşturulan denklemler olup, bazı kabuller neticesinde serbest yüzeyin çözülmesi aşamasında ekstra bir metota ihtiyaç duyulmamaktadır. Genellikle baraj yıkılması akım problemlerinde yıkılmanın ilk zamanlarında hidrostatik kabulüne uymayan basınç dağılımı söz konusu iken sonrasındaki dalga yayılımında dağılım hidrostatik dağılım şartları ile uyuşmaktadır (Mohapatra ve ark., 1999; Quecedo ve ark., 2005). Çizelge 3.1’de çoğunlukla ele alınan Saint- Venant denklem biçimleri gösterilmektedir (Soares-Frazao, 2002).

Çizelge 3.1. Farklı Biçimlerdeki Saint-Venant Denklemleri (Soares-Frazao, 2002)

Formülasyon Biçimi	Süreklilik ve Momentum Denklemleri
Düzensiz enkesit durumunda korunumlu formülasyon (A,Q) A = enkesit alanı, Q = debi I ₁ = enkesit birinci momenti I ₂ =enkesit genişliğinin uzaklık ile değişimi	$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g I_1 \frac{\partial h}{\partial x} = g A (S_0 - S_f) + g I_2$
Düzensiz enkesit durumunda korunumlu formülasyon (A,V,Q) V=Q/A enkesitteki ortalama hız	$\frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial V}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_0 - S_f)$
Dikdörtgen bir kanal durumunda korunumlu olmayan formülasyon (h,V)	$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_0 - S_f)$
Dikdörtgen prizmatik şekilli bir kanal yapısında korunumlu formülasyon (h,q) h=A/B=su derinliği q=Q/B= birim genişlikteki debi	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} \right) + g \frac{\partial h^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (gh(S_0 - S_f))$

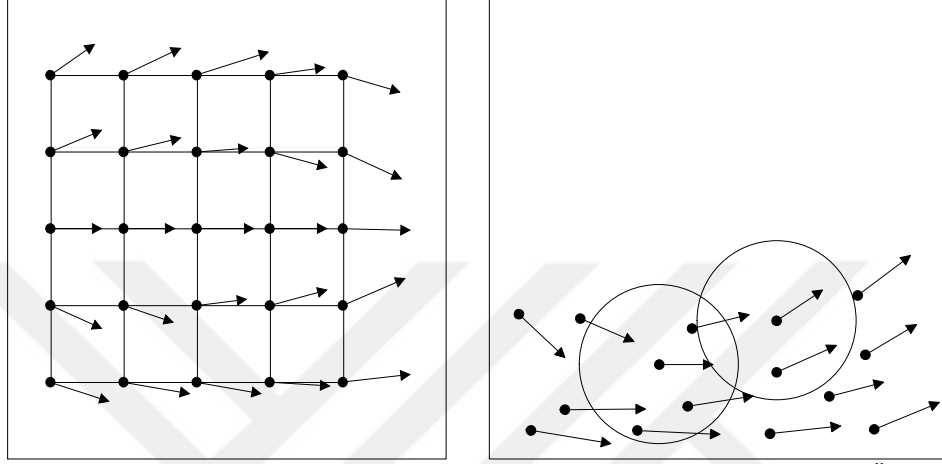
3.2. İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (SPH)

SPH yöntemi akışkanlar dinamiği denklemlerinin nümerik çözümlerinin parçacıklar kümesi şeklinde temsil edildiği ve aynı zamanda akışkanın yer değiştirmesini de içine alan bir metot olarak tanımlanmaktadır. Başlangıçta Gingold, Monaghan ve Lucy (1977) tarafından astrofizik problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Parçacık sistemleri kullanılarak, akışkanları modellemede yeni bir yöntem olan SPH yöntemi, günümüzde birçok alanda uygulanabilme özelliğine sahiptir. Astrofizik, volkanoloji, balistik, oşinografi ve akışkanların simülasyon çalışmaları dahil olmak üzere birçok araştırma alanında kullanılabilmektedir.

SPH metodunun en önemli özelliklerinden birisi bu yöntemin, bir parçacık metodu ve mesh yani örgü içermeyen ağırsız bir Lagrange yöntemi olmasıdır. Bu metotla çok farklı geometrilerde modellemeler yapılabilmektedir. Henüz teknik olarak geliştirilmeye devam edilmekle birlikte geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. HAD konularında, simülasyonlarda kullanılan çoğu geçerli metot Euler ve ızgaralı (grid) sistem olurken, SPH metodu Lagrange yaklaşımını kullanmaktadır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi Euler simülasyonlarında düzenli bir ızgara sistemindeki noktalar tanımlanmakta ve akışkan akımı uzaydaki sabitlenmiş noktalardan geçen bir akım olarak ele alınmaktadır. Lagrange yaklaşımında ise bir interpolasyon fonksiyonu (kernel fonksiyonu) tanımlanarak, çeşitli parçacık kümeleri oluşturulmaktadır (Özbulut, 2008).

SPH yöntemi bir dizi maddenin noktaları veya parçacıklarının kullanıldığı süreklilik içeren bir uygulamadır. Akışkanlar dinamiği problemlerinin modellemelerinde ayrıklaştırılmış Navier-Stokes denklemleri her bir parçacığın bulunduğu konumu yani r ’yi çevreleyen parçacıkların fiziksel özelliklerine göre integre edilebilmektedir. Bitişik (komşu) parçacıkların bir dizisi ya iki boyutlu dairesel ya da üç boyutlu küresel fonksiyon tabanlı mesafede birleştirilmiş karakteristik uzunluk olan çoğunlukla “ h ” olarak ifade edilen interpolasyon uzunluğu (smoothing length) tarafından belirlenmektedir. Her bir zaman adımında

yeni fiziksel miktarlar hesaplanmakta ve daha sonra bunlar güncellenmiş değerlere göre taşınmaktadır.



Şekil 3.1. Euler tabanlı metot (solda) ve Langrange metodu (sağda) (Özbulut, 2008)

Kernel fonksiyonunda Navier-Stokes momentum denklemleri, süreklilik denklemi ve bir hal denklemi uygulanmakta bu şekilde herhangi bir parçacığın tanımlanan parçacık kümesi içindeki ağırlıkça katkısı hesaplanmaktadır. Akışkanlar dinamiği problemlerine ait çözüm süreçlerindeki korunum denklemlerinin spesifik bir noktadaki interpolasyon fonksiyonuna dayalı tahmini değerleri verebilecek özellikte olması istendiğinden parçacık için uygun bir diferansiyel forma dönüştürülmektedir. Genel olarak bu interpolasyon veya ağırlık fonksiyonu kernel fonksiyonu olarak adlandırılmakta ve kübik veya kuintik şeklinde farklı uygulamaları olabilmektedir. Süreklilik gösteren akışkanlar dinamiği denklemleri kısmi diferansiyel denklem formuna dönüştürülmekte ve belirli bir noktada değerlerin tahminini veren interpolasyon fonksiyonuna dayalı denklem takımı oluşmaktadır. Bu sayede fonksiyon parçacık tabanlı simülasyon için uygun bir form özelliği taşımış olur. Genellikle söz konusu interpolasyon veya ağırlık katsayısı uygulama işlevi kernel fonksiyonu (W) veya farklı biçimlerde ele

alınabilmektedir. Ayrıca bununla birlikte tüm durumlarda (r')'de tanımlanabilen bir fonksiyon integre edilerek $F(r')$ şeklinde oluşturulmaktadır (Gesteira ve ark., 2010).

Yoğunluk ya da basınç gibi SPH'taki herhangi bir değişkeni hesaplamak için aşağıdaki ifade ile ortalama bir düzleştirme hesaplanabilmektedir (Crespo, 2008):

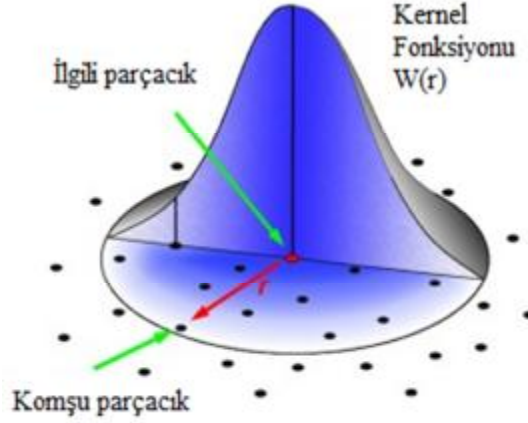
$$F(r) = \int F(r') W(r - r', h) (dr') \quad (3.13)$$

(3.13) denkleminde $F(r)$ değişkeni düzleştirilmiş ortalamayı, W ise kernel fonksiyonunu temsil etmektedir. Düzleştirme uzunluğu h , boyutsal uzunluğu göstermekte ve kernel fonksiyonunda hangi parçacıkların ne kadar katkıda bulunduğunu ifade etmektedir. Şekil 3.2'de temsili kernel fonksiyonu gösterilmektedir (Özbulut, 2013). Düzleştirme işleminde uygulanan kernel fonksiyonu birçok farklı özelliği de kapsayabilmektedir. Bu özelliklerden birkaçını, tanımlanmış bir etkileşim bölgesi içerisindeki pozitif olma ve tam katkı sağlayabilme durumu, normalizasyon ve de uzaklığa bağlı olarak türevlenebilirliğin monoton bir şekilde azalması sonucu oluşan değerleri ortaya çıkarabilmesi şeklinde sayabilmek mümkündür.

Fonksiyon h interpolasyon uzunluğu tarafından tanımlanan bağlı bölgeler içerisinde ele alınan parçacıklar üzerindeki toplam bir “ a ” parçacığında uygulanmaktadır (Crespo, 2008).

$$F(r_a) \approx \sum_b F(r_b) W(r_a - r_b, h) \Delta v_b \quad (3.14)$$

Bu denklemde, alt simgeler a ve b bireysel parçacıkları temsil etmektedir. Ayrıca Δv_b ise “ b ” bitişik parçacığın hacmini göstermektedir.



Şekil 3.2. $W(r)$ Kernel fonksiyonu (Özbulut, 2013)

Eğer hacmi $\Delta v_b = m_b / \rho_b$ ile gösterirsek ki m kütleyi, r ise parçacığın yoğunluğu göstermek üzere (3.14) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir (Altomare ve ark., 2015):

$$F(r_a) \approx \sum_b F(r_b) \frac{m_b}{\rho_b} W(r_a - r_b, h) \Delta v_b \quad (3.15)$$

Euler tabanlı metotlarda grid üzerinde noktalar rastgele tanımlanmaktadır. Fakat Lagrange metodunda ise bir noktadan belirli bir mesafedeki parçacıkların ortalama ağırlıklarının interpolasyonu şeklinde elde edilen gelişigüzel noktalar ele alınmaktadır. Her parçacık hal listesi ile belirlenmekte ve bu değişkenler “*kütle, hız, konum, kuvvet, yoğunluk, basınç, renk*” gibi durumlardan oluşabilmektedir.

Bir i parçacığının ivmesi bulunarak, o i parçacığına ait konum ve hızları denklem (3.16), (3.17), (3.18), (3.19) ve (3.20)’de görüldüğü gibi elde edilebilmektedir (Monaghan ve Gingold, 1977):

$$\frac{dV_i}{dt} = a_i^{\text{basınç}} + a_i^{\text{viskozite}} + a_i^{\text{interaktif}} + a_i^{\text{yerçekimi}} \quad (3.16)$$

$$a_i^{\text{basınc}} \approx \sum_j p_{ij} \nabla W(r_{ij}) \quad (3.17)$$

$$a_i^{\text{viskozite}} \approx \sum_j v_{ij} \nabla W(r_{ij}) \quad (3.18)$$

$$a_i^{\text{interaktif}} \approx \frac{1}{\rho_i} f_i^{\text{interaktif}} \quad (3.19)$$

$$a_i^{\text{yerçekimi}} \approx (0, 0, -g) \quad (3.20)$$

Denklemlerdeki “ f ” kuvvet yoğunluk alanını ifade etmekte olup, yukarıda bahsedilen hal listesini hesaplarken Navier-Stokes denklemi kullanılmaktadır (Monaghan ve Gingold, 1977):

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla \cdot \nabla v + \frac{1}{\rho} f_{\text{ext}} + g \quad (3.21)$$

Kütle ise aşağıdaki formülle bulunmakta ve modelleme boyunca sabit kalmaktadır (Özbulut, 2008):

$$m = \frac{(\text{yoğunluk}_{\text{akışkan}}) - (\text{hacim}_{\text{toplam}})}{\text{parçacık}_{\text{toplam}}} \quad (3.22)$$

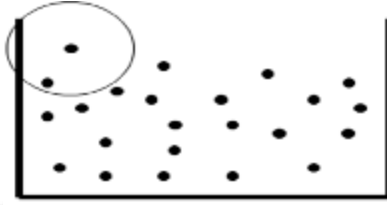
Kernel fonksiyonu yardımıyla, yoğunluk hesaplaması her t zaman aralığında yapılır ve yoğunluk izlenerek akışkanın yüzeyi hesaplanmaktadır. Eğer bir parçacıktaki yoğunluk beklenen yoğunlukla karşılaştırıldığında çok fazla sapma

gösteriyorsa, bu durum o parçacığın yüzey parçacığı olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.3'te söz konusu yüzey parçacıkları görülmektedir (Özbulut, 2008).

Yoğunluk hesaplaması ise şu şekilde olmaktadır:

$$\rho_i = \sum_j m_j W(r_{ij}) \quad (3.23)$$



Şekil 3.3. Yüzey parçacıkları (Özbulut, 2008)

Renk özelliği ise,

- Ø Akışkanın yüzey konumunu belirlemek için,
- Ø Aynı zamanda yüzeydeki normal vektörlerini bulmak için kullanılır.

Çeşitli renk alanları eklenerek örneğin alev yayılmasının basit bir modeli uygulanabilmektedir. Renk parametresi sonlu bir değere sahip olan parçacık haricinde her yerde sıfır olan bir niceliktir. Yoğunluk hesaplamasına benzer olarak parçacıktaki ortalama rengi aşağıdaki formülle hesaplayabiliriz:

$$\langle C \rangle_i \approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} C_j W(r_{ij}) \quad (3.24)$$

Renk alanlarındaki sapmalar bize yüzeyin nerede olduğunu göstermekte ve bu durumda renk alanının türevini çalışmak için seçilecek noktalar kolaylıkla belirlenebilmektedir. Renk alanının gradyanı ise şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\langle \nabla C \rangle_i \approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} C_j \nabla W(r_{ij}) \quad (3.25)$$

Gradyanın büyüklüğü belli bir değerden fazla olduğunda, bu parçacık yüzey parçacığı olarak adlandırılmaktadır (Özbulut, 2008).

3.2.1. Kernel Fonksiyonu

SPH modelinin performansı, çoğunlukla kernel fonksiyonunun seçimine bağlı olmaktadır. Kernel fonksiyonu daha önce de bahsedildiği gibi komşu parçacıkların göz önüne alındığı “a” parçacığı etrafındaki alanın büyüklüğünü içerisine alan h interpolasyon uzunluğu parametresi ve “a”, “b” gibi herhangi iki parçacık arasındaki mesafenin r olarak ifade edildiği tanımlardan hareketle parçacıklar arasındaki mesafenin boyutsuz bir değer olan q ifadesine dönüştürülmesi şeklinde açıklanmaktadır ($q=r/h$). Çalışmada kullanılan DualSPHysics programı içerisinde kullanıcı kernel fonksiyonlarından herhangi birini duruma uygun olarak seçebilmektedir (DualSPHysics User Guide, 2016). Örneğin;

Ø Kübik eğrisi;

$$W(r, h) = \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2 - q)^3 & 1 < q \leq 2 \\ 0 & q > 2 \end{cases} \quad (3.26)$$

ile ifade edilmekte olup, bu denklemde α_D eşitliği iki boyut için $10/7\pi h^2$ ve üç boyut için $1/\pi h^3$ e eşit olmaktadır. Önerilen gerilme düzeltme metodu sadece aktif

olarak q mesafesindeki parçacığın ilk türevinin sıfıra gittiği bir kernel fonksiyonu durumunda kullanılmaktadır (Monaghan, 2000).

Ø Kuintik eğrisi (Wendland) ise;

$$W(r, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (3.27)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemde a_D eşitliği iki boyut için $7/4\pi h^2$ ve üç boyut için $21/16\pi h^3$ 'e eşit olmaktadır. Genelde ($q \leq 2$) için sadece $2h$ 'ın etki alanındaki kernel fonksiyonu göz önünde bulundurulmaktadır (Gesteira ve ark., 2010).

3.2.2. Momentum Denklemi

Momentum korunum denklemi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Barreiro ve ark., 2013):

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \Gamma \quad (3.28)$$

Bu denklemde Γ enerji tüketen terimi ve g ise yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. DualSPHysics programı dağıtım etkilerini içeren farklı seçenekleri de içerisinde bulundurmaktadır (DualSPHysics User Guide, 2016).

3.2.2.1. Yapay Viskozite Terimi

Monaghan tarafından 1992'de önerilen yapay viskozite terimi, kolaylık sağlaması açısından SPH'ta kullanılarak akışkan modellemesinde genel bir yöntem olarak kabul görmektedir. SPH formülasyonu içerisinde (3.28) denklemi şu şekilde yazılabilmektedir (Crespo, 2015):

$$\frac{dV_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b - \rho_b} + \Pi_{ab} \right) \nabla \frac{1}{\rho} \nabla_a W_{ab} + g \quad (3.29)$$

Bu denklemde P_k ve r_k ifadeleri sırasıyla a veya b olarak değerlendirilen k parçacığının basınç ve yoğunluklarını göstermektedir. Yapay viskozite genellikle sayısal anlamda kararsızlıkları ve değişkenlikleri önleme amacına uygun olarak kullanılmaktadır (Vacondio ve ark., 2013). Yapay viskozite değeri minimum değer olarak öngörülen 0.20 olarak ele alınmaktadır. Viskozite terimi Π_{ab} ise denklem (3.30)'da verilmektedir:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \overline{c_{ab}} \mu_{ab}}{\rho_{ab}} & V_{ab} \cdot r_{ab} \leq 0 \\ 0 & V_{ab} \cdot r_{ab} > 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

Bu denklemde $r_{ab} = r_a - r_b$ ve $V_{ab} = V_a - V_b$ ifadelerini parçacığın r_k konumu ve V_k hızı olarak sırasıyla belirtmek mümkündür. μ_{ab} eşitliği $\mu_{ab} = h V_{ab} r_{ab} / (r_{ab}^2 + \eta^2)$ ile gösterilebilir. Speed of sound ifadesi $\overline{c_{ab}} = 0.5(c_a + c_b)$ ile, η^2 ise $\eta^2 = 0.01h^2$ şeklinde elde edilebilen ve α ise düzgün dağıtımı sağlayabilmek için oluşturulmuş katsayılarıdır. A değeri genellikle 0.01 olarak alınmaktadır (Gesteira ve ark., 2010).

3.2.2.2. Laminer Viskozite ve Alt Parçacık Ölçek Türbülansı

Momentum denklemi laminer viskoz gerilmeler şeklinde şu formülle ifade edilebilmektedir (DualSPHysics User Guide, 2016);

$$(\vartheta_0 \nabla^2 V)_a = \sum_b m_b \left(\frac{4\vartheta_0 r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) V_{ab} \quad (3.31)$$

Burada J_0 terimi kinematik viskoziteyi temsil etmekte olup, genellikle su için $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ değerini almaktadır. SPH formülasyonu içerisinde bu denklem şu şekilde gösterilebilir;

$$\frac{dV_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b \rho_a} \right) \nabla_a W_{ab} + g + \sum_b m_b \left(\frac{4\vartheta_0 r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) V_{ab} \quad (3.32)$$

Alt parçacık ölçek türbülans ifadesi de şu şekilde belirtilmektedir:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \vartheta_0 \nabla^2 V + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (3.33)$$

(3.33) denklemindeki $\vec{\tau}$ alt parçacık ölçek türbülans gerilme tensörüdür. Ortalama favre girdap viskozite varsayımı alt parçacık ölçek türbülans gerilme tensörünün kesme gerilmesi bileşeni için Einstein notasyonu ile uyumlu bir şekilde kullanılmaktadır. i ve j yönleri için:

$$\frac{\overline{\tau}_{ij}}{\rho} = v_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} C_I \Delta^2 \delta_{ij} |S_{ij}|^2 \quad (3.34)$$

ifadesinde τ_{ij} terimi alt parçacık kinetik enerjisi, $v_t = [(C_s \Delta l)]^2 |S|$ denkleminde k SPS türbülans kinetik enerjisi, C_s Smagorinsky sabitini (0.12), $C_I = 0.0066$ değerini, Δl ifadesi ise parçacıklar arasındaki mesafeyi göstermekte ve $|S| = 0.5(2S_{ij}S_{ij})$ ile hesaplanmaktadır. Burada S_{ij} alt parçacık ölçek türbülans gerilme tensörünün bir

bileşeni durumundadır. Alt parçacık ölçek türbülans ifadesi ortalama favre eşitliği kullanılarak zayıf sıkıştırılabilir SPH içerisinde tekrar yazılırsa:

$$\begin{aligned} \frac{dV_a}{dt} = & - \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b \rho_a} \right) \nabla_a W_{ab} + g + \sum_b m_b \left(\frac{4\vartheta_0 r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) V_{ab} \\ & + \sum_b m_b \left(\frac{\vec{\tau}_{ij}}{\rho_b^2} + \frac{\vec{\tau}_{ij}}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} \end{aligned} \quad (3.35)$$

denklemini elde edilmektedir. Bu ifadedeki üst simgeler olan a ve b , parçacıkları belirtmektedir (Gesteira ve ark., 2010).

3.2.3. Süreklilik Denklemi

Zayıf sıkıştırılabilir SPH modellemesi boyunca her bir parçacığın kütlesi sabit kalmakta ve sadece yoğunluk düzensizlikleri görülmektedir. Bu yoğunluk değişimleri kütle korunumunun çözülmesi ile hesaplanmakta veya SPH formu içerisinde süreklilik denklemi olarak şu şekilde gösterilebilmektedir (Gesteira ve ark., 2012):

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (3.36)$$

3.2.4. Hal Denklemi

Hal denklemi, parçacık yoğunluğuna dayalı akışkanın basıncını belirlemek için kullanılmaktadır. Sıkıştırılabilirlik ses hızının yüzeysel olarak düşürülebilmesi amacıyla uyarlanmıştır, bu da herhangi bir anda alınan zaman adımı büyüklüğünün makul bir değerde (tüm parçacıklar için ses hızının devamlı bir şekilde hesaplanmasına dayalı bir Courant durumuna göre belirlendiği zamanlarda) sürdürülebileceği anlamına gelmektedir. Ancak böylesi bir uyarılama %1'den daha

az yoğunluk varyasyonlarını sağlayan maksimum akım hızından en az 10 kat daha hızlı olması için ses hızını sınırlamaktadır. Ayrıca sıkışmayan yaklaşımdan kaynaklı başlıca sapmalarla da karşılaşmamaktadır. Dolayısı ile basınç ve yoğunluk arasındaki ifade şu şekilde tanımlanabilmektedir (DualSPHysics User Guide, 2016);

$$P = b \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (3.37)$$

Burada $\gamma=7$, $b = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ olarak ifade edilmekte, $\rho_0=1000 \text{ kg/m}^3$ ise referans yoğunluk ve $c_0 = c(\rho_0) = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)}|_{\rho_0}$ referans yoğunluğundaki ses hızını göstermektedir. Nümerik hesaplamalarda ses hızının makul zaman adımları elde edebilmek amacı ile fiziksel değer açısından uygun bir şekilde azaltılması ve yoğunluk değişiminin c_0 'ın %1 sınırı içerisinde tutmak için beklenen hızın maksimum yoğunluğun yaklaşık 20 katı civarında ayarlanması gerekmektedir (Vacondio ve ark., 2013).

3.2.5. Delta SPH

DualSPHysics içerisinde yoğunluk farklılıklarını azaltabilmek amacı ile ayrıntılı bir terimin eklendiği Delta SPH formülasyonunu uygulamak mümkün olmaktadır. Hal denklemi yoğunluk sayısal alanını doldurmak için yüksek frekanslı düşük genlikli salınımlar içeren Langrange parçacıklarının doğal düzensizlikleri ile beraber çok katı bir yoğunluk alanı olarak öngörülmektedir. DualSPHysics programı aşağıda denklem (3.38)'de görüldüğü üzere süreklilik denklemi içerisinde ayrıntılı bir terim içermektedir (DualSPHysics User Guide, 2016):

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \cdot \Delta_a W_{ab} + 2\delta_\phi \cdot h c_0 \sum_b (\rho_b - \rho_a) \frac{r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{r_{ab}^2} \frac{m_b}{\rho_b} \quad (3.38)$$

Bu denklemde δ_ϕ terimi bağımsız bir katsayı olup, uygun bir değerle desteklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu düzenleme yoğunluk alanının süreklilik denklemine Laplasiyen katkısı olarak ifade edilmektedir. Ayrıca denklem tam olarak toplam alan içerisindeki ayrıntılı formülasyonu göstermektedir ve de serbest yüzeyli açık sınır koşullarına da yakınsamaktadır (Dominguez ve ark., 2012).

Parçacıklara uygulanan net kuvvet sonuçları bakımından (açık bir sınır dışındaki örneklenen parçacıkların olmadığı) kernelin kestiği noktalar sebebiyle birinci dereceden ilaveler içermektedir. Bu etki herhangi diğer bir kuvvetin gerektiği, daha aşağı büyüklüklerin olduğu bazı düzensiz şartları içerisine alan hidrostatik olmayan durumlarda göz önüne alınmamaktadır. Bu yöndeki düzeltmeler üzerine halen çalışılmakta, fakat önemli hesaplama yükü oluşturabilecek yoğunluk gradyanı için normalize işleminin olmayacağı bir problem çözümünü içermesinin uygun olacağı düşünülmektedir. Dolayısı ile δ_ϕ katsayısının çoğu uygulamalarda 0.10 olarak alınması uygun görülmektedir (Crespo, 2008).

3.2.6. Değişken Algoritma

Anizotropik parçacık aralığı SPH yönteminde özellikle şiddetli akımlar, parçacıkların düzenli yayılımını sürdüremeyeceği koşullarda önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bazı koşullarda suyun oluşturduğu akım içerisindeki boşluğun tanımlanmasında basınç ve hız alanlarındaki düzensizlikler gözlemlenen durumlardandır. Anizotropik parçacık boşluğuna karşın değişiklikleri önleyebilmek adına değişken algoritmali bir parçacık şekli ele alınmıştır. Bu algoritma ilk olarak sıkışmayan SPH yöntemi için oluşturulmuştur, fakat DualSPHysics içerisinde zayıf sıkışan SPH modelinde de genişletilme imkanı bulunabilmektedir (DualSPHysics User Guide, 2016).

Değişken algoritma ile birlikte parçacıklardaki düzensizlikler sebebiyle oluşabilecek boşluk kısımlarını ortadan kaldırabilmek ve tek bir parçacık

yayılımını sürdürebilmek amacı ile alanın izin verebildiği daha az parçacık konsantrasyonunun olduğu alanlara doğru konumu değiştirilebilmektedir. Fick'in ilk difüzyon kuralını değişken büyüklüğü ve yönünü kontrol edebilmek amacı ile başlangıç değişken algoritmasında bir iyileşme söz konusu olmuştur (Lind ve ark., 2012). Fick'in ilk kuralı difüzyon akışının yoğunluk gradyanına ilave edilmesi şeklinde olup, denklem (3.39)'da görülebilmektedir (Falappi ve Gallatti, 2006):

$$J = -D_F \nabla C \quad (3.39)$$

Bu denklemde J akışı, C parçacık konsantrasyonunu ve D_F ise Fick'in difüzyon katsayısını temsil etmektedir. Akı olarak ifade edilen yani birim yüzey boyunca birim zamanda geçen parçacıkların sayısının parçacıkların hızı ile orantılı olduğu düşünülürse, parçacığın kayma hızı ve komşu parçacığı etkileme mesafesi bulunabilmektedir. Parçacık konsantrasyonu kullanılarak denklem (3.40)'ta görüldüğü gibi parçacık etkileme mesafesi de elde edilebilmektedir (Fang ve ark., 2006):

$$\delta r_s = -D \nabla C_i \quad (3.40)$$

Denklemde D değişken büyüklüğünü kontrol eden ve sabit orantılılığı içeren yeni bir difüzyon katsayısıdır. Parçacık konsantrasyonunun gradyanı SPH gradyan operatörü aracılığı ile denklem (3.41)'de belirtildiği gibi bulunabilmektedir (DualSPHysics User Guide, 2016):

$$\nabla C_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \nabla W_{ij} \quad (3.41)$$

Orantılılık katsayısı olan D ifadesi Skillen ve ark. (2013) tarafından önerilen bir yöntem aracılığı ile hesaplanabilmektedir. Etkili parçacık

değişkenliğini sağlayabilmek, önemli hatalar ve kararsızlıkları giderebilmek amacı ile yeterli boyutta seçilmesi gerekmektedir. Bu durum (3.42) denkleminde gösterilen Von Neumann adveksiyon-difüzyon kararlılık analizi ifadesi ile sağlanmaktadır:

$$D \leq \frac{1}{2} \frac{h^2}{\Delta t_{\max}} \quad (3.42)$$

Denklem (3.39)'daki $\Delta t_{\max}$ belirli bir yerel hızı ve parçacık aralığı için CFL koşulunun izin verdiği maksimum yerel zaman adımıdır. CFL koşulu denklem (3.43)'teki gibi gösterilebilmektedir:

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{h}{\|u\|_i} \quad (3.43)$$

(3.42) ve (3.43) denklemleri birleştirilirse, değişken katsayısı D 'yi bulabilmek için bir denklem türetilebilmektedir:

$$D = Ah\|u\|_i \quad (3.44)$$

Burada A , boyutsuz bir sabit olup 2.0 değerinin kullanılması uygun görülmektedir. Değişken algoritma tam bir kernel katkısına ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte, çoğu zaman serbest yüzeydeki ve bunlara komşu durumdaki parçacıklar fiziksel olmayan kararsızlıklara potansiyel olarak yol açan serbest yüzey tahmininde hatalara sebebiyet verebilecekleri için tam bir kernel katkısını elde edemezler (DualSPHysics User Guide, 2016).

Fick'in kanunları direkt olarak uygulandığında ise, serbest yüzeydeki geniş konsantrasyon gradyanlarına bağlı olarak akışkan kütleindeki parçacıkların hızlı bir difüzyona uğraması kaçınılmaz olmaktadır. Bu etkiye karşı koyabilmek amacı

ile serbest yüzeye teğet, kaymaya sınırlar dahilinde izin verebilen, normal yüzeye difüzyonu limitleri içerisinde kabul eden serbest yüzey düzeltmesi önerilmiştir (Lind ve ark., 2012). Dolayısı ile bu düzeltme sadece serbest yüzey yakınında kullanılmaktadır, ayrıca ilk olarak Lee ve ark. (2008) tarafından önerilmiş ve denklem (3.45) ile parçacık sapmasının değeri hesaplanmıştır:

$$\nabla \cdot \mathbf{r} = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \mathbf{r}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (3.45)$$

3.3. DualSPHysics Programı

DualSPHysics, SPHysics koduna dayalı SPH problemlerinin çözümünde kolaylık sağlayan bir programdır. Program kodları Johns Hopkins Üniversitesi (ABD), Vigo Üniversitesi (İspanya), Manchester Üniversitesi (İngiltere) ve Roma La Sapienza Üniversitesi'ndeki araştırmacılar tarafından açık kaynaklı SPH modeli olan SPHysics'ten yararlanarak ortaya çıkarılmıştır. SPHysics Fortran yapısına dayanan kodlamalar içermektedir (DualSPHysics User Guide, 2016). Bu kodlamalar ilk olarak Gomez-Gesteira ve Dalrymple (2004) tarafından kıyı yapıları etkileşim problemlerinde, Dalrymple ve Rogers (2006) tarafından dalga kırılmasının farklı problem türlerinde, Crespo (2008) tarafından baraj yıkılması akım problemlerinde ve Rogers ve ark. (2009) tarafından hareketli dalgakıranların tasarım problemlerinde test edilmiştir. DualSPHysics paket programı şu an ücretsiz olup, C++ ve CUDA kodlamalarını içeren bir dizi dosya bulundurmaktadır.

SPHysics kodları problem çözümlerinin yüksek çözünürlük ile simüle edilmesine olanak tanımasına rağmen gerçek mühendislik problemlerine uygulanmasında çalışma sürelerinin uzunluğu bakımından yapılan işlemler oldukça güçleşmektedir. Donanım ve paralel işlemci özellikleri SPHysics kodlamalarının mühendislik uygulamalarını daha kullanışlı hale getirmektedir. Bilgisayar oyun endüstrisinde kullanılan GPU bilimsel çalışmalar ve sayısal modellemelerde

yüksek performanslı hesaplamada önemli bir katkı sağlamaktadır. GPU'lar çok sayıda veriden yararlanabilmek amacı ile tasarlanmışlardır.

Bilgisayarların çözüm güçleri son yıllarda geleneksel CPU'lara kıyasla çok daha hızlı gelişme göstermiştir. Böylece karmaşık problemlerin çözülmesi konusunda daha hassas analizler yapılmaya başlanmış, üç boyutlu çözümlemeler kolaylaşmıştır. CUDA C/C++ programlama dilinin bazı uzantıları kullanılarak, CPU hesaplamalarında paralel programlama mantığı uygulanabilmektedir. Farklı disiplinlerdeki araştırmacılar CUDA dilini kullanarak yüksek performanslara ulaşabilmektedirler. Böylece, paralel hesaplama güçleri simülasyonlar sırasında her bir parçacık için aynı döngüleri oluşturabilen SPH yöntemlerine çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Gesteira ve ark., 2010).

SPHysics kodlarının modellemelerde sağladığı güvenilirlik ve tutarlılık ile birlikte CPU ve GPU özelliklerine göre en iyi yaklaşımlar sağlanmakta, optimizasyon uygulanarak en iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca daha iyi optimizasyonlar uygulayabilmek adına parçacıkların bellek sistemine daha hızlı erişim sağlayabilmesi için yeniden sıralanmakta ve bitişik parçacık listelerine en iyi yaklaşım sağlanmış olmaktadır (Dominguez ve ark., 2011). Aslında CUDA GPU'lardaki parçacıkların paralel kontrol edilmesini yerine getirmektedir.

Çoklu GPU-SPH programının tekli GPU-SPH programına göre daha başarılı sonuçlar verdiği, fakat parçacık sayısı arttıkça çözümün zorlaştığı belirtilmektedir (Valdez-Balderas ve ark., 2013). Dolayısı ile bilgisayarın özelliğinin çözüm gücünü doğrudan etkilediği ortaya konmaktadır. DualSPHysics kodları kullanılarak CPU ve GPU için en etkili uygulamalar arasında yapılan karşılaştırma sonucunda elde edilen performans verileri donanım özellikleri olarak Çizelge 3.2'de ve performans sonuçları ise Çizelge 3.3'te gösterilmektedir (Dominguez ve ark., 2013).

Çizelge 3.2. Donanım özellikleri (Dominguez ve ark., 2013)

Donanım	Özellikler
CPU-1	Intel Core i7 940 2.93 GHz DDR3 RAM (Tek Çekirdekli)
CPU-2	Intel Core i7 940 2.93 GHz DDR3 RAM (8 threads)
GPU-1	Nvidia GTX 480 1.37 GHz GDDR5 RAM
GPU-2	Nvidia Tesla 1060 1.3 GHz GDDR3 RAM

Çizelge 3.3. Performans sonuçları (Dominguez ve ark., 2013)

Donanım	Parçacık sayısı	Toplam zaman(s)	Zaman Adımı	Her bir saniyede hesap adımı	CPU-1'e göre bağlı hızı	CPU-2'ye göre bağlı hızı
CPU-1	503.492	14.6	19,855	0.4	1.0	-
CPU-2	503.492	3.2	19,806	1.7	4.6	1.0
GPU-1	503.492	0.5	19,832	10.2	26.8	5.8
GPU-2	503.492	0.3	19,830	21.2	55.7	12.2

Turhan ve ark. (2016) bir CPU ve iki farklı GPU olmak üzere üç farklı donanım özelliğine sahip bilgisayarda baraj yıkılması akım problemini simüle etmişler ve çözüm performanslarını karşılaştırmışlardır. Farklı işlemci ünitelerinin donanım özellikleri Çizelge 3.4'te gösterilmektedir (Turhan ve ark., 2016).

GPU'lar aslında grafik kartlarının güçlü bir paralel programlama seçeneği sunmaları sebebiyle SPH modellemelerini hızlandırmak için tercih edilmektedir. Bu yeni teknoloji, SPH yöntemini kullanarak gerçek mühendislik problemlerinin incelenmesini mümkün kılabilir. GPU'ların hesaplama gücü simülasyon

boyunca her bir parçacık için aynı döngülerin paralelleştirilebilmesini ve SPH yöntemlerine de kolaylıkla uygulanabilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 3.4. Farklı işlemci üniteleri (Turhan ve ark., 2016)

<i>Farklı Bilgisayar İşlemci Üniteleri</i>	<i>İşlemci Özelliği</i>	<i>Ekran Kartı Özelliği</i>	<i>Bellek Kapasitesi</i>
CPU	Intel® Core (TM) i5-3470 CPU, 3.20 Ghz	Intel ® HD Graphics, Grafik Belleği 2 GB	4 GB Dahili Bellek
GPU-1	Intel® Core (TM) i7-4700 MQ CPU, 2.40 Ghz	NVIDIA GeForce GT 755M, 4 GB Grafik Belleği	16 GB Dahili Bellek
GPU-2	Intel® Core (TM) i7-4790 CPU, 3.60 Ghz	NVIDIA GeForce GTX 970 STRIX, GDDR5, 256 Bit, 4 GB Grafik Belleği	16 GB Dahili Bellek

Donanım özelliği yüksek grafik, dahili bellek destekli ekran kartı özelliğine sahip bilgisayar işlemci üniteleri daha basit CPU'lara göre yaklaşık 800.000 maksimum parçacık sayısında parçacıklı, ağırsız Lagrange yöntemli yaklaşımlarla simüle edilmiş, çözüm sürelerinin yaklaşık 40-50 kat hızlandığı ifade edilmiştir. Çözüm süresi t (s) ile parçacık sayısı arasında elde edilen grafik Şekil 3.4'te görülebilmektedir (Turhan ve ark., 2016).

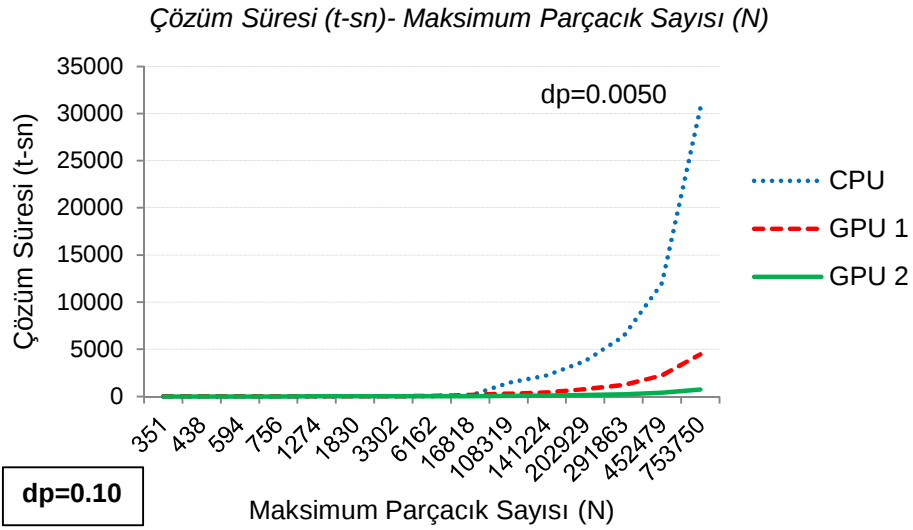
DualSPHysics programı zaman adımları yönünden sayısal entegrasyon ifadelerinin bir seçimini içermektedir. Momentum ifadesine v_{ab} , yoğunluk ifadesine ρ_a , konum ifadesine de r_a denilirse denklem takımı şekline dönüştürülmüş formu aşağıdaki gibi gösterilebilir (DualSPHysics User Guide, 2016):

$$\frac{dv_a}{dt} = F_a, \quad \frac{d\rho_a}{dt} = D_a, \quad \frac{dr_a}{dt} = V_a \quad (3.46)$$

Bu denklemler Verlet, Symplectic veya değişebilen zaman adımı metotları yardımı ile uygulanabilmektedir.

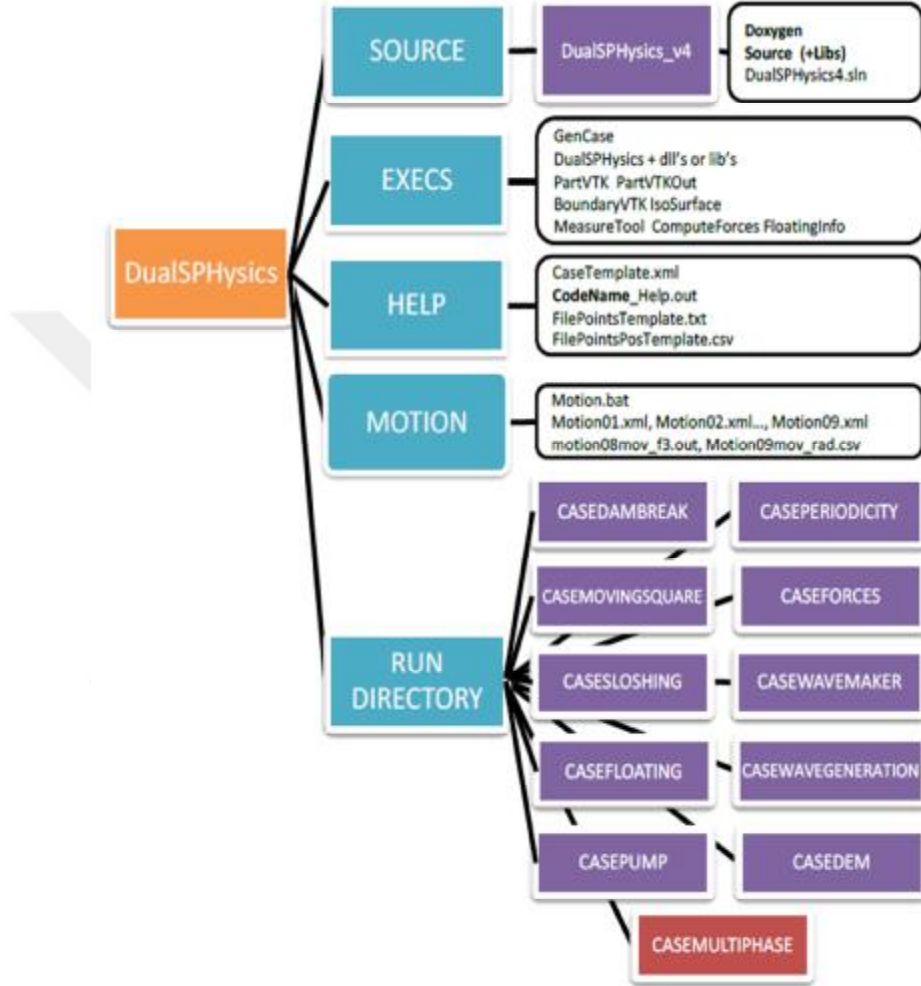
DualSPHysics programında, sınır olarak tabir edilen ifadeyi akışkan parçacıklarının ayrı bir set olarak göz önüne alındığı parçacıklar kümesi şeklinde tanımlamak mümkündür. Program rijit katı ve periyodik açık sınır durumları için ciddi derecede kolaylıklar sağlamaktadır. Bu sınır şartlarını aşağıda görüldüğü gibi dört farklı durumda açıklayabiliriz (DualSPHysics User Guide, 2016):

- Ø Dinamik sınır şartı,
- Ø Periyodik açık sınır şartı,
- Ø Önceden oluşturulmuş sınır hareketi,
- Ø Akışkan kaynaklı hareketli nesneler.



Şekil 3.4. Parçacıklar arası mesafe (dp) değişkenliklerine göre çözüm süresi grafiği
(N=351- 753750) (Turhan ve ark., 2016)

DualSPHysics programının uygulanması sırasında Şekil 3.5'te verilen dizin ağacı ve dosyalar kullanılmaktadır (DualSPHysics User Guide, 2016).



Şekil 3.5. DualSPHysics dizin ağacı ve gerekli dosyalar (DualSPHysics User Guide, 2016)

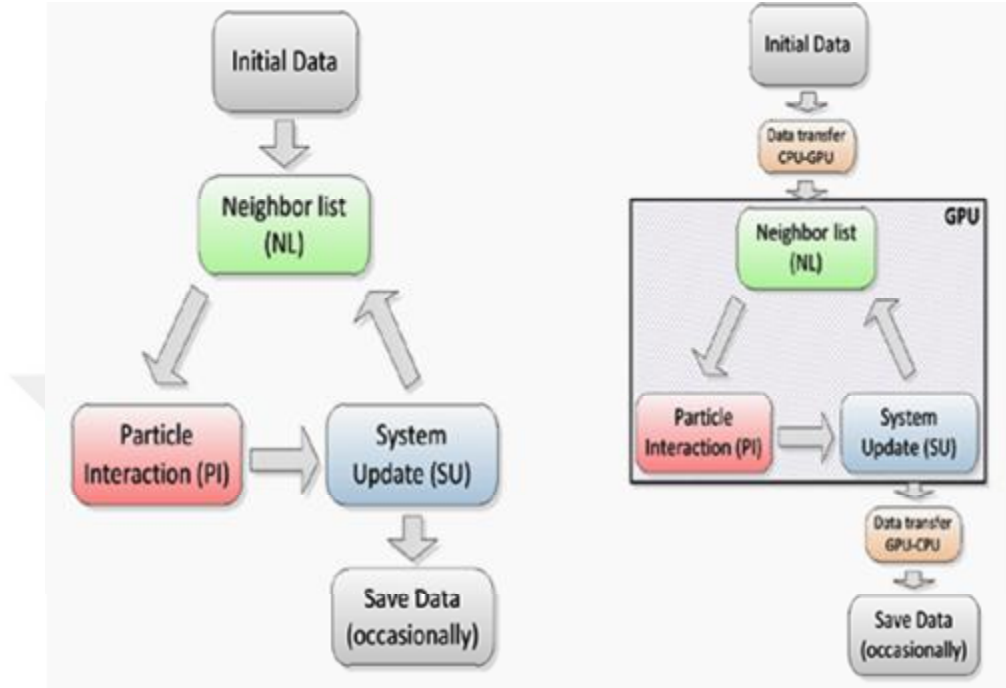
DualSPHysics programı animasyon özellikleri ile birlikte gerçek yaşamdaki mühendislik problemlerinin çözümü için oldukça kullanışlı olmaktadır. SPHysics yönteminde de olduğu gibi DualSPHysics programının uygulanmasını üç ana aşamaya ayırmak mümkündür (Gesteira ve ark., 2010):

- Ø Komşu liste düzeninin oluşturulması,
- Ø Parçacıklar arasındaki kuvvetlerin hesaplanması (momentum ve süreklilik denklemlerinin çözülmesi şeklinde),
- Ø Fiziksel niceliklerin sonraki zaman adımında güncellenmesi.

Modellemenin oluşturulması, iterasyon adımları ile söz konusu aşamaların uygulanması anlamına gelmektedir. GPU uygulaması CPU versiyonuna kıyasla bazı önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. Başlıca farklılık parçacıkla ilgili tüm bileşim noktalarında olduğu gibi tüm işlemlerde paralel uygulamaların olmasıdır. DualSPHysics CPU veya GPU kullanılarak ele alınacak benzer uygulamalarda da istenen sonucu vermektedir. DualSPHysics sadece Nvidia özellikli GPU ekran kartlarının kullanıldığı workstations bilgisayarlarda değil aynı zamanda CUDA uyumlu GPU olmayan özellikteki bilgisayarlarda da kullanılabilir. CPU versiyonu OpenMP API özelliği kullanılarak paralel bir şekle dönüştürülebilmektedir.

CPU ve GPU ile oluşturulacak spesifik optimizasyonların uygulamaları iki cihaz için de kullanımda yalnızca küçük kaynak kodu farklılıkları yaratsa dahi her ikisi de ortak ana kod yapısına sahiptir. Bu sebeple, hata ayıklama veya sürdürülebilirlik açısından işlemler kolaylaşmakta, hesaplama zamanı ve sonuçların karşılaştırması daha kısa bir zaman almaktadır (Dominguez ve ark., 2013).

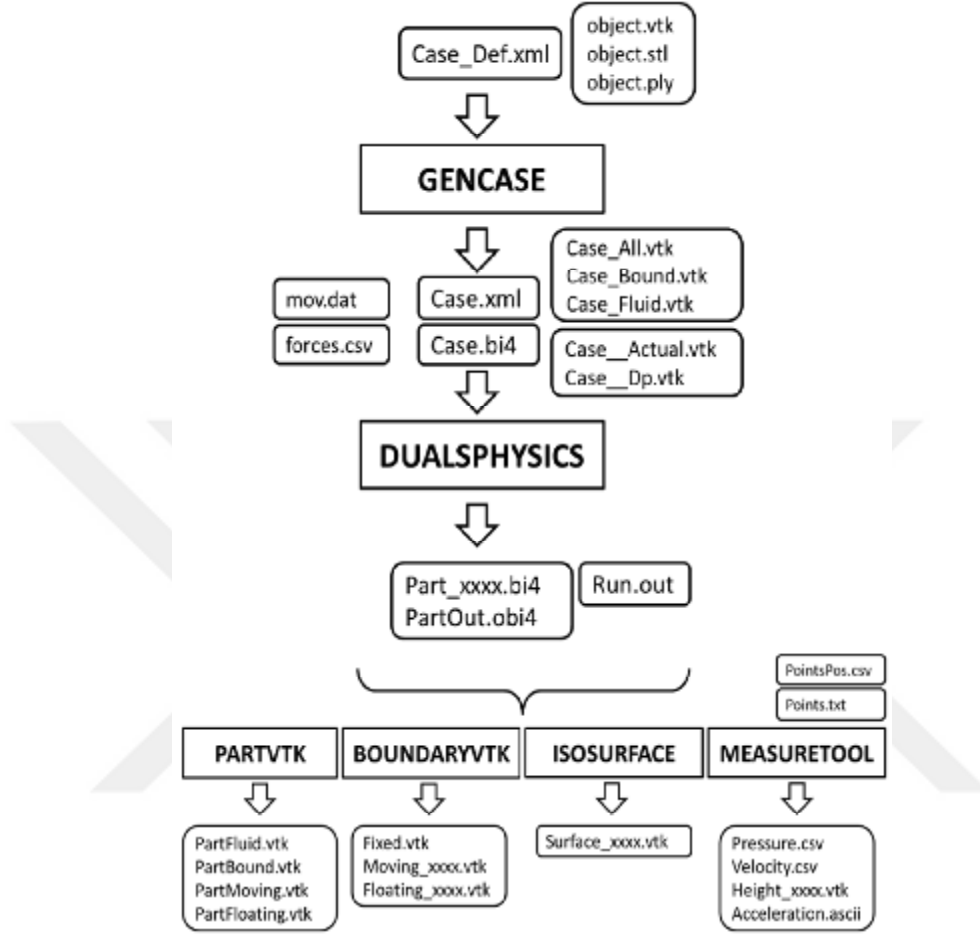
Şekil 3.6'da hem CPU hem de GPU için akış diyagramları görülmektedir (DualSPHysics User Guide, 2016). GPU ekran kartlarının paralel hesap yapabilme gücü modellemelerde önemli derecede artış sağlayabilmekte fakat özellikle iki boyutlu yüksek çözünürlük gerektiren geniş alanların modellenmesinde hassaslık problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu yüzden hesaplamalarda göreceli olarak küçük bir parçacığın dp değişken parçacıklar arası mesafesini gerektiren çok sayıda model şekilleri bulunmaktadır (Gesteira ve ark., 2010).



Şekil 3.6. CPU (solda) ve Toplam GPU (sağda) uygulamalarının akış diyagramı (DualSPHysics User Guide, 2016)

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi DualSPHysics çalıştırılmasında izlenecek adımları şu şekilde açıklamak mümkündür (DualSPHysics User Guide, 2016):

- Ø DualSPHysics paket programı içerisinde Source, Execs, Help, Motion, Run_Directory klasörleri bulunmaktadır. Run_Directory klasörleri içerisinde CaseDamBreak, CasePeriodicity, CaseMovingSquare, CaseForces, CaseSloshing, CaseWavemaker, CaseWaveGeneration, CaseFloating, CasePump, CaseDem, CaseMultiPhase örnek dosyaları yer almaktadır.



Şekil 3.7. DualSPHysics çalışma akış şeması (DualSPHysics User Guide, 2016)

- Ø Yapılması düşünülen modellemeye göre bu dosyaların içerisindeki Case_Def.xml veya dışarıdan herhangi bir programda uygulanmış .vtk, .stl, .ply kısımları düzenlenerek GenCASE işlemine girdi olarak verilebilmektedir.
- Ø GenCase işlemindeki çıkış verileri Case.xml, Case.bi4, Case_All.vtk, Case_Bound.vtk, Case_Fluid.vtk, Case_Actual.vtk, Case_Dp.vtk verileri de DualSPHysics programına girdi verisi olarak işlenebilmektedir.

- Ø DualSPHysics modellemesi sonucunda Part_xxxx.bi4, PartOut.ob4, Run.out verileri oluşmaktadır. Bütün bu işlemler CPU veya GPU destekli bilgisayar özelliklerine göre ayrı ayrı uygulanabilmektedir.
- Ø PartVTK, BoundaryVTK, IsoSurface, MeasureTool aşamaları ise; sonuç verilerinin görsel ve ölçüm gerektiren işlemleri için *ParaView* programında uygulanmaktadır (DualSPHysics User Guide, 2016).

DualSPHysics programında dosyalar üç farklı formatta karşımıza çıkmaktadır. Bunları şu şekilde belirtebiliriz (DualSPHysics User Guide, 2016):

- Ø XML Dosyası
- Ø Binary Dosyası
- Ø VTK Dosyası

XML dosyası açılımını *EXtensible Markup Language (XML)* ifadesinden almaktadır. Herhangi bir yazılım ve donanımla uyumlu olabilecek veri formatını içermektedir. Standart bir yazım editörü kullanılarak kolayca yazılabilmekte veya yüklenebilmektedir. Ayrıca bilgiyi düzenlemek için bir dizi etiket yapısına sahiptir. SPH çözümlemesinde bu format genellikle giriş dosyalarının işlem süreci öncesi düzenlenmesinde kullanılmaktadır (Gesteira ve ark., 2010).

Binary dosyası SPHysics kodu içerisinde çıkış verileri dökümanlarda bu formatla yazılmakta, genellikle ASCII format yapısı kullanılmaktadır. ASCII dosyaları görüntülemeye ve uyumluluk açısından bazı konularda avantajları olmakla birlikte, birtakım dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Örneğin düz yazı formatında veri depolama binary formatında benzer depolamadan en aşağı altı kat daha fazla bellek kapasitesi istemektedir.

ASCII ile okunan veya yazılan veri daha zahmetli olmakta (iki kat büyüklük) ve gerçek değerlerden yazıya dönüşümün yapıldığı zamanlarda hassaslık önemli derecede azalmaktadır. DualSPHysics programı yüksek sayıda parçacıkla modelleme oluşturmaya izin verdiği için, binary dosya formatı söz konusu problemlerdeki sorunları çözebilmek adına gerekli olmaktadır.

Binary formatı dosya hacmini azaltmakta ve zaman bu sayede modellemeyi oluşturmak için harcanabilmektedir. Programda dosya formatı BINX4 (.bi4) olarak gösterilmektedir. Bu dosyalar parçacığın belirlenmek istenilen özelliklerine göre sadece bir kısım bilgiyi içerebilecek şekilde düzenlenmektedir. Örneğin hal denklemi ile yoğunluktan başlanarak hesap yapıldığından basınç dosyanın içerisine dahil edilmez (DualSPHysics User Guide, 2016).

Genel olarak BINX4 dosya düzenlemesinin faydaları (Gesteira ve ark., 2010):

- Ø Hafıza depo alanını azaltmaktadır,
- Ø Hızlı erişim sağlamaktadır,
- Ø Hassaslık ve güvenilirlik daha fazladır,
- Ø Farklı işletim sistemlerine uyumluluğu yüksektir,
- Ø Ek bilgiye imkan vermektedir.

VTK dosyası Bu format şekli ile temel olarak sonuçların görüntülenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca sadece parçacık konumları değil aynı zamanda modellemeler yoluyla gerekli parçacıkların fiziksel büyüklükleri de elde edilebilmektedir.

VTK dosya düzeni; skaler, vektörel, tensör, bünye gibi bazı veri şekillerini ve aynı zamanda poligon azaltma, mesh düzleştirme, kesme, görsel hale getirme, Delaunay üç köşe oluşturma gibi farklı algoritmaları desteklemektedir. VTK veri setlerinin topolojisini, geometrik olarak veri seti yapısını, herhangi diğer kullanışlı bilgileri içeren ve verileri tanımlayan bir bağlantı yapısına sahiptir. Genellikle

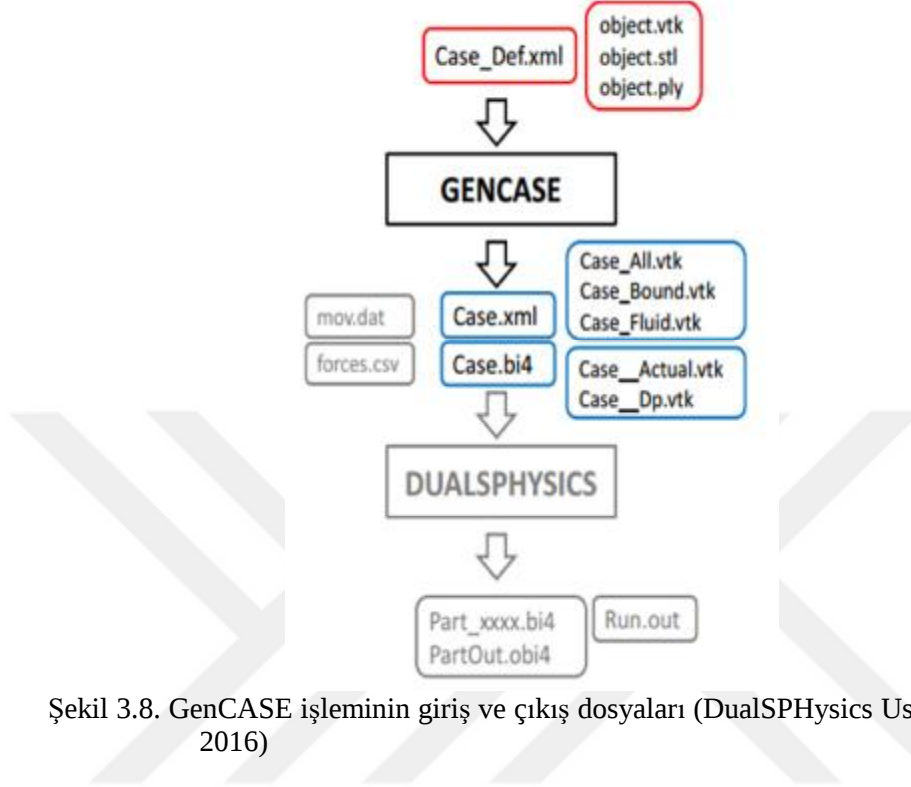
Polydata'nın VTK şeklidir ki okuma ve yazma işlemlerinde kolaylık olması bakımından ikili binary formatı olarak kullanılmaktadır (DualSPHysics User Guide, 2016).

3.3.1. DualSPHysics Pre-processing (İşlem Öncesi)

GenCASE olarak adlandırılan işlem DualSPHysics'te modellemenin, hareketli objelerin hareketinin, uygulama parametrelerinin başlangıç konfigürasyonunu tanımlamada kullanılmaktadır. Tüm bu bilgiler XML formatında Case_Def.xml isimli bir giriş dosyasında yer almaktadır. GenCASE çalıştırıldıktan sonra iki tane çıkış dosyası oluşmaktadır. Bunlar Case.xml ve Case.bi4 dosyaları olup, bu dosyalar aynı zamanda DualSPHysics kodları için giriş dosyalarını oluşturmaktadır (Şekil 3.8).

Case.xml sistem konfigürasyonunun tüm parametrelerini içermekte hareketli kütlenin özellikleri, hareketli sınırların hareket tanımlaması, sistem içerisinde parçacıkların sayısı, (interpolasyon uzunluğu, referans yoğunluk, yerçekimi ivmesi, hesaplama basınç katsayısı, speed of sound) gibi önemli değişkenlerin uygulamalarını ele almaktadır. Case.bi4 ise parçacık sayısı, konum, hız ve yoğunluk gibi parçacıkların başlangıç durumlarını içermektedir.

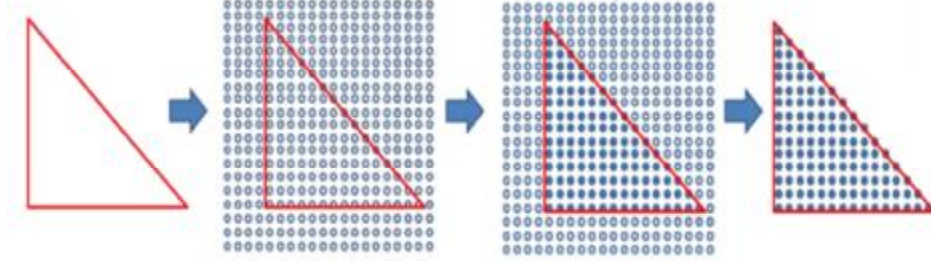
GenCASE işlemi parçacıkların konumunu oluşturmak için üç boyutlu kartezyen bir mesh yapısını ele almaktadır. Parçacık mantığı ile herhangi bir objenin tanımlanması mümkün olmaktadır. Parçacıklar üç boyutlu kartezyen mesh yapısının düğüm noktaları ile birleştirilmektedir.



Şekil 3.8. GenCASE işleminin giriş ve çıkış dosyaları (DualSPHysics User Guide, 2016)

Başlangıçta obje etrafındaki mesh düğümleri ve sonra da parçacıklar istenilen geometriyi çizebilmek için sadece gerekli olan düğümlerin içerisinde oluşturulmaktadır (Şekil 3.9). Tüm parçacıklar düzenli bir kartezyen ızgara üzerine yerleştirilmektedir. Çalışmanın geometrisi parçacıklar arası mesafenin bağımsız bir şekilde tanımlanması şeklinde oluşturulmaktadır.

dp ile kolaylıkla parçacıkların farklı sayısında her bir çalışmanın ayrıştırılmasına müsaade edilmektedir. Daha da fazlası, GenCASE işlemi çok hızlı olduğundan CPU destekli olarak saniyeler içerisinde milyon tane parçacığın oluşturulmasına imkan vermektedir. Çok karmaşık geometriler çok fazla sayıda komutu içermesi sebebi ile kolayca oluşturulabilmektedir (DualSPHysics User Guide, 2016).



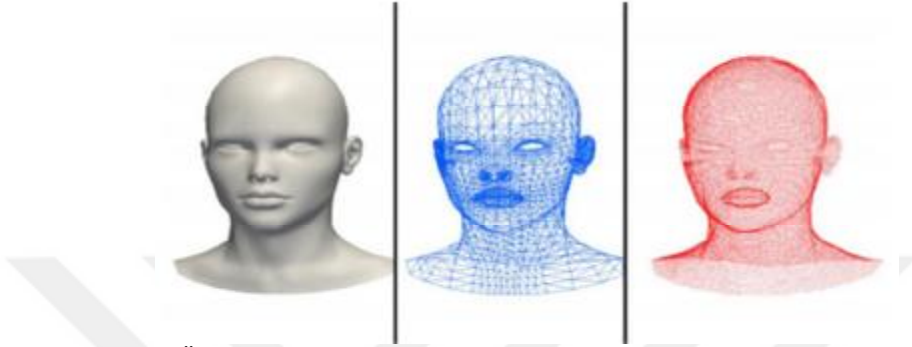
Şekil 3.9. GenCASE işlemi kullanılarak parçacık yolu ile iki boyutlu bir üçgen şeklinin oluşturulması (DualSPHysics User Guide, 2016)

Noktasal, çizgi, üçgen, dörtgen, çokgen, piramit, prizma, kutu, beaches, küre, elips, silindir, dalga gibi farklı objeler tanımlanabilmektedir. Daha karmaşık geometrilerin olduğu durumlarda, haricen objeler 3DS dosyaları veya CAD dosyalarından alınabilmektedir. Bu da daha gerçekçi geometrilerin GenCASE işlemi içerisine uyarlanması sağlamaktadır (Crespo ve ark., 2013). *.stl*, *.ply* veya *.vtk* formatındaki herhangi bir obje farklı üçgenlere ayrılabilir ve herhangi bir üçgen GenCASE işlemi kullanılarak parçacıklara dönüştürülebilmektedir (Şekil 3.10).

GenCASE'in çalıştırılma opsiyonlarını aşağıdaki şekilde açıklamak mümkündür (DualSPHysics User Guide, 2016):

- Ø *-save:<values>*: Çıkış dosyalarının formatını belirlemektedir.
- Ø *+/-all* : Tüm opsiyonları seçmek veya çıkarmak için kullanılmaktadır.
- Ø *+/- binx4* : Başlangıç konfigürasyonu için binary formatı şeklidir.
- Ø *+/-vtkall* : Başlangıç konfigürasyonunun tüm parçacıkları ile vtk formatıdır.
- Ø *+/-vtkbound* : Başlangıç konfigürasyonunun tüm sınır parçacıkları ile vtk formatıdır.

Ø +/-vtkfluid : Başlangıç konfigürasyonunun tüm akışkan parçacıkları ile vtk formatıdır.



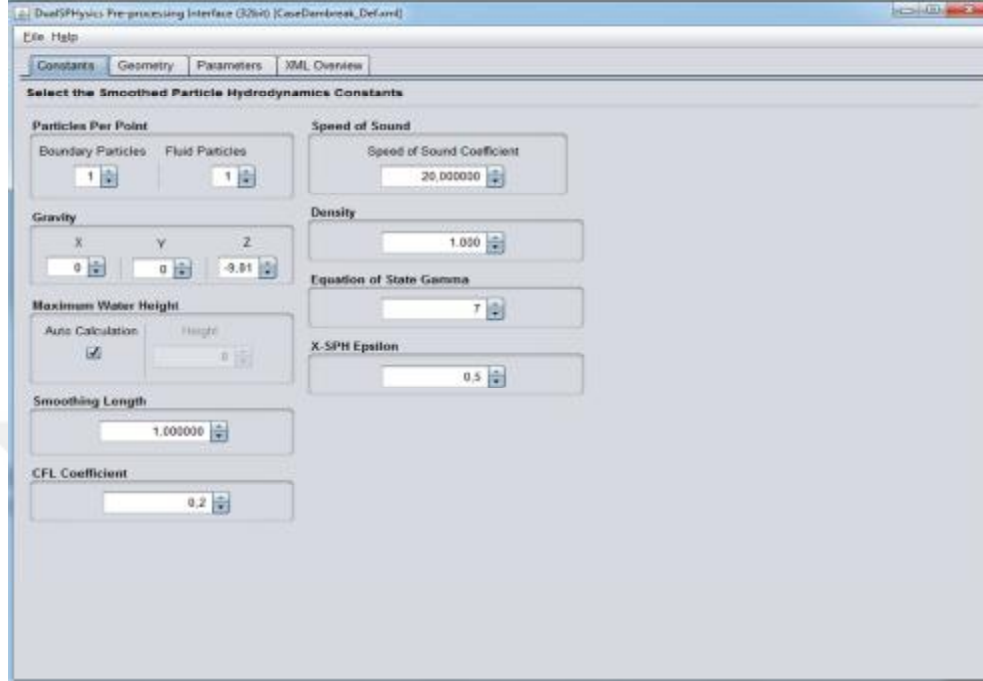
Şekil 3.10. Üç boyutlu bir örneğin GenCASE işlemi kullanılarak DualSPHysics'e dahil edilmesi ve parçacıklara dönüştürülmesi (Crespo ve ark., 2013)

Örneğin *-save:all* ifadesi yazıldığında Case_All.vtk, Case_Bound.vtk ve Case_Fluid.vtk dosyaları oluşmaktadır. DualSPHysics programının genel algoritma yapısı aşağıda görülmekte olup, bunu üç ana başlıkta toplayabiliriz (DualSPHysics User Guide, 2016):

- Ø Farklı özelliklerin tanımlandığı kısım,
- Ø Geometrinin tanımlandığı kısım,
- Ø Konfigürasyon parametrelerinin girildiği kısım

Bunlara ek olarak yeni oluşturulmuş DualSPHysics Pre-processing Interface (DPI)-GenCase Graphical User Interface (GUI) konfigürasyonu ve başlangıç geometrisini tanımlayabilmek için kullanıcıya yardımcı olan bir arayüz içermektedir.

Şekil 3.11'de DPI ile tanımlama özelliklerin girildiği arayüz formatı görülebilmektedir (Longshaw ve Rogers, 2014).

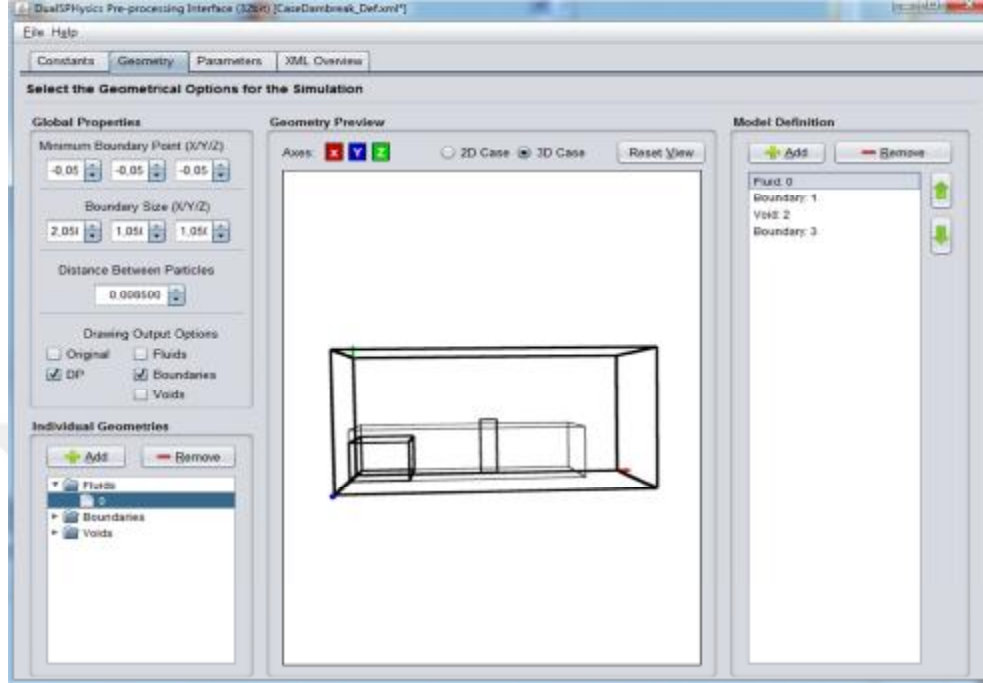


Şekil 3.11. DPI ile tanımlanan objelerin özelliklerinin girildiği arayüz (Longshaw ve Rogers, 2014)

Şekil 3.12’de DPI ile tanımlanacak objenin geometrisinin girildiği arayüz formatı bulunmaktadır (Longshaw ve Rogers, 2014).

3.3.2. DualSPHysics Processing (İşlem Kısmı)

SPH formülasyonunun uygulanmasındaki ana kod kısmı DualSPHysics olduğundan DualSPHysics’i çalıştırmak için giriş verileri Case.xml ve binary dosyası olan Case.bi4’tür. Çıkış dosyaları ise Part0000.bi4, Part0001.bi4, Part0002.bi4....PartOut.bi4 gibi modellemede farklı zamanlarda alınan parçacık bilgisinin binary formatındaki durumunu içermektedir (Longshaw ve Rogers, 2014).



Şekil 3.12. DPI ile tanımlanacak objenin geometrisinin girildiği arayüz (Longshaw ve Rogers, 2014)

Aynı zamanda modellemenin bir özetini kapsayan Run.out dosyası da mevcuttur (Şekil 3.13).

DualSPHysics'i çalıştırma opsiyonları (Longshaw ve Rogers, 2014):

- Ø -cpu: CPU destekli uygulamadır.
- Ø -gpu: GPU destekli uygulamadır ve cihaz tanımlıdır.
- Ø -sv:[formats...] Çıkış formatını belirlemektedir.

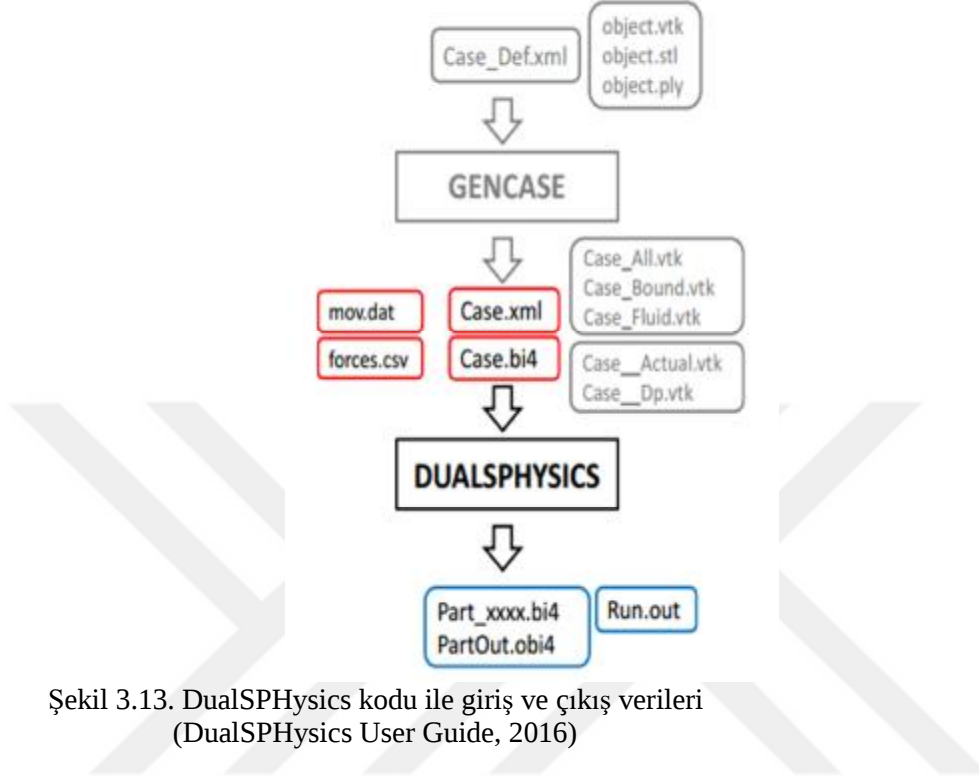
none: Parçacık ilgili hiçbir dosya oluşturulmaz.

binx: Binary dosyası oluşturur.

vtk : VTK dosyaları oluşturur.

ascii: ASCII dosyaları oluşturur (SPHysics'te bu Part_xxxx şeklindedir.)

csv : CSV dosyaları oluşturur (Excel).



Şekil 3.13. DualSPHysics kodu ile giriş ve çıkış verileri (DualSPHysics User Guide, 2016)

- Ø -svres:<0/1> Uygulama sürecinin özetini içeren bir dosya oluşturur.
- Ø -svtimers:<0/1> Her bir ayrı süreç için zamanlamayı oluşturur.
- Ø -partbegin:begin[:first]---Tekrar başlatma özelliğidir.

Bir sonraki adımdan devam edilmektedir.

- Ø tmax:<float> Modellemenin maksimum zamanını göstermektedir.
- Ø -tout:<float> Çıkış dosyalarının zaman aralığını belirtmektedir.

3.3.3. DualSPHysics Post-Processing (İşlem Sonrası)

3.3.3.1. Çıkış Verisi Parçacık Görselleştirme

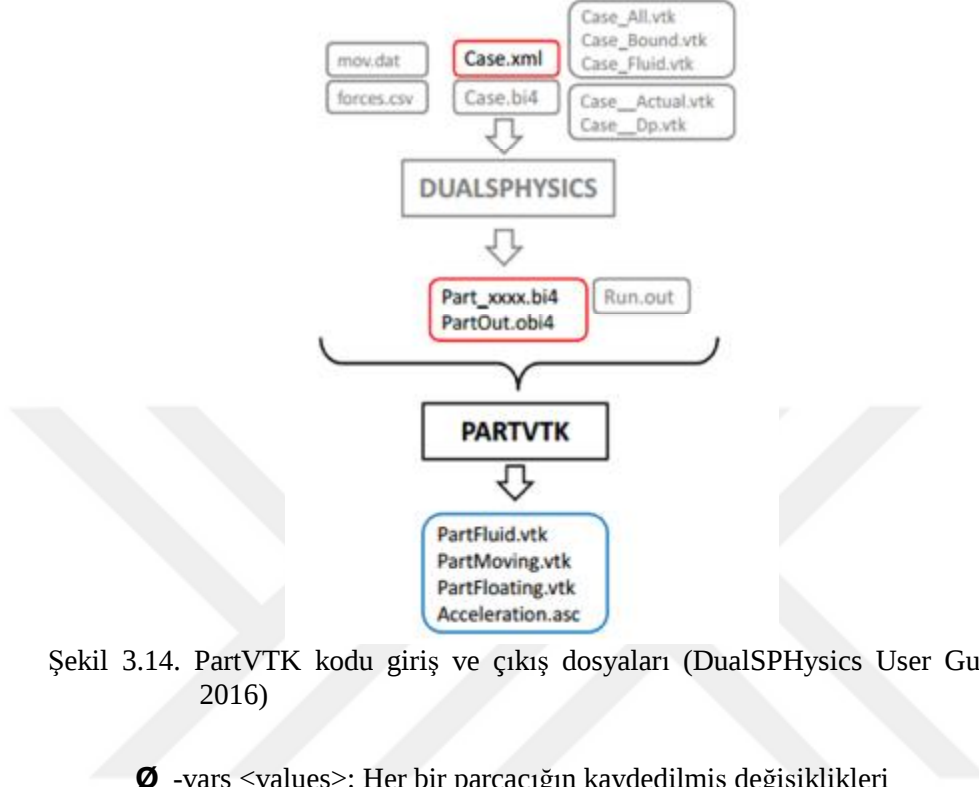
PartVTK kodu, analizi yapılan veya görselleştirilmiş DualSPHysics çıkış binary dosyalarının farklı formatlara dönüştürülmesinde kullanılmaktadır. Dolayısı ile DualSPHysics çıkış dosyaları olan binary dosyaları (.bi4) bu süreçte yani

post-processing kısmında PartVTK kodu için giriş dosyalarını oluşturmaktadır. (Şekil 3.14)

Çıkış dosyaları VTK-binary (-savevtk), CSV (-savecsv) veya ASCII (-saveascii) şeklindedir. Bu yolla modelleme sonuçları daha önceden bahsedilen *Paraview* programı yardımı ile görselleştirilebilmektedir.

PartVTK çalıştırma opsiyonları (DualSPHysics User Guide, 2016):

- Ø -savevtk<file.vtk>: onlymk, onlyid, onlytype seçenekleri ile birlikte verilen filtreye göre parçacıklarla vtk (polydata) dosyaları oluşturur.
- Ø -savecsv<file.csv>: Excel gibi tablo özelliğine dayanan CSV dosyaları oluşturur.
- Ø -onlymk: <values> Seçilmiş parçacıkların mk özelliğini belirlemektedir.
- Ø -onlytype:<values> Seçilmiş parçacıkların biçimini belirlemektedir.
- +/-all : Tüm seçeneklerin dahil edilmesi veya çıkarılması için,
- +/-bound : Sınır parçacıkları (Sabit, hareketli ve yüzen)
- +/-fixed : Sabit sınır parçacıkları
- +/-moving : Hareketli sınır parçacıkları
- +/-floating : Yüzen kütle parçacıkları
- +/-fluid : Akışkan parçacıkları (istisnasız)
- +/-fluidout : Kısmi akışkan parçacıkları



Şekil 3.14. PartVTK kodu giriş ve çıkış dosyaları (DualSPHysics User Guide, 2016)

Ø -vars <values>: Her bir parçacığın kaydedilmiş değişiklikleri belirlenmektedir.

- +/-all : Tüm seçeneklerin dahil edilmesi veya çıkarılması için,
- +/-vel : Hız
- +/-rho : Yoğunluk
- +/-press : Basınç
- +/-mass : Kütle
- +/-id : Parçacığın numarası
- +/-type : Cinsi (sabit, hareketli, yüzen, akışkan, akışkan harici)
- +/-mk : mk değeri
- +/-ace : İvme
- +/-vor : Türbülans

3.3.3.2. Sayısal Ölçümlerin Analizi

MeasureTool kodu, hesaplanmış birçok noktadaki farklı fiziksel niceliklerin ölçüm değerleri ile sonuçlar verebilmektedir. DualSPHysics'te elde edilen binary dosyaları (.bi4) MeasureTool kodu için giriş dosyası olmakta, çıkış dosyaları ise tekrar VTK-binary veya CSV veya ASCII dosyaları haline gelmektedir (Gesteira ve ark., 2010). Verilen bir konum etrafındaki komşu parçacıkların değerlerinin SPH vasıtası ile sayısal değerleri hesaplanabilmektedir (Şekil 3.15).

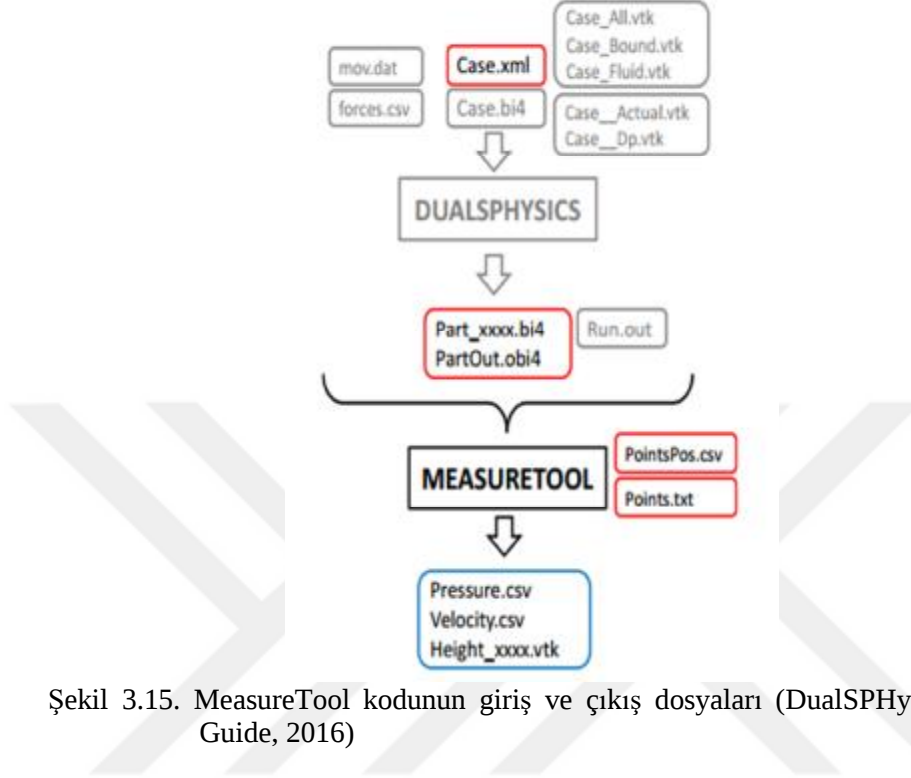
MeasureTool çalıştırma opsiyonları (DualSPHysics User Guide, 2016):

Ø -height[:<float>] :

Yükseklik değeri her bir x,y noktası için kütle değerlerinden hareketle hesaplanmaktadır. Yükseklik değerini elde etmek için referans kütle seçilmiş parçacıkların kütle değerlerine göre işlem yapılmaktadır. Hiçbir değer verilmediği zaman üç boyutluda 0.50; iki boyutluda 0.40 değeri alınmaktadır.

3.3.3.3. Sınırların Görselleştirilmesi

Sınır parçacıkları tarafından oluşturulan sınır geometrilerini görselleştirebilmek amacı ile farklı geometri dosyaları BoundaryVTK kodu kullanılarak oluşturulabilmektedir.

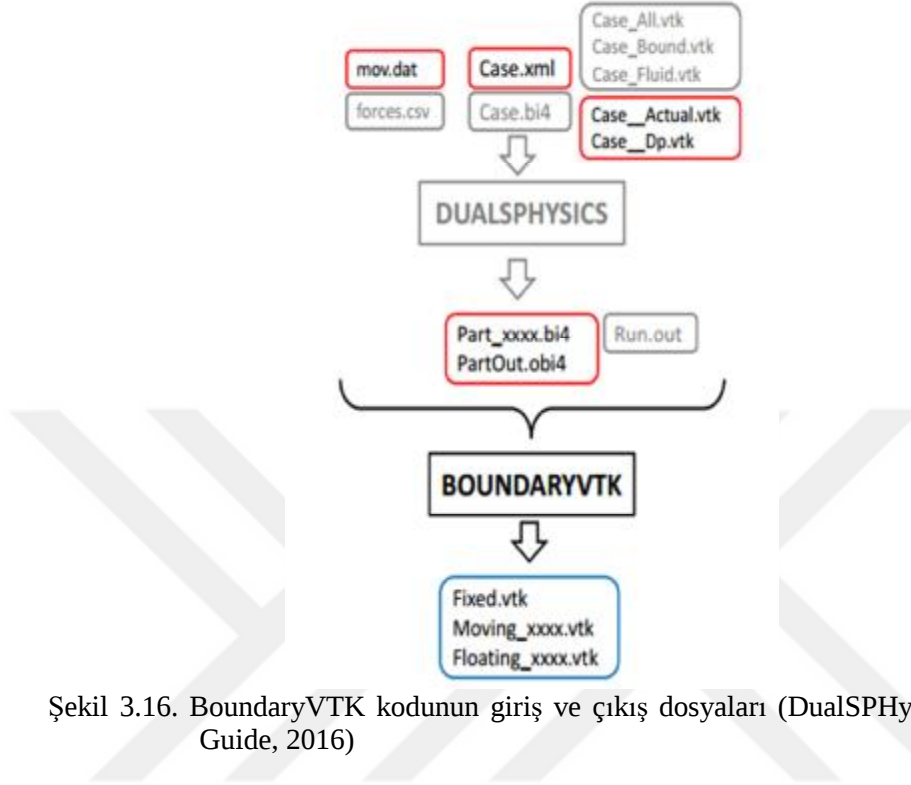


Şekil 3.15. MeasureTool kodunun giriş ve çıkış dosyaları (DualSPHysics User Guide, 2016)

Kod; üçgenler ve düzlemleri sınırları ile ifade edebilmek için kullanılmaktadır (Şekil 3.16).

3.3.3.4. Yüzey Gösterimi

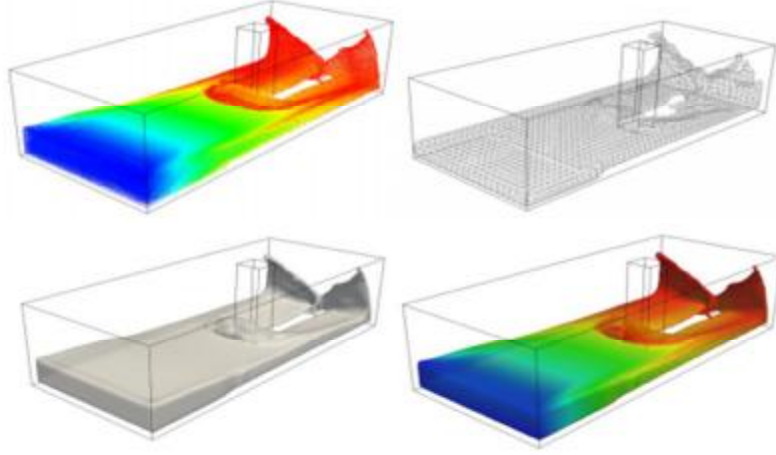
Çok fazla sayıda parçacığın kullanılması ve parçacıklar yerine yüzeylerin gösterilmesi ile modellenmenin görselleştirilmesi zenginleştirilebilmektedir. Yüzeyler oluşturulurken hareketli küpler algoritması kullanılmaktadır. Söz konusu bilgisayar tekniği ile üç boyutlu bir skaler alandan isosurface'in çoklu bir üçgen seti (mesh) ortaya çıkarılmaktadır.



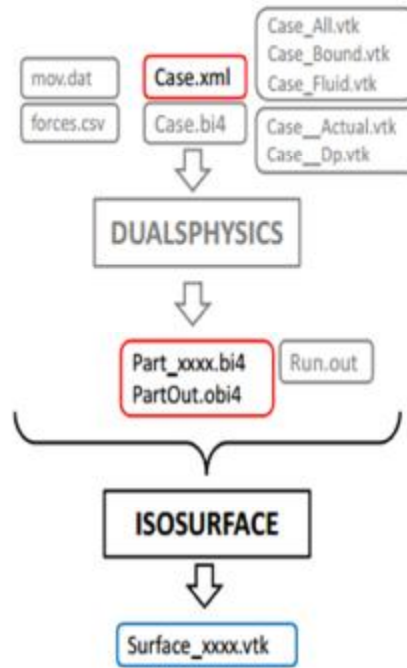
Şekil 3.16. BoundaryVTK kodunun giriş ve çıkış dosyaları (DualSPHysics User Guide, 2016)

Çalışmada SPH modelleri DualSPHysics programı içerisinde değerlendirilmiş, dikdörtgen bir deney düzeneğinde baraj yıkılması akım problemi mantığı ile ele alınmıştır. CaseDambreak data dosyası ismi ile oluşturulmuştur. Bunun haricindeki birçok data dosyası tüm modellerin kullanıcının isteğine göre şekil verebilmesi adına hazırlanmış örnek dosyalardır.

Örnek data dosyasındaki 300.000 parçacık kullanılarak oluşturulan üç boyutlu bir baraj yıkılması modellemesi Şekil 3.17’de görülmektedir. Şekil 3.18’de ise IsoSurface kodunun giriş ve çıkış dosyaları verilmektedir (DualSPHysics User Guide, 2016).

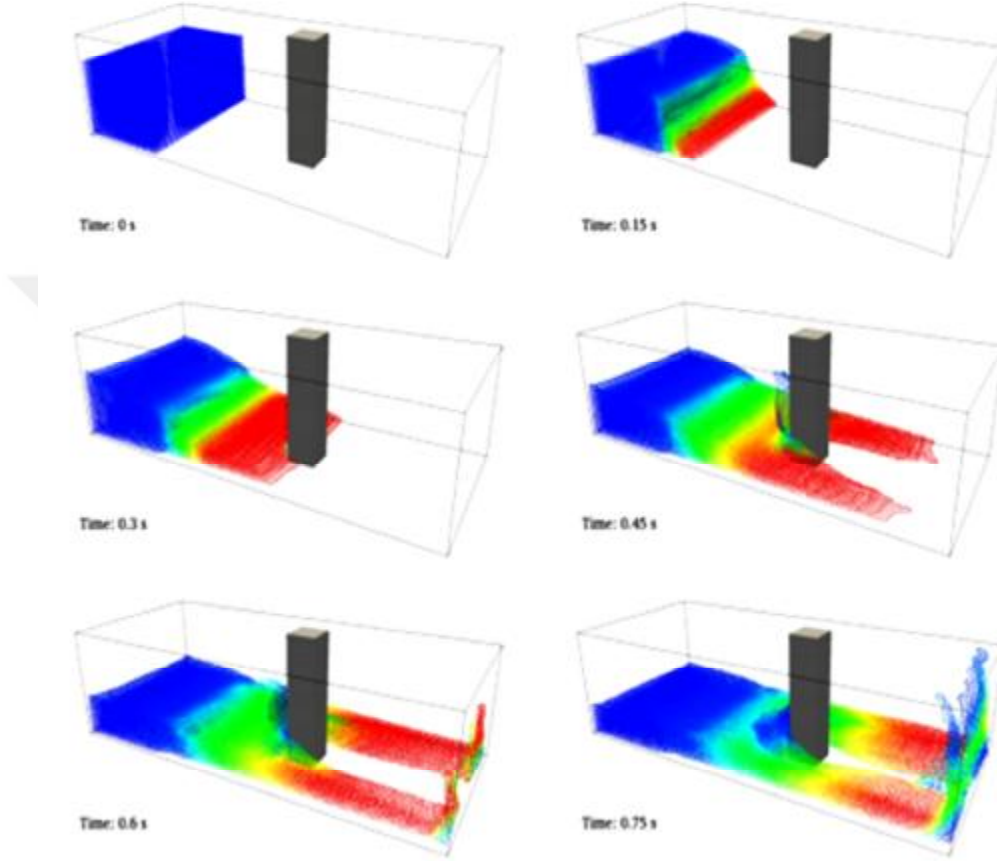


Şekil 3.17. Noktalardan yüzeylere dönüşüm şekli (DualSPHysics User Guide, 2016)



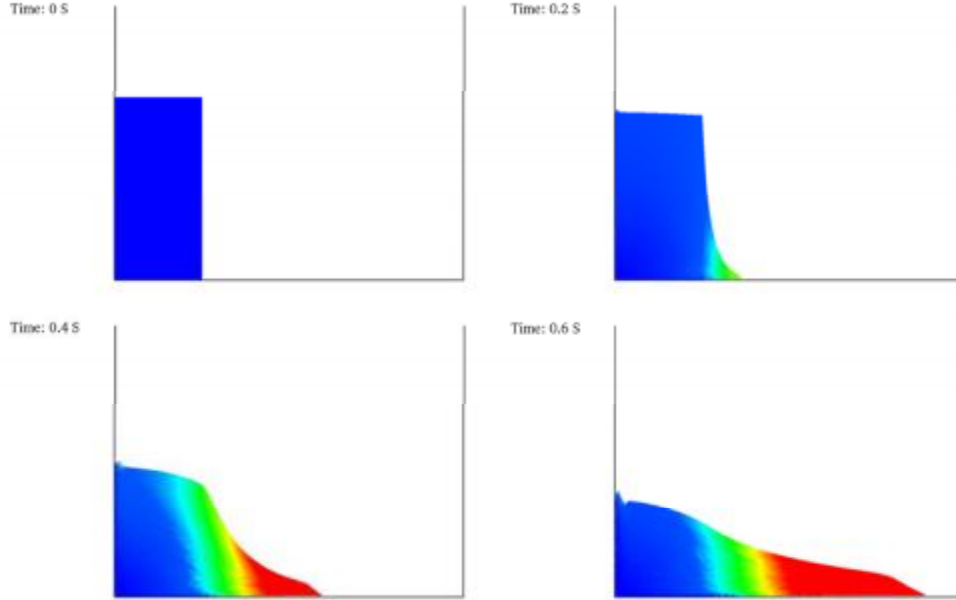
Şekil 3.18. IsoSurface kodunun giriş ve çıkış dosyaları (DualSPHysics User Guide, 2016)

Güçlü bilgisayar desteği ile çözünürlük oranı arttırılabilmekte ve dp değeri azaltılarak da görüntü netleştirilebilmektedir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Paraview programında görselleştirme (DualSPHysics User Guide, 2016)

Şekil 3.20’de CaseDambreak modelleme ekran görüntüsü görülebilmektedir. Renk farklılıkları dalga yayılımında hız değişkenliklerini temsil etmektedir.

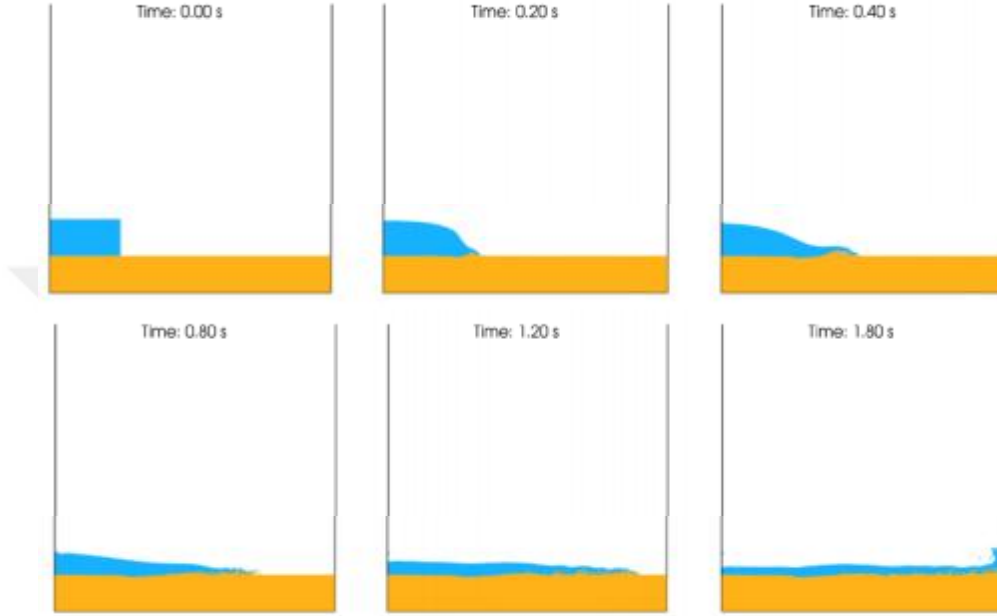


Şekil 3.20. CaseDambreak örnek data dosyası modelleme görüntüsü
(DualSPHysics User Guide, 2016)

DualSPHysics programı içerisindeki örnek data dosyalarının birisi de çok fazlı akışkan-sediment yaklaşımını ele alan CaseMultiphase data dosyasıdır. Daha önce bahsedildiği üzere maden, atık barajları gibi birçok baraj yapısı farklı akışkanları rezervuarında tutabilmektedir. Birçok sebepten dolayı oluşabilecek baraj yıkılması durumunda ise akışkanın mansapta yayılımı, girişimi, değişik mansap koşullarında ilerlemesi,..vb. durumlarında akışkanın davranışının incelenmesi çok önemli olmaktadır. Program içerisinde CaseDambreak örnek data dosyasından farklı olarak ek algoritma yapısı bulundurmaktadır. İki fazlı akım olarak değerlendirilen dosya su ve sediment yaklaşımı üzerine kurulmuştur.

CaseTwoPhases data dosyası aracılığı ile yapılan örnek çalışma simülasyon görüntüleri Şekil 3.21’de yer almaktadır (DualSPHysics User Guide, 2016). Şekil 3.22’de CaseDambreak dosyasında akışkan özelliklerinin tanımlandığı kısım görülmektedir. Şekil 3.23’te SPH modelleme akışının algoritma mantığı ile dizilimi

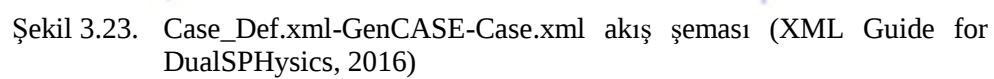
ve Şekil 3.24'te ise işlem öncesi ve sonrası SPH akış şeması yer almaktadır (XML Guide for DualSPHysics, 2016).

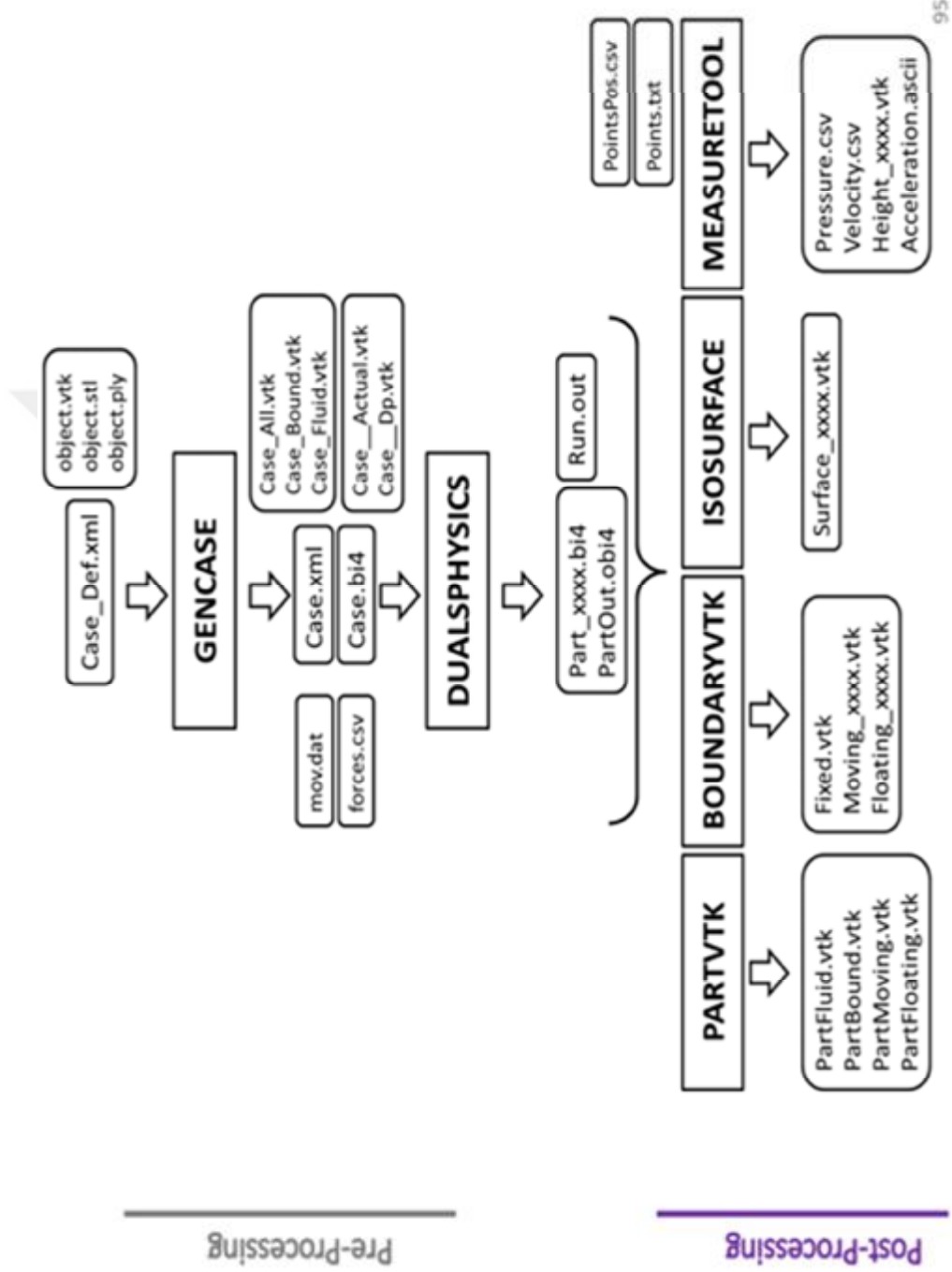


Şekil 3.21. CaseTwoPhases örnek data dosyası modelleme görüntüsü (DualSPHysics User Guide, 2016)

```
<constantsdef>
  <lattice bound="1" fluid="1" />
  <gravity x="0" y="0" z="-9.81" comment="Gravitational acceleration"
    units_comment="m/s^2" />
  <rho0 value="1000" comment="Reference density of the fluid"
    units_comment="kg/m^3" />
  <hswl value="0" auto="true" comment="Maximum still water level to calculate speedofsound"
    units_comment="metres (m)" />
  <gamma value="7" comment="Polytropic constant for water used in the state equation" />
  <speedsystem value="0" auto="true" comment="Maximum system speed
    (by default the dam-break propagation is used)" />
  <coefsound value="20" comment="Coefficient to multiply speedsystem" />
  <speedsound value="0" auto="true" comment="Speed of sound to use in the simulation
    (by default speedofsound=coefsound*speedsystem)" />
  <coefh value="0.866025" comment="Coefficient to calculate the smoothing length
    (h=coefh*sqrt(3*dp^2) in 3D)" />
  <cflnumber value="0.2" comment="Coefficient to multiply dt" />
</constantsdef>
```

Şekil 3.22. CaseDambreak akışkan tanımlama algoritması (XML Guide for DualSPHysics, 2016)





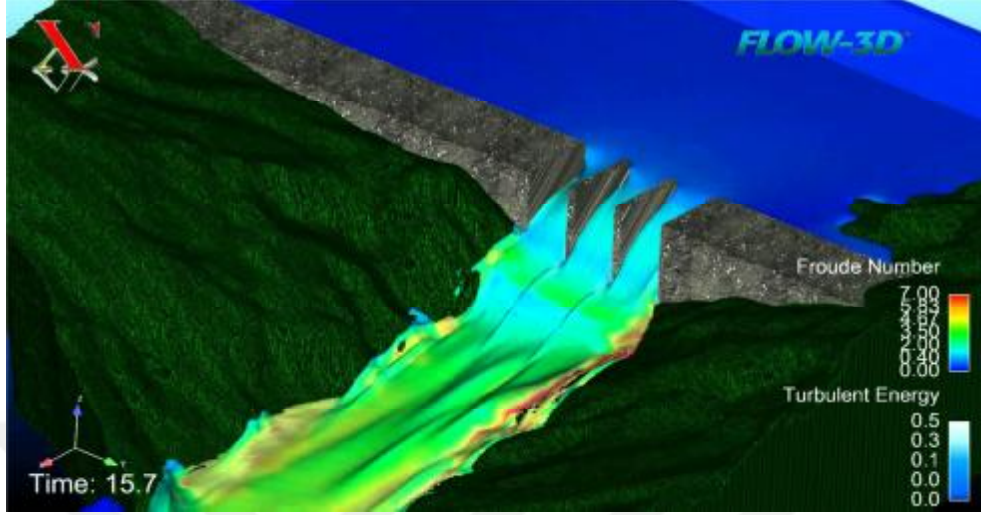
Şekil 3.24. İşlem öncesi ve sonrası SPH akış şeması (XML Guide for DualSPHysics, 2016)

3.4. Flow-3D Yazılımı

Flow-3D yazılımı ticari bir yazılım olup, tez içeriğindeki deneysel ve nümerik analiz verilerinin karşılaştırılması için kullanılmıştır. Genellikle bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu serbest yüzey yani açık kanal problemlerinin zamana bağlı veya kararlı hal çözümlerini yapmak amacı ile kullanılan oldukça başarılı bir HAD yazılımıdır. Yazılımın süreklilik, momentum ve enerji temel prensiplerini içeren her türlü akışkanlar mekaniği problemlerine uygulanabilmesi programın yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

Günümüz koşullarında gerek bilimsel anlamda gerekse de tüm uygulamalarda laboratuvar deneylerinin maliyetli olması ve uzun bir zaman süreci gerektirmesi nedeniyle nümerik analiz metotları uygun çözüm yöntemleri halini almıştır. Dolayısı ile Flow-3D su ve çevre konuları, dolusavak analizleri, dipsavak analizleri, baraj yıkılma analizleri, su alma yapısı analizleri, balık geçidi analizleri, toprak kayması analizleri, çığ düşmesi analizleri, kıyı ve nehir hidroliği, termal plum analizleri, atıksu tahliyesi ve kirlilik analizleri, taşkın analizleri, sediment taşınımı ve oyulması analizleri,...vb. gibi birçok alanda kullanılabilmektedir (<https://www.flow3d.com/>). Şekil 3.25'te Flow-3D programı ile yapılmış bir baraj yıkılması analiz örneği görülmektedir.

Flow-3D dünya genelinde kullanım alanı bulan, güçlü ve son derece hassas çoklu fizik HAD paket programı özelliği taşımaktadır. Aynı zamanda termal enerji transferi, sıvı katı etkileşiminin 6 derece, mekanik ve termal gerilme analizi çözümü yapabilen sayısal modelleme programıdır. Program serbest yüzey akışlarını takip edebilmek için gelişmiş bir algoritma ile yazılmıştır. İdeal simülasyon çalışmaları, araştırma ve üretim süreçlerini iyileştirme gibi konularda çokça faydalanılmaktadır (Flow-3D v11 Academic WatEnv Intro Lectures, 2014). Deneysel yöntemlerle ölçülmesi ve gözlem yapılması çok zor olabilen çoğu parametre Flow-3D ile görsel ve grafik tabanlı bir şekilde rahatça modellenabilmektedir.

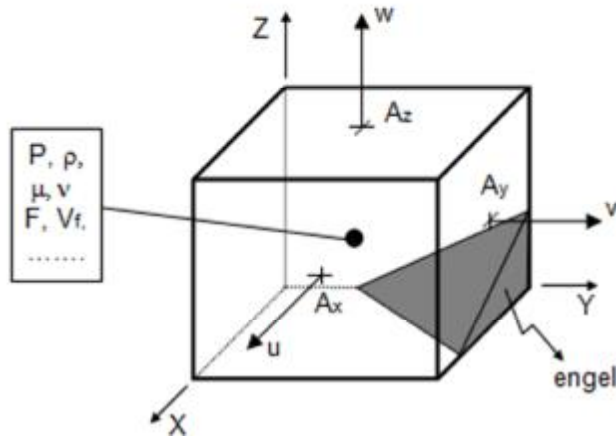


Şekil 3.25. Flow-3D ile baraj yıkılması örneği (<https://www.flow3d.com/>)

Son zamanlarda baraj yıkılma analizi gibi karmaşık problemlerin modellenmesinde ticari yazılımlar ciddi anlamda başı çekmekte ve önemleri gün geçtikçe daha çok artmaktadır. Flow-3D de bu programlar içerisinde yer almakta ve programda nümerik analizlere Navier-Stokes, Saint-Venant denklemlerinin sayısal biçime dönüştürülmesi ile başlanmaktadır. Bilinen başlangıç ve sınır şartları altında bilgisayarlar yardımı ile rahatça çözümü yapılabilir. Denklemlerin nümerik olarak analiz edilmesi süreçlerinde ise birbirinden farklı birçok yöntem kullanılmaktadır. Her ne kadar son zamanlarda akışkanlar dinamiği problemlerinde sonlu hacimler yönteminin kullanıldığı birçok ticari yazılım ortaya çıkmış olsa da Flow-3D’de hesaplama yöntemi dikdörtgen hücrelerden meydana gelen üniform özellik göstermeyen bir çözüm ağı üzerinde gerçekleşmektedir (Flow-3D Water and Environmental Brochure, 2017).

Programda akışkana ait yoğunluk, basınç, viskozite gibi skaler olan büyüklükler hücre merkezinde bulunurken yalnızca u,v,w bileşenli hızlar kontrol hacminin yüzeyinde kabul edilerek hesaplamalar yapılmaktadır. Şekil 3.26’da görüldüğü gibi birçok yazılımdan farklı olarak çözüm ağı içerisindeki bazı hücrelerin engeller vasıtası ile kapatılması şeklinde bir problem geometrisi

tanımlanmaktadır. *FAVOR* (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) olarak ifade edilen bu metotta iki değer hesaplanmakta ve bu değerler birbirleri ile oranlanmaktadır. Bu değerlerden bir tanesi kontrol hacmi içinde bulunan bir engelin kontrol hacminde ne kadarlık yer kapladığıdır ki bu volume fraction olarak adlandırılmaktadır. Diğeri ise engelin kontrol hacminin her bir yüzey kısmında ne kadarlık bir alanı işgal ettiği ile ilgili bir değer olmaktadır. Dolayısı ile engel tanımlama aşamalarında kullanılan bir boşluk tekniği de denilebilmektedir (Kocaman, 2007).



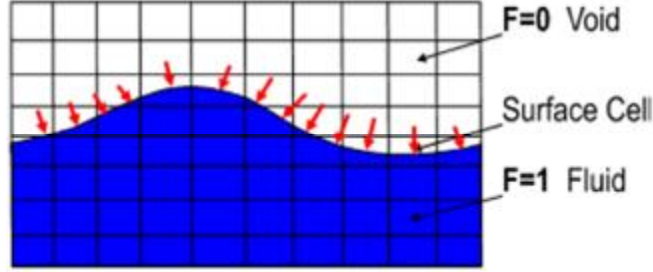
Şekil 3.26. Hesaplama yapılan hücreye etkiyen değişkenler (Kocaman, 2007)

Kontrol hacminin tamamen engel ile dolu olması ki bu değer 0 (sıfır)'a ve tamamen boş olması da 1'e eşit olması anlamına gelmektedir. Bu durum hücrenin kısmi bir engel ile dolu olması hücrede kapladığı hacme bağlı bir şekilde değerinin 0 ile 1 arasında bir değer almasını gerektirmektedir. Bu özellik her bir hücredeki yüzey kısımlarının ne kadarlık bir akışkan yapısını içerdiğini göstermektedir. Bu metot karmaşık geometrilerin olduğu ağ aralıklarında istenilen hassasiyetin sağlanamadığı durumlarda geometrinin dahi iyi bir şekilde tanımlanabilmesine ve sınırlarda nümerik olarak çözüm duyarlılığının oluşabilmesine imkan vermektedir (Flow-3D v11 Academic WatEnv Intro Lectures, 2014).

Problemlerde mevcut geometrinin tanımlanma süreçlerinde farklı yazılımlarla elde edilen şekiller Flow-3D programı içerisindeki çözüm ağı içerisine kolaylıkla dahil edilebilmektedir. Bu özellik düzensiz topoğrafya şartlarını içeren baraj, dolusavak,...vb. gibi serbest yüzey problemlerinin üç boyutlu analizlerinin yapılabilmesini olası hale getirmektedir. Simülasyon çalışmaları sırasında daha küçük ağ aralıklarının yani mesh'lerin tanımlanması çözüm ağı içerisindeki engel sınırlarında daha düzgün geometriler elde edilebilmesine olanak vermektedir (Kocaman, 2007).

Flow-3D içerisinde daha önce söylenildiği üzere VOF metodu kullanılmaktadır (Hirt ve Nichols, 1981). VOF metodu *FAVOR* yöntemi gibi hücrelerdeki kısımların suyla ne oranda kaplı olduğuna bağlı olarak boş, kısmen veya tamamen dolu şeklinde ele alınmaktadır (Şekil 3.27). Hesaplama yapılacak alan üzerinde hücre tümüyle su ile dolu olması halinde “1”, boş olması halinde “0”, kısmen dolu olmasında ise kapladığı alanın yüzdesi ölçüsünde değer almaktadır. VOF metodu ile açık kanal akım problemlerinin çözülmesi sırasında üç aşamadan söz edilebilir. İlk olarak serbest yüzeyin konumu belirlenir. Söz konusu bu yüzey, su-hava arakesitinde tanımlanır. İkincisi arakesite sınır şartları uygulanmaktadır. Son olarak ise arakesit koşulları kayma gerilmesinin sıfır ve basıncın sabit olması şeklinde düzenlenmektedir (Flow-3D v11 Academic WatEnv Intro Lectures, 2014).

Engel bulunduran üç boyutlu açık kanal akım problemlerinin Flow-3D ile çözümünde çözüm ağındaki hücrelerin beş ayrı durumundan ayrıca bahsetmek de mümkündür. Bu durumlar hücre tamamen katı veya sıvı, kısmen katı veya sıvı, tamamen boş şeklinde sıralanabilir.

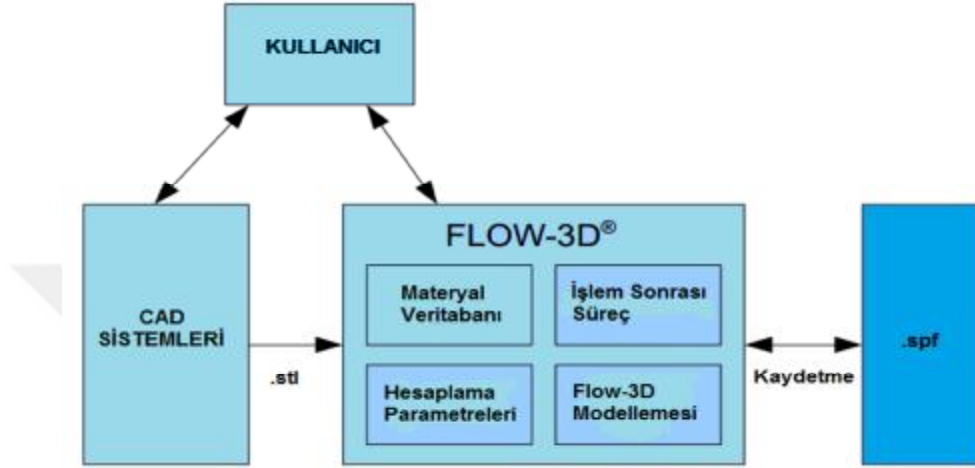


Şekil 3.27. VOF metodu örneği (Flow-3D v11 Academic WatEnv Intro Lectures, 2014)

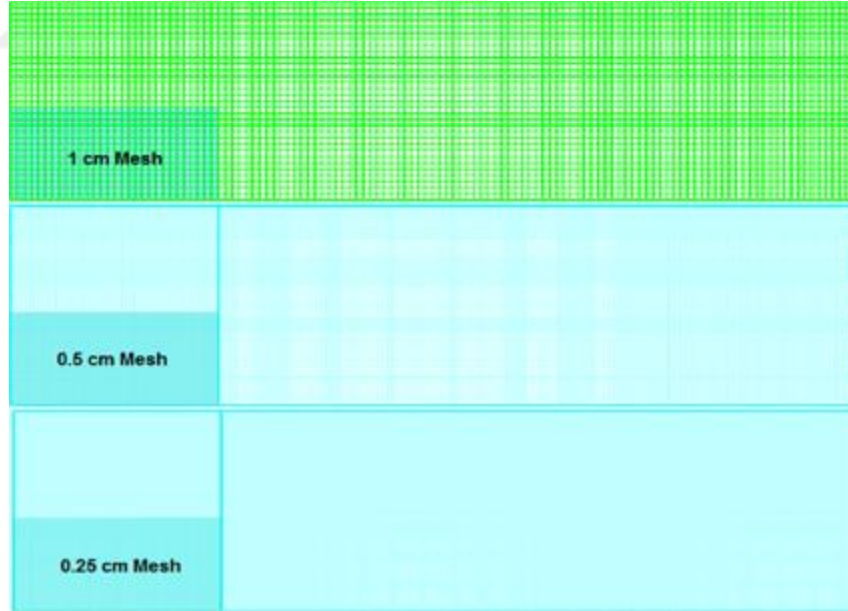
Flow-3D iki denklem içeren k - ϵ türbülans kapatma modelini, türbülans enerji (k), Prandtl karışma boyu hipotezi (ϵ), LES ve RNG gibi çok farklı türbülans modellerini içermektedir. Çözüm ağı içerisinde farklı sınır şartları tanımlanabilmekte ve üç boyutlu süreklilik ve hareket denklemleri için senkronize çözüm yapılabilir. k - ϵ türbülans kapatma modeli uygulamalarda sıkça tercih edilen bir model olmaktadır. Yüksek Reynolds değerlerinde k - ϵ modeli tatmin edici sonuçlar vermekte ve sınır tabakası dışında geçerli olmaktadır (Kocaman, 2007). Flow-3D yazılımında uygulanan genel işlemlerin kısa bir özetini Şekil 3.28’de görebilmek mümkündür (Flow-3D Water and Environmental Brochure, 2017).

Flow-3D yazılımında türbülans modelleri dışında mesh aralığının belirlenmesi de çok önemli bir konu durumundadır. Mesh’ler birbirine bağlı hücrelerden oluşmaktadır. Söz konusu hücreler tanımlanan geometrik şekli daha küçük boyuttaki hücrelere ayırmaktadır. Bu ağlar etkili sayısal alanları teşkil etmektedir. Bu sayede farklı akışkan tanımları yapılabilir, başlangıç ve sınır koşulları ayarlanabilmektedir. Böylece akışkan davranışını tanımlayabilmek için nümerik yaklaşımlar geliştirilebilmektedir (Atay, 2016). Dolayısı ile makul mesh aralıkları modelleme açısından zaruri bir hal oluşturmaktadır. Geometrik tanımlamalarda genellikle 0.5 cm mesh aralığının kullanılması tercih nedeni olmaktadır. Şekil 3.29’da çalışmada tanımlanan deney kanalının 1, 0.50 ve 0.25 cm

mesh düzenlenmesi durumunda geometrik yapının ağ şekline dönüştürülmüş hali görülebilmektedir.

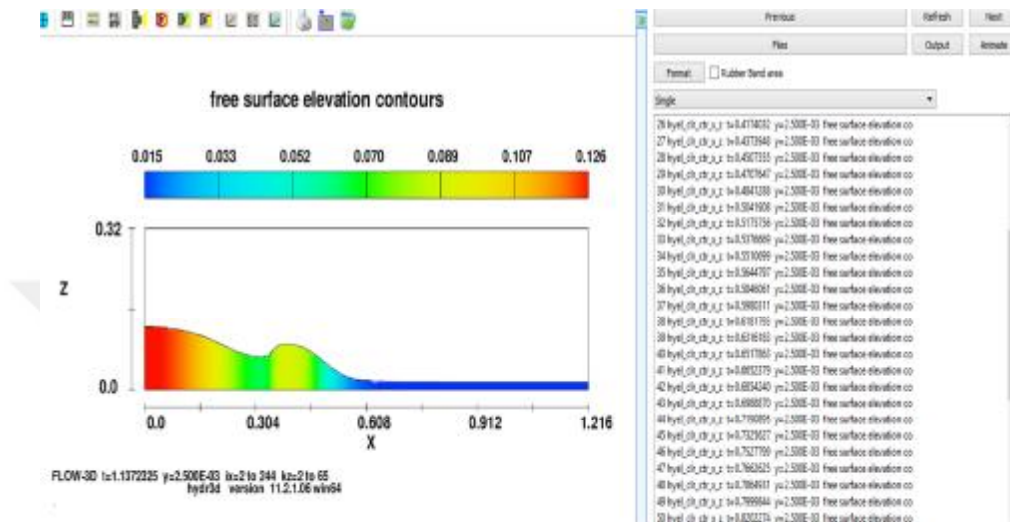


Şekil 3.28. Flow-3D modelleme süreci (Flow-3D Water and Environmental Brochure, 2017)



Şekil 3.29. Farklı mesh aralığı görüntüsü

Flow-3D yazılımında modelleme sonrası çıktıların alınabileceği ve görselleştirmelerin yapılacağı kısım Şekil 3.30'da verilmiştir.



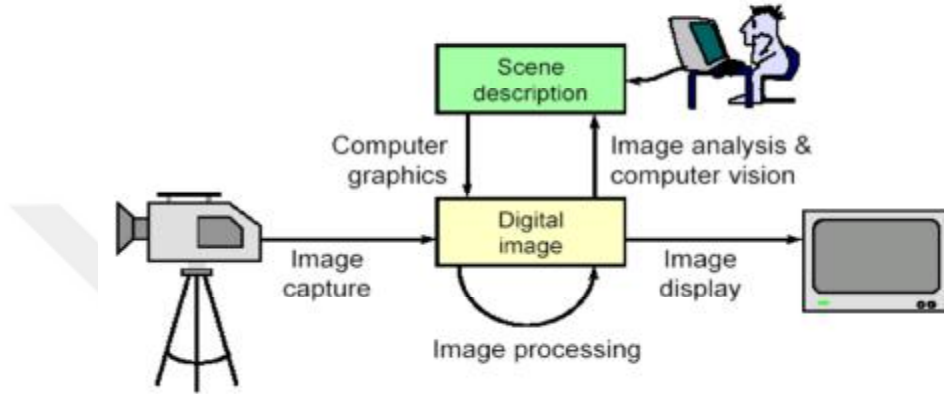
Şekil 3.30. Flow-3D modelleme sonrası görselleştirme

3.5. Görüntü İşleme Yöntemi

Görüntü yaşam içerisinde herhangi üç boyutlu cisimlerden oluşan bir sahnenin (x,y) şeklinde basit iki değişkenli bir fonksiyon olarak değerlendirilmesi olarak tarif edilmektedir. Aslında görüntü kendisini oluşturan elemanları ile birlikte üç boyutlu bir matris olarak öngörülmektedir. Matris boyutları genişlik, yükseklik ve kanal adedi (1-4) değerlerini içermektedir (Karakoç, 2012).

Gerçek görüntülerin çeşitli şekillerde dijital ortamlara aktarılması sonrasında oluşan sayısal özelliklerin ve niteliklerin değiştirilmesi işlemine “*Görüntü İşleme*” adı verilmektedir (Yıldırım ve ark., 2003). Görüntü işleme yolu ile görüntüsü alınan veriye ait renk, ışık ve yansıma olarak sayılabilecek optik özellikler; alan, uzunluk, çevre,...vb. gibi geometrik özellikler bilgisayarlar yardımıyla rahatça analiz edilebilmektedir. Teknoloji alanındaki baş döndürücü

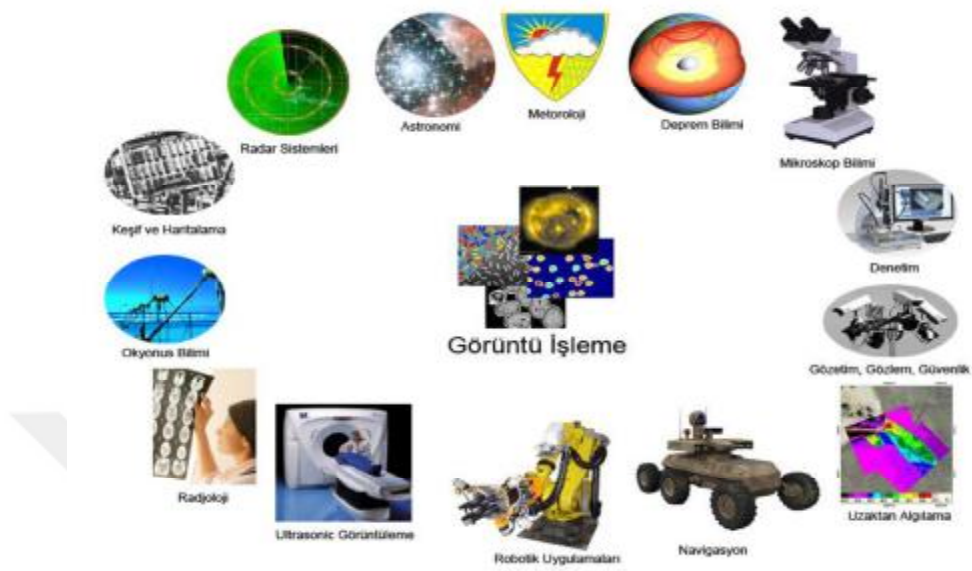
gelişmeler görüntü işleme tekniklerinin hemen hemen her alanda kullanımını yaygınlaştırmıştır (Kocaman, 2007). Şekil 3.31’de görüntü işleme mantığı gösterilmektedir.



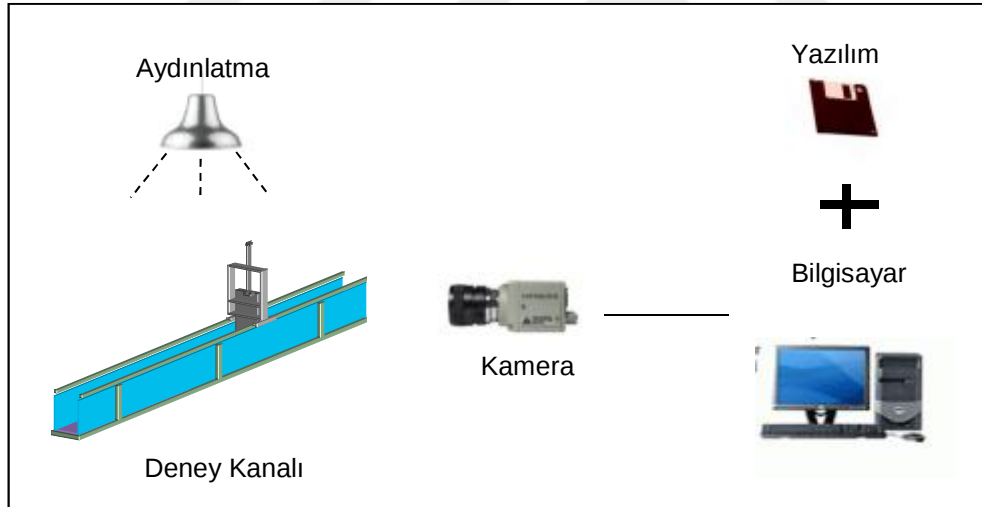
Şekil 3.31. Görüntü işleme mantığı (Yıldırım ve ark., 2003)

Şekil 3.32’de görüldüğü üzere görüntü işleme teknikleri yapay sinir ağları, dalgacık dönüşümü, Markov rastgele alan süzgeçleri, iteratif hücresel resim işleme algoritması, yönlendirme süzgeçleri, genetik algoritma, görüntü iletimi ve bulanık mantık konularında uygulanmaktadır. Ayrıca denizaltı sonic dalga taraması ve sualtı görüntüleme gibi askeri endüstri alanında; tomografi ve ultrason gibi özellikle tümör ve damar yapılarının belirgin olarak gözlemlenebilmesi açısından tıpta; biyomedikal uygulamalar başta olmak üzere biyoloji alanında; robotik, astronomi ve radar gibi havacılık alanında ve de HAD konularının olduğu birçok alanda etkin olarak kullanılmaktadır (Çomak ve ark., 2011). Görüntü işleme için oluşturulacak sistem genellikle dijital video kamera, fotoğraf makinesi, sensörler...vb. gibi aygıtlar, aydınlatma açısından önemli bir unsur olan ışıklandırma, bilgisayar donanımı ve yazılım gibi bileşenleri içermektedir.

Şekil 3.33’te görüntü işleme sistemini oluşturan bileşenler yer almaktadır (Kocaman, 2007).



Şekil 3.32. Sayısal görüntülerin kullanıldığı alanlar (Çomak ve ark., 2011)

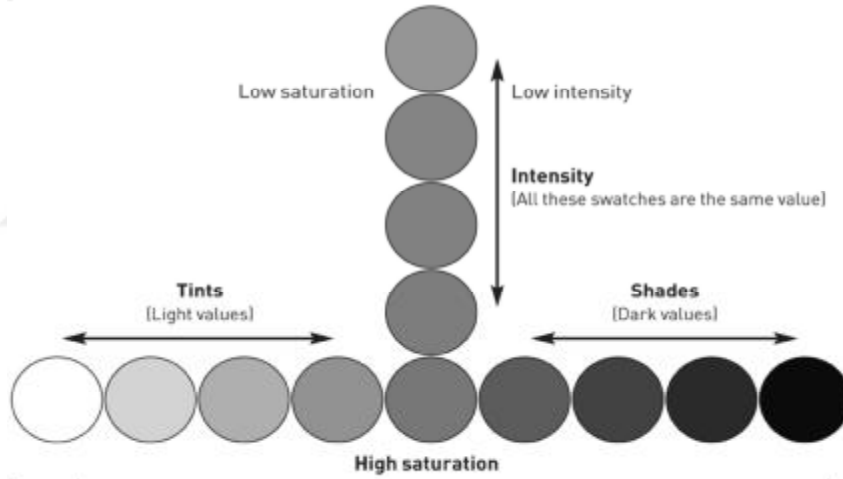


Şekil 3.33. Görüntü işleme ögeleri (Kocaman, 2007)

Yukarıda ifade edilen görüntü işlemenin her bir ögesinin kaliteli olması analizlerde arzu edilen başarıyı sağlamak konusunda çok büyük avantajlar ortaya koyabilecektir. Bu bileşenler uygulama gereksinimleri doğrultusunda muhakkak amaca uygun olarak seçilmelidir. Örneğin akışkan hareketlerini gözlemleyebilmek

için PIV ile yapılacak ölçümlerde yüksek çözünürlüğe sahip kameralardan faydalanmak akıllıca olurken; dalga çarpması, tsunami modellemeleri gibi hızın ön planda olduğu çalışmalarda detaylara dikkat çekebilmek için yüksek hızda kameralara öncelik verilmelidir.

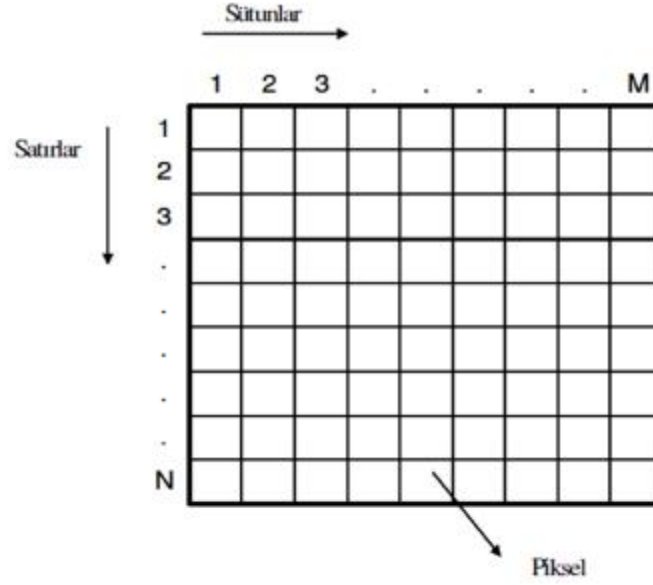
Tüm profesyonel kameralar genellikle görüntü elde etmede temel renkler olan kırmızı, yeşil ve mavi renkleri ayrı ayrı algılayabilmekte ve yüksek kalitede görüntüler oluşturabilmektedir. İnsan gözü Şekil 3.34'te görüldüğü gibi gri renk seviyeleri arasından yaklaşık olarak 100 adet bölgeyi birbirinden ayırt edebilme özelliğine sahiptir. Siyah ve beyaz renk değerleri ile arasında kalan tüm gri yapıdaki renk değerleri '*yoğunluk (intensity)*' olarak ifade edilmektedir (Karakoç, 2012).



Şekil 3.34. Yoğunluk değerleri (intensity)

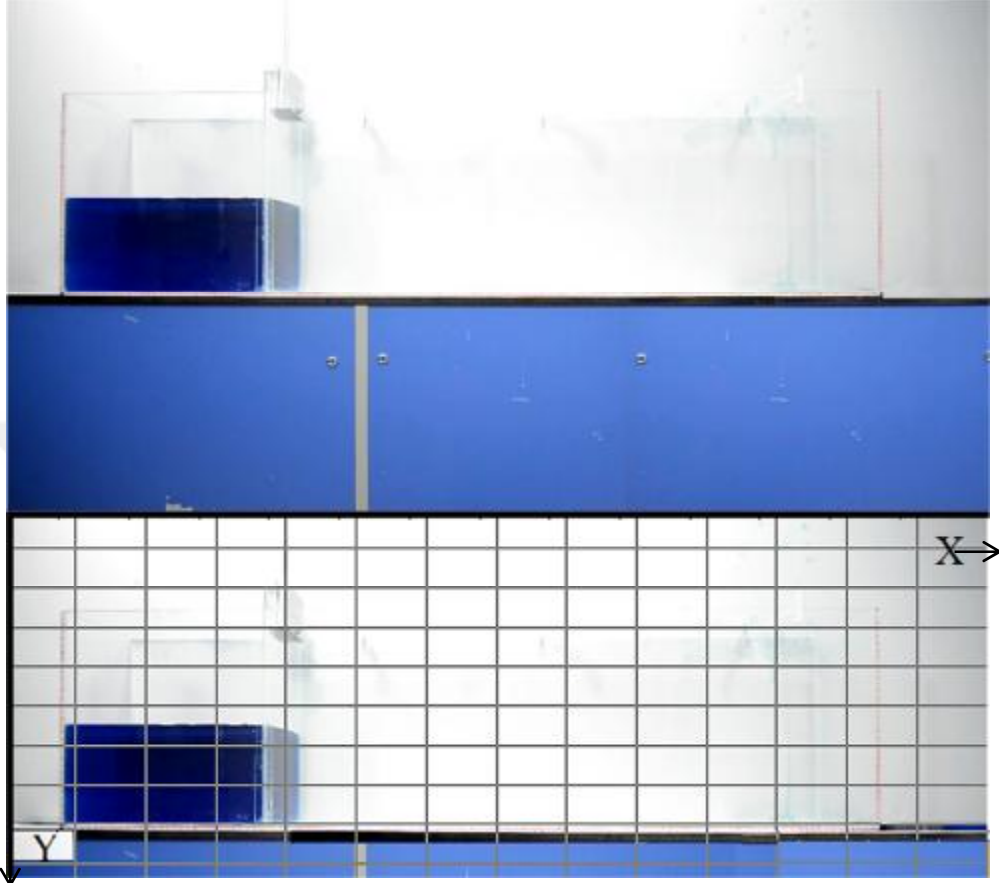
(http://artstudyguide.blogspot.com.tr/p/blog-page_4.html)

Video kameralardan elde edilen dijital görüntülerin kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden birisi şüphesiz çözünürlüğüdür. Çözünürlük görüntünün detaylanabilir en ufak parçasıdır. Bu kavramı görüntü algılayıcısındaki görüntü hücreleri olarak tanımlanan piksel sayısı ile açıklamak mümkündür (Şekil 3.35).



Şekil 3.35. Sayısal görüntü nitelikleri (Karakoç, 2012)

Algılayıcılarda yatay ve düşey ışığa hassas kapasitörler bulunmakta ve her kapasitör bir piksellik görüntü elde etmektedir. Elde edilen toplam piksel sayısı da görüntünün çözünürlüğü hakkında bir fikir vermektedir. Buradan yola çıkılarak yatay ve düşey piksel sayılarının birbirleri ile çarpılması sonucu görüntünün piksel çözünürlüğü bulunmaktadır (Kocaman, 2007). Şekil 3.36'da yatay ve düşey (x,y) fonksiyonu ve kaydedilen görüntünün ızgaralara ayrılmış şekli görülmektedir.



Şekil 3.36. Piksel (x,y) fonksiyonu ve ızgaralı görünüm

Piksel sayısının artması çözünürlüğün artmasını sağlamakta, kaliteli ve net görüntüler elde edilmesine olanak vermektedir. Bu sayının daha da büyümesi ile görüntüde kalite kaybı yaşanmadan daha hassas nitelikte ölçümlere ulaşılabilmektedir. Görüntülerin analog ortamdan dijital ortama aktarılması sonucunda görüntüde bozukluklar oluşabilmekte ve bu durum gürültü (noise) olarak adlandırılmaktadır. Görüntü işleme aşamasındaki bu zorluklar objektif bozulmaları (lens distortions), ışıklandırma durumları (lighting conditions), sensör termal gürültü (sensor thermal noise), hareket bulanıklığı (motion blur), sıkıştırma problemleri (compression artifacts) olarak sayılabilir (Karakoç, 2012).

3.5.1. Görüntü İşleme Unsurları

Görüntü işlemenin önemli unsurlarının başında kameralar yer almaktadır. Kameralar lens özellikleri sayesinde yakaladıkları görünür alan içerisinde bulunan görüntüleri sensör yardımı ile elektronik sinyale çeviren cihazlar olarak tanımlanmaktadır.

Her kamerada CCD (Charged Coupled Device) veya CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) olarak adlandırılan sensörler bulunmaktadır. Bu algılayıcılar ışığa karşı oldukça hassas aygıtlardır. Temel işlevlerini mercekler tarafından üzerlerine odaklanılan görüntüyü elektronik sinyallere dönüştürmek ve cihazın üzerindeki işlemcilerle iletmek şeklinde ifade etmek mümkündür. İşlenen elektronik sinyaller bilgisayar yapısına uygun resimler haline çevrilmektedir. Bu doğrultuda sensörler kameraların amaca uygun kullanılması noktasında çok önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir (<http://www.netfotograf.com/>).

CCD sensörler CMOS sensörlere göre birçok yönden avantaj sağlaması açısından günümüz kameralarının büyük kısmında CCD algılayıcılar yer almaktadır. Ayrıca CCD sensörlerin ışık hassasiyeti daha yüksektir ve daha az gürültü oluşturmaktadırlar. Bu nedenle CCD'ler aydınlık olmayan ortamlarda dahi iyi görüntü verebilme özelliklerine sahiptir. CMOS sensörler ise daha ekonomik ve uygun ebatla üretilebilmesinden dolayı daha avantajlı gözükmektedir. Fakat yine de sensörler çok önemli bir faktör olsa da uygun kamera tercihi için yeterli bir ölçüt sayılamamaktadır. Profesyonel kameralarda 3 adet CCD yapısı bulunmaktadır. Bu CCD'ler görüntü üretiminde ana üç renk olan kırmızı, yeşil, mavi renkleri tek tek algılamakta ve daha net görüntü oluşturabilmektedir.

Video kameralarda bulunan sensörler 1, 2/3, 1/3 ve 1/4 inç olmak üzere farklı ebatlardadır. Köşegenler arası uzunluğu açıklayan bu ölçüler, sensörlerin genel olarak kullanılabilir olan büyüklüklerini ifade etmektedir. Kullanılması planlanan merceklerin bu ebatlara uygun olması çok önemlidir (MEB, 2012).

Görüntü algılayıcıların kapsadığı alan fazlalaştıkça çözünürlük ve ışık algılayabilme yeteneği artmaktadır. 1 inç (2.54 cm) sensör en yüksek ışık algılayabilen ve yüksek çözünürlüğe sahip algılayıcılar olmaktadır. Bu tip sensörlerde 2 milyondan fazla piksel yer almakta ve sadece özel uygulamalar için tercih edilmektedir. Daha düşük ebatlarda çözünürlük ve ışık hassasiyeti epey düşmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte görüntü kalitesi her geçen gün artmakta ve daha küçük ebatlarda dahi çok yüksek görüntüler elde edilebilmektedir.

Kameralardan elde edilecek görüntülerin netliğini etkileyen en önemli unsurlardan bir diğeri de kamera çözünürlüğüdür. Bir kameranın çözünürlüğü, üzerindeki sensörlerin kaç adet piksele sahip olduğu ve kaç piksellik görüntü oluşturabildiğini göstermektedir. Sensörler üzerinde yatay ve dikey ışığa hassas kapasitörler mevcuttur ve her kapasitör bir piksel kaydedebilmektedir. Böylece kaydedilen piksellerin sayısı elde edilen görüntünün çözünürlüğü için bir gösterge durumundadır.

Kamera çözünürlükleri 256x256 dan başlayarak daha yüksek değerlere çıkabilmektedir. Çözünürlüğün artması daha net görüntünün elde edilebilmesini sağlamaktadır. Net görüntü olması kalite kaybı gerçekleşmeden görüntünün büyütülebileceği ve metrik ölçümler yapılabileceği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte çözünürlük arttıkça elde edilen görüntülerin bilgisayarlarda saklanması için gerekli alan yükseleceğinden ekstra disk alanı gerektirecektir. Tabi ki bu özellikler kameraların maliyetlerini büyük ölçüde yükseltecektir.

Kameralarda bir pikselin genişliğinin yüksekliğine oranını ifade eden “*aspect ratio*”nın bilinmesi önemlidir. Bu oran özellikle hassas metrik ölçümlerin yapılacağı uygulamalarda tercih sebebidir. Bir video kamera görünüş oranı 1:1 (kare) şartlarını sağlayamıyorsa görüntüyü sayısallaştırma ve kalibrasyon işlemleri için ciddi handikaplar oluşturmaktadır. Video kameralarda bulunan çekim ve kayıt formatları PAL (Avrupa ve ülkemizde) ve NTSC (Amerika) olarak sayılabilir (Kocaman, 2007).

PAL kameralarda daha düşük hızda daha yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilebilirken NTSC’lerde yüksek çekim hızı ve düşük çözünürlükte görüntüler alınabilmektedir. Kameraların en önemli özelliğini aralıksız görüntü kaydedebilmeleri şeklinde açıklamak mümkündür. Genellikle video kameraların çekim hızı saniyede yakaladıkları görüntü sayısı (fps: frame per second) ile ifade edilebilir. İnsan beyninin görüntüleri idrak edip net bir şekilde görebilmesi için saniyede 15 görüntü yeterli olmaktadır. Bu değerin düşmesi halinde görüntünün takılarak aktığı düşüncesi oluşmaktadır. Standart bir kamera 25 fps kaydedebilmektedir. 100.000 fps çekim yapabilen kameralar da bulunmakta fakat bu kameraların fiyatları epey yüksek olmaktadır.

Kameralarla görüntü elde edilmesi sürecinde hareketli objelerden yakalanacak görüntülerin netliğini etkileyen karışık (interlaced) ve aşamalı (progressive) tarama şeklinde iki farklı çekim tekniği bulunmaktadır. Karışık çekim tekniğinde 1 s de elde edilen 25 kare görüntü aslında 50 yarım kare görüntüden oluşmaktadır. Bu yarım kare görüntüler alan (field) olarak ifade edilmektedir. Aşamalı taramada ise 1/50 s de tam bir görüntü elde edilebilmektedir. Bu nedenle aşamalı tarama karışık taramaya nispeten iki kat sayıda kare görüntüyle aynı anda daha net görüntüler sağlayabilmektedir. Şekil 3.37’de görüldüğü üzere bu çalışmada kullanılan Nikon D600 Nikon FX-format kameralar arasında en küçük ve hafif gövdeye sahip video kamera özelliği taşımaktadır.

Nikon D600 kameranın temel özellikleri şu şekilde ifade edilebilir (<https://www.nikon.com.tr/>):

Ø Sinyal sistemi	: PAL/NTSC
Ø Boyut	: 141x113x82 mm
Ø İncelik	: 82 mm
Ø Görüntü hızı	: 60 fps (saniyede 60 görüntü)
Ø Görüntü sensörü	: 24.7 MP Full Frame CMOS

Ø Etkili piksel sayısı	: 24.385.536 piksel (6048 yatay x 4032 düşey)
Ø Doğal çözünürlük	: 6048*4032 (60 fps için 1280*720)
Ø Gerçek çözünürlük	: 24.4 MP
Ø Video kalitesi	: 1080 p @ 30 fps
Ø Sürekli çekim hızı	: 5.5 fps
Ø Tarama şekli	: Aşamalı (Progressive)
Ø Işık hassasiyeti	: ISO 6400- ISO Boost 25.600
Ø Lens montaj tipi	: Pro DSLR



Şekil 3.37. Çalışmada kullanılan dijital video kamera ve fotoğraf makinesi

Mercekler diğer bir ifade ile lensler görüntülemeye çok önemli bir rol oynamaktadır. Merceklerin temel fonksiyonu yansıyan ışığı toplamak ve sensörlerin üzerine net ve temiz bir görüntü odaklayabilmektir. Lensler kameralara takılıp çıkartılabilmekte ve ihtiyaç durumuna göre farklı bir parça monte edilebilmektedir. Merceklerdeki odak uzaklığı sensörler ile mercek arasındaki uzaklığı tanımlamakta ve bu değer mm cinsinden yazılmaktadır. Odak uzaklığı arttıkça lensin görüş açısı daralmakta, bu değer büyüdükçe görüntüsü alınan obje daha yakın bir şekilde görünmektedir. Değer azaldıkça ise çevre daha geniş bir açıyla görülebilmektedir. Dolayısı ile geniş açılı bir mercek kısa bir odak

uzaklığına, bir telefoto mercek ise uzun bir odak uzaklığı yapısına sahiptir. Geniş açılı mercekler bombeli bir görüntüye sebebiyet verirken, telefoto mercekler ise daha düz bir görüntü oluşturmaktadır.

Bir merceğin ışık toplama kapasitesi mercek ile odak uzaklığı ilişkisine göre değişmektedir. “f” ile gösterilen bu kavram merceklerin kenarında veya önünde basılı bir şekilde yer almaktadır. Büyük f değerine sahip mercekler sensörlere daha az ışık iletirlerken, düşük f’e sahip mercekler ise sensörlere daha çok ışık ilettiklerinden loş ortamlarda dahi daha iyi kalitede görüntü alınmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada AF-S Nikkor 24-85mm f/3.5-4.5G ED VR marka lens kullanılmıştır. Kullanılan lensin temel özellikleri ise şöyledir (<https://www.turknikon.com/>):

Ø Odak uzaklığı	: Min. f/3.5-4.5, Max. f/22-29
Ø Görüntü formatı	: FX/35 mm
Ø Montaj tipi	: Nikon F-Bayonet
Ø İris oranı	: 0.22x
Ø Görüş açısı	: Maksimum Açı (DX format) 61° Asgari Açısı (DX format) 18° 50' Maksimum Açı (FX-format) 84° Asgari Açısı (FX-format) 28° 30'

Görüntü işlemenin bir diğer bileşeni ise aydınlatma sistemidir. Görüntüsü alınacak obje iyi aydınlatılmadığı takdirde muhakkak ki elde edilecek görüntü ile arzu edilen sonuca ulaşamayacaktır. Kameralar görüntüsü alınacak yüzeylere çarparak yansıyan ışıkları tespit edebildiklerinden fotoğraf veya video kalitesinin iyi olabilmesi için ortamın yeterli bir şekilde ışıklandırması gerekmektedir. Doğal veya yapay ışık ya da her ikisi de bu amaçla kullanılabilir. Seçilen objenin iyi bir şekilde aydınlatılması en iyi görüntünün elde edilebilmesi için olmazsa

olmazdır. Bir kameranın ışık hassaslığı sensör üzerine düşen ışık miktarının algılanabilmesi ile orantılıdır. Lüks (lux) olarak ifade edilen bu değer ne kadar az ise kameranın ışığa o kadar hassasiyeti var demektir ve loş ortamlarda görüntüler açısından daha iyi sonuçlar alınabileceği anlamına gelmektedir. Aydınlatma esnasında gölgelerin ve yansımaların kontrol edilebilmesi çok önemlidir. Örneğin nokta kaynak gibi bazı ışıklandırmalar objelerde gölgelenmeler ve körleşmeler oluşturarak görüntüdeki detayları ortadan kaybedebilirler. Bu sebeple özel uygulamalar haricinde nokta aydınlatmalardan kaçınılmalı ve sürekli ışık kaynakları oluşturulmalıdır. Light Emitting Diode (LED) türü ışık kaynakları gerek enerji verimliliği gerekse de beyaz ışık özelliğinden dolayı sürekli ışık kaynakları için tercih sebebi olmaktadır.

Bulgular ve Tartışma kısmında görülebileceği üzere laboratuvar içerisinde deney kanalı üzeri tavana monte ve yanlarında ayaklı şekilde toplamda yaklaşık 500 W LED sürekli ışık düzeni oluşturularak aydınlatma sağlanmıştır. Kanal arka yüzeyi beyaz strafor malzeme ile kaplanarak laboratuvar içerisindeki ters ışıkların kanal yüzeyi üzerinde yansımaları, körleşmesi engellenmiş ve ayrıca kamera arkasındaki duvara siyah fon bir örtü asılarak da kanaldaki kamera yansımaları önlenmiştir. Şekil 3.38’de çalışmada oluşturulan aydınlatma sistemi gösterilmektedir.

Son olarak görüntü işlemenin sayısallaştırılması aşamasında çok önemli bir yeri olan bilgisayarlardan bahsetmek gerekirse; görüntü işlemenin uygun bir şekilde yapılabilmesi için bilgisayarların yüksek hız, bellek ve sabit disk kapasiteli donanım özelliklerine sahip olması gerekmektedir.



Şekil 3.38. Çalışmada oluşturulan aydınlatma sistemi

Kullanılan bilgisayarın genel bir görünümü Şekil 3.39'da görülebilmektedir. Bilgisayarın temel özellikleri şu şekilde sıralanmaktadır:

Ø	<u>Anakart:</u>	Gene Z97 1150Pin DDR3 2.6 Ghz (Diğer özellikler ile uyumlu)
Ø	<u>İşlemci:</u>	i7 4790 3.60Ghz 1150Pin 8Mb Vga (Yüksek performans ve hız için)
Ø	<u>RAM:</u>	16 Gb DDR4 2133 Mhz Hyperx Fury (Yüksek bellek hafızası için)
Ø	<u>Sabit Disk:</u>	2 TB SATA3 Seagate 7200Rpm (Harici kayıt için)
Ø	<u>Hard Disk:</u>	480 Gb Kingston 2.5" SATA3 SSD Disk (Yüksek kapasite için)
Ø	<u>Ekran Kartı:</u>	4 Gb Nvidia Strix GTX970 256 bit (Ekran kartı çözümü için)
Ø	<u>Monitör:</u>	24" Geniş Ekran (Simülasyonlar için uygun)

Görüntülerin kaydedilmesi, kalibrasyonlarının yapılması, işlenmesi ve metrik okumaların yapılması sırasında birçok yazılımdan yararlanılmıştır. Bunun haricinde belirli noktalarda akışkan serbest yüzey seviyelerinin zamanla değişimlerinin ölçülebilmesi amacıyla görüntü işleme yazılımı içerisinde bir kod yazılmıştır. Görüntülerin sayısallaştırılması ve metrik olarak mesafelerin hesaplanabilmesi amacı ile genel eğitim düzeyinden “*Image Pro Plus*” yazılımı kullanılmıştır. Kalibrasyonlar için ise “*GML Camera Calibration*” adlı yazılımla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca görüntülerin avi formatına getirilmesi noktasında genel amaçlı “*WinX HD Video Converter*” programından yararlanılmıştır.



Şekil 3.39. Çalışmada kullanılan güçlü donanım özellikli bilgisayar

3.5.2. Görüntü İşleme Analizi

Görüntünün piksellerin oluşturduğu satır ve sütunlardan meydana gelen bir matris olarak düşünüldüğü ifade edilmişti. Matris içerisinde bir pikselin iki ana özelliği bulunmaktadır. Birincisi pikselin matriste yer aldığı koordinatı ve diğeri ise gri renk seviyesi değeridir. Bu özellikleriyle görüntü matematiksel olarak $f(x,y)$ fonksiyonu olarak tanımlanabilmektedir. Ekranın en sol üst köşesindeki koordinatlar (0,0) orijin olarak değerlendirilmektedir. Renkli görüntüler bilgisayarlarda 24 bit’lik data olarak görüntülenmektedir. Aynı objeye ait olan R

(Red-Kırmızı), G (Green-Yeşil), B (Blue-Mavi) olarak filtrelenmiş gri seviyeli görüntünün üst üste ekrana iletilmesi sureti ile renkli görüntüler oluşmaktadır.

Görüntü işlemede renkler bir veya birkaç ayrı renk uzayında kategorize edilebilmektedir. RGB (Red-Green-Blue, Kırmızı-Yeşil-Mavi) uzayı bunlardan biri olup bir görüntüdeki rengi değiştirebilmek amacı ile ilk yapılacak iş rengin sıra numarası (RGB sırası) ve R,G,B değerlerinin karışım oranlarını kullanmaktır (Kocaman, 2007).

Görüntüler yukarıda anlatıldığı şekilde elde edildikten sonra, bilgisayarda arka plan gürültüsünden, yansıma ve körleşmelerden arındırmak için çeşitli filtrelemeler yapılmakta, geometrik bozulmaları onarmak için görüntü düzeltmesi uygulanabilmektedir. Görüntüler üzerinde yapılan bu tip işlemlere “*Sayısal Görüntü İşleme (Digital Image Processing)*” denilmektedir. Görüntü işleme uygulamalarını; görüntü iyileştirme, görüntü süzgeçleme, görüntü sıkıştırma, görüntü cisim algılama, görüntüdeki cisimlerin özelliklerinin belirlenmesi, görüntüdeki cisimlerin sınır şartlarının oluşturulması,...vb. daha birçok görüntü işleme uygulaması sayılabilir. Bu uygulamalar genel olarak görüntüdeki bulanıklığın çözülmesi veya keskinleştirilmesi, kenarların belirgin bir hale dönüştürülmesi, görüntüdeki parlaklıkların giderilmesi ve gürültünün azaltılması,...vb. gibi işlemleri kapsamaktadır. En önemli noktalar ise eşikleme (thresholding), bölümleme (segmentation), kontrast iyileştirme (contrast enhancement) ve histogram eşitleme olarak belirtilebilir (Çankaya, 2013).

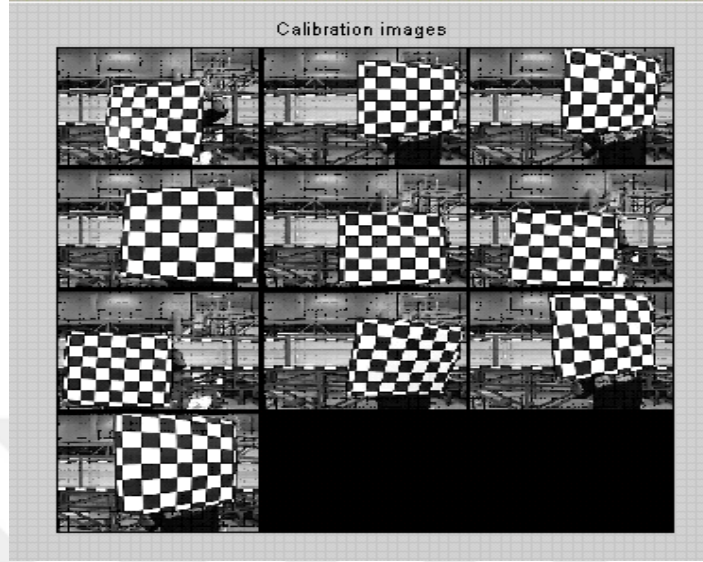
Kontrast iyileştirme ile görüntünün parlaklık ve renkler düzenlemeleri kolayca yapılabilir. Görüntünün renk düzeyleri değiştirilerek renkler belirginleştirilebilir ve böylece görüntü sınırları keskin hale getirebilmektedir. Filtreler ise görüntüde belirli düzensizliklerin giderilmesi için gerçekleştiren uygulamalardır. Alçak filtre (low pass filter) büyük ve homojen noktaları belirginleştirmek ve sadeleştirme yapmak için uygulanmaktadır. Yüksek filtreler (high pass filters) küçük detayları daha da keskinleştirmek ve detayları biraz daha ortaya çıkarmak için oluşturulmuştur (Kocaman, 2007).

Bu çalışmada uygulanan görüntü işleme işlemlerinden yeniden boyutlandırma, kontrast, renklendirme ve filtreleme örneğini Şekil 3.40’da görebilmek mümkündür.



Şekil 3.40. Görüntü sayısallaştırma adımlarının uygulandığı bir deney görüntüsü

Görüntülerin elde edilmesi sürecinde hataların belirlenmesi ve düzeltilebilmesi çok önemlidir. Kalibrasyon olarak ifade edilen bu işlem mevcut algoritma ve yazılımlarla onarılabilmektedir (Karlı ve Ayhan, 2005). Bozulmalar açısal ve teğetsel bozulmalar olarak iki grupta incelenebilir. Bunlar haricinde perspektif, yatay ve metrik kalibrasyon işlemlerinden söz edilebilir. Şekil 3.41’de farklı açı ve uzaklıklardan çekilen kalibrasyon panosu örneği gösterilmiştir (Kocaman, 2007).



Şekil 3.41. Farklı açı ve uzaklıklardaki kalibrasyon panosu örneği (Kocaman, 2007)

Metrik kalibrasyondan biraz bahsedecek olursak bu işlem bilinen bir doğru orantı ile açıklanabilmektedir. Örnek olarak görüntü üzerindeki 15 cm uzunluğundaki bir referans çizgisi ki bu rezervuar akışkan yüksekliği olarak seçilebilir 30 piksel ile ölçülürse bu oran aslında $15/30 = 0.5$ cm/piksel olarak hesaplanabilir. Bu oran ile piksel koordinatları kolayca metrik koordinatlara dönüştürülebilir.

Deneylerde kanal başlangıç noktası (ekranın sol kısmı ile deney kanalı kesişimi) orijin olarak değerlendirilmiş ve x eksenini kanal tabanı, y eksenini kapak düzlemi üzerinde ayarlanmıştır. Hesaplamalar Ms Excel yazılımı ile yapılmıştır. Şekil 3.42’de çalışmada uygulanan metrik kalibrasyon görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.42. Metrik kalibrasyon işlemlerinin uygulanması

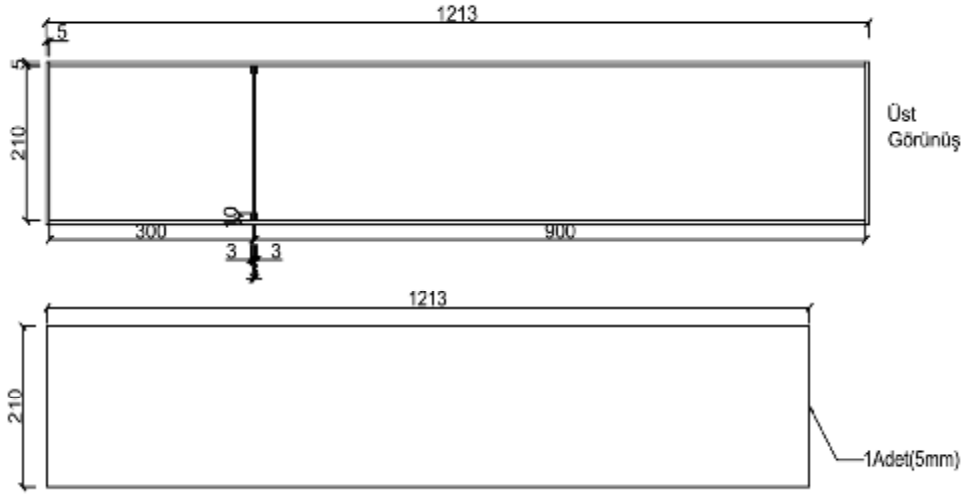
Sonuç olarak güvenilir deneysel veriler elde etmek modellemelerin ölçüm hassasiyetlerini test edebilmek açısından çok önemlidir. Bu çalışmada SPH gibi daha yeni uygulama alanı bulan bir yöntemin modelleme gücünü sınavabilmek adına güvenilirliği kanıtlanmış Flow-3D ticari yazılımı ve görüntülerin sayısallaştırılması sonucu ulaşılan veriler kullanılmıştır. Flow-3D ağ yapısına dayanan bir yazılım, SPH ise Lagrange tabanlı ağsız bir parçacık modeli olması sebebiyle aslında parçacık modellemelerinin HAD problemlerini çözme konusundaki başarısı da böylece irdelenmiş olacaktır.



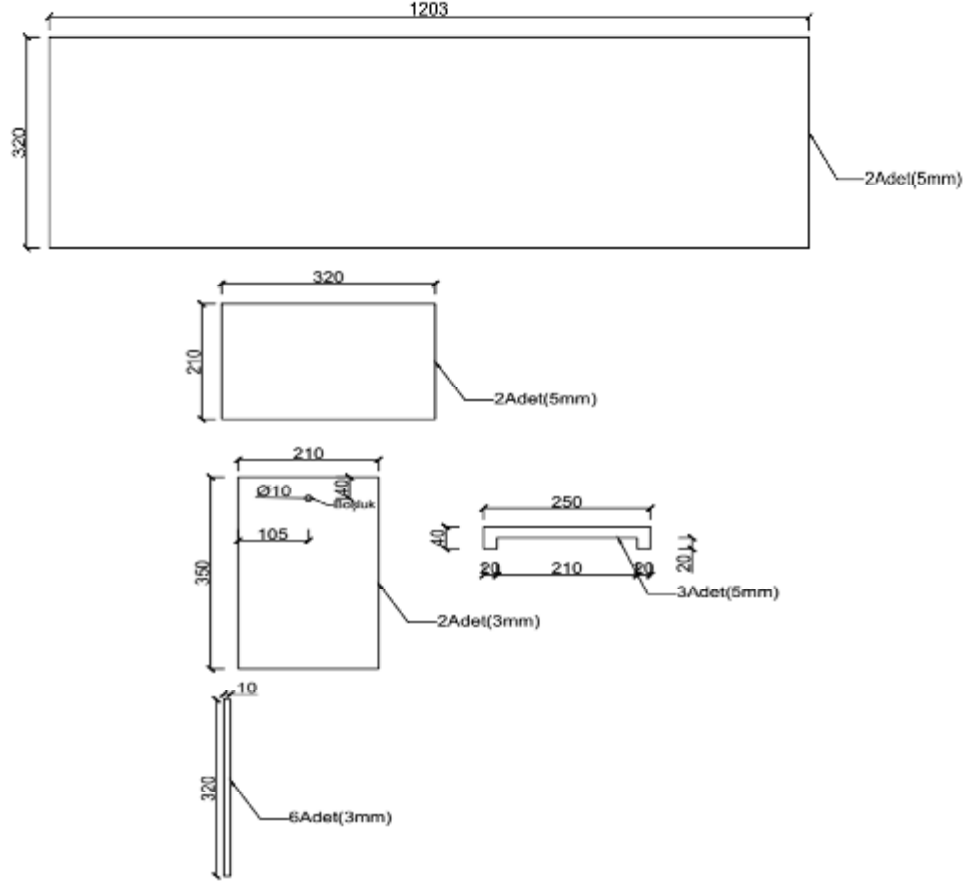
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Deney Düzeneği ve Yöntemi

Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının mansapta yayılımının incelenmesi için yapılan deneysel çalışmalar Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı dikdörtgen şeklindeki kanal; rezervuar yüksekliği ve ıslak haldeki mansap serbest yüzeyine oranı (0.10, 0.20 ve 0.40) olan, ayrıca memba ve mansap uzunluklarının birbirleri ile orantılı olması amacı ile sırasıyla 0.30 m ve 0.916 m olacak şekilde dizayn edilmiştir. Kanal malzemesi pleksiglastan teşkil edilmiştir. Kapak mekanizması ve kapak 3 mm, kanalı oluşturan diğer kısımlar da 5 mm malzemeden imal edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1a. Deney kanalı demonte ölçüleri-I (mm)



Şekil 4.1b. Deney kanalı demonte ölçüleri-II (mm)

Malzemeler pleksiglas tek parça plakalardan CNC’de uygun ölçülerde kesilerek oluşturulmuştur. Daha sonra parçalar kloroform yapıştırıcı ile birleştirilerek kanal toplamda 1.216 m uzunluğa, 0.32 m yüksekliğe ve 0.20 m genişliğe sahip olacak şekilde birbirine monte edilmiş, yatay bir düzlem üzerinde konumlandırılacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Deney kanalının pleksiglas malzemeden teşkili

Kanal yapısının üst kısmında kanalın çeşitli sebeplerle deforme olmasını önlemek amacı ile 3 mm pleksiglas malzemeden üç adet kelepçe dizayn edilmiştir. Kelepçelerden birisi kapağa yakın, diğerleri de mansapta birbirine eşit uzaklıkta olacak şekilde kanala monte edilmiş ve körleşmeleri önlemek amacı ile ileride bahsedilecek olan aydınlatma sisteminin bir parçası olarak yerleştirilen beyaz arka fona tutturulmuştur. Kelepçeler kanalın tahliyesi sırasında kolayca çıkarılıp tekrar takılabilmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Pleksiglas kelepçelerin oluşturulması ve konumlandırılması

Baraj yıkılması akım problemini simüle edebilmek için deney kanalına 3 mm pleksiglas malzemeden bir adeti yedek olmak üzere iki adet 0.35 m yüksekliğinde kapak imal edilmiştir. Kapağın gireceği yuva kısmı ise 1 cm uzunluğunda, 3 mm kalınlığında ve kanal yüksekliği kadar karşılıklı dört adet parçadan oluşturulmuş ve kanala kloroform yapıştırıcı ile monte edilmiştir. Yuva parçalarının aralığı ise kapağın rahatça girebilmesi için 3 mm olarak ayarlanmıştır (Şekil 4.4).

Kapak yapısına bağlı olacak şekilde baraj yıkılmasının ani olarak ele alınması düşüncesiyle tek doğrultuda çalışacak makara sistemi düzenlenmiştir. Kapak yapısı ve makara düzeni sistemi çalıştırabilmek adına yeterli olamamakta arada bağlantıyı rijit bir şekilde oluşturmak gerekmektedir. Bu bağlamda kapağın üzerindeki deliğe ip yardımı ile bağlanan yaklaşık 2 kg ağırlığında metal bir aksam oluşturulmuştur.

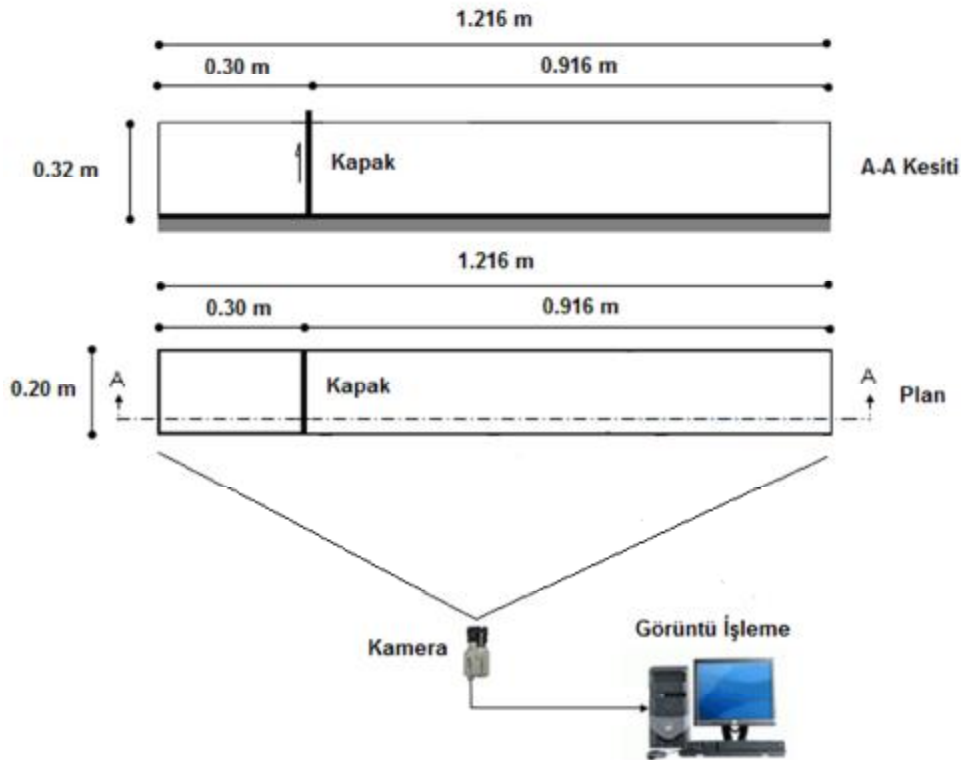


Şekil 4.4. Kapak yuvaları ve üst kısmının teşkil edilmesi

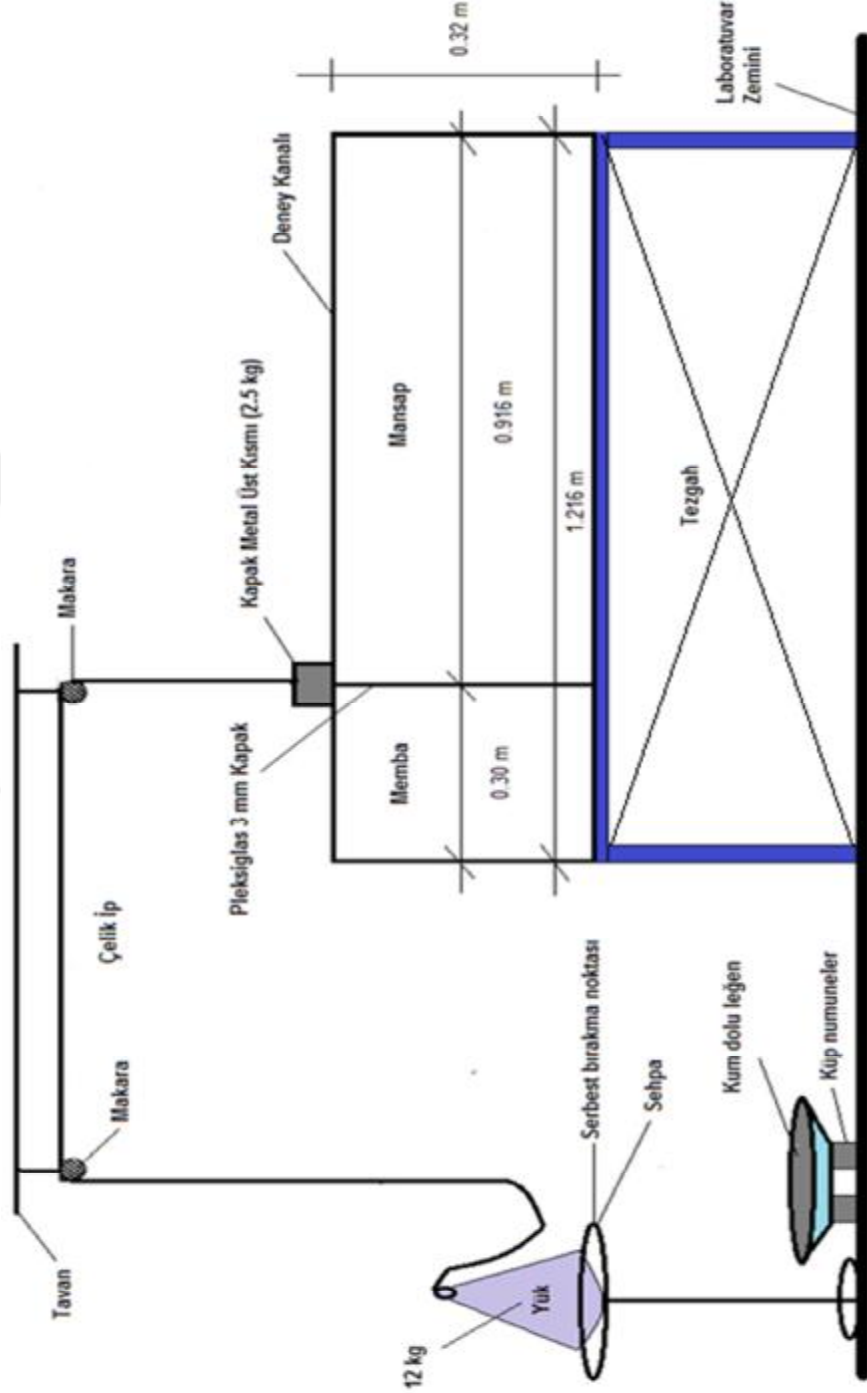
Metal aksam kapağa vidalar yardımı ile tutturulmuş, makara sistemine bağlanan ipler ise kuvveti iki eşit parçaya ayıracak şekilde oluşturulmuştur. Ağırlık etkisi aynı zamanda membadaki akışkanın mansaba doğru sızmasını engelleyebilme özelliğine de sahiptir. Kapağın tek doğrultuda ve düzgün hareket edebilmesi amacı ile oluşturulan makara sisteminde en önemli parçalardan birisi de laboratuvarın tavan kısmına monte edilen iki adet bayrak makarasıdır. Kapak üst

kısmına bağlanan ipler söz konusu makaralardan geçirilmiş ve poşetlerle sarılarak kumdan teşkil edilen yaklaşık 12 kg ağırlığında yüke iletilmek sureti ile sistem hazır hale getirilmiştir. Deney düzeneğinin yerleşim planı ve kesitini Şekil 4.5'te, genel bir şematiğini ise Şekil 4.6'da görebilmek mümkündür.

Lauber ve Hager (1998) kapağın yukarı doğru çekilmesi sürecinde $1.25(h_0/g)^{1/2}$ 'den daha az bir zaman dilimi olması halinde yıkılmanın ani yıkılma olarak değerlendirilebileceğini ifade etmişlerdir. Yapılan deneylerde $h_0=0.15$ m olarak öngörüldüğünden 0.155 s sınır değeri göstermektedir. Video görüntülerinden kalkma anı yaklaşık olarak 0.10 s'nin altında olduğundan kapak hızlı bir şekilde kalkmakta, yıkılma anı yıkılma şartlarını sağlamaktadır.

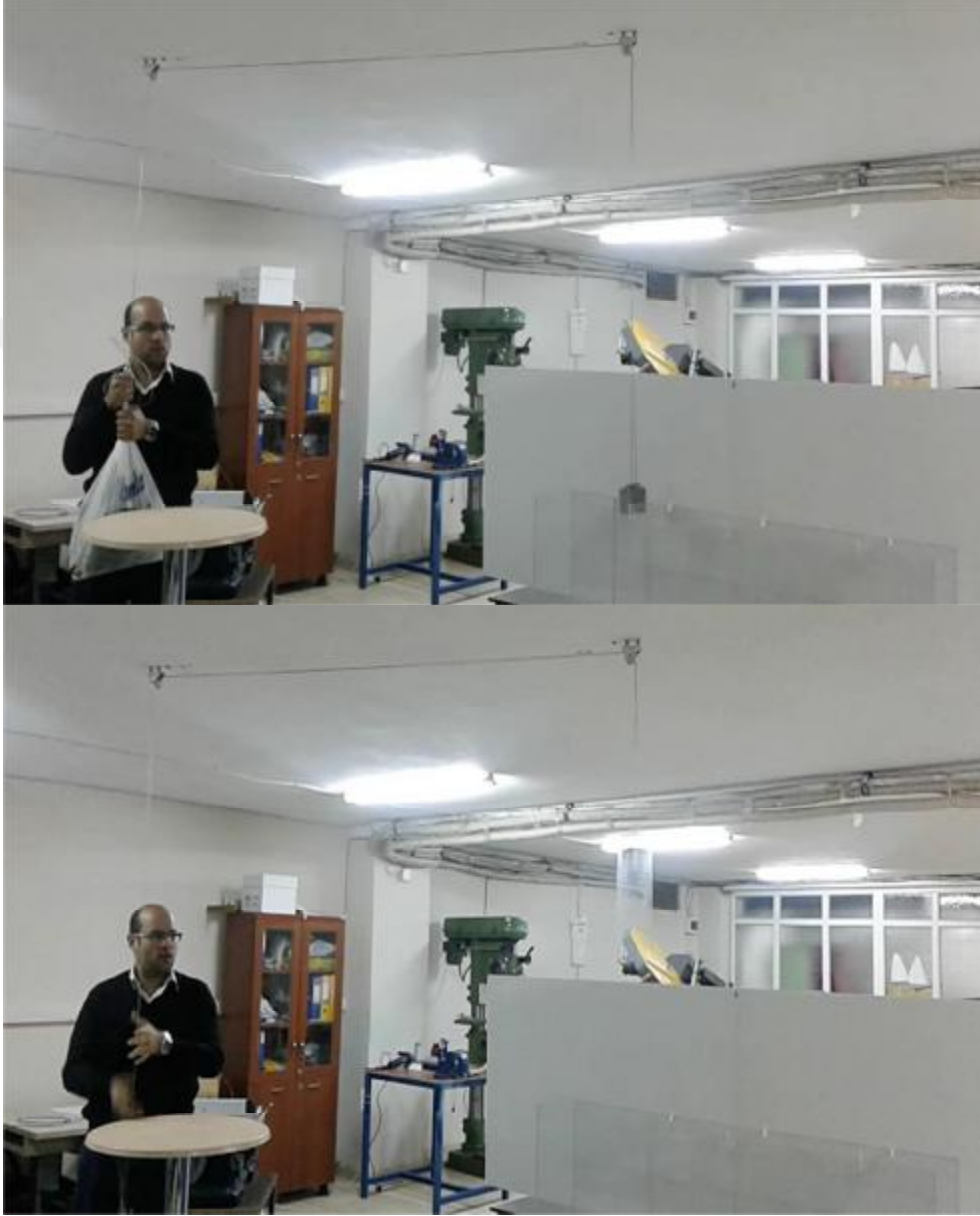


Şekil 4.5. Deney düzeneği yerleşim plan ve kesiti



Şekil 4.6. Deney düzeneğinin genel bir şematığı

Şekil 4.7’de makara ve yük sistemi gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Makara ve yük sistemi

Yükün belirli bir yükseklikten serbest bırakılması sürecinde hız etkisini düzenleyebilmek ve oluşabilecek titreşimleri azaltabilmek için yükün kumla dolu leğene düşürülmesi sağlanmıştır. Ayrıca ani baraj yıkılması şartları oluşturabilmek amacı ile yükseklik kontrolü için leğen dört adet küp beton numune üzerine oturtulmuştur (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Yük teşkili

Mekanik sistem deney düzeneğinin oluşturulmasında sadece birinci aşama olup, diğer aşama ise aydınlatma sistemidir. Görüntülerin elde edilmesinde aydınlatma önemli bir unsur olarak görüldüğünden iki adet ayaklı, iki adet de tavana monte LED ışık kaynağı aydınlatma sistemi içerisine dahil edilmiştir. Ayaklı ışık kaynaklarının aydınlatma gücü yaklaşık 200 W olup, biri membada diğeri de mansap ortasına yakın tavana monte iki adet ışık kaynağının gücü yaklaşık 300 W değerindedir. Dolayısı ile toplamda yaklaşık 500 W sürekli ışık kaynağı ya da aydınlatma sistemi oluşturulmaya çalışılmıştır. Görüntü netliğini daha da arttırmak, mevcut ışık kaynaklarının kanal üzerinde gölge ve yansıma yapmasını önlemek amacı ile kameranın arkasına siyah kumaştan bir örtü asılmıştır (Şekil 4.9).

Önceden değinildiği üzere kanal arka kısmına beyaz fon teşkil edilmiştir. Fon deney düzeneğinde görüntü karmaşasını gidermek ve baraj yıkılması akımını ön plana çıkarabilmek adına 5 mm kalınlığında strafor levhadan oluşturulmuştur. Ayrıca deney kanalında akışkan seviyelerini ölçebilmek ve görüntü kalibrasyonlarında konum tespiti yapabilmek için kanal yüzeyinin alt ve yanlarına m cinsinden mezure parçaları kesilip yapıştırılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.9. Aydınlatma sistemi bileşenleri

Deney kanalı laboratuvarında mevcut tezgahın ön kısmına yerleştirilmiş ve hep aynı noktalardan görüntü alabilmek amacı ile konumu işaretlenmiştir. Aynı şekilde aydınlatmaların en iyi olduğu nokta tespit edilerek ayaklı ışık kaynakları belirlenen yerlere yerleştirilmiş, ışıklar ve kamera konumları işaretlenerek sabitlenmesi sağlanmıştır. Tavandaki ışık kaynakları ise zaten sabit durumda bulunmaktadır.

Baraj yıkılması deney koşullarının oluşturulmasında başlangıçta en önemli sorunlar akışkanların sızma ve kanalın boşaltılması yani tahliye problemleri olarak öngörülmüştür. Metal aksamdan oluşturulan kapak üst kısmı kendi ağırlığının etkisi ile kapağı her ne kadar kanal tabanına oturtabilse de imalattan kaynaklanan boşluklar nedeniyle membadaki akışkanın mansaba sızmasına engel olma konusunda yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Dolayısı ile kapağın alt kısmına şeffaf

silikondan ince bir tabaka oluşturulup, metal aksamın etkisiyle kapağın taban yüzeyine yayılması sağlanmış, böylece sızma tamamen önlenmiştir.



Şekil 4.10. Deney kanalının ölçülendirilmesi

Kapak yuvalarının olduğu noktalardan akışkan geçişlerini durdurabilmek için her deneyden önce akım davranışına olumsuz etkisi olmayacak şekilde kapak mekanizması ve kanal yuvalarına şeffaf vazelin uygulanmıştır.

Tahliye problemine değinecek olursak her deney sonrası kanalın tamamen boşaltılıp temizlenerek bir sonraki deneye kadar tekrar hazırlanması gerekmektedir. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi kanalın doldurulma işlemi düzeneğe yakın musluk kısmından hortumla, boşaltma işlemi ise akvaryumlarda daha çok kullanılan dip çekme aparatı vasıtası ile yapılmıştır.



Şekil 4.11. Dip çekme aparatı

Akışkan su ise kanal sadece boşaltılırken, özellikle yağ ve tuzlu su olduğunda yeni deneye kadar uygun temizlik malzemeleri ile tamamen temizlenmesi sağlanmıştır.

Deneylerde kullanılan akışkanların fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi amacı ile öncelikle ortam sıcaklığı tüm deneyler boyunca ölçülmüştür. Ortam sıcaklığının yaklaşık oda sıcaklığına yakın olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.12). Deneylerin yapıldığı dönem bahar dönemi ve kısa bir zaman periyodunu kapsadığından çok büyük değişimler gözlenmemiştir. Bu sebeple tüm modelleme çalışmalarında oda sıcaklığı baz sıcaklık değeri olarak alınmıştır.



Şekil 4.12. Ortam sıcaklığı ve nem ölçümü

Fiziksel özelliklerden bir diğeri viskozite olup, viskozite herhangi bir akışkanın yüzey gerilimi etkisinde deforme olmamak için gösterdiği direncin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Aslında akışkanın akamazlığı veya iç direnci olarak da ifade edilebilir. Viskozite farklı viskozimetreler aracılığı ile çoğunlukla 25°C'de ölçülmektedir.

Deneylerde kullanılan akışkanlardan suyun viskozite değeri yani dinamik viskozite değeri aynı sıcaklık şartlarında 0.001 kg/m/s olarak sabit alınmıştır. Yoğunluk 1000 kg/m³ olarak değerlendirilmiştir (<http://www.viskozimetre.com/>). Yağ olarak ise birçok avantajından ötürü ayçiçek yağı tercih edilmiştir. Yağın ve

tuzlu suyun viskozite değerleri ise Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Mühendisliği Laboratuvarı'ndaki Brookfield viskozimetre cihazında ölçülmüştür.

Sıcaklık olarak oda sıcaklığı baz alınmış, centipoise (cP) cinsinden değerler elde edilmiştir (Şekil 4.13). Oda koşullarında gerekli kalibrasyon işlemleri yapılması neticesinde yağın viskozitesi 50 cP veya 0.05 kg/m/s; tuzlu suyun ise 18 cP yani 0.018 kg/m/s ölçülmüştür.

Yağ olarak ayçiçek yağı tercih edildiği için yoğunluğu 25°C'de 910 kg/m³ olarak kullanılmıştır (<http://www.aycicekyagi.net/>). Ek B'de "Akışkan Viskozite Tablosu" gösterilmektedir. Tuzlu suyun yoğunluğu ise ortam sıcaklığı ve karışım oranından direkt olarak etkilendiği için yoğunluk ölçümleri yardımı ile Şekil 4.14'te gösterildiği gibi bulunmuştur.



Şekil 4.13. Yağ ve tuzlu suyun Brookfield viskozimetre ile ölçülmesi

Tuzlu suyun karışım oranı eldeki kaplar ve malzeme miktarı göz önüne alınarak %20 olarak öngörülmüştür. Bu oranı mevcut kaplarda homojen bir şekilde elde etmek uzun zaman süreci gerektirdiğinden laboratuvarındaki torna cihazına beton karıştırıcı uç monte edilerek hızlı devir yapması sağlanmış, böylece kısa bir

zaman zarfında tuzlu suyun homojen karışımı elde edilmiştir. Sonuç olarak tuzlu suyun yoğunluğu 1200 kg/m^3 olarak işlemlerde kullanılmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.14. Tuzlu suyun yoğunluğunun tespit edilmesi



Şekil 4.15. Tuzlu suyun homojen dağılımı için tornada karıştırılması

Akışkanların fiziksel özellikleri tamamlanmış olmasına rağmen en önemli sorunlardan bir diğeri de her bir deney tamamlandıktan sonra özellikle yağın tekrar kullanılamaması durumudur. Bu durum kullanılacak malzemenin maliyetinin

artması anlamına geleceğinden, yağın fiziksel ayrıştırılması gerçekleştirilerek sonraki deneylerde faydanılabilmesinin önü açılmıştır. Böylece malzemenin verimli kullanılması noktasında ciddi bir avantaj söz konusu olmuştur.

Su-Yağ ve Tuzlu Su deneylerinin bitimi ile birlikte kanal içerisindeki birbirine karışamayan akışkanların büyük plastik şişelere dökülmesi sağlanmıştır. Bir süre beklenmesi sonucunda fiziksel olarak yoğunluğu oranında su ve yağ birbirinden ayrılmıştır. Daha sonra şişelerin kapakları belirli hızlarda açılarak yoğunluğu yüksek olan suyun akması sağlanmış, dolayısı ile kapta sadece yağ kalmıştır. Dolayısı ile su ve yağ birbirinden ayrıştırılarak yağın tekrar kazanımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Su-y yağ karışımının ayrıştırılması

Deney başlangıcında yağın kanala dökülmesi huni yardımı ile yapılmış, bu sayede yağın kanalda görüntü kirliliği yaratması önlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Yağın deney kanalına huni ile aktarılması

Deneylerde akışkan renk karakterizasyonu oluşturmak amacıyla su mavi renkli, tuzlu su kırmızı renkli gıda boyası ile renklendirilerek akımın rahatça takip edilebilmesi sağlanmıştır. Gıda boyasının en önemli avantajı homojen dağılabilmesi ve akımı olumsuz etkilememesidir. Özellikle kuyruk suyu deneylerinde ani yıkılma sonrası akım geçişlerini gözlemleyebilmek amacı ile mansaptaki akışkana farklı renk gıda boyası ilave edilmiştir. Şekil 4.18’de membada 0.15 m mansapta ise 0.030 m suyun bulunduğu Su-Su ($\alpha=0.20$) baraj yıkılması deney çalışmasının renklendirilmesi görülmektedir. Tuzlu su karışımlarının olduğu deneylerde de aynı şekilde farklı renklendirme uygulanmıştır. Yağın kendi renginin yeterli olduğu düşüncesiyle yağ deneylerinde herhangi bir gıda boyası eklenmemiştir.



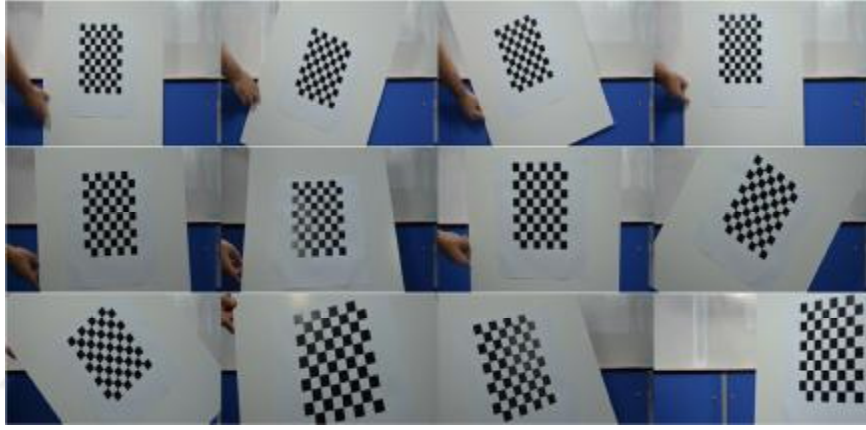
Şekil 4.18. Su-Su ($\alpha=0.20$) deneyinde akışkanların gıda boyası ile renklendirilmesi

Deneylere başlamadan önce kameranın hassas ayarlamaları üzerinde durulmuştur. İlk olarak enstantane ve ISO ayarları düzenlenmiştir. Çeşitli enstantane ve ISO seçeneklerinde kameranın video çekim netlikleri, hızları,..vb. gibi birçok özellik kontrol edilmiştir (Şekil 4.19). En uygun çekim seçeneğinin 1/125 enstantane, 85 mm, f3.5 ve 1250 ISO ayarı olduğu görülmüştür.



Şekil 4.19. Enstantane ve ISO ayarları

Son olarak kamera kalibrasyonu yapılmıştır. Satranç tahtası görünümlü beyaz strafordan levha yardımıyla 12 farklı açıdan görüntüler alınmış, baraj yıkılması akım görüntülerinin elde edilen kalibrasyon parametreleri sayesinde işlenmeye uygun hale getirilmesi sağlanmıştır (Şekil 4.20). Şekil 4.21’de kalibre edilmiş bir deney görüntüsü görülmektedir. Tek kamera ile hep aynı koordinatlardan çekimler gerçekleştirildiği için kalibrasyon sonuçlarına göre hata oranı oldukça düşük çıkmıştır.



Şekil 4.20. Kalibrasyon ayarı



Şekil 4.21. (a) Orijinal görüntü (b) Kalibre edilmiş görüntü

Deney çalışmalarına geçmeden önce deney kanalının oluşturulması, akışkan seçimleri ve modelleme konularına değinecek olursak literatürde baraj yıkılması akım probleminin araştırıldığı oldukça fazla sayıda yayın bulunmaktadır. Bu yayınların birçoğunda deneylerin gerçekleştirildiği kanalların ölçülerinin orantılı olarak belirlendiği görülmüştür. Bu çalışmada da kapak yapısının birbirini ayırdığı memba ve mansap kısımları oranının yaklaşık 1/3 oranında, rezervuardaki akışkan yüksekliğinin memba uzunluğuna oranının yaklaşık 1/2 oranında olması sağlanmıştır. Baraj yıkılması şartları oluşturulduğunda akışkanların kanaldan taşmasının önüne geçebilmek amacı ile kanal yüksekliği mambadaki akışkan yüksekliğinin 0.15 m alınması sebebiyle 0.32 m olarak öngörülmüştür. Farklı yoğunlukta akışkan kullanılması nedeniyle etkin bir deney oluşturulması için kanalın çok büyük olmaması tercih edilmiştir.

Akışkan seçimi konusunda epey bir araştırma yapılmış, çeşitli Nevtoniyen akışkanların kullanılıp kullanılmaması durumu ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Su, yağ, tuzlu su, süt, karışımlarla oluşturulacak sıvı lateks, Carboxymethyl Sodyum Selüloz (CMC)-Yağ ile, PEO, Doygun kil bentonit, silikon yağı, reçine yağı, hexane,...vb. gibi akışkanlar etraflıca araştırılmıştır. Atık barajlarında demir cevheri ve siyanür gibi zehirli kimyasallar bulunduğundan yaklaşım yapabilmek amacı ile farklı yoğunluk konusu irdelenmeye çalışılmıştır. CMC'nin gıda katkı malzemesi olarak kullanıldığı, suda çözünen sentetik bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Suyla karıştırıldığında akışkanlığının ciddi oranda azaldığı belirtilmektedir. Bu durum viskoziteyi ayarlayabilmek yönünden avantaj gibi gözükse de kimyasal içeriğinden dolayı kanserojen riski taşıdığı gözden kaçırılmaması gereken bir ayrıntı durumundadır. PEO çözeltisi suda çözünmekte, yağlar ile karışımı sınırlı olmaktadır. Fakat en önemli dezavantajı kimyasal olarak tehlikeli olması olup vücutla temasından kaçınılması gerekmektedir. Silikon yağı her yerde kullanılabilen bir akışkan yapıya sahip olmasından dolayı üç farklı viskozite büyüklüğünü elde edebilmek mümkün olmaktadır. Buna karşın kanserojen riski yine en önemli handikap durumundadır.

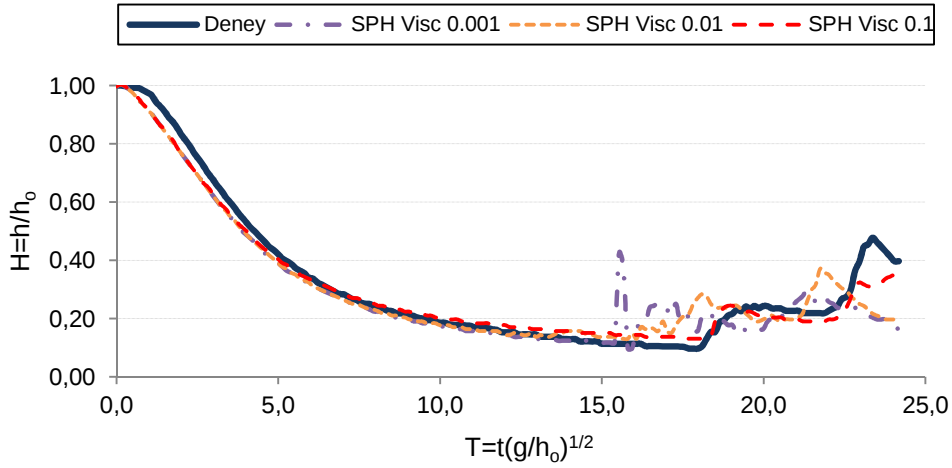
İncelemeler sonucunda üç farklı yoğunluk elde edilebilmesi düşüncesinden yola çıkılarak su, yağ ve tuzlu su tercih edilmiştir. Suyun orta yoğunlukta akışkan olması sağlanarak sudan daha düşük yoğunluklu yağ ve daha yüksek tuzlu su akışkan seçimlerini oluşturmuştur. Su, yağ ve tuzlu su deneyleri kendi içerisinde miscible fluids yani karışabilen akışkanlar; birbirleri ile karşılaşmaları durumunda ise immiscible fluids yani karışamayan akışkanlar olarak değerlendirilmektedirler. Monaghan ve Kocharyan (1994) en ilgi çekici akışkanlar dinamiği problemlerini birden fazla fazın bulunduğu çok fazlı akım problemlerinin oluşturduğunu ifade etmiştir.

Nümerik modellemeler Flow-3D yazılımı ve SPH tabanlı program olan DualSPHysics aracılığı ile yapılmıştır. Flow-3D yazılımında en önemli unsurlardan birisi mesh aralığı seçimidir. Mesh aralığı için bilgisayar altyapısının uygunluğu ölçüsünde 0.5 cm uygulanması uygun görülmüştür. Çünkü tanımlanan geometrinin özellikle sınır koşullarında mesh uygunluğu açısından 0.5 cm minimum değer olması açısından çok önemlidir. Viskoziteler laboratuvar ölçümlerinde elde edilen değerler olarak programa girilmiştir. Modellemelerde çözüm süresi 3 s ve çözüm aralığı 0.0167(1/60 fps) olarak değerlendirilmiştir. Dolayısı ile 180 zaman adımı oluşmuştur. Simülasyon birimlerinin SI birimine uygun olması sağlanmıştır. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığı ölçüsü olarak alınmıştır. Türbülans modeli daha önceden de anlatıldığı üzere sık kullanılan k-ε modeli olarak değerlendirilmiştir. Yoğunluklar daha önce belirlenen yoğunluklar şeklinde modellemelerde tanımlanmıştır.

SPH modellemelerinde en büyük sorun viskozite teriminin yapay viskozite şeklinde tanımlanmış olmasıdır. Bu durum akışkan hareketini simüle etmede akışkanlığı oldukça değiştirmektedir. Yapay viskozite SPH dalga yayılımı problemlerinde fiziksel parçalanmaları önlemek amacı ile oluşturulmuştur. Eğer yapay viskozite olmasa idi fiziki olarak dalga ilerlemesi safhalarında ciddi salınımlar oluşması söz konusuydu. SPH yönteminde genelde en çok “*Monaghan Tipi Yapay Viskozite*” yaklaşımı benimsenmektedir (Özbulut, 2008). Bu çalışmada SPH yapay viskozite değerini belirlemek için tüm akışkanlar için değişik yapay

viskozite değerinde modellemeler yapılmış, en uygun değerin 0.10 olduğu gözlemlenmiştir. Diğer viskozite değerleri 0.10 ile birlikte baraj yıkılması akımını başlangıç aşamalarında iyi temsil ederken, $T=15$ itibari ile dalga yansıması nedeniyle parçacıklarda kopmalar olduğundan grafiklerde sapmalar görülmektedir. Dolayısı ile viskozite değerinin artması ile akışkan hızı yavaşlamakta parçacıklar birbirinden ayrılamamaktadır.

Örnek olarak akışkanın su olduğu kuru mansapta $A=0.15$ m noktasında üç farklı yapay viskozite değerinde DualSPHysics programı ile modellemeler yapılmış ve elde edilen boyutsuz H-T grafikleri Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de ise programa girilen SPH parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.22. Yapay viskozite tayini

Çalışmada çekimi yapılan görüntülerin çözünürlüğü 1280*720 olup, çekim hızları 60 fps’dir. Saniyede 60 görüntü elde edildiğinden noktasal seviye ölçümlerinde data adım aralığı 0.0167 olarak değerlendirilmiştir. Bir başka ifade ile çalışmada 0.0167 s aralıklarla elde edilen görüntüler sayısallaştırılmıştır. Noktasal su seviyesi değişimleri h-t (derinlik-zaman) grafikleri ile belirlenmiş, boyutsuzlaştırılarak H-T şeklinde irdelenmiştir. Deneylerde ortalama 25 s çekim

süresine sahip video görüntüler oluşturulmuş, görüntü işleme teknikleri kullanılarak istenilen grafikler elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. SPH kullanılan parametreler

Proses	Parametreler
Versiyon	DualSPHysics
Boyut	2D
CFL Katsayısı	0.20
Coefsound Değeri	20.0
Coefficient Value	1.0
Gamma Value	7.0
Eps Value	0.5
Kernel Çeşidi	Cubic Spline
Zaman Adımı	Verlet
Viskozite Davranışı	Yapay Viskozite ($\alpha=0.10$)
Hal Denklemi	Tait Equation
IncZ	0.5
ShepardSteps	0.0
DeltaSPH Değeri	0.10
Sınır Koşulları	Dinamik
İnterpolasyon Uzunluğu	3.0
Akışkan Parçacığı Sayısı	46.857
Akışkan Parçacık Aralığı (dp)	0.001

4.2. Deney ve Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deney ve modellemeler sadece membada akışkanın bulunduğu kuru hal ($\alpha=0$), akışkanların birbirine karışması ($\alpha=h/h_0=0.10, 0.20$ ve 0.40) ve karışamaması durumları ($\alpha=0.10, 0.20$ ve 0.40) olarak ele alınmıştır. Birbirine

karişamayan tuzlu su ve yağ deneyleri bir tek $\alpha=0.20$ derinlik oranı için incelenmiştir. Akışkanlar memba ve mansap olarak farklı kısımlar için çeşitli varyasyonlarla irdelenmiştir. Aynı tür akışkanlar birbirine karişabilmekte, farklı türde akışkanlar karişamamakta ve yoğunluk etkisine bağlı olarak davranışları değişebilmektedir. Deney sonuçları görüntü işleme teknikleri kullanılarak sayısallaştırılmış, modellemeler için Flow-3D yazılımı ve SPH yönteminden faydanılmıştır. Çalışma sonucunda akışkanların yayılımı esnasında belirli anlardaki görüntülerinin yanı sıra önceden belirlenmiş noktalardaki serbest akışkan derinlik değişim eğrileri oluşturulmuştur.

Kuru durum için 3, ıslak durum için 9, karişamayan akışkan durumu için 8, doğrulama için 1 olmak üzere toplamda 21 adet deney uygulanmıştır (izelge 4.2). Her bir deneyin çekim süresi yaklaşık 25 s olup toplamda 525 s yani 0.146 sa'lık görüntüler elde edilmiştir. Baraj yıkılması akım probleminde başlangıç aşamaları önemli olduğundan $t_0=0$ s, $t_1=0.0167$ s, $t_2=0.0833$ s, $t_3=0.1336$ s, $t_4=0.1837$ s, $t_5=0.2338$ s, $t_6=0.2839$ s, $t_7=0.4509$ s, $t_8=1.0020$ s, $t_9=1.2525$ s, $t_{10}=1.6700$ s, $t_{11}=2.0040$ s, $t_{12}=2.3380$ s ve $t_{13}=2.9893$ s zamanlarındaki anlık görüntüler her üç yöntem ile gösterilerek birbirleriyle mukayese edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca birbirine karişamayan akışkanların birbirleri ile karişılaşmaları durumundaki davranışlarını geniş ölçekte inceleyebilmek amacı ile 180 zaman adımının modellendiği taşkın şok dalgasının mansapta seçilen farklı anlardaki 11 adet simülasyon görüntüsü ve deney sonuçları sunulmuştur. Daha önce ifade edildiği gibi Kocaman (2007)'nin yaptığı çalışmadaki deney ve RANS tabanlı Flow-3D modelleme sonuçları bu çalışmada SPH yöntemi ile de mukayese edilerek SPH'ın HAD problemlerini zebilme hassasiyeti test edilmeye çalışılmıştır. Kuru durum, ıslak durum (0.10 ve 0.40), üçgen ve trapez eşik P1, P2 ve P4 noktaları için incelenmiştir. Aynı zamanda anlık görüntüler de birbirleri ile karişılaştırılmıştır.

Grafiklerin x ve y eksenlerinde boyutsuz ifadeler kullanılmıştır. Boyut ifadesi aslında sayısal değer olmadan fiziksel miktarın bir ölçüsü anlamına gelmektedir. Boyutsuzlaştırma işlemi çoğunlukla analizlerin denetimli bir şekilde

yapılabilmesi açısından önemli bir faktör olarak görülmektedir. Bu sebeple işlemler boyutsuzlaştırılarak değişken sayısı azaltılabilmekte, incelenen parametre hakkında daha net fikirler ortaya konulabilmektedir. Böylece boyut etkisinden bağımsız değerlendirmeler yapılması mümkün olabilmektedir.

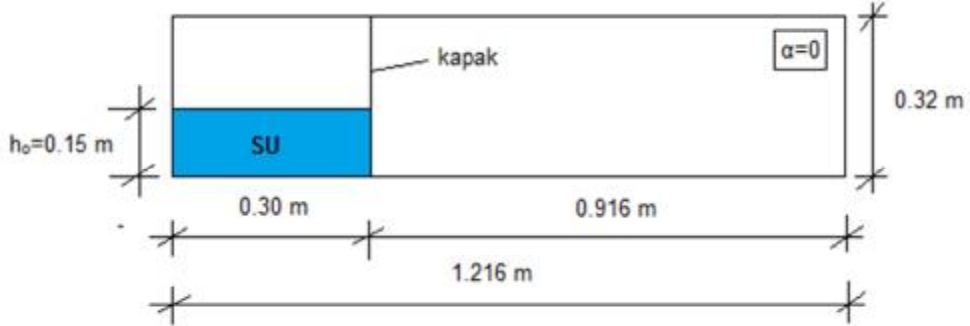
Çizelge 4.2. Çalışma kapsamındaki deneyler

Deneyler	Sayısı (Akışkanlar)
Kuru Hal ($\alpha=0$)	3 (Su, Yağ ve Tuzlu Su)
Karışabilen Islak Hal ($\alpha=0.10$)	3 (Su, Yağ ve Tuzlu Su)
Karışabilen Islak Hal ($\alpha=0.20$)	3 (Su, Yağ ve Tuzlu Su)
Karışabilen Islak Hal ($\alpha=0.40$)	3 (Su, Yağ ve Tuzlu Su)
Karışamayan Islak Hal ($\alpha=0.10$)	2 (Su-Yağ ve Yağ-Su)
Karışamayan Islak Hal ($\alpha=0.20$)	4 (Su-Yağ, Yağ-Su, Tuzlu Su-Yağ ve Yağ-Tuzlu Su)
Karışamayan Islak Hal ($\alpha=0.40$)	2 (Su-Yağ ve Yağ-Su)
Doğrulama Deneyi	1 (Su-Su $\alpha=0.10$)
Kocaman (2007) Deneyleri SPH Karşılaştırma	5 (Kuru, Islak Hal-0.10 ve 0.40, Üçgen Eşik ve Trapez Eşik)
TOPLAM	26

4.2.1. Kuru Hal Sonuçları

4.2.1.1. Akışkanın Su ($\alpha=0$) Olduğu Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m (h_0) yüksekliğinde suyun bulunduğu, mansabın ise kuru halde olduğu çalışmadır. Şekil 4.23'te kuru durumun şematik gösterimi verilmiştir.



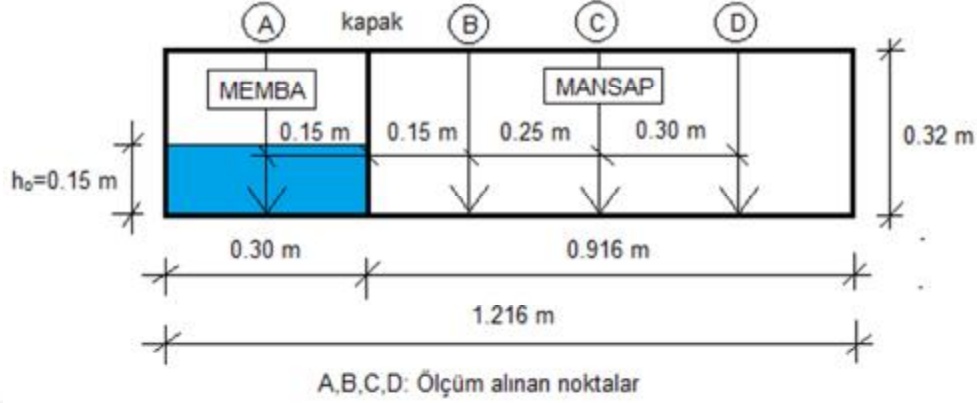
Şekil 4.23. Su kuru durum şematik gösterimi

Kanal tabanı x eksenini, kapağın yer aldığı düzlem y eksenini olarak seçilmiş, su durgun halde ve kanalın x eksenindeki başlangıç noktası orijin olarak değerlendirilmiştir. Pleksiglas malzeme nedeniyle kanalın pürüzlülüğünün oldukça düşük olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.24'te Su kuru durumunun deney başlangıç anı gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Su kuru durumu deney başlangıç anı (t=0)

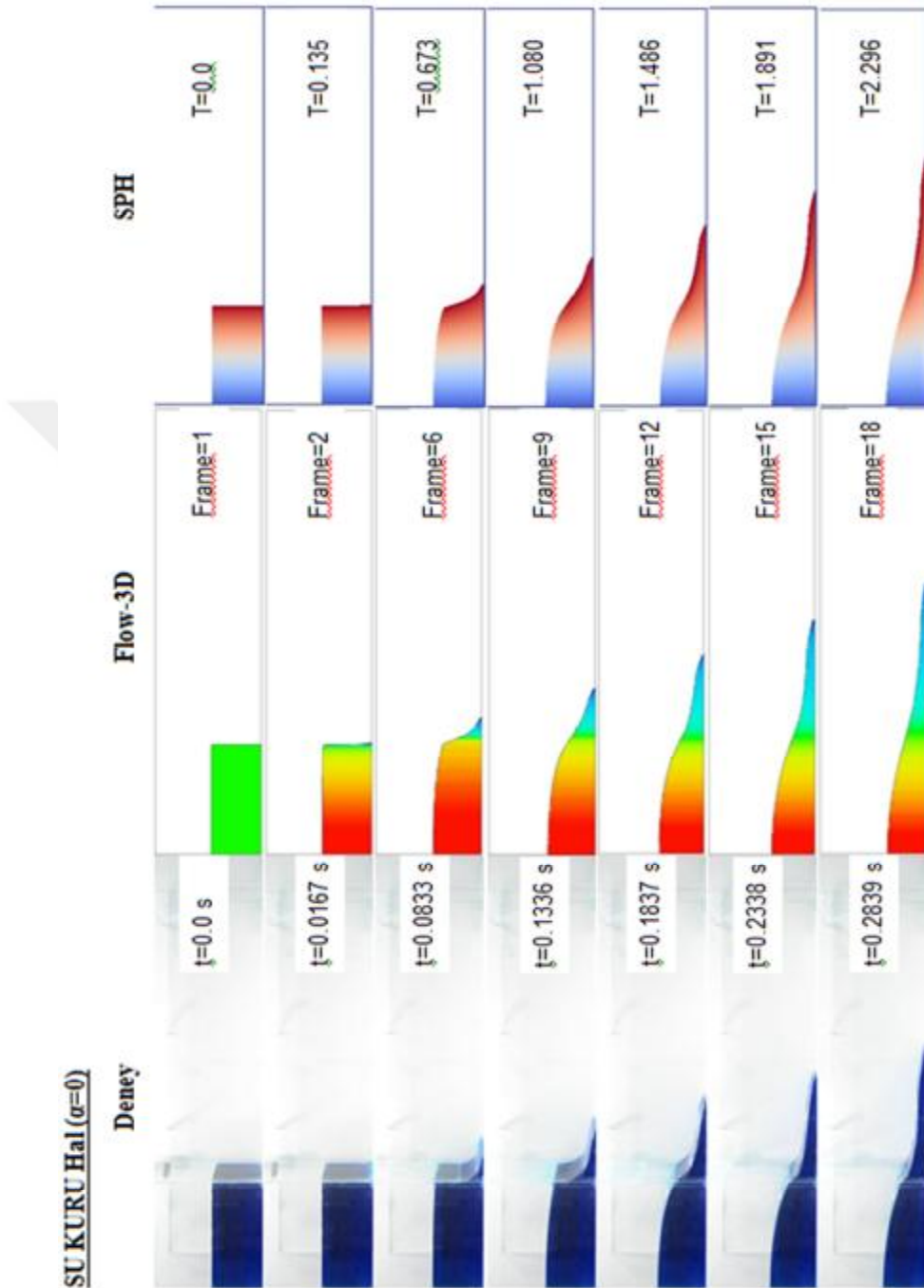
Tez çalışması kapsamında biri membada diğer üçü de mansapta A,B,C ve D gibi dört farklı noktanın akışkan seviye değişimleri incelenmiştir (Şekil 4.25).



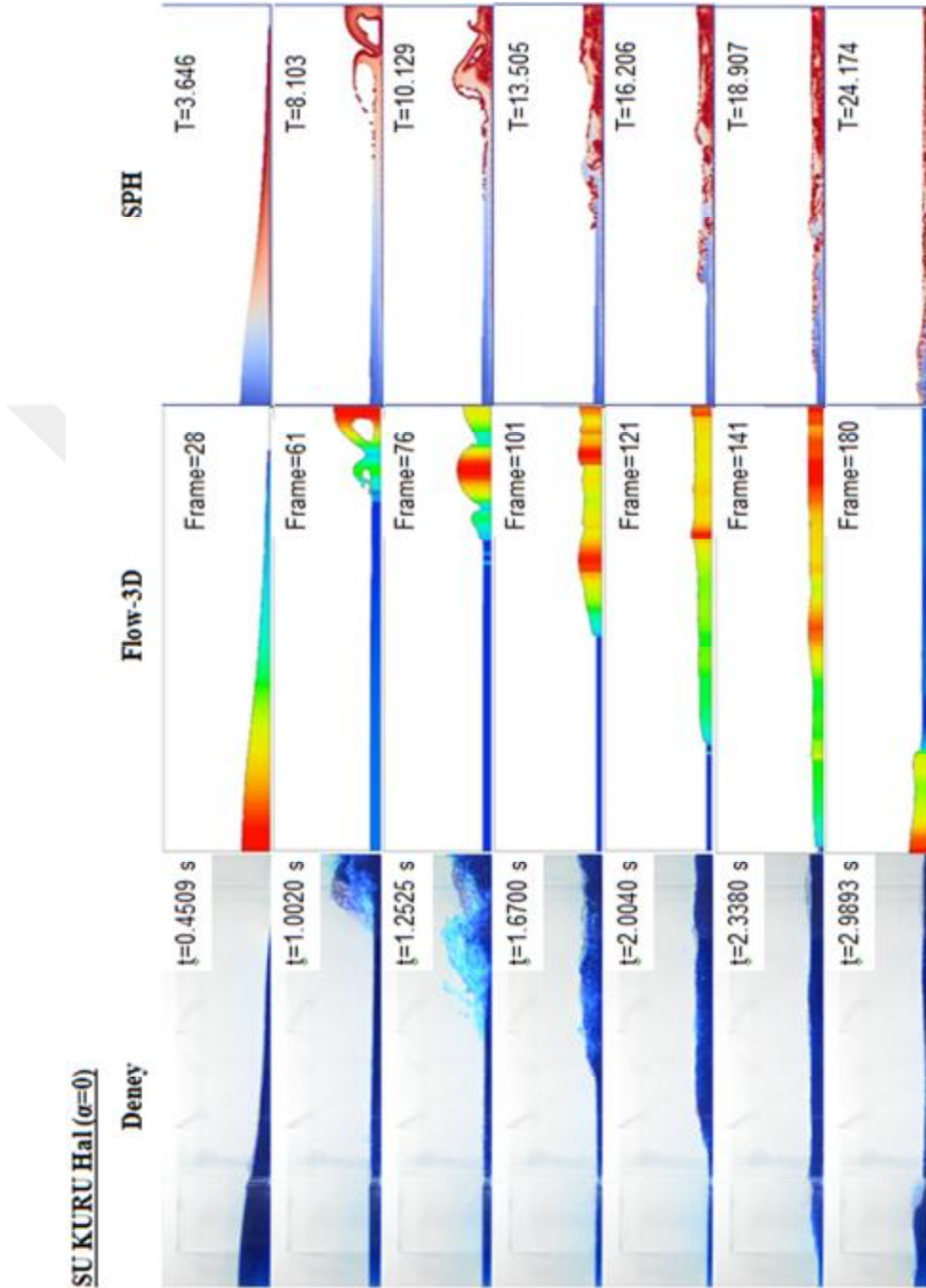
Şekil 4.25. Akışkan seviye değişimlerinin ölçüldüğü noktalar

Membada seçilen A noktasının membranın tam orta noktasında, B noktasının ise kapağa simetrik olacak şekilde kapaktan mansap doğrultusunda 0.15 m uzaklıkta olması sağlanmıştır. Dolayısı ile A noktası kanal başlangıcından 0.15 m, B noktası 0.45 m mesafede olmaktadır. C noktası 0.70 m, D noktası ise 1.00 m uzaklıkta değerlendirilmiştir. Her bir noktanın zamanla akışkan seviye değişimine ait grafikler oluşturulmuştur. Grafiğin x eksenini T yani boyutsuz bir büyüklüktür. $T=t(g/h_0)^{1/2}$ denkleminde t zamanı, g yerçekimi ivmesini, h_0 başlangıç akışkan yüksekliğini ifade etmektedir. y ekseninde H büyüklüğü boyutsuz olup, $H=h/h_0$ denkleminde h zamanla değişen akışkan yüksekliğini göstermektedir. Örneğin $t=0$ anında akışkan yüksekliği 0.15 m olduğu için $H=1$ olmaktadır.

Yıkılmanın başlangıç anında her iki modellemenin de Şekil 4.26'da görülebileceği üzere deney sonuçlarına yakın datalar ürettiği, zaman arttıkça deney ve modellemeler arasındaki farklılığın arttığı dikkat çekmektedir.



Şekil 4.26a. Su kuru hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



Şekil 4.26b. Su kuru hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509$ - 2.9893 s)

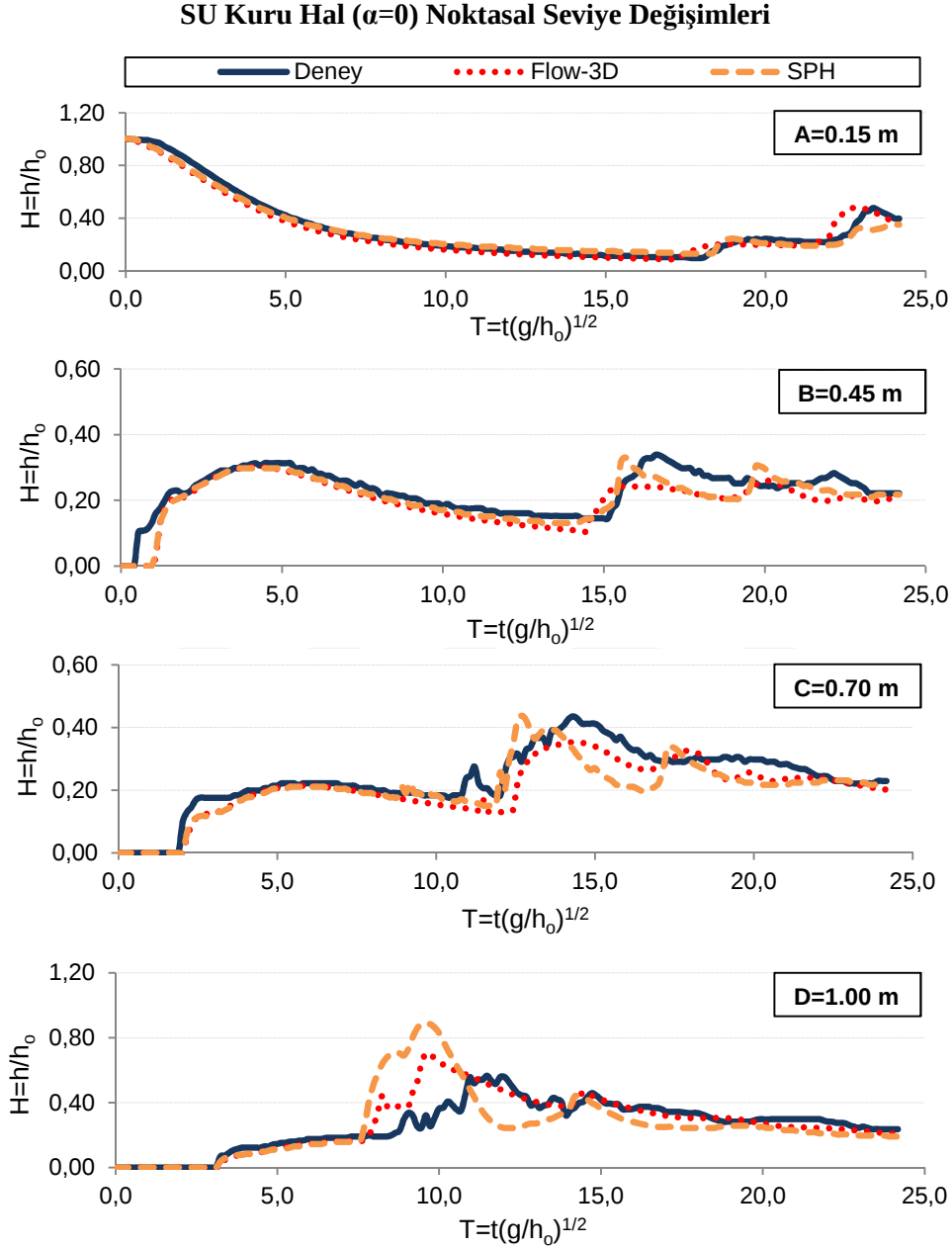
Şekil 4.26 incelendiğinde özellikle yıkılmanın ilk anlarında su yüzü profil sonuçlarının her bir yöntem için birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülebilmektedir. Flow-3D yazılımı ağ yapısına dayanmakta, SPH yöntemi ise parçacık esasına göre sonuçlar ortaya koymaktadır. $t=0.0833$ s’de serbest yüzey bütün yöntemlerde parabolik özellik göstermektedir. Fakat $t=0.1336$ s anında ise deney görüntüsünde şok dalgası önü (wave front) şekil değişimine uğrayıp içbükey hale bürünmekte, modellemelerde ise dalga önü tümsek haline dönüşmektedir. Bunun sebebini düşük de olsa deney kanalındaki yüzey pürüzlülüğünün etkisi ile açıklamak mümkündür. Hatta SPH’ta bu tümsek eğriliğinin daha fazla olduğu gözlenebilmektedir. Ayrıca yıkılmanın başlangıç safhalarında kapağın ani kalkması neticesinde hidrostatik olmayan bir basınç dağılımından da söz edilebilir.

$T=8-16$ civarında yöntemlerin özelliklerine dayalı değişik serbest yüzey profilleri elde edilmiştir. $T=13$ ’te su yüzü profilinde süreksizlikler görülmekte, aynı zamanda Flow-3D’de de yer yer derinliklerin azaldığı göze çarpmaktadır.

Deney sonucu elde edilen görüntülerdeki serbest yüzey seviye değişimi, istenilen noktalarda sanal bir düşey probe derinlik ölçer vasıtasıyla ölçülmüştür (Şekil 4.27). Renk farklılıklarının olduğu noktalarda kenar tanıma fonksiyonu uygulanarak yüzeyin (x,y) koordinatı elde edilmiştir. Dolayısı ile Şekil 4.28’de her üç yönteme ait belirlenen noktalardaki seviye değişim (H-T) grafikleri boyutsuz olarak çizilmiştir.



Şekil 4.27. Bir sanal derinlik ölçer örneği (Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.40$ için)



Şekil 4.28. Su kuru durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

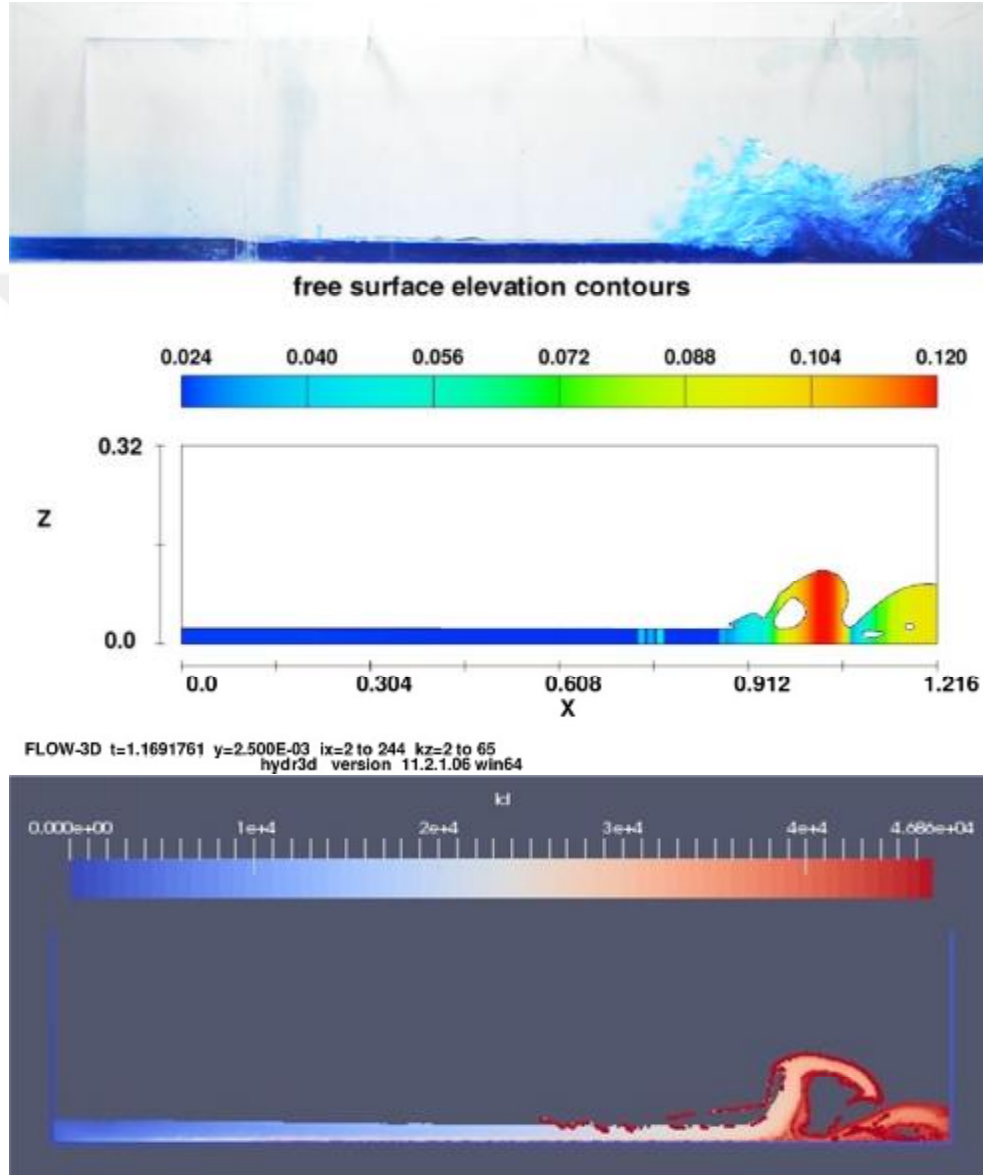
Şekil 4.28'e bakılırsa $A=0.15$ m noktasında şok dalgası yayılımının $T=0-20$ arasındaki değerlerde bütün yöntemler için birbirine yakın datalar ortaya çıktığı

göze çarpmaktadır. A noktası için $T=25$ 'ye geldiğinde ise deney sonuçları Flow-3D ile SPH arasında seyretmektedir. A noktasının sonlarında eğriler kesişim noktasına ulaşmaktadır. $B=0.45$ m noktasında ise $T=15$ değerine kadar tüm yöntemlerde oldukça iyi bir uyum dikkat çekmektedir. $T=15-25$ arasında modelleme sonuçları neredeyse birbirine eşit olurken deney sonuçları bir miktar daha yukarı seviyede gözlemlenmiştir, bu durumda yüzey pürüzlülüğü ve kapilaritenin önemli bir etken olabileceği düşünülmekte, hızın azalması nedeniyle de su seviyesi artmaktadır. Dolayısı ile deney sonuçları bir miktar yukarıda oluşmuştur.

$C=0.70$ m noktasında her yöntem için değerlerin birbirine eşit olduğu durumlar $T=10$ civarında oluşmaktadır. $T=5-100$ arasında SPH ve Flow-3D sonuçları birkaç nokta haricinde uyumlu görünmektedir. Bazı noktalarda SPH datalarının sıçrama yapıyor olması parçacık tabanlı metot olmasına, Flow-3D sonuçlarının daha düşük değerlerde olması ise yüzey pürüzlülüğü ve gerilmeleri ihmal edilmiş olsa bile türbülans ve viskozite etkisinden dolayı az dahi olsa enerji kayıplarına dayandırılabilir. $D=1.00$ m noktasında $T=8-15$ değerleri haricinde grafikler birbirleri ile tamamen kesişmektedir. Dikkat çeken en önemli nokta ise SPH verilerindeki sıçrama olmaktadır. Bu durumu suyun kanal sonunda duvar etkisi yaratan son bölüme çarpması ile akışkanların özellikle SPH verilerinde parçacıklar şeklinde ayrışması kaynaklı açıklanabilmektedir. Deney verilerinin daha aşağı seviyelerde görünmesi duvara çarpma neticesinde yüzeyde tutunma oluşması şeklinde ifade edilebilir. $T=10-15$ arasında ise SPH eğrisi diğer iki yöneme göre aşağıda kalmakta, Flow-3D ise deney sonuçlarına oldukça yaklaşık sonuçlar ortaya koymaktadır. SPH verilerinin bu kadar düşük seyretmesi parçacıkların birbiri ile çarpışmasından dolayı parçacıklarda kopmaların oluşması şeklinde açıklanabilir.

D noktası için $T=10$ durumunda nümerik analiz sonuçlarının deney verilerine göre daha yüksek değerler ortaya koyduğu gözlemlenmektedir. Diğer T durumlarında ise aynı noktada birbirine benzer sonuçların elde edildiği görülebilir.

Şekil 4.29’da D noktası için $T=10$ dolaylarındaki deney ve simülasyon görüntü farklılıklarına bir örnek verilmiştir.

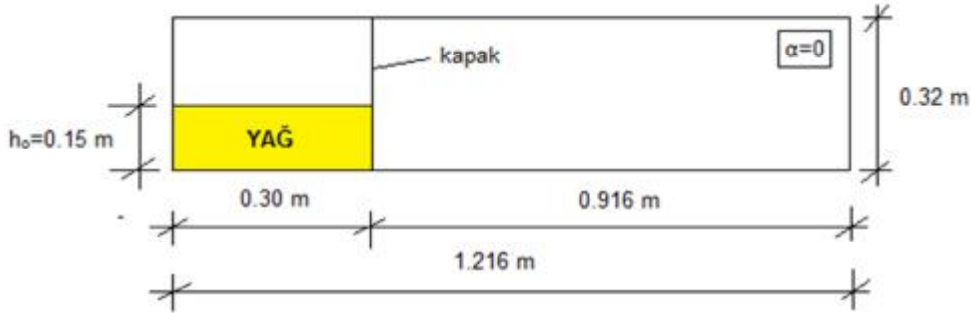


Şekil 4.29. Su kuru durum için $D=1.00$ m yüzey profili farklılıkları

Dalganın kanal sonuna çarpması ile akışkanın doğrultusu değişmekte, bu etki deneyde yüzeye daha çok tutunma gerçekleştirmektedir. Flow-3D sonuçlarında köpüklenme deneye göre daha az olmakta, SPH'ta ise parçacıklar nedeniyle büyük kopmalar meydana gelmektedir.

4.2.1.2. Akışkanın Yağ ($\alpha=0$) Olduğu Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m yüksekliğinde yağ bulunmakta, mansap ise kuru haldedir. Şekil 4.30'da Yağ kuru ($\alpha=0$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.31'de deney başlangıç anı yer almaktadır.



Şekil 4.30. Yağ kuru durum şematik gösterimi



Şekil 4.31. Yağ kuru durumu deney başlangıç anı (t=0)

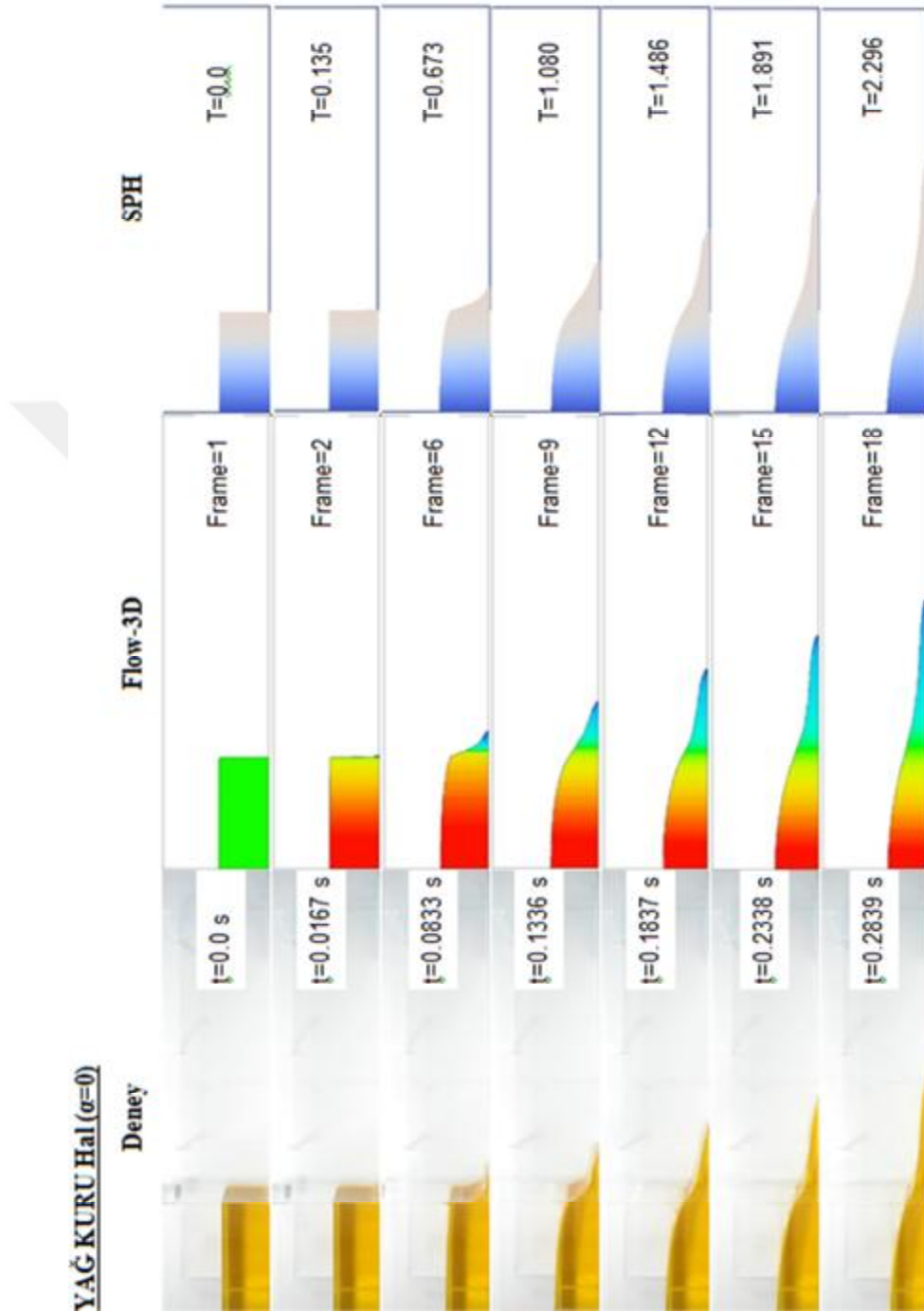
Taşkın şok dalgasının mansapta ilerlemesi sürecinde ani değişken açık kanal akımı özellikleri hakim olmaktadır. Açık kanal akım özellikleri baraj yıkılması akım şartlarında da aynen uygulanabilmektedir. Şekil 4.32'de Yağ kuru

deney ve modellemelerin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılması bulunmaktadır. Aynı Su kuru deney şartlarında olduğu gibi $T=0.673$ 'te yıkılma sonrası dalga parabolik özellikler göstermektedir. $T=1.080$ değerinde suya göre parabolik eğrinin eğimi azalmakta fakat diğer modelleme sonuçlarına göre tümsek şeklini alamamaktadır. $T=1.5-4$ arasındaki değerlerde tüm yöntemler için dalga yayılımı oldukça iyi bir şekilde temsil edilmektedir.

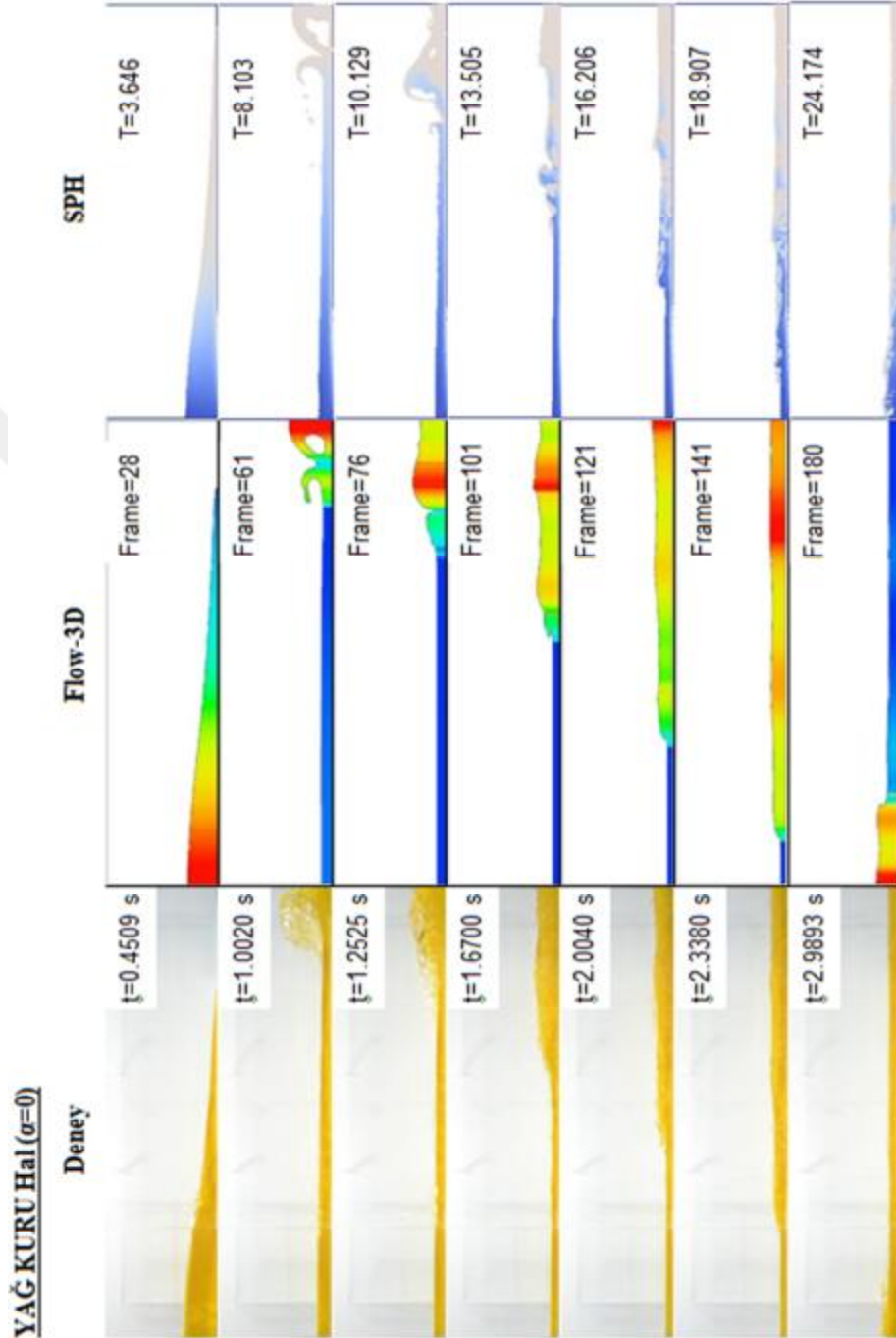
$T=10-16$ arasında SPH yönteminde parçacıkların birbiri üzerinde hareket etmesinden dolayı büyük parça kopmaları gözükmemektedir. SPH'ta aynı zamanda dalga önü diğer yöntemlere göre daha dik olmakta ve dalga arkasında ise akışkan yani yağ seviyesi daha az derinliğe sahip olacak şekilde ilerlemektedir. $T=16-24$ civarında bazı kesitlerde derinlik azalması ve artması görülmekle birlikte çoğu kez yöntemlerin birbirlerine başarılı bir şekilde yakınsadığı dikkat çekmektedir. Flow-3D'de ağ yapısı daha da azaltılarak yağ serbest yüzey profilinde deneye göre ciddi yaklaşım sağlayacak sonuçlara ulaşılabilir.

Şekil 4.33'te ise yağın mansapta ilerlemesi ile oluşan seviye değişim grafikleri gösterilmiştir. Bu eğrilerde $A=0.15$ m noktasında modellemelerin birbirine yakın sonuçlar ürettiği deney sonuçlarının ise bir miktar daha yukarıda seyrettiği görülmektedir. Bunu deney şartlarındaki modellemelerde ihmal edilen kanal tabanı sürtünmesi kaynaklı hızın azalması ve yağ seviyesinin yükselmesi ile açıklamak mümkündür.

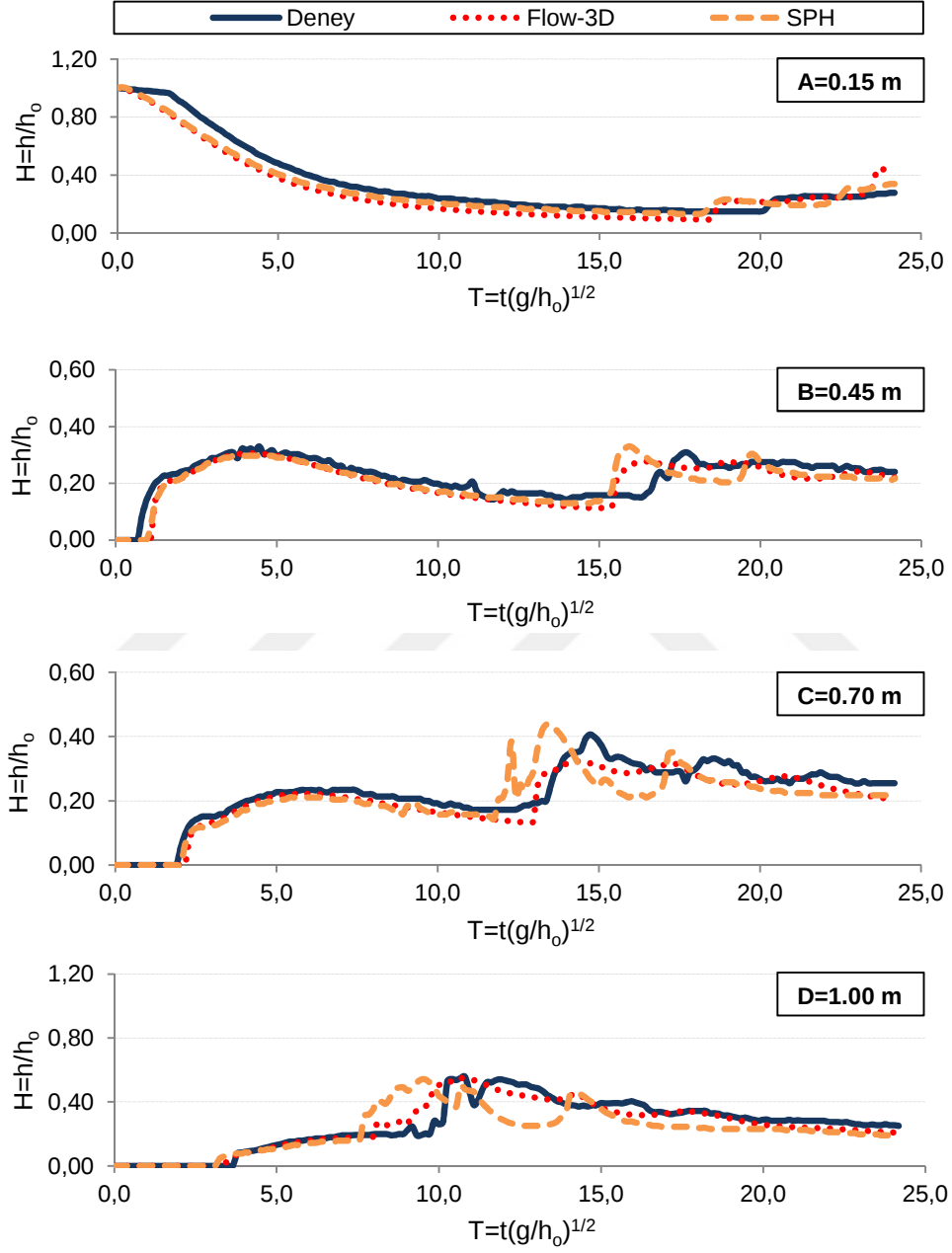
$B=0.45$ m noktasında genel olarak uyumlu sonuçlar görünmekle birlikte $T=15-20$ arasında SPH ve Flow-3D sonuçlarının deneye göre daha erken çıkışa geçtiği yorumu yapılabilir. Deney sonuçlarının daha geç olması yansıyan dalgaların gecikmesi şeklinde ifade edilebilir. Bu durumu yaratan faktörün ise deneyde türbülans ve viskoziteden kaynaklanan enerji kaybının oluşturduğu hız azalması olarak öngörülebilir. Her üç yöntemde $C=0.70$ m noktası için $T=12-20$ ve D noktası için ise $T=8-20$ haricinde sonuçların birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu dikkat çekmektedir. Bahsedilen noktalarda akımın kanal sonuna çarpması ile geri dönüşündeki farklılıklar eğrilerin değişimini ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 4.32a. Yağ kuru hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)

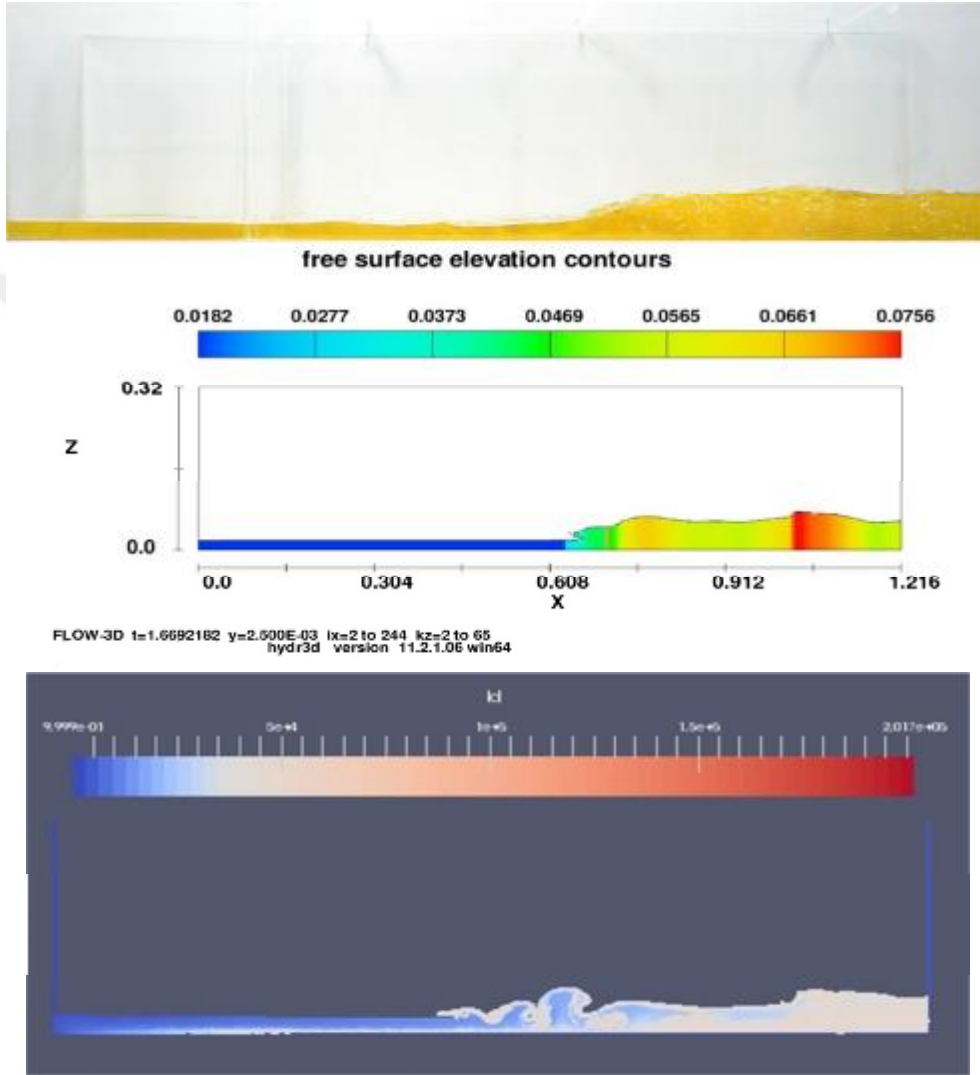


Şekil 4.32b. Yağ kuru hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509$ - 2.9893 s)

YAĞ Kuru Hal ($\alpha=0$) Noktasal Seviye Değişimleri

Şekil 4.33. Yağ kuru durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

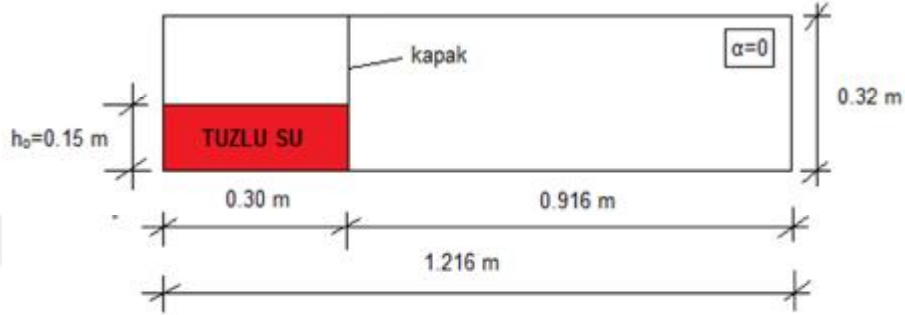
Şekil 4.34'te C noktası için T=10-15 arasında deney ve simülasyon farklılıklarına örnek teşkil edecek görüntüler sunulmuştur.



Şekil 4.34. Yağ kuru durum için C=0.70 m noktası görüntü farklılıkları

4.2.1.3. Akışkanın Tuzlu Su ($\alpha=0$) Olduğu Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada tuzlu suyun bulunduğu mansabın kuru olduğu durumdur. Şekil 4.35'te Tuzlu Su kuru ($\alpha=0$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.36'da ise deney başlangıç anı verilmiştir.



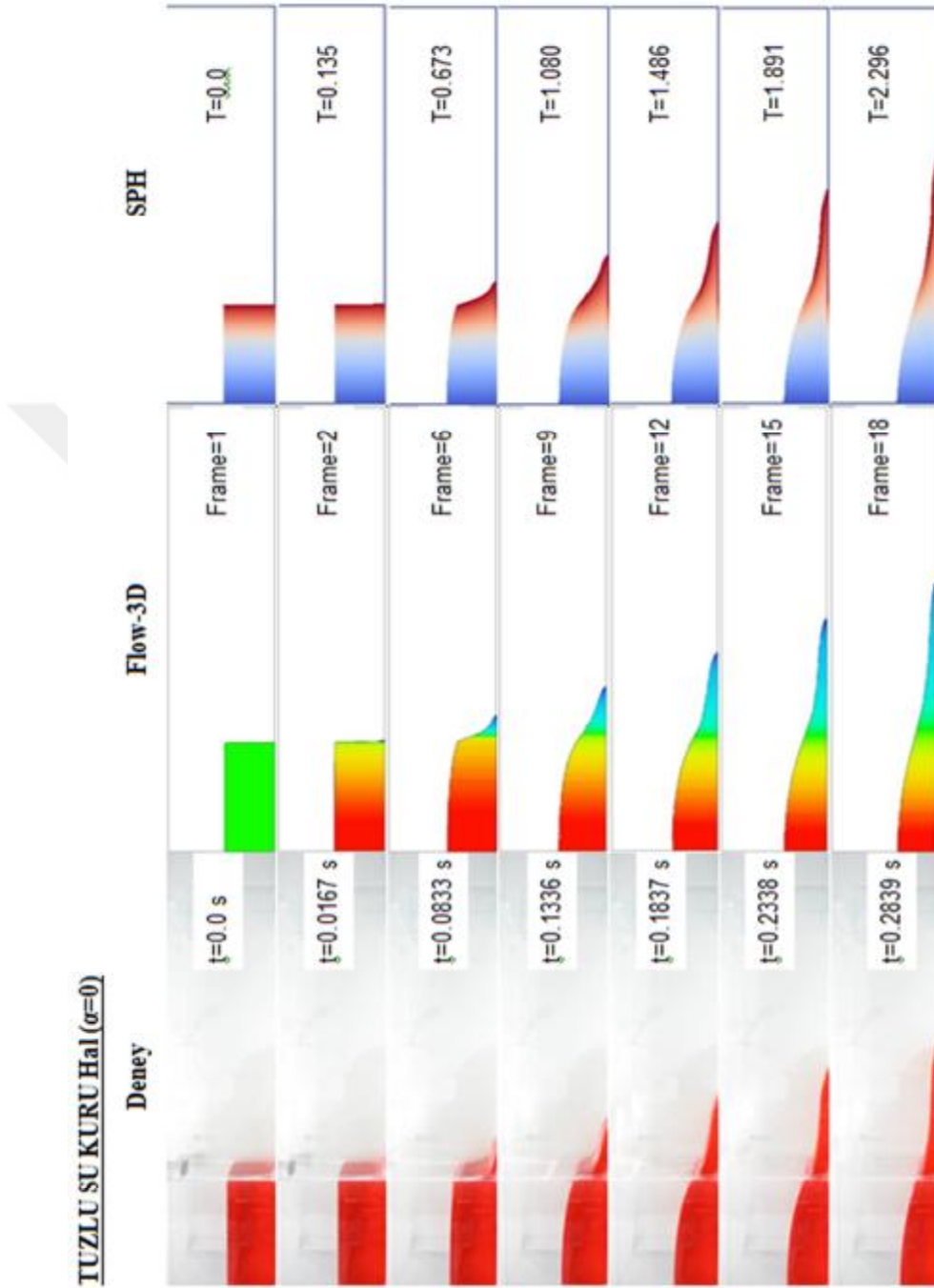
Şekil 4.35. Tuzlu su kuru durum şematik gösterimi



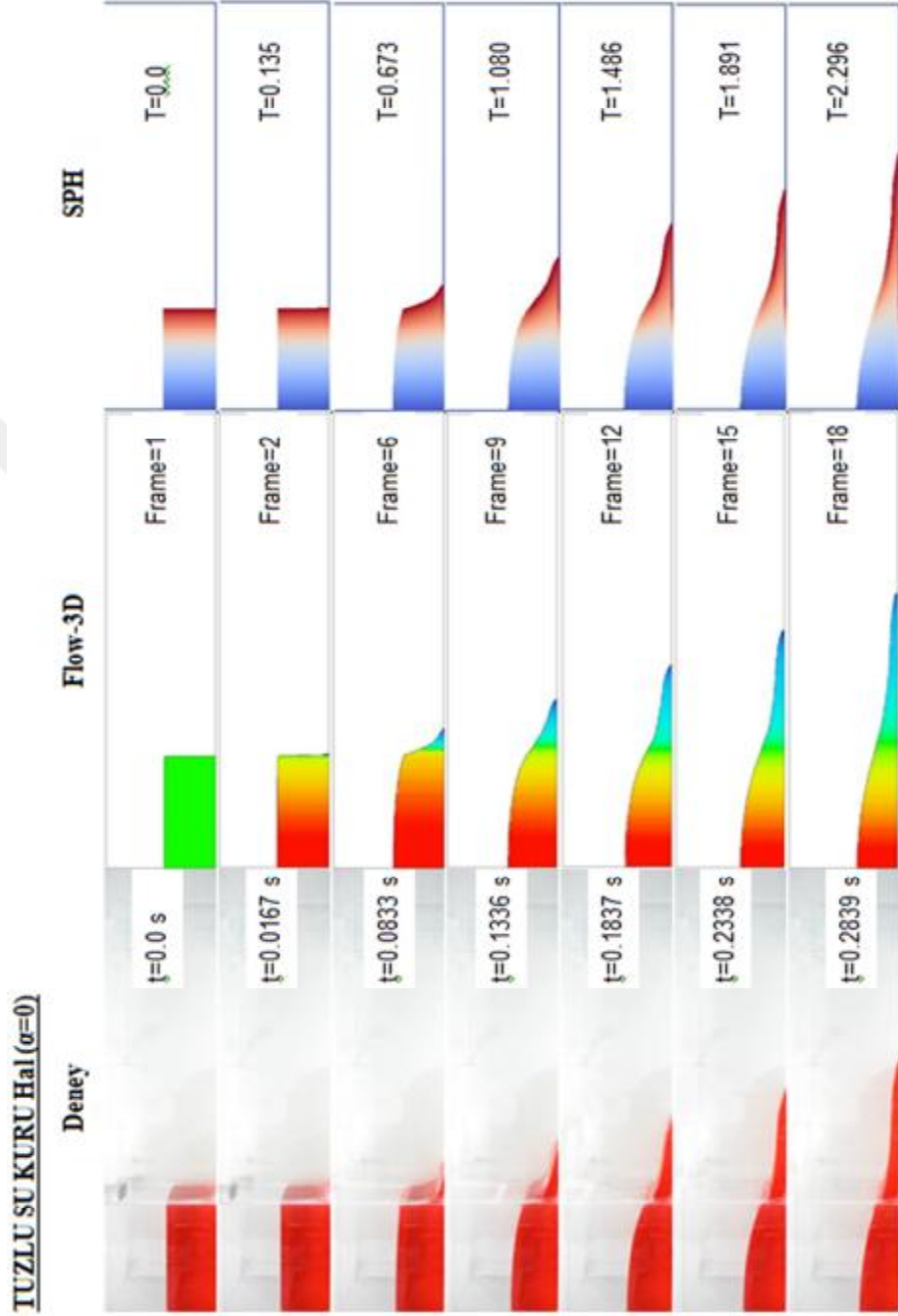
Şekil 4.36. Tuzlu su kuru durum deney başlangıç anı ($t=0$)

Şekil 4.37'de deney ve modellemelerin baraj yıkılması sonrası anlık görünümlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Yıkılmanın başlangıç safhası için Su ve Yağ sonuçlarında olduğu gibi oldukça uyumlu sonuçlar gözükmektedir. Yalnızca $T=8$ 'de SPH için büyük bir sıçrama göze çarpmaktadır. Ayrıca $T=10$ dolaylarında parçacıkların birbirinden ayrıştığı da dikkat çeken durumlardandır.

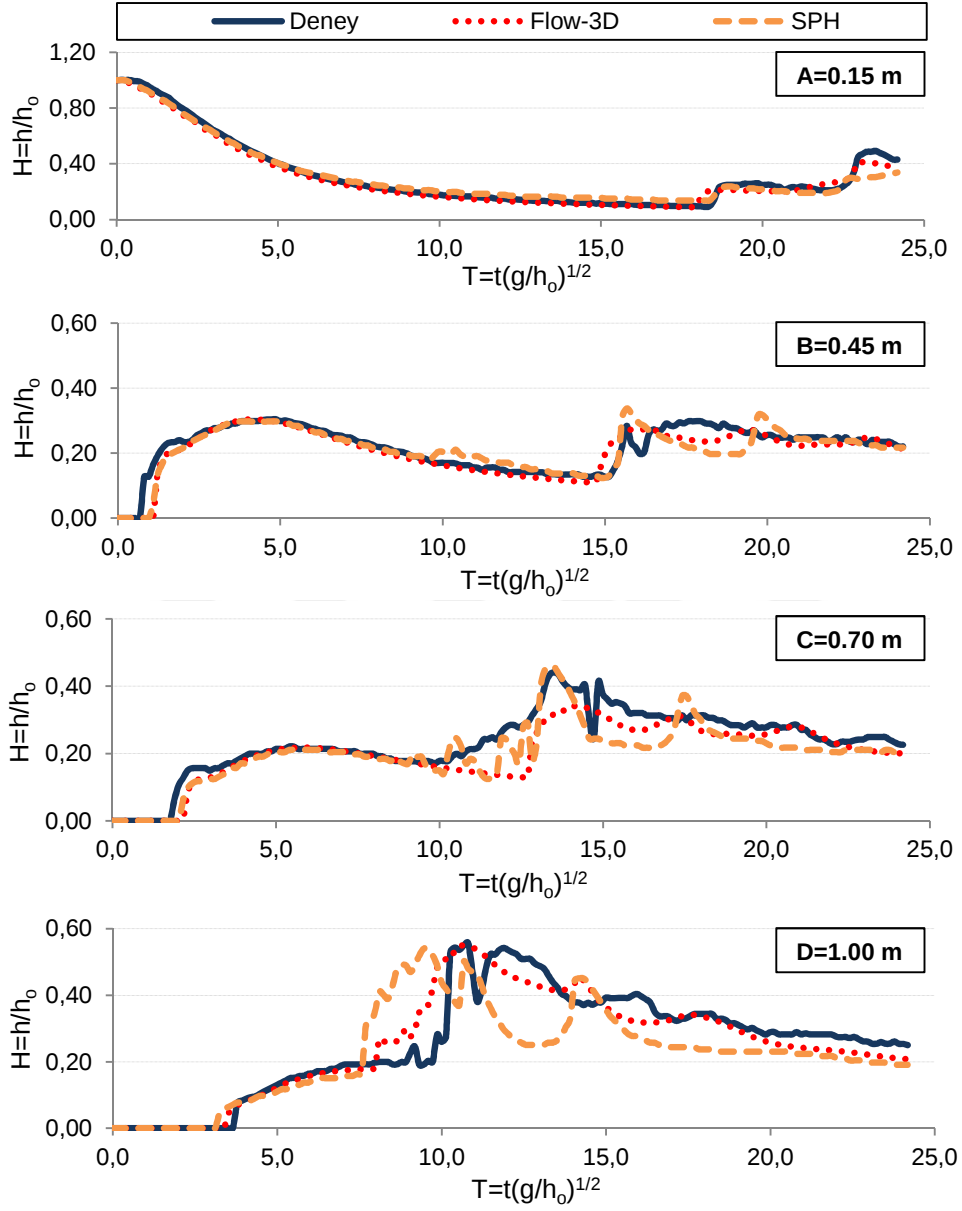
Şekil 4.38'de Tuzlu suyun A,B,C ve D noktalarındaki ilerleme durumundaki seviye değişim eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.37a. Tuzlu su kuru hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



Şekil 4.37b. Tuzlu su kuru hal ($\alpha=0$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s)

TUZLU SU Kuru Hal ($\alpha=0$) Noktasal Seviye Değişimleri

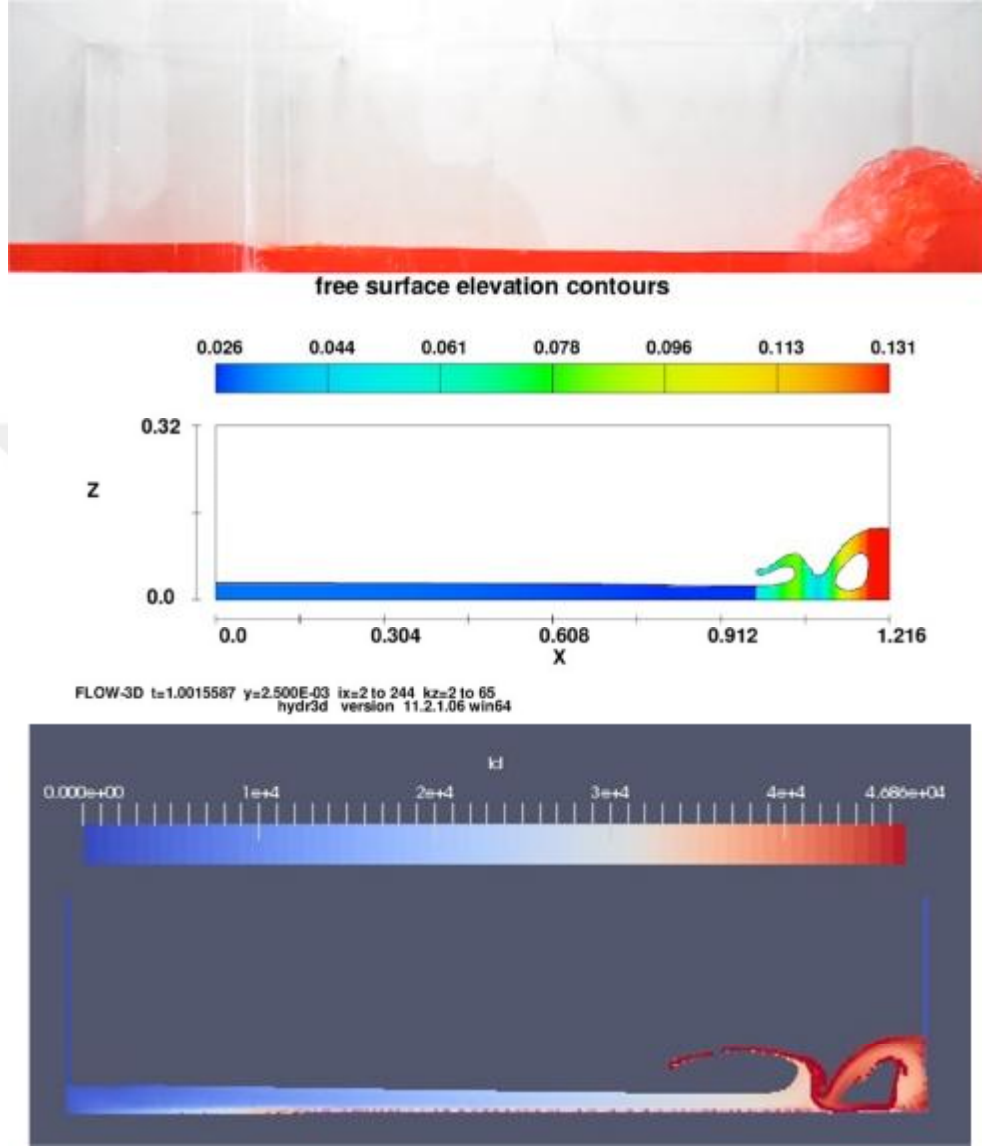
Şekil 4.38. Tuzlu suyun kuru durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Şekil 4.38'deki eğrilerde $A=0.15$ m noktasında $T=23$ dolaylarına kadar bütün yöntemlerde birbirine yakın datalar olduğu göze çarpmaktadır. $T=23-25$ arasında Flow-3D sonuçlarının deney ve SPH arasında orta eğilim çizgisini takip ettiği gözlenmektedir. Deney şartlarının enerji kayıplarını arttırması hızı azaltmakta ve tuzlu su seviyesi daha yukarıda grafiklerde kendini göstermektedir. $B=0.45$ m noktasında $T=15$ 'e kadar çok ufak farklılıklar dışında tüm yöntemler birbirine yakın veriler oluşturmuştur. $T=15-20$ arasında ise Flow-3D ve SPH yönteminde öncelikle deney tuzlu su seviyelerinin azaldığı daha sonra arttığı, hatta $T=20$ 'de SPH eğrisinin daha dik konuma geldiği görülmektedir. SPH'ta yapay viskozite terimi nedeniyle parçacıklar dağılabilmekte, Flow-3D'de ise kabul edilebilir türbülans ve enerji kayıpları eğriyi orta çizgiye getirebilmektedir.

$C=0.70$ m noktasında özellikle $T=10-15$ arasında Flow-3D eğrisi deney sonuçlarına göre daha geride kalmış, SPH sonuçlarında da dalgalanmalar söz konusu olmuştur. $T=15$ civarında deney akışkan seviyesi ciddi şekilde azalmış, birden artarak da $H=0.40$ dolaylarına ulaşmıştır. SPH diğer yöntemlere göre derinliği C noktası $T=15$ dolaylarında daha aşağı seviyelerde modellemiştir. $T=25$ gibi her üç yöntem için de sonuçlar epeyce uyumlu görünmektedir.

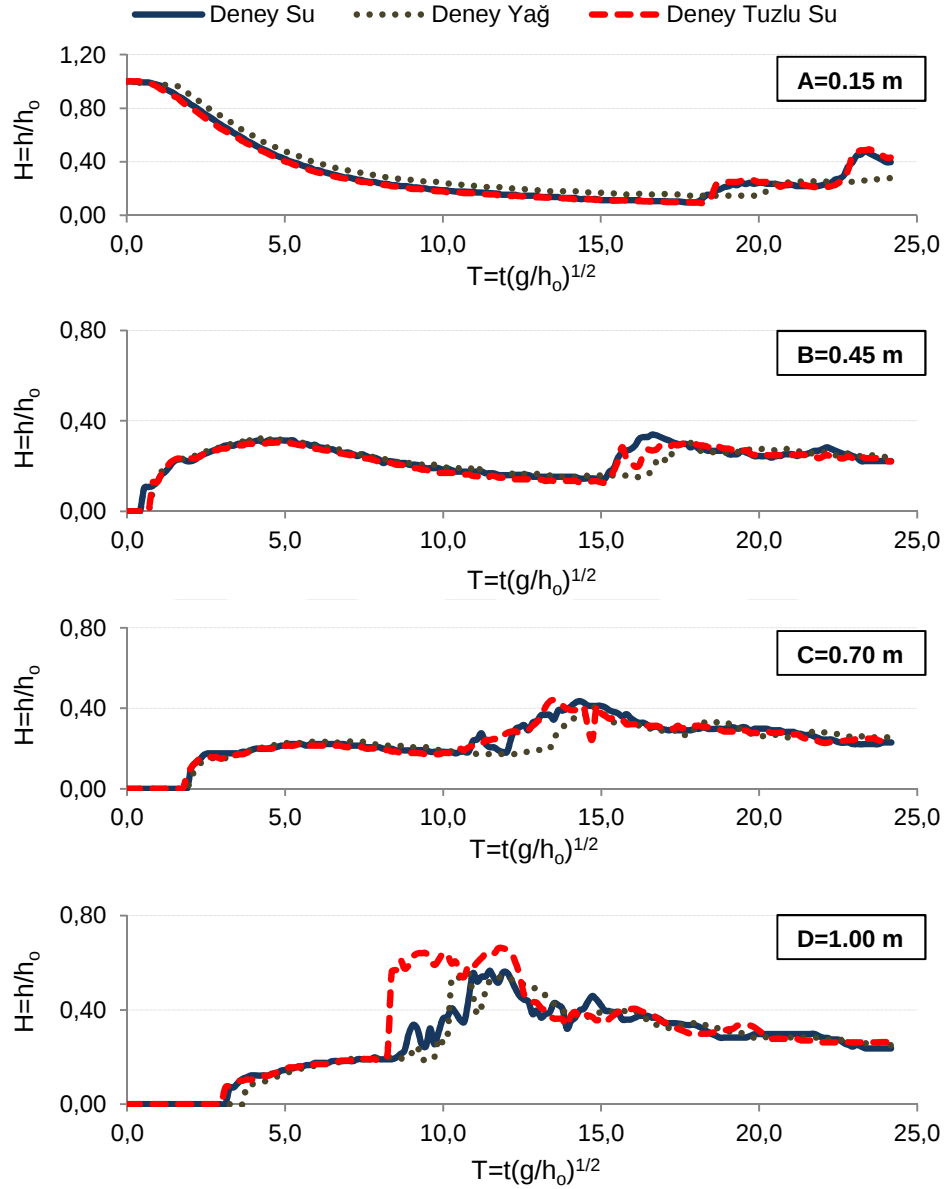
$D=1.00$ m noktasında $T=8-20$ arasında özellikle deney sonuçlarında artıp azalan salınımlar söz konusudur. Maksimum derinlik seviyesinde Flow-3D ile deney sonuçları çakışmış, SPH bir miktar aşağıda kalmıştır. $T=13$ 'te ise SPH verileri diğerlerinden oldukça uzakta gözükmemektedir. Bu duruma ilerleyen dalgaların birbirleri ile çarpışması sonucu parçacıkların ayrışması sebep olarak gösterilebilir. $T=25$ 'te ise deney ve modelleme sonuçları tatmin edici bir yakınsama sağlamaktadır.

Şekil 4.39'da D noktası için deney ve simülasyon farklılıklarına ait bir örnek görüntü verilmiştir.



Şekil 4.39. Tuzlu Su kuru durum için $D=1.00$ m görüntü farklılıklarına bir örnek

Böylece üç akışkan için kuru durum karşılaştırmaları tamamlanmış olmaktadır. İlave olarak Şekil 4.40'ta görüleceği üzere üç akışkanın önceden belirtilen noktalardaki deney sonuçları birbirleri ile kıyaslanması için bir arada verilmiştir.

Deney Kuru Hal Durumu ($\alpha=0$)

Şekil 4.40. Su, Yağ ve Tuzlu Su kuru durum deneylerinin belirlenen noktalardaki seviye değişimleri

Şekil 4.40'taki grafikler dikkatle incelendiğinde, membadaki $A=0.15$ m noktasında Su ve Tuzlu Su Newtoniyen akışkanları yıkılma anında aynı davranışı

sergilemektedirler. Fakat yoğunluğu daha düşük olan yağın $T=18$ 'e kadar viskozitesinin yüksek olması sebebiyle hızı düşük ve yüksekliği daha fazla olmaktadır. $T=20$ civarında yağın yüksekliği diğer akışkanların altında kalmaktadır. Bu durumu kanal sonundaki duvara yağın çarpması neticesinde yüzeye tutunamama ve kabarma dalgası önünün düşük yoğunluk etkisi ile kayması, dolayısı ile sıçrama yapamaması şeklinde açıklayabilmek mümkündür. $T=25$ civarında ise yağın seviyesi su ve tuzlu suya göre çok aşağıda kalmıştır. Duvara çarpması sonucu yağda oluşan türbülans etkisinin zayıf olması da bir neden olarak ortaya konabilir.

$B=0.45$ m noktasında $T=17$ haricinde tüm değerlerde üç akışkan için de birbirleri ile oldukça uyumlu bir sonuç gözükmektedir. $T=17$ civarında tuzlu su; su ve yağ arasında eğilim çizgisine paralel hareket etmektedir. Su ise en yüksek derinlik seviyesinde seyretmektedir. Tuzlu suyun suya göre daha aşağı seviyede olması duvardan yansıyan dalga ile memba yönündeki kısımların çarpışması sonucunda yoğunluk etkisinin kabarma dalgası önünde daha düz bir şekil alması ile izah edilebilir. $C=0.70$ m noktasında $T=11-15$ dolaylarında az önce bahsedilen sebeplerle su ve tuzlu su birbirine yakın sonuçlar verirken yağ yine düşük seviyelerde seyretmektedir. $T=15$ 'te tuzlu suyun yüksekliği önce epey bir artmış daha sonra ise belirgin bir düşüşe geçmiştir. Yağın yüksekliğinin bile altına inmiştir. Nedeni muhtemelen görüntü işleme teknikleri uygulanırken kenar belirginleştirme işleminde filtre kullanılması kaynaklı görüntü kayıplarıdır.

$D=1.00$ m noktası $T=8-13$ arasında yöntemlerde büyük oranda farklılıklar oluşmuştur. Mansaba en yakın olan bu kesitte bu aralıkta tuzlu su; yağ ve suya göre daha az salınım yapmış, daha fazla derinliğe erişmiştir. Bu durumu ise kanal sonuna çarpan ve yansıyan dalgaların tuzlu su akışkan olduğunda yüksek yoğunluk etkisi ile yüzeye daha çok tutunması ve daha yükseğe sıçrama yapması ile açıklanabilir.

Sonuç olarak tüm mansabın kuru olduğu deney şartlarında kapağın ani kalkması durumunda yerçekimi etkisi ile akışkan kapak altından harekete

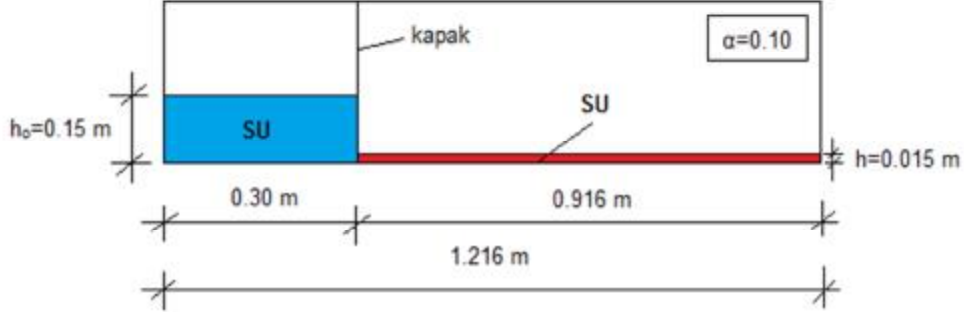
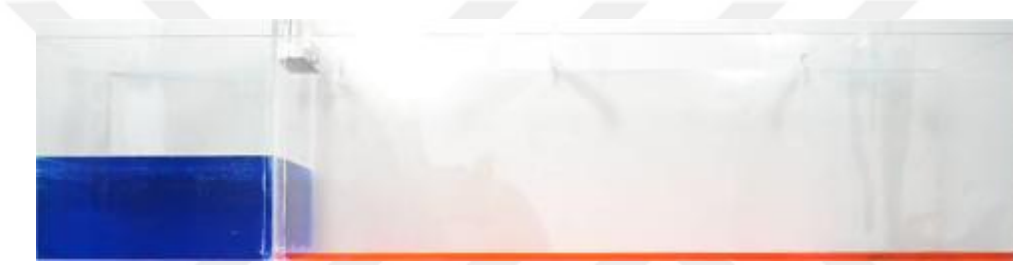
geçmektedir. Başlangıç safhalarında akışkan serbest yüzey profilleri parabolik görünüme sahip olmakta, sadece deney görüntülerinde taşkın dalgasının yayılımı ile birlikte dalga önü şekil değişimine uğrayarak tümsek görünümüne bürünmektedir. Modellemelerde yüzey gerilmeleri ihmal edildiğinden deneylerde yüzey pürüzlülüğünün davranışı değiştirmekteki faktörü bu noktada etkili olmaktadır. Dalga önü mansap doğrultusunda ilerlemeye devam ederken bu pürüzlülük durumu çok az bir oranda dahi olsa dalga önünün hızını azaltmakta ve dalga önünün kabarmasına sebebiyet vermektedir.

Yıkılmanın ilk anlarında yüzey eğriliğinin hissedilir derecede fazla oluşması hidrostatik olmayan basınç dağılımını ön plana çıkarmaktadır. Kapağın ani kalkması bir nevi türbülans etkisi yaratmaktadır. Özellikle kapağın yani barajın olduğu noktalarda akışkan dönme hareketine maruz kalmaktadır. Zamanla dalga düzleşerek yoluna devam etmektedir. Kanal kuru olduğunda membadaki noktada akışkan yüksekliği belirli bir ana kadar azalmakta daha sonra yükselmektedir. Yağda bu durum neredeyse yatay bir konuma ulaşmaktadır. Mansaptaki noktalarda ise kanal sonuna en yakın noktada maksimum noktaya ulaşma erken olmaktadır. Doğaldır ki kapağa en yakın noktada daha geç meydana gelmektedir. Mansaptaki en uzak noktada $H=0.60$ civarında olup diğer noktalarda 0.40 dolaylarında seyretmektedir. Farklı yoğunluklu akışkanlar düşünüldüğünde rezervuarında yüksek yoğunluklu bir akışkan olan barajın yıkılması durumunda mansap mesafesinin artması akışkanın derinliğini arttırabilecek ve güzergahındaki engellerle karşılaşması halinde uygulayacağı kuvvet daha fazla olabilecektir.

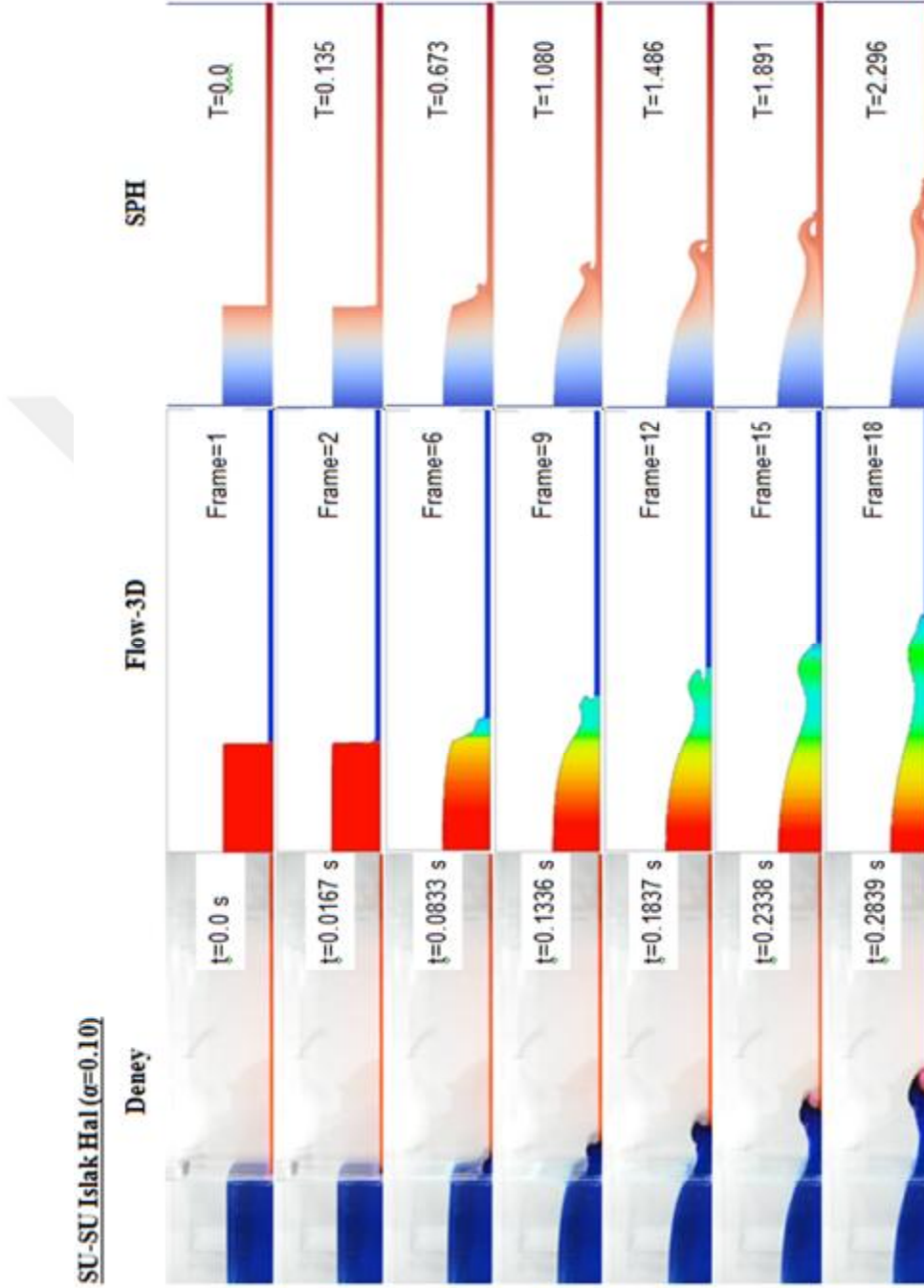
4.2.2. Karışabilen Akışkanların Islak Hal ($\alpha=0.10$) Sonuçları

4.2.2.1. Su-Su ($\alpha=0.10$) Deney ve Modelleme Sonuçları

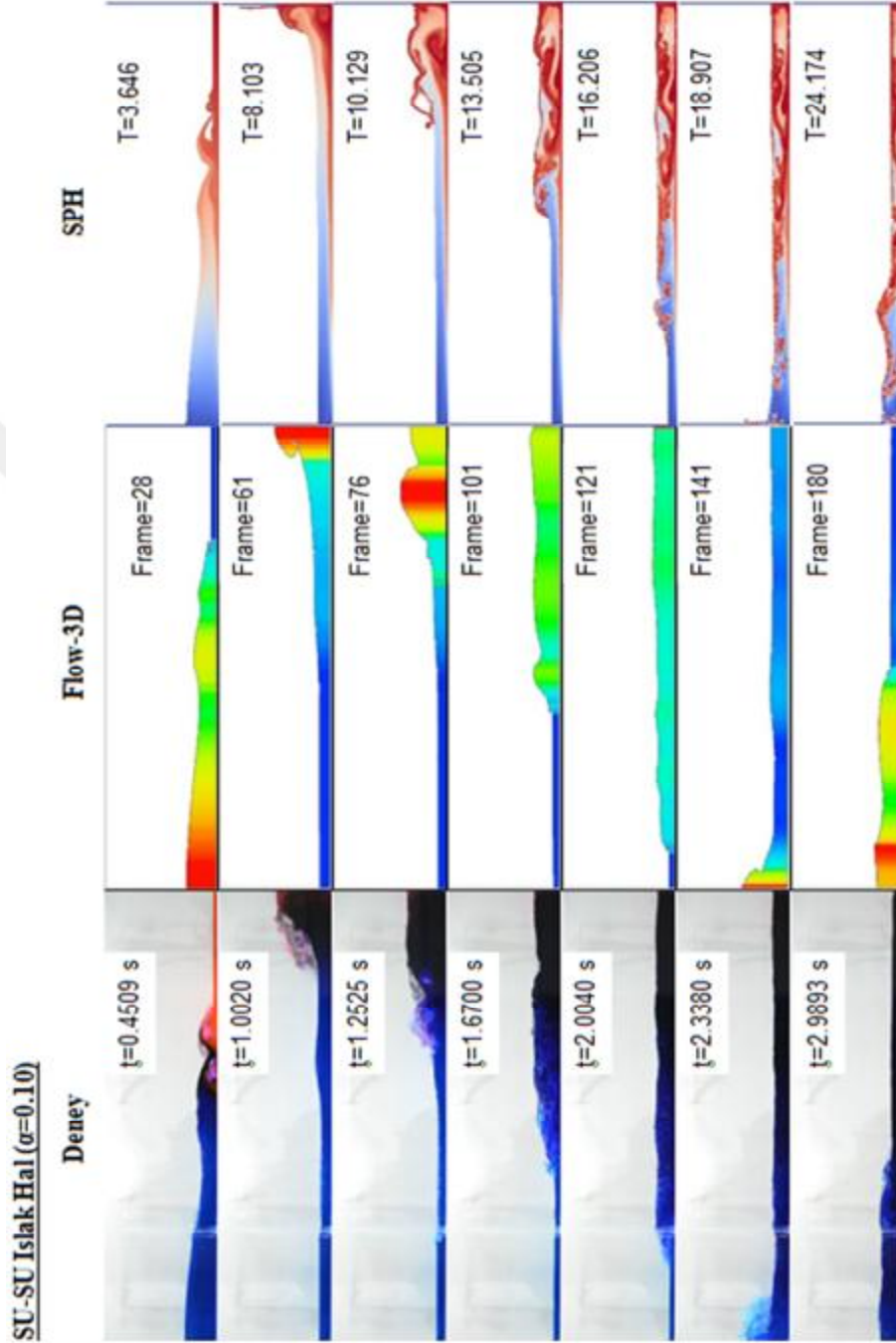
Membada 0.15 m, mansapta ise 0.015 m yüksekliğinde su bulunmaktadır. Derinlik oranı 0.10 olup, Şekil 4.41’de Su-Su ($\alpha=0.10$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.42’de ise bu durumun deney başlangıç anı verilmiştir.

Şekil 4.41. Su-Su ($\alpha=0.10$) ıslak durum şematik gösterimiŞekil 4.42. Su-Su ($\alpha=0.10$) durumu deney başlangıç anı ($t=0$)

Şekil 4.43'te derinlik oranı 0.10 için Su-Su deney ve modellemelerin her birinin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılması yer almaktadır. Bu çalışma kapsamındaki modellemelerde akım iki boyutlu kabul edilmiş ve yüzeysel gerilmeler hesaba katılmamıştır. Islak durumun genel bir görünümüne bakıldığında kuru durumdan oldukça değişik bir akım hareketini ortaya koyduğunu görmek mümkündür. Su kapağın ani kalkışı ile birlikte yerçekimi kuvvetinin etkisi ile kapak altından harekete başlayıp mansaptaki akışkanı yani suyu sürüklemektedir.



Şekil 4.43a. Su-Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



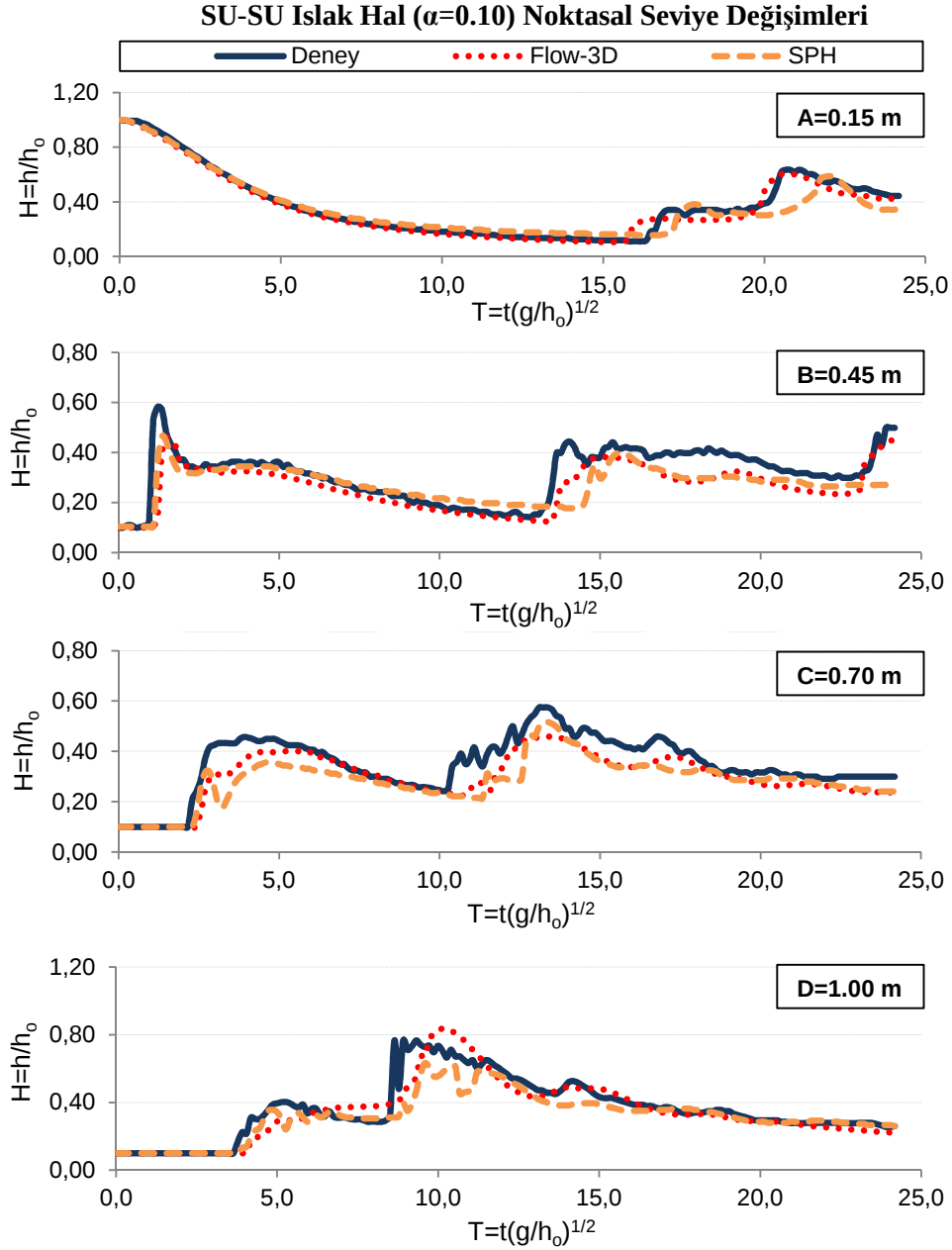
Şekil 4.43b. Su-Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509$ - 2.9893 s)

Şekil 4.43'te her üç yöntemin de baraj yıkılması başlangıç adımlarını iyi bir yaklaşıklıkla çözümlediği görülebilir. Durgun halde mansaptaki su ani değişime ayak uyduramayıp direnmeye çalışmaktadır. Sonuç olarak da belirli bir zamanda direnci kırılmakta ve dalga kırılması ve dolayısıyla jet oluşumu meydana gelmektedir. Dalga kırılması neticesinde dalga önünde başka bir akışkan olan serbest yüzeydeki hava suyun içerisinde dahil olarak çevrintili bir akım meydana getirmektedir. Oluşan hızdan dolayı dalganın özellikle kinetik enerjisi iki veya üç defa hidrolik sıçrama yapabilecek düzeye erişebilmektedir.

Kanal sonundaki çarpma durumu ile birlikte dalga düzgün yapıda kabarma dalgası oluşturmaktadır. Şok dalgası bu şekilde yolunda ilerlemektedir. Dalganın ilerlemesi ile birlikte dalgaların ufak kırılmaları aynı zamanda köpük oluşumuna da sebebiyet vermektedir. Bu şekilde akımın türbülanslı olması kaçınılmaz olmaktadır.

$t=0.4509$ s anında SPH yönteminin deney görüntülerine çok daha başarılı bir şekilde yakınsama sağladığı görülmektedir. RANS tabanlı Flow-3D yazılımında ise serbest yüzey oldukça iyi temsil edilirken hava girişimi konusunda modelleme Flow-3D'de çok fazla akım şeklinde tanımlanmadığı için girişim net olarak algılanamamaktadır. $t=1.0020$ s'de deney görüntülerinde yüzey genişliği çekimden dolayı fark edilebilmektedir, tek kamera ile belirli noktadan çekim yapılabilmesinde dolayı bu durum görüntü işleme tekniklerinde kenar belirginleştirme işlemi ile düzeltilmeye çalışılmıştır. Genelde yüzey profilleri birbirleri ile eşdeğer olup, modelleme tekniklerinden kaynaklı girişim koşulları karışabilen akışkanlar mantığı ile ve serbest yüzey derinlik değişimleri ele alındığı için bu çalışma kapsamında çok ön plana alınmamıştır. Gelecekte bununla ilgili bir çalışma akışkan davranışını detaylı tanımlayabilmek açısından oldukça önemlidir.

Şekil 4.44'te Su-Su ($\alpha=0.10$) karışabilen akışkanları için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri verilmiştir.

Şekil 4.44. Su-Su $\alpha=0.10$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

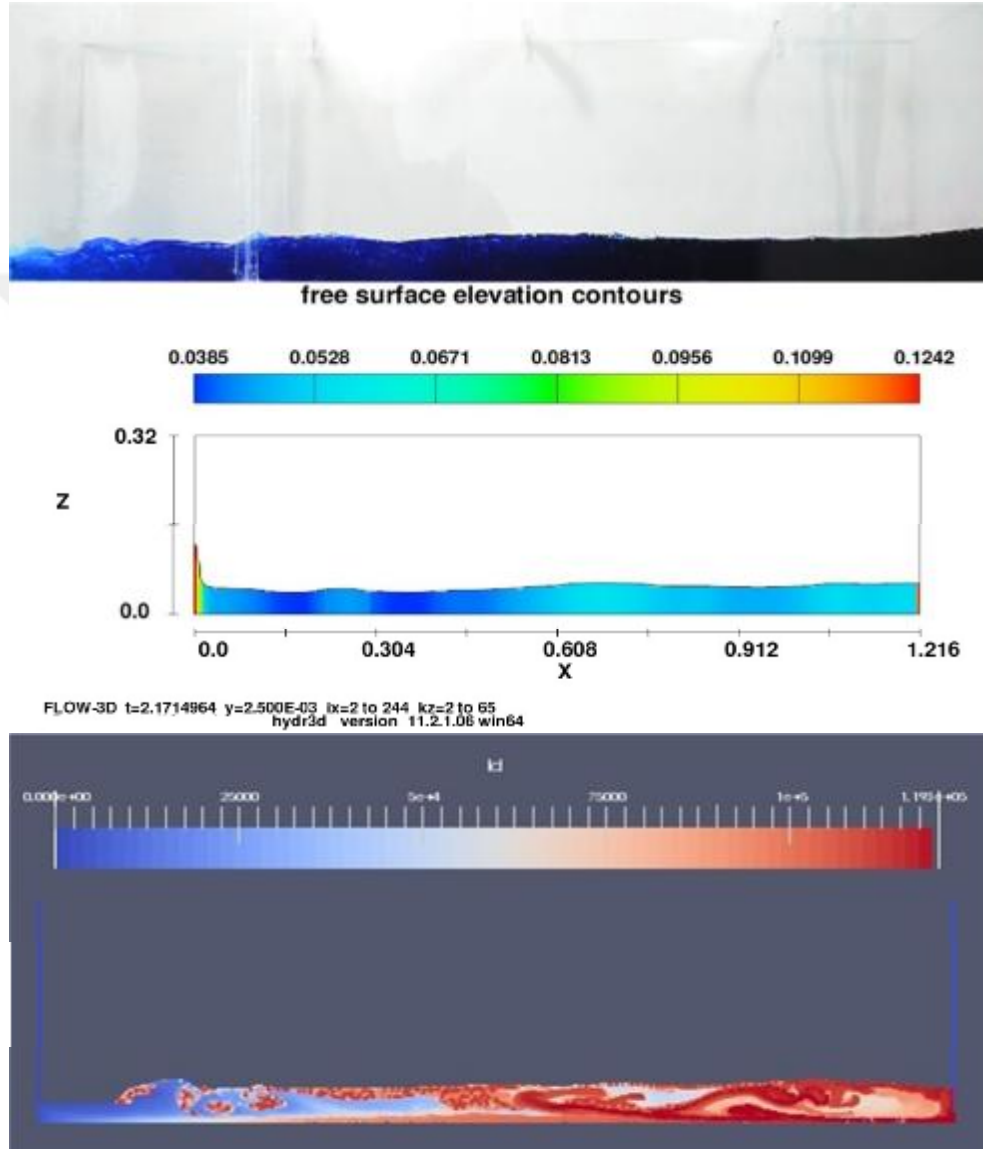
Yukarıdaki grafikler irdelendiğinde sonuçlar her yöntemde de birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir. Özellikle $A=0.15$ m ve $B=0.45$ m noktalarında baraj

yıkılması başlangıç aşamalarında yakınsaklık düzeyi çok yüksek görünmektedir. Daha sonraki T'lerde bir miktar farklılık bulunmaktadır. Bu durumu da deney şartları ve modellemelerdeki kabullerden kaynaklı hatalar olarak belirtmek mümkündür.

B noktasında su seviyesi başlangıçta hızlı bir şekilde artmakta, daha sonra bir miktar düşerek yatay denilebilecek konumda ilerlemektedir. Daha sonra yansıma ve çarpışmalar ile seviye ikinci kez yükselerek T=18 dolaylarında tekrar sabit seviyeye ulaşmaktadır. C=0.70 m noktasında da buna benzer bir davranış söz konusu olurken su seviyesi B noktasına göre daha aşağıdadır. Fakat daha geç bir zamanda gerçekleşmektedir. D=1.00 m noktasında yayılım daha geriden gitmekte, sıçrama daha ani olmakta ve salınım azalmaktadır. Tüm eğrilerde T=25 civarında birbirine yakın sonuçlar gözlenmektedir. Bütün sonuçlarda deney verilerinin seviyeleri daha yukarıda görülmektedir. Deney şartları ve enerji kayıpları nedeniyle hızın azalması sonucu derinliğin artması bunun nedenleri arasında sayılabilir. SPH sonuçlarının kuru sonuçlara göre diğer bilindik yöntemlere daha çok yakınsama sağladığı yadsınamayacak bir gerçek durumundadır. Sadece akışkanların hareketi sırasındaki ani değişiklikler (çarpma, engeller, tabanda meydana gelen diğer değişimler,...vb. gibi) davranışta birtakım değişiklikleri beraberinde getirebilmektedir. Bu noktalarda modelleme yöntemleri deney sonuçlarından bariz farklılıklar oluşturabilmektedir.

Şekil 4.45'te örnek B noktası için deney ve simülasyon farklılıklarına ait bir görüntü gösterilmektedir. Flow-3D sonucunda kanal başlangıcına doğru ilerleyip yansıyan dalga bir miktar tırmanma gerçekleştirmiştir. Deneyde bu durum gözlenmemekte, fakat derinlik biraz daha yukarıda olduğu için eğrilerin tepe noktasında bu kesişim dikkat çekmektedir. SPH yönteminde yüzey profili deney ile oldukça uyumlu olmakta, karışan akışkanların birbirleri içerisindeki girişim daha detaylı görülebilmektedir. Deneyde kanal başlangıcına yakın dalga önünde ikinci küçük bir kırılma varken SPH'ta tek bir kırılma gözlenmektedir. Viskozite

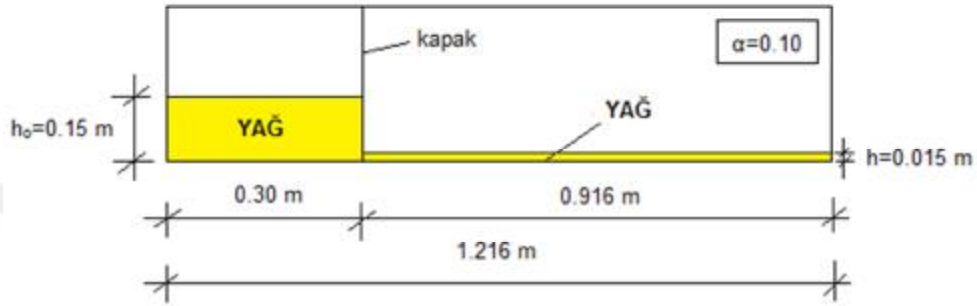
değişkenliği bu durumu açıklamak için en az birkaç sebepten biri olarak ortaya konabilir.



Şekil 4.45. Su-Su $\alpha=0.10$ ıslak durum $B=0.45$ m görüntü farklılıkları

4.2.2.2. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m, mansapta ise 0.015 m yüksekliğinde yağ bulunmaktadır. Şekil 4.46’da Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) durumunun şematik hali ve Şekil 4.47’de deney başlangıç anı gösterilmektedir.

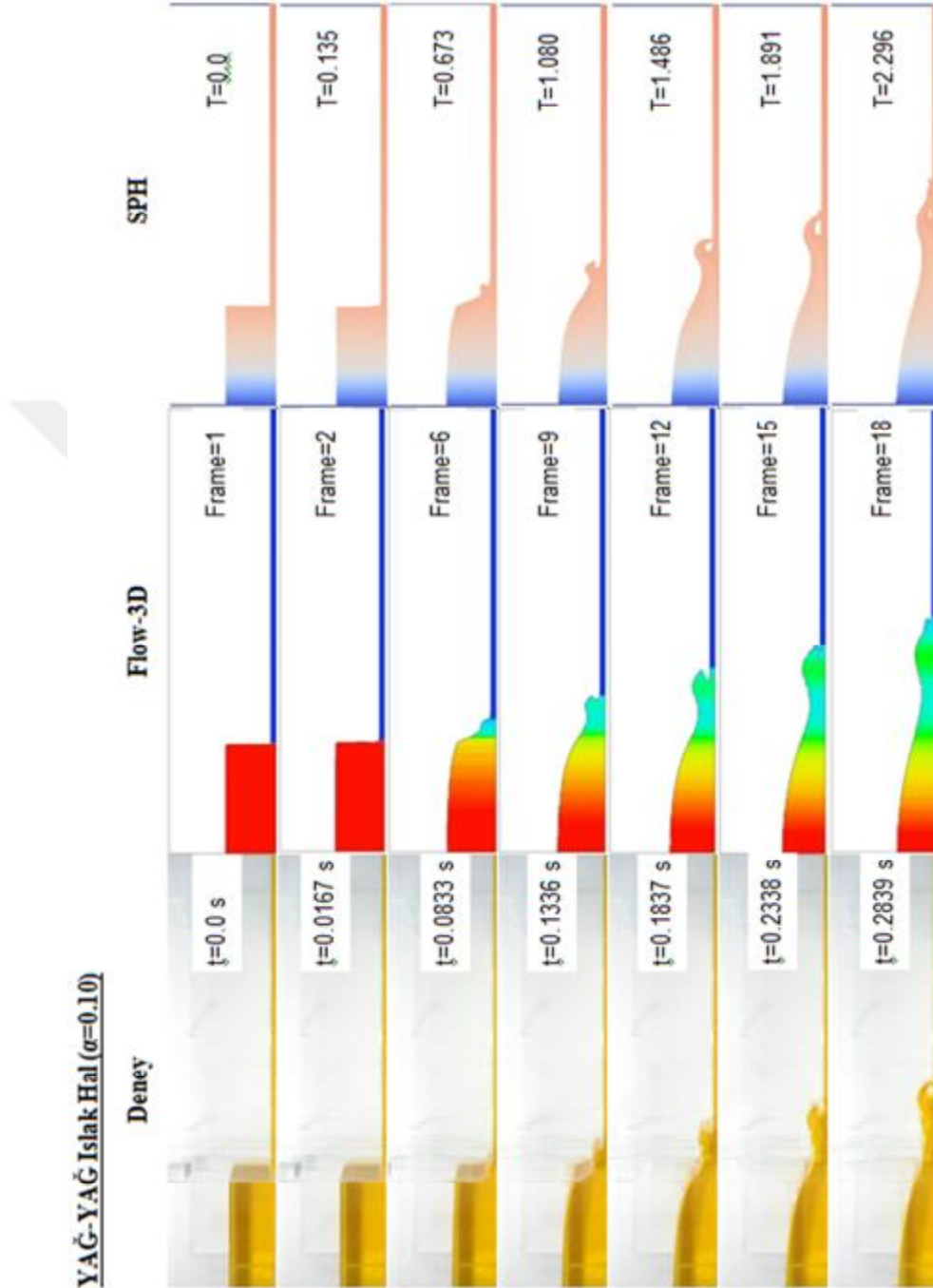


Şekil 4.46. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) ıslak durum şematik gösterimi

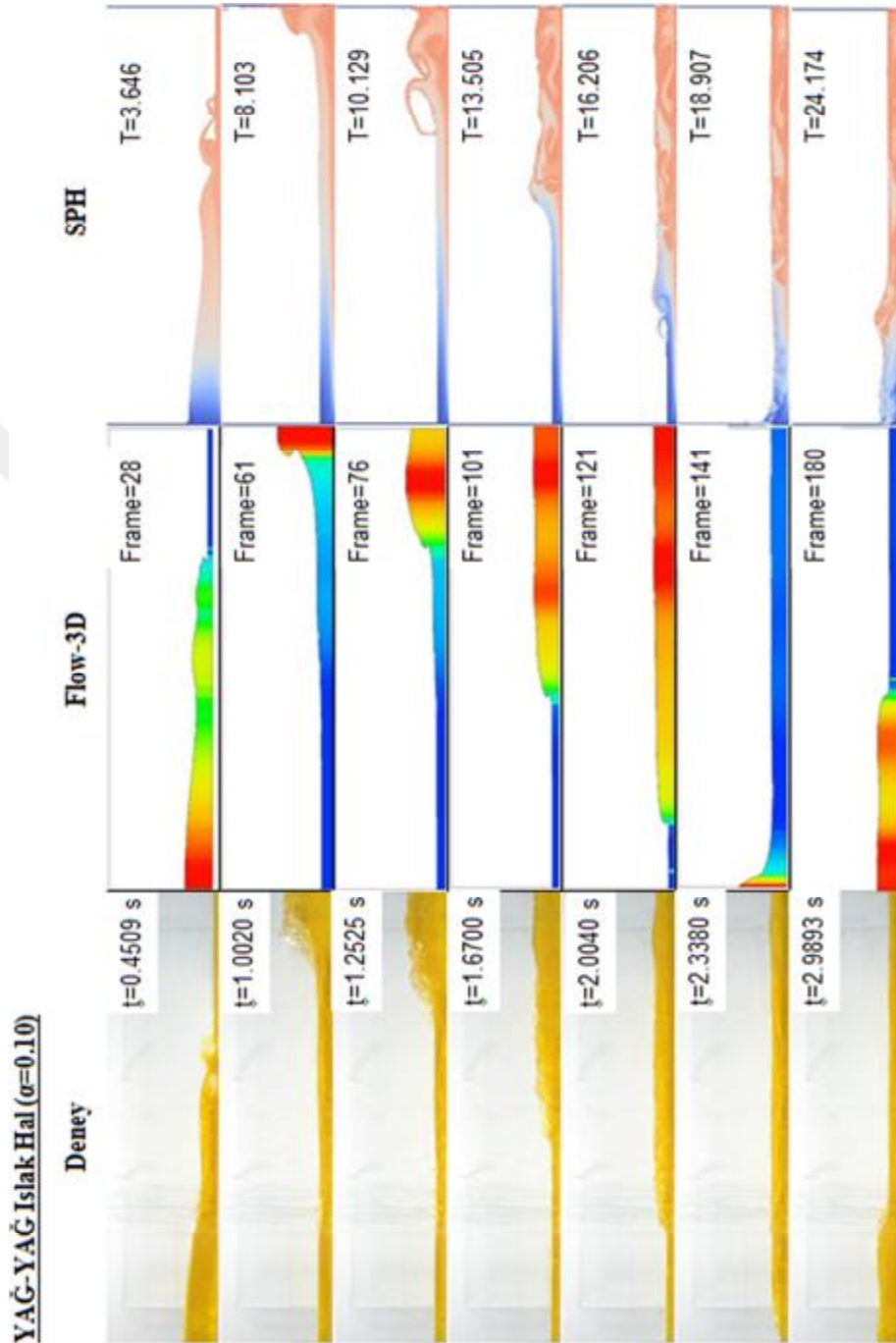


Şekil 4.47. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Şekil 4.48’de deney ve modellemelerin her birinin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılması toplu halde verilmiştir. Bu görüntülerde Su-Su 0.10 derinlik oranlı karışıma benzemekte, durgun haldeki kuyruk akışkanı baraj yıkılması ile meydana gelen şok dalgasını engellemeye çalışmaktadır. Hareket eden dalga önü bu engeli aştığı anda yukarı doğru hareket etmeye çalışan bir jet oluşumu yaratmaktadır. $t=0.1837$ s zamanında oluşan küçük kabarma gelişerek $t=0.2839$ s sonunda dalganın kırılmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 4.48a. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)

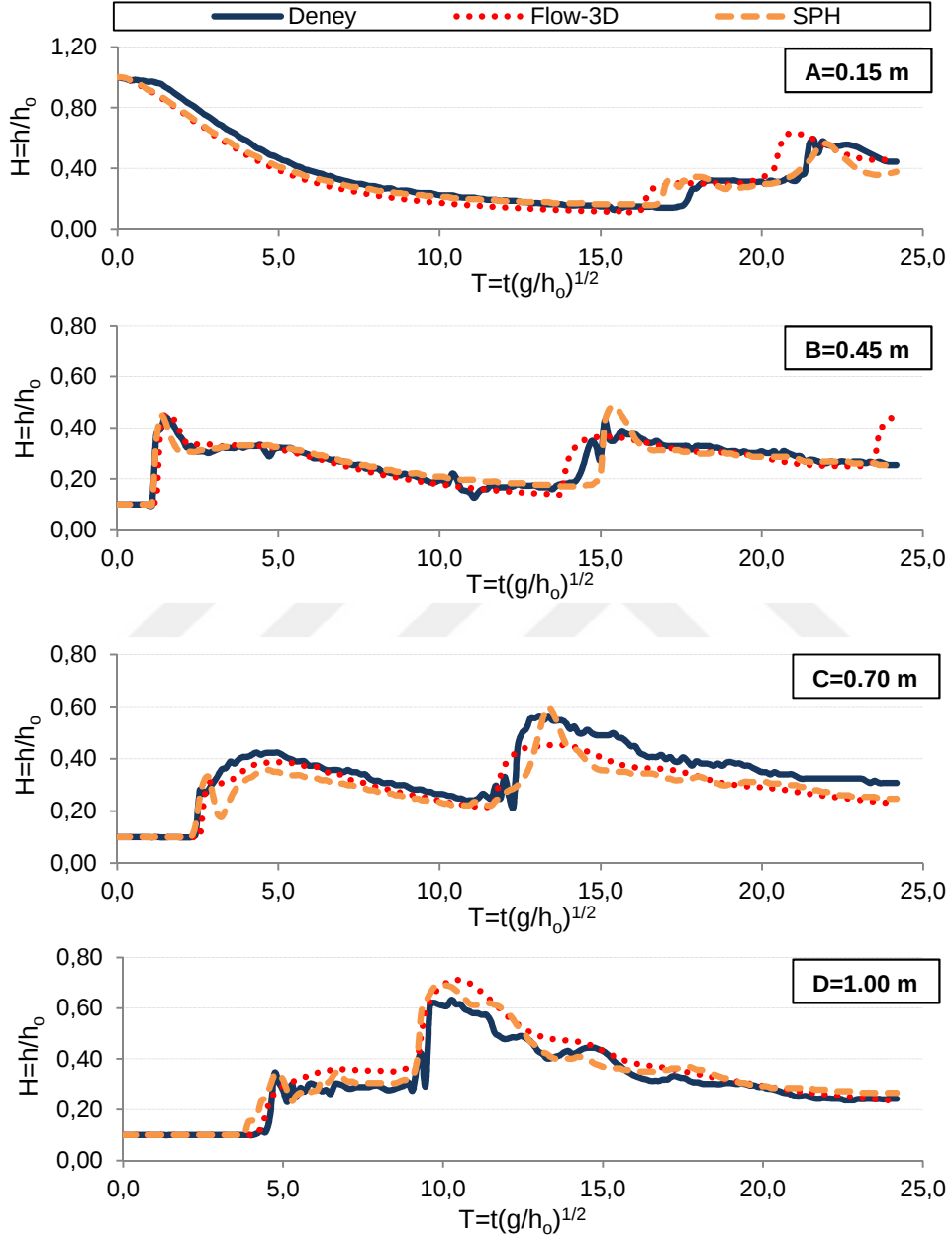


Şekil 4.48b. Yağ-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509$ - 2.9893 s)

$t = 0.1336$ s itibari ile başlayan hava girişimi $t = 0.2839$ s’de belirgin bir görünüm almaya başlamıştır. $t = 0.1837$ s anında dalga önü yağda sudaki yayılmaya göre daha eğik durumdadır. Buna sebep olarak yağın yoğunluğunun düşük ve daha kaygan bir yapıda olması, dolayısı ile gösterdiği direncin zayıflığı örnek olarak verilebilir. Yağın kuyruk akışkanı ile mücadelesi sırasında $t = 0.2839$ s civarında yağın dalga boyu ve genliği suya göre daha az olmakta ve hava girişim bölgesi tam bir çember görünümünü almaktadır. Oysa ki su karışımında bu bölge elips şeklinde görülmektedir. $t = 0.4509$ s’de ikinci dalga kırılmasının genliği yağda çok küçük olmakta dalga tam bir kırılması gerçekleştiremeden ilerlemektedir. Suda ise belirgin bir ikinci kırılma söz konusu olup, dalga önü daha dik konumda ilerlemektedir.

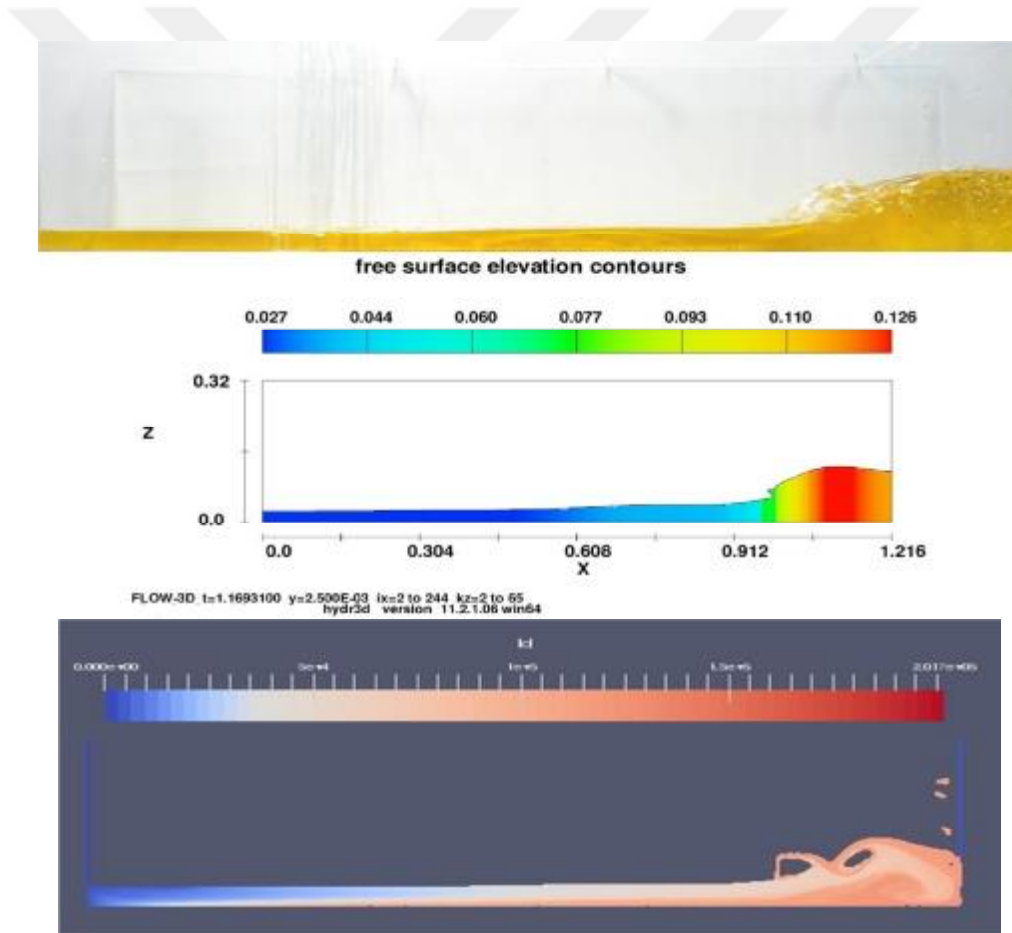
$t = 1.0020$ s anında dalganın kanal sonuna erişip duvar kısmına çarpma etkisi ile birlikte dalga yüzeyde yükselmekte yansıyarak ilerlemesine devam etmektedir. Dikkat çeken en önemli nokta yağın yüzeye tutunması daha düşüktür ve sudaki gibi daha geniş bir tutunma alanı görülememektedir. $t = 1.2525$ s zamanında dalga önünde yağın köpük oluşumu çok az olup suya göre daha az tanecikli bir görünüm hasıl olmuştur. Yağın fiziksel özelliklerinin bu konuda önemli bir etkisi olmakla birlikte viskozite kaynaklı sıçramanın daha düşük seviyelerde olması da bir faktör olarak öngörülebilir. Bu davranışlar diğer anlarda da hissedilebilmektedir.

Birkaç nokta haricinde nümerik yöntemler deney sonuçlarına ciddi anlamda yakın sonuçlar üretmiş, yalnızca nümerik yöntemlerin modelleme yaklaşımlarındaki farklılıklar anlık görüntülerde değişimler oluşturmuştur. Örneğin SPH’ta hava girişim bölgesi çok büyük bir hal almıştır. Bunun sebebi ise parçacıklar arasındaki mesafeden kaynaklanmaktadır. Bu oran azaltılarak daha güçlü bilişim desteği ile deney sonuçlarına büyük oranda yakınsama sağlanabilecektir. Ayrıca Şekil 4.49’da ise Yağ-Yağ 0.10 derinlik oranı için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri çizilmiştir.

YAĞ-YAĞ Islak Hal ($\alpha=0.10$) Noktasal Seviye DeğişimleriŞekil 4.49. Yağ-Yağ $\alpha=0.10$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Grafiklere bakıldığında her iki yöntem için oldukça iyi bir benzerlik söz konusudur. A ve B noktaları için grafikler neredeyse birbirleri ile çakışmaktadır. $C=0.70$ m noktası $T=15$ dolaylarında deney ve Flow-3D grafikleri tümsek görünümdeyken SPH grafiğinin ise daha dik bir biçimde deney verileriyle kesiştiği gözlemlenmektedir. Bu duruma kanal sonundaki çarpma ile SPH'ta oluşan sıçramalar neden olarak verilebilir.

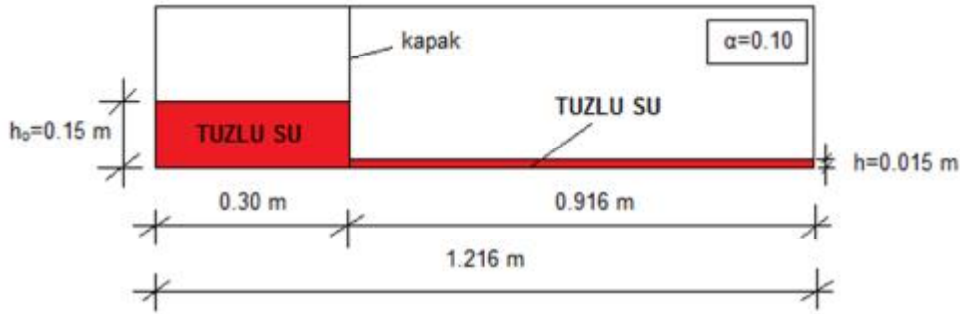
Şekil 4.50'de $D=1.00$ m noktası için deney ve simülasyon farklılıklarına ait örnek görüntüler görülebilmektedir.



Şekil 4.50. Yağ-Yağ $\alpha=0.10$ ıslak durum $D=1.00$ m görüntü farklılıkları

4.2.2.3. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.10$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m, mansapta ise 0.015 m yüksekliğinde tuzlu su bulunmaktadır. Şekil 4.51’de Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.10$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.52’de ise deney başlangıç anı bulunmaktadır.

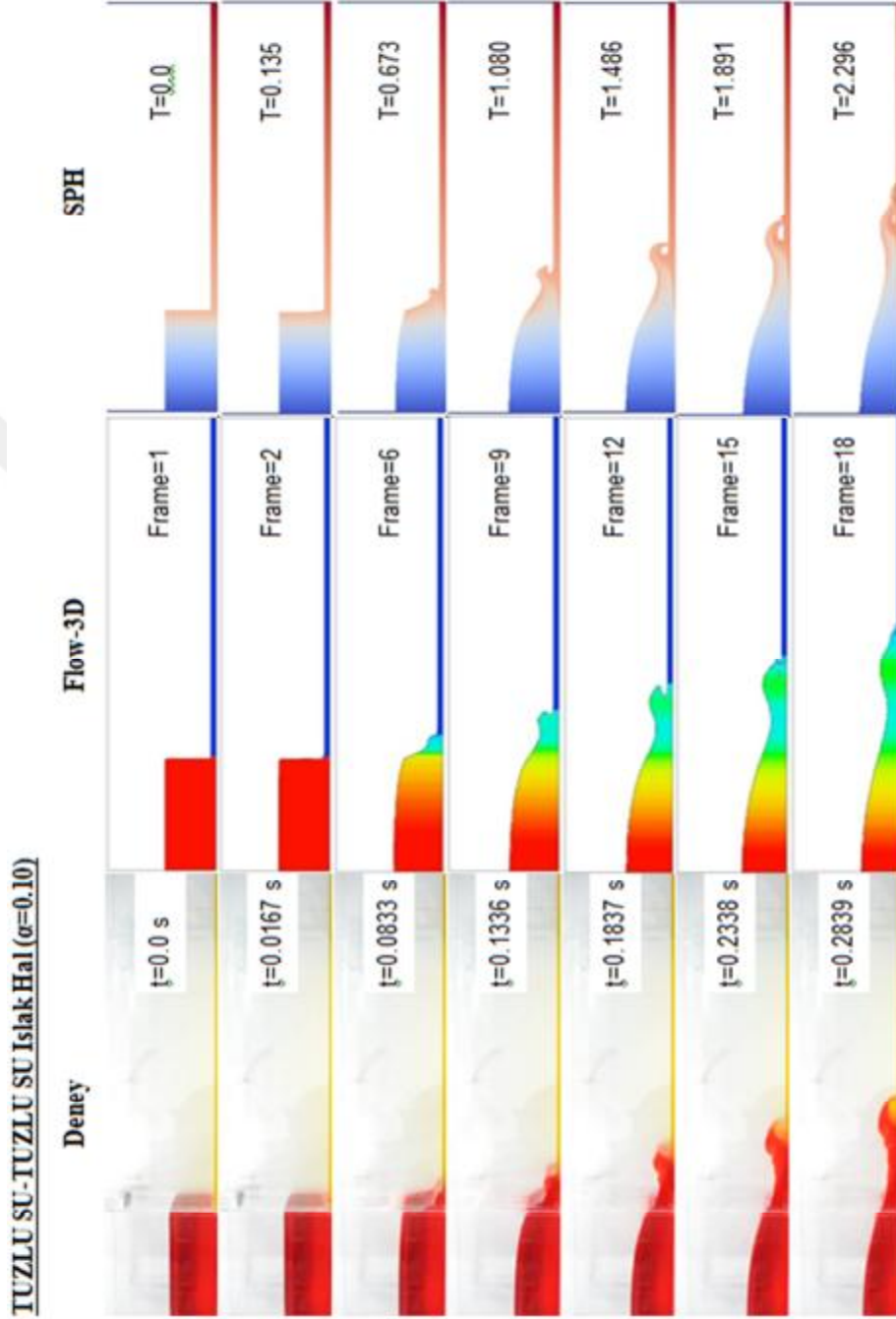


Şekil 4.51. Tuzlu Su-Tuzlu Su ıslak durum şematik gösterimi

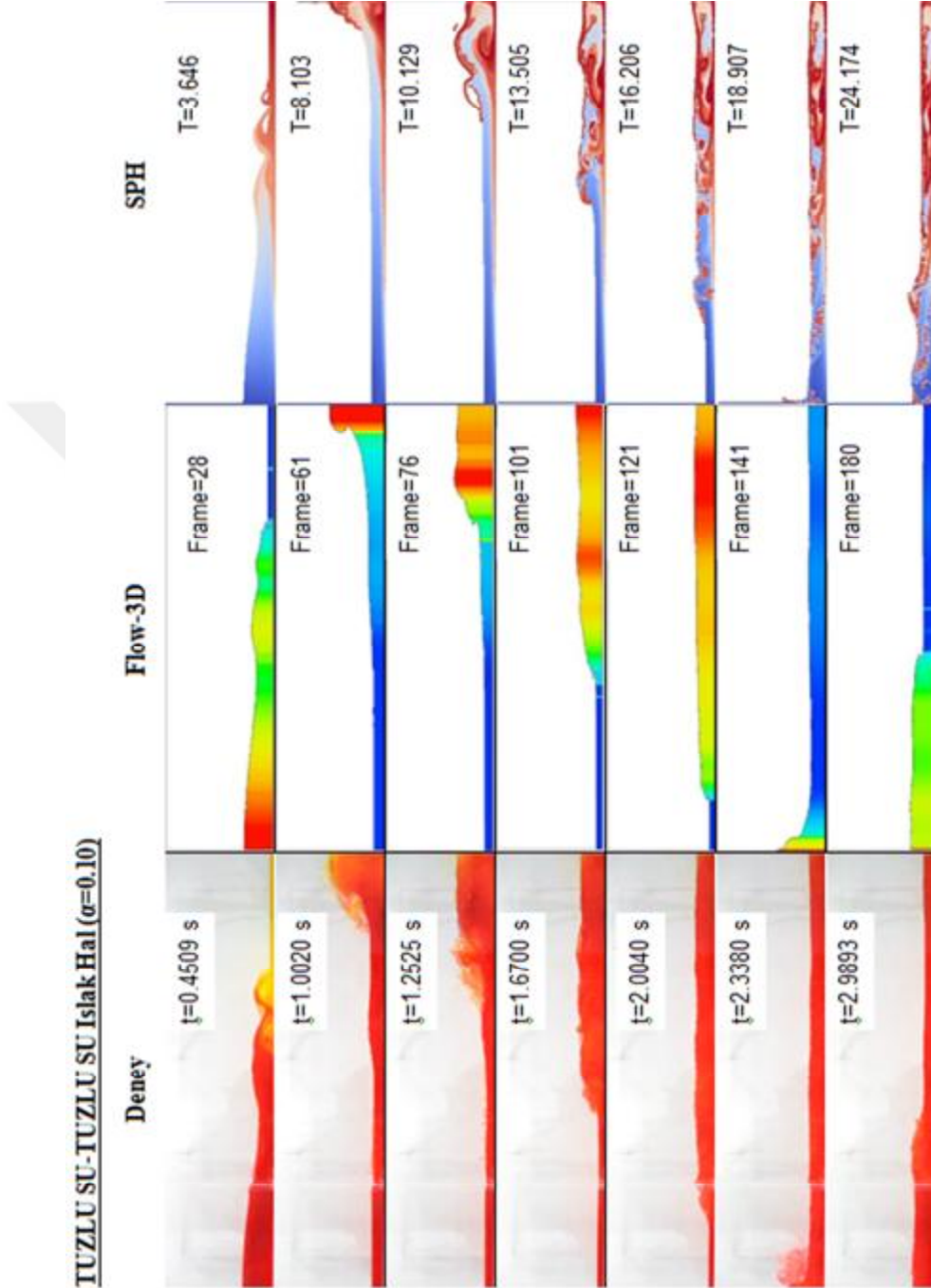


Şekil 4.52. Tuzlu Su-Tuzlu Su ıslak durum ($\alpha=0.10$) deney başlangıcı ($t=0$)

Kapağın aniden kaldırılması ile membadaki tuzlu su kapak altından harekete başlamakta ve mansaptaki durgun durumdaki tuzlu suyu itmeye çalışmaktadır. Şekil 4.53’te deney ve modellemelerin her birinin baraj yıkılması sonrası anlık görüntülerinin karşılaştırılması görülebilmektedir. Görüntülerde derinlik oranı 0.10 olan su karışımına yakın görüntüler oluşmuştur. Yalnızca $t=0.0833$ s anından Flow-3D’de dalga önü bundan önceki akışkanlarda tümsek görünümündeyken tuzlu suyun yayılımında deney görüntülerine bir nebze de olsa yakın olan parabolik görünümüne ulaşmıştır.



Şekil 4.53a. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



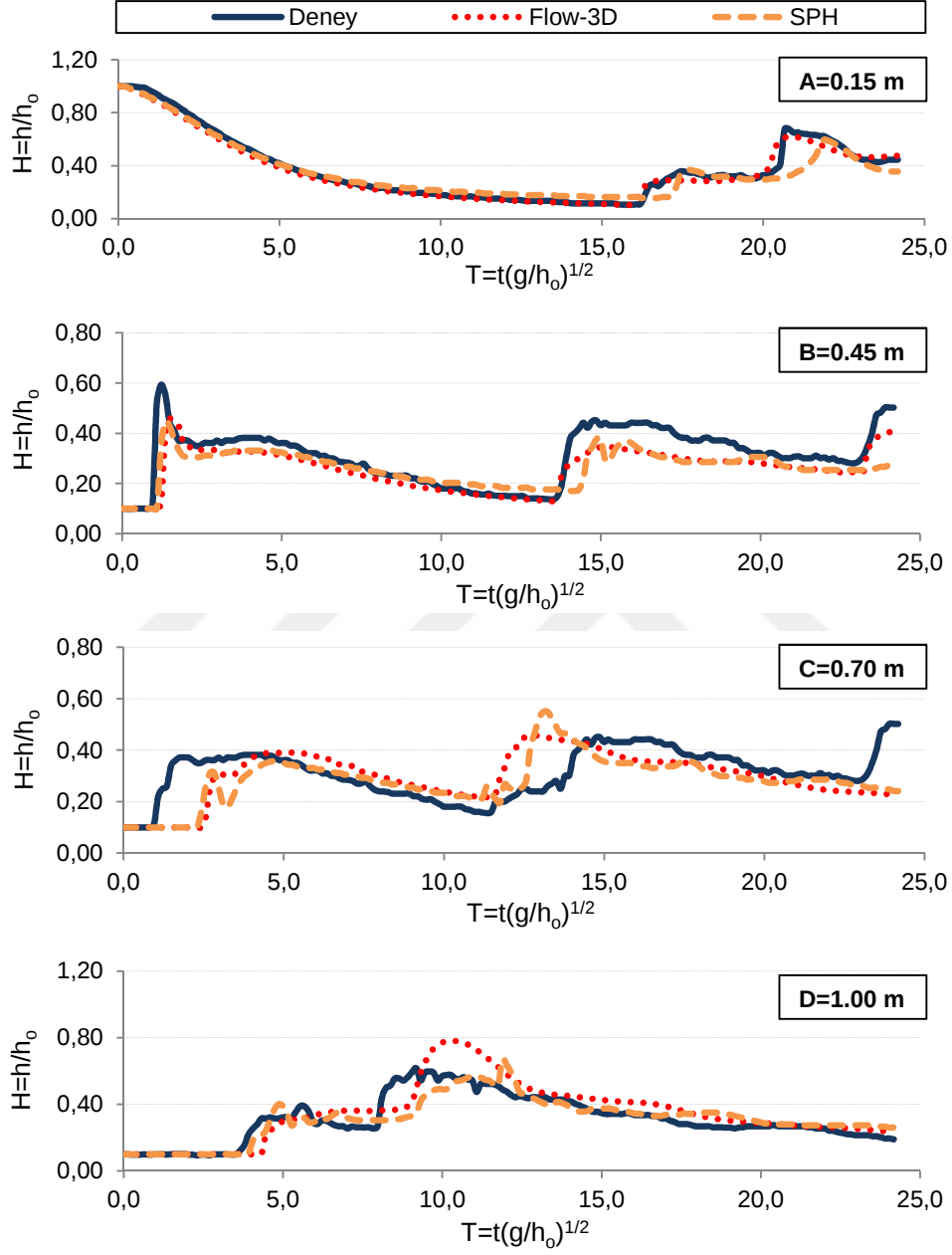
Şekil 4.53b. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s)

Görüntülerde en dikkat çekici ayrıntılar tuzlu suyun yoğunluğunun fazla olması ve viskoziteden dolayı kanal sonu duvara çarpma etkisi ile yüzeye tutunması çok fazla olmakta ve bu da kabarma dalgasının daha büyük dalga boyulu olmasını sağlamaktadır. Kanal mansabına doğru bu etki büyük ölçüde artmaktadır.

Şekil 4.54'te Tuzlu Su-Tuzlu Su 0.10 derinlik oranı için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri görülebilmektedir. Grafikler dikkatle incelendiğinde A=0.15 m noktasında akım davranışları her üç yöntemde de birbirilerine önemli ölçüde yakınsama sağlamaktadır. T=22 civarında SPH verileri deneysel verileri daha geç zamanda yakalamaktadır. B=0.45 m noktasında ise tuzlu suyun yansıma ve çarpma etkisi ile oluşan türbülans kaynaklı enerji kaybı nedeniyle hızı düşmekte ve akışkan serbest yüzey seviyesi daha yüksekte görünmektedir.

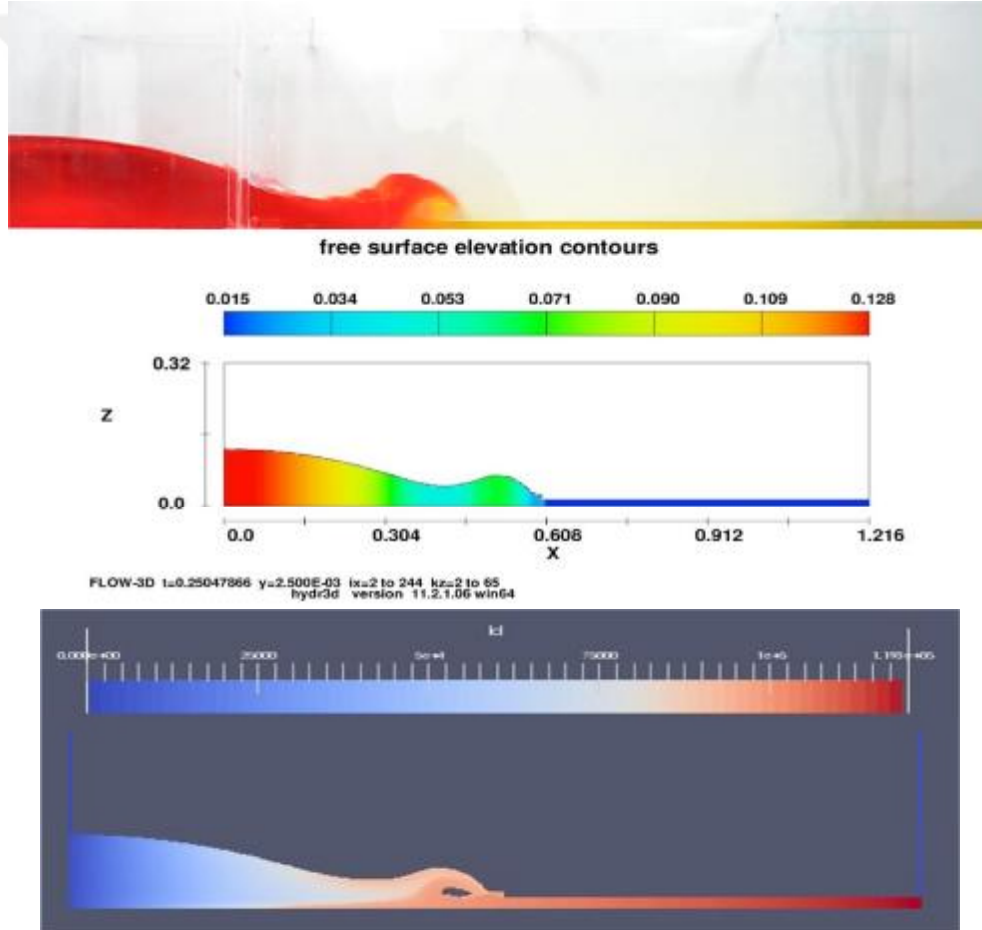
C=0.70 m noktasında deney ölçümleri ilk sıçramayı daha erken zamanda belirlemiş, diğer modelleme yöntemleri belirli bir karşılaşma anına kadar daha uzun bir zaman sürecinde tepe noktasını yakalayabilmiştir. Hatta SPH'ta ani düşüş ve yükselişler ciddi bir şekilde göze çarpmaktadır. Bunda parçacık kopmalarının etkisi çok fazladır. T=13 gibi en yüksek derinliğin SPH yönteminde elde edilmesi de bu sebepten kaynaklanabilmektedir. T=25 civarında deneyde hızlı bir yükselme gözlenmekte, diğer modellemelerde yükselmeler daha az olmaktadır. SPH'ta yatay bir süreçten dahi bahsedilebilir.

D=1.00 m noktasında T=10 dolaylarında en yüksek derinlik Flow-3D'de ölçülmüştür. Bu durumda ağ yapısına dayanan yaklaşım etken olabileceği gibi türbülans faktörü de göz ardı edilmemelidir. Bu noktada SPH datalarının deneysel verilere olumlu yaklaşım sergilemesi mansaba yakın noktalar için uygun modelleme yaklaşımını güçlendirmektedir.

TUZLU SU-TUZLU SU Islak Hal ($\alpha=0.10$) Noktasal Seviye DeğişimleriŞekil 4.54. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.10$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

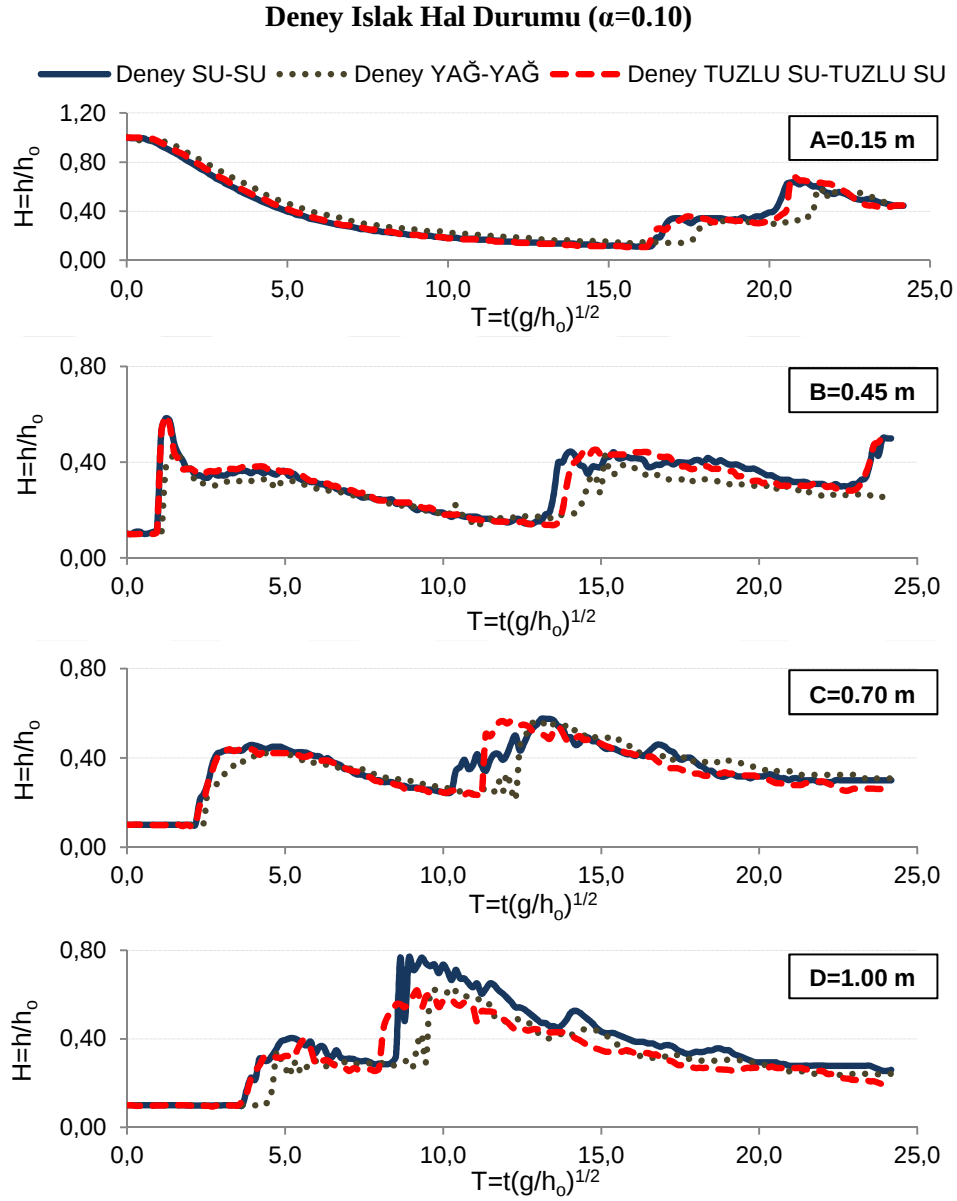
C noktası $T=0-5$ arasında modelleme grafiklerinde dalga önu hızının deney sonuçlarına göre bir miktar geride kaldığı gözlemlenmekte, daha sonra deney sonuçlarını yakaladığı görünmektedir. Bunun sebebinin ise yıkılma ile birlikte oluşan kabarma dalgasının süresizliği ve modellemelerdeki kabuller ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.55'te $C=0.70$ m noktası için deney ve simülasyon farklılıklarına ait örnek görüntüler verilmektedir.



Şekil 4.55. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.10$ ıslak durum $C=0.70$ m görüntü farklılıkları

Ayrıca Şekil 4.56'da $\alpha=0.10$ değeri için tüm akışkanların belirlenen noktalardaki seviye değişim eğrileri görülebilmektedir.



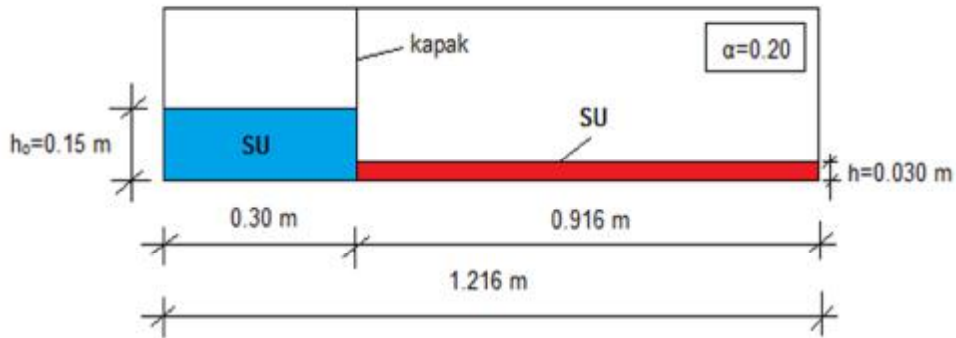
Şekil 4.56. Su, Yağ ve Tuzlu Su 0.10 derinlik oranı deneylerinin belirlenen noktalardaki seviye değişimleri

A, B ve C noktaları için yıkılmanın başlangıç safhaları için büyük oranda bir uyum dikkat çekerken mansaba yakın kesitlerde bariz farklılıklar görülmektedir. Membra yakınındaki noktalarda su ve tuzlu su seviyeleri yukarıda seyrederken yağ daha aşağıda kalmaktadır. Mansaba yaklaştıkça çarpma ve enerji kayıpları akışkanları birbirine yaklaştırmaktadır.

4.2.3. Karışabilen Akışkanların Islak Hal ($\alpha=0.20$) Sonuçları

4.2.3.1. Su-Su ($\alpha=0.20$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m, mansapta ise 0.030 m yüksekliğinde su bulunmaktadır. Şekil 4.57’de Su-Su ($\alpha=0.20$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.58’de ise deney başlangıç hali yer almaktadır.



Şekil 4.57. Su-Su ıslak durum ($\alpha=0.20$) şematik gösterimi



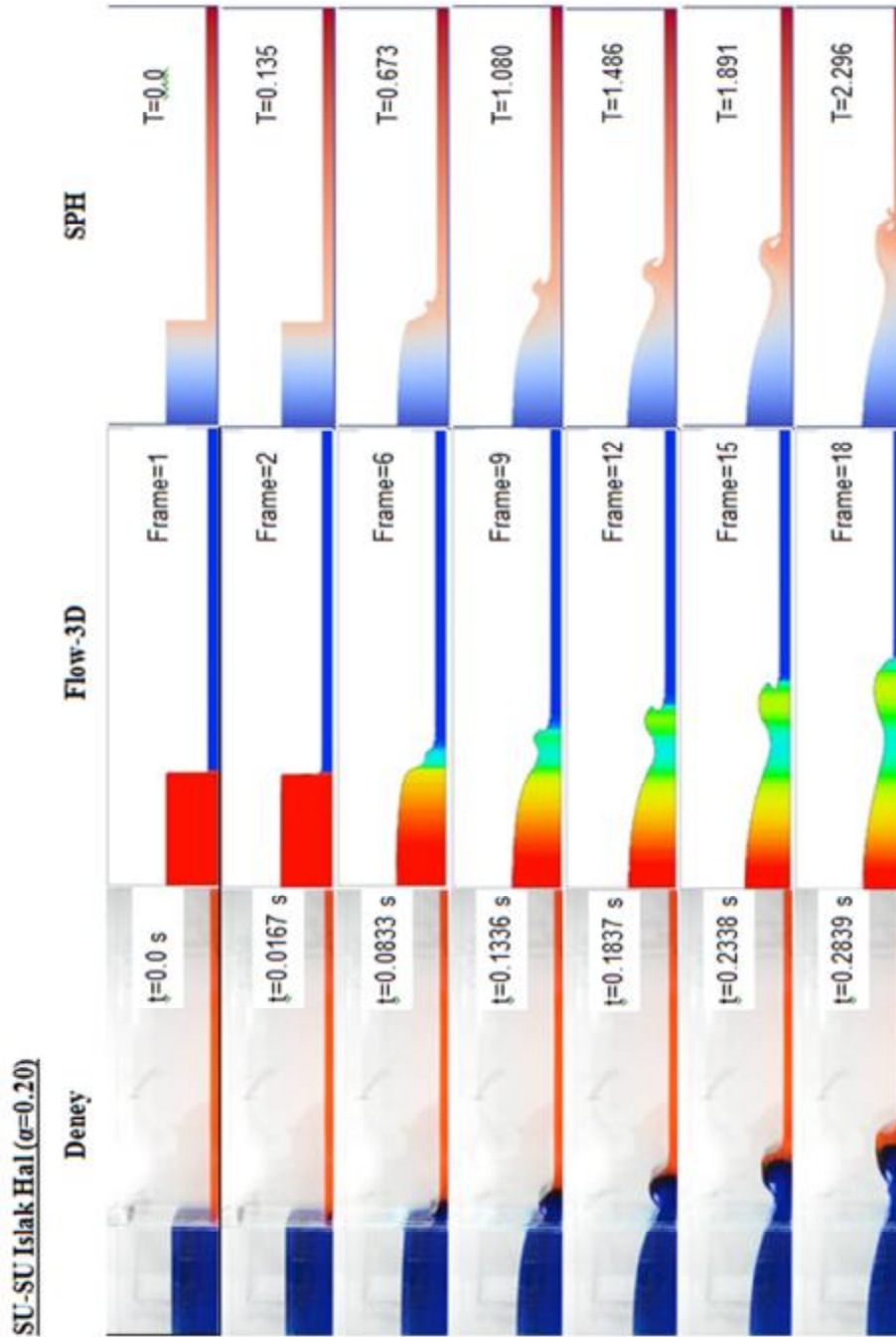
Şekil 4.58. Su-Su ıslak durum ($\alpha=0.20$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Kapağın kalkması sonucunda mambadaki akışkan kütlesi mansaptaki kuyruk akışkanını sürüklemektedir. Derinlik oranı 0.20 olduğu için mansaptaki suyun direnci fazla olmakta, $\alpha=0.10$ 'a nazaran direnç artmıştır.

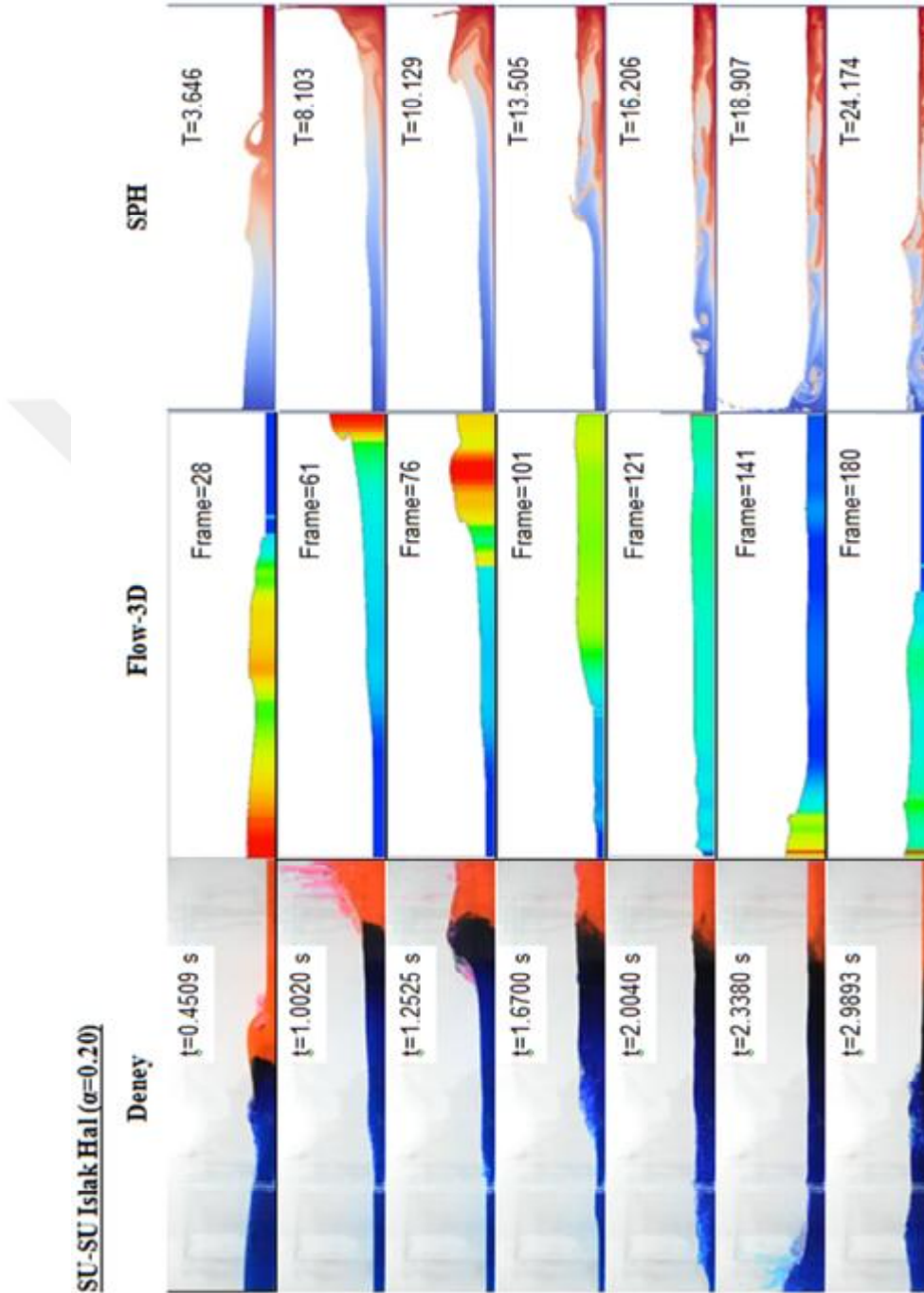
Şekil 4.59'da Su-Su 0.20 derinlik oranı için deney ve modellemelerin her birinin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılması yer almaktadır. Simülasyon ve deney görüntüleri ele alındığında derinlik oranının da etkisi ile $\alpha=0.10$ 'a göre dalga önü bir miktar geriye gelmekte mansaptaki su yıkılma sonrasındaki akımı ters harekete zorlamaktadır. $t=0.2839$ s anında simetrik bir dalga önü yapısı dikkat çekmekte $t=0.4509$ s ile birlikte mansaba doğru bir dalga harekete nüfuz etmeye başlamaktadır. $t=1.0020$ s ile dalga kanal sonundan yansımaktadır. Yansıyan dalga bir miktar sıçrama ile önündeki akışkan kütlesini iterek bu sefer memba yönünde ilerlemeye devam etmektedir.

$t=1.6700$ s'de dalga önü kabarma dalgası oluşumu ile yayılmakta türbülans etkisi ile köpük oluşumuna açık hale gelmektedir. $t=2.9893$ s anında tekrar kırılma olmadan serbest yüzeyde köpüklenme miktarını artırarak mansap güzergahını takip etmektedir.

Modellemelerden Flow-3D baraj yıkılması sonrası $t=0.0833$ s için su yüzü profilinin genel şeklini iyi bir şekilde temsil ederken, SPH bir miktar sapma göstermektedir. $t=0.2338$ s dolaylarında deney görüntülerine göre modellemeler çok farklı akışkan serbest yüzey profili ortaya koymaktadır. Deneyde dalga önü bir miktar geride iken modellemelerde mansap yönünde bir dalga önü gözlemlenmektedir. Modellemelerde bu farkın sebebini çok fazla akışkan yaklaşımı ile hava girişiminin nümerik açılardan irdelenmemesi ve hesaplamalara dahil edilmemesi olarak açıklanabilir. Bu durum görüntülerde hava etkisinin kabarma dalgasının ilerlemesi konularında önemli bir değişken olduğunu göstermektedir. Özellikle Flow-3D'de hava etkisinin tanımlanarak modellemelere ilave edilmesi yaklaşık sonuçların elde edilmesine imkan verebilecektir.

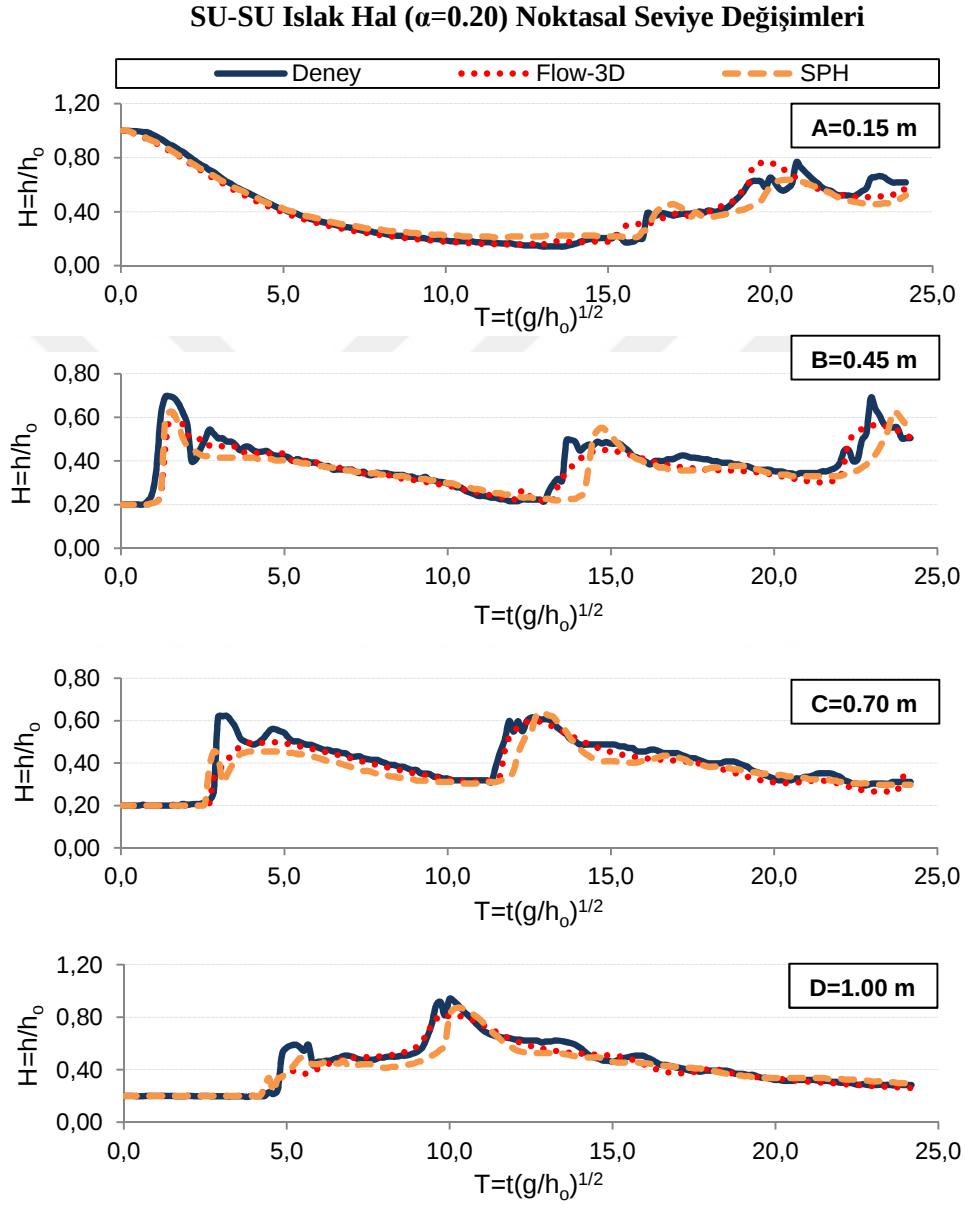


Şekil 4.59a. Su-Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



Şekil 4.59b. Su-Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509$ - 2.9893 s)

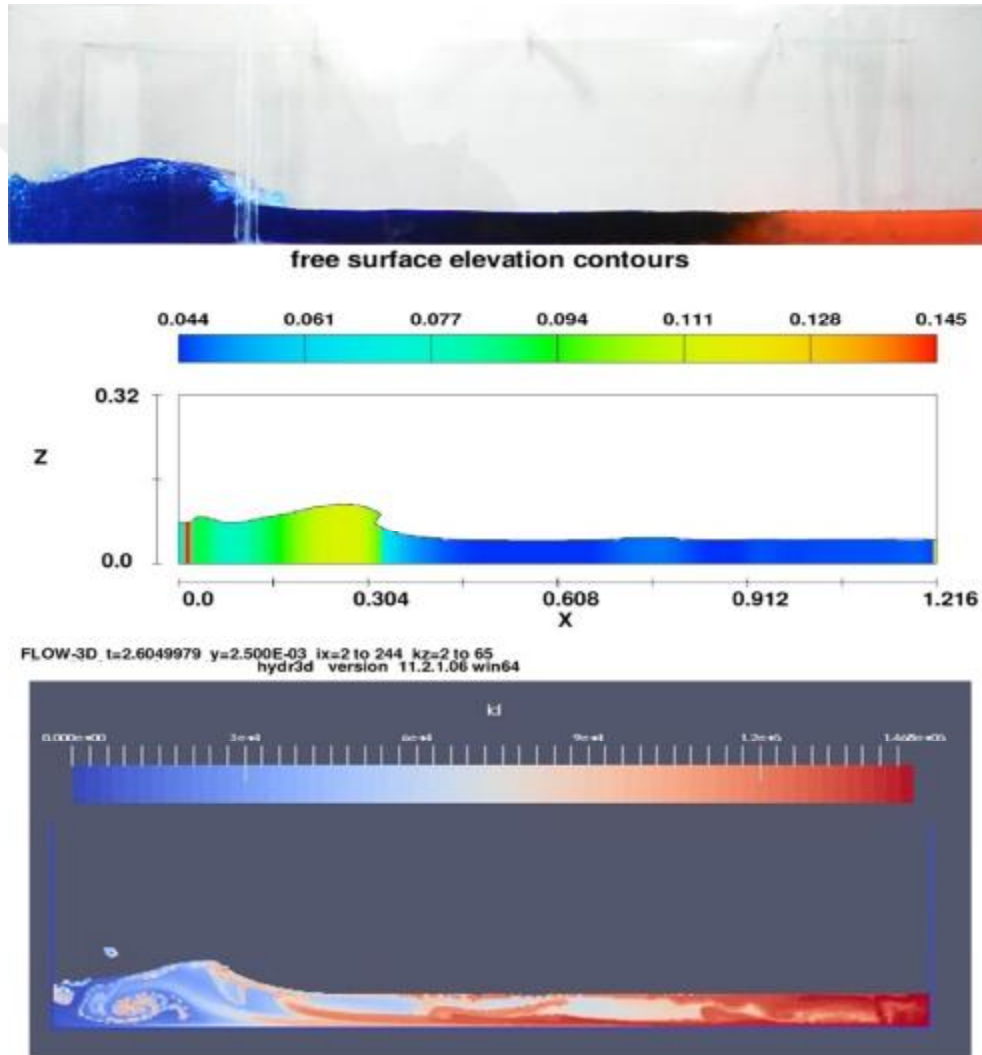
Şekil 4.60'ta Su-Su 0.20 derinlik oranı için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.60. Su-Su $\alpha=0.20$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Grafiklerde az da olsa farklılıklar tespit edilmesine rağmen bundan önceki $\alpha=0.10$ durumuna göre daha iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır. En başta A noktası $T=0-15$ arasında grafiklerin üst üste çakışma hali dikkat çekmektedir.

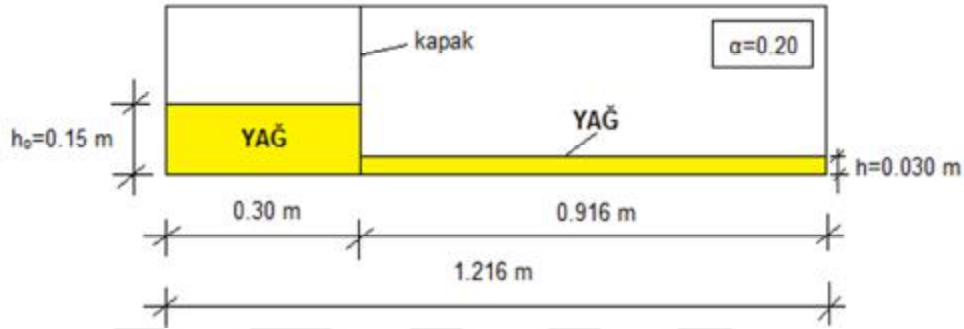
Şekil 4.61’de $A=0.15$ m noktası için deney ve simülasyon farklılıklarına ait örnek görüntü sergilenmektedir.



Şekil 4.61. Su-Su $\alpha=0.20$ ıslak durum $A=0.15$ m görüntü farklılıkları

4.2.3.2. Yağ-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m, mansapta ise 0.030 m yüksekliğinde yağ bulunmaktadır. Derinlik oranı 0.20 olup, Şekil 4.62’de Yağ-Yağ ($\alpha=0.20$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.63’te deney başlangıç anı bulunmaktadır.



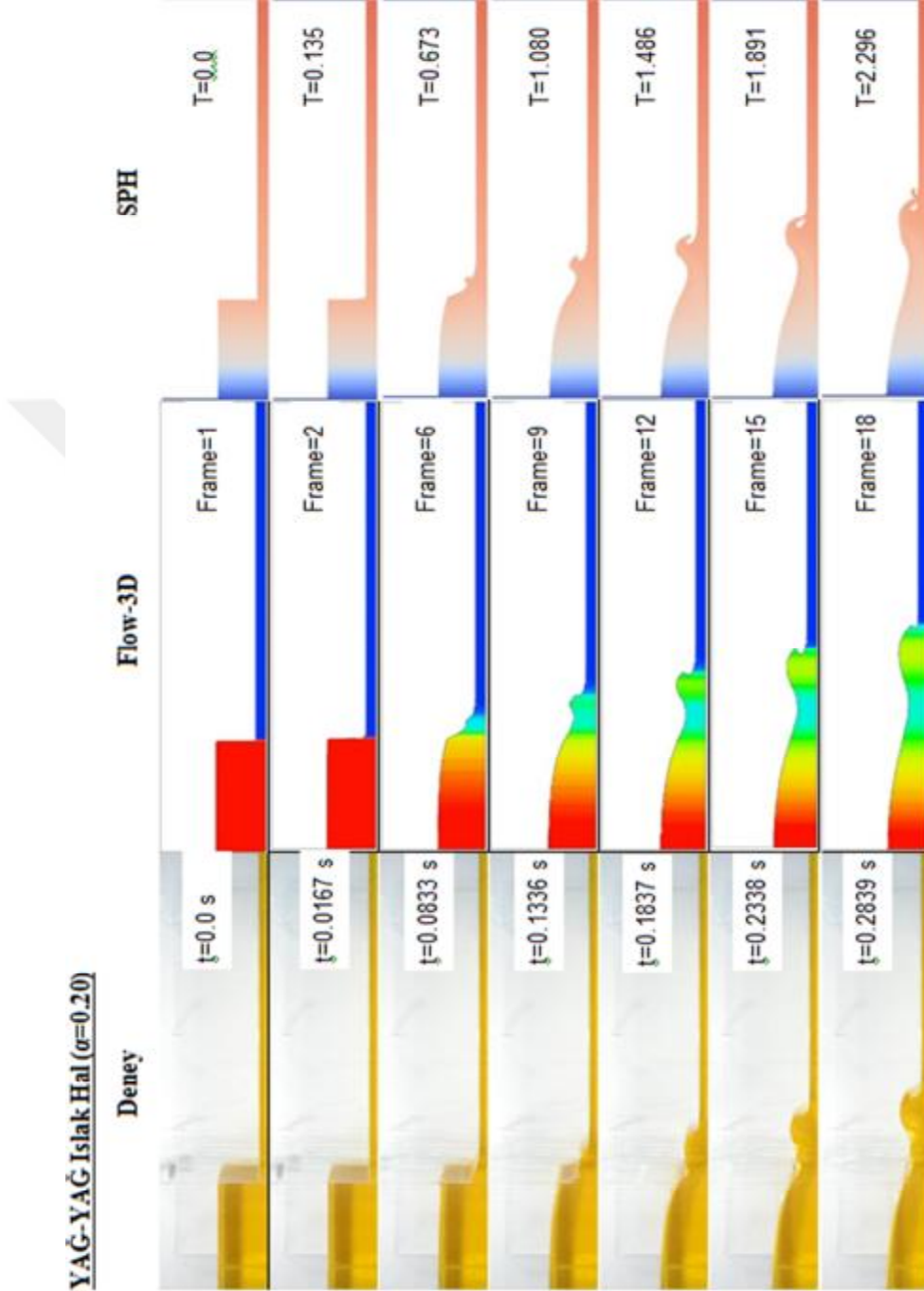
Şekil 4.62. Yağ-Yağ ıslak durum ($\alpha=0.20$) şematik gösterimi



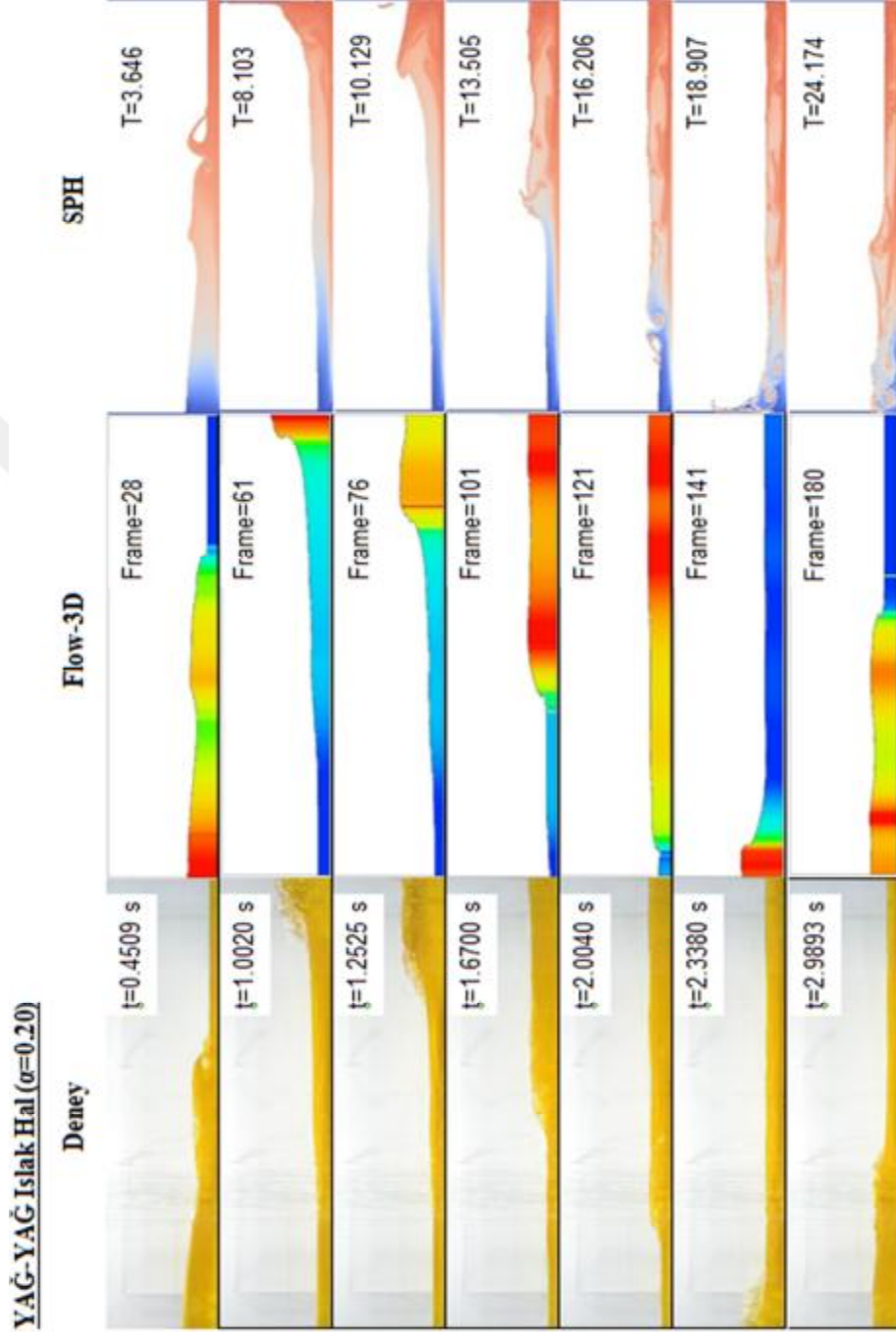
Şekil 4.63. Yağ-Yağ ıslak durum ($\alpha=0.20$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Hem memba hem de mansap için yağın akışkan olarak kullanıldığı bu deneyde daha önce değinildiği üzere farklı renklendirme uygulanmamıştır. Yağın kendi renginin yeterli olacağı öngörülmüştür.

Şekil 4.64’te derinlik oranı 0.20 için Yağ-Yağ deney ve modellemelerin her birinin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılması yer almaktadır. Derinlik oranının iki katına çıkmış olması nedeniyle mambadaki yağ mansaptaki durgun haldeki yağ kütlesini harekete zorlamaya başlamakta, mansaptaki akışkan ise harekete karşı koyan bir davranış sergilemektedir. Genelde yüzey profillerinin her iki yöntem için yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

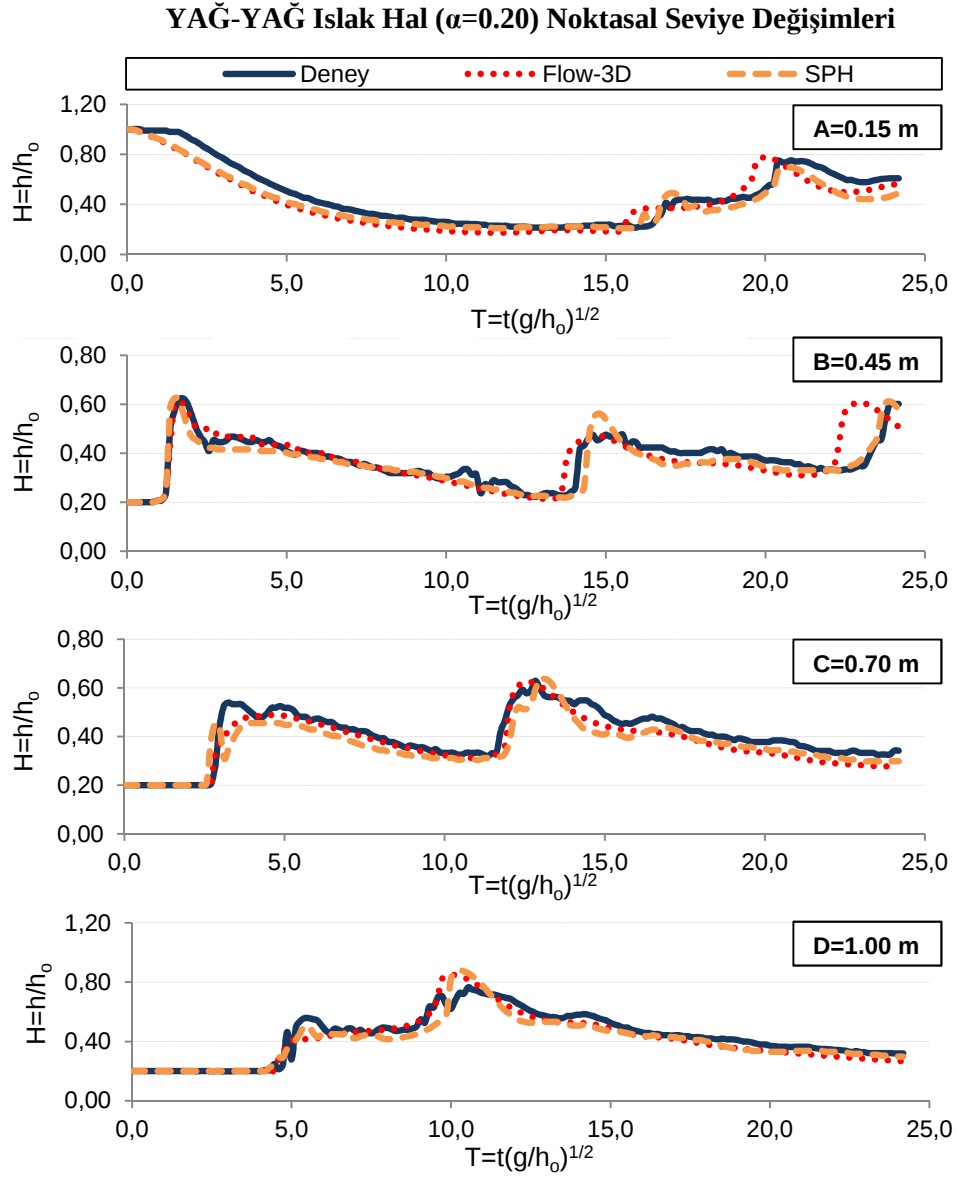


Şekil 4.64a. Yağ-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



Şekil 4.64b. Yağ-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509$ - 2.9893 s)

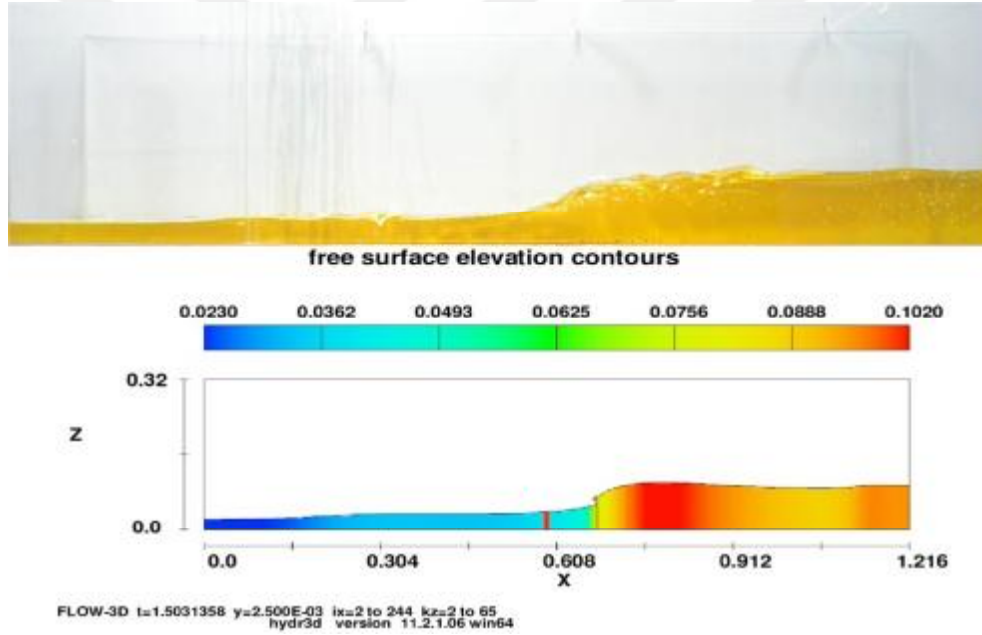
Şekil 4.65'te ise Yağ-Yağ 0.20 derinlik oranı için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri verilmiştir.



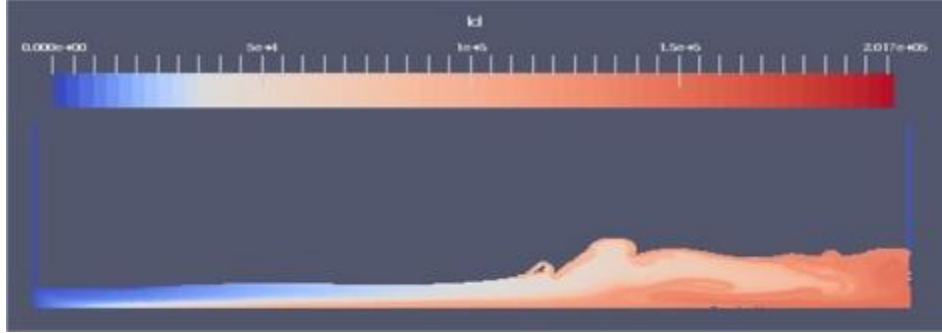
Şekil 4.65. Yağ-Yağ $\alpha=0.20$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Eğrilerde genelde çok iyi bir uyum gözlemlenmektedir. Şu ana kadar mansabın ıslak olduğu yani kuyruk akışkan durumlarında sonuçların oldukça iyi olması kuru durumdaki sürtünme etkisini ön plana çıkarmaktadır. Özellikle mansaba yakın noktalarda eğrilerin neredeyse tümüyle kesişmesi yoğunluk düştükçe akışkan hareketini tanımlama konusundaki belirsizlikleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Viskozite etkisi de tabi göz ardı edilmemesi gereken bir ayrıntı durumundadır.

Şekil 4.66'da $C=0.70$ m noktası için deney ve simülasyon farklılıklarına ait örnek bir görüntü verilmiştir.



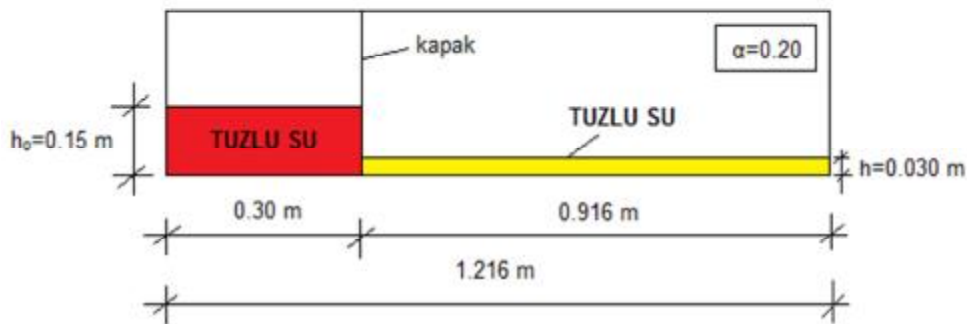
Şekil 4.66a. Yağ-Yağ $\alpha=0.20$ ıslak durum $C=0.70$ m görüntü farklılıkları-I



Şekil 4.66b. Yağ-Yağ $\alpha=0.20$ ıslak durum $C=0.70$ m görüntü farklılıkları-II

4.2.3.3. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m, mansapta ise 0.030 m yüksekliğinde tuzlu su bulunmaktadır. Derinlik oranı yine 0.20'dir. Şekil 4.67'de Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.68'de ise deney başlangıç hali yer almaktadır.



Şekil 4.67. Tuzlu Su-Tuzlu Su ıslak durum ($\alpha=0.20$) şematik gösterimi

Tuzlu su bu çalışmada yoğunluğu yüksek bir akışkan olarak değerlendirilmiştir. Farklı sıcaklık ve karışım oranlarında çeşitli yoğunluklar belirlenebilmektedir. Daha önceden de ifade edildiği gibi tuzlu suyun yoğunluğu çalışmada 1200 kg/m^3 olarak ölçülmüş ve modellemelerde bu değer tanımlanmıştır.

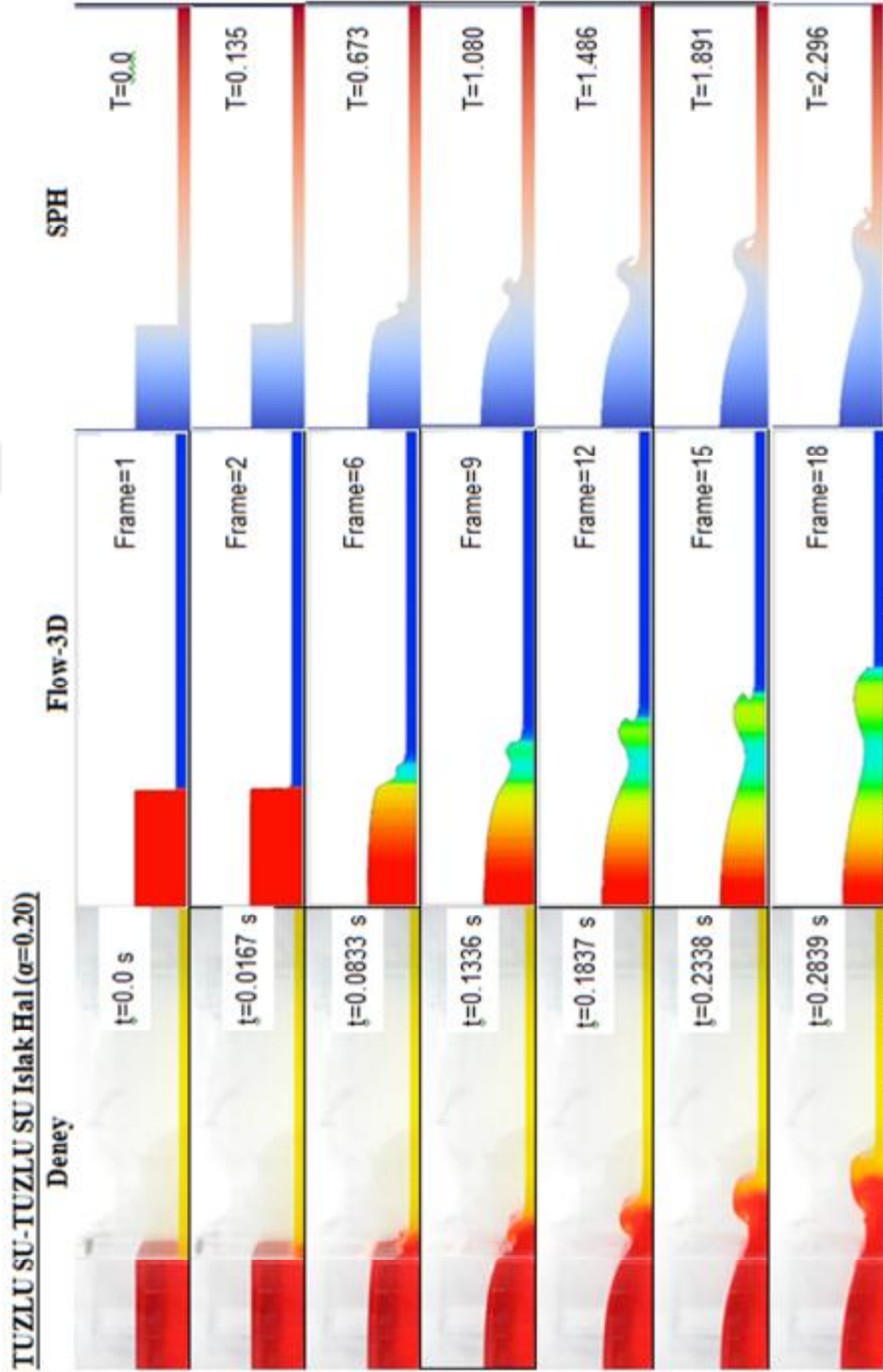


Şekil 4.68. Tuzlu Su-Tuzlu Su ıslak durum ($\alpha=0.20$) deney başlangıcı

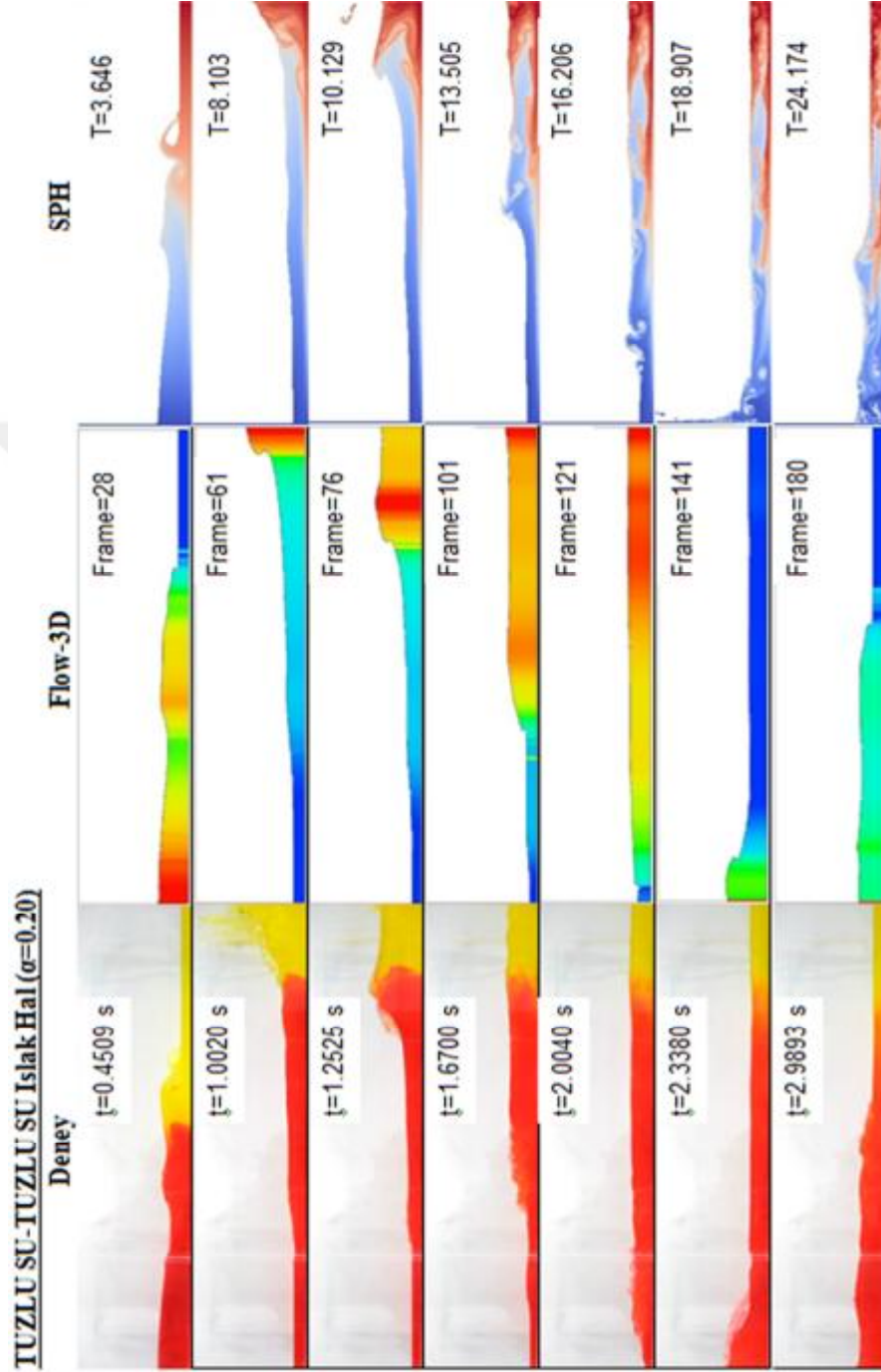
Şekil 4.69’da görülebileceği üzere tuzlu su karışımının derinlik oranı 0.20 için deney ve modellemelerin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılması yer almaktadır. Görüntülerde derinlik oranı faktörü sebebiyle yıkılma sonrasında membadaki tuzlu su mansapta bulunan durgun haldeki tuzlu suyu harekete zorlamakta ve aynı oranda mansaptaki akışkan kütlesi de bu harekete karşı bir direnç sergileyerek akımı tersine çevirme konusunda davranış ortaya koymaktadır.

$t=0.0833$ s’de akımda aniden barajı simgeleyen kapağın kaldırılması ile kompleks akım koşulları oluşmakta, akım türbülanslı yapıya dönüşmektedir. Diğer aynı derinlik oranında farklı yoğunluklu akışkanlarda olduğu gibi $t=0.2839$ s anında ilerleyen dalgaya durgun haldeki tuzlu su karşı koymakta dalga önü orta çizgide simetrik bir görünüm almaktadır. $t=0.4509$ s’de taşkın şok dalgası mansap yönünde ilerlemeye başlamaktadır. Kanal sonunda çarpma etkisi ve yansıyan dalganın memba yönündeki akışkan kütlesi ile karşılaşması sebebiyle çalkantı oluşumu göze çarpmakta, bu noktada enerji düzensizliği oluşmakta ve hızın düşmesi ile derinlik artmaktadır.

SPH ve Flow-3D sonuçları deneysel verileri büyük ölçüde serbest yüzey profili açısından yakınsamakla birlikte modellemelerdeki yüzey gerilmelerinin ihmali, bazı kabuller ve metodolojiden kaynaklı farklı yaklaşım durumları görüntülerde sapmalar meydana getirmektedir.

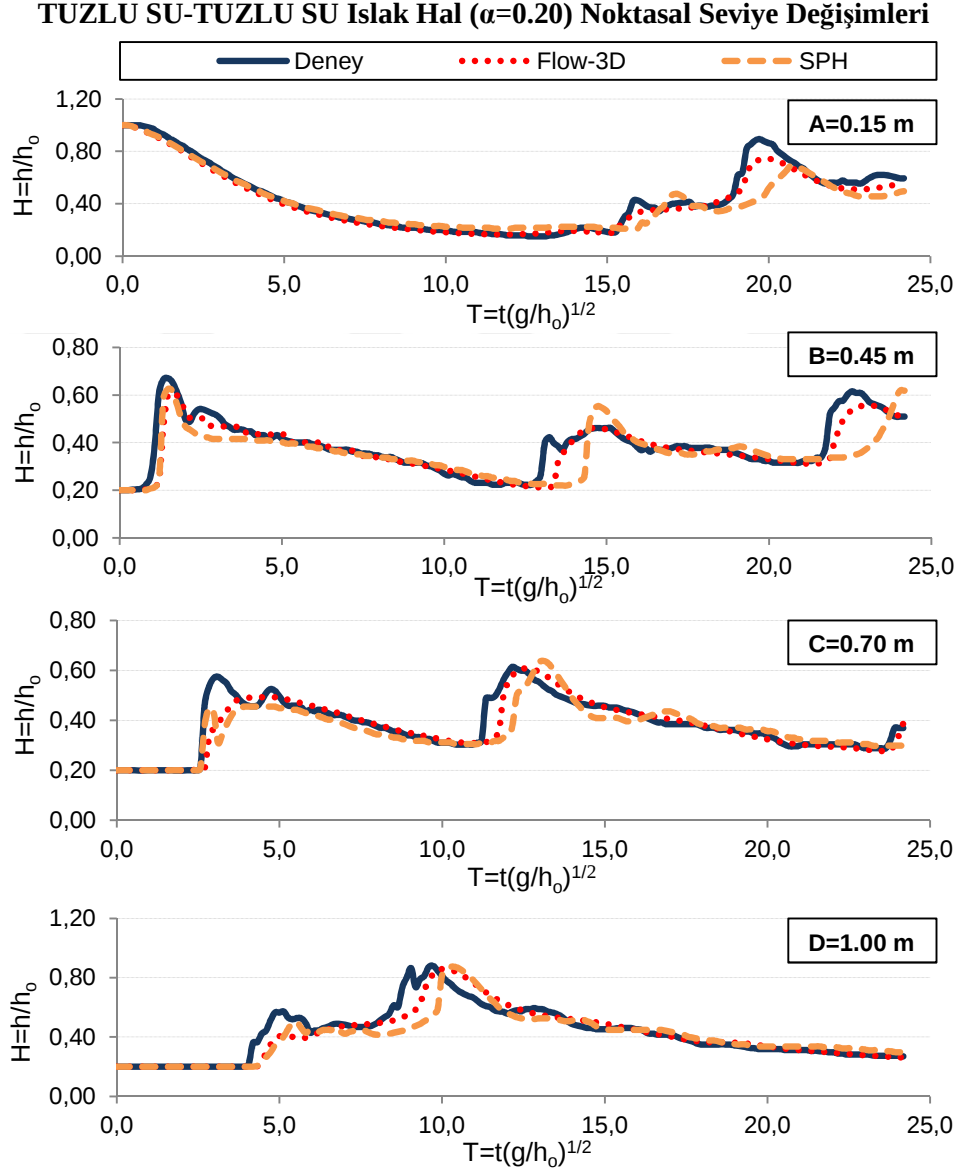


Şekil 4.69a. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



Şekil 4.69b. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509-2.9893$ s)

Şekil 4.70’te ise Tuzlu Su-Tuzlu Su 0.20 derinlik oranı için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.70. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.20$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

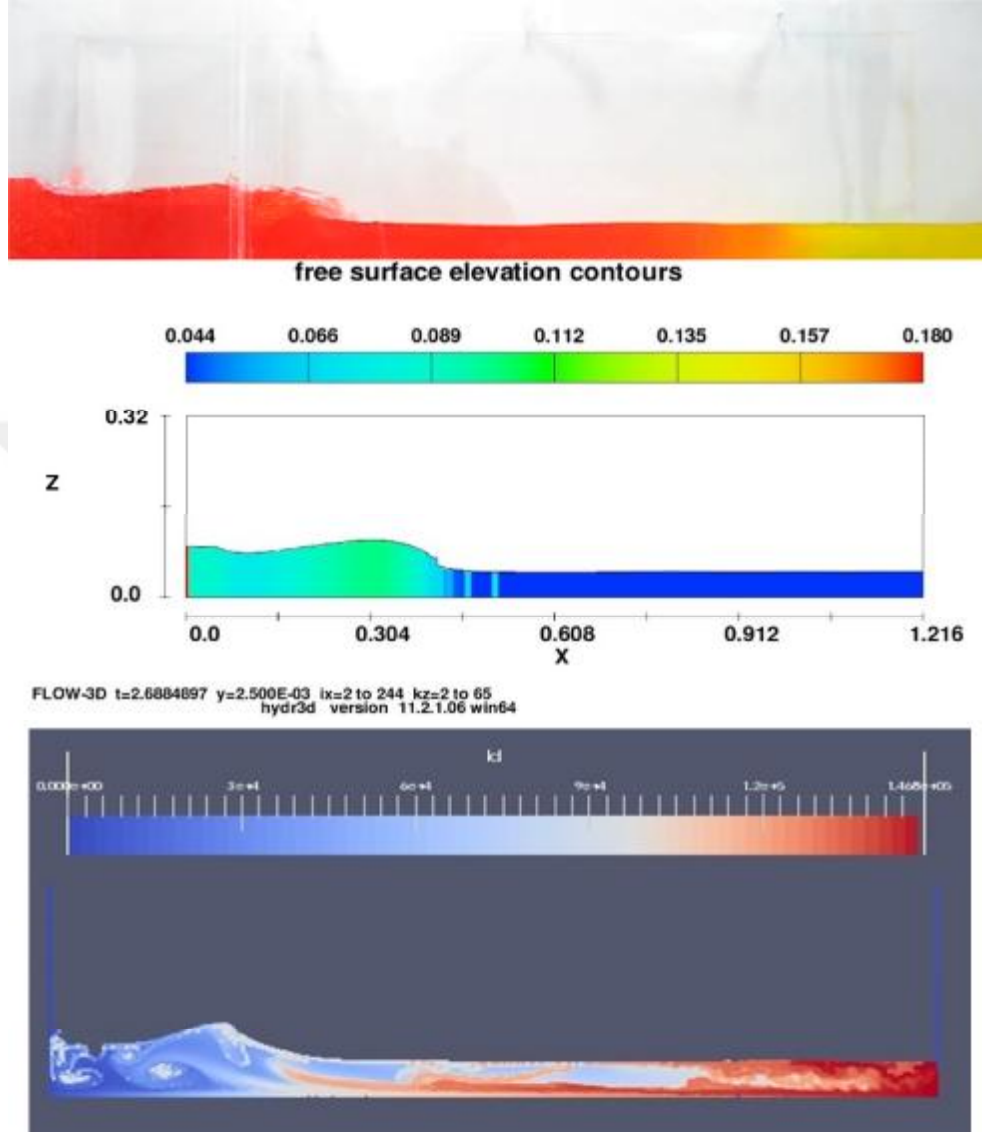
Grafiklere bakılırsa $A=0.15$ m noktası için yıkılmanın başlaması ile birlikte $H=1$ 'den seviye 0.20 dolaylarına kadar düşmekte, biri az diğeri de daha fazla iki yükselme gözlenmektedir. İlk yükselme yansıyan dalganın memba yönündeki akışkan kütlesi ile çarpışması sonucu seviyenin yukarı çıkması, ikincisi ise memba yönündeki kanala çarpma etkisi ile jet oluşumu sebebiyle çalkantının söz konusu olması ile açıklanabilir. $T=20$ civarında deney sonuçlarının daha yüksek değerler göstermesi de bu gerçeğe izah edilebilir.

$B=0.45$ m noktası için başlangıçta tüm değerler birbirleri ile oldukça uyumlu görünmektedir. $T=13$ ve $T=22$ gibi değerlerde Flow-3D diğer yöntemlerin ortasında seyretmekte, SPH'ta parçacık kaynaklı kopmalar etken olduğu için tuzlu su seviyesi göreceli yukarı gözükmektedir. Parçacıklar arası mesafe de bu değişimi büyük ölçüde etkilemektedir. $C=0.70$ m noktasında $T=3$ ve $T=12$ dolaylarında farklılıklar göze çarpmaktadır. Keza $D=1.00$ m noktası için de $T=5$ ve $T=10$ için aynı durumlar geçerlidir.

Dikkat edilmesi gereken en önemli şey mansabın sonuna doğru sıçrama anları daha geç gerçekleşse dahi kısa zaman süreci içerisinde olmaktadır ve enerji süreksizlikleri meydana gelmektedir.

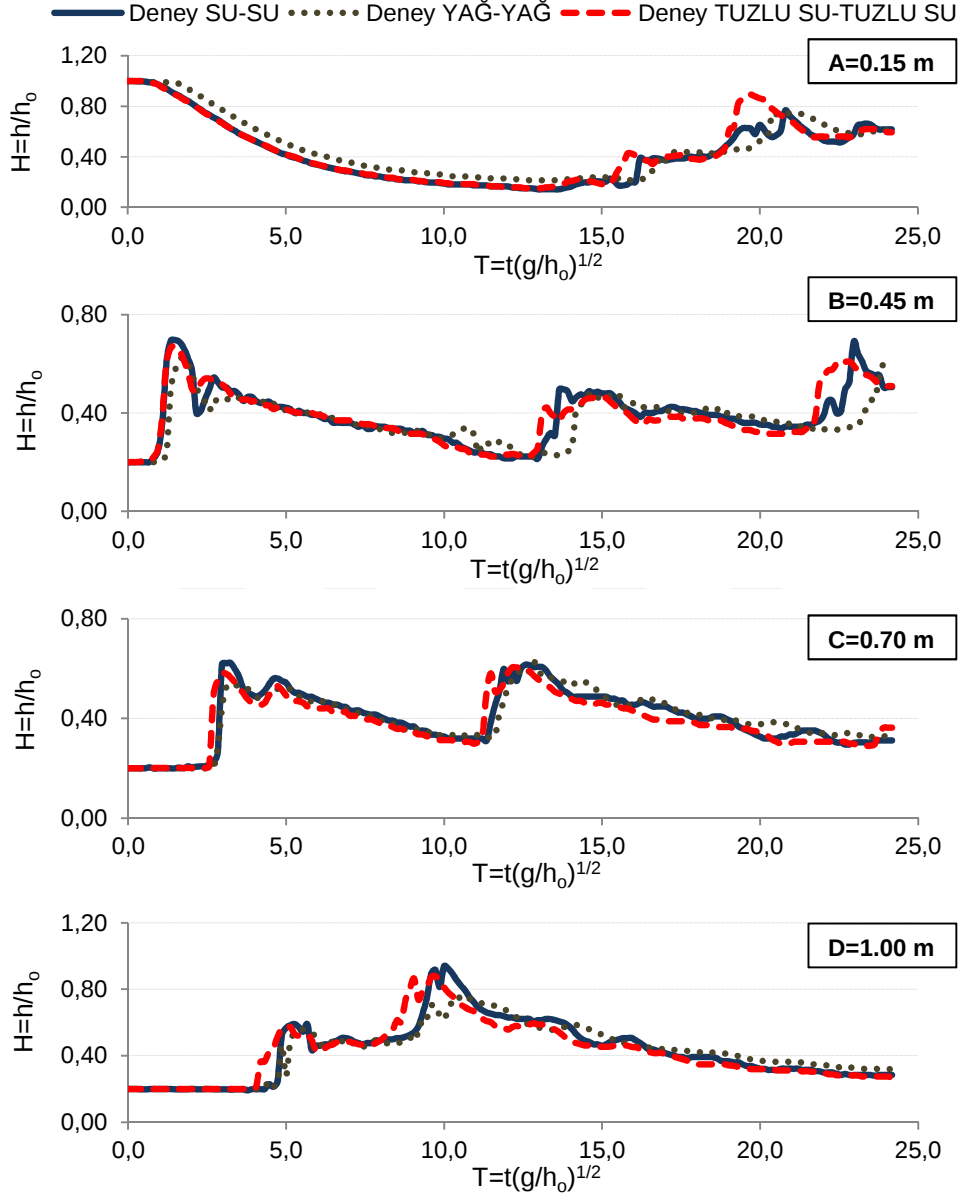
Şekil 4.71'de $B=0.45$ m noktası $T= 20-25$ arasında deney ve simülasyon farklılıklarına ait örnek görüntüler gösterilmektedir. Görüntülerde oldukça iyi bir uyum dikkat çekmekte, gerek başlangıç şartları olsun gerekse de hız süreksizliklerinin olduğu nokta ve anlarda akım davranışı iyi bir şekilde temsil edilebilmektedir.

Kapak noktasından mansaba doğru modelleme zamanını tamamlamakta olan dalga önü kısmında deney görüntüleri içerisinde köpük oluşumu gözlenirken, modellemelerde akışkan serbest yüzeyinde her ne kadar iyi yakınsama söz konusu olsa dahi türbülans ve enerji kayıpları kaynaklı fiziksel etki farklılıkları görülebilmektedir.



Şekil 4.71. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.20$ ıslak durum $B=0.45$ m görüntü farklılıkları

Şekil 4.72’de 0.20 derinlik oranı için Su, Yağ ve Tuzlu suyun taşkın şok dalgası oluşumu sonrası A, B, C ve D noktalarında meydana getirdiği derinlik değişimi grafikleri oluşturulmuştur.

Deney Islak Hal Durumu ($\alpha=0.20$)Şekil 4.72. $\alpha=0.20$ için A,B,C ve D noktalarındaki akışkan derinlik değişimi

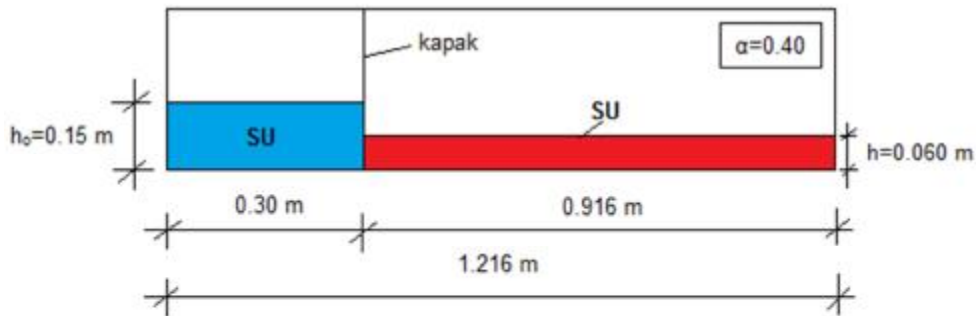
Eğrilerde tüm akışkanlar açısından iyi bir uyum gözlenmekte, $A=0.15$ m noktası için $T=15-25$ arasında Su 0.20 deneyinin orta çizgide seyrettiği tuzlu suyun daha yukarı seviyelere çıktığı dikkat çekmektedir. Bu durumu yoğunluk ve kanal sonuna çarpma etkisi ile sıçramanın fazla olması, ayrıyeten de görüntü işleme kaynaklı renk kayıpları şeklinde açıklanabilir.

$B=0.45$ m noktasında Su deneyinin daha pik seviyede olduğu görülmekte, yağ yine $T=15-20$ haricinde daha az derinliklerde ilerlemektedir. Yalnızca o anlarda yukarı seviyelerde olması fazla dalga kırılmalarının meydana gelmemesi nedeniyle daha kararlı bir akım profili çizmesi ile izah edilebilir. $C=0.70$ m noktasında genellikle akışkan seviyelerinin birbirleri ile pozitif anlamda korelasyon sağladıkları görülmektedir. $D=1.00$ m noktasında $T=10$ için tam kanal sonuna çarpma etkisi eğrilerde kendisini göstermektedir. Çarpma ile birlikte su ve tuzlu su yüzeyde tutunup bir süre tırmanmakta ve kabarma dalgası şeklinde yansıyarak yayılımını gerçekleştirmektedir.

4.2.4. Karışabilen Akışkanların Islak Hal ($\alpha=0.40$) Sonuçları

4.2.4.1. Su-Su ($\alpha=0.40$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m, mansapta ise 0.060 m yüksekliğinde su bulunmaktadır. Şekil 4.73'te Su-Su ($\alpha=0.40$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.74'te ise deney başlangıç hali verilmiştir.



Şekil 4.73. Su-Su ıslak durum ($\alpha=0.40$) şematik gösterimi

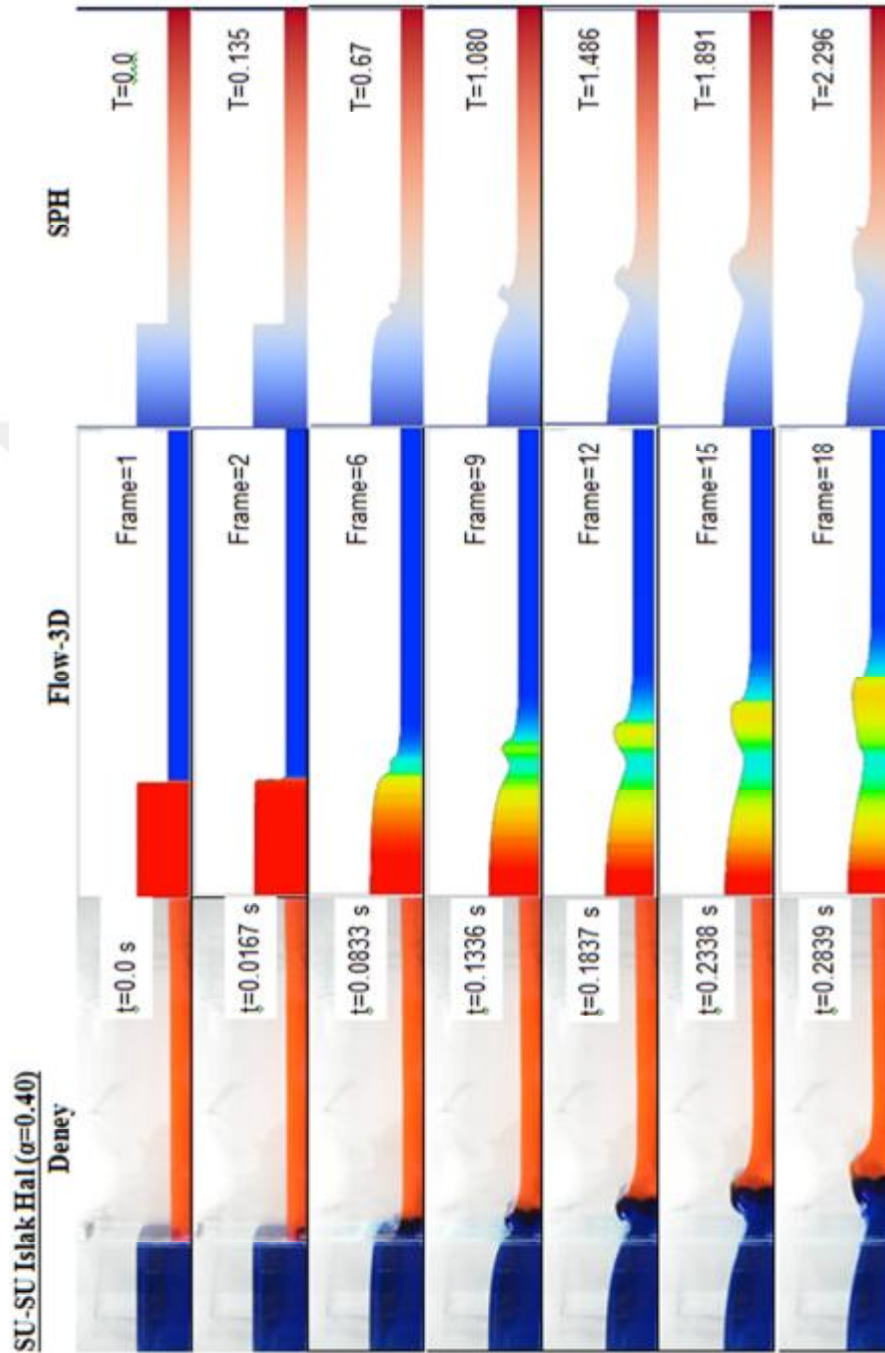


Şekil 4.74. Su-Su ıslak durum ($\alpha=0.40$) deney başlangıç anı ($t=0$)

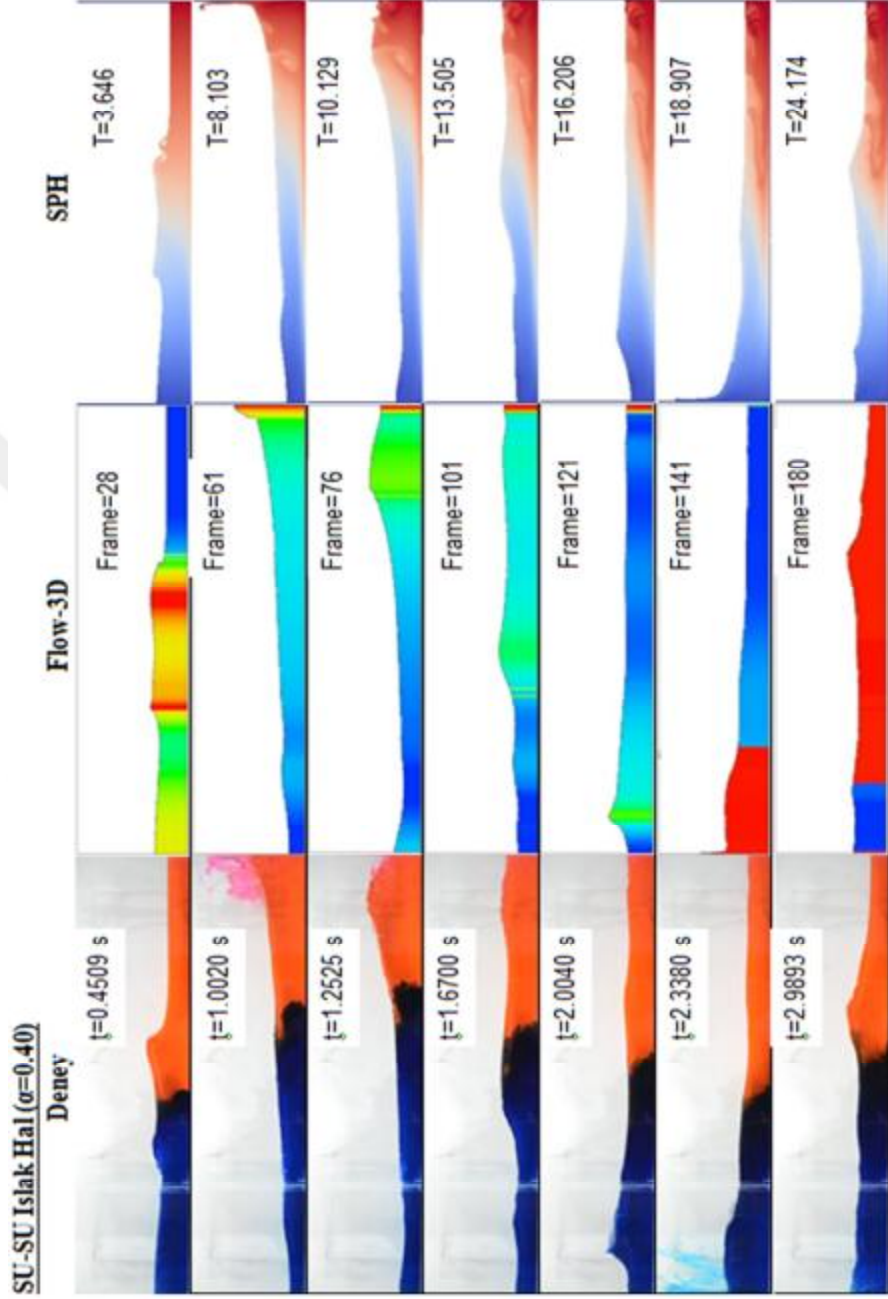
Şekil 4.75'te görüleceği üzere Su-Su 0.40 derinlik oranında deney ve modellemelerin her birinin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılması bulunmaktadır. Membayı mansaptan barajı temsil eden kapak yapısı ile ayıran bu deney çalışmasında rezervuardaki suyun yüksekliği diğer deneylerdeki ile aynı olmasına rağmen mansapta daha fazla bir su kütlesi mevcuttur.

Doğal olarak kapağın ani hareketi ile membadaki su kapak altından hızlıca ilerleyerek mansaptaki durgun suyu itirmeye çalışmaktadır. Derinlik oranının fazla olması ciddi bir engel oluşturmakta $t=0.1837$ s'de dalga önü çift başlı dalga görünümünü almaktadır. $t=0.2338$ s itibariyle birbirine simetrik iki farklı renkli dalga yapısı hakim olmaktadır.

$t=0.4509$ s ile birlikte rezervuardan hareketlenen dalga mansaptaki suyu sürüklemeye başlatmakta ve mansaptaki akışkan kütlesinde çalkantı hareketine sebebiyet vererek dalga önü kısmını yukarı doğru tırmandırmaktadır. Dalga o hızla kanal sonunda duvara çarpma etkisi ile kabarma dalgası oluşturmakta, ters yöne yani membaya doğru yayılımını sürdürmektedir. Bu sefer yıkılma safhasındaki şartlar değişerek yansıyan dalga membadaki akışkan kütlesini itmekte ve ikinci bir kabarma dalgası oluşturmaktadır. Kanal başlangıcındaki duvara çarpıp doğrultusunu değiştirdikten sonra hareketine devam etmektedir.

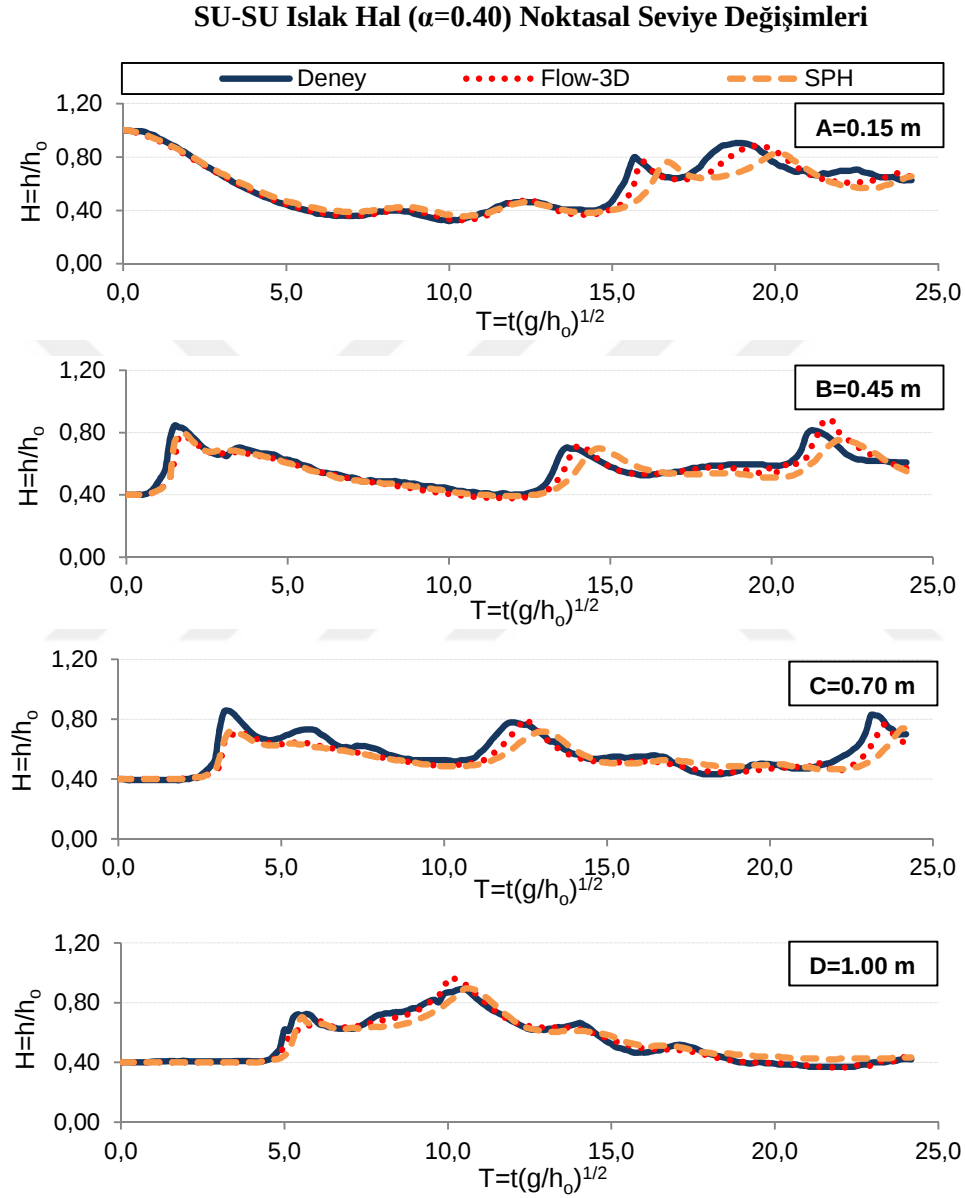


Şekil 4.75a. Su-Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



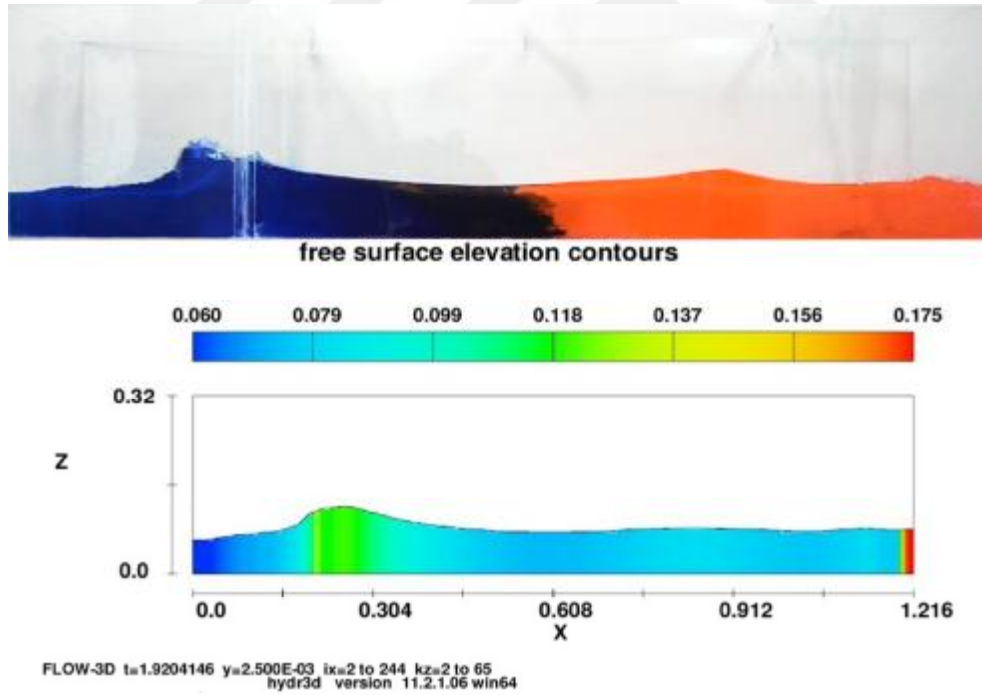
Şekil 4.75b. Su-Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler
($t=0.4509$ - 2.9893 s)

Şekil 4.76’da ise Su-Su 0.40 derinlik oranı için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri verilmektedir.

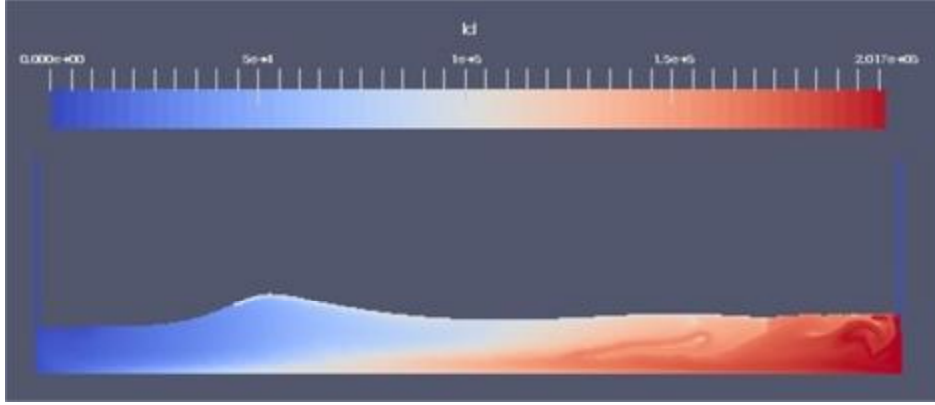


Şekil 4.76. Su-Su $\alpha=0.40$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Yukarıdaki sonuçlar modellemelerin oldukça iyi bir yaklaşıklıkla çözüm ürettiğini göstermektedir. Dikkat edilirse derinlik oranı arttıkça eğrilerde önemli ölçüde iyileşme gözlenmektedir. A=0.15 m noktası için T=15-25 arası eğriler birbirinden farklılaşmakta bunda da türbülans ve enerji kayıplarının etkisinin olduğu düşünülmektedir. B=0.45 m noktasında yıkılma başlangıcında su seviyesi birden artmakta devamında düşüşe geçerek, bir süre sonra neredeyse yatay konumda hizalanmaktadır. Burada H=0.40 civarı olup, C=0.70 m ve D=1.00 m noktalarında daha geç sıçramalar oluşmakta, fakat dalganın belirli hızlarla ilerlemesi daha yüksek seviyelerde görülmektedir. Örneğin D noktası için H=0.80 değerini aşmaktadır. B ve C noktalarında T=25 civarlarında ikinci bir yükseliş söz konusu olurken, D noktasında yatay konuma ulaşmaktadır. Şekil 4.77’de A noktası için deney ve simülasyon farklılıklarına ait örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 4.77a. Su-Su $\alpha=0.40$ ıslak durum A=0.15 m görüntü farklılıkları-I

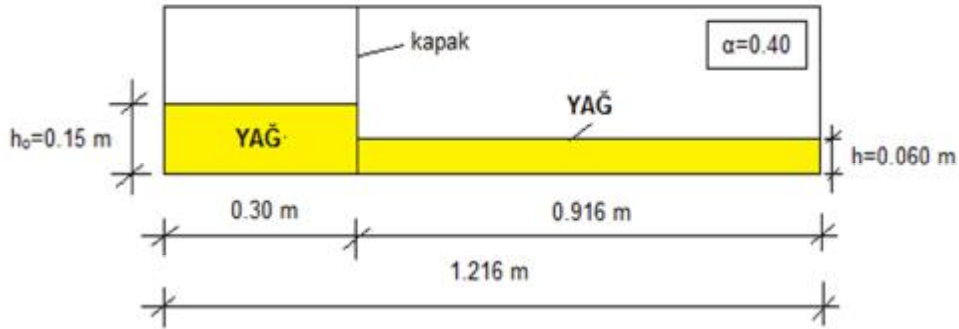


Şekil 4.77b. Su-Su $\alpha=0.40$ ıslak durum $A=0.15$ m görüntü farklılıkları-II

4.2.4.2. Yağ-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m, mansapta ise 0.060 m yüksekliğinde yağ bulunmaktadır.

Şekil 4.78’de Yağ-Yağ ($\alpha=0.40$) durumunun şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.78. Yağ-Yağ ıslak durum ($\alpha=0.40$) şematik gösterimi

Şekil 4.79’da deney başlangıç anı görülmekte olup, kapağın aniden kaldırılması ile membadaki yağ kütlesi ile mansaptaki yağ karşılaşmakta ve derinlik oranı 0.40 olduğu için de 0.10 ve 0.20’ye göre rezervuardaki akışkanın daha büyük bir direnç ile karşılaşması muhtemeldir.

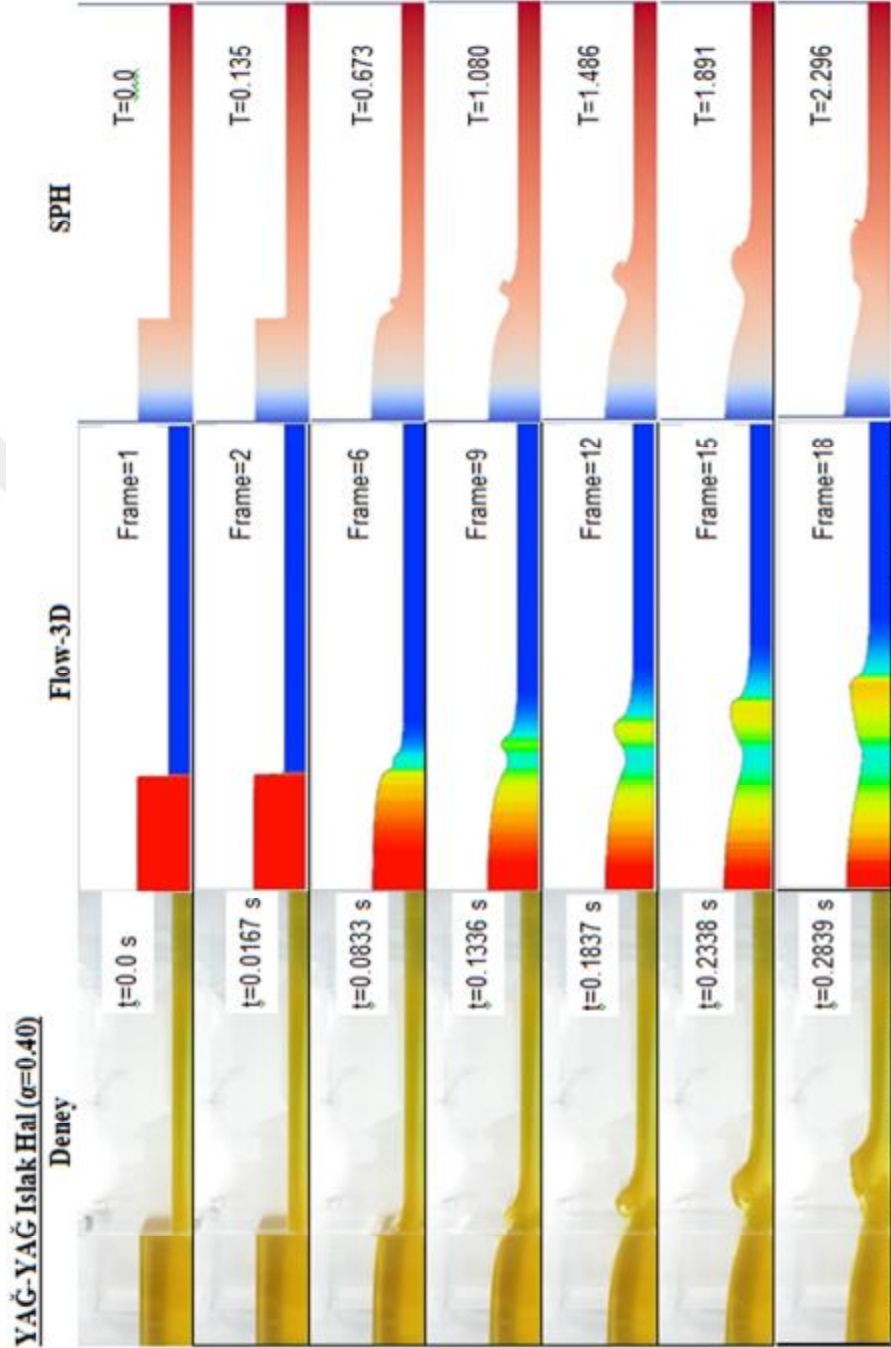


Şekil 4.79. Yağ-Yağ ıslak durum ($\alpha=0.40$) deney başlangıcı ($t=0$)

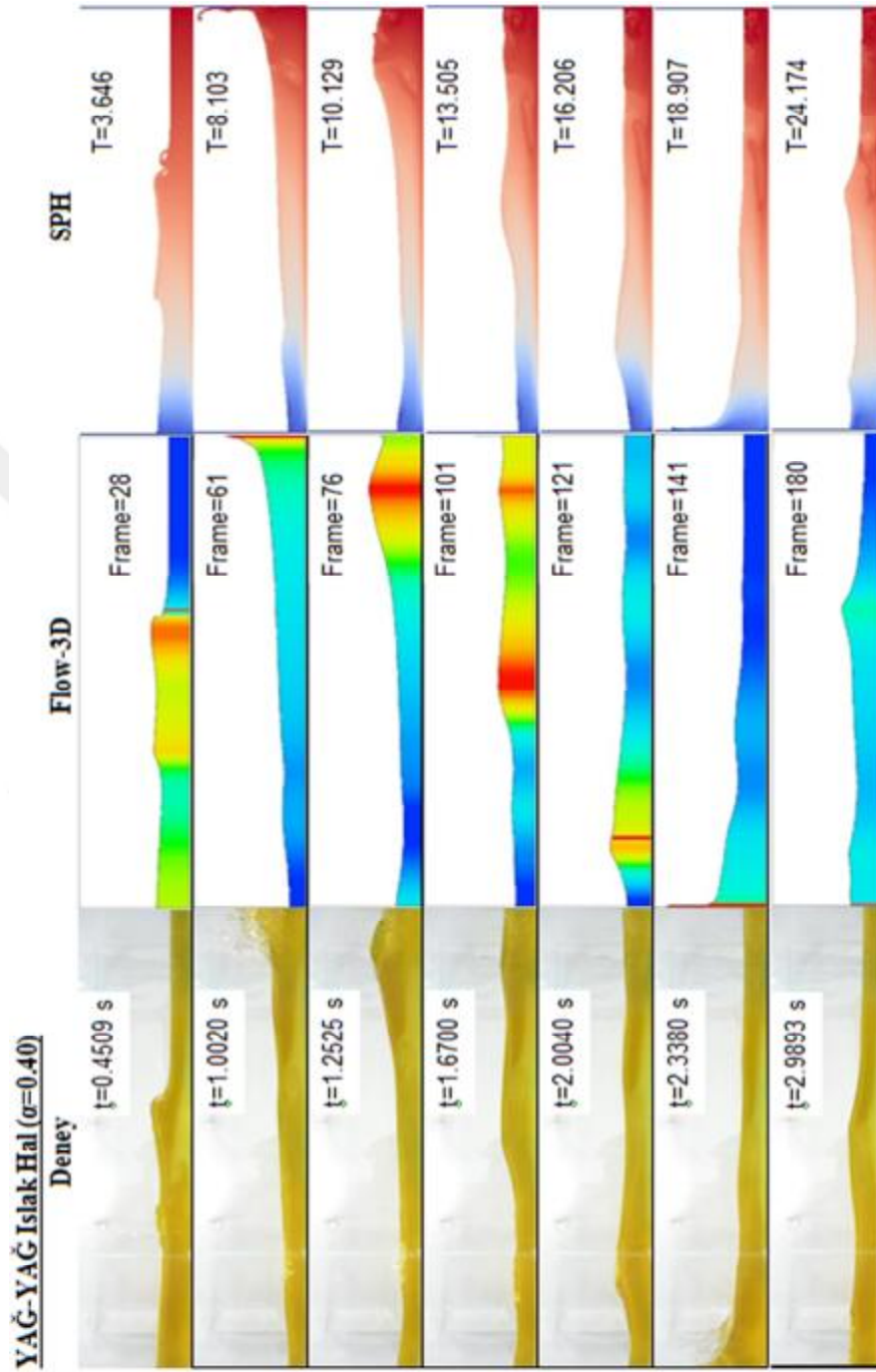
Şekil 4.80'e bakılırsa Yağ-Yağ 0.40 derinlik oranı için deney ve modellemelerin her birinin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılması bulunmaktadır. Yıkılma ile birlikte $t=0.0833$ s'de oluşan ani değişim taşkın şok dalgasında düzensizlikleri beraberinde getirmekte ve türbülans oluşumu gözlenerek kompleks akım özellikleri baskın hale gelmektedir.

$t=0.1837$ s'de genliği ve dalga boyu sudaki deneylere göre daha küçük olan bir kabarma dalgası gözlenmektedir. Derinlik oranının yüksek olması dalga önü ucunun membaya doğru döndüğü izlenmektedir. Aslında bir nevi dönme hareketi meydana gelmektedir. Bu kabarma dalga arkasında akışkan seviyesini azaltmaktadır. Dalga ucunda diğer akışkanlara nazaran daha az bir hava girişim bölgesi tespit edilebilmektedir.

$t=0.2839$ s'de kabarma dalgası daha da dikleşerek maksimum yüksekliğe erişmektedir. $t=0.4509$ s'de ise dalga önünün boyu azalmakta ve bir miktar gerisinde küçük bir dalga kabarması gözlenmektedir. Kanalın mansap ucuna çarpması ile yağ yüzeyde tutunmakta çok az türbülans ve köpük oluşumu sonucunda doğrultu değiştirerek memba yönünde hareketini sürdürme eğilimindedir. Çok kısa bir süre içerisinde tekrar bir kabarma dalgası izlenmekte, çabuk sönümlenmesi ile de yayılımına devam etmektedir. $t=2.0040$ s'de memba tarafındaki kanal ucuna yönelim devam etmekte çarpma bu noktada tırmanmayı daha çok arttırmaktadır. Yağ deneylerinde genelde en büyük sorun kapağın aniden kalkması ile yağ taneciklerinin kapaktan kanala dökülmesidir.

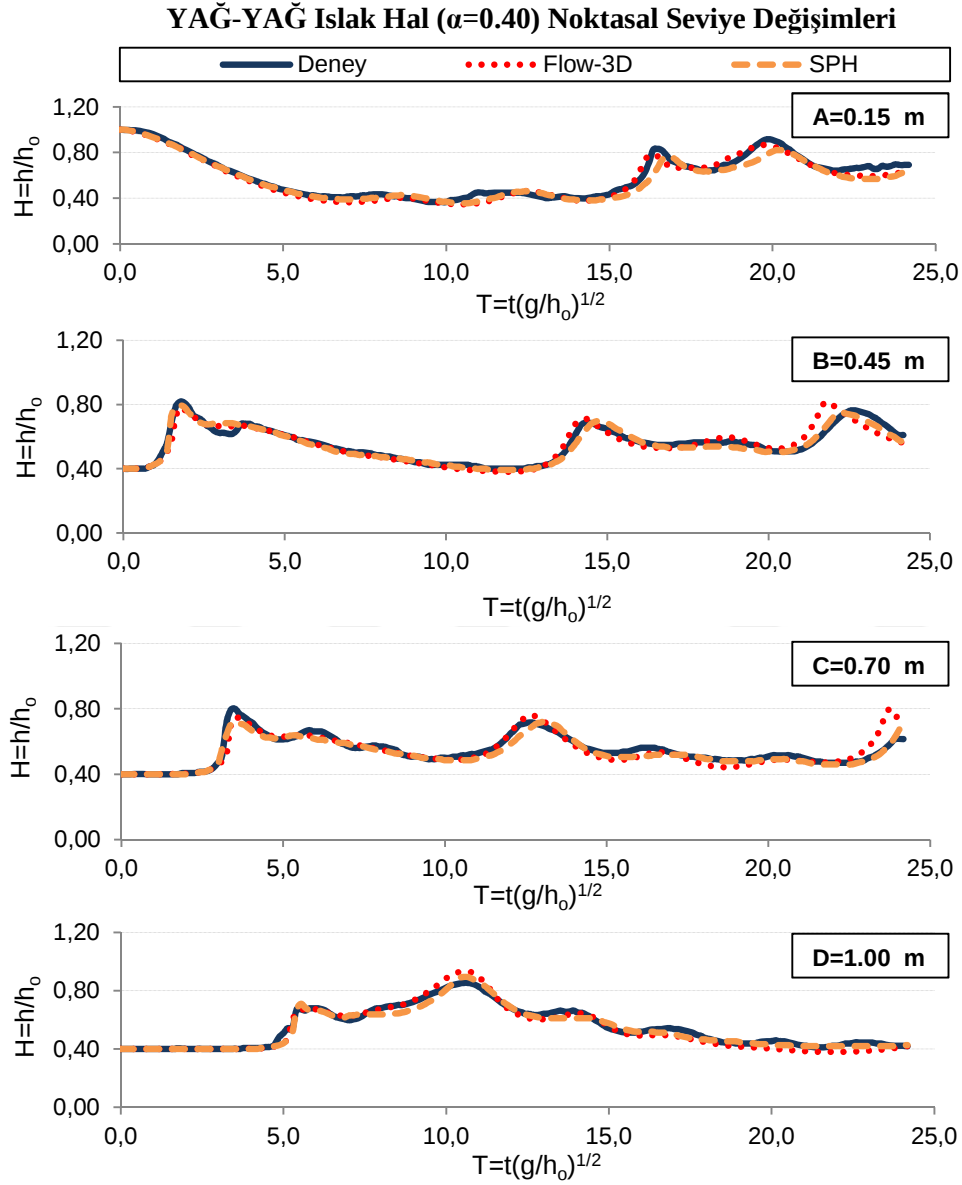


Şekil 4.80a. Yağ-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



Şekil 4.80b. Yağ-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509$ - 2.9893 s)

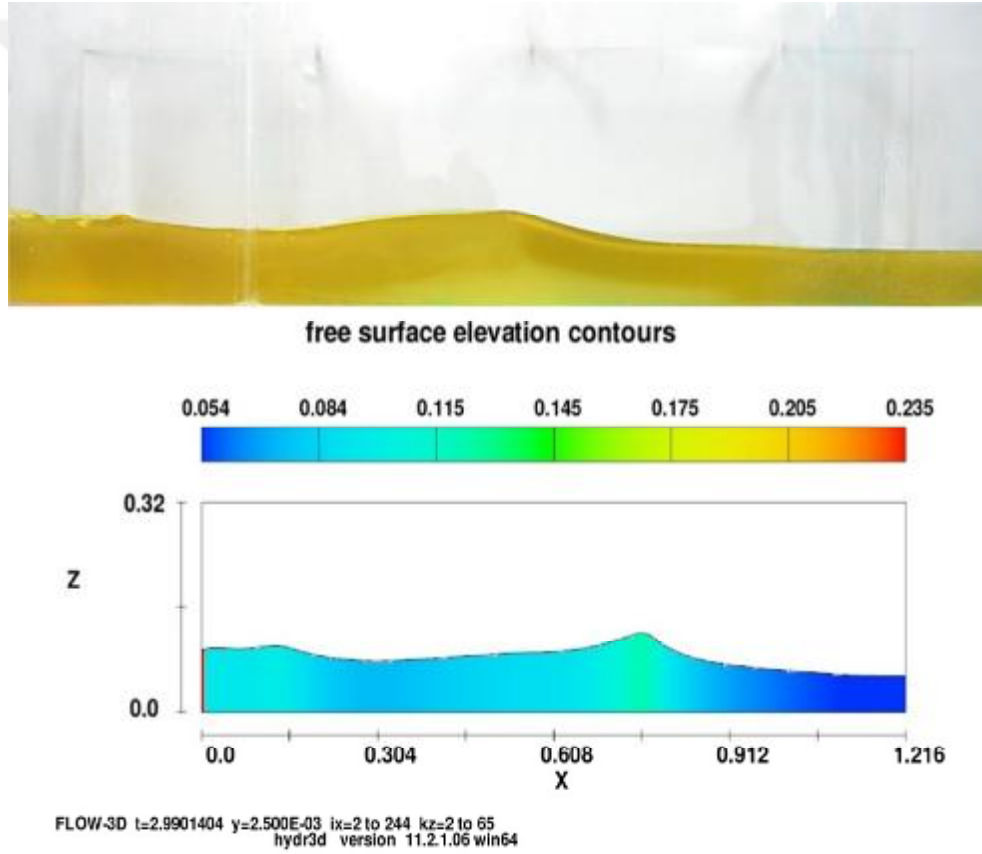
Şekil 4.81’de ise Yağ-Yağ 0.40 derinlik oranı için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri verilmiştir.



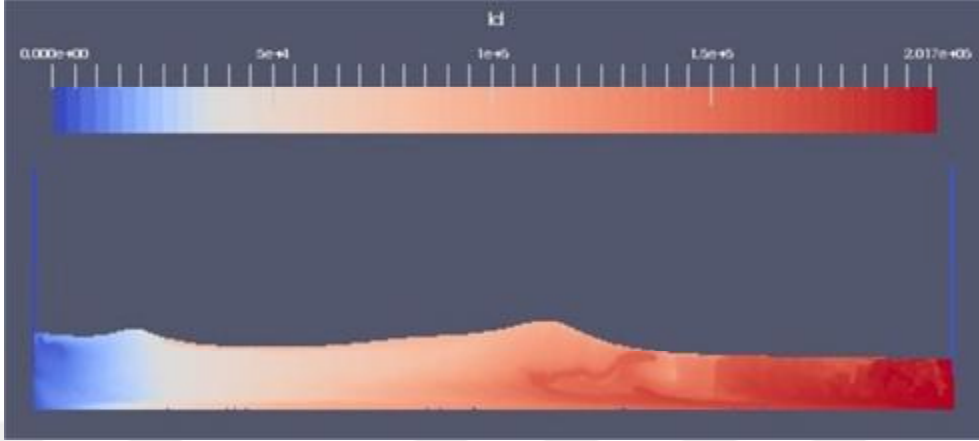
Şekil 4.81. Yağ-Yağ $\alpha=0.40$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Grafikler dikkatlice incelendiğinde tüm noktalarda oldukça iyi bir uyum gözlenmektedir. Yalnızca $T=20-25$ arasında B ve C noktaları için ufak farklılıklar mevcuttur. SPH datalarının deney sonuçlarına yakınsama konusundaki başarısı göze çarpmaktadır. Yağ deneyleri için en iyi sonuçların bu derinlik oranında elde edildiği aşikardır.

Şekil 4.82’de $C=0.70$ m noktası $T=24$ dolayları için deney ve simülasyon farklılıklarına ait örnek bir görüntü verilmiştir.



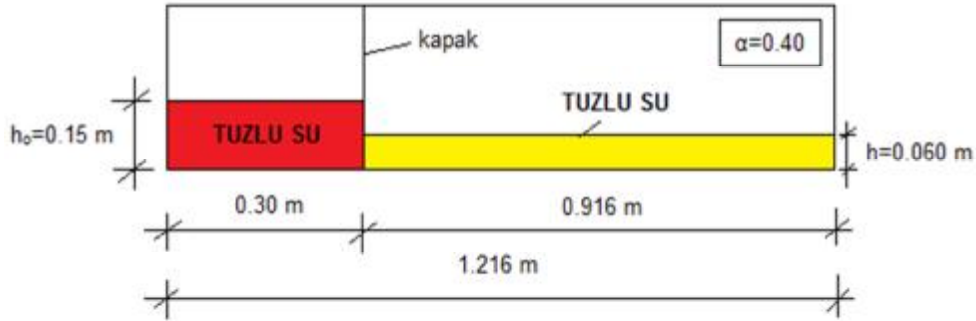
Şekil 4.82a. Yağ-Yağ $\alpha=0.40$ ıslak durum $C=0.70$ m görüntü farklılıkları-I



Şekil 4.82b. Yağ-Yağ $\alpha=0.40$ ıslak durum $C=0.70$ m görüntü farklılıkları-II

4.2.4.3. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.40$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m, mansapta ise 0.060 m yüksekliğinde tuzlu su bulunmaktadır. Şekil 4.83'te Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.40$) durumunun şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.83. Tuzlu Su-Tuzlu Su ıslak durum ($\alpha=0.40$) şematik gösterimi

Derinlik oranı 0.40 olan deneylerin sonuncusu tuzlu su olanıdır. Şekil 4.84'te bu deneyin $t=0$ anındaki durumu gösterilmektedir.



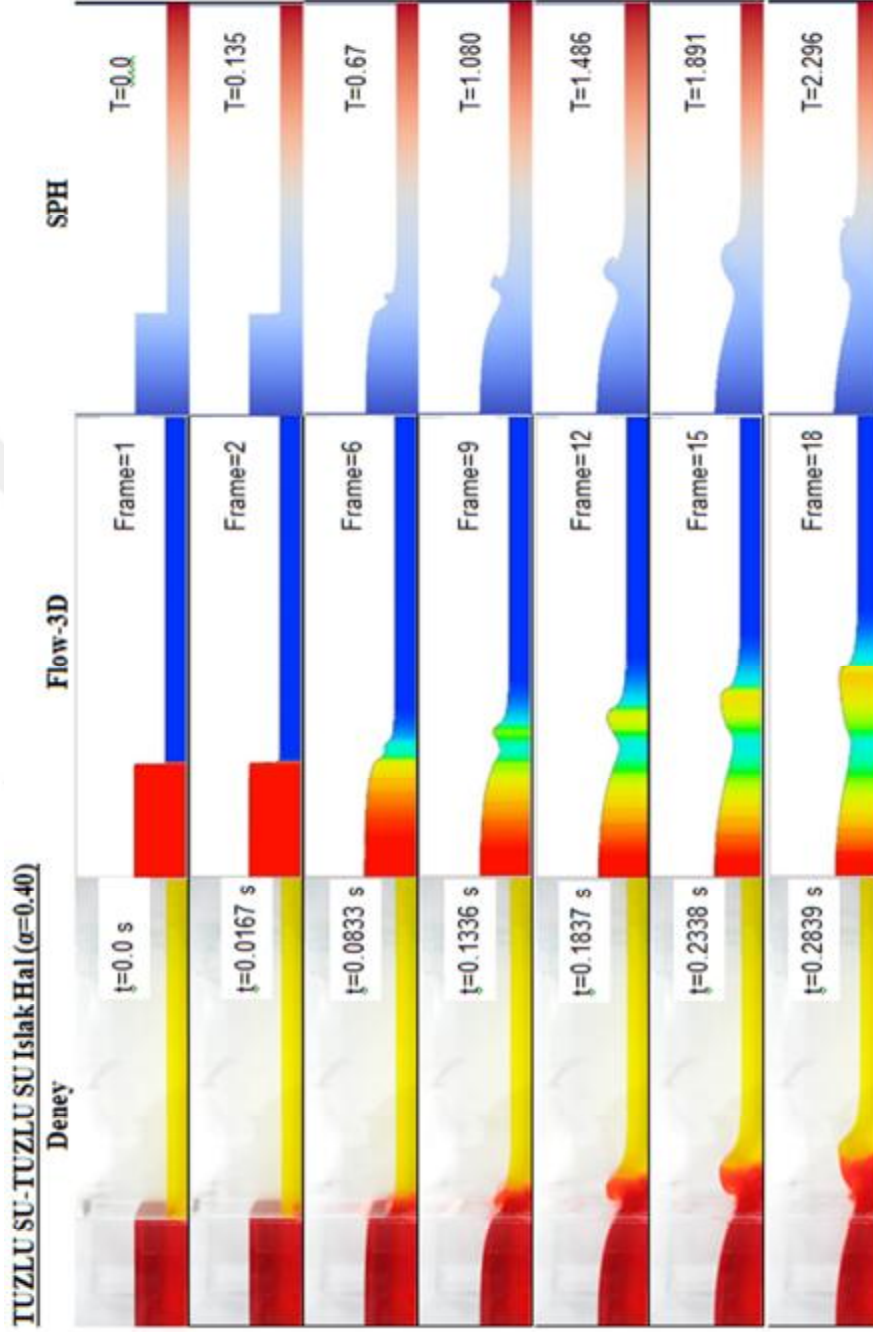
Şekil 4.84. Tuzlu Su-Tuzlu Su ıslak durum ($\alpha=0.40$) deney başlangıcı ($t=0$)

Şekil 4.85'te deney ve modellemelerin her birinin baraj yıkılması sonrası anlık görünümünün karşılaştırılmasına bakılırsa aynı derinlik oranında Su-Su sonuçlarına yakın görüntüler olduğu gözlenmektedir. Yıkılmanın başlaması ile birlikte mambadaki tuzlu su kapak altından harekete geçerek mansaptaki aynı türdeki akışkanı sürüklemeye çalışmaktadır. Derinlik oranının yüksek olması ve nispeten diğer akışkanlara göre yoğunluğun fazla olması ile ciddi bir engel söz konusu olmaya başlamakta, kabarma dalgası ucu memba yönünde uzanmaktadır. Kabarma dalgasına hava girişi çok az gözlenmekte yoğunluğun etkisi ile kırılma dalga genliği çok artmadan gerçekleşmektedir.

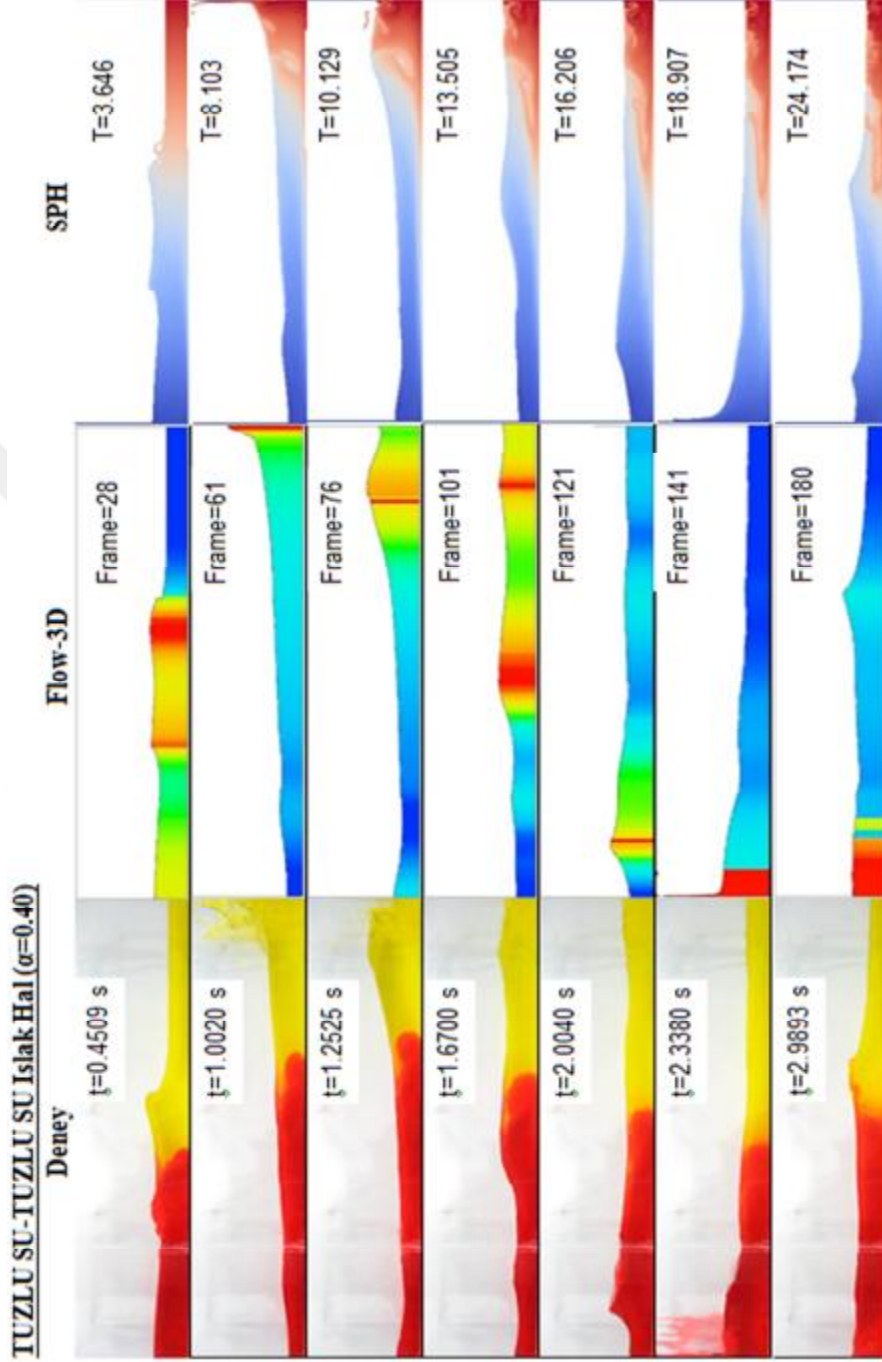
$t=0.2338$ s anında taşkın şok dalgası ile mansaptaki akışkan kütlelerinin oluşturduğu görünüm neredeyse simetrik bir hal almaktadır. $t=0.2839$ s'de ise direnç kırılmakta dalga mansaba doğru harekete başlamaktadır.

$t=0.4509$ s ile birlikte dalga önü kabarmakta ve arkasında çok küçük bir kabarma ile ilerlemektedir. Kanal sonunda çarpmanın etkisi ile yüzeyde tutunma ve tırmanma oluşarak ters yönünde dalga kabarak membaya doğru uzanmaktadır. Bu kez memba yönünde dalga etkin olmakta, memba tarafındaki kanal ucuna çarpma gerçekleşmeden daha dik bir konuma erişmektedir.

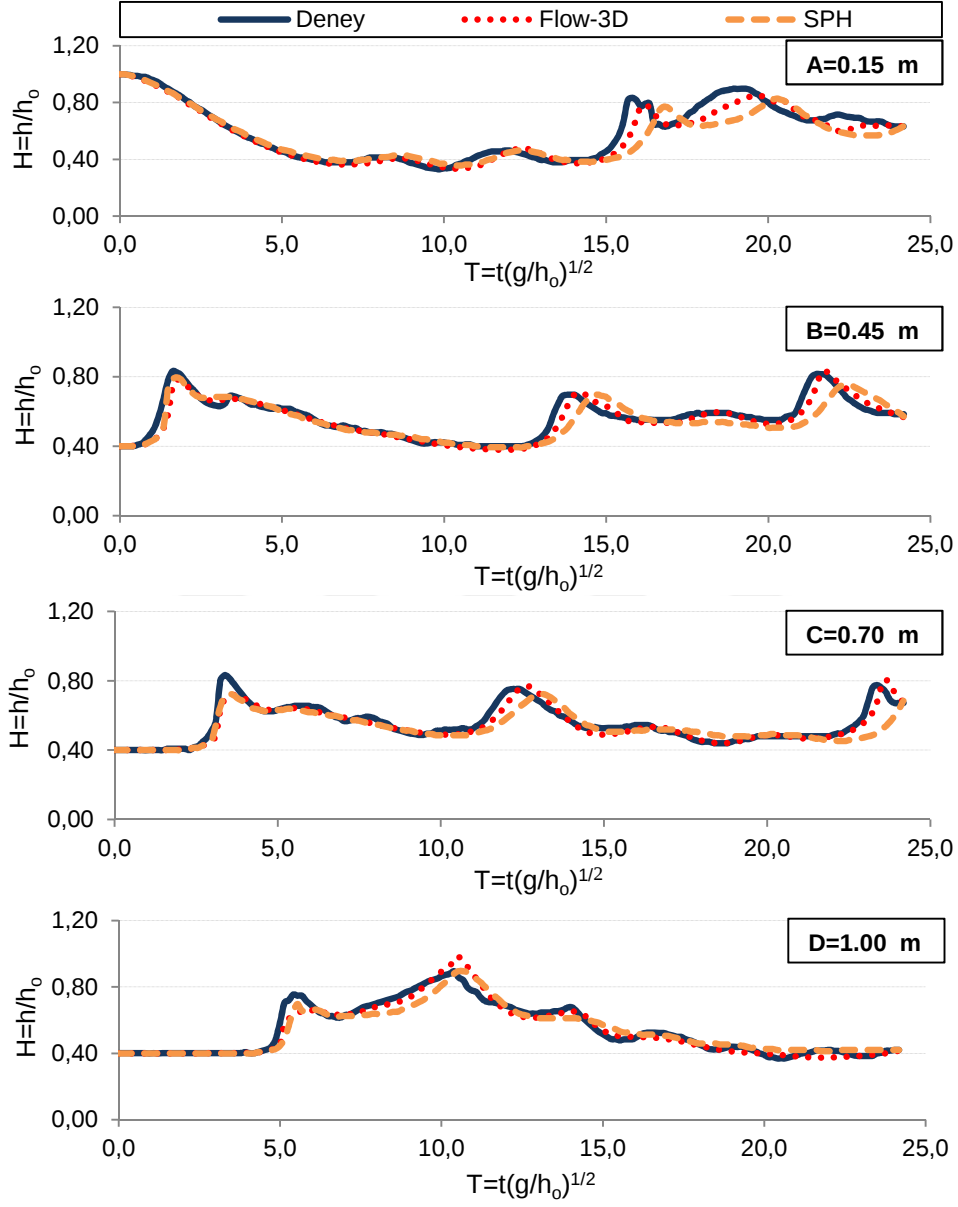
Şekil 4.86'da ise Tuzlu Su-Tuzlu Su 0.40 derinlik oranı için A,B,C ve D noktalarındaki seviye değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.85a. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.0-0.2839$ s)



Şekil 4.85b. Tuzlu Su-Tuzlu Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler ($t=0.4509$ - 2.9893 s)

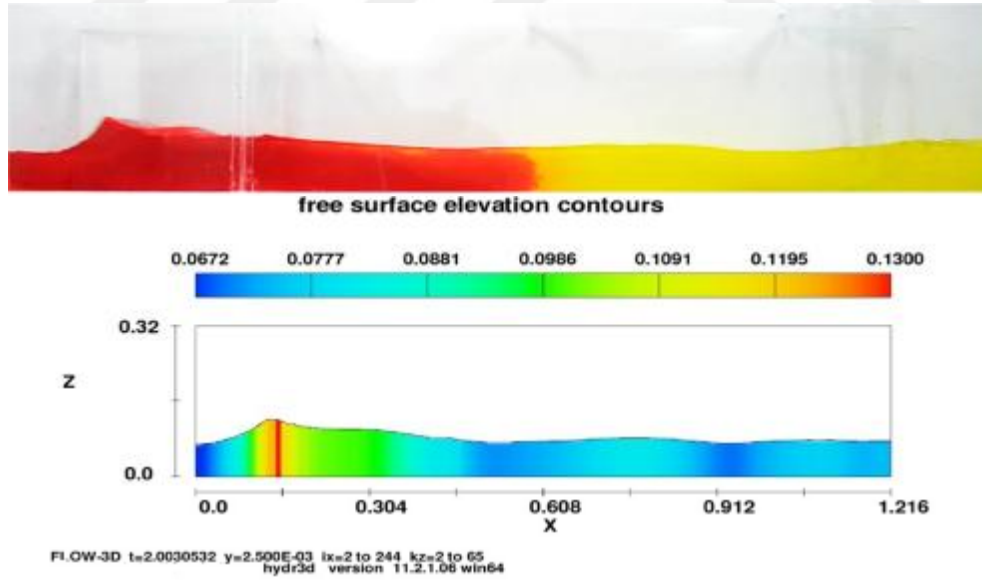
TUZLU SU-TUZLU SU Islak Hal ($\alpha=0.40$) Noktasal Seviye Değişimleri

Şekil 4.86. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.40$ ıslak durum A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

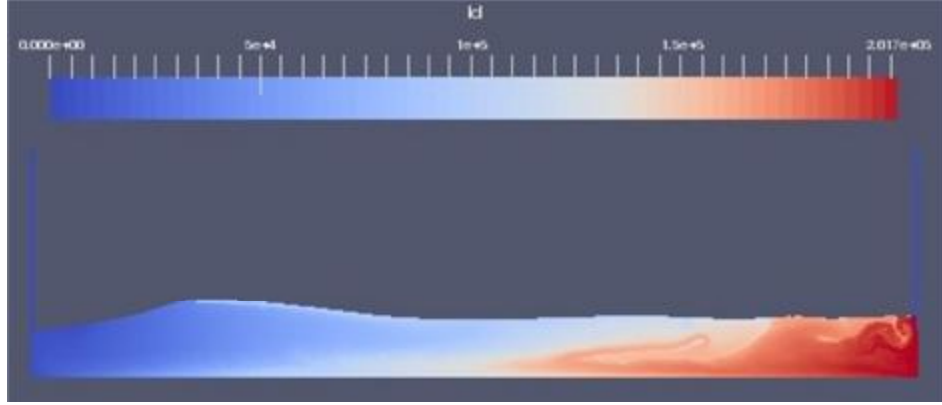
Eğriler incelendiğinde genelde büyük oranda yaklaşıklık söz konusu olup, $A=0.15$ m noktası için tuzlu su seviyelerinin alçalıp yükseldiği anlarda farklılıklar oluşmaktadır. Bu farklılıklar $B=0.45$ m noktasında $T=14$ ve $T=22$; $C=0.70$ m noktasında $T=13$ ve $T=24$; $D=1.00$ m noktasında $T=10$ değerlerinde gerçekleşmiştir.

Grafiklerde yıkılma ile birlikte akışkan seviyesinin değişimi B noktasında başlangıçta yükselme olarak erken bir zaman aralığında meydana gelmektedir. Azalarak devam etmekte sonrasında $H=0.40$ noktasında tekrar artışa geçmektedir. C noktasında artış daha geç zamanda olmakta, en geç D noktasında tezahür etmektedir. Tekrar sıçrama yapacağı süre ise D noktasında en az olmaktadır. Buradan mansaba yakın noktada derinliğin artmasının daha geç zamanda, daha kısa sürede ve az salınımla gerçekleşiyor sonucunu çıkarmak mümkündür.

Şekil 4.87’de A noktası $T=16$ için deney ve simülasyon farklılıklarına ait örnek görüntüler sunulmuştur.



Şekil 4.87a. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.40$ ıslak durum $A=0.15$ m görüntü farklılıkları-I

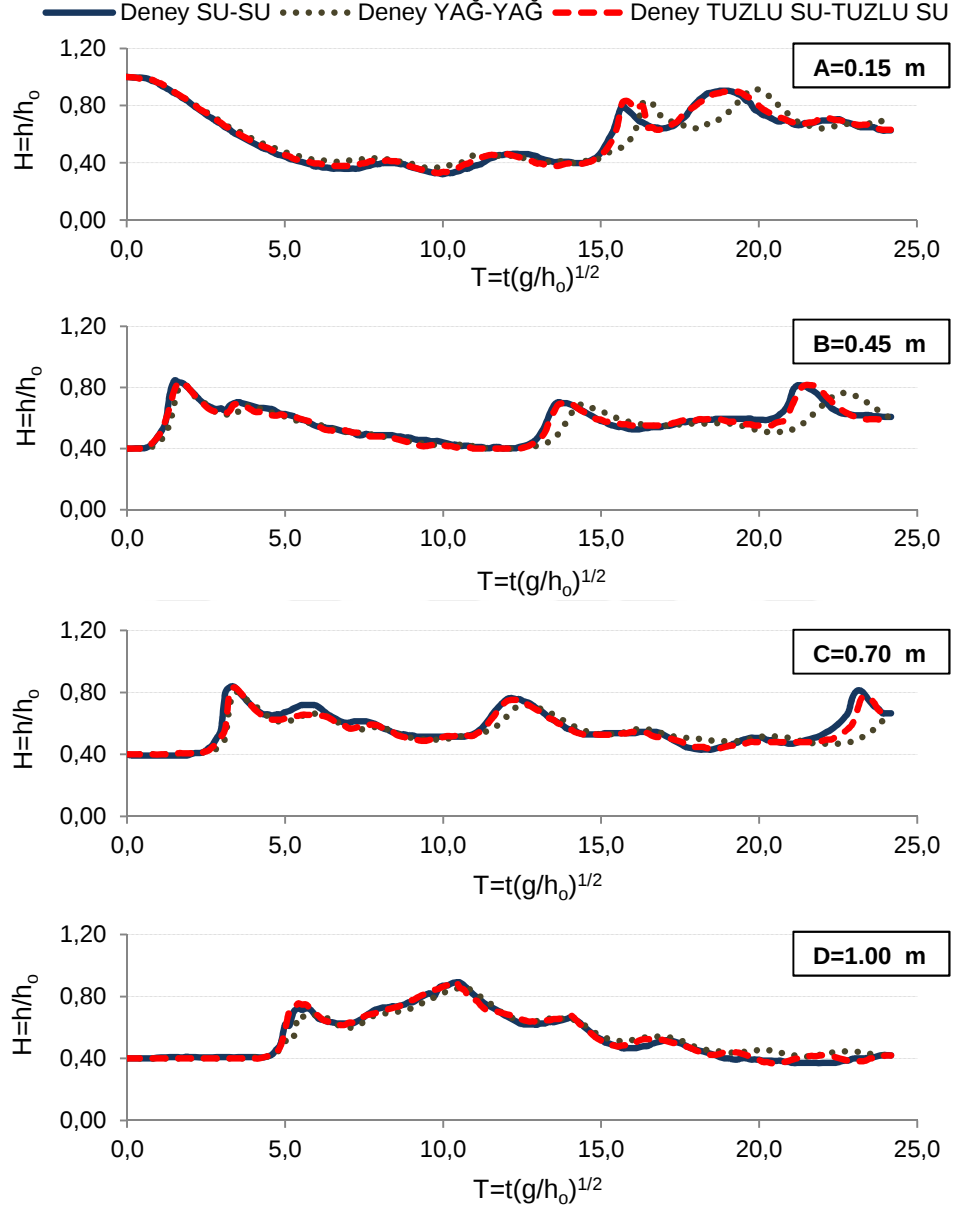


Şekil 4.87b. Tuzlu Su-Tuzlu Su $\alpha=0.40$ ıslak durum $A=0.15$ m görüntü farklılıkları-II

Şekillerden görülebileceği gibi deney görüntülerinde kabarma dalgası önü dik görünümde olup, sadece Flow-3D yazılımında buna benzer görüntü görülebilmektedir. SPH'ta ise daha yayvan bir dalga uç kısmı gözükmemektedir.

Şekil 4.88'de her üç akışkan için 0.40 derinlik oranında deney çalışmaları sonucu elde edilen seviye değişim eğrileri verilmiştir. $T=15$ civarında kullanılan akışkana göre pek fazla değişiklik göstermeyen yayılım dikkat çekmektedir. Çok küçük değişiklikler dışında genelde grafikler birbirleri ile örtüşmektedir. Farklılıklar çoğunlukla $T=15-25$ aralığında gerçekleşmektedir. $A=0.15$ m ve $B=0.45$ m noktalarında eğriler büyük oranda benzeşirken, $C=0.70$ m ve $D=1.00$ m noktalarında neredeyse çakışmaktadır. Buradan hareketle yoğunluktan bağımsız olarak derinlik oranı arttıkça taşkın şok dalgası ilerlemesinin yakın sonuçlar ortaya koyduğu çıkarımı yapılabilir ta ki herhangi bir engel, düzensizlik, süreksizlik,...vb. gibi mansap tabanında değişiklik oluşturacak şeylerle karşılaşana kadar.

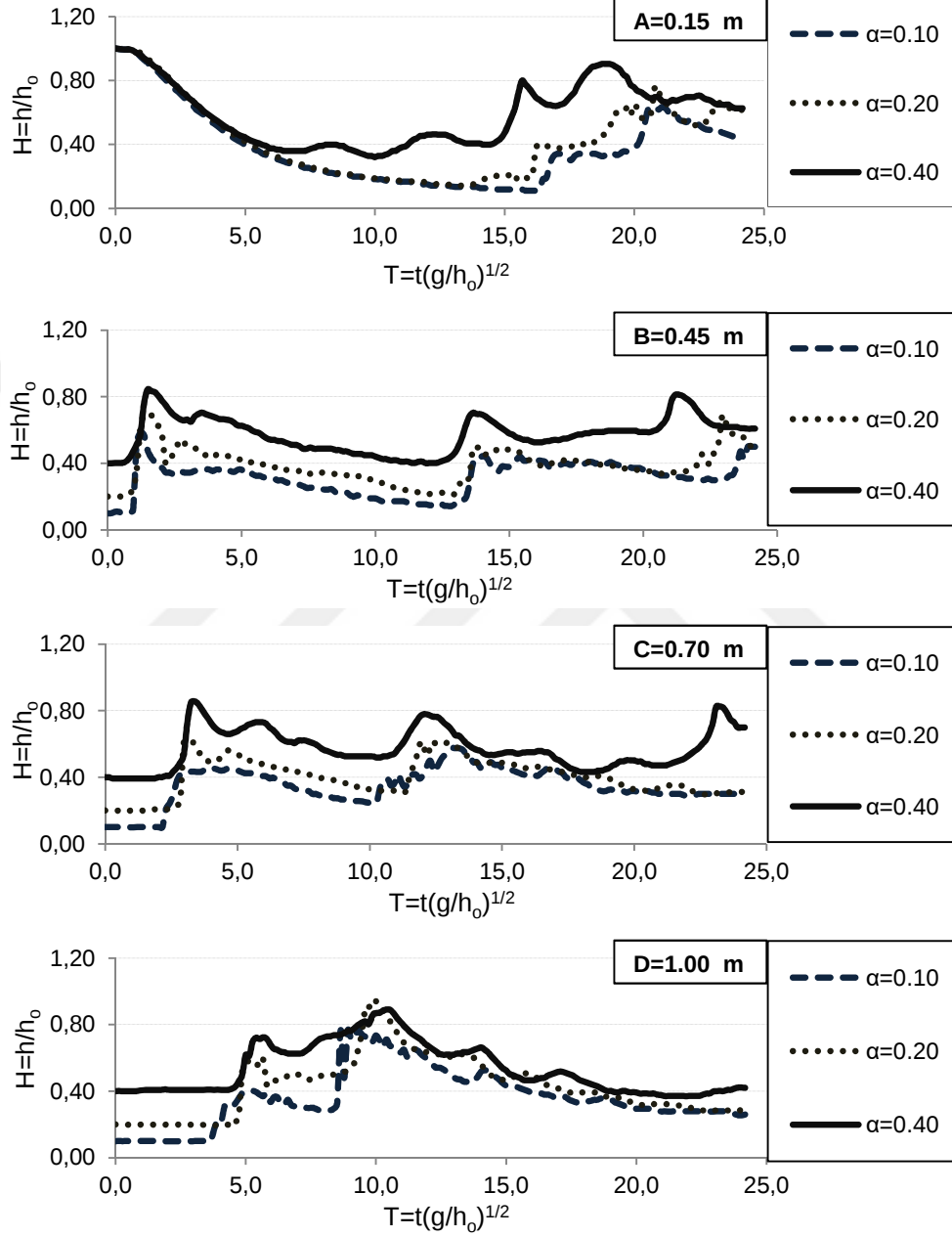
A noktasında $T=15-22$ arasında su ve tuzlu su benzer akım davranışı sergilerken yağın alçalma ve yükselme eğrileri ilerlemenin daha geç olduğunu göstermektedir. Diğer noktalarda da aynı durumlar söz konusudur.

Deney Islak Hal Durumu ($\alpha=0.40$)Şekil 4.88. $\alpha=0.40$ için A,B,C ve D noktalarındaki akışkan derinlik değişimi

Sonuç olarak karışabilen akışkanların ıslak ve kuru halleri değerlendirildiğinde; tüm yöntemlerde de görülebileceği gibi barajı simgeleyen kapak yapısının aniden kalkmaya başlaması ile birlikte yerçekimi etkin olmakta ve akışkan kapak altından mansaba doğru ilerlemeye çalışmaktadır. Mansap yönünde ilerleyen dalga ile memba yönünde tam tersi dalga oluşumu meydana gelmektedir. Deney sonuçlarında yıkılmanın ilk anlarında akışkan yüzey profilleri parabolik iken modellemelerde genellikle tümsekli bir görünüm hakimdir. Fakat ilerleyen zamanlarda deneyde de tümsek görünüm belirmektedir. Bunun sebebini düşük de olsa yüzey pürüzlülüğü olarak ifade etmek mümkündür. Bu pürüzlülük durumu dalga önünün hızını kesip yavaşlatmakta ve dalga önünde kabarma oluşmasına sebebiyet vermektedir. Kanalda yayılım devam ettikçe sürtünme artmakta hız azalarak akışkan seviyesi yükselmektedir.

Anlık görüntülerden de anlaşılacağı üzere yıkılma başlangıcında hidrostatik olmayan basınç dağılımı söz konusudur. Bu da baraja yakın noktalar civarında akımda türbülans yaratacak dönme hareketinin olduğunu açıklamaktadır. Genelde eğrilere alçalma ve yükselmenin keskin geçişler şeklinde olduğu izlenmektedir. Bu bağlamda akışkan seviyelerindeki azalma ve artmaların rezervuarın uzunluğu ile ilişkisi incelenmesi gereken noktalardandır. Bu çalışmada rezervuar uzunluğu sabit 0.30 m alındığı için değişkenliğin oluşturacağı etki irdelenmemiştir. İleride bu konuda çalışmaların yapılması taşkın şok dalgası yayılımında rezervuar uzunluğu ile derinlik ve diğer parametrelerin etkilerini açıkça ortaya koyabilecektir.

Mansabın uzak noktalarında akışkan derinliklerinin salınımlar yapması daha kısa ama daha geç zamanda gerçekleşmektedir. Mansapta düzensizlik ve değişim oluşturacak engel, kesit değişimi,...vb. gibi durumlar yoksa genelde maksimum derinlikler belirli değerlerde seyretmektedir. Şekil 4.89’da suyun farklı derinlik oranlarında A, B, C ve D noktalarındaki derinlik değişim grafikleri verilmiştir.

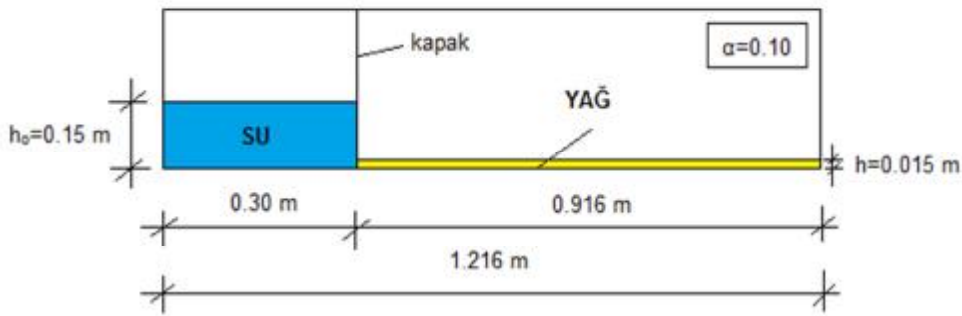
Deney SU-SU Islak Hal Farklı Derinlik Oranları (α) Noktasal Seviye Değişimi

Şekil 4.89. Farklı derinlik oranlarında suyun A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

4.2.4. Karışmayan Akışkan ($\alpha=0.10$) Sonuçları

4.2.4.1. Su-Yağ ($\alpha=0.10$) Akışkan Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m su, mansapta ise 0.015 m yüksekliğinde yağ bulunmaktadır. Derinlik oranı 0.10'dur. Şekil 4.90'da Su-Yağ ($\alpha=0.10$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.91'de ise deney başlangıç anı görülebilmektedir.

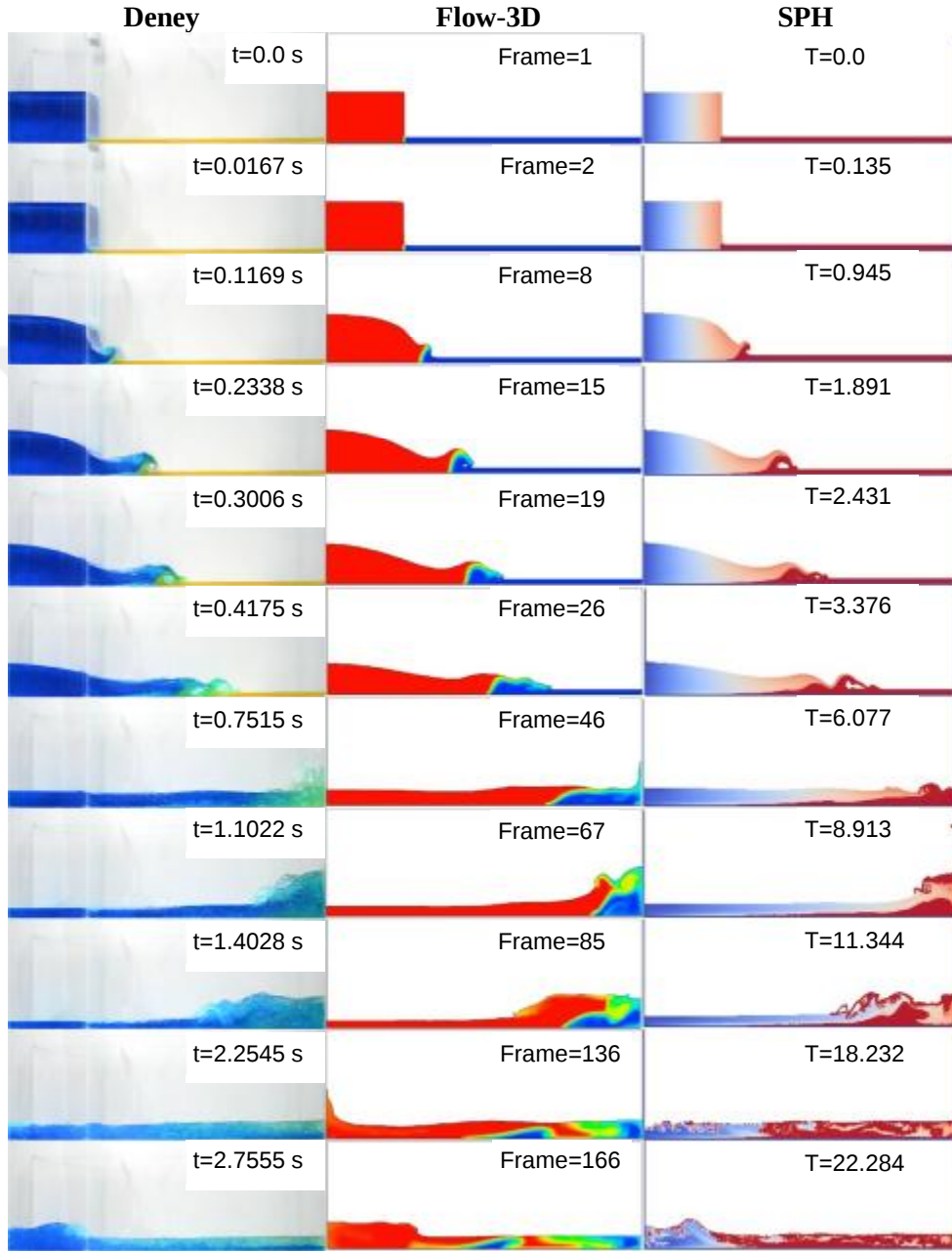


Şekil 4.90. Su-Yağ ($\alpha=0.10$) deney şematik gösterimi

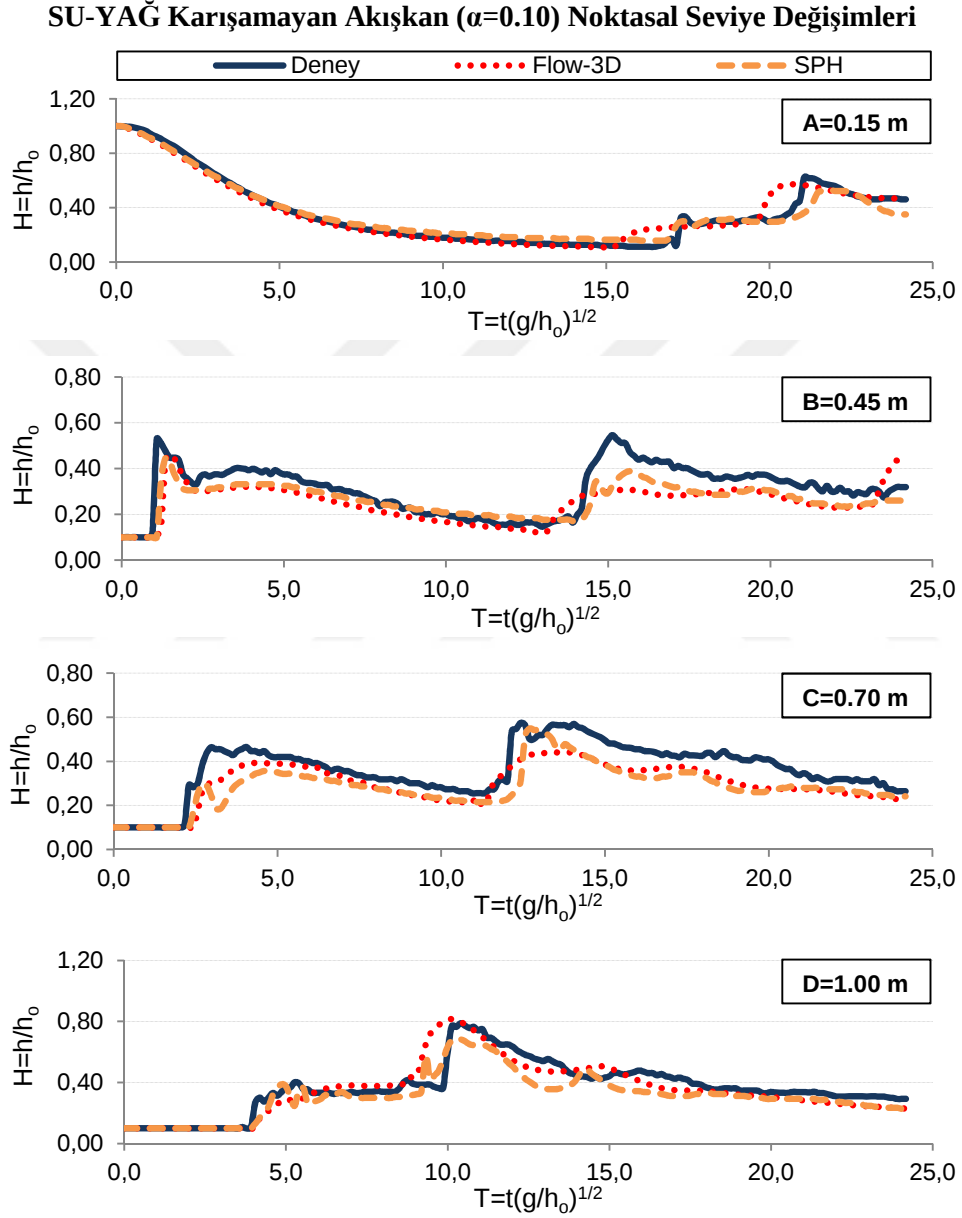


Şekil 4.91. Su-Yağ ($\alpha=0.10$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Kapağın kaldırılması ile membadaki su kapak altından hareketine başlamakta ve mansaptaki farklı yani suya göre daha düşük yoğunluktaki yağ ile karşılaşmaktadır. Şekil 4.92'de de görülebileceği gibi su yağı mansap doğrultusunda sürüklemeye çalışmakta ve mansap sonundaki duvara itmeye çabalamaktadır. Duvara çarpma etkisi ile kabarma dalgası oluşmakta ve yoğunluk etkisi ile yağ suyun üzerine çıkmaktadır.

SU-YAĞ Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.10$)Şekil 4.92. Su-Yağ ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler

Şekil 4.93'te 0.10 derinlik oranı için Su-Yağ noktasal seviye değişimi gösterilmektedir.

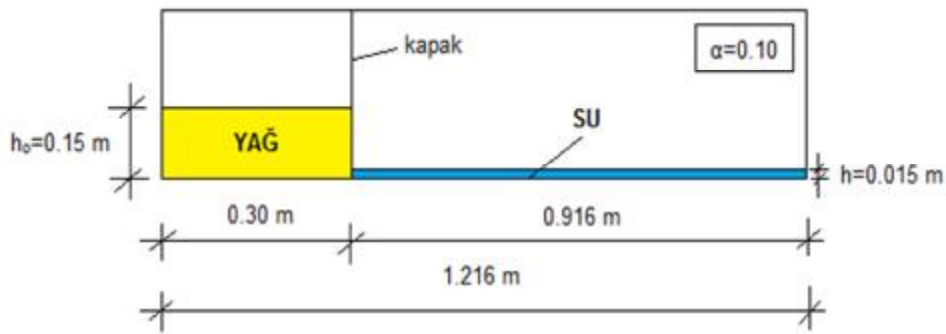


Şekil 4.93. Su-Yağ $\alpha=0.10$ A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Grafiklere bakılırsa tüm yöntemlerde çok iyi bir uyum gözükmemektedir. $A=0.15$ m noktası için $T=20$ dolaylarında Flow-3D sonuçları daha erken yukarı doğru seviye değişimine maruz kalmıştır. SPH bir miktar geride kalmıştır. Bu durumda enerji kaybı ve ağ-parçacık metodoloji farklılıklarının ön planda olduğu düşünülmektedir. $B=0.45$ m noktası için deney sonuçlarında daha fazla derinliklerde akışkan yayılımı gerçekleşmiş, Flow-3D ve SPH sonuçları birbirlerine oldukça iyi bir yakınsama sağlamışlardır. $T=25$ civarında Flow-3D programında ani bir yükseliş dikkat çekmektedir. Bunun nedeninin kanal yüzeyine tutunma konusunda yüzey pürüzlülüğü etkilerinin ihmal edilmiş olması olduğu öngörülmektedir. $C=0.70$ m ve $D=1.00$ m noktalarında genelde birkaç değer haricinde Flow-3D sonuçları diğer yöntemlerin orta çizgisi dolaylarında seyretmektedir.

4.2.4.2. Yağ-Su ($\alpha=0.10$) Akışkan Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m yağ, mansapta ise 0.015 m yüksekliğinde su bulunmaktadır. Derinlik oranı yine 0.10 olup, Şekil 4.94'te Yağ-Su ($\alpha=0.10$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.95'te deneyin başlangıç görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.94. Yağ-Su ($\alpha=0.10$) deney şematik gösterimi

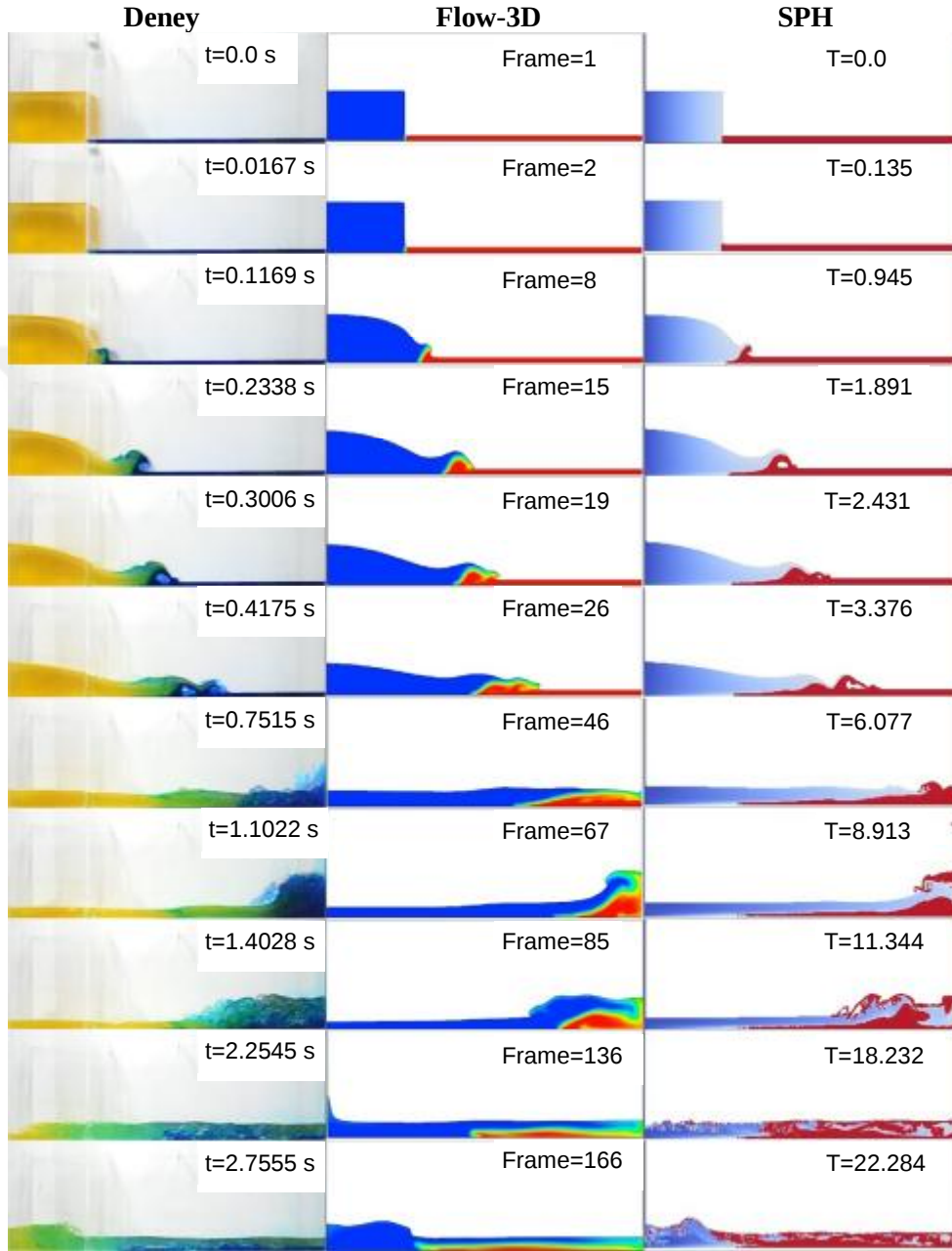


Şekil 4.95. Yağ-Su ($\alpha=0.10$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Kapağın aniden kalkması ile membadaki yağ kapak altından hareketlenmekte ve mansaptaki daha yüksek yoğunluktaki su ile karşılaşmaktadır. Şekil 4.96'da görülebileceği üzere yağ ani düşüşe geçerek suyla neredeyse aynı seviyede bir araya gelerek mansaptaki suyu iteklemeye çalışmaktadır. Su bu noktada yağın derinliğinin artmasına engel olarak bir süre tutmayı başarmaktadır, daha sonra büyük dalga boyu, nispeten de daha küçük genlikli bir kabarma dalgası oluşumu gözlenmektedir. Yayılım devam ederken dalga kırılması gerçekleşmekte, dalga önünde daha küçük bir kabarma dalgası meydana gelmektedir. Küçük kabarma dalgasında hatta hava girişim bölgesi de dikkat çekmektedir. Yağ suyun üzerine çıkmaya çabalamakta ve suyun aşağı doğru hareketi ile birlikte de kanal sonundaki duvarda çarpışma neticesinde türbülans oluşumu görülmekte, duvar kısmına kadar itmeye çabalamaktadır. Duvara çarpma etkisi ile kabarma dalgası oluşmakta ve yoğunluk etkisi ile yağ suyun üzerine çıkmaktadır.

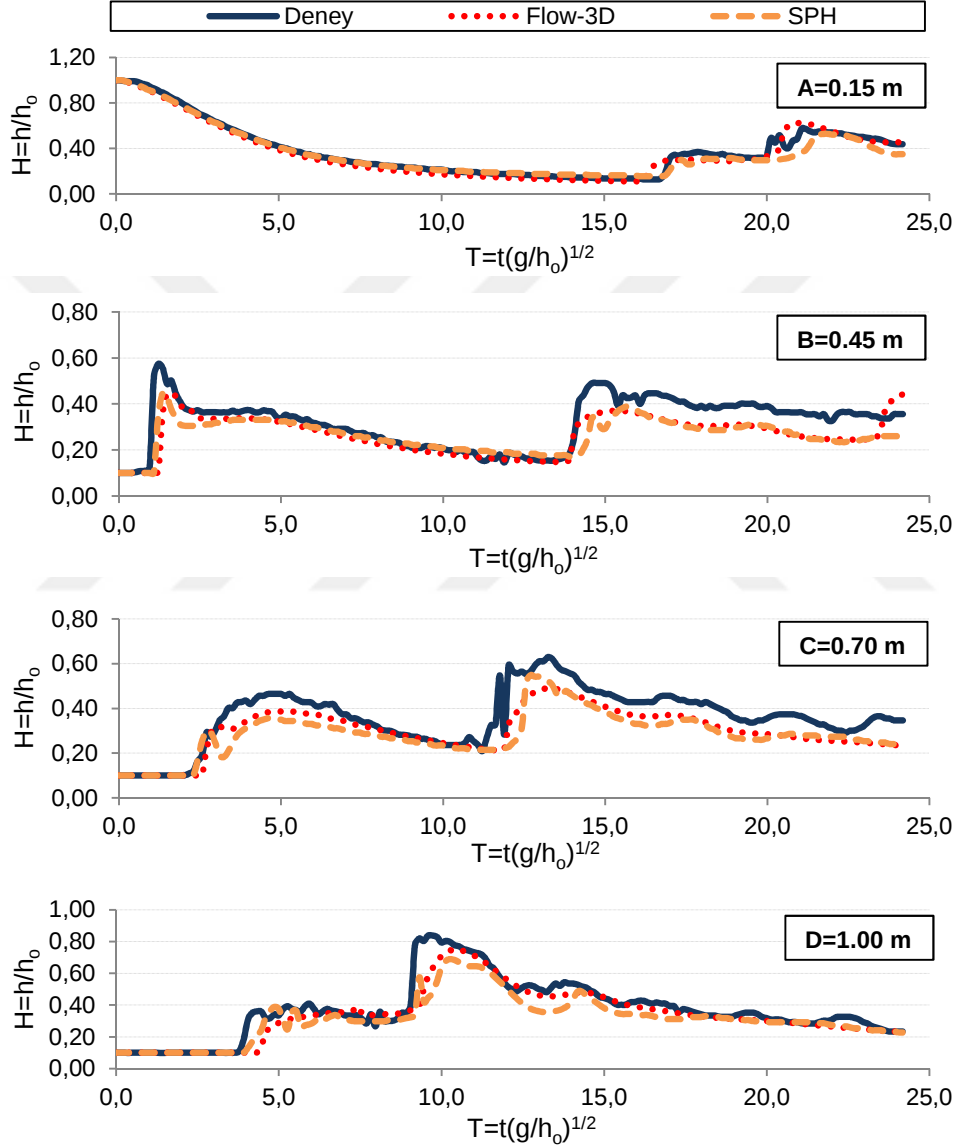
Yansıma sonucu yağ büyük oranda suyun üzerine çıkmış olmakta ve ilerleyen zamanlarda su tamamen kanal tabanına doğru çekilmektedir. Dikkat edilecek önemli bir husus ise membadaki yağın suyla karşılaşması sonrası girişim reaksiyonlarının mansapta gerçekleşiyor ve $t=1.4028$ s anından sonra suyun tüm tabanı kaplayacak şekilde su-yağ ayrışmasının oluşuyor olmasıdır.

Deney ve modelleme sonuçlarını kıyaslırsak akışkan serbest yüzey profilleri açısından tatmin edici bir yakınsama olduğu görülmektedir. Fakat yoğunluk açısından girişim konusunda yaklaşım tabanlı farklılıklar aşıkardır.

YAĞ-SU Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.10$)Şekil 4.96. Yağ-Su ($\alpha=0.10$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler

Şekil 4.97’de derinlik oranı 0.10 için Yağ-Su için A,B,C ve D noktasal seviye değişimi gösterilmektedir.

YAĞ-SU Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.10$) Noktasal Seviye Değişimleri



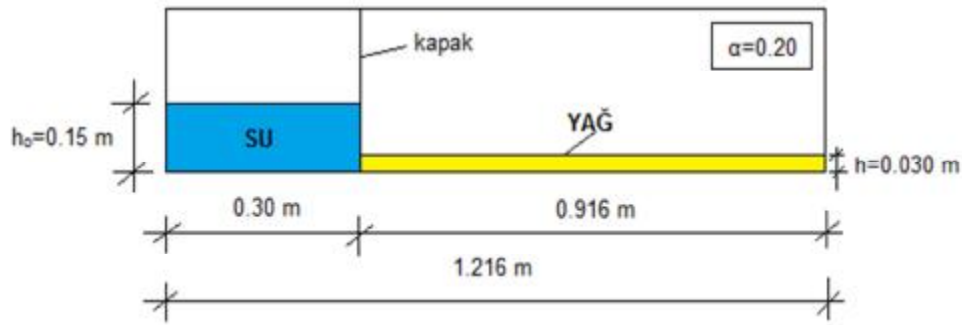
Şekil 4.97. Yağ-Su $\alpha=0.10$ A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Eğriler incelendiğinde genel olarak tüm yöntemlerde tatmin edici bir yakınsama dikkat çekmektedir. Yalnızca $C=0.70$ m için $T=12$ dolaylarında akışkan serbest yüzey profilinde ani bir yükseliş gözlenmektedir. Değerler $H=0.80$ civarına yaklaşmakta bu da neredeyse tüm noktalar açısından maksimum derinliği ifade etmektedir. Ayrıca $D=1.00$ m noktasında deney sonuçları belirgin bir yükselme ile $H=0.80$ 'e ulaşmaktadır. SPH ve Flow-3D daha geç tepe noktasına varabilmektedir.

4.2.5. Karışmayan Akışkan ($\alpha=0.20$) Sonuçları

4.2.5.1. Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Akışkan Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m su, mansapta ise 0.030 m yüksekliğinde yağ bulunmaktadır. Derinlik oranı 0.20 olup, Şekil 4.98'de Su-Yağ ($\alpha=0.20$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.99'da deney başlangıcı görülebilmektedir.



Şekil 4.98. Su-Yağ ($\alpha=0.20$) deney şematik gösterimi



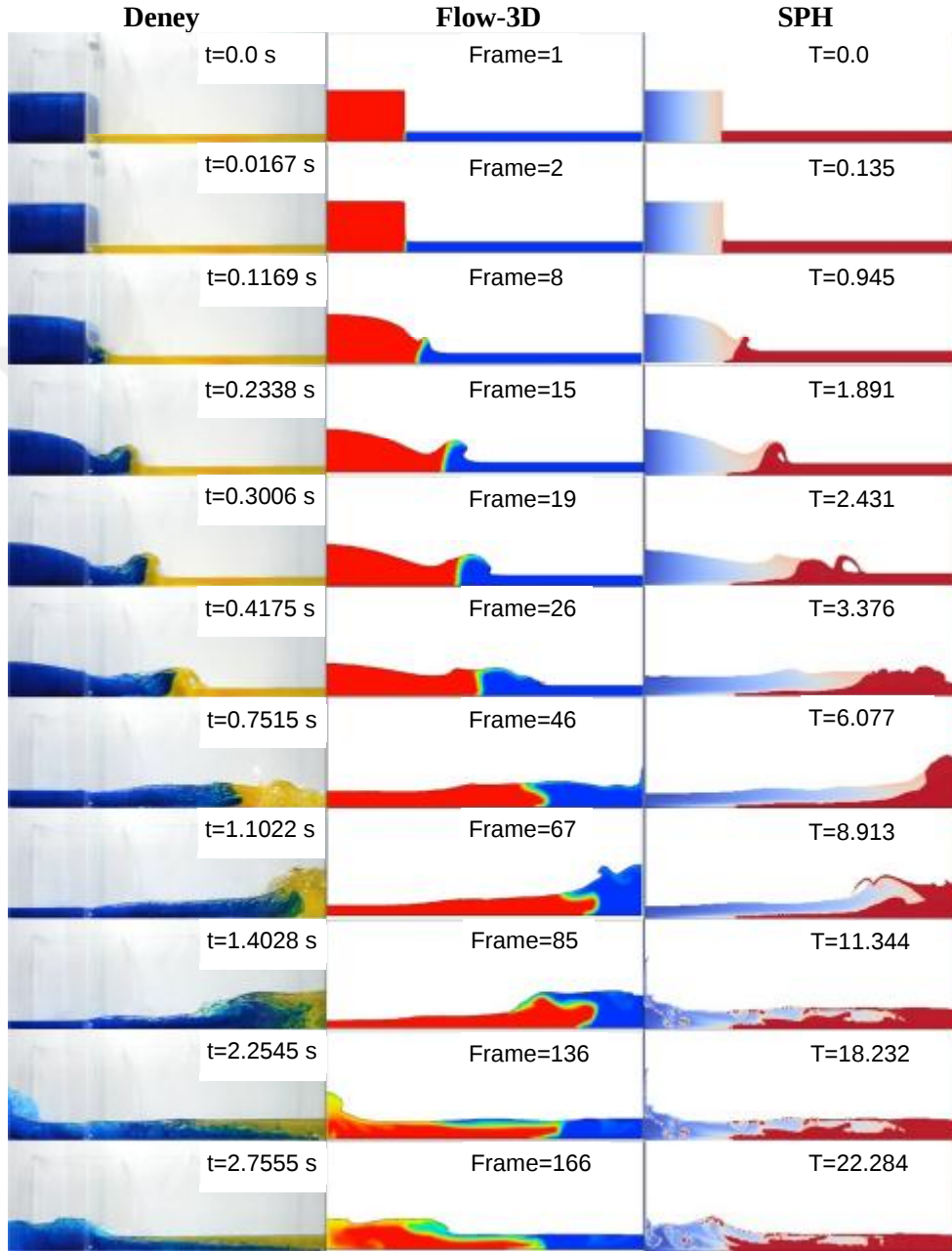
Şekil 4.99. Su-Yağ ($\alpha=0.20$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Kapağın kaldırılması ile mambadaki su kapak altından hareket etmekte ve mansaptaki yağ ile karşılaşmaktadır. Şekil 4.100’de görülebileceği gibi yıkılmanın ilk safhalarında diğer deney sonuçlarına benzer görüntüler elde edilmekle birlikte $t=0.2328$ s anında derinlik oranının etkisi ile yağ suya karşı koymaya başlamaktadır.

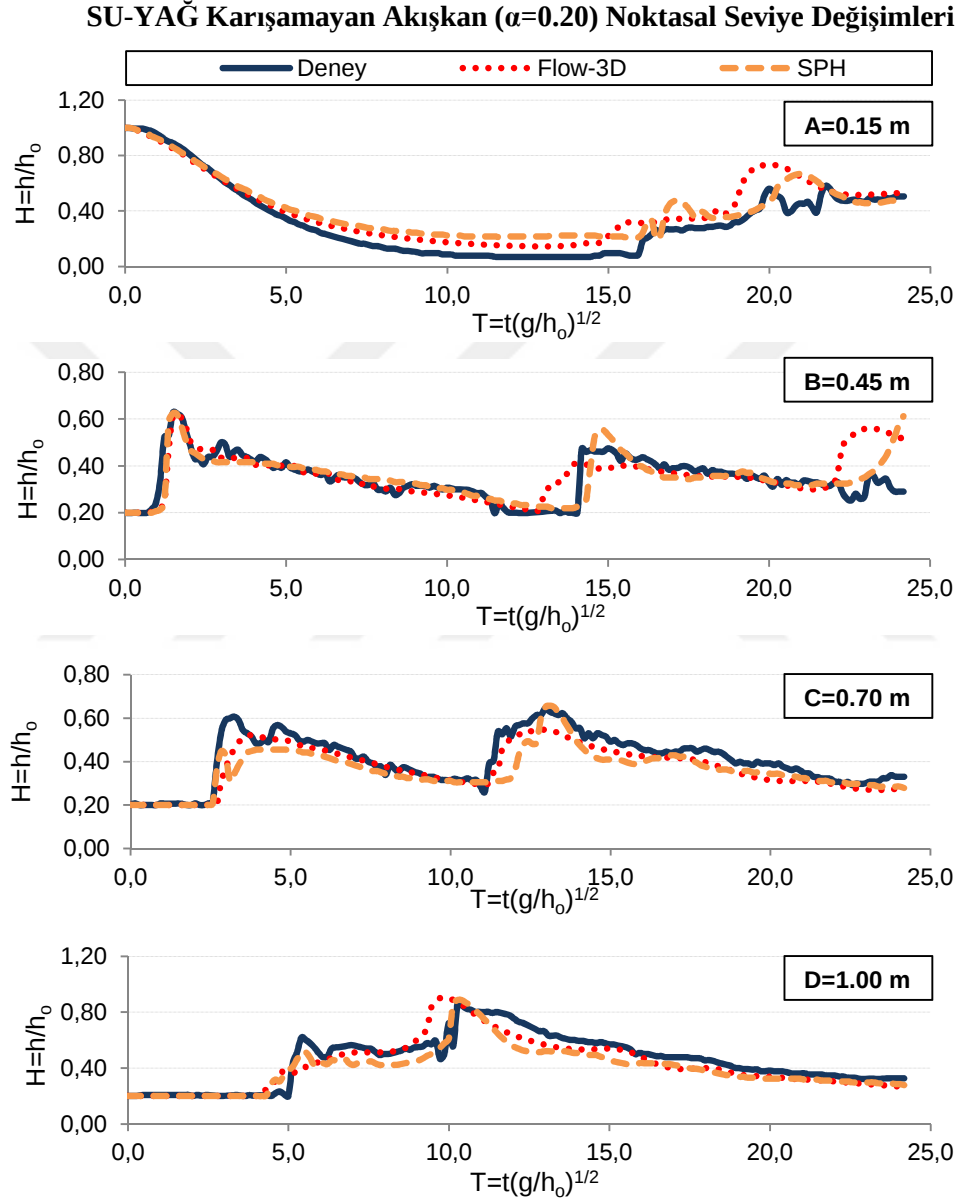
$t=0.3006$ s’de dalga önü simetrik iki yapı görünümüne kavuşmaktadır. $t=0.4175$ s itibari ile ise yavaş yavaş yağın direnci kırılmakta, $t=0.7515$ s anında su yağı mansap doğrultusunda itmeye yani sürüklemeye başlamaktadır. Yağı tümüyle kanal sonuna sürükleyen su, duvara çarpma etkisi ile yağı yüzeye doğru yükseltmekte ve kanal tabanını kaplayacak şekilde ilerlemektedir.

$t=2.2545$ s’de yüzeydeki yağın kapsadığı alan neredeyse mansap sonundaki kanalın çok bir bölümüne denk gelmektedir. İlerleyen anlarda yağ tamamen yüzeye çıkmaktadır. Dikkat edilecek önemli hususlara değinirsek karışabilen akışkanlardan farklı olarak başlangıç safhalarında yıkılma etkisi ile baraj yıkılması akımı kompleks akım özelliği göstermesinin yanında kuyruk akışkanı etkisi ile parabolik şeklinin biraz daha dışbükeye doğru değişmesidir.

Çarpma anlarında yoğunluğu düşük yağın suyun üzerinde kalmak için suyu tutması, bu yüzden de kabarma dalgalarının dalga boylarının çok artmaması önemli bir ayrıntıdır. Modellemelerin yaklaşımlarına bakarsak dalga önünün deneylerde daha dik fakat nümerik yöntemlerde yoğunluk faktörü ile mansaba doğru eğildiği göze çarpmaktadır. Flow-3D Frame 19’da neredeyse dalga kırılmak üzereyken SPH’ta çoktan kırılmış hatta hava girişimi söz konusu olmaktadır. Bu durumlara yazılım ve programlardaki bazı kabullerin sebep olduğu öngörülmektedir. Bunlar haricinde sayısal modellemeler oldukça başarılı bir şekilde davranışı temsil etmektedir.

SU-YAĞ Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.20$)Şekil 4.100. Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler

Şekil 4.101'de derinlik oranı 0.20 bakımından Su-Yağ için A,B,C ve D noktasal seviye değişimi gösterilmektedir.

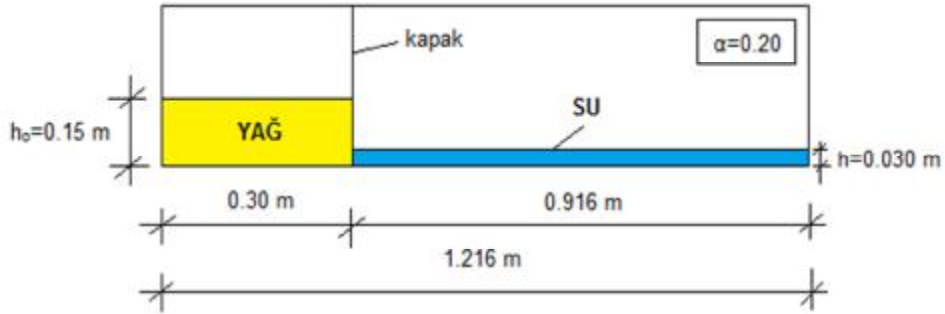


Şekil 4.101. Su-Yağ $\alpha=0.20$ A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

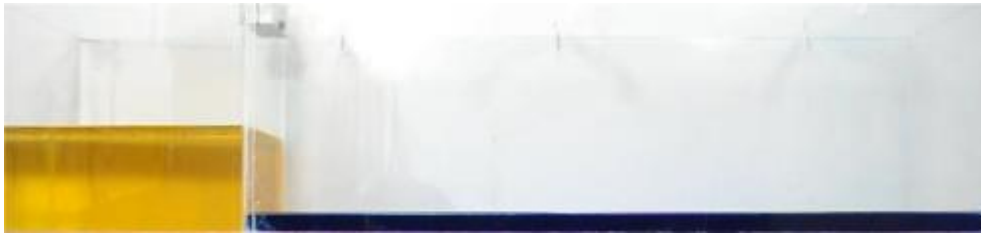
Şekil 4.101’de genelde eğrilerin birbirleri ile yakın sonuçlar ortaya çıkardığını görmek mümkündür. SPH sonuçlarında parçacık kopmalarından dolayı derinliğin bazı yerlerde epey fazla olduğu gözden kaçmamaktadır. Bir diğer ayrıntı da barajı simgeleyen kapağa yakın noktalarda $T=0-5$ arasındaki yükselme eğrilerinin daha dik, uzak noktalarda ise daha az eğimle devam ettiği görülebilmektedir.

4.2.5.2. Yağ-Su ($\alpha=0.20$) Akışkan Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m yağ, mansapta ise 0.030 m yüksekliğinde su bulunmaktadır. Derinlik oranı 0.20’dir. Şekil 4.102’de Yağ-Su ($\alpha=0.20$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.103’te ise deney başlangıç hali bulunmaktadır.



Şekil 4.102. Yağ-Su ($\alpha=0.20$) deney şematik gösterimi



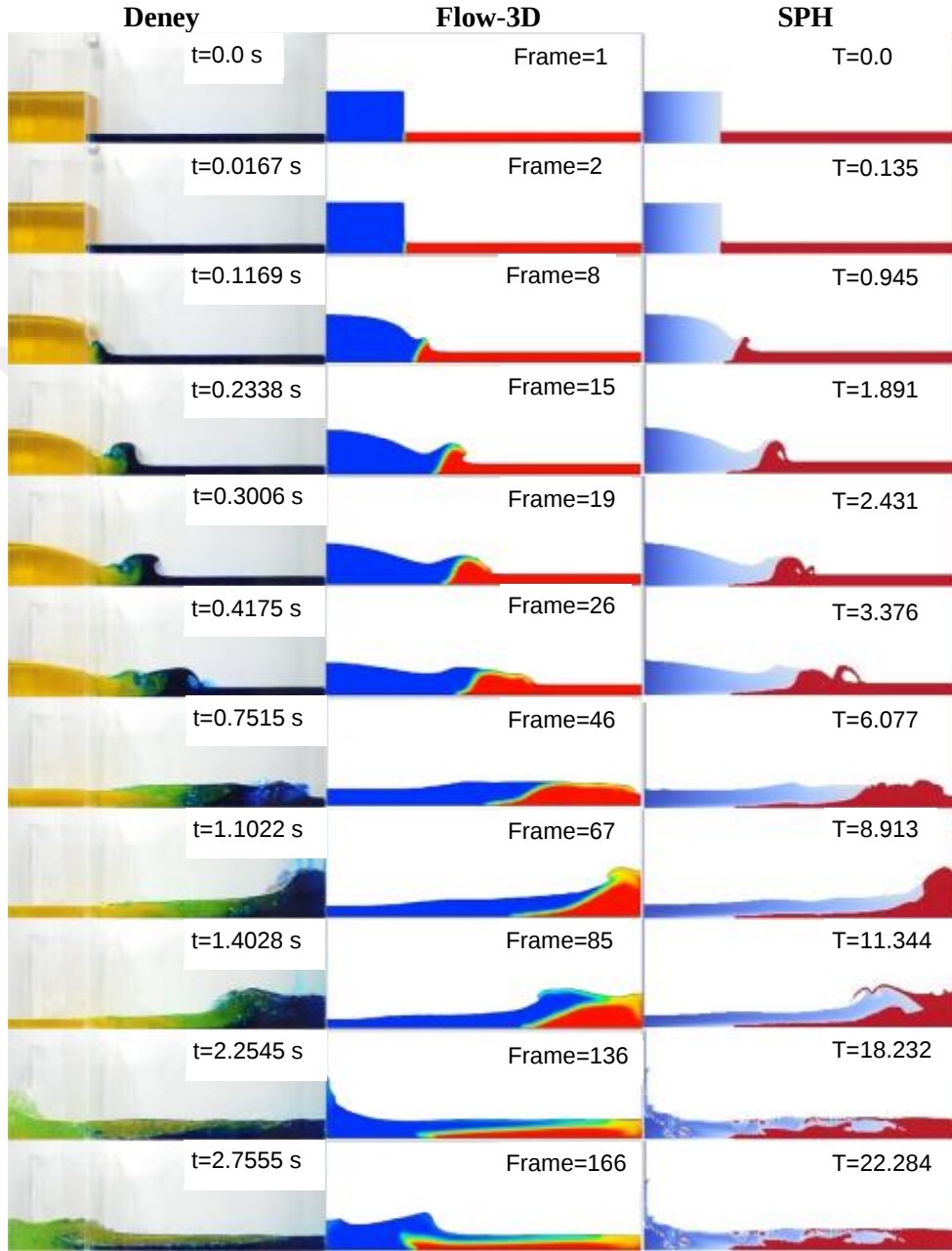
Şekil 4.103. Yağ-Su ($\alpha=0.20$) deney başlangıç anı ($t=0$)

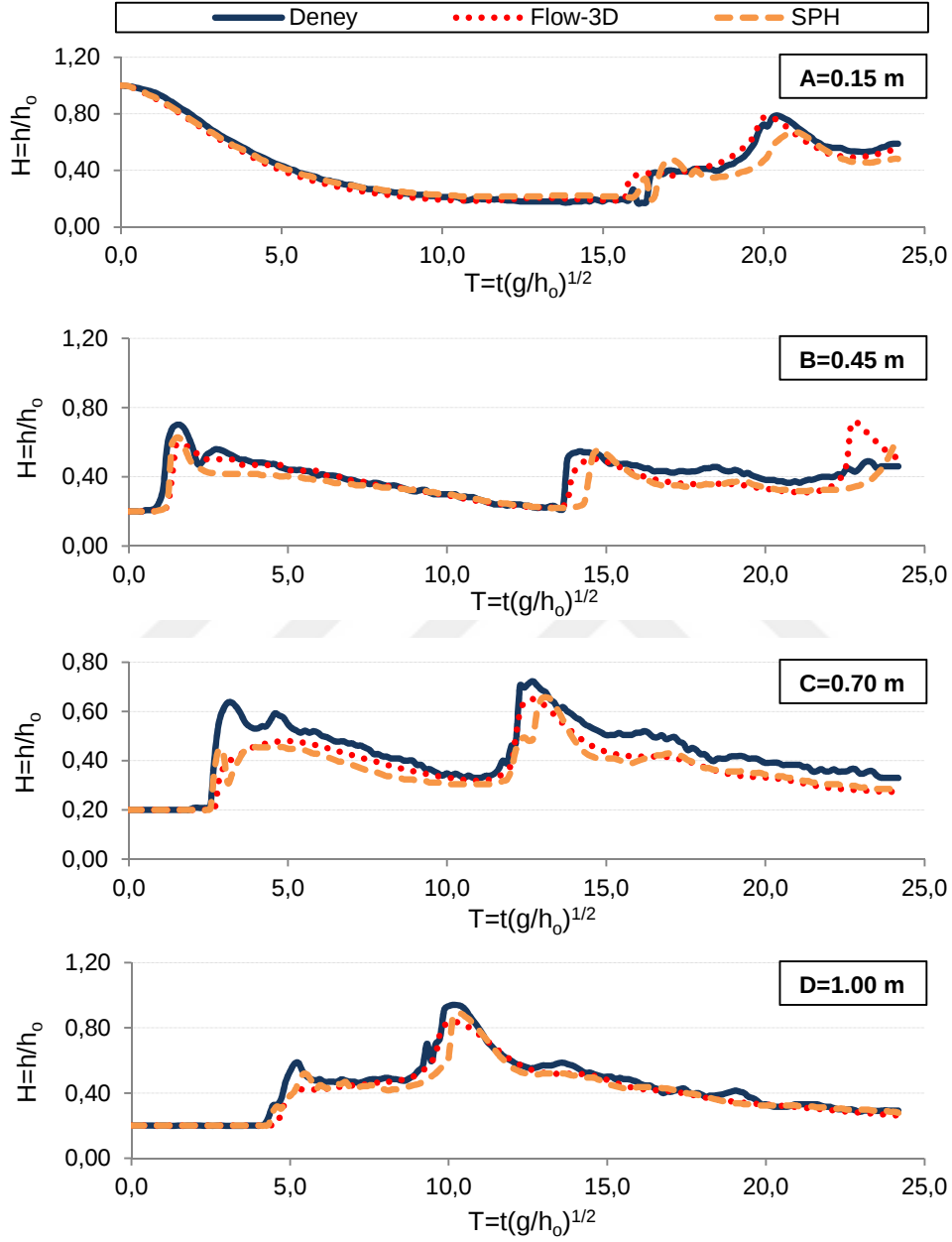
Şekil 4.104'te deney ve modellemelerin tüm yöntemler için anlık görüntüleri verilmiştir. Görüntüler ele alındığında $t=0.2338$ s anında yoğunluğu fazla olan ve mansapta yer alan su membadaki yağın hareketine karşı koymakta dalga önü kısmını memba doğrultusuna çevirmeye çabalamaktadır. $t=0.3006$ s itibari ile birbirine simetrik iki ayrı dalga yakası oluşmaktadır. Sonuçta dalga bir süre sonra kırılarak mansap yönünde hareketine devam etmektedir. Çarpma etkisi ile yükselen dalga yapısında yağ üst tabakaya doğru yönelmekte ve su kanal tabanına yayılmaya başlamaktadır. Zamanla su ve yağ ayrışarak iki farklı katman meydana getirmektedir.

Dalga yayılımının oluşturduğu akışkan yüzey profilleri nümerik yöntemlerde oldukça iyi bir uyumla oluşmasına karşın iki farklı yoğunluklu akışkanların girişim durumları tam net bir şekilde ortaya konamamaktadır. Örneğin Flow-3D Frame 26'da dalga kırılması açıkça görülememektedir. Her ne kadar SPH'ta dalga kırılmaları mevcut ise de kırılma şematiği deney sonuçlarından farklılık arz etmektedir. Herşeye rağmen akım davranışını büyük ölçüde yansıtmaması bakımından modellemeler olumlu olarak değerlendirilmektedir.

$t=1.1022-2.7555$ s zamanlarında karışmayan akışkanların birbirleri ile karşılaşmaları durumundaki davranışları her yöntem için başarılı bir şekilde temsil edilmektedir.

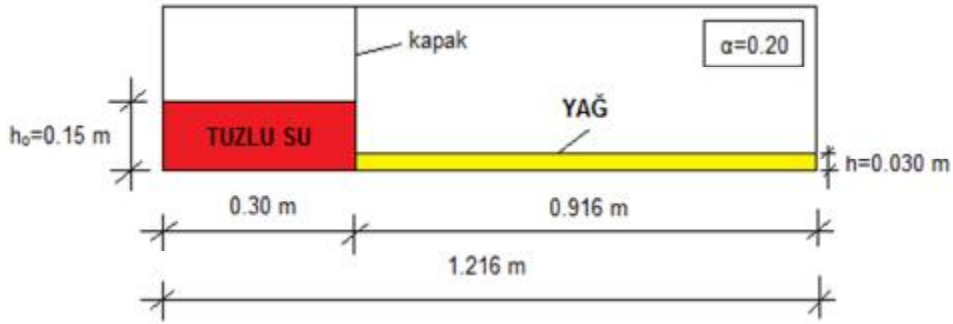
Şekil 4.105'te derinlik oranı 0.20 açısından Yağ-Su için A, B, C ve D noktasal seviye değişim eğrileri yer almaktadır. Eğrilerde birbirine yakınsama oldukça başarılı görünmektedir. Yalnızca B=0.45 m noktasında $T=25$ civarında Flow-3D sonuçlarında ani bir artış ve azalış dikkat çekmektedir. Bunun sebebini dalga kırılması, yansımaları ve çarpışmalar neticesinde enerji kayıpları ile ilişkilendirmek mümkündür. Tabidir ki programların kabulleri ile ilgili durumların da etken olduğu düşünülebilir.

YAĞ-SU Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.20$)Şekil 4.104. Yağ-Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler

YAĞ-SU Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.20$) Noktasal Seviye DeğişimleriŞekil 4.105. Yağ-Su $\alpha=0.20$ A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

4.2.5.3. Tuzlu Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m tuzlu su, mansapta ise 0.030 m yüksekliğinde yağ bulunmaktadır. Derinlik oranı 0.20 olup, Şekil 4.106'da Tuzlu Su-Yağ ($\alpha=0.20$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.107'de deney başlangıç hali görülebilmektedir.

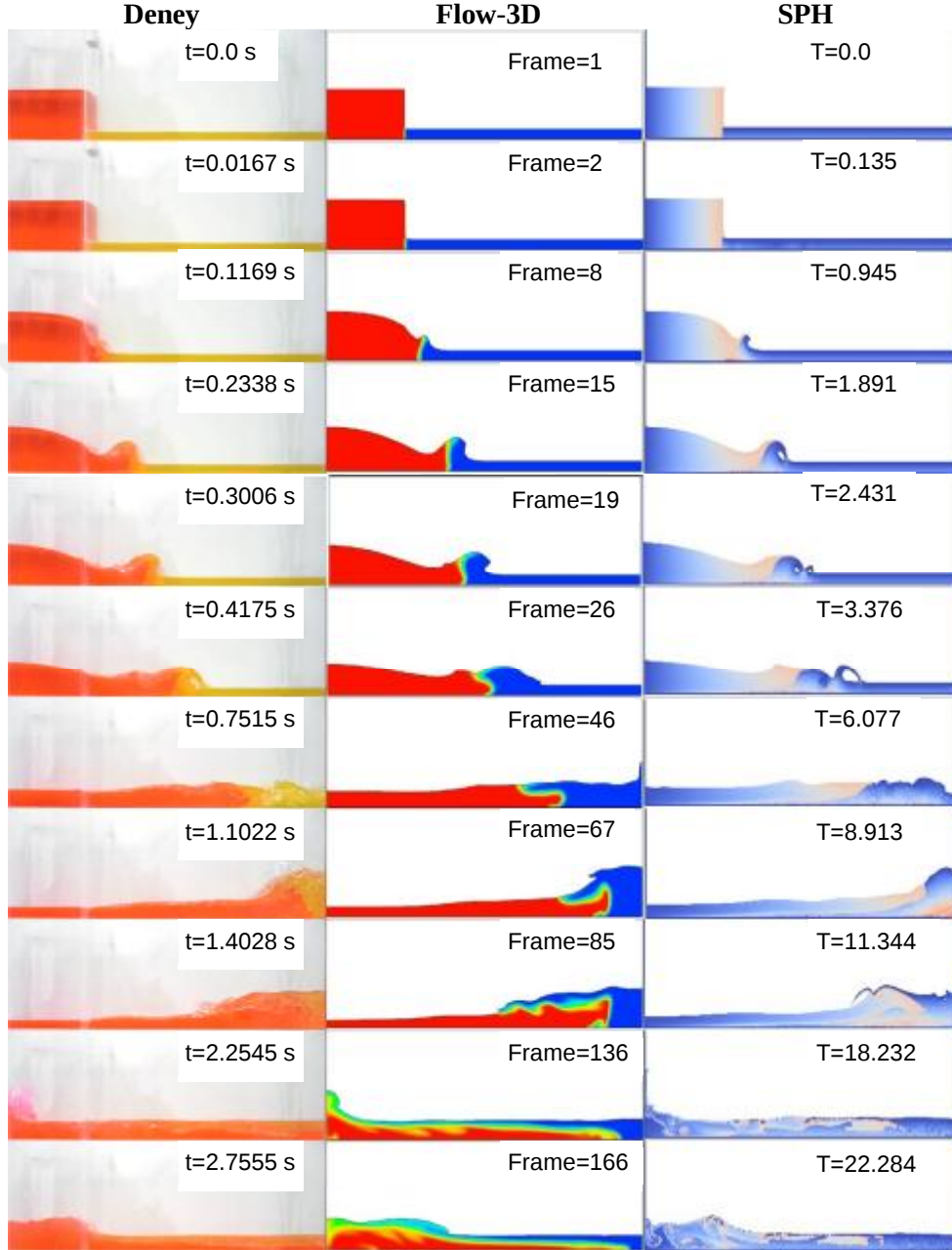


Şekil 4.106. Tuzlu Su-Yağ ($\alpha=0.20$) durumu şematik gösterimi



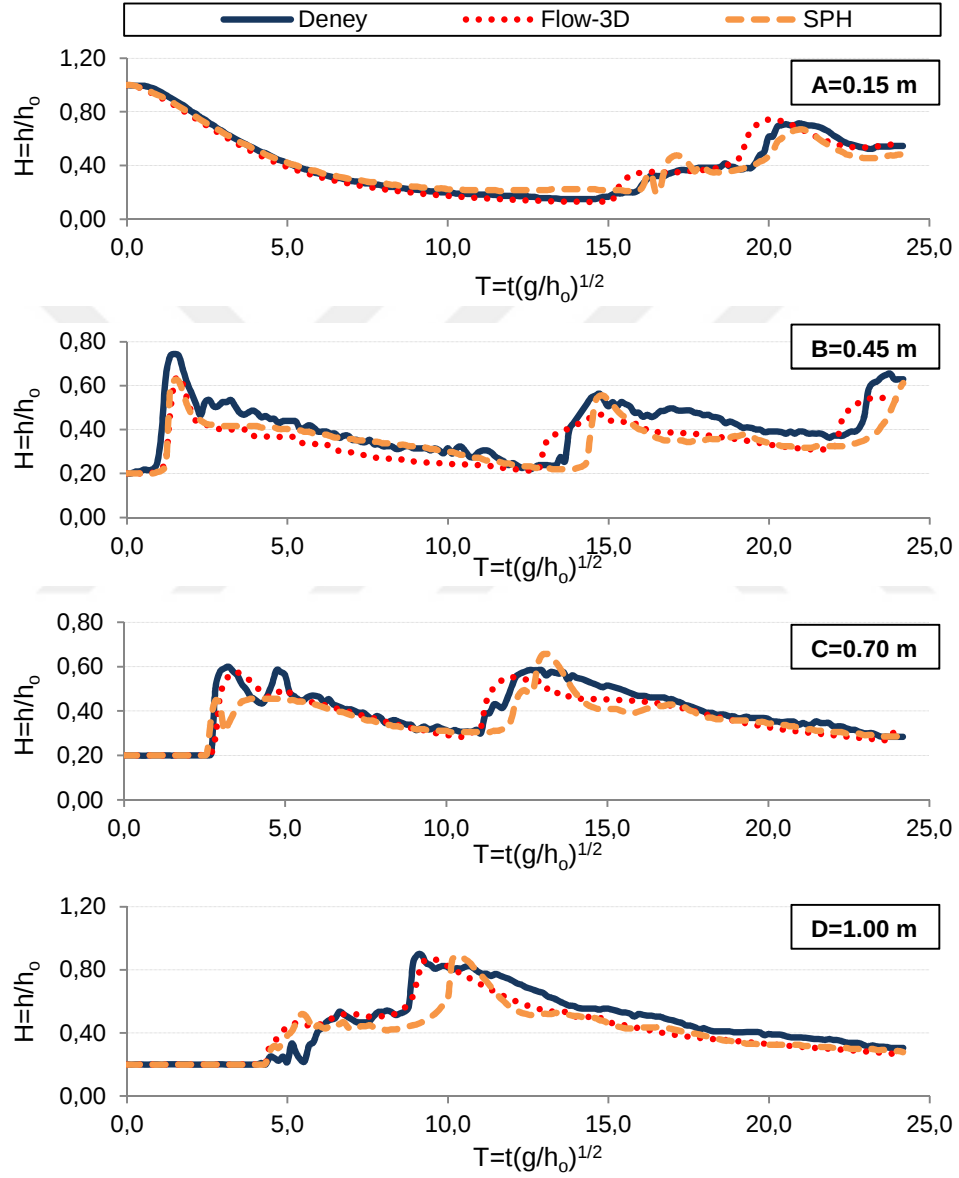
Şekil 4.107. Tuzlu Su-Yağ ($\alpha=0.20$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Şekil 4.108'de görüldüğü gibi kapağın aniden kaldırılması ile membadaki tuzlu su kapak altından hızlı bir şekilde mansaba doğru ilerlemekte, mansaptaki akışkanı sürüklemeye çalışmaktadır. $t=0.2338$ s'de kabarma dalgası meydana gelmekte, her ne kadar yağ direnmeye çalışsa da $t=0.3006$ s ile birlikte direnci kırılmaktadır. $t=0.4175$ s'de dalga kırılması gerçekleşmektedir. Yağın yoğunluğunun düşük olması nedeniyle duvara çarpma ile yağ tutunma yüzeyinden serbest yüzeye doğru kaymaktadır.

TUZLU SU-YAĞ Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.20$)Şekil 4.108. Tuzlu Su-Yağ ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler

Şekil 4.109’da derinlik oranı 0.20 olması durumunda Tuzlu Su-Yağ için A,B,C ve D noktasal seviye değişimi gösterilmektedir.

TUZLU SU-YAĞ Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.20$) Noktasal Seviye Değişimleri



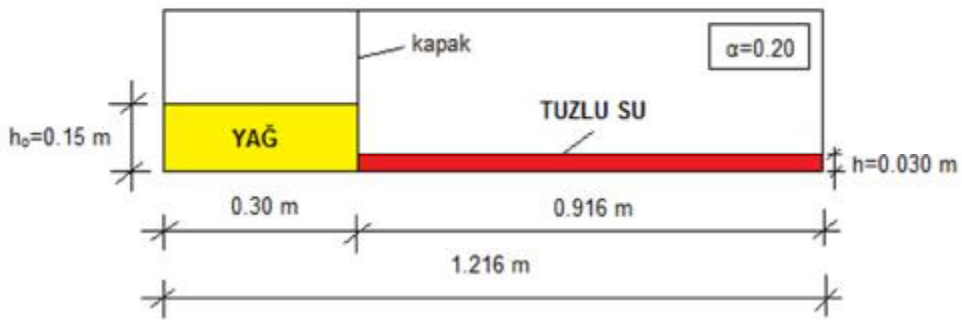
Şekil 4.109. Tuzlu Su-Yağ $\alpha=0.20$ A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Şekil 4.108’de akışkan serbest yüzey profilleri açısından anlık görünümle birbirlerine oldukça iyi yakınsama sağlarken, farklı yoğunluklu birbirine karışamayan akışkanların karşılaşmaları halindeki arakesit yüzeylerini tanımlamak konusunda kısım kısım düzensizlikler olduğu göze çarpmaktadır. Çalışma dahilinde akışkan yüzey profillerinin görüntüleri ve noktasal seviye değişimleri irdelendiği için bu konunun daha sonraki araştırmalarda geliştirilmesi bu konuları aydınlatmak açısından faydalı olacaktır.

Şekil 4.109’da eğrilerin birbirine yakın olduğu görülmekte, kapak yapısından mansap ucuna doğru ilerledikçe maksimum akışkan seviyesine ulaşma daha uzun zaman sürecinde gerçekleşmektedir. En dikkat çekici husus barajı niteleyen kapaktan uzaklaştıkça Flow-3D sonuçları deney sonuçlarına yakınsama konusunda ciddi başarı ortaya koymakta, fakat SPH sonuçları daha geç sıçrama gerçekleştirmektedir. Bunun nedeninin yapay viskozite kaynaklı akışkanların akma durumu ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

4.2.5.4. Yağ-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m yağ, mansapta ise 0.030 m yüksekliğinde tuzlu su bulunmaktadır. Derinlik oranı yine 0.20’dir. Şekil 4.110’da Yağ-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.111’de deney başlangıç anı verilmiştir.

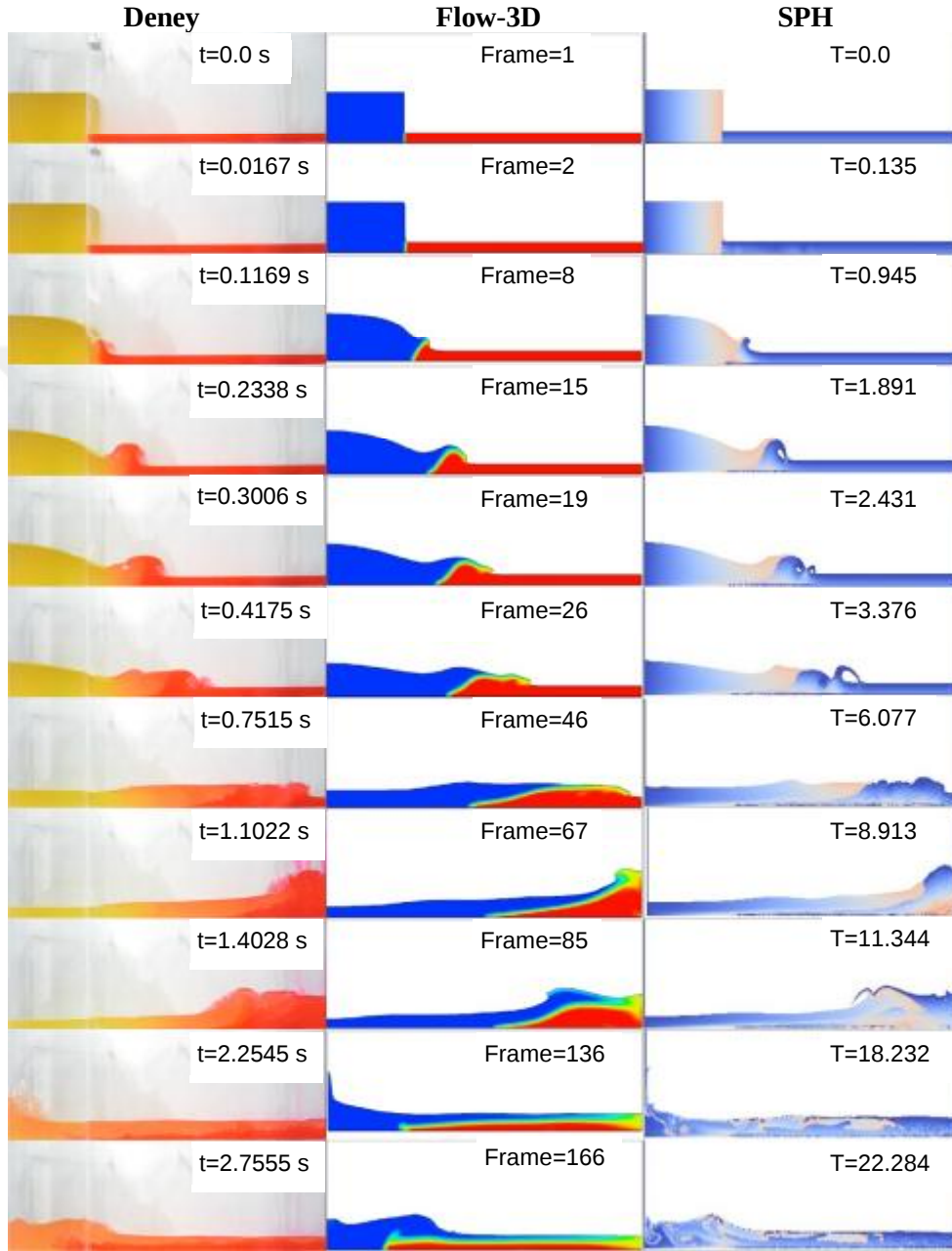


Şekil 4.110. Yağ-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) durumu şematik gösterimi



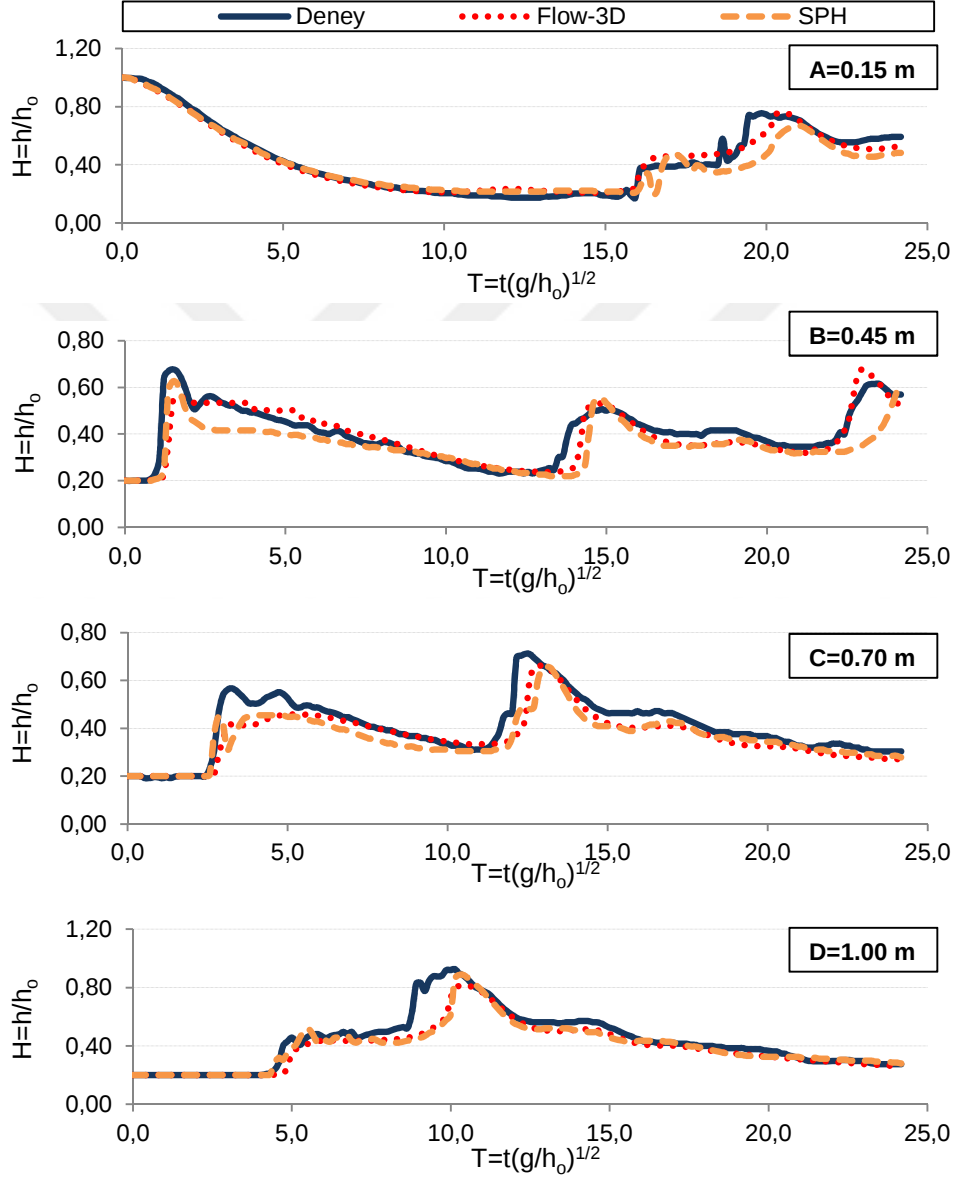
Şekil 4.111. Yağ-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Şekil 4.112’de de gösterildiği üzere baraj yıkılması başlangıç safhasında bir önceki Tuzlu Su-Yağ davranışına benzer bir oluşum gözükse de $t=0.3006$ s’de dalga önünde hem mansaba yönelmiş hem de membaya doğru uzanan iki simetrik kısım görülmektedir. Buradan yağın tuzlu suyun direncini kıramadığı maksimum derinliğe ulaştığı yorumu çıkarılabilir. Yağ tuzlu suyu mansap yönünde sürüklemekte, dalga önünde kabarma dalgası oluşmaktadır. Hatta kabarma dalgası arkasında küçük bir dalga kabarması da mevcuttur. Çarpmanın etkisi ile tuzlu su yağı yukarıya doğru itmekte ve ilerleyen zamanlarda tuzlu su kanal tabanına tamamen hakim olarak yağı yüzeye konumlandırmaktadır.

YAĞ-TUZLU SU Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.20$)Şekil 4.112. Yağ-Tuzlu Su ($\alpha=0.20$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler

Şekil 4.113'e bakılırsa bazı anlar hariç deney verilerinde akışkan yükseklikleri daha fazla görünmektedir.

YAĞ-TUZLU Su Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.20$) Noktasal Seviye Değişimleri



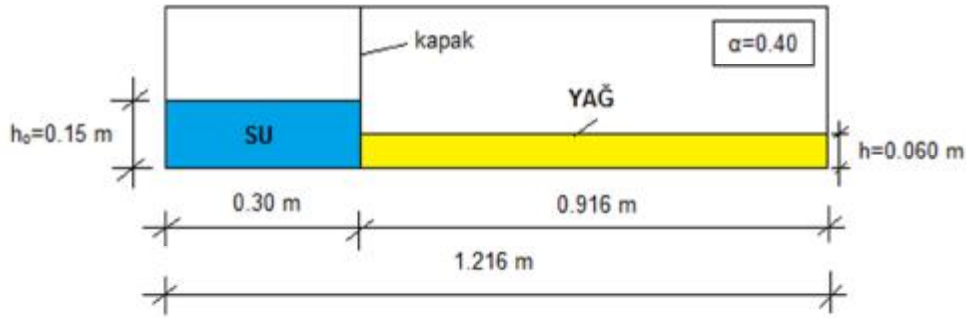
Şekil 4.113. Yağ-Tuzlu Su $\alpha=0.20$ A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

Bu durumda deney kanalında enerji kayıplarının söz konusu olmasının etkisi çok büyüktür. SPH verilerinde birkaç T değerinde sıçrama görülmesi parçacık kaynaklı kopmaları işaret etmektedir. Grafiklerde dikkat edilecek en önemli ayrıntılar kanal mansabına doğru ilerledikçe modellemeler birbirine yakın sonuçlar verirken deney sonuçları ile aradaki fark artmaktadır. Bunda modellemelerde birçok konuda kabullerin yapılıyor olması başlıca faktör olarak sayılabilir. Ayrıca farklı yoğunluklu akışkanların karşılaşmalarında akışkanların davranışında özellikle arakesit noktaları yakınlarında yaklaşımların tutarlı olduğu kısımlar olduğu gibi çok değişik görüntüler de dikkat çekici özellik taşımaktadır.

4.2.6. Karışmayan Akışkan ($\alpha=0.40$) Sonuçları

4.2.6.1. Su-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m su, mansapta ise 0.060 m yüksekliğinde yağ bulunmaktadır. Derinlik oranı 0.40 olup, Şekil 4.114'te Su-Yağ ($\alpha=0.40$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.115'te deney başlangıcı görülebilmektedir.



Şekil 4.114. Su-Yağ ($\alpha=0.40$) durumunun şematik gösterimi

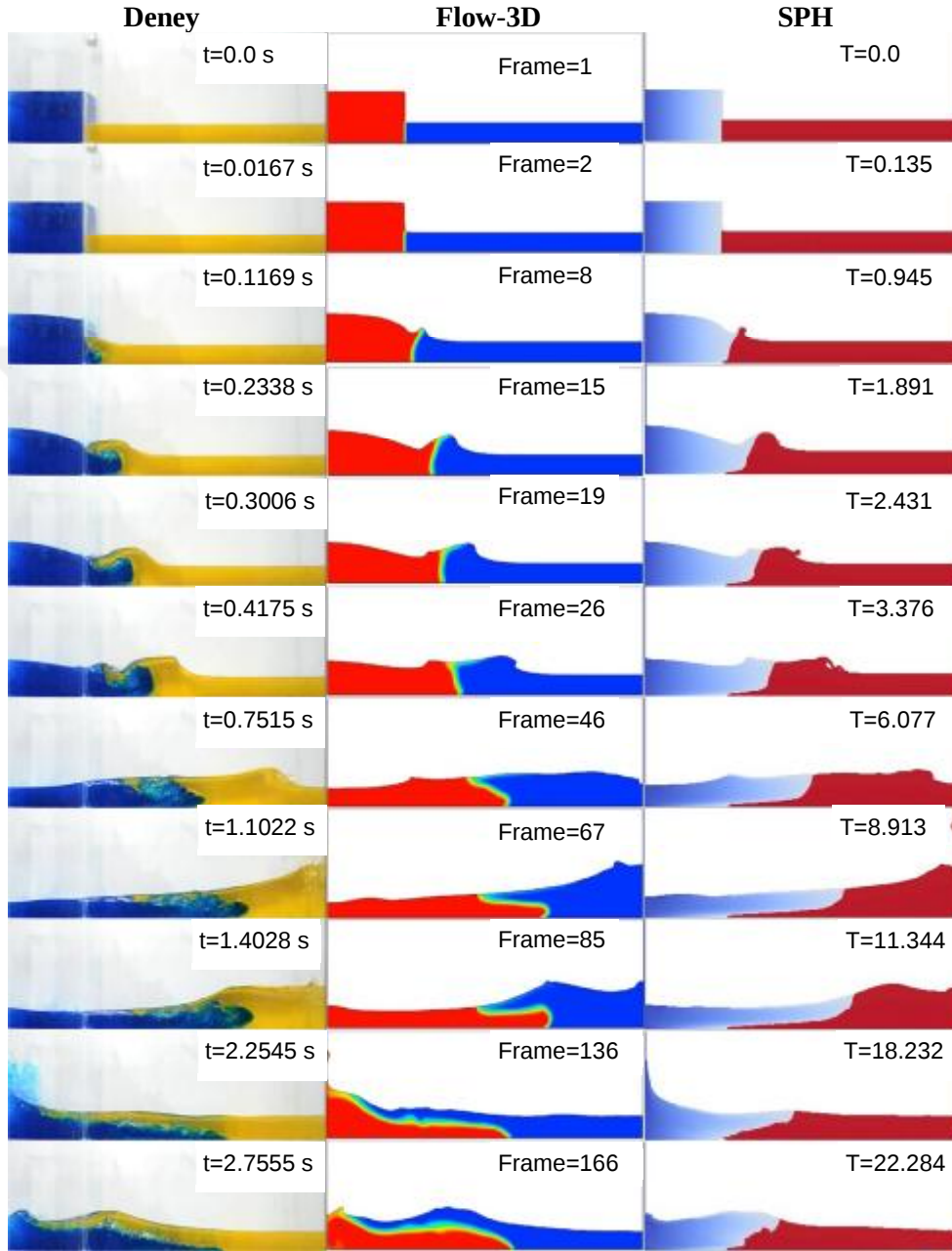


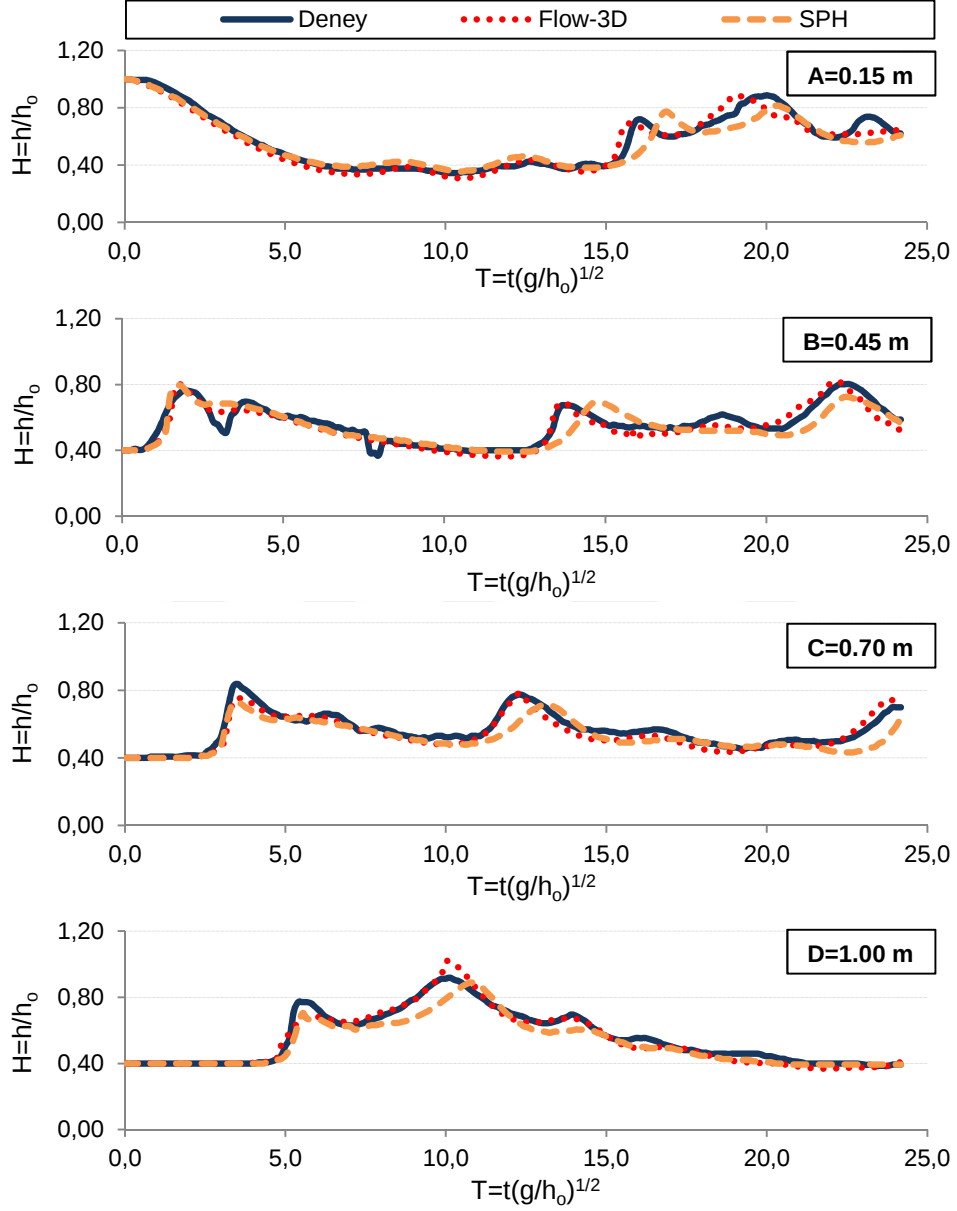
Şekil 4.115. Su-Yağ ($\alpha=0.40$) deney başlangıç anı ($t=0$)

Kapağın ani hareketi ile yerçekimi etkisi sonucu su kapak altından hareketini sürdürme eğilimine girmekte ve mansaptaki yağı itmeye çabalamaktadır. Şekil 4.116'daki görüntüler incelendiğinde ani kalkma neticesinde suyun mansaptaki yağa kuvvet uygulaması ile yağ yüzeye çıkmaya çalışmaktadır. Bir süre sonra su tamamen kanal tabanında ilerlemeye başlamakta ve derinlik oranının da etkisi ile de kanal sonundaki duvar kısmına çarpma daha şiddetli olmaktadır.

Derinlik oranının artıyor olması modellemelerde benzeşimleri daha da yükseltmektedir. SPH yöntemi ile Flow-3D yazılımı deneyden anlık görüntüler olarak farklı durumlar yansıtıyor olsa dahi kendi içerisinde birbirine yaklaşım konusunda oldukça yakın sonuçlar üretmektedirler.

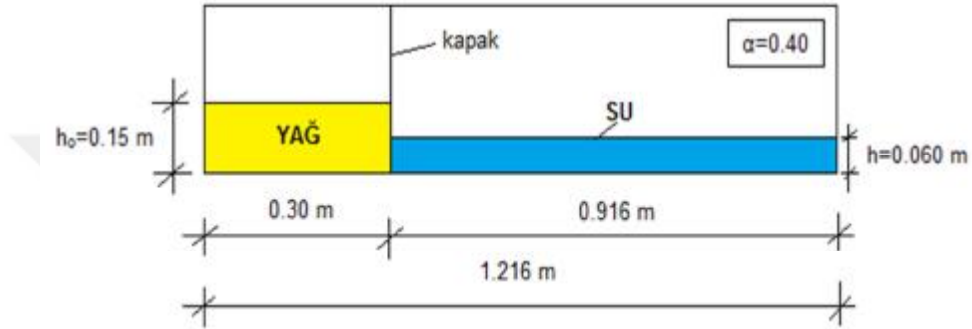
Şekil 4.116 ve 117'de hem görüntü hem de grafiklerde nümerik model sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle $D=1.00$ m noktası $T=10$ civarında yöntemlerdeki farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi duvara çarpma kaynaklı yansıyan dalganın membaya doğru ilerlemesi ve membadaki akışkan kütlesi ile çarpışan dalganın bilhassa modellemelerde bariz değişiklikler meydana getirmesidir.

SU-YAĞ Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.40$)Şekil 4.116. Su-Yağ ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler

SU-YAĞ Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.40$) Noktasal Seviye DeğişimleriŞekil 4.117. Su-Yağ $\alpha=0.40$ A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

4.2.6.2. Yağ-Su ($\alpha=0.40$) Deney ve Modelleme Sonuçları

Membada 0.15 m yağ, mansapta ise 0.060 m yüksekliğinde su bulunmaktadır. Derinlik oranı 0.40'tır. Şekil 4.118'de Yağ-Su ($\alpha=0.40$) durumunun şematik gösterimi ve Şekil 4.119'da ise deney başlangıç anı yer almaktadır.



Şekil 4.118. Yağ-Su ($\alpha=0.40$) durumunun şematik gösterimi



Şekil 4.119. Yağ-Su ($\alpha=0.40$) deney başlangıç anı ($t=0$)

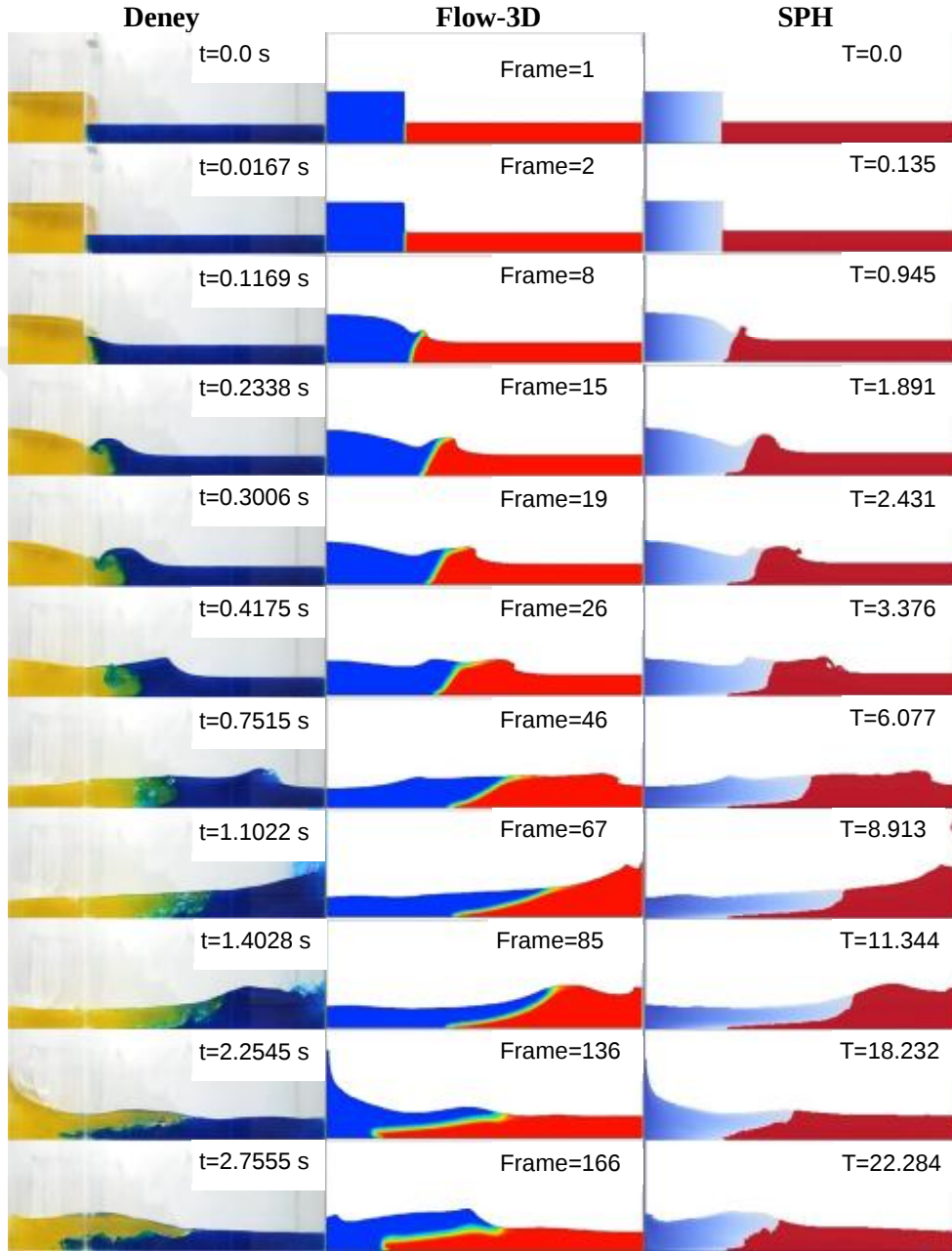
Şekil 4.120'e bakılırsa kapağın aniden kaldırılması ile birlikte membadaki yağ mansaptaki suyu sürüklemeye zorlamaktadır. Yağ başlangıçta kanal tabanına doğru yönelim göstermekte, fakat mansaba doğru harekete geçen suyun kanal sonundaki duvara çarpmasının etkisi ile bu sefer memba yönünde yağı zorlayan bir ters kuvvet oluşmaktadır. Yağ yoğunluk faktörü nedeniyle yüzeye doğru çıkmak istemektedir. Suyun daha yüksek yoğunlukta olması kaynaklı bu sefer daha şiddetli bir şekilde memba ucundaki kanala çarpıp yansıyan dalga yağın yüzeye geçmesini

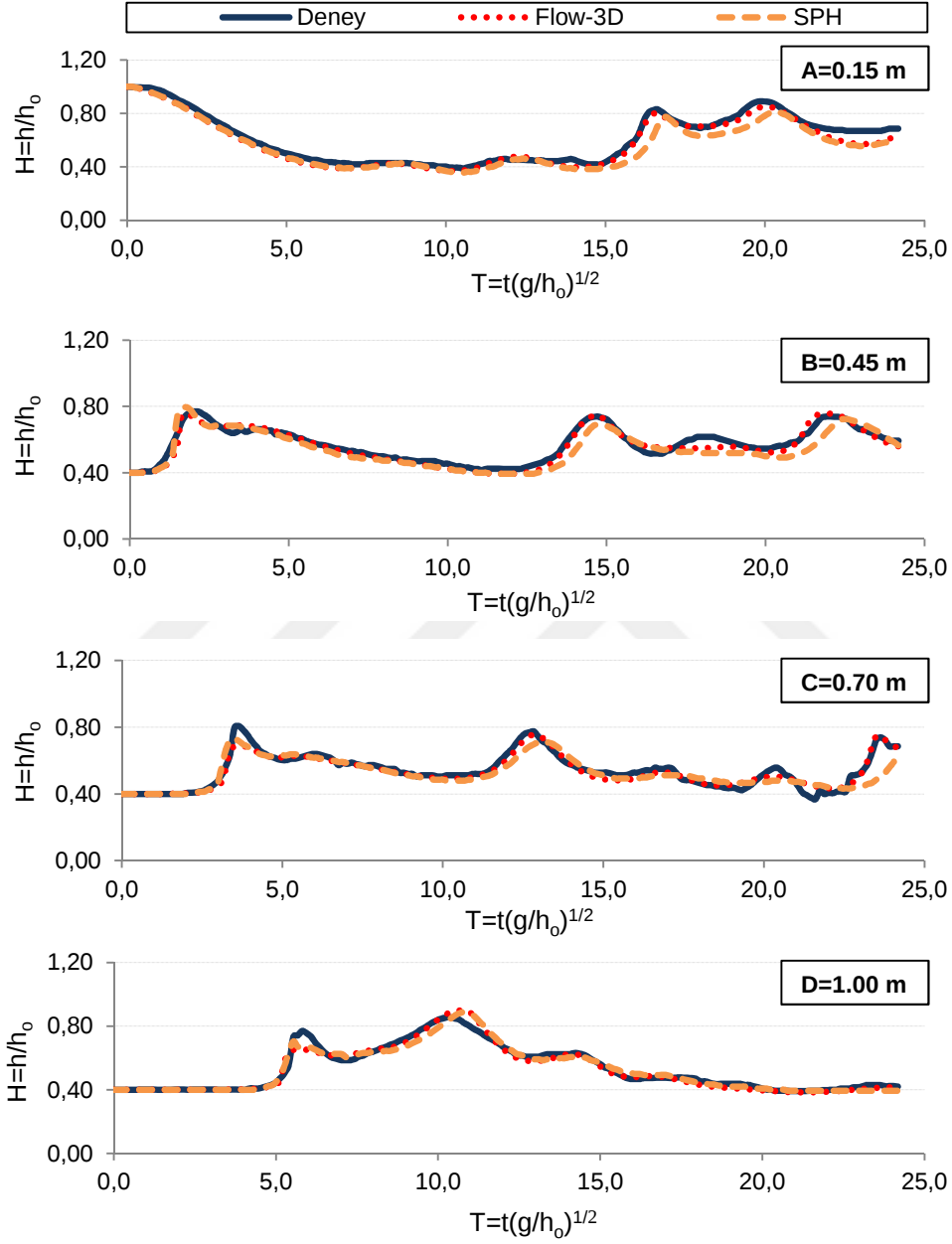
kolaylaştırmaktadır. Hareket sonunda yağ üst su alt tabakada olacak biçimde bir tabakalaşma süreci meydana gelmektedir.

Dikkat edilecek husus farklı yoğunluktaki birbirine karışamayan akışkanların davranışlarında yoğunluk geçişlerinin modellemelerde tam anlamı ile yansıtamamasıdır. Yüzey profili yönünden uyumlu olarak ifade edilse bile akım ara kesit yüzeylerinin değişimi üzerinde daha fazla durulması gerekecektir. Bundan sonraki çalışmalar bu konuya büyük ölçüde ışık tutabilecektir.

Şekil 4.121 değerlendirildiğinde tüm modelleme sonuçlarının deneysel sonuçları ile neredeyse çakışacak şekilde iyi bir yaklaşıklıkla çözümlendiği görülebilmektedir. Deney sonuçlarında ani yükselme ve alçalma eğrilerinin membadan mansaba ilerledikçe birbirine yaklaştığı göze çarpmaktadır. Ayrıca membada kapağa yakın noktadan mansap ucuna gidildikçe hareketini tamamlayan akımların salınımlarında azalma olmaktadır. Bir başka deyişle mansabın en uç noktasında $T=20$ dolaylarından akım yaklaşık sabit derinliklerde ilerlemektedir.

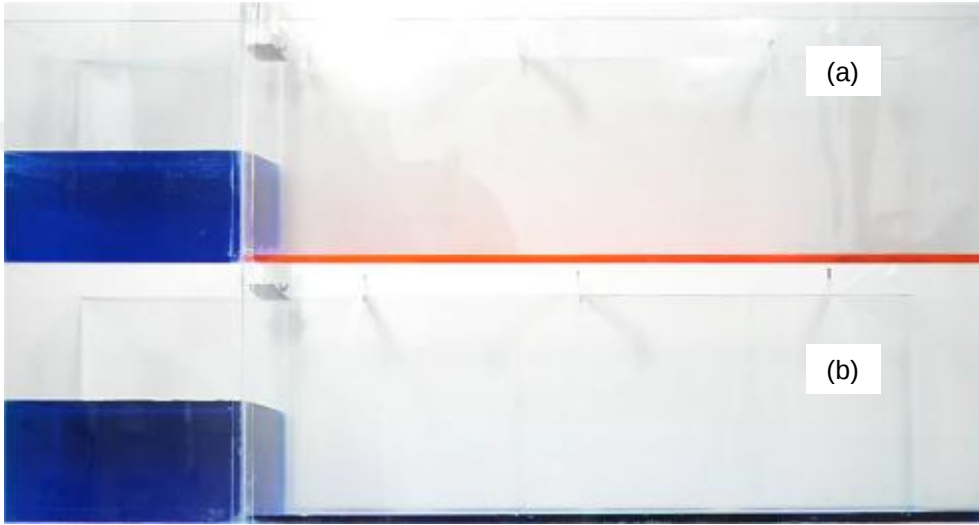
Kapağın kalkmasından sonra akışkan seviyesinin yükselmesi sürecinde akışkan yüksekliği her ne kadar sabit yani dalga boyu birbirine eşit görünse de dalgaların genliği mansap doğrultusunda azalmaya maruz kalmaktadır. Yansıyan dalgalarda dalga önü kabarmakta, bu durumda hız azaldığından akışkan seviyesi daha yukarıda izlenmektedir. Buradan hareketle yıkılma sonrası ve yansıyan dalgalarda kabarma dalgası oluşumunun mansapta oluşturacağı etkiler bakımından alınacak eylem planlarında uyarı zamanının gerekenden daha çok uzayacağı açıktır.

YAĞ-SU Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.40$)Şekil 4.120. Yağ-Su ($\alpha=0.40$) Deney, Flow-3D ve SPH anlık görüntüler

YAĞ-SU Karışamayan Akışkan ($\alpha=0.40$) Noktasal Seviye DeğişimleriŞekil 4.121. Yağ-Su $\alpha=0.40$ A,B,C ve D noktasal seviye değişimi

4.2.7. Deney Doğrulama Çalışması

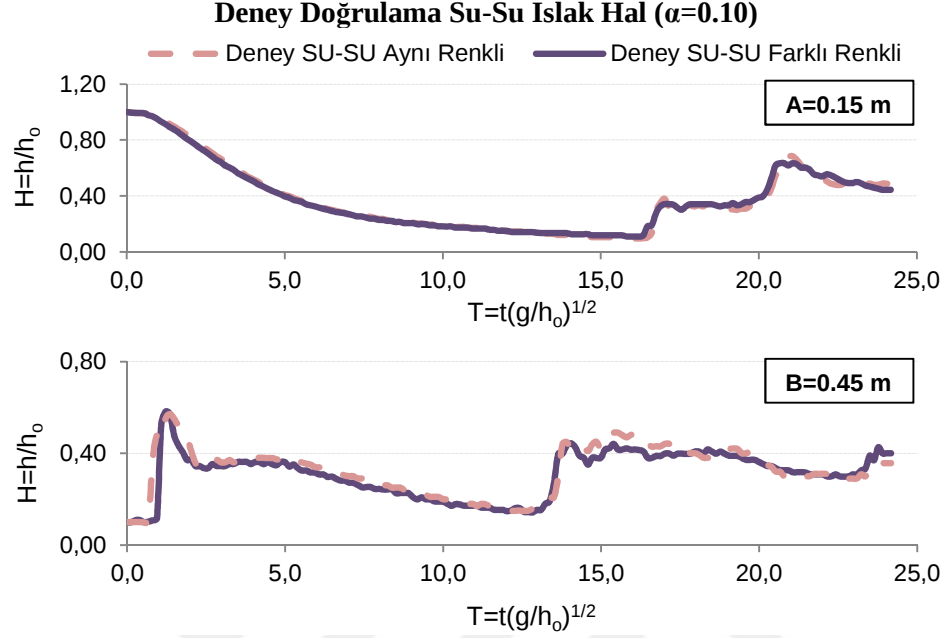
Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin doğruluğunu sınavabilmek için yalnızca Su-Su ($\alpha=0.10$) deneyi için memba ve mansaptaki akışkanlar için aynı renk gıda boyası uygulanarak her iki yöntemde elde edilen değerler mukayese edilmiştir. Şekil 4.122’de iki deney için de başlangıç anı gösterilmiştir.



Şekil 4.122. Farklı renk (a) ile aynı renk (b) deney doğrulama yapılması

Şekil 4.123’te görüleceği üzere sadece $A=0.15$ m ve $B=0.45$ m noktaları yani kapağın memba yönü ile mansap kısmındaki yerler irdelenmiştir. Her iki denemede de birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Deneylerin kendi içerisinde sorgulanmasının tutarlı deney dataları üretmek açısından önemli olduğu bilinmektedir.

Çok küçük farklılıkların gözlenmesi her deneyde ihmal edilebilecek hata oranlarının olabileceğini göstermektedir. Farklı renkli gıda boyasının uygulanması ile akım davranışlarında ara kesit geçişlerini izleyebilmek mümkün olabilmektedir.



Şekil 4.123. Deney doğrulama sonucu elde edilen eğriler

4.2.8. Kocaman (2007) Sonuçlarının SPH ile Karşılaştırılması

Şekil 4.124'te görülebileceği gibi Kocaman (2007) çalışmasında kapak yapısı membadan 4.65 m ve mansaptan ise 4.35 m uzaklıkta olacak biçimde oluşturmuştur. Kapak orijin noktası olacak şekilde öngörmüştür. Yüksek çözünürlüklü kameralar ile kaydedilen görüntülerin çözünürlüğü 768*576 ve 384*288 olup, çekim hızları ise 25 ve 50 fps'dir. Saniyede 50 görüntü noktasal ölçümlerde data aralığının 0.020 olmasını sağlamıştır.

Çalışmasını kuru ($h_0=0.25$ m) ve farklı kuyruk suyu yüksekliklerine (h_1) ($\alpha=h_1/h_0=0.10, 0.20, 0.40$) ıslak halleri için baraj yıkılmasının başlangıç safhalarında su yüzü profillerini elde etmiştir. Deneysel sonuçları FLOW-3D yazılımından faydalananak sığ su ve RANS denklemleri tabanlı nümerik çözümlerle mukayese etmiştir. Daha sonra mansapta üçgen ve trapez şeklinde iki değişik geometrisi bulunan taban eşikleri oluşturarak taşkın yatağındaki değişikliklerin etkisini incelemiştir.

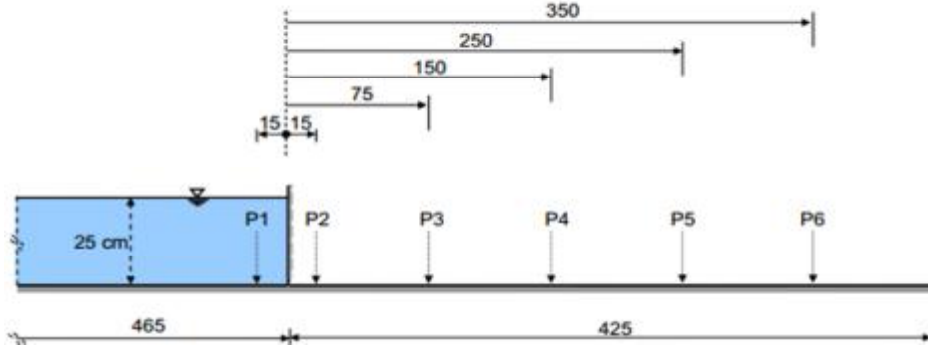


Şekil 4.124. Kocaman (2007) deney kanalı

Bu çalışma kapsamında Kocaman (2007) sonuçlarının SPH yöntemi ile de modellenmesiyle ağırsız Lagrange tabanlı parçacık yönteminin tutarlı bir yakınsama sağlayıp sağlayamayacağı konusuna açıklık getirilmesi amaçlanmıştır. Kuru, ıslak hal (0.10 ve 0.40), üçgen ve trapez eşik sonuçları üzerinde durulmuştur.

4.2.8.1. Kuru Hal ($\alpha=0$) Sonuçları

Membada 0.25 m su bulunmakta olup, Şekil 4.125'te kuru haldeki deney şematiğinin gösterimi verilmiştir. Şekil 4.125'e bakılırsa ölçüm alınan noktalar P1-P6 arasındır. Bu çalışmada ise örnek olması düşüncesiyle sadece P1-P2 yani memba ve mansap kapağa simetrik noktaları ve P4 noktası ele alınmıştır. $X=x/h_0=-0.6$ (P1), $x/h_0=0.6$ (P2) ve $x/h_0=6$ (P4) memba ve mansaptaki ölçümü yapılan noktalardır. Anlık görüntülerde Kocaman (2007) çalışmasındaki süreler dikkate alınmış ve deney görüntüleri ile SPH modellemesi sonucu elde edilen anlık simülasyon görüntüleri birlikte verilmiştir.

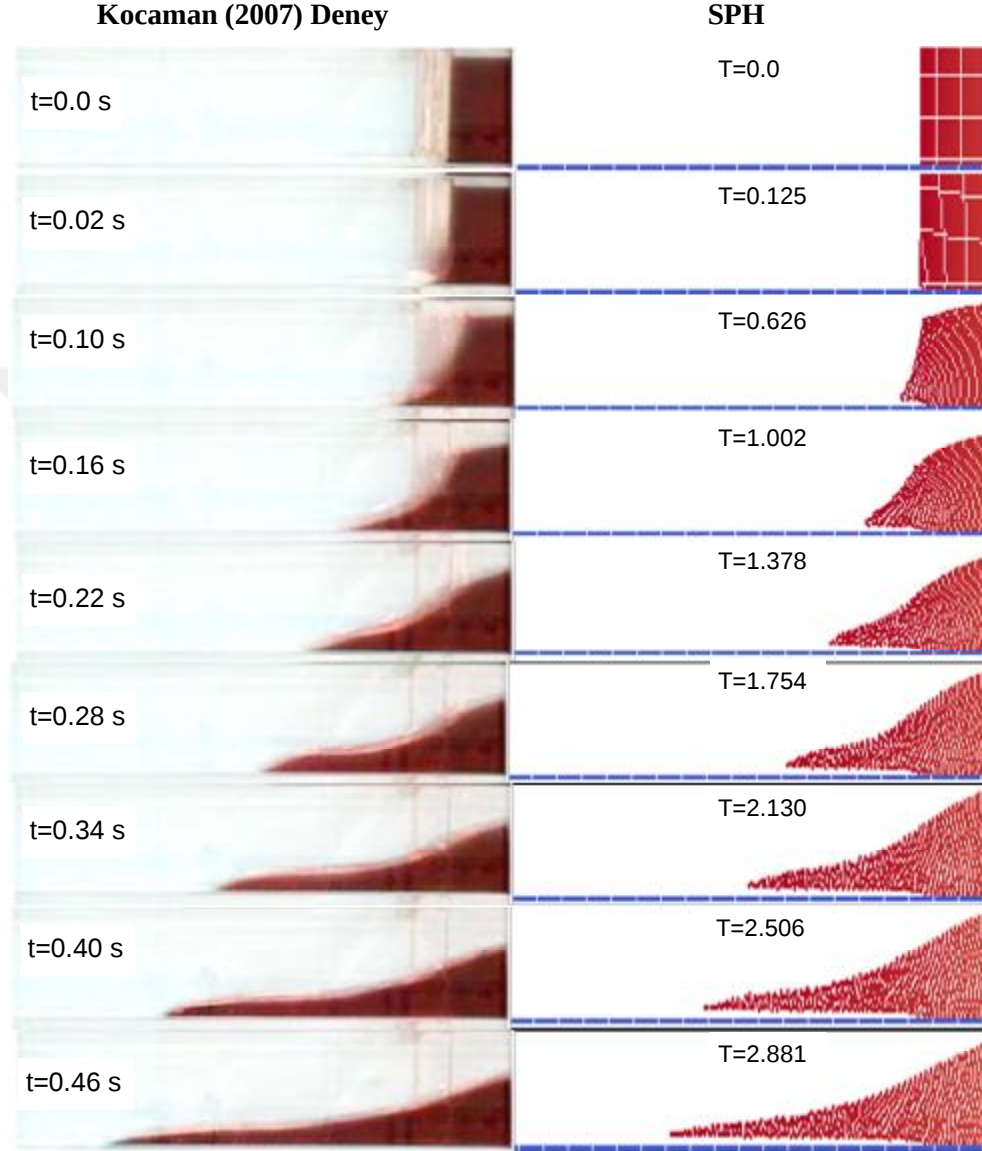


Şekil 4.125. Kuru Hal ($\alpha=0$) deney şematiği (Kocaman, 2007)

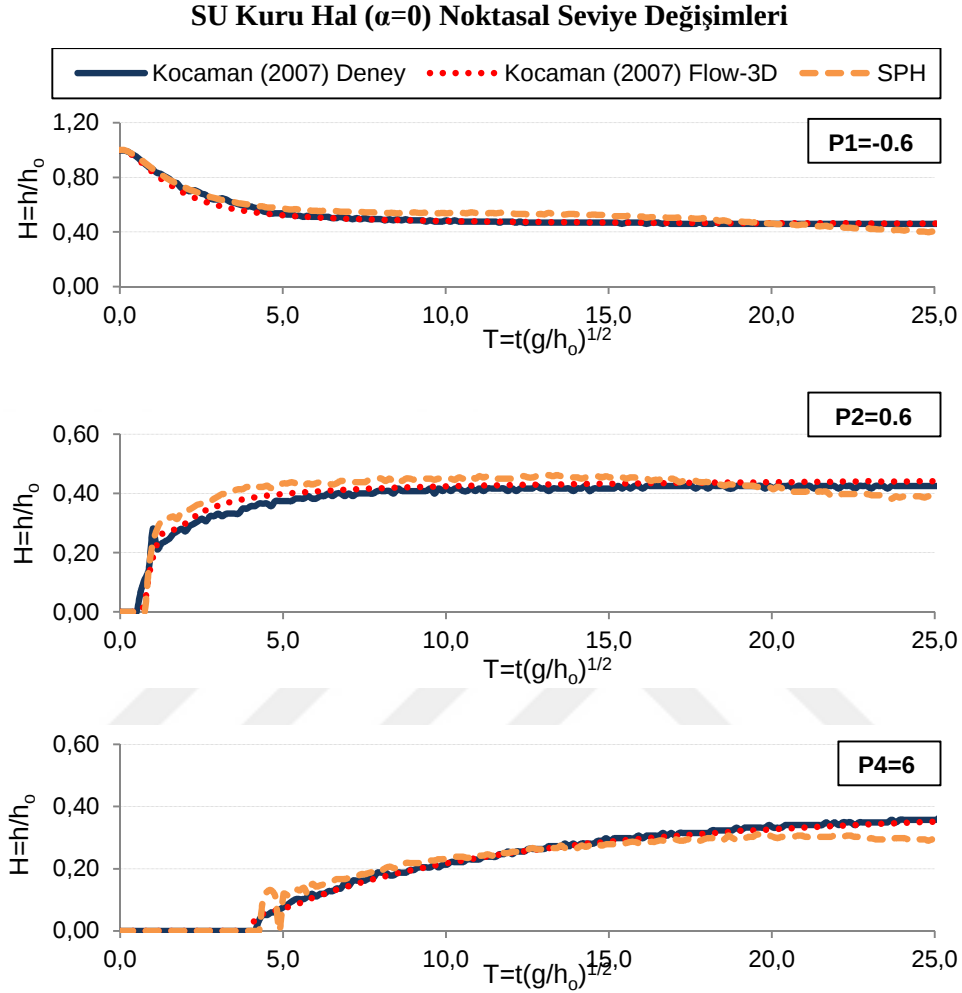
Şekil 4.126'ya bakılırsa baraj yıkılması başlangıç aşamalarında taşkın sonucu oluşan şok dalgalarının yerçekiminin etkisi ile kapağın altından hareketi ani yıkılma nedeniyle hızlı gerçekleşmektedir. $t=0.02$ s itibari ile su yüzü profili parabolik bir görünüme kavuşmaktadır. SPH yönteminde ise parabolikten ziyade dalga önünün hafif kırılması şeklinde bir görüntü dikkat çekmektedir. $t=0.10$ s'de yüzey eğrisi SPH'ta parabolik olmakta, fakat yine de deneyde yüzey eğriliğinin daha fazla olduğu göze çarpmaktadır.

$t=0.16$ s anında deneyde hidrostatik olmayan koşulların etkisi fazlasıyla hissedilmektedir. SPH yönteminde ise dalganın tepe noktası dışbükey geometrik özelliğe hakimdir. $t=0.22$ s ile birlikte her iki yöntemin birbirine yakınsaklık oranı artmaktadır. Dolayısı ile kuru durumun ilk anlarında biraz farklılıklar görülse dahi SPH'ın akımın davranışını başarılı bir şekilde temsil ettiği ifade edilebilir.

Şekil 4.127'de görüleceği üzere barajın mansabında ($P2=0.6$) ilk olarak su seviyesi hızlı bir şekilde artışa geçmekte, daha sonra ise membadaki gibi ortalama $H=0.40$ düzeyinde yatay çizgide seyretmekte ve belirgin bir düşüş yaşamaktadır. Baraja yakın noktalarda su seviyesinin $H=0.42$ seviyesi dolaylarında olduğu görülmektedir. Mansaptaki birçok noktada derinlik artmaktadır. Ölçüm alınan noktalarda grafiklerdeki derinliklerde belirgin azalmaların sebebi rezervuarın sonlu uzunlukta olması ile açıklanmıştır.

SU KURU Hal ($\alpha=0$)Şekil 4.126. Su Kuru Hal ($\alpha=0$) Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırılması

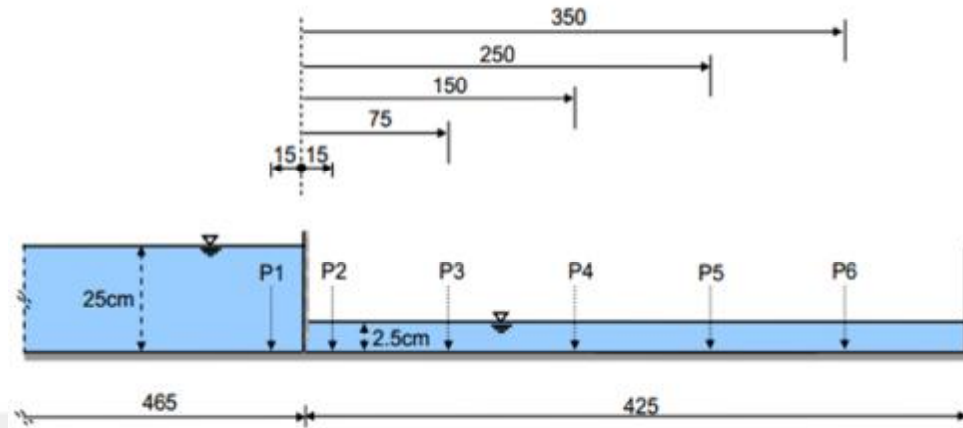
Sonuç olarak P1-P2 ve P4 noktalarında SPH yönteminin deney ve RANS tabanlı Flow-3D sonuçları ile oldukça iyi bir uyum yakaladığı izah edilebilir.



Şekil 4.127. Kocaman (2007) kuru hal ile SPH noktasal seviye değişimi

4.2.8.1. Islak Hal ($\alpha=0.10$) Sonuçları

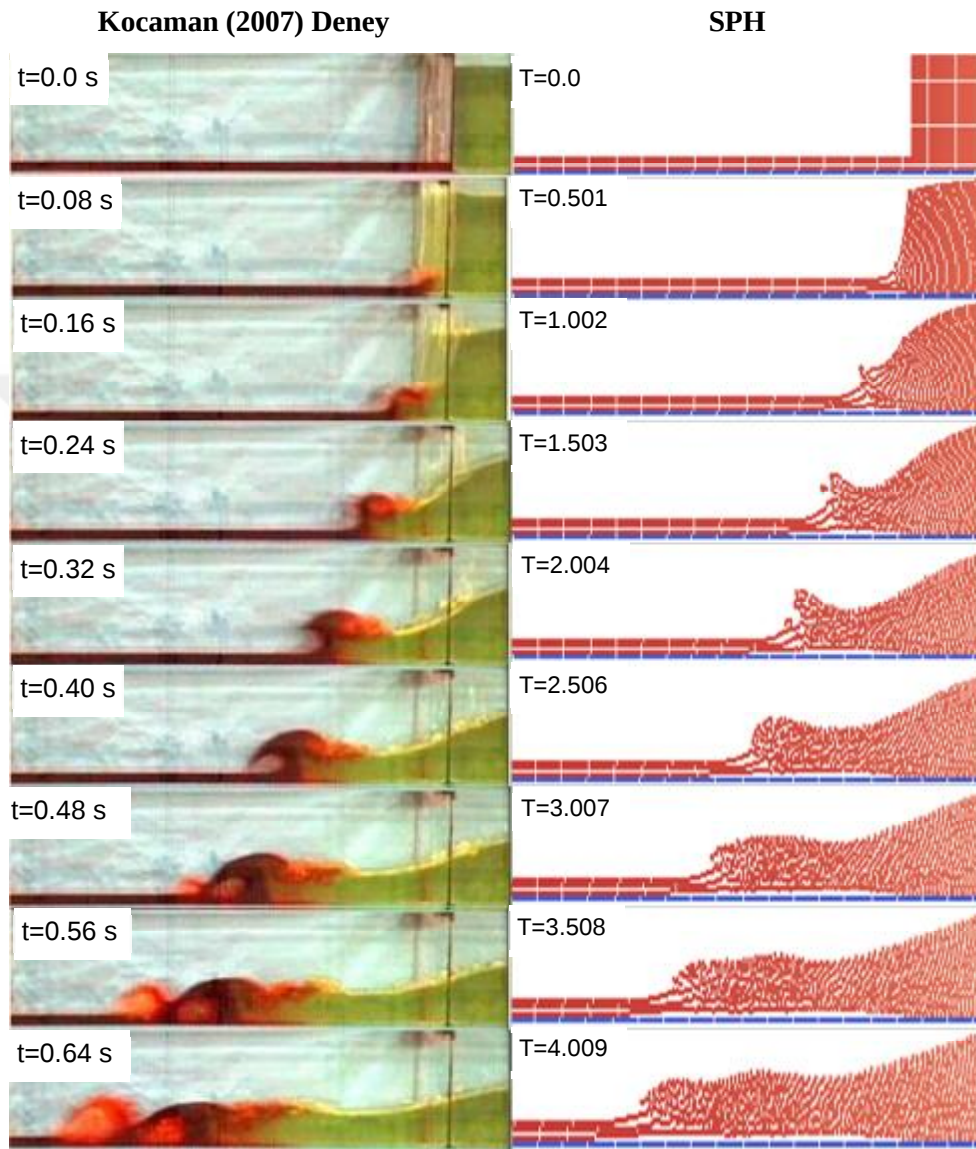
Membada 0.25 m, mansapta ise 0.025 m su bulunmaktadır. Şekil 4.128’de ıslak haldeki ($\alpha=0.10$) deneyi şematiği gösterilmektedir. Kuru hal çalışmasına göre en önemli fark kuru durumda yıkılma sonrası akımın mansap yönünde bir duvar kısmı olmamasına karşın ıslak mansap koşullarında akım duvara çarpıp yansyarak ilerlemesini sürdürmesidir.

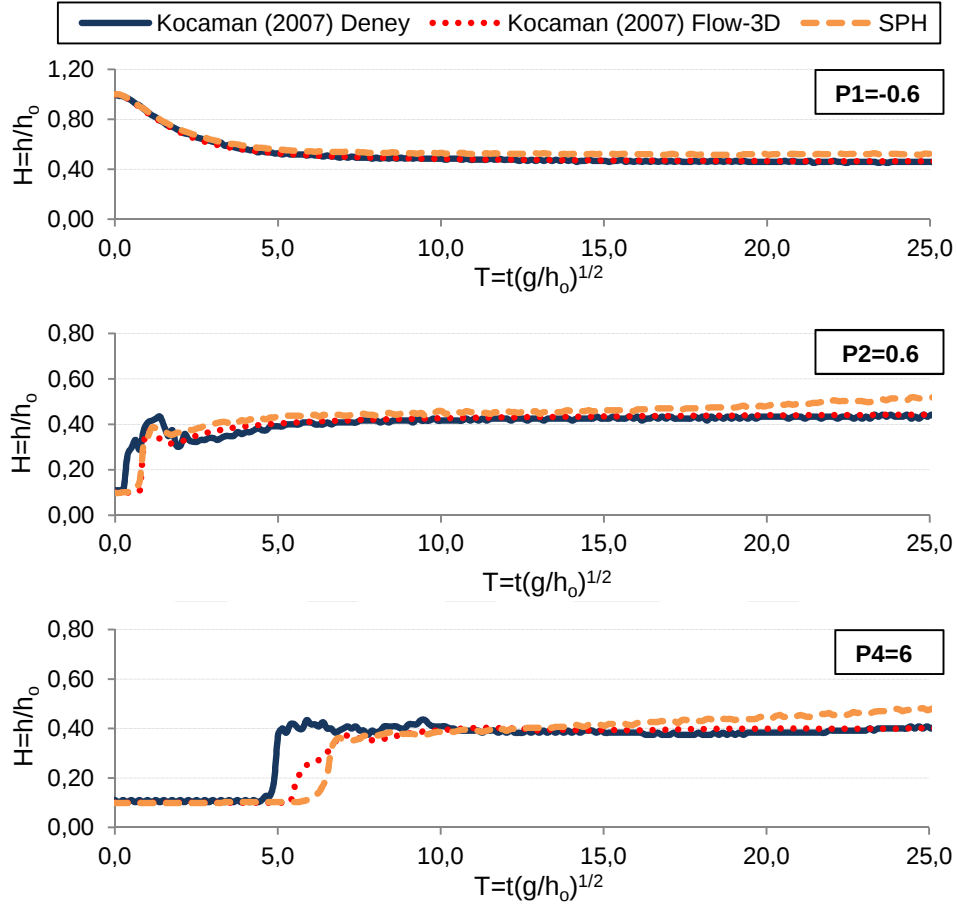


Şekil 4.128. Islak Hal ($\alpha=0.10$) deney şematiği (Kocaman, 2007)

Şekil 4.129 incelenirse ani yıkılma şartlarının oluşması ile birlikte akım kapak altından hareketine başlamakta ve mansaptaki suyu sürüklemek istemektedir. İlk başta mansaptaki su bir direnç gösterse de bir süre sonra şok dalgası mansap yönünde ilerlemesine devam etmektedir. $t=0.02$ s’de deneyde su yüzü profili membadaki suyun mansaptaki su ile karşılaşması nedeniyle dalga önü bir miktar dışa doğru bükülmeye başlamıştır. SPH’ta ise akımın genel görünümü daha çok eksende hafif bir kayma şeklinde kendisini göstermektedir. $t=0.16$ s ile birlikte deneyde kabarma dalgası önü daha yükseğe erişmişken SPH yönteminde daha az eğime sahip bir dalga önü göze çarpmaktadır. İki yöntemde en önemli fark ise $t=0.40$ s ve $t=0.48$ s anlarında sırası ile dalga önü hava girişim bölgesi dalga yapısı ve dalga kırılmasının SPH’ta tam bu davranışları yansıtamamış olmasıdır. Bunun sebebinin yapay viskozite ile bağlantılı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.130’da Kocaman (2007) ile SPH modellemesinin noktasal seviye değişimi irdelenmiştir. $P1=-0.6$ noktası için iki yöntemin sonuçlarının oldukça uyum gösterdiği fark edilebilmektedir. $P2=0.6$ için ise deney verilerinde su yüksekliğinin maksimum noktaya çıkışı daha erken olmaktadır. SPH’taki sıçramalar ve sapmalar parçacık özelliğinden kaynaklanmaktadır.

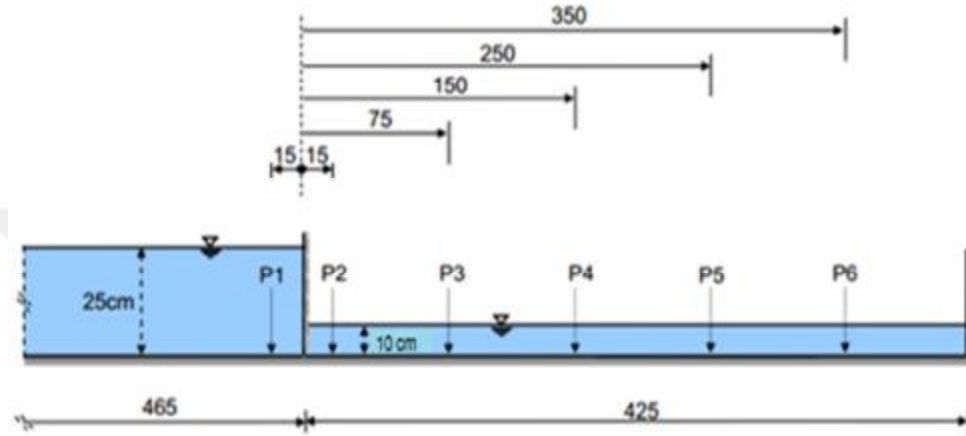
SU Islak Hal ($\alpha=0.10$)Şekil 4.129. Islak Hal ($\alpha=0.10$) Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırılması

SU-SU Islak Hal ($\alpha=0.10$) Noktasal Seviye DeğişimleriŞekil 4.130. Kocaman (2007) ıslak hal ($\alpha=0.10$) ile SPH noktasal seviye değişimi

P4=6 noktasında $T=5$ 'e kadar tüm yöntemlerin birbirleri ile uyumlu olacak sonuçlar ürettikleri görülebilmektedir. $T=5$ 'ten itibaren deney sonuçlarında maksimum seviyeye daha erken ulaşılmakta, en geç SPH verilerinde izlenmektedir. Sonuç olarak su yüzü profili açısından değerlendirildiğinde akım davranışında belirgin değişiklikler var olsa da daha önceden bahsedilen noktalardaki seviye değişimleri birbirlerini doğrulamaktadır.

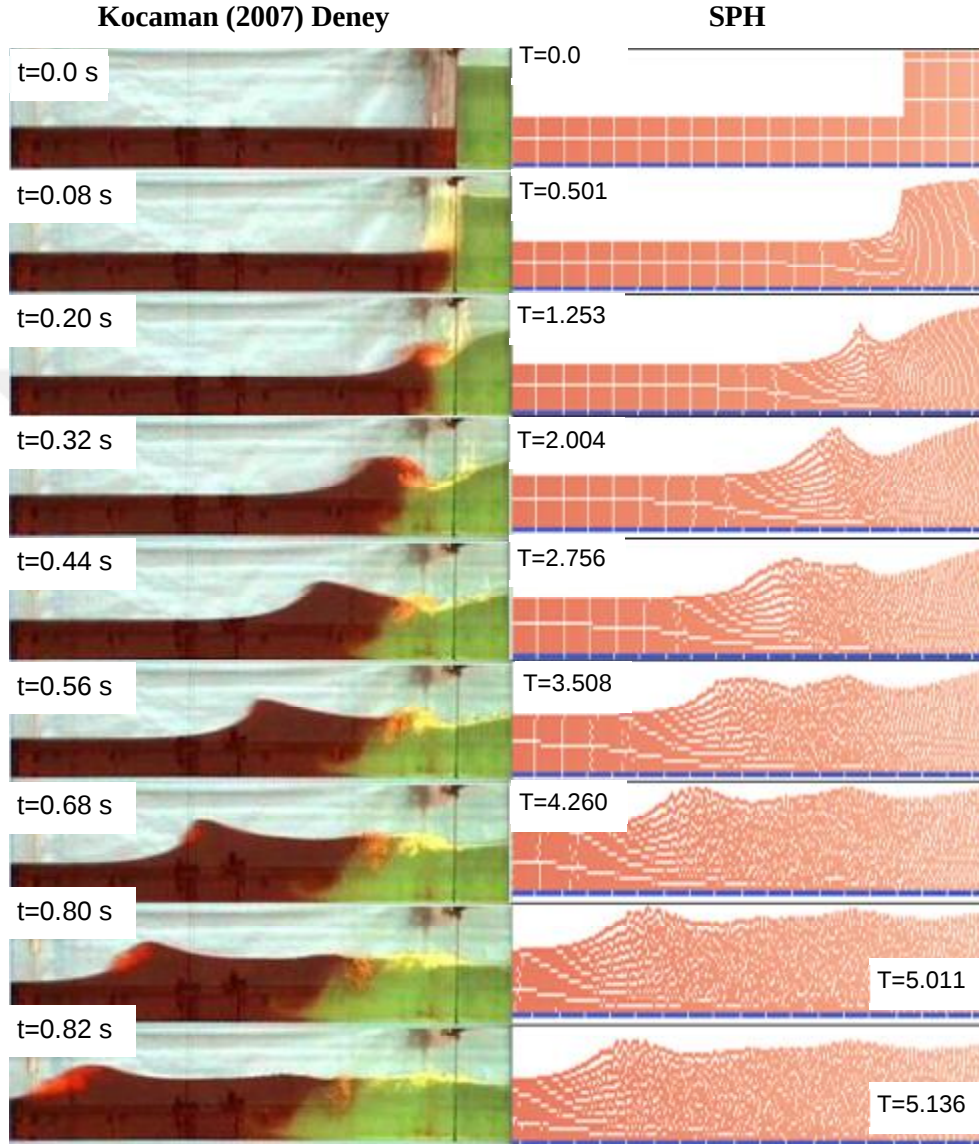
4.2.8.2. Islak Hal ($\alpha=0.40$) Sonuçları

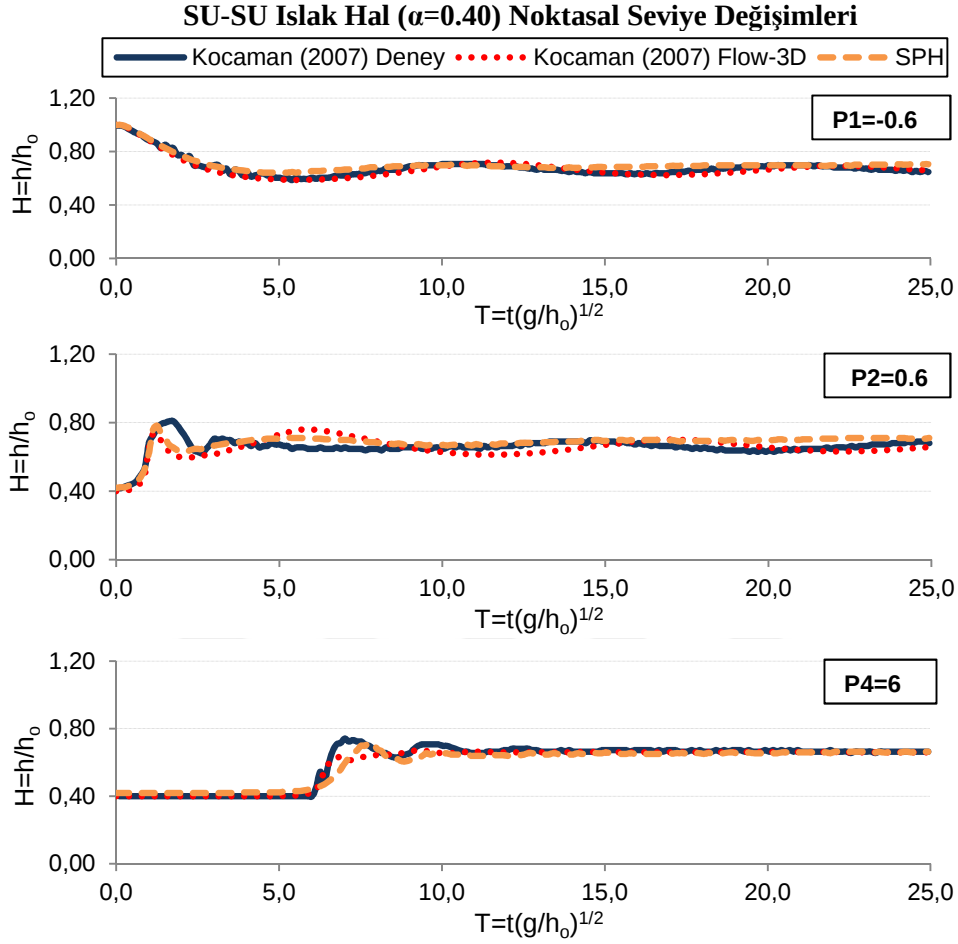
Membada 0.25 m, mansapta ise 0.10 m su bulunmaktadır. Şekil 4.131’de ıslak haldeki ($\alpha=0.40$) deneyi şematiği gösterilmektedir.



Şekil 4.131. Islak Hal ($\alpha=0.40$) deney şematiği (Kocaman, 2007)

Şekil 4.132’deki görüntüler ele alınırsa SPH yönteminin çoğunlukla su yüzü profilini oldukça iyi bir yakınsama ile sağladığı gözlenmektedir. $t=0.08$ s anında yıkılma sonucu oluşan dalga önünün parabolik şekli burada da dikkat çekmektedir. Yıkılmanın ani olması akımda kompleks akım özellikleri meydana getirmekte ve akım dönme hareketine benzeyen bir biçimde mansaptaki suyu sürüklemeye çabalamaktadır. Direnç kırıldığında $t=0.20$ s’de dalga önü daha dik konuma gelmektedir. SPH’ta dalga ucu davranışı büyük oranda tanımlamakla birlikte membaya yönelen uç kısmında farklılık bulunmaktadır. Diğer anlarda da dalga yayılımında benzer anlık görünümeler oluşmuştur. SPH’ın parçacık özelliği ve yapay viskozite teriminden dolayı düzeltilebilecek değişikliklerin olması kaçınılmazdır.

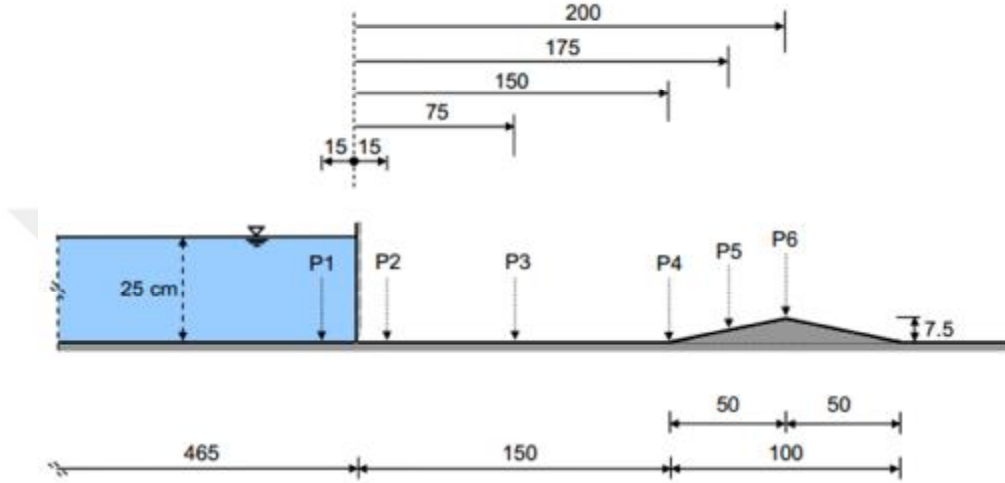
SU Islak Hal ($\alpha=0.40$)Şekil 4.132. Islak Hal ($\alpha=0.40$) Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırılması

Şekil 4.133. Kocaman (2007) ıslak hal ($\alpha=0.40$) ile SPH noktasal seviye değişimi

Yukarıdaki eğrilerde membadaki noktalar için yakınsama oldukça tatmin edici bir durumdayken mansaba doğru ilerledikçe ani su seviyesinin yükseldiği anlar daha geç bir zamanda oluşmaktadır. P4=6 noktasında maksimum su seviyesi $H=0.80$ değerinin altına düşmektedir. $T=10$ 'dan sonra ise tüm yöntemler için çakışan eğriler söz konusu olmaktadır. Buradan derinlik oranı arttıkça her üç yöntemin de sonuçlarının ciddi bir şekilde birbirine benzer olduğu yorumu çıkarılabilir.

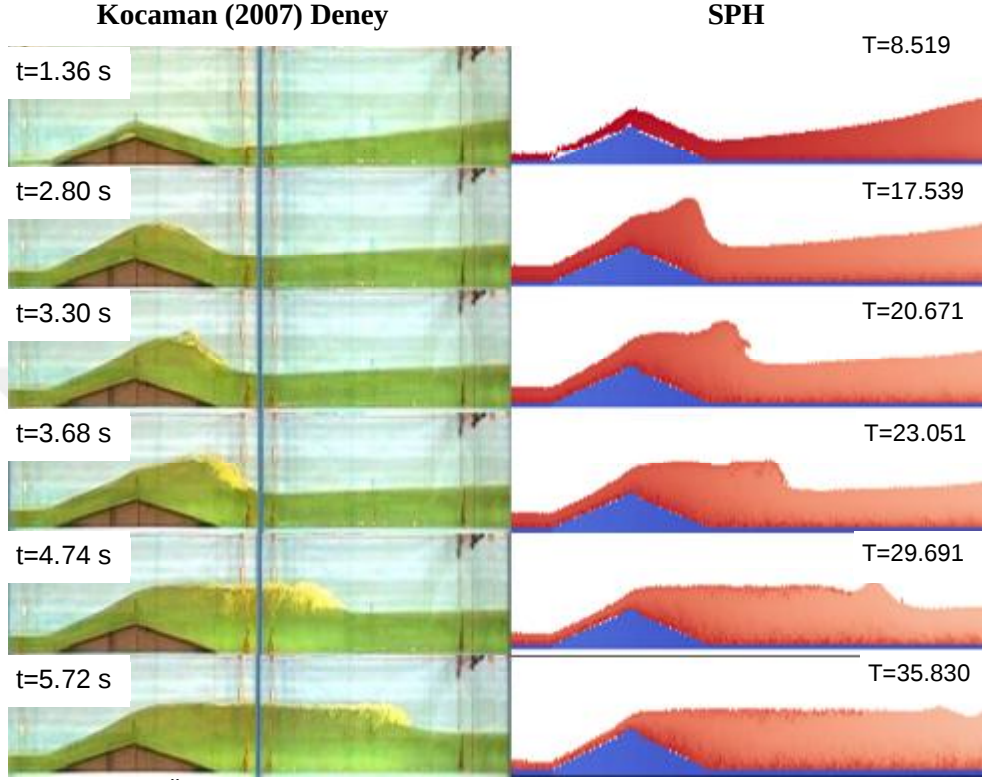
4.2.8.3. Kanal Mansabında Üçgen Eşik Bulunması Sonuçları

Membada 0.25 m su yüksekliği vardır, mansapta ise Şekil 4.134'te görüldüğü gibi üçgen bir eşik yer almaktadır. Mansap kuru halde bulunmaktadır.



Şekil 4.134. Mansapta üçgen eşik olması deney şematığı (Kocaman, 2007)

Gerçek arazi şartları göz önüne alındığında taşkın şok dalgasının yayılması kompleks ve bir o kadar da çözülmesi zor problemler arasındadır. Aslında arazi yatağında değişik geometrilerde yerel düzensizlikler bulunmaktadır. Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere mansapta üçgen eşikğin yer alması durumunda en kritik noktalar engelin memba tarafındaki ilk temas noktası, üçgenin tepe noktası ve bu iki noktanın ortası yani yükselen kısmı olarak değerlendirilmiştir (Kocaman, 2007). Şekil 4.135'e bakılırsa şok dalgası eşiğe vardığında bir kısmı engelden aşmakta, bir kısmı yansımakta ve memba yönünden bir kabarma dalgası oluşmaktadır. Eşik aslında bir savak davranışı göstermektedir. Eşikğin mansap kısmında kritik üstü, memba noktasında kritik akım koşulları meydana gelmektedir.

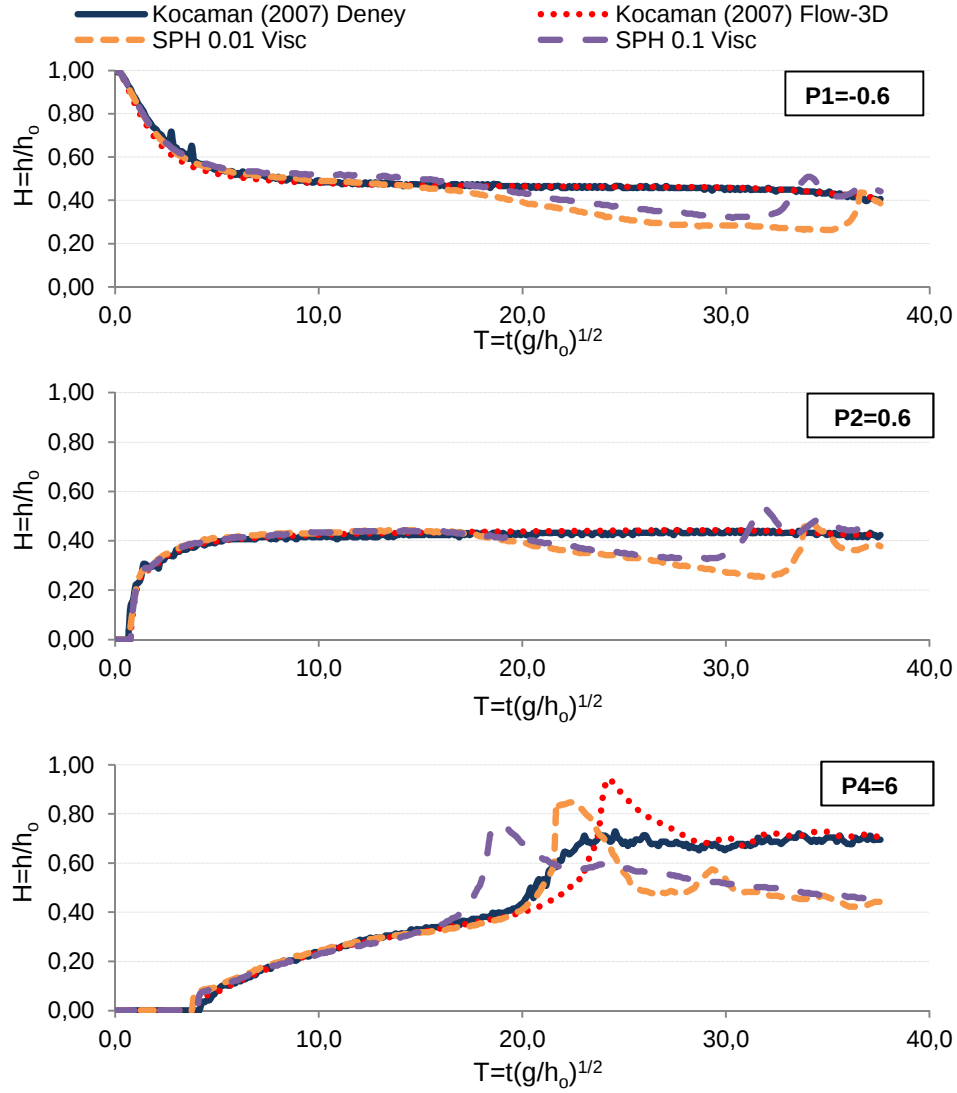
Üçgen Eşik Durumu

Şekil 4.135. Üçgen eşik durumunda Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırması

SPH sonuçlarının genelde iyi bir yakınsama ile problemi çözebildiği görülmekte, $t=1.36$ s anında parçacık kaynaklı sapmalar dikkat çekmektedir. $t=2.80$ s anında SPH’ta dalga arkası dikleşmektedir. $t=3.30$ s ile birlikte dalga arkasındaki eğrilik modelleme sonucunda da belirlemektedir. Sonrasındaki akım davranışları benzer özellikler göstermektedir.

Şekil 4.136’da üçgen eşik için Kocaman (2007) ve SPH seviye değişim eğrileri oluşturulmuştur.

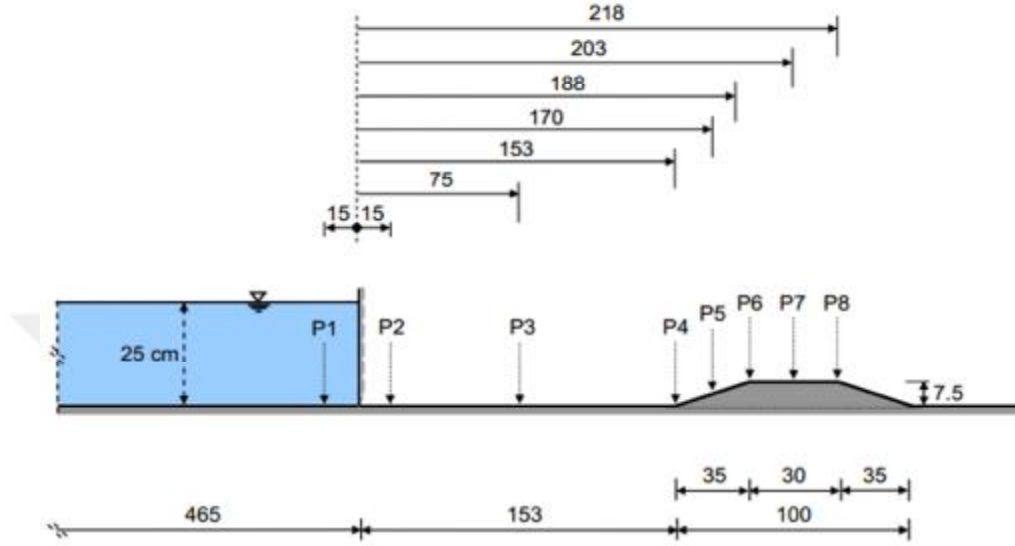
Üçgen Eşik Noktasal Seviye Değişimleri



Şekil 4.136. Kocaman (2007) üçgen eşik ile SPH noktasal seviye değişimi karşılaştırması

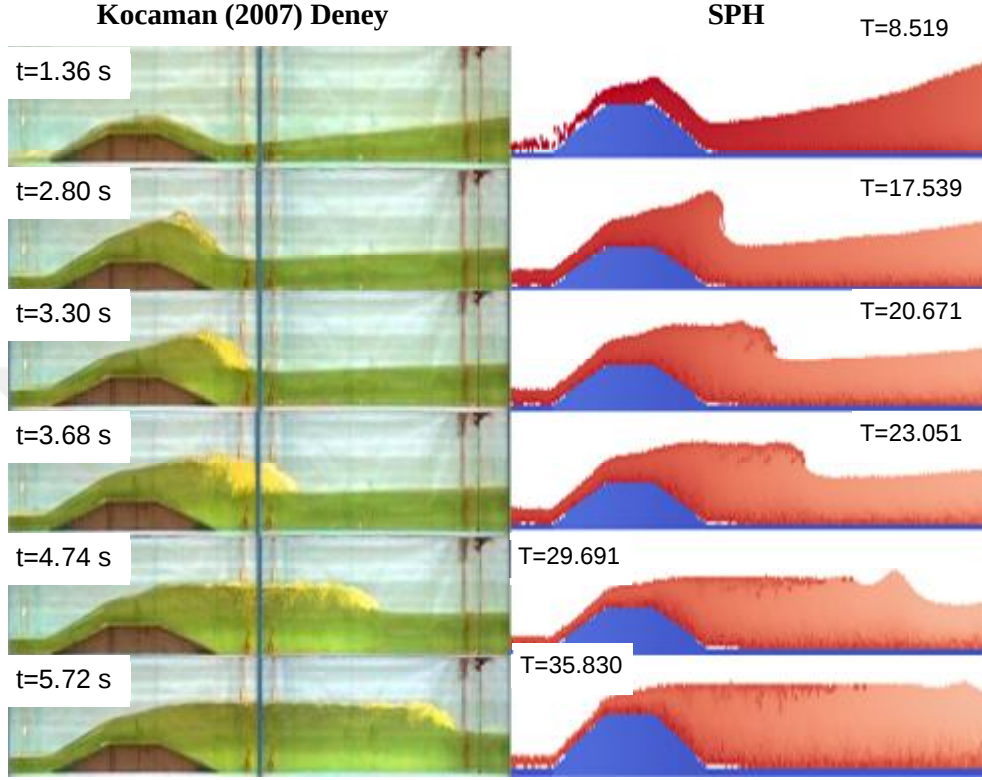
Grafikler kapağa yakın memba ve mansap yönündeki noktalarda uyumlu sonuçlar ortaya koyarken üçgen eşikle karşılaştırılması durumunda Flow-3D modelleme sonucuna benzer fakat düşük H sonucu şeklinde görülmektedir.

4.2.8.4. Kanal Mansabında Trapez Eşik Bulunması Sonuçları



Şekil 4.137. Mansapta trapez eşik olması deney şematifi (Kocaman, 2007)

Üçgen eşik dışında mansapta trapez eşik bulunması durumu için de sorgulama yapılmış SPH ile test edilmeye çalışılmıştır. Üçgen eşikte de olduğu gibi kanalın mansap kısmı sonu kapatılmamış akımın rahatça uzaklaşması düşünülmüştür. Şekil 4.138’de göüldüğü gibi taşkın şok dalgası eşikle karşılaştığında bir kısmı aşabilirken diğer kısmı ters yönde harekete geçmektedir. Eşikten mansap kısmına geçen dalganın eğim nedeniyle hızı düşmekte, aşağı doğru ise tepe noktasından inmesi sebebiyle hızı artmaktadır. Akım koşulları kompleks yapıya sahip olmaktadır.

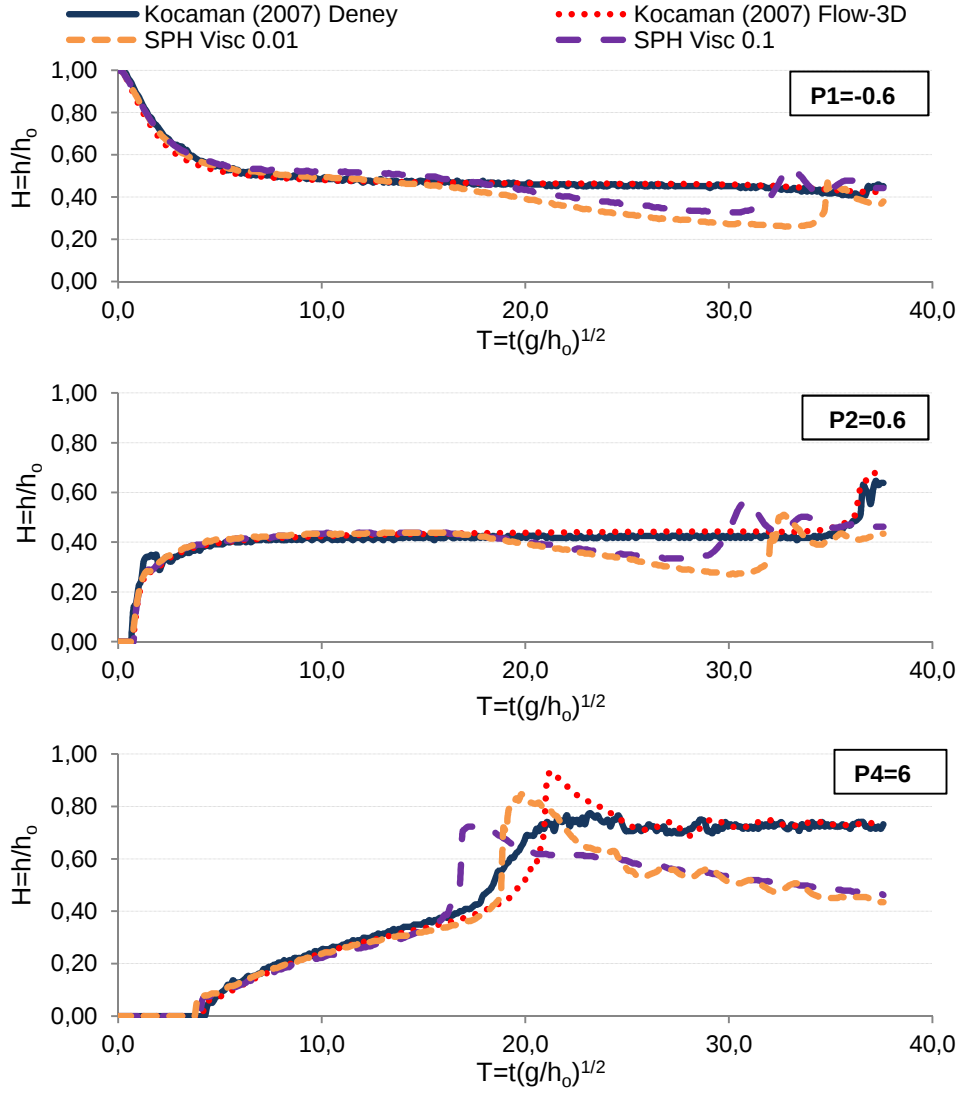
Trapez Eşik Durumu

Şekil 4.138. Trapez eşik durumunda Kocaman (2007) ile SPH Karşılaştırması

Görüntüler incelendiğinde SPH'ta $t=1.36$ s itibari ile parçacık dağılımlarının çok etkin olduğu göze çarpmaktadır. Genel olarak yüzey profilleri çok büyük oranda yakınsama sağlarken akımın türbülans koşulları nedeniyle maruz kaldığı köpüklenme durumları SPH yöntemi ile tam olarak yansıtamamaktadır.

Şekil 4.139'da trapez eşik için Kocaman (2007) ile SPH seviye değişim grafikleri görülmektedir.

Trapez Eşik Noktasal Seviye Değişimleri



Şekil 4.139. Kocaman (2007) trapez eşik ile SPH noktasal seviye değişimi karşılaştırması

Eğrilerde dikkat edileceği üzere trapez eşikle dalğanın karşılaşması sonrasında SPH'ın problemi çözebilme kabiliyeti epey azalmaktadır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada baraj yıkılması akım problemi deneysel ve nümerik yönlerden incelenmeye çalışılmıştır. Baraj yıkılması problemlerinin gerçek arazi şartlarında uygulanmasındaki güçlükler sayısal yöntemlerin bu tip problemlerin çözümünde kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki baş döndürücü gelişmeler problemin çözümü için bilgisayar destekli yazılımların kolay bir şekilde bu problemlere entegre olmasını sağlamıştır. Bu noktadan hareketle uygulanabilecek sayısal yöntemlerin doğrulanması daha doğrusu problemi çözme konusundaki hassasiyetleri test edilmiştir. Akım davranışını daha iyi analiz edebilmek açısından birçok deney yapılmış, deneysel verilerin sayısal sonuçlarla yakınsaklığı irdelenmiştir. Deneyler Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen şeklinde yatay düzlemde konumlandırılmış bir kanalda baraj yıkılması akımının davranışı gözlenmiştir. Kanalin ölçülerinin belirli oranlarda olması sağlanmış, bu doğrultuda membada 0.15 m yüksekliğinde üç tip Newtoniyen akışkan kullanılması tercih edilmiştir. Akışkanlarda farklı yoğunluk esas alınan temel özellik olmuştur. Su, yağ ve tuzlu su seçilen akışkanlar olup; en yoğun akışkan tuzlu su, en düşük yoğunluktaki akışkan yağ olarak değerlendirilmiştir. Bu sayede üç farklı yoğunluğa sahip akışkanın baraj yıkılması akım problemindeki etkisi araştırılmıştır. Oluşturulan deney düzeneğinde barajı tasvir etmesi yönünden bir kapak mekanizması tasarlanmış, makara düzeneğinin ucundaki yükün belirli yükseklikten bırakılması ile ani yıkılma şartları meydana getirilmiştir. Deneylerde yıkılma sonucu oluşan şok dalgasının serbest yüzey profillerinin anlık görünüşleri ve belirlenen noktalardaki zamanla değişen derinlikleri ele alınan fiziksel özelliklerdir. Deney görüntüleri görüntü işleme tekniklerinden faydalanılarak sayısallaştırılmıştır. Bu amaçla sayısallaştırma aşamasında zamanla değişen derinliklerin belirlenebilmesi için bilgisayar algoritması oluşturulmuştur. Deney görüntülerinin iyi bir şekilde elde edilebilmesi amacıyla laboratuvar ortamında

aydınlatma iyileştirilmiş ve kamera ayarları yapılmıştır. Böylece görüntülerin işlemeye uygun hale getirilmesi sağlanmıştır. Tüm deneylerde rezervuar yüksekliği $h_0=0.15$ m olarak değerlendirilmiştir. Mansapta ise kuru ve ıslak koşullar oluşturulmuştur. Islak koşullarda memba-mansap derinlik oranı yani $h/h_0=0.10$, 0.20 ve 0.40 'tır. Üç ayrı değerlendirme sistemi üzerinde çalışma devam ettirilmiştir. Birincisi karışabilen akışkanlar olarak su, yağ ve tuzlu su deneyleri kendi içerisinde biraz önce bahsedildiği gibi kuru ve ıslak yatakta yayılımı araştırılmıştır. İkincisi ise karışamayan akışkanların aynı şekilde ele alınması sağlanmıştır. Su ve yağda tüm durumlar, tuzlu su ve yağda ise sadece 0.20 derinlik oranı yani $\alpha=0.20$ için karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneylerin doğrulanması açısından suyun 0.10 derinlik oranı için uygulanan deney sistemi farklı ve aynı renkli gıda boyası ilave edilmesi ile elde edilen sonuçlar birbirleri ile mukayese edilmiştir. Böylece deneylerin tutarlılığı sınanmaya çalışılmıştır. Gıda boyasının eklenmesiyle yıkılma sonrası akım hareketini takip etme açısından önemli bir avantaj sağlanmıştır. Aynı zamanda akımı rahatsız etmemesi yönünden de önemi büyüktür. Ayrıca kanal sonunda duvar etkisi oluşturan yüzey nedeniyle yansıma konusu da irdelenmeye çalışılmıştır. Üçüncü ve son olarak Kocaman (2007) yaptığı çalışmadaki sonuçlar kullanılarak bu çalışma kapsamında incelenen SPH yönteminin baraj yıkılması akım problemine uygulanması gerçekleştirilmiştir. Kuru, ıslak (0.10 ve 0.40 derinlik oranı), üçgen ve trapez eşik mansap koşullarında kanal yatağında ve genişliğindeki değişimlerin etkisini SPH'nin çözebilmesi noktasındaki gücü araştırılmıştır. Çalışmalarda deney sonuçları ağ yapısına dayanan Flow-3D yazılımı ve biraz önce değinilen günümüzde de yeni yeni uygulama alanı bulan parçacık tabanlı SPH yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tez içeriğinde elde edilen sonuçlar aşağıda tek tek özetlenmeye çalışılmıştır:

- Ø Membada akışkan olarak suyun bulunduğu kuru durumda yıkılmanın başlangıç anı itibari ile nümerik modellemelerin deney sonuçlarına oldukça

başarılı bir şekilde yakınsadığı, fakat zaman ilerledikçe aradaki farklılıkların arttığı dikkat çekmektedir. İlk zamanlarda serbest yüzey bütün yöntemlerde parabolik özellik gösterirken, devamında deneydeki dalga önünün içbükey yapı sergilediği görülmektedir. SPH yönteminde ise içbükey kaynaklı eğriliğin daha fazla olduğu izlenmiştir. Kapağın ani kalkışı hidrostatik olmayan basınç dağılımını çağrıştırmaktadır. Taşkın şok dalgasının yayılımı ile kanal sonundaki duvara çarpma etkisi ile tüm yöntemlerde karakteristik özelliklere bağlı olarak orantılı değişimler fark edilmektedir. Deney sonuçlarında seviyeler diğer yöntemlere nazaran daha yukarıda seyretmektedir. Bunun nedeni genellikle modellemelerde ihmal edilen veya kabullerle değerlendirilen enerji kayıplarının deneylerde etkin olması ile açıklanabilir. Ayrıca yansıyan dalgalarda kabarma dalgası görülmekte ve bu dalganın arkası her bir yöntem açısından değişiklikler ortaya koymaktadır. Çoğunlukla türbülans sebebi ile hızda meydana gelen değişim Flow-3D sonuçlarında ağ yapısı, SPH'ta ise parçacık özellikleri düzensizlikler oluşturmaktadır. Yağ kuru durumunda da suda olduğu gibi başlangıç kısımlarında benzer şartlar hakim olmaktadır. Zamanla parabolik eğrinin eğimi belirgin azalma göstermekte, tümsek halini alamamaktadır. SPH'ta parça kopmaları kaynaklı dalga önü daha dik konuma gelmektedir. Dalganın mansap ucundaki kanal sonu duvar kısmına çarpıp yansıması ile oluşan kabarma dalgasının yüzey profili tüm sonuçlar için oldukça uyumludur. Tuzlu su kuru halinde ise yıkılma sonucu yoğunluk etkisi ile dalga oluşumu sürecinde SPH'ta büyük bir sıçrama göze çarpmaktadır. Mansaba yakın noktalarda diğer akışkanlara göre eğrilerde uyumsuzluklar biraz daha fazla olmaktadır. Ani yükselme ve düşmeler görülmektedir. Duvara çarpma etkisi ile yüzeye daha çok kuvvet uygulanıp, yüzeye tutunma ile akımda kompleks koşullar sıçramayı epeyce arttırmaktadır.

- Ø Üç akışkan için kuru durumun genel bir özetini çıkarırsak $T=10$ civarında yani duvar öncesi ve sonrası akım davranışında büyük farklılıklar

oluşabilmektedir. Membaya yakın noktalarda davranış yönünden birbirine benzer hareketler gözlenmekte, mansaptan uzaktaki özellikle $D=1.00$ m noktasında maksimum akışkan yükseklikleri artmaktadır. Tuzlu suda türbülans oluşumu nedeniyle salınımlar biraz daha artmaktadır. Sonuç olarak mansabın kuru vaziyette olduğu çalışmalarda modelleme yöntemlerinin deney sonuçlarına yakın veriler ortaya koyduğu, bu çalışma kapsamında irdelenen SPH yönteminin akımın davranışını temsil etme konusunda oldukça başarılı olduğu söylenebilmektedir.

Ø Derinlik oranının 0.10 olduğu karışabilen akışkanların ıslak durumlarında akım davranışı kuru hale göre değişiklikler ortaya koymaktadır. Tüm akışkanlar için kapağın ani hareketi ile membadaki akışkan mansaptakini sürüklemeye çalışmakta ve bir dirençle karşılaşmaktadır. Direnci kırılan dalgada kırılma ve jet oluşumu izlenmektedir. Hatta türbülans nedeniyle dalga önünde hava girişim bölgesi dikkat çekmektedir. Hız artmakta dolayısıyla dalganın kinetik enerjisi art arda hidrolik sıçrama yapabilecek düzeye erişebilmektedir. Duvara çarpma ile birlikte kabarma dalgası oluşmakta, beraberinde küçük kırılmalar neticesinde köpük oluşumu da gözlenmektedir. Modelleme kabulleri sebebiyle deneye nispeten Flow-3D ve SPH'ta yüzey profili birbirlerinden birkaç noktada farklılık ortaya koyabilmektedir. Dalga kırılmaları ve köpüklenme olayları süreksizliklerin olduğu yerleri tanımlamaktadır. Viskozite kaynaklı akım hareketi belirgin değişiklikler yaratmaktadır. SPH'ta yapay viskozite teriminin olması eğrilerdeki uzaklaşmaları daha da artırmaktadır. Genel olarak kapağa yani baraja yakın noktalarda akışkan derinliğinin artması daha erken bir zamanda gerçekleşmekte, maksimum akışkan yüksekliğinin daha fazla olduğu görülmektedir.

Ø $\alpha=0.20$ olduğunda membadaki karışabilen akışkana mansaptaki akışkan daha yüksek bir direnç oluşturmaktadır. Bu direnç faktörü ile dalga önü bir miktar ters yöne doğrulabilmektedir. Belirli bir andan itibaren söz konusu

direnç kırılmakta ve dalga önü şekli simetrik bir görünüme sahip olmaktadır. Duvara çarpıp yansıyan dalga sıçrama yaparak memba yönünde harekete geçmektedir. Dikkat edilecek en önemli nokta 0.10'a göre 0.20 oranında yöntemlerin birbirine benzeşimlerinin arttığıdır. İkinci kez sıçrama yani maksimum yüksekliğe ulaşma süresi kapağa yakın noktada daha geç olmakta, fakat daha kısa sürmektedir. Sıçrama olan noktalarda deney verilerinden uzaklaşma daha çok gerçekleşmekte, deney sonuçlarında akım hızının belirli anlarda yüksek olduğu dikkat çekmektedir. 0.40 derinlik oranı için kapağın aniden kalkması sonucunda mansaptaki akışkanlarda meydana gelen direnç belirgin şekilde artmaktadır. Derinlik oranının artması anlık görüntülerde farklılıkları azaltmakta ve yoğunluk etkisinin akım davranışını yansıtması konusundaki hassasiyetini az da olsa düşürmektedir. Grafiklerdeki yakınsaklık düzeyi en çok yağın ıslak deneylerinde görülürken, tuzlu suda aradaki farklılıklar kendini belli etmektedir.

- Ø Sonuçta derinlik oranı arttıkça tüm yöntemlerde yaklaşıklık tatmin edici bir seviyeye çıkmaktadır. Çalışma kapsamında ölçülen SPH sonuçlarının deney ve yazılım sonuçlarına en benzer dataları ürettiği çalışmalar 0.40 derinlik oranında karışabilen yağ deneyinde elde edilmiştir.
- Ø Karışamayan akışkanlarda memba ve mansap yoğunluk değişkenlikleri büyük oranda akım davranışını değiştirmektedir. Membada yoğunluklu daha yüksek Newtoniyen bir akışkan olması durumunda mansaptaki akışkan bir süre direnç göstermeye çalışsa da kanala çarpma etkisi ile oluşan türbülansa yoğunluğu düşük olan akışkan yüzeye geçme çabası içerisinde bulunmaktadır. Dalganın ilerlemesi ile birlikte akışkanlar tamamen ayrılarak tabakalı bir yapı oluşmaktadır. Derinlik oranının 0.20 ve 0.40 olarak artması ile kapağı kaldırılması sonucu dalga önü epeyce yükselmekte belirli bir andan itibaren simetrik yapıya dönüşen kabarma dalgası mansap yönünde ilerlemeye devam etmektedir. Duvara çarpma ile

birlikte yoğunluğu fazla olan akışkan bayağı yüksek noktaya ulaşmakta, hızın artması neticesinde membadaki akışkanı kapak tarafındaki yüzeye çarptırarak hareketin devamında tabakalı bir akım yapısına bürünmesine neden olmaktadır. Membada düşük yoğunluklu akışkanın olduğu çalışmalarda yıkılma sonucunda mansapta durgun haldeki yüksek yoğunluklu akışkan için membadaki akışkan duvar etkisi yaratmakta, mansap yönünde hızını arttırarak yoğunluğu fazla olan akışkanın ufak çaplı dalga kırılmaları şeklinde yayılımını sağlamaktadır. Derinlik oranı arttıkça dalga önü daha da dikleşmektedir. Tuzlu su gibi en yüksek yoğunluktaki akışkanda diğer akışkanlarla karşılaşmasında dalga boyu ve genliği belirgin bir yükselme göstermekte, dalga önü kırılmaları gerçekleşerek akım şartları değişmektedir. Her derinlik oranında ve akışkan yoğunluk farklılıklarına dayanarak tabakalı akım oluşumuna geçiş süreci apayrıdır. Derinlik oranının artması karışamayan akışkanların bir katman şeklinde görünüm alması zamanını uzatmaktadır. Özellikle yağın membada olduğu karşılaşmalarda bu fark daha çok artmaktadır.

- Ø Sonuçta karışamayan akışkanların serbest yüzey profilinde hissedilir bir yakınsama söz konusu ise de ara kesit yoğunluk geçişlerinin deneylerden oldukça farklı olduğu göze çarpmaktadır. Derinlik oranının artması bu farklılıkların azalmasını sağlamaktadır. Genelde SPH yönteminin yoğunluk farkı kaynaklı akışkanların baraj yıkılması sonucu mansapta oluşturduğu anlık görüntülerini ve noktasal seviye değişimlerini tutarlı bir şekilde yansıtabilmektedir.
- Ø En son Kocaman (2007) çalışmasının deney ve RANS tabanlı modelleme sonuçları SPH yöntemi ile ele alınmış ve parçacık kaynaklı kopma ve birbirinden uzaklaşmalar sebebiyle oluşan değişimler haricinde birbirine oldukça yakın verilerle karşılaşılmaktadır. Kapaktan uzaklaştıkça yakınsaklık azalmakta, en iyi sonuçlar ise derinlik oranının artmasında görülmektedir. Kuru şartlardaki ve düşük derinlik oranlarında yüzey

gerilmeleri ve sürtünme etkisi başı çeken faktörler arasındadır. Mansapta üçgen ve trapez eşik olması durumunda engele yakın noktalarda süreksizliklerin fazla olduğu dikkat çekmekte, sapmalar görülmektedir. Bunun dışında SPH'nın engel durumunda da iyi yaklaşıklıkta çözüm üretebildiği söylenebilir.

- Ø Baraj yıkılması akım problemlerinde çözümlenmesi gerekli daha birçok ayrıntı bulunmaktadır. Bu çalışma dahilinde sadece akışkan serbest yüzey profili anlık görünüm ve zamanla noktasal seviye değişimleri incelenen parametrelerdir. Bunlar dışında akıma ait hız ve taşkın dalgasının yayılımı sırasında karşılaştığı engellere uyguladığı kuvvetler, kanal tabanının bir eğime sahip olması halinde akım davranışındaki değişiklikler, taban yapısının pürüzlü olması durumları,...vb. birçok özellik muhakkak ki araştırılmalıdır. Katı madde olması halindeki dalgaın ilerleme şartlarındaki farklılıklar da ele alınabilir. Taşkın dalgası mansapta ilerlerken sadece uzunluk etkisi değil genişlik değişimleri de ele alınarak daralma ve genişleme halleri üç boyutlu olarak çözümlenebilir. SPH gibi yeni kullanılan daha başka yazılım ve yöntemlerin denenmesi ile HAD problemlerinin çözümünde farklı bakış açıları oluşturulabilir. Deney sonuçları da programlarda olduğu gibi değişik fiziksel ölçümlerle kıyaslanarak görüntü işlemenin çözüm tutarlılığı irdelenebilir. Bu çalışmada değerlendirilemeyen basınç sensörleri, hız ölçerleri,...vb. ilaveler sonraki çalışmalar için düşünülebilir.



KAYNAKLAR

- Abay, O., Baykan, N. ve Baykan, N. O., 2015. Tarih Boyunca Barajların Elden Çıkma Nedenleri. 4.Su Yapıları Sempozyumu, 157-166.
- Abid, M. ve Siddiqi, M.U.R., 2010. Multiphase Flow Simulations through Tarbela Dam Spillways and Tunnels. J.Water Resources and Protection, 2: 532-539. doi:10.4236/jwarp.2010.26060
- Adami, S., 2014. Modeling and Simulation of Multiphase Phenomena With Smoothed Particle Hydrodynamics. PhD Thesis, Technische Universitat München, 152s.
- Altomare, C., Crespo, A.J.C., Rogers, B.D., Dominguez, J.M., Gironella, X. ve Gomez-Gesteira, M., 2014. Numerical Modelling of Armour Block Sea Breakwater With Smoothed Particle Hydrodynamics. Computers and Structures, 130: 34-45.
- Altomare, C., Crespo, A.J.C., Dominguez, J.M., Gomez-Gesteira, M., Suzuki, T. ve Verwaest, T., 2015. Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics For Estimation of Sea Wave Impact on Coastal Structures. Coastal Engineering, 96: 1-12.
- Amanifard, N., Hesani, M. ve Rahbar, B., 2011. An SPH Approach For Fluid-Hypoeelastic Structure Interactions With Free Surfaces. Proceedings of The World Congress on Engineering, 3: 1-6.
- Ancey, C. ve Cochard, S., 2009. The Dam-Break Problem for Herschel-Bulkley Viscoplastic Fluids Down Steep Flumes. Journal of Non-Newtonian Fluid Mech., 158: 18-35. doi: 10.1016/j.jnnfm.2008.08.008
- ASDSO, 2012. USA, <http://www.damsafety.org/news/?p=412f29c8-3fd8-4529-b5c9-8d47364c1f3e>
- Atay, B., 2016. Ana Yatakta ve Taşkın Yatağında Bitki Örtüsü Bulunan Açık Kanal Akımlarının Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 115s.

- Aureli, F., Mignosa, P. ve Tomirotti, M., 1999. Dam-Break Flows in Presence of Abrupt Bottom Variations. Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, Graz (Austria) 22-27 August 1999, Technical University Graz.
- Aureli, F., Maranzoni, A. ve Mignosa, P., 2004. Experimental Modeling of Rapidly Varying Flows on Wet Bed and in Presence of Submersible Obstacles. River Flow, 2004, Proceedings of the Second International Conference on Fluvial Hydraulics, 23-25 Giugno, Napoli, Italy.
- Aureli, F., Dazzi, S., Maranzoni, A., Mignosa, P. ve Vacondio, R., 2015. Experimental and Numerical Evaluation of The Force Due to The Impact of a Dam-break Wave on a Structure. Advances in Water Resources, 76: 29-42.
- Barreiro, A., Crespo, A.J.C., Dominguez, J.M. ve Gomez-Gesteira, M., 2013. Smoothed Particle Hydrodynamics For Coastal Engineering Problems. Computers and Structures, 120: 96-106.
- Bell, S. W., Elliot, R.C. ve Chaudry, M. H., 1992. Experimental Results of Two Dimensional Dam-break Flows. Journal of Hydraulic Research, 30 (2): 225-252.
- Bellos, V., Soulis, J.V. ve Sakkas, J.G., 1992. Experimental Investigation of Two-Dimensional Dam-Break Induced Flows. Journal of Hydraulic Research, 30(1): 47-63.
- Berkün, M., 2007. Barajlar, Savaklar ve Su Kuvveti Tesisleri. Birsen Yayınevi, İstanbul, 668s.
- Biscarini, C., Di Francesco, S. ve Manciola, P., 2010. CFD Modelling Approach For Dam Break Flow Studies. Hydrology and Earth System Sciences, 14: 705-718.
- Blaser, F. ve Hager, W.H., 1999. Positive Front of Dambreak Wave on Rough Bottom. Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, Graz (Austria) 22-27 August 1999, Technical University Graz.

- Bozkuş, Z., 2004. Afet Yönetimi İçin Baraj Yıkılma Analizleri. İMO Teknik Dergi, Ankara, 15 (4): 3335-3350.
- Bozkuş, Z. ve Bağ, F., 2011. Çınarcık Barajının Sanal Yıkılma Analizleri. İMO Teknik Dergi, Ankara, 364: 5675-5688.
- Bukreev, V. I., Gusev, A. B. ve Malysheva, A. A., 2003. Experimental Verification of the Gas-hydraulic Analogy with Reference to the Dam-break Problem. Fluid Dynamics, 39 (5): 801-809.
- Bukreev, V. I., 2005. On the Water Depth Breach During a Partial Dam Break. Fluid Dynamics, 40 (5):769-776.
- Bukreev, V. I. ve Gusev, A., 2005. Initial Stage of the Generation of Dam-break Waves. Doklady Physics, 50(4): 200-203.
- Bukreev, V.I., Degtyarev, V.V. ve Chebotnikov, A.V., 2008. Experimental Verification of Methods For Calculating Partial Dam-Break Waves. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 49(5): 754-761.
- Burger, G. ve Rauch, W., 2011. Investigating Smoothed Particle Hydrodynamics in Sewer Hydraulics Modeling. 12th International Conference on Urban Drainage, 11-16 September, Porto Alegre, Brazil, 1-9.
- Canelas, R.B., Alexio, R. ve Ferreira, R.M.L., 2012. SPH-based Numerical Simulation of The Velocity Field in a Dam-Break Flow. Proceedings of MEFTE Conference, Lisbon, 1-10.
- Canelas, R.B., Crespo, A.J.C., Dominguez, J.M., Ferreira, R.M.L. ve Gomez-Gesteira, M., 2016. SPH-DCDEM Model For Arbitrary Geometries in Free Surface Solid-Fluid Flows. Computer Physics Communications, 202: 131-140.
- Chanson, H., 2004a. Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Chanson, H., 2004b. Dam Break Wave Propagation on Abrupt Drops: An Experimental Study. 15th Australian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Australia.

- Chanson, H., 2004c. Dam Break Wave With Energy Dissipation: Two Case Studies. Proc. 29th IAHR Congress, Beijing, Theme C, Tsinghua Univ. Pres, Beijing:311-318.
- Chanson, H., 2005. Analytical Solution of Dam Break Wave With Flow Resistance Application to Tsunami Surges. XXXI IAHR Congress, September 12-16, Seoul, Korea, 3341-3356.
- Chen, Z., Zong, Z., Liu, M.B., Zou, L., Li, H.T. ve Shu, C., 2015. An SPH Model For Multiphase Flows With Complex Interfaces and Large Density Differences. Journal of Computational Physics, 283: 169-188. doi: 10.1016/j.jcp.2014.11.037
- Chung, T.J., 2002. Computational Fluid Mechanics. Cambridge University Press.
- Colagrossi, A. ve Landrini, M., 2003. Numerical Simulation of Interfacial Flows By Smoothed Particle Hydrodynamics. Journal of Computational Physics, 191(2): 448-475.
- Crespo, A.J.C., 2008. Application of The Smoothed Particle Hydrodynamics Model SPHysics to Free –Surface Hydrodynamics. PhD Thesis, Universidade De Vigo, Departamento De Fisica Aplicada, 170s.
- Crespo, A.J.C., Dominguez, J.M., Gomez-Gesteira, M., Barreiro, A. ve Rogers, B.D., 2013. GenCASE XML Guide, 59s.
- Crespo, A.J.C., Dominguez, J.M., Rogers, B.D., Gomez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R., Vacondio, R., Barreiro, A. ve Garcia-Feal, O., 2015. DualSPHysics: Open-source Parallel CFD Solver Based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Computer Physics Communications, 187: 204-216. doi: 10.1016/j.cpc.2014.10.004

- Cubos-Ramirez, J.M., Ramirez-Cruz, J., Salinas-Vazquez, M., Vicente-Rodriguez, W., Martinez-Espinosa, E. ve Lagarza-Cortes, C., 2016. Efficient Two-phase Mass-conserving Level Set Method For Simulation of Incompressible Turbulent Free Surface Flows With Large Density Ratio. *Computers and Fluids*, 136: 212-227. doi: 10.1016/j.compfluid.2016.05.032
- Cunningham, L.S., Rogers, B.D. ve Pringgana, G., 2014. Tsunami Wave and Structure Interaction: An Investigation With Smoothed-Particle Hydrodynamics. *Engineering and Computational Mechanics*, 167(3): 126-138.
- Çalışır, T., 2011. Çarpan Akışkan Jetleri Kullanarak Kanatçıklı Yüzeyler Üzerindeki Isı Transferinin Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği, Ankara, 188s.
- Çankaya, G., 2013. Görüntü İşleme Teknolojisi ile Betonun Bazı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 162s.
- Çomak, B., Beycioğlu, A., Başyigit, C. ve Kılınçarslan, Ş., 2011. Beton Teknolojisinde Görüntü İşleme Tekniklerinin Kullanılması. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS), 16-18 May, Elazığ, Türkiye, 220-227.
- Dalrymple, R. ve Rogers, B., 2006. Numerical Modeling of Water Waves With The SPH Method. *Coastal Engineering*, 53: 141-147. doi: 10.1016/j.coastaleng.2005.10.004
- De Wrachien, D. ve Mambretti, S., 2009. Dam-break Problems, Solutions and Case Studies. WIT Press, UK, 333s.

- Degtyarev, V.V., Ostapenko, V.V., Kovyorkina, O.A. ve Zolotykh, A.V., 2014. Comparison of Theory and Experiment in Simulation of Dam Break in a Rectangular Channel With a Sudden Change in Cross-Sectional Area. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, ISSN 0021-8944, 55(6): 999-1004. doi: 10.1134/S0021894414060108
- Dinçer, A.E. ve Bozkuş, Z., 2015. Baraj Yıkılması Probleminin Düzleştirilmiş Tanecik Hidrodinamiği Yöntemi Kullanılarak Sayısal Olarak İncelenmesi. 4.Su Yapıları Sempozyumu, Antalya, 215-224.
- DSİ, 2014. Baraj Emniyeti Rehberi. Ankara, 75s.
- DSİ, 2017. Türkiye'deki Barajlar. <http://www.dsi.gov.tr>
- Dominguez, J.M., Crespo, A.J.C., Gomez-Gesteira, M. ve Marongiu, J.C., 2011. Neighbour Lists in Smoothed Particle Hydrodynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 67(12): 2026-2042. doi: 10.1002/fld.2481
- Dominguez, J.M., Crespo, A.J.C. ve Gomez-Gesteira, M., 2012. Optimization Strategies For CPU and GPU Implementaitons of a Smoothed Particle Hydrodynamics Method. Computer Physics Communications, 184: 617-627.
- Dominguez, J.M., Crespo, A.J.C., Valdez-Balderas, D., Rogers, B.D. ve Gomez-Gesteira, M., 2013. New Multi-GPU Implementation For Smoothed Particle Hydrodynamics on Heterogeneous Clusters. Computer Physics Communications, 184: 1848-1860.
- Douglas, S., Nistor, I. ve St-Germain, P., 2015. 3-D Multi-Phase Numerical Modelling of Tsunami-Induced Hydrodynamic Loading on Nearshore Structures. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June-3 July, The Hague, the Netherlands, 1-12.
- DualSPHysics User Guide, 2016. User Guide For DualSPHysics Code, DualSPHysics Team, 140s.

- Duarte, R., Ribeiro, J., Boillat, J.L. ve Schleiss, A., 2011. Experimental Study on Dam-Break Waves For Silted-Up Reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*: 1385-1393. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000444
- Encon, 2006. Yusufeli Barajı ve HES Projesi Çevresel Etki Değerlendirmesi Raporu. Ankara, 74s.
- Eren, Y., 2013. Su Taşkınları. www.yasareren.com/ Notları, 67s.
- Falappi, S. ve Galatti, M., 2006. SPH Simulations of Dam-break Waves Over Granular Beds. PhD Thesis, Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale, Roma, 67s.
- Fang, J., Owens, R.G. ve Aurele-Parriaux, L.T., 2006. A Numerical Study of The SPH Method For Simulating Transient Viscoelastic Free Surface Flows. Elsevier Science, 1-29.
- Fourtakas, G., 2014. Modelling Multi-Phase Flows in Nuclear Decommissioning Using SPH. PhD Thesis, The University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, 245s.
- Fourtakas, G. ve Rogers, B.D., 2016. Modelling Multi-phase Liquid-Sediment Scour and Resuspension Induced By Rapid Flows Using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Accelerated With a Graphics Processing Unit (GPU). *Advances in Water Resources*, 92: 186-199. doi: 10.1016/j.advwatres.2016.04.009
ftp://ftp.mde.state.md.us/outgoing/Dam_Safety/
- Furuya, M., Oka, Y., Satoh, M., Lo, S. ve Arai, T., 2014. Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer XIII, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 83: 363-374. doi: 10.2495/HT140321
- Gao, Z., Vassalos, D. ve Gao, Q., 2010. Numerical Simulation of Water Flooding Into A Damaged Vessel's Compartment By The Volume of Fluid Method. *Ocean Engineering*, 37:1428-1442.

- Gingold, R.A. ve Monaghan, J.J., 1977. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-Spherical Stars. *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*, 181: 375-389.
- Gladstone, C., Ritchie, L.J., Sparks, R.S. ve Woods, A.W., 2004. An Experimental Investigation of Density-Stratified Inertial Gravity Currents. *Sedimentology*, 51: 767-789. doi: 10.1111/j.1365-3091.2004.00650.x
- Gomez-Gesteira, M. ve Dalrymple, R.A., 2004. Using a Three-Dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics Method For Wave Impact on a Tall Structure. *Journal of Waterways, Ports, Coasts, and Ocean Engineering*, ASCE, 130(2): 63-69.
- Gomez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A., Crespo, A.J.C. ve Narayanaswamy, M., 2010. User Guide For The SPHysics Code, 104s.
- Gomez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Crespo, A.J.C., Dalrymple, R.A., Narayanaswamy, M. ve Dominguez, J.M., 2012. SPHysics – Development of a Free Surface Fluid Solver- Part 1: Theory and Formulations. *Computer&Geosciences*, 48: 289-299.
- Gomez-Gesteira, M., Crespo, A.J.C., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A., Dominguez, J.M. ve Barreiro, A., 2012. SPHysics- Development of a Free-Surface Fluid Solver- Part 2: Efficiency and Test Cases. *Computer&Geosciences*, 48: 300-307.
- Gong, K., Shao, S., Liu, H., Wang, B. ve Tan, S.K., 2016. Two-phase SPH Simulation of Fluid-Structure Interactions. *Journal of Fluids and Structures*, 65: 155-179. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2016.05.012
- Goutiere, L., Frazao, S.S. ve Zech, Y., 2011. Dam-break Flow on Mobile Bed in Abruptly Widening Channel: Experimental Data. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3): 367-371.
- Gu, S., Zheng, X., Ren, L., Xie, H., Huang, Y., Wei, J. ve Shao, S., 2017. SWE-SPHysics Simulation of Dam Break Flows at South-Gate Gorges Reservoir. *Water*, 9: 387-406.

- Haltaş, İ., Tayfur, G., Elçi, Ş., Güney, Ş. ve Bombar, G., 2013. 3.Ulusal Taşkın Sempozyumu Sunum Notları, 29-30 Nisan, İstanbul, 1-31.
- Harlow, F. H. ve Welch, E., 1965. Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluids with Free Surface. *Phys. Fluids*, 8: 2182.
- He, Z., Wu, T., Weng, H., Hu, P. ve Wu, G., 2017. Numerical Simulation of Dam-Break Flow and Bed Change Considering The Vegetation Effects. *International Journal of Sediment Research*, 32: 105-120. doi: 10.1016/j.ijsrc.2015.04.004
- Heller, V., Bruggemann, M., Spinnenken, J. ve Rogers, B.D., 2016. Composite Modelling of Subaerial Landslide-Tsunamis in Different Water Body Geometries and Novel Insight into Slide and Wave Kinematics. *Coastal Engineering*, 109: 20-41.
- Hieu, P.D., Katsutoshi, T. ve Ca, V.T., 2004. Numerical Simulation of Breaking Waves Using a Two-Phase Flow Model. *Applied Mathematical Modelling*, 28: 983-1005.
- Hirt, C. W. ve Nichols, B. D., 1981. Volume of Fluid (VOF) Method For the Dynamics of Free Boundaries. *J. Comput. Phys.*, 39: 201–225.
- Hu, C. ve Sueyoshi, M., 2010. Numerical Simulation and Experiment on Dam Break Problem. *J. Marine. Sci. Appl.*, 9: 109-114. doi: 10.1007/s11804-010-9075-z
- Ikebata, A. ve Xiao, F., 2016. GPU-accelerated Large-scale Simulations of Interfacial Multiphase Fluids For Real-case Applications. *Computers and Fluids*, 141: 235-249. doi: 10.1016/j.compfluid.2016.03.018
- IOG Mühendislik, 2014. FLOW-3D v11 Academic WatEnv Intro Lectures. FLOW-3D v11 for Water & Environment-Short Academic Training, Ankara, 147s.
- IOG Mühendislik, 2017. FLOW-3D Water and Environmental Brochure, Ankara, 13s, www.flow3d.com

- Janosi, I. M., Jan, D., Szabo, K. G. ve Tel, T., 2004. Turbulent Drag Reduction in Dam-break Flows. *Experiments in Fluids*, 37: 219-229.
- Javadian, M., Kaveh, R. ve Mahmoodinasab, F., 2016. A Study on Experimental Model of Dam Break Problem and Comparison Experimental Results With Analytical Solution of Saint-Venant Equations. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*, ISSN 0976-2612, 7(5): 1239-1245.
- Jonsson, P., Jonsen, P., Andreasson, P., Lundstorm, T.S. ve Hellstrom, J.G.I., 2015. Modelling Dam Break Evolution Over a Wet Bed With Smoothed Particle Hydrodynamics: A Parameter Study. *Engineering*, 7: 248-260.
- Jovanovic, M. ve Djordjevic, D., 1995. Experimental Verification of the MacCormack Numerical Scheme. *Advances in Engineering Software*, 23:61-64.
- Karakoç, M., 2012. Görüntü İşleme, Teknolojiler ve Uygulamaları. Akademik Bilişim, Uşak Üniversitesi, 1-3 Şubat, 136s.
- Karkınlı, A.E., Kurban, T., Kesikoğlu, A. ve Beşdok, E., 2011. CBS’de Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Tabanlı Risk Simülasyonları ve Yönetimi. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 31 Ekim- 4 Kasım, Antalya, 7s.
- Karlı, F. ve Ayhan, E., 2005. Orta ve Yüksek Çözünürlüklü Dijital Kameraların Metrik Performanslarının Belirlenmesi. 10.Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, TMMOB, 28 Mart- 1 Nisan, Ankara, 11s.
- Kırkgöz, M.S., 2013. Akışkanlar Mekaniği. Birsan Yayınevi, Y.0029, ISBN: 978-975-511-598-6, İstanbul, 562s.
- Kocaman, S., 2007. Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 305s.

- Kocaman, S. ve Güzel, H., 2011a. Baraj Yıkılması Taşkın Dalgası Yayılmasının 3-Boyutlu Deneysel ve Nümerik Karşılaştırılması. e-Journal of New World Sciences Academy, ISSN: 1306-3111, 6(1): 406-414.
- Kocaman, S. ve Güzel, H., 2011b. Numerical and Experimental Investigation of Dam-Break Wave on a Single Building Situated Downstream. Proceedings of International Balkans conference on Challenges of Civil Engineering, BCCE, 19-21 May, EPOKA University, Tirana, Albania.
- Kocaman, S. ve Özmen-Çağatay, H., 2012. The Effect of Lateral Channel Contraction on Dam Break Flows: Laboratory Experiment. Journal of Hydrology, 432-433: 145-153.
- Kocaman, S. ve Özmen-Çağatay, H., 2015. Investigation of Dam-Break Induced Shock Waves Impact on a Vertical Wall. Journal of Hydrology, 525: 1-12. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.040
- Kovyrkina, O.A. ve Ostapenko, V.V., 2012. Comparison Between the Theory and the Numerical Experiment in the Problem of Dam Break on a Jump of the Cross-Sectional Area of a Rectangular Channel. Fluid Dynamics, ISSN 0015-4628, 48(3): 291-302. doi: 10.1134/S0015462813030022
- Kulga, Z., 1997. Türkiye Barajlarının Hidrolojik Yönden Güvenlik Kontrolü, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi (392), 21-23.
- Kunugi, T., Hara, K., Nagatake, T. ve Kawara, Z., 2013. Reconsideration of Scaling Measure For Liquid-Column Break Problem. AIP Conference Proceedings, 1547(1): 280-289.
- Kunz, P., Zarikos, I.M., Karadimitriou, N.K., Huber, M., Nieken, U. ve Hassanizadeh, S.M., 2015. Study of Multi-phase flow in Porous Media: Comparison of SPH Simulations With Micro-model Experiments. Transp Porous Med, 1-20. doi: 10.1007/s11242-015-0599-1

- La Rocque, L.A., Imran, J. ve Chaudry, M.H., 2013. Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*: 569-579. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000705
- Lauber, G. ve Hager, W. H., 1997. Positive Front of Dambreak Wave. 27 IAHR Congress San Francisco A:729-739.
- Lauber, G. ve Hager, W. H., 1998. Experiments to Dambreak Wave: Horizontal Channel. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3): 291-308.
- Laigle, P. ve Coussot, P., 1997. Numerical Modelling of Mudflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123 (7): 617-623.
- Landrini, M., Colagrossi, A. ve Tulin, M.P., 2002. A Novel SPH Formulation For 2-Phase Flows. 17th IWWF, 1-7.
- Leal, J., Ferreira, R. ve Cardoso, A., 2006. Dam-break Wave-front Celerity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132: 69–76.
- Lee, E.S., Moulinec, C., Xu, R., Violeau, D., Laurence, D., Stansby, P., 2008. Comparisons of Weakly Compressible and Truly Incompressible Algorithms For The SPH Mesh Free Particle Method. *J. Comput. Phys.*, 227: 8417–8436.
- Li, G., Oka, Y., Furuya, M. ve Kondo, M., 2013. Experiments and MPS Analysis of Stratification Behavior of Two Immiscible Fluids. *Nuclear Engineering and Design*, 265: 210-221.
- Liem, R. ve Kongeter, J., 1999. Application of High-Speed Digital Image Processing to Experiments on Dam Break Waves. *Proc. CADAM Meeting*, Zaragoza, Spain, 399–411.
- Lind, S.J., Xu, R., Stansby, P.K. ve Rogers, B.D., 2012. Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics for FreeSurface flows: A Generalised Diffusion-Based Shifting for Stability and Validations for Impulsive Flows and Propagating Waves. *J. Comp. Phys.*, 231(4): 1499-1523.

- Liu, G.R. ve Liu, M.B., 2003. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method. World Scientific Publishing, ISBN 981-238-456-1, Singapore, 451s.
- Longshaw, S. M. ve Rogers, B.D., 2014. DualSPHysics Pre-processing Interface Documentation, The School of Mechanical, Aerospace & Civil Engineering, The University of Manchester, 10s.
- Longshaw, S. M. ve Rogers, B.D.2015. Automotive Fuel Cell Sloshing Under Temporally and Spatially Varying High Acceleration Using GPU-based Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Advances in Engineering Software, 83: 31-44. doi: 10.1016/j.advengsoft.2015.01.008
- Lucy, L.B., 1977. A Numerical Approach to The Testing of The Fission Hypothesis. Astronomical Journal, 82: 1013-1024.
- Marsooli, R. ve Wu, W., 2014. 3-D Finite-Volume Model of Dam-Break Flow Over Uneven Beds Based on VOF Method. Advances in Water Resources, 70: 104-117. doi: 10.1016/j.advwatres.2014.04.020
- Milli Eğitim Bakanlığı, 2012. Görüntü İşleme Cihazları. Bilişim Teknolojileri Notları, Ankara, 65s.
- Meister, M., 2015. Smoothed Particle Hydrodynamics in Urban Water Management. PhD Thesis, Universitat Innsbruck, 166s.
- Memarzadeh, R., Barani, G. ve Ghaeini-Hessaroeyeh, M., 2015. A Multi-Phase ISPH Model For Simulation of Dam Break Waves on Movable Bed. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June- 3 July, The Hague, the Netherlands, 4s.
- Mohapatra, P. K. ve Bhallamudi, S. M., 1996. Computation of A Dam-Break Flood Wave in Channel Transitions. Advances in Water Resources, 19 (3): 181-187.

- Mokos, A., 2013. Multi-phase Modelling of Violent Hydrodynamics Using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) on Graphics Processing Units (GPUs). PhD Thesis, The University of Manchester, 250s.
- Mokos, A., Rogers, B.D., Stansby, P.K. ve Dominguez, J.M., 2015. Multi-phase SPH Modelling of Violent Hydrodynamics on GPUs. *Computer Physics Communications*, 196: 304-316. doi: 10.1016/j.cpc.2015.06.020
- Monaghan, J.J. ve Kocharyan, A., 1994. SPH Simulation of Multi-Phase Flow. *Computer Physics Communications*, 87: 225-235.
- Monaghan, J.J., 2000. SPH Without a Tensile Instability. *Journal of Computational Physics*, 159(2): 290-311. doi: 10.1006/jcph.2000.6439
- Munoz, A.J., 2010. Three-Dimensional Tsunami Modeling Using GPU-SPHysics. Senior Scholars Thesis, Texas A&M University, 39s.
- Muthukumar, S.N., 2008. A Hybrid Boussinesq-SPH Wave Propagation Model With Applications to Forced Waves in Rectangular Tanks. PhD Thesis, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, 150s.
- Nicholas, M., 2015. Numerical and Experimental Modelling of Dam-break Interaction With A Sediment Bed. PhD Thesis, The University of Nottingham, UK, 224s.
- Nsom, B., Debiante, K. ve Piau, M. J., 2000. Bed Slope Effect on Dam Break Problem. *Journal of Hydraulic Research*, 38 (6): 459-464.
- Nsom, B., 2002. Horizontal Viscous Dam-Break Flow: Experiments and Theory *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (5): 543-546.
- Obernhuber, P., Schöberl, P. ve Melbinger, R., 2005. Dam Surveillance Practice. 2nd Experts Seminar, 30 May-2 June, Austria.
- Oertel, M. ve Bung, D.B., 2012. Initial Stage of Two-Dimensional Dam-Break Waves Laboratory Versus VOF. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1): 89-97. doi: 10.1080/00221686.2011.639981
- Orman ve Su İşleri Bakanlığı, 2016. DSİ 2016 Yılı Performans Programı. Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 208s.

- Orman ve Su İşleri Bakanlığı, 2017. Ormancılık ve Su Şurası Raporu. Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 867s.
- Osher, S. J. ve Fedkiw, R. P., 2002. Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces. Springer-Verlag.
- Quecedo, M., Pastor, M., Herreros, M. I., Merodo, J. A. F. ve Zhang, Q., 2005. Comparison of Two Mathematical Models for Solving the Dam Break Problem Using the FEM Method. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 194: 3984-4005.
- Özbulut, M., 2008. İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiğinde Bir ve İki Boyutlu Uygulamalar. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 53s.
- Özbulut, M., 2013. İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Yöntemi ile Serbest Su Yüzeyle Şiddetli Akış Problemlerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 122s.
- Özmen-Çağatay, H. ve Kocaman, S., 2009. Baraj Yıkılması Taşkın Dalgalarının Mansapta Oluşturacağı Su Yüzü Profillerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, ISSN 1019-1011, 24(1-2): 99-110.
- Özmen-Çağatay, H., Kocaman, S. ve Güzel, H., 2014. Investigation of Dam-break Flood Waves In a Dry Channel With a Hump. Journal of Hydro-Environment Research, 8: 304-315. doi: 10.1016/j.jher.2014.01.005
- Paredes, R.J. ve Imas, L., 2013. Application of Multiphase SPH to Fluid Structure Interaction Problems. 9th International SPHERIC Workshop, June 03-05, Paris, France, 1-9.
- Park, G.M., Yoon, H.S. ve Kim M.I., 2016. Effect of Liquid Density on Particulate Flow in Dam Break. WSEAS Transactions on Fluid Mechanics, 11: 69-75.

- Pathak, A. ve Raessi, M., 2016. A 3D, fully Eulerian, VOF-based Solver to Study The Interaction Between Two Fluids and Moving Rigid Bodies Using The Fictitious Domain Method. *Journal of Computational Physics*, 311: 87-113. doi: 10.1016/j.jcp.2016.01.025
- Postacchini, M., Othman, I.K., Brocchini, M. ve Baldock, T.E., 2014. Sediment Transport and Morphodynamics Generated By a Dam-Break Swash Uprush: Coupled and Uncoupled Modeling. *Coastal Engineering*, 89: 99-105. doi: 10.1016/j.coastaleng.2014.04.003
- Rezavand, M. ve Taeibi-Rahni, M., 2015. Numerical Simulation of Multiphase Flows Using Projection Method. *Applied Mathematics in Engineering, Management and Technology*, 3(4): 277-287.
- Razavitoosi, S.L., Ayyoubzadeh, S.A. ve Valizadeh, A., 2014. Two-phase SPH Modelling of Waves Caused By Dam Break Over a Movable Bed. *International Journal of Sediment Research*, 29(3): 344-356.
- Ritter, A., 1892. Die Fortpflanzung der Wasserwellen. *Vereine Deutscher Ingenieure Zeitschrift*, 36(2): 947-954.
- Robb, D.M. ve Vazquez, J.A., 2015. Numerical Simulation of Dam-Break Flow Using Depth-Averaged Hydrodynamic and Three-Dimensional CFD Models. 22nd Canadian Hydrotechnical Conference, April 29- May 2, Montreal, Canada, 1-10.
- Rogers, B.D., Dalrymple, R.A. ve Stansby, P.K., 2009. Simulation of Caisson Breakwater Movement Using 2-D SPH. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1): 135-141.
- Rostami, M. ve Siosemarde, M., 2015. Human Life Saving By Simulation of Dam Break Using Flow-3D (A Case Study: Upper Gotvand Dam). *Trends in Life Sciences, Dama International*, ISSN: 2319-4731, 4(3): 308-316.
- Rudvan, B., 2002. Toprak Dolgu Barajlarda Yarık Oluşumu ve Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 133s.

- Sarno, L., Caravetta, A., Martino, R. ve Tai, Y.C., 2013. Pressure Coefficient in Dam-Break Flows of Dry Granular Matter. *Journal of Hydraulic Engineering*: 1126-1133. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000772
- Sethian, J. A., 1999. *Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science*. Cambridge University Press.
- Shakibaeinia, A. ve Jin, Y.C., 2011. A Mesh-free Particle Model For Simulation of Mobile-bed Dam Break. *Advances in Water Resources*, 34: 794-807. doi:10.1016/j.advwatres.2011.04.011
- Shao, S. ve Lo, E.Y.M., 2003. Incompressible SPH Method For Simulating Newtonian and non-Newtonian Flows With a Free Surface. *Advances in Water Resources*, 26(7): 787-800.
- Shao, S.Z., 2013. *Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling of Two-Phase Flow For Understanding Geyser Phenomena in Urban Stormwater System*. PhD Thesis, The University of Kentucky, 193s.
- Shige-eda, M. ve Akiyama, J., 2003. Numerical and Experimental Study on Two-Dimensional Flood Flows with and without Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (10): 817-821.
- Shigematsu, T., Liu, P. L.F. ve Oda, K., 2004. Numerical Modeling of the Initial Stages of Dam-break Waves. *Journal of Hydraulic Research*, 42 (2):183-195.
- Skillen, A., Lind, S., Stansby, P.K. ve Rogers, B.D., 2013. Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) With Reduced Temporal Noise and Generalised Fickian Smoothing Applied to Body–Water Slam and Efficient Wave–Body Interaction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 265: 163-173. doi: 10.1016/j.cma.2013.05.017

- Soares-Frazao, S., Bueger, C. D., Dourson, V. ve Zech, Y., 2002. Dam-break Wave Over a Triangular Bottom Sill. Proceedings River Flow Conference, Louvain-la-Neuve, Belgium, September 2002, Balkema, 1: 437-442.
- Soares-Frazao, S., Lories, D., Taminiau, S. ve Zech, Y., 2003. Dam-break Flow in a Channel with a Sudden Enlargement. Proceedings 30th IAHR Congress, Thessaloniki, Greece, 24-29 August, C-II: 221-228.
- Soares-Frazao, S., Noel, B. ve Zech, Y., 2004. Experiments of Dam-break Flow in the Presence of Obstacles Proceedings of River Flow 2004 Conference, Naples, Italy, 2: 911-918.
- Soares-Frazao, S., Canelas, R., Cao, Z., Cea, L., Chaudhry, M.H., Moran, A.D., El Kadi, K., Ferreira, R., Cadorniga, I.F., Gonzalez-Ramirez, N., Greco, M., Huang W., Imran, J., Coz, J.L., Marsooli, R., Paquier, A., Pender, G., Pontillo, M., Puertas, J., Spinewine, B., Swartenbroekx, C., Tsubaki, R., Villaret, C., Wu, W., Yue, Z. ve Zech, Y., 2012. Dam-Break Flows Over Mobile Beds: Experiments and Benchmark Tests For Numerical Models. Journal of Hydraulic Research, 50(4): 364-375.
- Souders, D., Kariya, J. ve Burnham, J., 2013. Validation of a Hybrid 3-Dimensional and 2-Dimensional Numerical Flow Modeling Technique For an Instantaneous Dam-Break. Proceedings of Flow-3D Conference: 1-7.
- Stansby, P. K., Chegini, A. ve Barnes, T. C. D., 1998. The initial Stages of Dam-break Flow. J. Fluid Mech., 374: 407-424.
- St-Germain, P., Nistor, I., Townsend, R. ve Shibayama, T., 2014. Smoothed-Particle Hydrodynamics Numerical Modeling of Structures Impacted By Tsunami Bores. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1-17. doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000225
- Stoker, J. J., 1957. Water Waves. Interscience Publishers, Wiley, Newyork, 333-341.

- Sun, X. ve Sakai, M., 2016. Numerical Simulation of Two-phase Flows in Complex Geometries By Using The Volume-of-Fluid/Immersed-Boundary Method. *Chemical Engineering Science*, 139: 221-240. doi: 10.1016/j.ces.2015.09.031
- Thürey, N., 2003. A Single-Phase Free Surface Lattice Boltzmann Method. Masters Thesis, University of Erlangen, Nuremberg, Germany.
- Turhan, E., Kocaman, S. ve Özmen-Çağatay, H., 2016. Taşkın Dalgası Yayılımının İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Metodu ile Modellenmesinde Farklı İşlemci Ünitelerinin Çözüm Performanslarının Karşılaştırılması. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), October 26-28, Adana, Turkey, 1224-1232.
- Vacondio, R., 2010. Shallow Water and Navier-Stokes SPH-like Numerical Modelling of Rapidly Varying Free-Surface Flows. PhD Thesis, Università degli Studi di Parma, Gennaio, 170s.
- Valdez-Balderas, D., Dominguez, J.M., Rogers, B.D. ve Crespo, A.J.C., 2013. Towards Accelerating Smoothed Particle Hydrodynamics Simulations For Free Surface Flows on Multi-GPU Clusters. *J. Parallel Distrib. Comput.*, 73: 1483-1493.
- Valiani, A., Caleffi, V. ve Zanni, A., 2002. Case Study: Malpasset Dam-Break Simulation Using a Two-Dimensional Finite Volume Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (5): 460-472.
- Vazquez, J.A. ve Roncal, J.J., 2009. Testing River2D and Flow-3D For Sudden Dam-Break Flow Simulations. *Proceedings of Canadian Dam Association Annual Conference*, Whistler, BC Canada: 44-55.
- Versteeg, H., Malalasekera, W. ve Malalasekera, W., 1996. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Prentice Hall.
- Vischer, D. L. ve Hager, W. H., 1998. *Dam Hydraulics*. John Wiley and Sons Ltd., England, 271-304.
- XML Guide For DualSPHysics, 2016. DualSPHysics Team, 95s.

- Xu, R., 2009. An Improved Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics Method and Its Application in Free-Surface Simulations. PhD Thesis, The University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, 207s.
- Xu, X., 2016. An Improved SPH Approach For Simulating 3D Dam-break Flows With Breaking Waves. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 311: 723-742.
- Yang, C., Lin, B., Jiang, C. ve Liu, Y., 2010. Predicting Near-Field Dam-Break Flow and Impact Force Using a 3D Model. *Journal of Hydraulics Research*, 48(6):784-792. doi:10.1080/00221686.2010.531099
- Ye, Z., Zhao, X. ve Deng, Z., 2016. Numerical Investigation of The Gate Motion Effect on a Dam Break Flow. *J Mar Sci Technol*, 21: 579-591. doi: 10.1007/S00773-016-0374-1
- Ye, Z. ve Zhao, X., 2017. Investigation of Water-Water Interface in Dam Break Flow With a Wet Bed. *Journal of Hydrology*, 548: 104-120. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.055
- Yenigün, K. ve Sepetçioğlu, M.Y., 2012. Güncel Baraj Hasarlarının Analizi. Uluslararası Katılımlı III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, ESOGU, 10-12 Ekim, Eskişehir, 393-401.
- Yıldırım, K.S., İnce, C. ve Kalaycı, T.E., 2003. Görüntü İşleme Notları, Ege Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 64s.
- Yilmaz, O., Korobkin, A. ve Iafrati, A., 2013. The initial Stage of Dam-break Flow of Two Immiscible Fluids. *Linear Analysis of Global Flow. Applied Ocean Research*, 42: 60-69. doi: 10.1016/j.apor.2013.04.003
- Yurtal, R., 2004. Su Yapıları Ders Notları. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Adana, 186s.

- Yusuf, F., Lang, G. ve Garrett, M., 2009. Modernization of BC Hydro's Inundation Modelling and Mapping: A High Resolution, Flexible and Responsive Approach. Proceedings of Canadian Dam Association Annual Conference, Whistler, BC Canada, 3-8 October, 1-14.
- Zhang, T., Fang, F. ve Feng, P., 2017. Simulation of Dam/Leeve- Break Hydrodynamics With a Three-Dimensional Implicit Unstructured- Mesh Finite Element Model. Environ Fluid Mech, 1-21. doi: 10.1007/s10652-017-9530-3
- Zienkiewicz, O. C. ve Taylor, R. L., 2000. Finite Element Method: Volume 3, Fluid Dynamics (Finite Element Method), John Wiley & Sons.
- Zorluer, İ., 1999. Toprak Dolgu Barajlarda Borulanma ve Bir Borulanma Göçmesi: Teton Barajı. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi (1): 135-146.
- <http://artstudyguide.blogspot.com.tr/p/blog-page-4.html>
- <http://www.aycicekyagi.net/>
- <http://blogs.agu.org/>
- <http://www.dailymail.co.uk/>
- <https://www.flow3d.com/>
- <http://www.geol.ucsb.edu/>
- http://home.global.co.za/~fluid/GWIS%20Fluid_Viscosity_Table.htm
- <http://www.hurriyet.com.tr/>
- <http://www.mittomaden.com.tr/>
- <http://www.netfotograf.com/>
- <http://www.nikon.com.tr/>
- <http://pt.slideshare.net/farahsevilla/>
- <http://www.sabah.com.tr/>
- <http://tinytu.be/w/FlrsnoSkbfo/>
- <http://tr.euronews.com/>
- <http://www.turknikon.com/>

<http://www.viskozimetre.com/>

<http://www.walker-institute.ac.uk>

<https://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>

<http://www.wise-uranium.org/>



ÖZGEÇMİŞ

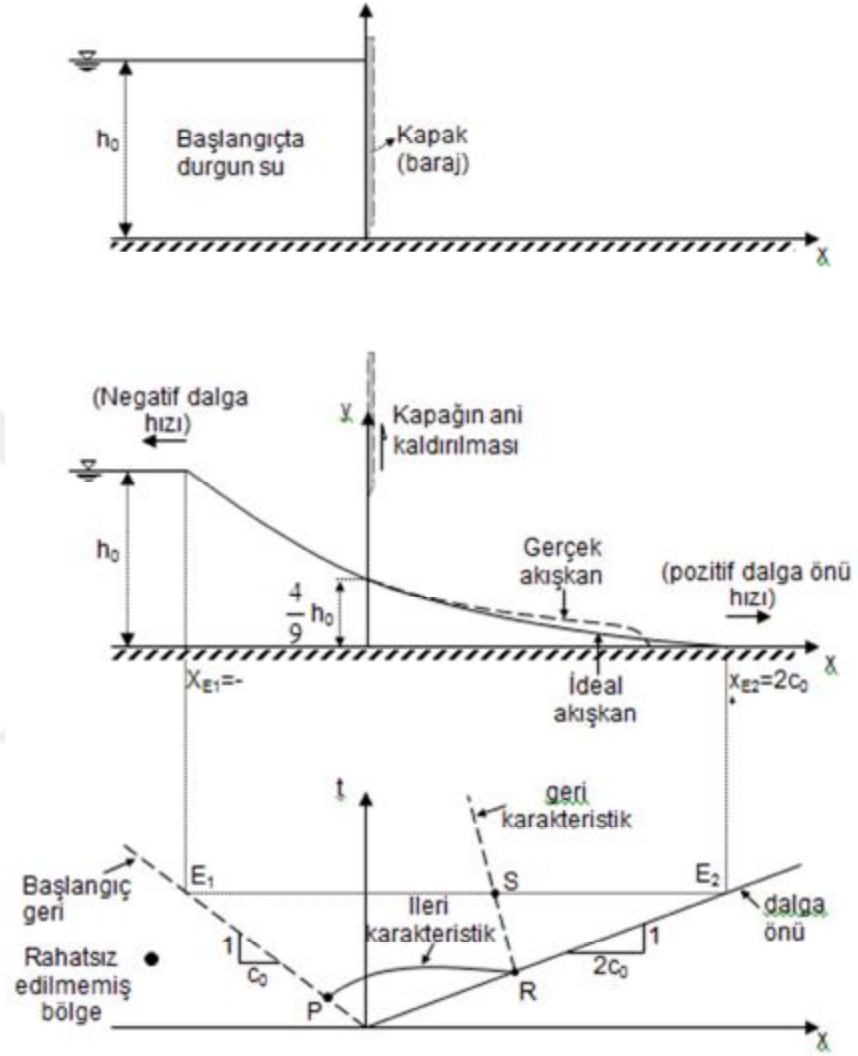
06/01/1980 yılında Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 1999 yılında başladığı Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu ve aynı yıl Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ortaalan Matematik Öğretmenliği alanında tezsiz yüksek lisansa başladı ve 2005 yılında eğitimini tamamladı. 2005 ile 2008 yılları arasında özel sektörde, 2009 ile 2012 yılları arasında çeşitli kamu kuruluşlarında İnşaat Mühendisi olarak çalıştı. 2008 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisansını 2012 yılında tamamladı ve aynı yıl Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2013 yılı başında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Halen aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya ve doktora eğitimine devam etmektedir.



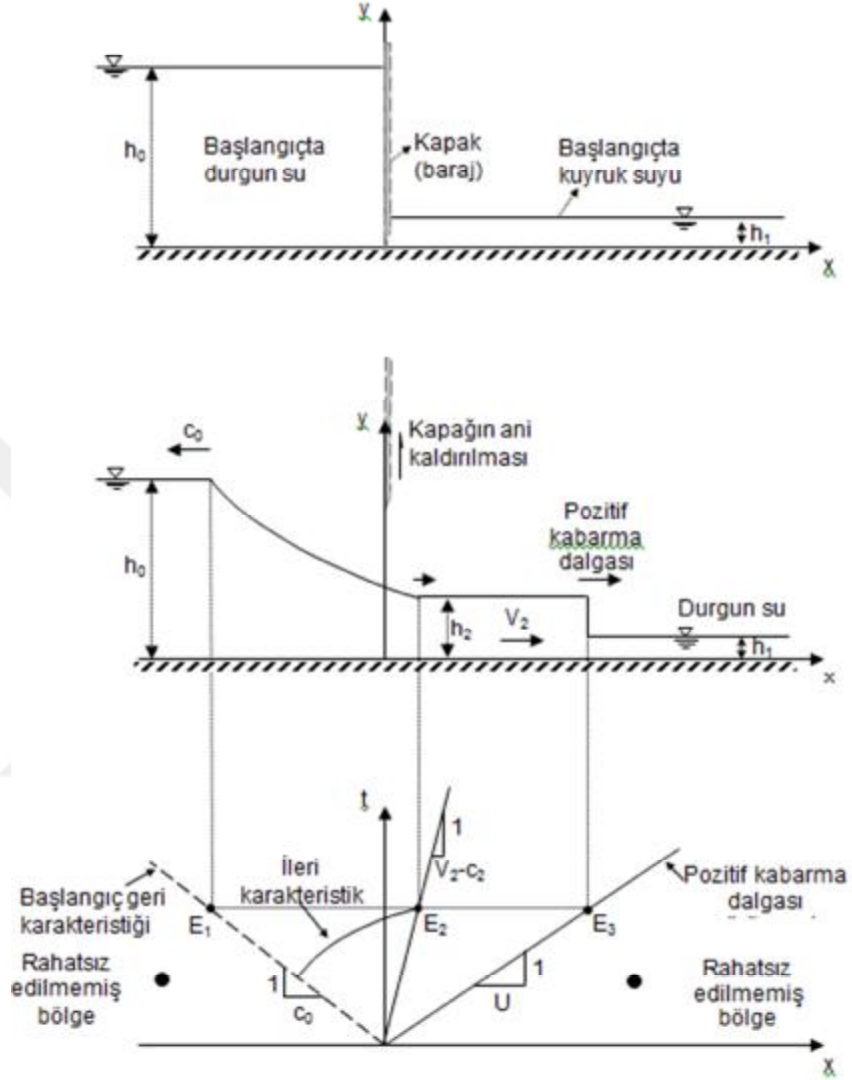
EKLER



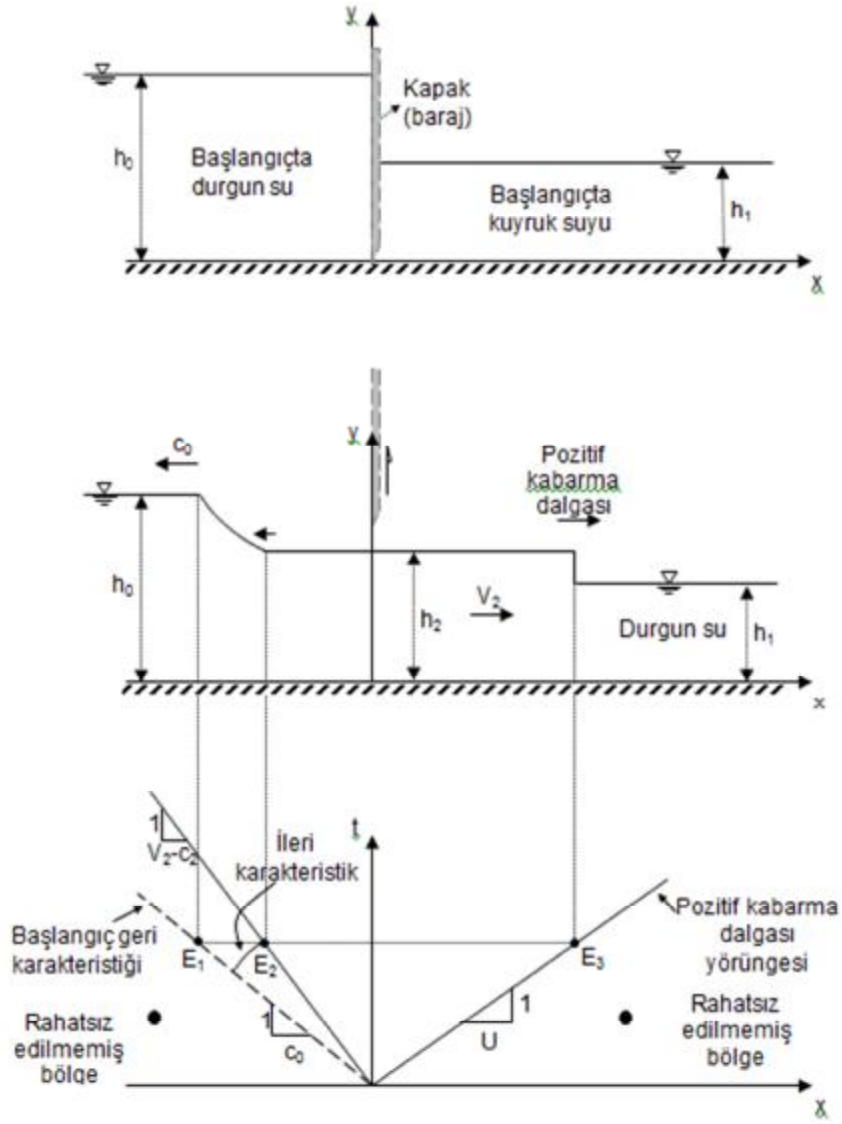
EK A. Baraj Yıkılması Problemi Akım Şematiği



Şekil 1. Mansabın kuru olduğu baraj yıkılması problemi (Chanson, 2004a)



Şekil 2. Mansabın ıslak olduğu baraj yıkılması problemi ($h_1/h_0 < 0.1383$) (Chanson, 2004a)



Şekil 3. Mansabın ıslak olduğu baraj yıkılması problemi ($h_1/h_0 > 0.1383$) (Chanson, 2004a)

EK B. Akışkan Viskozite Tabloları

Çizelge 1. Akışkan Viskozite Tablosu (http://home.global.co.za/~fluid/GWIS%20Fluid_Viscosity_Table.htm)

Units	Fluid	Temp. degrees C	Salinity ppm (mg/L)	Density kg/m ³	cP(centipoise) (mPa.s)	P(poise)	Dynamic Viscosity (Pa.s) (Ns/m ²) (kg/ms)	sSt(centistokes)	Kinematic Viscosity (m ² /s)
8.09305E-01	-5.34139E03 Water	4	0	999.9730	1.5680	0.0157	1.568E-03	1.57	1.568E-06
8.24493E-01	-5.72400E03 Water	0	2000	1.001.4892	1.7921	0.0179	1.792E-03	1.79	1.789E-06
8.05855E-01	-5.25402E03 Water	5	2000	1.001.5762	1.5188	0.0152	1.519E-03	1.52	1.516E-06
7.90467E-01	-4.86576E03 Water	10	2000	1.001.2817	1.3077	0.0131	1.308E-03	1.31	1.306E-06
7.77832E-01	-4.56224E03 Water	15	2000	1.000.6569	1.1404	0.0114	1.140E-03	1.14	1.140E-06
7.67532E-01	-4.34044E03 Water	20	2000	999.7414	1.0050	0.0101	1.005E-03	1.01	1.005E-06
7.67163E-01	-4.33329E03 Water	20.2	2000	999.6992	1.0000	0.0100	1.000E-03	1.00	1.000E-06
7.59230E-01	-4.20138E03 Water	25	2000	998.5664	0.8937	0.0089	8.937E-04	0.89	8.950E-07
7.52672E-01	-4.14504E03 Water	30	2000	997.1564	0.8007	0.0080	8.007E-04	0.80	8.030E-07
7.47680E-01	-4.17144E03 Water	35	2000	995.5317	0.7225	0.0072	7.225E-04	0.73	7.257E-07
7.44160E-01	-4.28056E-03 Water	40	2000	993.7085	0.6560	0.0066	6.560E-04	0.66	6.602E-07

Çizelge 1. (Devamı)										
7.42097E-01	-4.47242E-03	Water	45	2000	991.7006	0.5988	0.0060	5.988E-04	0.60	6.038E-07
7.41556E-01	-4.74700E-03	Water	50	2000	989.5194	0.5494	0.0055	5.494E-04	0.56	5.552E-07
7.42685E-01	-5.10432E-03	Water	55	2000	987.1748	0.5064	0.0051	5.064E-04	0.51	5.130E-07
7.45710E-01	-5.54436E-03	Water	60	2000	984.6751	0.4688	0.0047	4.688E-04	0.48	4.761E-07
7.50938E-01	-6.06714E-03	Water	65	2000	982.0279	0.4355	0.0044	4.355E-04	0.44	4.435E-07
7.58758E-01	-6.67264E-03	Water	70	2000	979.2398	0.4061	0.0041	4.061E-04	0.41	4.147E-07
7.69638E-01	-7.36088E-03	Water	75	2000	976.3166	0.3799	0.0038	3.799E-04	0.39	3.891E-07
7.84126E-01	-8.13184E-03	Water	80	2000	973.2639	0.3635	0.0036	3.635E-04	0.37	3.735E-07
8.02852E-01	-8.98554E-03	Water	85	2000	970.0867	0.3355	0.0034	3.355E-04	0.35	3.458E-07
8.26527E-01	-9.92196E-03	Water	90	2000	966.7896	0.3165	0.0032	3.165E-04	0.33	3.274E-07
8.55940E-01	-1.09411E-02	Water	95	2000	963.3773	0.2994	0.0030	2.994E-04	0.31	3.108E-07
8.91963E-01	-1.20430E-02	Water	100	2000	959.8539	0.2838	0.0028	2.838E-04	0.30	2.957E-07
7.90467E-01	-4.86676E-03	Sea Water	10	40000	1.031.3128	1.3460	0.0135	1.346E-03	1.31	1.305E-06
7.67532E-01	-4.34044E-03	Sea Water	20	40000	1.028.9016	1.0700	0.0107	1.070E-03	1.04	1.040E-06

Çizelge 2. Akışkanların Yoğunluk ve Viskozite Değerleri (www.walker-institute.ac.uk)

Units	degrees C	kg/m ³	cP(centipoise) (mPa.s)	P(poise)	(Pa.s) (Ns/m ²) (kg/ms)	sSt(centistokes)	(m ² /s)
Fluid	Temp.	Density	Dynamic Viscosity	Dynamic Viscosity	Dynamic Viscosity	Kinematic Viscosity	Kinematic Viscosity
Acetone	20	790.0000	0.4100	0.0041	4.100E-04	0.52	5.190E-07
Turpentine	20	870.0000	1.4900	0.0149	1.490E-03	1.71	1.713E-06
Benzene	20	879.0000	0.7440	0.0074	7.440E-04	0.85	8.464E-07
Oil SAE 30	20	890.0000	350.0000	3.5000	3.500E-01	393.26	3.933E-04
Olive Oil	20	910.0000	91.5000	0.9150	9.150E-02	100.55	1.005E-04
Sunflower Oil	20	920.0000	64.0730	0.6407	6.407E-02	69.64	6.964E-05
Linseed Oil	20	920.0000	47.0000	0.4700	4.700E-02	51.09	5.109E-05

Substance	Density (kg/m ³)
Water	998
Sea Water	1025
Air	1.2
Wood	~ 850
Steel	7810
Gold	19320
Castor oil	956
Milk	1030

Substance	Density (kg/m ³)	Temperature of measurement (°C)
Water	1000	4
Water	998	20
Water	992	40
Water	983	60
Water	971	80