

Ada YILMAZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK 2024



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA
TEZİ

İTERPOLASYONLU PARÇACIK
HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE
HİDROELASTİK AKIŞKAN-YAPI
ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN
NUMERİK ANALİZİ

Ada YILMAZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

OCAK 2024





**İTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE
HİDROELASTİK AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN
NUMERİK ANALİZİ**

Ada YILMAZ

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

Ada YILMAZ tarafından hazırlanan “İTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE HİDROELASTİK AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN NUMERİK ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa DEMİRCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

İkinci Danışman: Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Mustafa DEMİRCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Hatice ÇAĞATAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Neslihan SEÇKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hasan GÜZEL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 09/01/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Ada YILMAZ

09/01/2024

İTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE
HİDROELASTİK AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN NUMERİK
ANALİZİ
(Doktora Tezi)

Ada YILMAZ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Bu çalışmada, karmaşık hidroelastik AYE problemlerinin analizinde kullanılmak üzere çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimine dayanan GİB ile hızlandırılmış bir numerik kodun geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Mevcut numerik birleşimde akışkan alanı Roe'nun yaklaşık Riemann çözücüsüne dayanan Riemann-İPH formülasyonu ile modellenirken, katı alan yapay viskozite ve kum-saati kontrol şemaları ile kararlılık seviyesi artırılmış BLİPH formülasyonu kullanılarak analiz edilmektedir. Mevcut çoklu-çözünürlük algoritması akışkan ve katı alanlar için farklı başlangıç parçacık aralığı değerlerinin kullanımına dayanmaktadır. Hesaplama verimliliğini arttırmak amacıyla çoklu zaman adım kullanımına ek olarak akışkan ve katı alanlarda sırasıyla Simplektik ve tek-adımlı Yarı-Örtük Euler zaman integrasyonu formülasyonlarının kullanıldığı hibrit bir zaman integrasyonu yaklaşımı benimsenmektedir.

Mevcut numerik birleşimin çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği, bir konsol kirişin serbest titreşimi, elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi ve farklı konfigürasyonlardaki baraj yıkılması akımlarının elastik yapılar ile etkileşimi olmak üzere çeşitli kıyaslama durumları kullanılarak araştırılmıştır. Mevcut model hesaplamaları, analitik çözümler, deneysel ölçümler ve diğer numerik model hesaplamalarının yanı sıra, karşılaştırmalarda referans olarak kullanılması amacıyla geliştirilen geleneksel zaman integrasyonu yaklaşımlı ZSİPH-BLİPH ve Riemann-İPH-BLİPH birleşimlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin kullanılan tüm çözünürlük oranlarında, akışkan-katı arayüzeyinde herhangi bir kararlılık sorunu yaşamadan akışkan ve katı alanlar için düzgün basınç ve gerilme alanları üretebildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, mevcut hibrit zaman integrasyon şemasının çoklu zaman adımı yaklaşımıyla birlikte ilgili kıyaslama durumlarında problem karakteristiklerine bağlı olarak farklı seviyelerde hızlanmalar sağladığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Akışkan-Yapı Etkileşimi, hidroelastisite, İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği, Riemann, Bütünsel Lagrange, çoklu-çözünürlük
Sayfa Adedi : 112
Danışman : Prof. Dr. Mustafa DEMİRCİ
İkinci Danışman : Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN

NUMERICAL ANALYSIS OF HYDROELASTIC FLUID-STRUCTURE
INTERACTION PROBLEMS BY SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS
METHOD
(Ph. D. Thesis)

Ada YILMAZ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2024

ABSTRACT

In this study, it is aimed to develop a GPU-accelerated numerical code based on multi-resolution Riemann-SPH-TLSPH coupling for use in the analysis of complex hydroelastic FSI problems. In the present numerical coupling, while the fluid domain is modeled by Riemann-SPH formulation based on Roe's approximated Riemann solver, the solid one is analyzed by TLSPH formulation stabilized by artificial viscosity and hourglass control schemes. The present multi-resolution algorithm is based on the use of different initial particle spacing for fluid and solid domains. In addition to multiple time stepping, a hybrid time integration approach, based on the Symplectic and one-step Semi-Implicit Euler time integration formulations for fluid and solid domains, respectively, is used to improve numerical efficiency.

The accuracy and efficiency of the present numerical coupling are investigated using several benchmark cases, including the free oscillating of a cantilever beam, hydrostatic water column on an elastic plate, and interaction of dam-break flows in various conditions with elastic solids. In addition to analytical solutions, experimental measurements, and other numerical computations in literature, the present model computations are also compared with the numerical results obtained from the reference analyses developed based on WCSPH-TLSPH and Riemann-SPH-TLSPH couplings with conventional time integration scheme.

The obtained results show that, in all used resolutions, the developed multi-resolution Riemann-SPH-TLSPH reproduced smooth pressure and stress fields for fluid and solid domains without any numerical stability issue around the fluid-structure coupling and provided reasonable accuracy in hydroelastic deformations. Additionally, it is observed that the present hybrid time integration scheme with multiple time stepping increased computational efficiency at different rates depending on problem characteristics by comparison with reference analyses.

Key Words : Fluid-Structure Interaction, hydroelasticity, Smoothed Particle
Hydrodynamics, Riemann, Total Lagrangian, multi-resolution
Page Number : 112
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa DEMİRCİ
Second Supervisor : Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalıőmam boyunca bilgi birikimi ve tecrübeleriyle bana yol gösterip desteklerini esirgemeyen kıymetli danışman hocalarım Prof. Dr. Mustafa DEMİRCİ ve Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN'a,

Tüm tez sürecim boyunca gösterdiği sabır, anlayış ve destek ile yaptığı birçok fedakârlık için sevgili eşim Eylem GÜMÜŐ YILMAZ'a,

Doktora dönemim boyunca birlikte yol yürüdüğüm, her anımda yanımda olup hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan kıymetli mesai arkadaşlarım ve hocalarım Arő. Gör. Dr. Yakup TÜREDİ, Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Musab ERDEM, Arő. Gör. Kaan DAL, Arő. Gör. Sezer SANCAR ve Arő. Gör. Halil Çağrı YILMAZ'a,

Tüm eğitim hayatım boyunca gösterdikleri fedakarlıklarla bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan tüm aile üyelerime,

Teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. NUMERİK MODEL	9
2.1. Standart İPH Formülasyonu	9
2.1.1. Çekirdek yaklaşımı	9
2.1.2. Parçacık yaklaşımı	12
2.1.3. Ağırlık fonksiyonu.....	13
2.2. Akışkan Dinamiklerinin Modellenmesi	14
2.2.1. Korunum denklemleri.....	14
2.2.2. Standart İPH ayrıklaştırması.....	15
2.2.3. Geleneksel ZSİPH modeli	15
2.2.4. Riemann-İPH modeli.....	17
2.2.5. Akışkan alanının zaman adımı değerinin belirlenmesi.....	19
2.3. Katı Dinamiklerinin Modellenmesi.....	20
2.3.1. Korunum denklemleri.....	20
2.3.2. BLİPH ayrıklaştırması.....	21
2.3.3. Katı alanının zaman adımı değerinin belirlenmesi.....	24
2.4. Sınır Koşulları	25

	Sayfa
2.5. Akışkan-Yapı Birleşim Şeması	26
2.6. Zaman İntegrasyonu (Zİ)	29
2.6.1. Simplektik zaman integrasyon şeması.....	32
2.6.2. Yarı-Örtük Euler zaman integrasyon şeması.....	34
2.7. Komşu Parçacık Arama Şeması	35
2.8. GİB Tabanlı Programlama Modeli.....	37
2.9. Geliştirilen Bilgisayar Kodundaki Bir Numerik Döngünün Özeti.....	39
2.9.1. Zİ1 numerik döngüsü	40
2.9.2. Zİ2 numerik döngüsü	42
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	44
3.1. Deney Düzeneği	44
3.2. Ölçüm Tekniği.....	46
3.3. Elastik Engel Elastisite Modülünün Tahmin Edilmesi	48
3.4. Deney Sonuçları	49
4. NUMERİK ANALİZLER.....	53
4.1. Konsol Kirişin Serbest Titreşimi Problemi	54
4.2. Elastik Bir Plaka Üzerindeki Durağan Su Kütlesi	61
4.3. Baraj Yıkılması Akımının Elastik Bir Geçit ile Etkileşimi.....	68
4.4. Kuru Bir Yatak Üzerindeki Baraj Yıkılması Akımının Elastik Bir Kapak ile Etkileşimi	75
4.5. Islak Bir Yatak Üzerindeki Baraj Yıkılması Akımının Elastik Bir Engel ile Etkileşimi	82
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	92
5.1. Sonuçlar.....	92
5.2. Öneriler.....	94
KAYNAKLAR	96
EKLER.....	106

Sayfa

EK-1. Geliştirilen numerik koda ait bazı kernel fonksiyonlarının sadeleştirilmiş özetleri	107
EK-2. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminde katı alan için yapay viskozite teriminin kullanılmadığı analiz sonuçları	109
EK-3. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin analizlerinde vortisite gelişimi	110
DİZİN	112



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Mevcut tez çalışması kapsamında numerik analizlerde kullanılan zaman integrasyonu yaklaşımları.....	32
Çizelge 3.1. Elastik engel Elastisite modülünün yaklaşık olarak hesaplanması.....	49
Çizelge 4.1. Konsol kirişin serbest titreşimi problemi için gerçekleştirilen numerik analizler	55
Çizelge 4.2. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminde farklı çözünürlükteki BLIPH hesaplamalarının Kök Ortalama Kare Hata oranları.....	61
Çizelge 4.3. Bir elastik plaka üzerindeki durağan su kütlesi problemi için gerçekleştirilen analizler.....	63
Çizelge 4.4. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminde hesaplama verimliliği karşılaştırmaları	68
Çizelge 4.5. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi problemi için gerçekleştirilen analizler.....	69
Çizelge 4.6. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminde hesaplama verimliliği karşılaştırmaları	74
Çizelge 4.7. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi problemi için gerçekleştirilen analizler.....	76
Çizelge 4.8. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminde hesaplama verimliliği karşılaştırmaları	82
Çizelge 4.9. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi problemi için gerçekleştirilen analizler.....	83
Çizelge 4.10. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminde hesaplama verimliliği karşılaştırmaları.....	90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ağırlık fonksiyonu ve kompakt destek alanı	11
Şekil 2.2. Wendland ağırlık fonksiyonu ve birinci türevinin αD katsayısından bağımsız değerleri	13
Şekil 2.3. Bir boyutlu Riemann problemlerinin uzay-zaman düzlemindeki dalga yapısı	17
Şekil 2.4. Mevcut çoklu-çözünürlüklü birleşim şemasındaki parçacık etkileşimlerinin şematik bir görünümü.....	28
Şekil 2.5. GPK, GSK ve MESK zaman integrasyon şemalarında işlem adımları	31
Şekil 2.6. Komşu parçacık arama şemasında problem alanının hücrelere ayrıklaştırılması	36
Şekil 2.7. GİB üzerindeki iş parçacığı, blok ve ızgara yapıları	38
Şekil 2.8. Z1 zaman integrasyonu yaklaşımı ile gerçekleştirilen analizlere ait sadeleştirilmiş akış şeması.....	41
Şekil 2.9. Z2 zaman integrasyonu yaklaşımı ile gerçekleştirilen analizlere ait sadeleştirilmiş akış şeması.....	43
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik bir görünümü ve ölçüm noktalarının (M1-M4) konumu	45
Şekil 3.2. Bir resim karesini oluşturan piksellerin şematik bir görünümü.....	46
Şekil 3.3. Görüntü işleme tekniği ile elastik engel üzerindeki noktasal yer değişimi ölçümleri.....	47
Şekil 3.4. Elastik engelin kendi ağırlığı altındaki noktasal deplasman değerlerinin görüntü işleme yöntemi ile ölçülmesi	48
Şekil 3.5. Farklı zaman adımlarında deneysel çalışmaya ait görsel kesitler.....	50
Şekil 3.6. Elastik engel ölçüm noktalarındaki (M1-M4) yatay yer değiştirme ölçümleri.....	51
Şekil 4.1. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminin şematik bir görünümü ve ölçüm noktasının konumu	54
Şekil 4.2. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminin $t=0.57 s$ ve $0.71 s$ zaman adımlarında a) $d^s/\Delta x^s=5$, b) $d^s/\Delta x^s=10$, c) $d^s/\Delta x^s=20$, d) $d^s/\Delta x^s=40$ ve e) $d^s/\Delta x^s=80$ için BLİPH sonuçları (düzlem-gerinim).....	56

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminin $t=0.57 s$ ve $0.71 s$ zaman adımlarında $a)d^s/\Delta x^s=5$, $b)d^s/\Delta x^s=10$, $c)d^s/\Delta x^s=20$, $d)d^s/\Delta x^s=40$ ve $e)d^s/\Delta x^s=80$ için BLİPH sonuçları (<i>düzlem-gerilme</i>)	57
Şekil 4.4. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminde farklı çözünürlükteki BLİPH hesaplamalarının analitik çözüm ile karşılaştırmaları (<i>düzlem-gerinim</i>)	59
Şekil 4.5. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminde farklı çözünürlükteki BLİPH hesaplamalarının analitik çözüm ile karşılaştırmaları (<i>düzlem-gerilme</i>)	60
Şekil 4.6. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminin şematik bir görünümü.....	62
Şekil 4.7. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminin farklı zaman adımlarında $R1$ ve $R2$ analizlerine ait görseller.....	64
Şekil 4.8. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminin farklı zaman adımlarında $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizlerine ait görseller	65
Şekil 4.9. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminde plaka orta nokta deplasman hesaplamalarının analitik çözüm ile karşılaştırmaları	67
Şekil 4.10. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminin şematik bir görünümü.....	68
Şekil 4.11. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında deney ve $R1$ ve $R2$ analizlerine ait görseller	70
Şekil 4.12. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizlerine ait görseller.....	71
Şekil 4.13. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminde elastik geçit uç nokta (MI) yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması.....	73
Şekil 4.14. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin şematik bir görünümü	75
Şekil 4.15. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında deney ve $R1$ ve $R2$ analizlerine ait görseller	77
Şekil 4.16. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında $NA1$ ve $NA2$ ve $NA3$ analizlerine ait görseller	78
Şekil 4.17. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminde MI noktasındaki yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması	80

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminde elastik geçit ölçüm noktalarındaki ($M1-M4$) yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması	81
Şekil 4.19. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında deney ve $R1$ ve $R2$ analizlerine ait görseller	85
Şekil 4.20. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında $NA1$ ve $NA2$ ve $NA3$ analizlerine ait görseller	86
Şekil 4.21. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminde $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizlerine ait detay kesitler....	87
Şekil 4.22. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminde $M1$ noktasındaki yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması.....	88
Şekil 4.23. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminde elastik geçit ölçüm noktalarındaki ($M1-M4$) yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması	89

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

α_D	Ağırlık fonksiyonu sabiti
δ	Dirac delta fonksiyonu
δ^D	Yapay yoğunluk yayılım terimi sabiti
ϕ	Enerji kaybı sınırlayıcısı
γ	Hal denklemi sabiti
D	Yapay yoğunluk yayılımı terimi
ε	Euler gerinim tensörü
λ	Enerji kaybı sınırlayıcısı sabiti
κ	İnterpolasyon uzunluğu sabiti
ρ	Yoğunluk
Γ	Enerji kaybı terimi
Π	Yapay viskozite terimi
σ	Cauchy gerilme tensörüdür
ω	Katı alan alt zaman adımı sayısı
ω_1	Konsol kiriş temel titreşim frekansı
\mathbf{a}	İvme vektörü
c	Nümerik ses hızı
\mathbf{e}	Birim vektör
E	Elastisite modülü
\mathbf{E}	Green-Lagrange gerinim tensörü
\mathbf{F}	Deformasyon gradyanı
\mathbf{g}	Yer çekimi ivmesi
h	İnterpolasyon uzunluğu
J	Deformasyon gradyanı determinanı
H	Başlangıç su derinliği
K	Hacim modülü

L	Ağırlık fonksiyonu türevi düzeltme matrisi
m	Kütle
\vec{n}	Yüzey normal vektörü
P	Basınç
\mathbf{P}	Birinci Piola–Kirchhoff gerilme tensörü
q	Boyutsuz etkileşim uzunluğu
S	Ağırlık fonksiyonu destek alanı yüzeyi
V	Hacim
\mathbf{v}	Hız vektörü
ν	Poisson oranı
t	Zaman
U	Hız
\mathbf{U}	Yer değiştirme gradyanı tensörü
W	Ağırlık fonksiyonu
\mathbf{x}	Konum vektörü
\mathbf{X}	Referans konum vektörü

Kısaltmalar

Açıklamalar

AEY	Ayrık Elemanlar Yöntemi
APR	Adaptive Particle Refinement
AYE	Akışkan-Yapı Etkileşimi
BL	Bütünsel Lagrange
CUDA	Compute Unified Device Architecture
DEM	Discrete Element Method
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
FPS	Frames Per Second
FSI	Fluid-Structure Interaction
FVM	Finite Volume Method
GİB	Grafik İşlemci Birimi
GPK	Geleneksel Paralel Kademeli
GPU	Graphics Processing Unit

GSK	Geleneksel Sıralı Kademeli
HDPY	Hacim Dengelemeli Parçacık Yöntemi
İPH	İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği
MESK	Modifiye Edilmiş Sıralı Kademeli
MPS	Moving Particle Semi-Implicit
PD	Peridinamik
PPE	Pressure Poisson Equation
PST	Particle Shifting Technique
RKPM	Reproducing Kernel Particle Method
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SFY	Sonlu Farklar Yöntemi
SHY	Sonlu Hacimler Yöntemi
SİPH	Sıkıştırılmaz İPH
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
TÇPY	Türetilmiş Çekirdek Parçacığı Yöntemi
VCPM	Volume Compensated Particle Method
Zİ	Zaman İntegrasyonu
ZSİPH	Zayıf Sıkıştırılabilir İPH

1. GİRİŞ

Birçok mühendislik uygulamasında akışkan akımları katı sınırlar üzerinde önemli deformasyonlara neden olmaz ve problem yalnızca akışkan dinamikleri ele alınarak analiz edilebilir. Ancak bu akımlar katı sınırlar üzerinde ihmal edilemeyecek şekil ve yer değişimlerine neden olduğunda akışkan ve katı dinamiklerinin birlikte ele alınması zorunlu hale gelmektedir [1]. Akışkan-Yapı Etkileşimi (Fluid-Structure Interaction, FSI) problemleri olarak adlandırılabilen bu olgu, bünyesinde kaotik akışkan hareketleri, yüksek hidrodinamik yükler, şekil/yer değiştiren katı sınırlar ve hareketli arayüzler gibi zorlayıcı temel karakteristikler barındırmaktadır. Akışkan-Yapı Etkileşimi (AYE) fenomeni ile karmaşık hava akımlarının uçak veya rüzgâr türbini kanatları ile etkileşimine dayanan aeroelastik problemler veya açık deniz/kıyı yapıları üzerindeki dalga etkisi, sıvı konteynerleri içerisindeki şiddetli çalkantı hareketi ve gemi gövdelerindeki hidrodinamik dövünme etkisi gibi hidroelastik problemler şeklinde çeşitli mühendislik uygulamalarında sıklıkla karşılaşılmaktadır [2–5].

AYE problemlerinin analizinde kapsamlı bir analitik çözümün bulunmaması ve deneysel çalışmaların sınırlılıkları göz önüne alındığında numerik yöntemler kritik bir rol oynamaktadır [6,7]. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method, FEM), Sonlu Hacimler Yöntemi (Finite Volume Method, FVM) ve Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Method, FDM) gibi geleneksel ağ esaslı (grid-based) yöntemler araştırmacılar tarafından AYE problemlerinin analizlerinde kullanılan temel numerik yaklaşımlardandır [8–10]. Ancak, özellikle kaotik serbest yüzeyle akımlar içeren hidroelastik AYE problemlerinin karakteristikleri dikkate alındığında ağ esaslı yöntemler çeşitli dezavantajlar barındırmaktadır. Lagrange temelli Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) formülasyonunda malzemelerin ağ elemanlarıyla birlikte hareketi arayüzey takibinin kolaylıkla yapılabilmesini mümkün kılarken, yüksek deformasyon içeren problemlerde bu elemanlarda bozulmalar meydana gelebilmekte ve ilave dinamik düzenleme tekniklerinin kullanımı gerekebilmektedir. Euler temelli Sonlu Hacimler Yöntemi (SHY) ve Sonlu Farklar Yöntemi (SFY) formülasyonlarında ise malzemelerin ağ yapısından bağımsız hareketi yüksek deformasyon içeren problemler için uygun bir yapı sunarken, arayüzeylerin tespiti için ilave denklemlere ihtiyaç duyulmaktadır [6,11–13]. Bu gibi ilave geliştirmeler hesaplama maliyetlerini arttırmakla birlikte uygulamada zorluklar ve analizlerde kararlılık ve

yakınsaklık problemlerine neden olabilmektedir [6].

Son yıllarda parçacık bazlı ağsız (meshfree) numerik modellerin çeşitli mühendislik problemlerinin analizlerinde kullanımı giderek artmaktadır. Bu yöntemlerde çözüm alanı, birbirleriyle herhangi bir ön tanımlı bağlantısı bulunmayan parçacıklar kullanılarak ayrıklaştırılmaktadır. Lagrange temelli, ağ yapısı barındırmayan doğalarıyla bu yöntemler, yüksek deformasyon içeren problemler için uygun bir yapı sunarken, ilave denklemlere ihtiyaç duymadan arayüzeylerin takibini mümkün kılmakta ve özellikle serbest yüzeyli akımlar içeren hidroelastik AYE problemleri için oldukça uygun bir yapı sunmaktadır. Literatürde İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH), Ayrık Elemanlar Yöntemi (Discrete Element Method, DEM), Yarı-Örtük Hareketli Parçacıklar (Moving Particle Semi-Implicit, MPS) gibi çeşitli parçacık temelli ağsız numerik yöntemler ve bu yöntemler için çeşitli sınıflandırmalar bulunmaktadır [14]. Ancak bu tez çalışması kapsamında, gerçekleştirilecek numerik analizlerin temelini oluşturan İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (İPH) yöntemine odaklanılacaktır.

İPH başlangıçta astrofizik problemlerinde kullanılmak üzere Lucy [15] ve Gingold ve Monaghan [16] tarafından önerilen, literatürdeki en popüler parçacık temelli numerik yöntemlerden birisidir. Orijinal adlandırması Smoothed Particle Hydrodynamics olan yöntem, Özbulut [17] tarafından Türkçeye “İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği” olarak çevrilmiştir [18]. İPH yöntemi başlangıçta astrofizik problemlerinde kullanılmak üzere önerilse de farklı varyantları ile çeşitli akışkan ve katı dinamiği problemlerine uygulanmaya başlamıştır.

Akışkan dinamiklerinin analizinde temel olarak iki İPH varyantı öne çıkmaktadır; Zayıf Sıkıştırılabilir (Weakly Compressible) İPH [19] ve Sıkıştırılmaz (Incompressible) İPH [20]. Zayıf Sıkıştırılabilir İPH (ZSİPH) yönteminde akışkan parçacıklarının basınç değerleri bir hal denklemi yardımıyla yoğunluk değerlerine bağlı olarak açık (explicit) zaman integrasyon şeması ile hesaplanırken, Sıkıştırılmaz İPH (SİPH) yaklaşımında bu değerler bir Basınç Poisson Denklemi (Pressure Poisson Equation, PPE) yardımıyla belirlenmektedir. Birçok araştırmacı, ZSİPH ve SİPH varyantlarını kaotik serbest yüzeyli akımlar içeren çeşitli akışkanlar dinamiği problemlerinin analizinde başarı ile kullanılmıştır (ZSİPH [19,21–28]; SİPH [20,29–32]).

Bununla birlikte, literatürdeki akışkanlar dinamiği problemlerinin modellenmesinde en sık başvurulan İPH varyantı olan ZSİPH bazı dezavantajlar barındırmaktadır. Yöntemin bir hal denklemi gerektiren zayıf sıkıştırılabilir doğası, kaotik akışkan akımlarının analizinde kararlılık ve şiddetli basınç salınımı problemlerine yol açmakta [33–35] ve buna bağlı olarak yapay viskozite (artificial viscosity) [36], yoğunluk filtreleme (density filtering) [37] ve yapay yoğunluk yayılımı (artificial density diffusion) [38,39] gibi ilave geliştirme tekniklerinin kullanımı zorunlu hale gelebilmektedir. Alternatif bir yaklaşım olarak son yıllarda Riemann tabanlı İPH yaklaşımı araştırmacılar tarafından tercih edilmeye başlamıştır. Riemann tabanlı İPH yaklaşımında numerik kararlılık, herhangi bir ilave geliştirme tekniğine ihtiyaç duymadan Riemann çözücüsünün içsel numerik viskozitesi ile sağlanmaktadır [40]. Literatürde farklı Riemann tabanlı İPH şemaları bulunmakla birlikte [40,41], bir Riemann çözücüsünün herhangi bir yeniden düzenleme gerektirmeden doğrudan standart İPH korunum denklemleri içerisine entegre edildiği Riemann-İPH [42,43] yöntemi, sunduğu uygulama kolaylığı ile araştırmacılar tarafından çeşitli akışkanlar dinamiği problemlerinin analizinde başvurulan numerik yaklaşımlardan biri haline gelmiştir [33,34,41,44–46].

Katı dinamiklerinin modellenmesinde ise temel olarak standart İPH [47,48] ile Bütünsel Lagrange (Total Lagrangian) İPH [49,50] yaklaşımları ön plana çıkmaktadır [6]. Standart İPH yaklaşımında katı dinamikleri, ZSİPH ile akışkan modeline benzer bir yaklaşım benimsenerek ele alınmaktadır [51]. Ancak bu yaklaşım, katı alanların analizinde gerilme kararsızlığı (tensile instability) sorununa yol açabilmektedir [6,51]. Bu sorunun çözümü olarak başlangıçta araştırmacılar tarafından ilave bir yapay gerilme (artificial stress) terimi önerilmiştir [47]. Ancak bu yaklaşım, uygulama zorluğunun yanı sıra fiziksel dayanağı olmayan ek bir parametrenin kullanımını mecbur kılmaktadır [6,51]. Belytschko ve diğerleri [49] çalışmalarında gerilme kararsızlığının standart İPH yaklaşımındaki Euler karakteristikli ağırlık (kernel) fonksiyonu kullanımından kaynaklandığını bildirmişler ve Lagrange karakteristikli bir ağırlık fonksiyonunun kullanımını önermişlerdir. Bu doğrultuda Bütünsel Lagrange İPH (BLİPH) yönteminde çekirdek fonksiyonu ve bağlı türevler, başlangıç durumundaki materyal koordinatlarının bir fonksiyonu olarak hesaplanmakta ve böylece herhangi bir ek geliştirmeye ihtiyaç duymadan gerilme kararsızlığı problemi elimine edilebilmektedir. Sunduğu bu avantajlarla BLİPH yöntemi, araştırmacılar tarafından son yıllarda çeşitli elastik katı [52–56] ve zemin [57] mekaniği problemlerine uygulanmaya başlamıştır.

Özellikle akışkanlar dinamiği modellemelerindeki çözüm başarısı ile İPH yönteminin kullanım alanı araştırmacılar tarafından AYE problemlerine genişletilmeye başlanmıştır. Bu doğrultuda birçok araştırmacı İPH yönteminin akışkan, farklı bir numerik yöntemin ise katı alanı modellemek için kullanıldığı numerik yaklaşımlar ile AYE problemlerinin analizini gerçekleştirmiştir (ZSİPH-SEY [12,58–63]; ZSİPH-Ayrık Elemanlar Yöntemi (AEY) [64]; ZSİPH-Peridinamik (PD) [4,5,65–67]; ZSİPH-Hacim Dengelemeli Parçacık Yöntemi (Volume Compensated Particle Method, VCPM) [68]; ZSİPH-Türetilmiş Çekirdek Parçacığı Yöntemi (Reproducing Kernel Particle Method, RKPM) [69]). Ayrıca bazı araştırmacılar, ZSİPH akışkan modeli ile mekanik kısıtlar kullanılarak birleştirilen ve katı elemanların deformasyonlarını taklit etmeyi amaçlayan bir çoklu rijit elemanlar sistemini kullanarak hidroelastik AYE problemlerinin analizlerini gerçekleştirmişlerdir [7,70]. Bu gibi yaklaşımlar, katı alanların modellenmesinde problem dinamiğine bağlı olarak özelleşmiş bir numerik yöntemin kullanımını mümkün kılsa da kararlı bir akışkan-katı arayüzey birleşim şemasının oluşturulması dikkatle ele alınması gereken bir konu haline gelebilmektedir.

Alternatif bir yaklaşım olarak bütüncül İPH tabanlı hidroelastik AYE çözücülerini potansiyel olarak kararlı bir akışkan-katı arayüzey birleşimi şeması sunmakla birlikte uygulanabilirlik açısından da çeşitli avantajlara sahiptir [3]. Bu alandaki ilk çalışmalar, akışkan alanının geleneksel ZSİPH, katı alanın ise standart İPH yaklaşımı ile modellendiği ZSİPH-İPH birleşimine odaklanmıştır [1,11,71]. Paralelinde ise SİPH-İPH birleşimi hidroelastik AYE problemlerinde kullanılmaya başlamıştır [2,3,72,73]. Bazı araştırmacılar ise akışkan ve katı alanlar için sırasıyla ZSİPH ve BLİPH yöntemlerinin kullanıldığı ZSİPH-BLİPH birleşimini hidroelastik AYE problemlerine başarı ile uygulamışlardır. He ve diğerleri [74], geleneksel ZSİPH modelini yapay viskozite terimi barındıran bir BLİPH modeli ile birleştirerek hidroelastik AYE problemlerinin analizini gerçekleştirmişlerdir. Zhan ve diğerleri [6], geleneksel ZSİPH modeli ile kum saati kontrol şeması kullanılarak kararlılık seviyesi artırılmış bir BLİPH modelinin birleşimine dayanan, Grafik İşlemci Birimi (Graphics Processing Unit, GPU) tabanlı bir bilgisayar kodu geliştirerek üç boyutlu hidroelastik AYE problemlerinin analizini gerçekleştirmişlerdir. Sun ve diğerleri [75], yapay viskozite, yapay yoğunluk yayılımı ve ağırlık fonksiyonu gradyanı düzeltme teknikleri ile güçlendirilmiş bir çok-fazlı δ -İPH [39,76] modeli ile yapay viskozite terimi ile stabilize edilmiş bir BLİPH modelini birleştirerek hidroelastik AYE problemlerinin analizini gerçekleştirmişlerdir. O'Connor ve diğerleri [51], açık kaynak kodlu DualSPHysics [77] çözücüsü içerisinde

entegre edilmiş bir geleneksel ZSİPH-BLİPH birleşimi ile üç boyutlu hidroelastik AYE problemlerini analiz etmişlerdir. Lyu ve diğerleri [78], bir birleştirilmiş δ -İPH-BLİPH modeli özelinde, hidroelastik AYE analizlerinde karşılaşılan negatif basınç etkilerini düzenleyici modifikasyonlar önermiş ve çeşitli kıyaslama durumları üzerinden ilgili modifikasyonların etkinliğini araştırmışlardır. Sun ve diğerleri [79], çok-fazlı δ -İPH-BLİPH [75] birleşimini Parçacık Öteleme Tekniği (Particle Shifting Technique, PST) ile güçlendirerek üç boyutlu hidroelastik AYE problemlerine genişletmişlerdir. Yılmaz ve diğerleri [80], geleneksel ZSİPH ile yapay viskozite ve kum saati kontrol şeması ile kararlılık seviyesi artırılmış BLİPH birleşiminin AYE analizlerindeki çözüm yakınsaklığını farklı zaman integrasyon şemaları kullanarak araştırmışlardır.

Riemann tabanlı İPH çözücülerinin tek ve çok fazlı serbest yüzeyli akım problemlerinin analizinde kullanımını giderek yaygınlaşmakta olsa da AYE problemlerindeki uygulamaları henüz sınırlıdır [81]. Bazı araştırmacılar akışkan alanının Riemann tabanlı bir İPH yöntemine dayandığı çeşitli numerik birleşimlerle karmaşık hidroelastik AYE problemlerinin analizlerini gerçekleştirmişlerdir (Riemann-İPH-SEY [60]; Riemann-İPH-Türetilmiş Çekirdek Parçacığı Yöntemi (TÇPY) [81]). Zhang ve diğerleri [82] doğrusallaştırılmış Riemann çözücüsüne dayanan bir Riemann-İPH modeli ile BLİPH modelini birleştirerek hidroelastik AYE problemlerinin analizini gerçekleştirmişlerdir. İlgili numerik birleşim bir çoklu-çözünürlük uygulaması içerirken, katı alanın modellenmesinde kullanılan BLİPH formülasyonunda kararlılık seviyesini arttırmak amacıyla herhangi bir ilave geliştirme şeması kullanılmamıştır. Ren ve diğerleri [83], çalkantı hareketinin elastik engeller ile etkileşimini bir Riemann-İPH-BLİPH numerik birleşimi kullanarak araştırmışlardır. Meng ve diğerleri [84] ise akışkan ve katı alanların her ikisinin de Riemann tabanlı bir çözücü ile ele alındığı bir Riemann-İPH-BLİPH birleşimi önermiş ve çeşitli hidroelastik AYE problemlerine uygulamışlardır.

İPH, ağ esaslı yöntemlere kıyasla sahip olduğu birçok avantajın aksine bu yöntemlere nazaran daha yüksek hesaplama maliyetleri gerektirmektedir [85]. İPH yönteminde her bir zaman adımında etkileşim içerisinde olan parçacıkların aranması gerekliliğinin yanı sıra, ağırlık fonksiyonunun destek alanı içerisinde etkileşimde olan parçacık sayısı ağ esaslı yöntemlerin düğüm noktalarına kıyasla daha fazladır [6]. Bu doğrultuda İPH modelleri, Grafik İşlemci Birimi (GİB) ile hızlandırılmış İPH [6,30,77,86] gibi etkin paralel hesaplama kabiliyeti barındıran donanımsal geliştirmelere veya çoklu-çözünürlük, çoklu zaman adımı

veya komşu parçacık arama gibi yüksek hesaplama verimliliği sağlayan numerik şemalara ihtiyaç duymaktadır.

İPH yöntemi kullanılarak ele alınan AYE analizleri, akışkan ve katı alanları için genellikle eşit başlangıç parçacık aralığı değerleri ile tekdüze çözünürlükle analiz edilmekte ve sistemde kullanılacak zaman adımı değeri akışkan ve katı alanların gerektirdiği değerlerden küçük olanına göre belirlenmektedir [6,51,74]. İlgili eşit parçacık aralığı yaklaşımı, özellikle akışkan alanının geometrisine kıyasla ince geometrilili yapılar barındıran AYE problemlerinde, katı alanda numerik yakınsaklığın artırılması amacıyla küçülen başlangıç parçacık aralığı değerleriyle birlikte dramatik olarak artan akışkan parçacık sayıları nedeniyle yüksek hesaplama maliyetlerine neden olabilmektedir [82,87]. Bu doğrultuda çoklu-çözünürlüklü İPH şemaları, hesaplama verimliliği açısından araştırmacılara yüksek bir potansiyel sunmaktadır [88].

İPH ile AYE analizlerinde çoklu-çözünürlük uygulamaları genel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu alandaki ilk çalışmalar, akışkan ve katı alan parçacık çözünürlüklerinin her ikisinin de belirli bir alan özelinde yerel olarak artırıldığı numerik şemalara odaklanmıştır. Bu doğrultuda bazı araştırmacılar, Uyarlamalı Parçacık Yoğunlaştırma (Adaptive Particle Refinement, APR) [89] tekniğini karmaşık hidroelastik AYE problemlerine başarı ile uygulamıştır [75,79,90]. Çoklu-çözünürlük alanındaki diğer çalışmalar ise akışkan ve katı parçacıklar için farklı başlangıç parçacık aralığı değerlerinin kullanılması ile etkileşim içerisindeki parçacıklar arasında çözünürlük farklarının oluşturulduğu numerik şemalara dayanmaktadır. Khayyer ve diğerleri [87] akışkan ve katı alanlar için farklı çözünürlük değerlerinin kullanıldığı bir çoklu-çözünürlüklü SİPH-İPH birleşimi geliştirmiş ve çeşitli hidroelastik AYE problemlerine uygulamıştır. Ng ve diğerleri [91] karmaşık AYE problemleri için benzer bir yaklaşımla çoklu-çözünürlüklü ZSİPH-Hacim Dengelemeli Parçacık Yöntemi (HDPY) birleşimini önermiştir. Zhang ve diğerleri [82] ise akışkan ve katı alanlar için farklı çözünürlük değerlerinin kullanıldığı bir çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi ile hidroelastik AYE problemlerinin analizini gerçekleştirmiştir.

İPH ile geleneksel tekdüze zaman adımlı AYE analizlerinde ilgili zaman adımı, genellikle katı alandaki numerik ses hızının akışkan alanına göre daha yüksek ($c^s \gg c^f$) olması sebebiyle ilgili değer tarafından sınırlanmaktadır [91]. Bu sınırlama, katı alan için daha

yüksek çözünürlük kullanılan çoklu-çözünürlüklü numerik modellerde daha da kısıtlayıcı bir hal almaktadır. Alternatif bir yaklaşım olarak araştırmacılar tarafından hesaplama verimliliğini arttıran çoklu zaman adımli zaman integrasyon şemaları AYE problemlerinin analizinde önerilmiş ve kullanılmıştır [60,68,79,84,88]. Bu gibi yaklaşımlarda, genellikle daha yüksek zaman adımı değeri gerektiren akışkan alanı kendi zaman adımı değeri kullanılarak güncellenirken, katı alan tekrarlanan alt zaman adımları ile ele alınmaktadır. Bu doğrultuda, genellikle daha yüksek hesaplama maliyetine sahip olan akışkan alanlarında gereksiz zaman adımı tekrarlamalarından kaçınılması amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, karmaşık hidroelastik AYE problemlerinin analizinde kullanılmak üzere çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimine dayanan GİB tabanlı özgün bir bilgisayar kodunun geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen numerik birleşimde akışkan alanı Roe'nun yaklaşık Riemann çözücüsüne dayanan İPH [41,84,92] modeli kullanılarak analiz edilirken, katı alan, yapay viskozite [93] ve kum saati kontrol [52] şemalarıyla kararlılık seviyesi artırılmış BLİPH modeli kullanılarak ele alınmaktadır. Mevcut numerik birleşimin hesaplama verimliliğinin artırılması amacıyla çoklu-çözünürlük ve çoklu zaman adımı olmak üzere iki farklı numerik yaklaşım benimsenmiş olup, bu yaklaşımların çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kullanılan çoklu-çözünürlük şeması, akışkan ve katı alanlar için farklı başlangıç parçacık aralığı değerlerinin kullanımına dayanmaktadır.

Geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminde çoklu zaman adımı uygulaması içerisinde, mevcut tez çalışmasının literatüre sunduğu özgün katkılardan biri olarak, akışkan ve katı alanlar için farklı zaman integrasyon şemaların kullanıldığı hibrit bir yaklaşım benimsenmiştir. İlgili yaklaşımda akışkan alanı, tahmin-düzeltilme (predictor-corrector) adımları kapsamında ilave bir ara hesaplama gerektiren Simplektik integrasyon şeması ile güncellenirken, katı alan herhangi bir ek ara zaman hesaplaması gerektirmeyen Yarı-Örtük (Semi-Implicit) Euler integrasyon şeması kullanılarak güncellenmektedir. Bu doğrultuda, katı alan zaman integrasyonundaki ek ara adımların elimine edilerek, özellikle çoklu-çözünürlük uygulamalarıyla artan katı parçacık sayılarının neden olacağı hesaplama maliyeti artışlarının etkilerinin azaltılıp, hesaplama verimliliğinin artırılması amaçlanmaktadır.

Mevcut numerik birleşimin çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği çeşitli kıyaslama durumları kullanılarak test edilmiştir. İlk olarak katı alanının analizlerinde kullanılacak BLİPH modelinin düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme koşulları altındaki çözüm yakınsaklığı, farklı başlangıç parçacık aralığı değerleri ile bir konsol kirişin serbest titreşimi problemi [47,94] üzerinden analitik sonuçlar ile kıyaslanarak araştırılmıştır. Akabinde geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin hidroelastik AYE problemlerindeki çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği, bir elastik plaka üzerindeki durağan su kütlesi [95,96], baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi [1], kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi [59,97] ve son olarak, mevcut tez çalışması kapsamında hidroelastik AYE problemlerinde bir kıyaslama durumu olarak kullanılabilmesi amacıyla yeni bir deneysel çalışma olarak tasarlanan, ıslak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi olmak üzere dört farklı kıyaslama durumu kullanılarak araştırılmıştır.

Geliştirilen numerik modelin çözüm yakınsaklığı, ilgili kıyaslama durumlarına ait analitik, deneysel ve literatürdeki diğer numerik model sonuçları kullanılarak araştırılırken, hesaplama verimliliği araştırmaları, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen mevcut model ve ZSİPH-BLİPH birleşimlerinin tekdüze zaman adımı ile Simplektik integrasyon şeması kullanılarak ele alınan geleneksel versiyonları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, kullanılan zaman integrasyonu ve İPH yaklaşımlarının hidroelastik AYE problemleri kapsamında çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği üzerine etkilerinin de ayrıca araştırılması amaçlanmaktadır.

2. NUMERİK MODEL

Bu bölümde geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin teorik altyapısı hakkında detaylı açıklamalara yer verilmiştir. İlk olarak standart İPH teorisi ve literatürdeki en yaygın İPH varyantı olan geleneksel ZSİPH formülasyonu hakkında bir özet sunulmuş olup, akabinde mevcut tez çalışması kapsamında sırasıyla akışkan ve katı alanların modellenmesinde kullanılacak olan Roe'nun yaklaşık Riemann çözücüsüne dayanan İPH ile yapay viskozite ve kum saati kontrol şeması kullanılarak kararlılık seviyesi arttırılmış BLİPH formülasyonları detaylı olarak tanıtılmıştır. Takip eden alt bölümlerde ise geliştirilen bilgisayar kodu kapsamında sınır koşulları, akışkan-yapı birleşim şeması, zaman integrasyonu, komşu parçacık arama şeması, GİB tabanlı programlama modeli ve bir numerik döngü kapsamında gerçekleştirilecek işlemler hakkında kapsamlı bilgiler sunulmuştur.

2.1. Standart İPH Formülasyonu

İPH yönteminde çözüm alanı, birbirleriyle herhangi bir ön tanımlı bağlantısı bulunmayan ve kütle, ivme, hız ve yoğunluk gibi fiziksel özellikler taşıyan bir dizi ayrık parçacık ile temsil edilmektedir. Bu parçacıkların taşıdığı yoğunluk ve ivme gibi fiziksel değerler, İPH teorisi yardımıyla çözülebilir ayrık formlarına dönüştürülmüş korunum denklemleri vasıtasıyla hesaplanabilmektedir. İlgili İPH teorisi, çekirdek/ağırlık yaklaşımı (kernel approximation) ve parçacık yaklaşımı (particle approximation) olmak üzere iki temel yaklaşım üzerine kurulmaktadır [14,98].

2.1.1. Çekirdek yaklaşımı

İPH formülasyonunun temelini oluşturan adımların ilki olan çekirdek yaklaşımı, herhangi \mathbf{x} konum vektörü üzerinde tanımlı bir $f(\mathbf{x})$ fonksiyonunun aşağıdaki şekilde gösterilebilecek bir integral yaklaşımı ile başlamaktadır;

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (2.1)$$

burada $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$ Dirac delta fonksiyonu olup;

$$\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} = \mathbf{x}' \\ 0, & \mathbf{x} \neq \mathbf{x}' \end{cases} \quad (2.2)$$

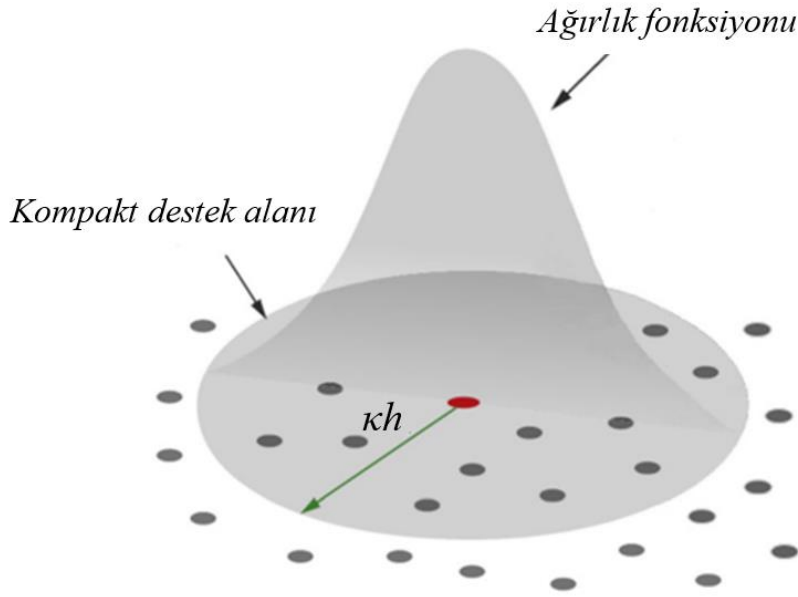
şeklinde tanımlanmaktadır. Çekirdek yaklaşımı, herhangi bir fonksiyonun integral yaklaşımıyla ifade edilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, Eş. 2.2'de görülebileceği üzere, Dirac delta fonksiyonu noktasal bir destek sunmakta ve bu nedenle ayrık numerik yöntemlerde kullanımı mümkün olmamaktadır [98]. Eşitlik içerisindeki Dirac delta fonksiyonunun bir ağırlık (kernel) fonksiyonu $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)$ ile değiştirilmesiyle ilgili $f(\mathbf{x})$ fonksiyonunun integral ifadesi;

$$f(\mathbf{x}) \approx \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (2.3)$$

halini almaktadır. Bu noktada, ağırlık fonksiyonunun bir Dirac delta fonksiyonu olmaması sebebiyle Eş. 2.3'ün bir yaklaşım olduğu vurgulanmalıdır [14]. h , ağırlık fonksiyonunun destek alanını belirleyen interpolasyon uzunluğu olup ilgili ağırlık fonksiyonu;

- $\int_{\Omega} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' = 1$ olmak üzere birim özellik,
- $\lim_{h \rightarrow 0} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$ olmak üzere delta fonksiyonu davranışı,
- $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) = 0$, $|\mathbf{x} - \mathbf{x}'| > \kappa h$ olmak üzere sınırlı destek,
- $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) > 0$, $|\mathbf{x} - \mathbf{x}'| \leq \kappa h$ olmak üzere pozitiflik,
- $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) = W(\mathbf{x}' - \mathbf{x}, h)$ olmak üzere simetri,
- $|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$ değerinin artmasıyla $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)$ değerinin monolitik olarak azalmasına dayanan monoton azalma,

koşullarını sağlamaktadır [14,18,99]. Burada κ , interpolasyon uzunluğu h ile ilişkili olarak ağırlık fonksiyonunun destek alanı boyutunun belirlenmesinde kullanılan bir sabittir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Ağırlık fonksiyonu ve kompakt destek alanı [77]

Benzer şekilde, $f(\mathbf{x})$ fonksiyonunun türev ifadesinin $\nabla \cdot f(\mathbf{x})$ integral yaklaşımı, Eş. 2.3'te bulunan ilgili terimlerin değiştirilmesi ile;

$$\nabla \cdot f(\mathbf{x}) \approx \int_{\Omega} [\nabla \cdot f(\mathbf{x}')] W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitliğin sağ tarafındaki ifadenin açılması ile ilgili eşitlik;

$$\nabla \cdot f(\mathbf{x}) \approx \int_{\Omega} \nabla \cdot [f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)] d\mathbf{x}' - \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') \cdot \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (2.5)$$

halini almaktadır. Eş. 2.5'in sağ tarafındaki ilk terim, diverjans teoremi kullanılarak destek alanı yüzeyi S üzerinde bir integral formuna dönüştürülüp aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilmektedir;

$$\nabla \cdot f(\mathbf{x}) \approx \int_S f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) \cdot \vec{n} dS - \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') \cdot \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (2.6)$$

burada \vec{n} , integral yüzeyi S için birim normal vektördür. Ağırlık fonksiyonunun kompakt destek özelliği düşünüldüğünde Eş. 2.6'nın sağ tarafındaki ilk terim olan yüzey integralinin değeri sifıra eşit olacaktır [98]. Sonuç olarak ilgili fonksiyonun türev ifadesi $\nabla \cdot f(\mathbf{x})$;

$$\nabla \cdot f(\mathbf{x}) \approx - \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') \cdot \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Eş. 2.7, çekirdek yaklaşımı ile elde edilen fonksiyon türevlerinin, yalnızca ağırlık fonksiyonunun türev ifadesi kullanılarak ifade edilebileceğini ortaya koymaktadır.

2.1.2. Parçacık yaklaşımı

İPH formülasyonunun ikinci temel adımı olan parçacık yaklaşımında, çözüm alanını oluşturan ayrık parçacıklara ait fiziksel değerlerin hesaplanabilmesi amacı ile Eş. 2.3'teki integral yaklaşımı ifadesinin ayrık hale dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, bir merkez i parçacığındaki ilgili fonksiyonun değeri $f(\mathbf{x}_i)$, ağırlık fonksiyonunun destek alanı içerisinde bulunan komşu j parçacıklarının katkılarının toplamı şeklinde hesaplanabilecek aşağıdaki ayrık formuna dönüştürülebilmektedir;

$$f(\mathbf{x}_i) \approx \sum_j f(\mathbf{x}_j) W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) V_j \quad (2.8)$$

burada $V_j = m_j/\rho_j$ parçacık hacmi olup, m ve ρ sırasıyla parçacığın kütle ve yoğunluk değerlerini temsil etmektedir. Benzer şekilde ilgili fonksiyonun türevi $\nabla \cdot f(\mathbf{x}_i)$, Eş. 2.7 dikkate alınarak;

$$\nabla \cdot f(\mathbf{x}_i) \approx - \sum_j f(\mathbf{x}_j) \cdot \nabla W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) V_j \quad (2.9)$$

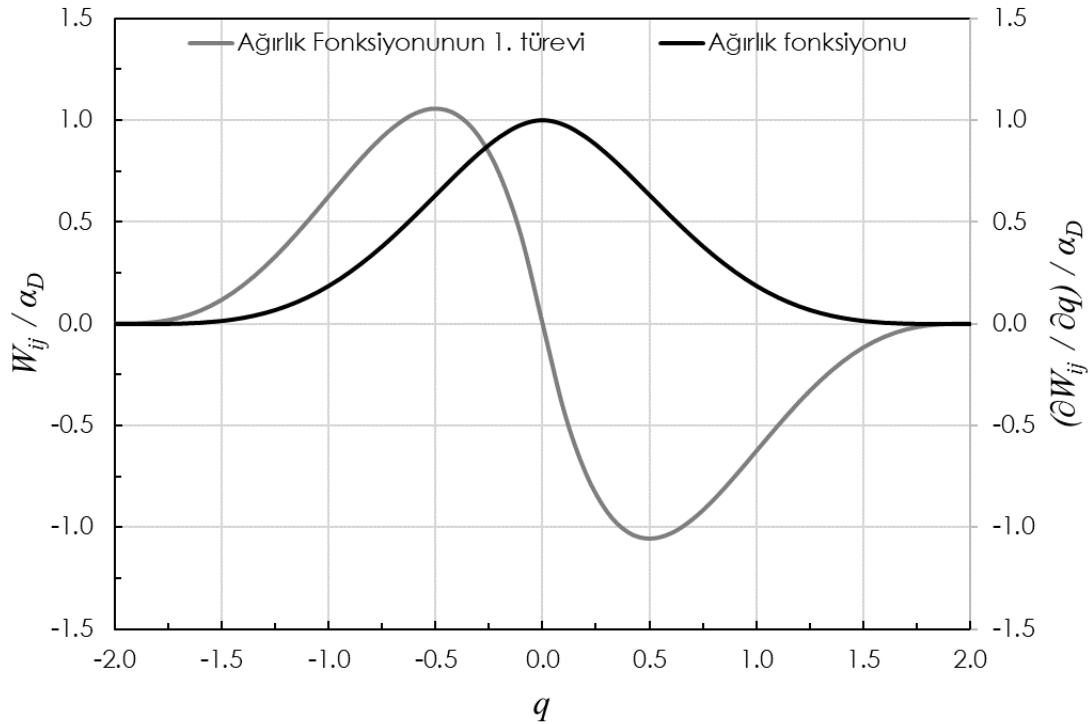
şeklinde ayrıklaştırılabilmektedir. Bununla birlikte literatürde farklı türev alma teknikleri kullanılarak Eş. 2.9'dan farklı ifadelerinin elde edilebildiği not edilmelidir [14,98–100].

2.1.3. Ağırlık fonksiyonu

İPH analizlerinin çözüm başarısı kullanılan ağırlık fonksiyonu ile doğrudan ilişkilidir [86]. Literatürde İPH analizlerinde kullanılmak üzere çeşitli ağırlık fonksiyonları bulunmakla birlikte [14], bu tez çalışması kapsamında serbest yüzeyli akım analizlerindeki faydaları [101] göz önüne alınarak beşinci dereceden Wendland C2 [102] tipi ağırlık fonksiyonu kullanılacaktır;

$$W_{ij} = W(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|, h) = \begin{cases} \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1), & 0 \leq q \leq 2 \\ 0, & q > 2 \end{cases} \quad (2.10)$$

burada α_D , iki ve üç boyutlu problemler için sırasıyla $7/(4\pi h^2)$ ve $21/(16\pi h^3)$ olan bir sabit olup, $q = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|/h$ değerine eşittir. İlgili ağırlık fonksiyonu ve birinci türevinin α_D sabitinden bağımsız değerlerini ifade eden grafik Şekil 2.2’de sunulmuştur. İlgili şekilden, mevcut ağırlık fonksiyonunun $W_{ij} = W_{ji}$ ve $\nabla W_{ij} = -\nabla W_{ji}$ koşullarının sağlandığı görülebilmektedir.



Şekil 2.2. Wendland ağırlık fonksiyonu ve birinci türevinin α_D katsayısından bağımsız değerleri

2.2. Akışkan Dinamiklerinin Modellenmesi

Bu bölümde, akışkan dinamiklerinin modellenmesinde kullanılacak temel korunum denklemleri ve bu denklemlerin standart İPH, geleneksel ZSİPH ve Riemann-İPH yöntemleri kapsamında ayrıık formları hakkında detaylı bir özet sunulmaktadır.

2.2.1. Korunum denklemleri

Akışkan dinamiklerinin modellenmesinde esas alınacak kütle ve momentumun korunumu denklemleri Lagrange formunda sırasıyla [6,77];

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho\nabla \cdot \mathbf{v} \quad (2.11a)$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \Gamma + \mathbf{g} \quad (2.11b)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada \mathbf{v} ve \mathbf{g} sırasıyla hız ve yer çekimsel ivme vektörleri olup, P basınçtır. Γ eşitlik içerisindeki enerji kayıplarını temsil eden terimdir. ZSİPH yaklaşımında korunum denklemlerini kapatmak amacıyla, basınç değerlerinin yoğunluk değerlerine bağlı olarak hesaplanmasını mümkün kılan bir hal denklemi kullanılmaktadır [19,103];

$$P = \frac{(c^f)^2 \rho_0}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (2.12)$$

burada γ bir sabit olup, su için $\gamma = 7$ değeri kullanılmaktadır. c^f , akışkan içerisindeki numerik ses hızı olup aşağıdaki şekilde belirlenebilmektedir [104];

$$c^f \geq 10 \max \left(U_{max}, \sqrt{P_{max}/\rho_0} \right) \quad (2.13)$$

burada U_{max} ve P_{max} sırasıyla azami beklenen hız ve basınç değerleri olup, baraj yıkılması problemleri için azami beklenen hız değeri $U_{max} = 2\sqrt{gH}$ eşitliği kullanılarak hesaplanabilmektedir. Burada H , başlangıç su derinliği değeridir.

2.2.2. Standart İPH ayrıklaştırması

Standart İPH formülasyonunda korunum denklemleri parçacık yaklaşımı sonucu elde edilen Eş. 2.9 yardımıyla ayrıklaştırılabilmektedir. Bu doğrultuda Bölüm 2.2.1’de sunulan kütle ve momentumun korunumu denklemleri sırasıyla aşağıdaki şekilde ayrıklaştırılabilmektedir [76];

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \nabla W_{ij} V_j \quad (2.14a)$$

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho_i} \sum_j (P_i + P_j) \nabla W_{ij} V_j + \mathbf{g} \quad (2.14b)$$

burada ∇W_{ij} , ağırlık fonksiyonunun gradyanı olup;

$$\nabla W_{ij} = -\nabla W_{ji} = \frac{\mathbf{x}_{ij}}{x_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_{ij}} \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$ ve $x_{ij} = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|$ olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte Eşitlik 2.14b’nin viskoz etkileri gözetilen herhangi bir terim barındırmadığı ve dolayısıyla ilgili hareket denkleminin Euler denge denklemlerine indirgendiği vurgulanmalıdır.

2.2.3. Geleneksel ZSİPH modeli

Mevcut haliyle Eş. 2.14, kaotik akışkan akımlarının analizinde kararsızlık ve şiddetli basınç salınımı problemlerine neden olabilmektedir. Yaşanabilecek muhtemel kararlık sorunlarının önüne geçebilmek ve düzgün bir basınç alanı elde edebilmek amacıyla literatürdeki geleneksel ZSİPH analizlerinde sıklıkla ilgili eşitliklerin yapay viskozite ve yapay yoğunluk yayılımı terimleri ile kararlılık seviyesi artırılmış formları kullanılmaktadır;

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \nabla W_{ij} V_j + \mathcal{D}_i \quad (2.16a)$$

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho_i} \sum_j (P_i + P_j) \nabla W_{ij} V_j + \mathbf{\Pi}_i^f + \mathbf{g} \quad (2.16b)$$

burada \mathcal{D}_i yapay yoğunluk yayılımı terimi olup;

$$\mathcal{D}_i = \delta^{\mathcal{D}} h^f c^f \sum_j V_j \psi_{ij} \cdot \nabla W_{ij} \quad (2.17a)$$

$$\psi_{ij} = 2(\rho_j - \rho_i) \frac{\mathbf{x}_{ji}}{x_{ij} + \eta^f} \quad (2.17b)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilmektedir [38]. Burada $\delta^{\mathcal{D}}$, yoğunluk yayılım teriminin etkinliğini kontrol eden bir sabit olup, mevcut tez çalışması kapsamında $\delta^{\mathcal{D}} = 0.1$ değeri benimsenmiştir. η^f , x_{ij} değerinin sıfıra yaklaşması durumunda ortaya çıkabilecek numerik hataların önüne geçebilmek amacıyla kullanılan bir sabit olup, $\eta^f = 0.01(h^f)^2$ değerine eşittir. Numerik kararlılığı geliştirmek amacıyla momentum denklemi içerisine eklenen yapay viskozite terimi $\mathbf{\Pi}_i^f$;

$$\mathbf{\Pi}_i^f = -\sum_j m_j \left(\frac{\alpha^f c^f}{\bar{\rho}_{ij}} \right) (h^f K_{ij} \pi_{ij}) \nabla W_{ij} \quad (2.18a)$$

$$\pi_{ij} = \frac{\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij}}{x_{ij} + \eta^f} \quad (2.18b)$$

$$K_{ij} = \begin{cases} 1, & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij} < 0 \\ 0, & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (2.18c)$$

eşitlikleri kullanılarak ifade edilebilmektedir [36,100]. Burada $\bar{\rho}_{ij} = 0.5(\rho_i + \rho_j)$ değerine eşittir. α^f , yapay viskozite sabiti olup problem karakteristiği ve kullanılan diğer parametreler ile ilişkili olarak genellikle $\alpha^f = 0.01 - 0.05$ aralığında bir değer olarak seçilmektedir [76].

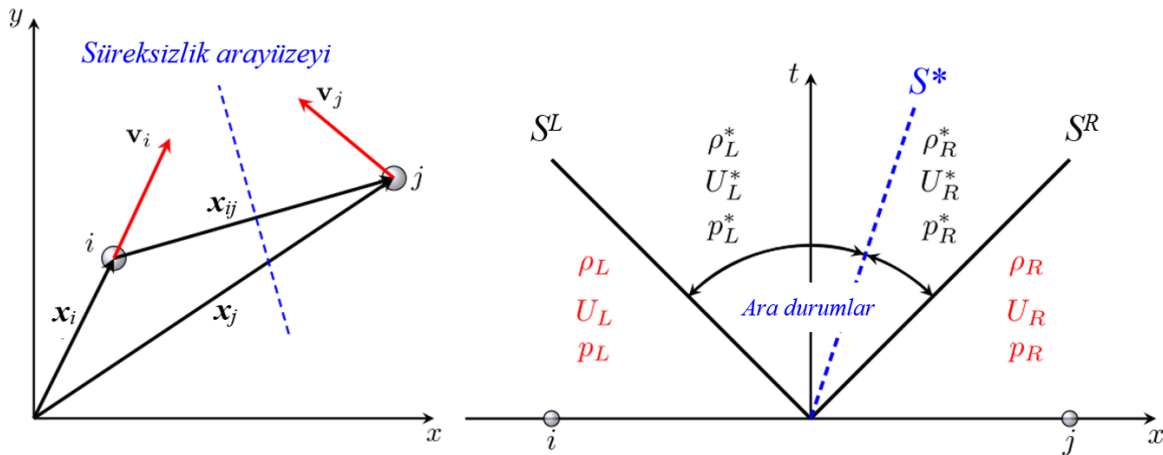
2.2.4. Riemann-İPH modeli

Eş. 2.14'ün aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek formunda görülebileceği üzere, standart İPH yaklaşımında parçacık çiftleri arasındaki etkileşim, ilgili parçacıkların taşıdığı hız ve basınç değerlerinin ortalamalarının ağırlıklı toplamlarına dayanmaktadır;

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = 2\rho_i \sum_j (\mathbf{v}_i - \bar{\mathbf{v}}_{ij}) \cdot \nabla W_{ij} V_j \quad (2.19a)$$

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = -\frac{2}{\rho_i} \sum_j \bar{P}_{ij} \nabla W_{ij} V_j + \mathbf{g} \quad (2.19b)$$

burada $\bar{\mathbf{v}}_{ij} = (\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_j)/2$ ve $\bar{P}_{ij} = (P_i + P_j)/2$ olacak şekilde sırasıyla hız ve basınç değerlerinin basit ortalamalarını temsil etmektedir. Riemann-İPH yaklaşımında ise parçacık çiftleri arasındaki etkileşim, orta noktasında bir süreksizlik arayüzünün olduğu kabul edilen birim vektör $\mathbf{e}_{ij} = -\mathbf{x}_{ij}/x_{ij}$ boyunca, bir boyutlu Riemann problemi olarak ele alınmaktadır [34]. İlgili bir boyutlu Riemann problemlerinin uzay-zaman ($x-t$) düzlemindeki dalga yapısı Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Bir boyutlu Riemann problemlerinin uzay-zaman düzlemindeki dalga yapısı [33]

Riemann çözümleri, temas arayüzeyinden yayılan üç dalga (S_L, S^*, S_R) tarafından dörde bölünen başlangıç sol (R_L), ara sol (R_L^*), ara sağ (R_R^*) ve başlangıç sağ (R_R) durumlarını kullanmaktadır [105]. Başlangıç sol ve sağ durumlarına ait ilgili değerler, merkez i ve komşu

j parçacıkları ile ilişkili olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir [34];

$$(\rho_L, U_L, P_L) = (\rho_i, \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{e}_{ij}, P_i) \quad (2.20a)$$

$$(\rho_R, U_R, P_R) = (\rho_j, \mathbf{v}_j \cdot \mathbf{e}_{ij}, P_j) \quad (2.20b)$$

Ara durumlara ait U^* ve P^* değerleri ise $U_L^* = U_R^* = U^*$ ve $P_L^* = P_R^* = P^*$ kabulleri ile Roe'nun yaklaşık Riemann çözücüsü kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir [41,84,106];

$$U^* = \frac{1}{2} \left[U_L + U_R + \frac{1}{C_{RL}} (P_L - P_R) \right] \quad (2.21a)$$

$$P^* = \frac{1}{2} [P_L + P_R + C_{RL}(U_L - U_R)] \quad (2.21b)$$

burada C_{RL} , aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek, akışkan alanı içerisindeki Roe ortalama Lagrange ses hızıdır;

$$C_{RL} = \frac{c_L \rho_L \sqrt{\rho_L} + c_R \rho_R \sqrt{\rho_R}}{\sqrt{\rho_L} + \sqrt{\rho_R}} \quad (2.22)$$

Eş. 2.14'te sunulan korunum denklemlerinin ayrık formları, $\bar{\mathbf{v}}_{ij} \approx \mathbf{v}^*$ ve $\bar{P}_{ij} \approx P^*$ kabulleriyle yeniden düzenlendiğinde, mevcut Riemann-İPH modelinde kullanılacak korunum denklemlerinin ayrık formları;

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = 2\rho_i \sum_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}^*) \cdot \nabla W_{ij} V_j \quad (2.23a)$$

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = -\frac{2}{\rho_i} \sum_j P^* \nabla W_{ij} V_j + \mathbf{g} \quad (2.23b)$$

halini almaktadır. Burada $\mathbf{v}^* = U^* \mathbf{e}_{ij} + (0.5(\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_j) - 0.5(U_L + U_R)\mathbf{e}_{ij})$ eşitliği kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bununla birlikte mevcut haliyle Eş. 2.21b'nin analizlerde yüksek viskoz etkilere neden olduğu tespit edilmiş olup, bu doğrultuda Zhang ve diğerlerinin [34] çalışmasına benzer bir şekilde P^* değerinin hesaplanmasında aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek aşırı viskoz etkileri önleyen bir sınırlayıcı ϕ kullanılmaktadır;

$$P^* = \frac{1}{2}[P_L + P_R + \phi(U_L - U_R)] \quad (2.24)$$

burada $\phi = \min\{\lambda \max[\tilde{\rho}(U_L - U_R), 0], C_{RL}\}$ şeklinde hesaplanmakta olup, λ bir sabittir. Bu tez çalışması kapsamında, Zhang ve diğerlerinin [34] çalışmasını takiben, analizlerde $\lambda = 3$ değeri benimsenmiştir.

2.2.5. Akışkan alanının zaman adımı değerinin belirlenmesi

Mevcut numerik birleşim kapsamında akışkan alanının modellenmesinde kullanılacak olan Riemann-İPH modelinde zaman adımı değeri Δt^f , Courant–Friedrich–Levy (CFL) koşulu ile sınırlandırılarak;

$$\Delta t^f \leq 0.2 \frac{h^f}{c^f + U_{max}} \quad (2.25)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. Burada h^f , akışkan alanına ait interpolasyon uzunluğunu temsil ederken, U_{max} akışkan parçacıklarının sahip olduğu azami hız değeridir.

Yapay viskozite ve yapay yoğunluk yayılımı terimleri ile güçlendirilmiş geleneksel ZSİPH formülasyonunda ise ilgili Δt^f değeri;

$$\Delta t_f^f = \sqrt{\frac{h^f}{a_{max}}} \quad (2.26a)$$

$$\Delta t_{cv}^f = \frac{h^f}{c^f + \max(h^f |\pi_{ij}|)} \quad (2.26b)$$

$$\Delta t^f = 0.2 \min(\Delta t_f^f, \Delta t_{cv}^f) \quad (2.26c)$$

koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Burada a_{max} , akışkan parçacıklarının sahip olduğu azami ivme değeridir.

2.3. Katı Dinamiklerinin Modellenmesi

Bu bölümde, katı dinamiklerinin modellenmesinde kullanılan temel korunum denklemleri ve bu denklemlerin BLİPH yöntemi kapsamında ayırık formları hakkında detaylı bir özet sunulmaktadır.

2.3.1. Korunum denklemleri

Katı dinamiklerini modellemek üzere kullanılacak kütle ve momentumun korunumu denklemleri sırasıyla aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir [6];

$$\rho^s J = \rho_0^s \quad (2.27a)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{\rho_0^s} \nabla_0 \cdot \mathbf{P} + \mathbf{g} \quad (2.27b)$$

burada \mathbf{P} , birinci Piola–Kirchhoff gerilme tensörüdür ve 0 alt indisi, değer veya operatörlerin başlangıç durumu dikkate alınarak belirlenen temsillerini ifade etmektedir. J , deformasyon gradyanının determinantıdır ve ilgili deformasyon gradyanı \mathbf{F} ;

$$\mathbf{F} = \frac{dx}{dX} \quad (2.28)$$

olacak şekilde tanımlanmaktadır. Burada \mathbf{x} ve \mathbf{X} sırasıyla mevcut ve başlangıç konum vektörlerini temsil etmektedir. Birinci Piola–Kirchhoff gerilme tensörü \mathbf{P} aşağıdaki şekilde açılabilir;

$$\mathbf{P} = J \boldsymbol{\sigma} \mathbf{F}^{-T} \quad (2.29)$$

burada $-T$ üst indisi ilgili tensörün devriğinin tersini ifade ederken, σ Cauchy gerilme tensörüdür. σ , iki boyutlu lineer-elastik kurucu model dikkate alınarak düzlem-gerilme ve düzlem-gerinim durumları için sırasıyla;

$$\begin{bmatrix} \sigma^{11} \\ \sigma^{22} \\ \sigma^{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^{11} \\ \varepsilon^{22} \\ \varepsilon^{12} \end{bmatrix} \quad (2.30a)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma^{11} \\ \sigma^{22} \\ \sigma^{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^{11} \\ \varepsilon^{22} \\ \varepsilon^{12} \end{bmatrix} \quad (2.30b)$$

şeklinde açılabilir. Burada E ve ν , sırasıyla malzeme Elastisite modülü ve Poisson oranını temsil etmektedir. ε , Euler gerinim tensörü olup;

$$\varepsilon = \mathbf{F}^{-T} \mathbf{E} \mathbf{F}^T \quad (2.31)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada \mathbf{E} , Green-Lagrange gerinim tensörü olup;

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} [\mathbf{U} + \mathbf{U}^T + \mathbf{U}^T \mathbf{U}] \quad (2.32)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Burada \mathbf{U} , yer değiştirme gradyanının tensörü olup, deformasyon gradyanı \mathbf{F} ve birim matris \mathbf{I} değişkenlerine bağlı olarak, $\mathbf{U} = \mathbf{F} - \mathbf{I}$ eşitliğiyle hesaplanabilmektedir.

2.3.2. BLİPH ayrıklaştırması

BLİPH formülasyonunda momentumun korunumu denkleminin (Eş. 2.27b) yalnızca başlangıç yoğunluk değerine (ρ_0^s) bağlı olması nedeniyle, analizlerde kütle korunumu denkleminin (Eş. 2.27a) çözümüne ihtiyaç duyulmamaktadır [79]. Bu doğrultuda, BLİPH analizinde kullanılmak üzere momentumun korunumu denklemini aşağıdaki şekilde ayrıklaştırılabilmektedir [52,79];

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = \frac{1}{\rho_{0i}^s} \sum_j (\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_j) \cdot \nabla_0 W_{ij} V_{0j} + \mathbf{g} \quad (2.33)$$

Katı alan yüzeylerinde kesintiye uğrayarak tamamlanamayan ağırlık fonksiyonu destek alanları nedeniyle oluşabilecek numerik hataları engellemek amacıyla, mevcut BLİPH yönteminde ağırlık fonksiyonunun türevlerine aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek bir düzeltme matrisi uygulanmaktadır [98,107];

$$\mathbf{L}_i = \sum_j (\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i) \otimes \nabla_0 W_{ij} V_{0j} \quad (2.34)$$

İlgili düzeltme matrisi kullanılarak elde edilen düzeltilmiş ağırlık fonksiyonu gradyanı;

$$\tilde{\nabla}_0 W_{ij} = \mathbf{L}_i^{-1} \nabla_0 W_{ij} \quad (2.35)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Eş. 2.33 içerisindeki ağırlık fonksiyonunun türev ifadesinin, $\nabla_0 W_{ij} = -\nabla_0 W_{ji}$ özelliği dikkate alınarak düzeltilmiş ağırlık fonksiyonu türevi ifadesi ile değiştirilmesiyle ilgili denklem;

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = \frac{1}{\rho_{0i}^s} \sum_j (\mathbf{P}_i \mathbf{L}_i^{-1} \nabla_0 W_{ij} - \mathbf{P}_j \mathbf{L}_j^{-1} \nabla_0 W_{ji}) V_{0j} + \mathbf{g} \quad (2.36)$$

halini almaktadır [6,52]. Bununla birlikte, mevcut tez çalışması kapsamında BLİPH analizlerinde Eş. 2.36'nın aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek basitleştirilmiş formu kullanılacaktır;

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = \frac{1}{\rho_{0i}^s} \sum_j (\mathbf{P}_i \mathbf{L}_i^{-1} + \mathbf{P}_j \mathbf{L}_j^{-1}) \cdot \nabla_0 W_{ij} V_{0j} + \mathbf{g} \quad (2.37)$$

Burada, momentum denklemin ana terimi olan birinci Piola–Kirchhoff gerilme tensörünün \mathbf{P} hesaplanabilmesi için gerekli olan deformasyon gradyanı \mathbf{F} , düzeltilmiş ağırlık fonksiyonu yaklaşımıyla aşağıdaki ayrık formu yardımıyla belirlenmektedir;

$$\mathbf{F}_i = \sum_j (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \otimes \mathbf{L}_i^{-1} \nabla_0 W_{ij} V_{0j} \quad (2.38)$$

Bu tez çalışması kapsamında mevcut BLİPH modelinin kararlılık seviyesinin arttırılması amacıyla momentum denklemi (Eş. 2.37) içerisine ilave yapay viskozite ve kum saati kontrol şeması geliştirmeleri eklenmiştir. Momentum denklemi içerisinde yapay viskozite kaynaklı viskoz gerilmeleri temsil eden \mathbf{P}_{ij}^v ;

$$\mathbf{P}_{ij}^v = J_i \Pi_{ij} \mathbf{F}_i^{-T} \quad (2.39)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada Π_{ij} , yapay viskozite terimi olup, Lin ve diğerleri [93] ve Sun ve diğerlerinin [75] çalışmalarıyla benzer bir şekilde, aşağıdaki gibi açılabilir;

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \alpha^s c^s h^s \rho_0^s \frac{\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij}}{x_{ij} + \eta^s}, & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij} < 0 \\ 0, & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (2.40)$$

burada η^s , x_{ij} değerinin sıfıra yaklaşması sonucu ortaya çıkabilecek numerik hataları engellemek üzere kullanılan ve $\eta^s = 0.01(h^s)^2$ değerine eşit olan bir sabittir.

İPH teorisinin temelini oluşturan çekirdek yaklaşımında, alan değişkenlerinin ağırlık fonksiyonu içerisindeki komşu parçacıkların ortalama değerleri üzerinden hesaplanması nedeniyle, yüksek deformasyon içeren problemlerde BLİPH yaklaşım kum saati modu olarak adlandırılan düzensiz parçacık dağılımlarından mustarip olabilmektedir [6,49,52,108]. Bu doğrultuda Ganzenmüller [52], BLİPH analizlerinde karşılaşılan kum saati modlarını engellemek amacıyla aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek bir düzeltme kuvveti formülasyonu önermiştir;

$$\left(\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} \right)^{HG} = 0.5\kappa \frac{1}{\rho_{0i}^s} \sum_j E_{ij} \frac{\mathbf{e}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij}}{X_{ij}^2} \frac{\mathbf{x}_{ij}}{x_{ij}^2} W_{0ij} V_{0j} \quad (2.41)$$

burada κ , düzeltme kuvvetinin büyüklüğünü belirleyen boyutsuz bir sabit olup, \mathbf{e}_{ij} ,

aşağıdaki şekilde hesaplanabilecek, bir parçacık çiftinin idealize edilmiş lineer ve gerçek konumları arasındaki farkı temsil eden ortalama hata vektörüdür;

$$\mathbf{e}_{ij} = \frac{1}{2}(\mathbf{F}_i + \mathbf{F}_j)\mathbf{X}_{ij} - \mathbf{x}_{ij} \quad (2.42)$$

Bununla birlikte literatürde kum-saati modu kaynaklı düzensiz parçacık dağılımlarının etkilerinden kurtulmak için nispeten düşük interpolasyon uzunluğu ve ilave yapay viskozite terimi gibi ilgili etkileri azaltıcı yaklaşımlara başvurulabildiği de vurgulanmalıdır [79]. Ancak bu gibi yaklaşımlarda, kullanılan yapay viskozite sabitinin değerine bağlı olarak katı alan deformasyonlarında aşırı viskoz davranışlar gözlemlenebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, muhtemel kum saati modlarının oluşumunu engellemek üzere kum saati kontrol şemasının kullanımı benimsenirken, görece olarak düşük bir yapay viskozite sabiti kullanılarak katı alan içerisinde oluşabilecek gerilme gürültülerinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

Sonuç olarak, yapay viskozite ve kum saati kontrol şemalarının ilgili BLİPH momentum eşitliği (Eş. 2.37) içerisine eklenmesiyle, BLİPH momentum denkleminin mevcut tez çalışması kapsamında numerik analizlerde esas alınacak son hali aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir;

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = \frac{1}{\rho_{0i}^s} \sum_j (\mathbf{P}_i \mathbf{L}_i^{-1} + \mathbf{P}_j \mathbf{L}_j^{-1} + \mathbf{P}_{ij}^v \mathbf{L}_i^{-1}) \cdot \nabla_0 W_{ij} V_{0j} + \left(\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} \right)^{HG} + \mathbf{g} \quad (2.43)$$

burada eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim yapay viskozite kaynaklı viskoz etkilerin içerisine eklendiği BLİPH temel momentum denklemini temsil ederken, ikinci terim kum-saati kontrol şeması uygulanması sonucu merkez i parçacığı üzerine etkiyen düzeltme kuvvetini temsil etmektedir.

2.3.3. Katı alanının zaman adımı değerinin belirlenmesi

Mevcut numerik birleşim kapsamında katı alanının modellenmesinde kullanılacak olan BLİPH yaklaşımında zaman adımı değeri Δt^s , akışkan alanına benzer şekilde Courant–Friedrich–Levy (CFL) koşulu ile sınırlandırılarak;

$$\Delta t^s \leq 0.3 \frac{h^s}{c^s} \quad (2.44)$$

eşitliği üzerinden belirlenmektedir. Burada h^s , katı alanına ait interpolasyon uzunluğu olup, c^s katı alan içerisindeki numerik ses hızıdır ve $c^s = \sqrt{K/\rho_0^s}$ değerine eşittir. Burada K , katı alan hacim modülünü temsil etmekte olup, $K = E/[3(1 - 2\nu)]$ eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

2.4. Sınır Koşulları

Bu tez çalışması kapsamında akışkan parçacıklarının sınır ve katı parçacıkları ile etkileşimlerinde Adami ve diğerleri [109] tarafından önerilen yapay sınır parçacıkları (dummy wall particles) yaklaşımı benimsenmiştir. Yapay sınır parçacıkları yaklaşımında ilgili sınır ve katı parçacıkları, akışkan parçacıkları ile etkileşimlerinde birer yapay akışkan parçacığı olarak ele alınmaktadır. Numerik modelde sınır parçacıkları, sınır bölgesine yakın akışkan parçacıklarının ağırlık fonksiyonu destek alanının herhangi bir kesintiye uğramaması ve kompakt destek koşulunun sağlanabilmesi amacıyla interpolasyon uzunluğu ile orantılı olacak şekilde belirli sayıda katmanlar halinde konumlandırılmaktadır. Katı parçacıklarında ise bu değerler geometriye sadık kalınarak belirlenmektedir.

Akışkan parçacıkları ile etkileşim içerisine giren yapay sınır/katı parçacıklarının basınç değerleri P_w , komşu akışkan parçacıklarının katkılarının toplamı şeklinde;

$$P_w = \frac{\sum_f P_f W_{wf} + (\mathbf{g} - \mathbf{a}_w) \cdot \sum_f \rho_f \mathbf{x}_{wf} W_{wf}}{\sum_f W_{wf}} \quad (2.45)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilmektedir [109]. Burada alt indisler w ve f sırasıyla yapay sınır/katı ve komşu akışkan parçacıklarını temsil ederken, \mathbf{a} ivme vektörüdür. Eş. 2.45 kullanılarak basınç değerleri hesaplanan yapay sınır/katı parçacıklarının yoğunluk değerleri, Eş. 2.12'de sunulan hal denklemi yardımıyla aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir;

$$\rho_w = \rho_0 \left[\frac{P_w \gamma}{(c^f)^2 \rho_0} + 1 \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.46)$$

Yapay sınır ve katı parçacıklarının Eş. 2.45 ve 2.46 kullanılarak elde edilen basınç ve yoğunluk değerleri, akışkan parçacıklarının korunum denklemlerine katkı vermelerinin yanı sıra, momentum denklemi vasıtasıyla akışkan parçacıklarının katı parçacıklara uyguladıkları harici (external) kuvvetlerin hesaplanmasında da kullanılmaktadır. Sınır parçacıkları ise analiz boyunca sabit kalmaları veya önceden tanımlı bir fonksiyona göre hareket etmeleri nedeniyle momentum denkleminin kullanımını gerektiren herhangi bir hesaplama adımı gerektirmemektedir.

2.5. Akışkan-Yapı Birleşim Şeması

Mevcut numerik birleşimde akışkan ve katı alanlar için farklı başlangıç parçacık aralığı değerlerinin kullanıldığı bir çoklu-çözünürlük şeması benimsenmiştir [82]. Bununla birlikte, mevcut çoklu-çözünürlük şemasının, akışkan alanında kullanılan başlangıç parçacık aralığı değerinin (Δx^f), katı alanıninkine (Δx^s) kıyasla eşit veya daha büyük olduğu ($\Delta x^f \geq \Delta x^s$) kabulüne dayandığı not edilmelidir. Yapılan ön çalışmalar sonucu, aksi durumlarda özellikle akışkan-yapı arayüzeyinde kullanılan değişkenlerle bağlantılı olarak kararlılık sorunlarının yaşanabildiği gözlemlenmiştir. Ancak mevcut kabulün, hidroelastik AYE problemlerinde sıklıkla karşılaşılan, katı alan geometrisinin akışkan alanına kıyasla göreceli olarak ince kaldığı ve bu doğrultuda numerik yakınsaklığı arttırmak üzere katı alanda daha yüksek çözünürlük kullanımını gerektiren durumları temsil ettiği belirtilmelidir.

Mevcut numerik birleşim akışkan-akışkan, akışkan-katı, akışkan-sınır, katı-akışkan ve katı-katı olmak üzere farklı parçacık tiplerinin oluşturduğu dahili (internal) ve harici (external) etkileşimler barındırmaktadır. Bununla birlikte, geliştirilen mevcut model kapsamında, katı parçacıklarının sınır parçacıklarıyla olan etkileşimlerinin ihmal edildiği vurgulanmalıdır. Akışkan parçacıklarına etkileşimler yoluyla etki eden dahili ve harici kuvvetler sonucu bu parçacıklarda oluşan toplam ivme değerleri;

$$\sum \mathbf{a}^f = \mathbf{a}^{f \rightarrow f} + \mathbf{a}^{s \rightarrow f} + \mathbf{a}^{b \rightarrow f} + \mathbf{g} \quad (2.47)$$

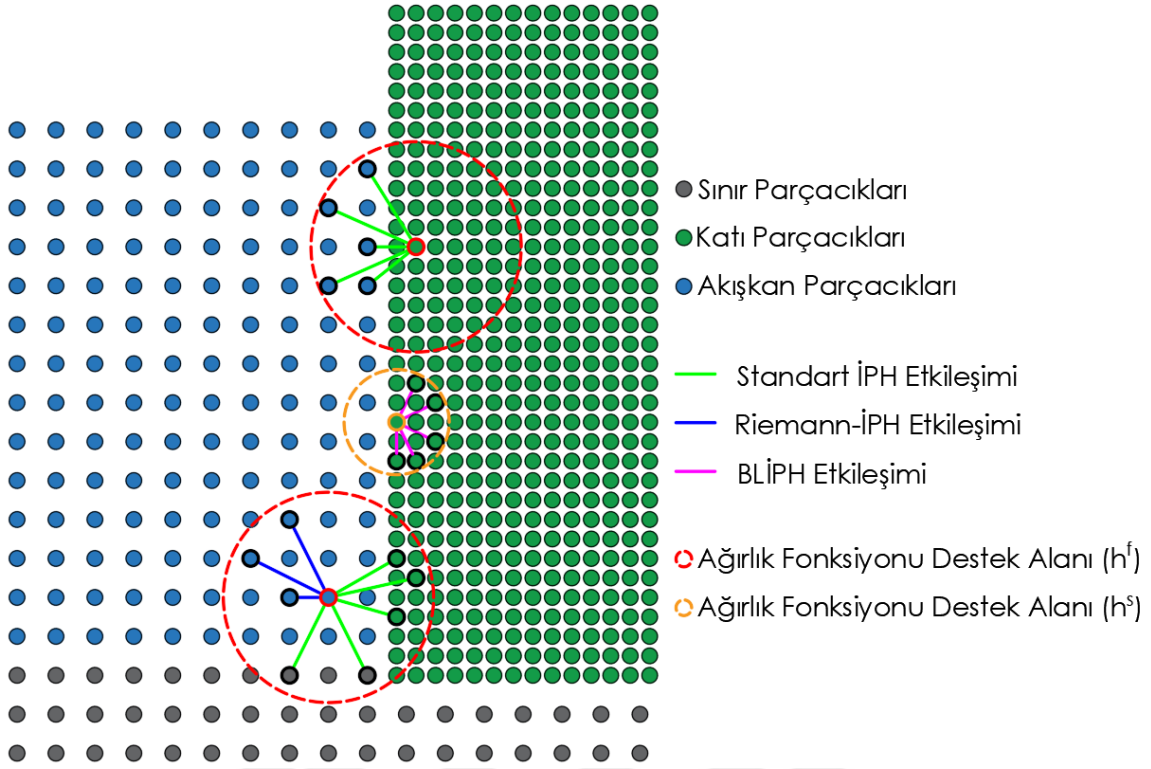
şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada üst indislerde kullanılan f , s ve b ifadeleri sırasıyla akışkan, katı ve sınır alanlarını temsil eden parçacıkları ifade ederken, \rightarrow işaretinin sağ ve sol tarafı sırasıyla kuvvete maruz kalan (merkezi i) ve kuvvet uygulayan (komşu j)

parçacıkları göstermektedir. Eşitliğin sağındaki ilk terim akışkan parçacıklarının diğer akışkan parçacıkları ile etkileşimleri sonucu oluşan dahili ivme değerini, ikinci ve üçüncü terim ise akışkan parçacıklarının sırasıyla katı ve sınır parçacıkları ile etkileşimlerinden kaynaklanan harici ivme değerlerini ifade etmektedir. İlgili ivme değerleri Bölüm 2.2’de sunulan bilgiler ışığında;

$$\mathbf{a}^{f \rightarrow f} = -\frac{2}{\rho_i} \sum_j P^* \nabla W_{ij}^{h^f} V_j \quad (2.48a)$$

$$\mathbf{a}^{s \rightarrow f} = \mathbf{a}^{b \rightarrow f} = -\frac{1}{\rho_i} \sum_j (P_i + P_j) \nabla W_{ij}^{h^f} V_j \quad (2.48b)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada akışkan parçacıklarının diğer akışkan parçacıkları ile etkileşimlerinin Riemann-İPH yaklaşımıyla ele alınırken, akışkan parçacıklarının yapay katı ve sınır parçacıkları ile etkileşimlerinin standart İPH yaklaşımı ile ele alındığı dikkat çekmektedir. İlgili etkileşimlerin, başlangıç akışkan parçacık aralığı (Δx^f) ile başlangıç katı parçacık aralığı (Δx^s) arasında $\Delta x^f / \Delta x^s = 2$ oranı ile şematik bir görünümü Şekil 2.4’te sunulmuştur. Literatürde sınır parçacıkları ile etkileşimlerde de ayrıca Riemann yaklaşımının kullanıldığı çalışmalar da mevcut olmakla birlikte [34,81], bu tez çalışması kapsamında uygulama kolaylığı gözetilerek standart İPH yaklaşımı benimsenmiştir. Bununla birlikte, ilgili standart İPH yaklaşımının herhangi bir viskoz terim barındırmaması nedeniyle akışkan ve sınır alanları arasında serbest kayma (free-slip) sınır koşulunun sağlandığı vurgulanmalıdır.



Şekil 2.4. Mevcut çoklu-çözünürlüklü birleşim şemasındaki parçacık etkileşimlerinin şematik bir görünümü

Katı parçacıklarına etkileşimler yoluyla etki eden dahili ve harici kuvvetler sonucu bu parçacıklarda oluşan toplam ivme değerleri ise;

$$\sum \mathbf{a}^s = \mathbf{a}^{s \rightarrow s} + \mathbf{a}^{f \rightarrow s} + \mathbf{g} \quad (2.49)$$

eşitliği yardımıyla ifade edilebilmektedir. Burada eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim katı parçacıkların diğer katı parçacıklar ile etkileşiminden kaynaklanan dahili ivme değerini, ikinci terim ise katı parçacıklarının akışkan parçacıkları ile etkileşiminden kaynaklanan harici ivme değerini temsil ederken, ilgili ivme değerleri;

$$\mathbf{a}^{s \rightarrow s} = \frac{1}{\rho_{0i}^s} \sum_j (\mathbf{P}_i \mathbf{L}_i^{-1} + \mathbf{P}_j \mathbf{L}_j^{-1} + \mathbf{P}^v_{ij} \mathbf{L}_i^{-1}) \cdot \nabla_0 W_{ij}^{hs} V_{0j} + \left(\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} \right)^{HG} \quad (2.50a)$$

$$\mathbf{a}^{f \rightarrow s} = \frac{m_i^H}{m_i} \left[-\frac{1}{\rho_i} \sum_j (P_i + P_j) \nabla W_{ij}^{hf} V_j \right] \quad (2.50b)$$

eşitlikleri yardımıyla hesaplanabilmektedir. Burada, katı-akışkan etkileşimlerinde katı alan parçacıklarının yapay akışkan parçacıkları ile temsil edilmesi nedeniyle, etkileşim sonucu gerçek katı parçacıklarına etki eden ivme değerleri, parçacık çiftleri arasındaki kuvvet dengesi gözetilerek yapay akışkan parçacığı kütlelerinin gerçek katı parçacık kütlelerine (m_i^H/m_i) oranı ile çarpılmaktadır. Ayrıca, mevcut akışkan-akışkan, akışkan-katı ve katı-akışkan etkileşimlerinde akışkan alanına ait etkileşim uzunluğu değeri (h^f) kullanılırken, katı alanına ait etkileşim uzunluğu değerinin (h^s) yalnızca katı parçacıklarının diğer katı parçacıkları ile etkileşimlerinde kullanıldığı not edilmelidir.

Bununla birlikte, mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH modelinin çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği araştırmalarında referans olarak kullanılacak tekdüze çözünürlüklü geleneksel ZSİPH-BLİPH birleşimde akışkan parçacıklarının diğer akışkan parçacıkları ile etkileşimlerinin ele alınışları dışında teorik olarak bir farklılık bulunmadığı vurgulanmalıdır. Bu doğrultuda, geleneksel ZSİPH-BLİPH birleşiminde mevcut birleşim şemasındaki ilgili etkileşim $\mathbf{a}^{f \rightarrow f}$;

$$\mathbf{a}^{f \rightarrow f} = -\frac{1}{\rho_i} \sum_j (P_i + P_j) \nabla W_{ij} V_j + \mathbf{\Pi}_i^f \quad (2.51)$$

eşitliği kullanılarak ele alınmaktadır.

2.6. Zaman İntegrasyonu (Zİ)

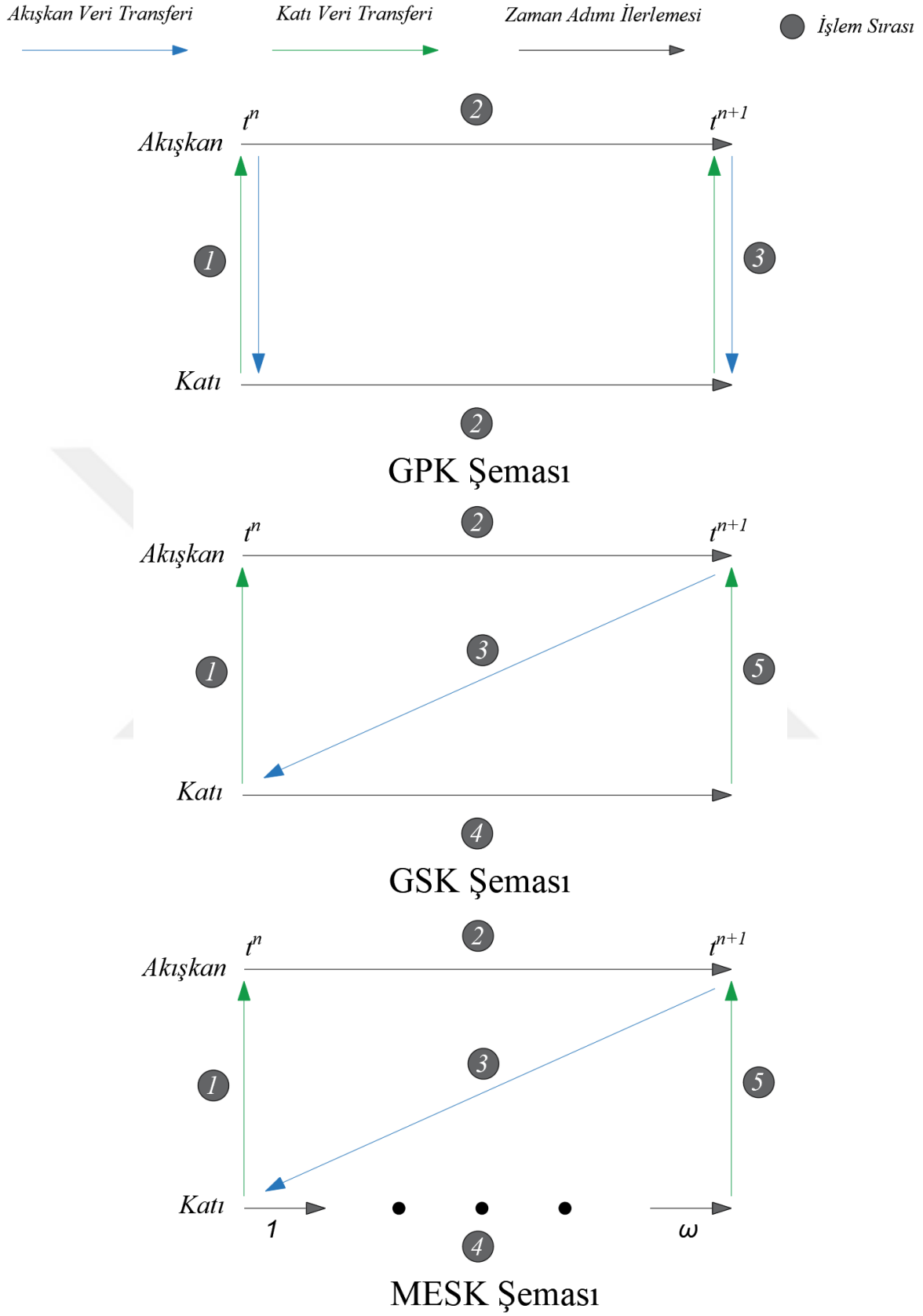
AYE problemlerinin analizinde kullanılan numerik modellerin zaman integrasyonlarında, genel olarak Geleneksel Paralel Kademeli (Conventional Parallel Staggered, CPS) ve Geleneksel Sıralı Kademeli (Conventional Sequential Staggered, CSS) olmak üzere iki farklı yaklaşım benimsenmektedir. Geleneksel Paralel Kademeli (GPK) zaman integrasyonu yaklaşımında, akışkan ve katı alanlar eş zamanlı olarak güncellenirken, Geleneksel Sıralı Kademeli (GSK) zaman integrasyonu yaklaşımında katı alan güncellemesi, akışkan zaman adımı güncellemesinin tamamlanması sonrasında, bu alana ait güncellenmiş değerler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Fourey ve diğerleri [60], çalışmalarında geliştirdikleri İPH-SEY modeli üzerinden bu iki yaklaşımı tanıtmış ve karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Ancak bu iki yaklaşım, aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek;

$$\Delta t = \min (\Delta t^f, \Delta t^s) \quad (2.52)$$

tekdüze zaman adımı kullanımı nedeniyle, çoğunlukla katı alanın gerektirdiği daha küçük zaman adımı değeri tarafından sınırlanmaktadır.

Alternatif bir yaklaşım olarak, Modifiye Edilmiş Sıralı Kademeli (Modified Sequential Staggered, MSS) [79,110] zaman integrasyon şeması, sahip olduğu çoklu-zaman adımı yaklaşımıyla potansiyel olarak yüksek hesaplama verimliliği vaat etmektedir. Modifiye Edilmiş Sıralı Kademeli (*MESK*) yaklaşımında genellikle daha yüksek zaman adımı değerine sahip olan akışkan alanı kendi zaman adımı değeri ile güncellenirken, katı alan, akışkan alanının zaman adımı değeri ile eşitlenecek şekilde $\omega = \lceil \Delta t^f / \Delta t^s \rceil + 1$ kere, yeniden hesaplanan $\Delta t^{s\omega} = \Delta t^f / \omega$ değeri kullanarak güncellenmektedir [68,79]. Burada $\lceil \cdot \rceil$ işleci, aşağı yuvarlanmış bir tam sayıyı ifade etmektedir. *GPK*, *GSK* ve *MESK* integrasyon yaklaşımlarının şematik bir gösterimi Şekil 2.5'te sunulmuştur.

Mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH birleşiminde çoklu zaman adımlı *MESK* yaklaşımının yanı sıra, akışkan ve katı alanlar için sırasıyla Simplektik ve Yarı-Örtük (Semi-Implicit) Euler olmak üzere iki farklı zaman integrasyonu formülasyonunun kullanıldığı hibrit bir yaklaşım benimsenmiştir. Ayrıntıları ilerleyen bölümlerde açıklanmak üzere, mevcut akışkan alanı değişkenlerinin güncellenmesinde kullanılacak olan Simplektik zaman integrasyon şeması tahmin-düzeltilme yaklaşımı kapsamında bir ara adım numerik döngüsü gerektirirken, katı alan güncellenmesinde kullanılacak olan Yarı-Örtük Euler zaman integrasyon şeması herhangi bir ara adım hesaplaması gerektirmemekte ve tek adımlı olarak alan değişkenlerinin güncellenmesini sağlamaktadır. Bu doğrultuda, özellikle çoklu-çözünürlük uygulaması ile yüksek çözünürlük değerlerine çıkılacak katı alanların analizinde, ilave ara adım döngüsünden kaçınarak hesaplama verimliliğinin artırılması amaçlanmaktadır.



Şekil 2.5. GPK, GSK ve MESK zaman integrasyon şemalarında işlem adımları

Bununla birlikte, benimsenen bu yaklaşımın çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği üzerine etkileri, literatürdeki AYE problemlerinin analizlerinde kullanılan İPH birleşimlerinde sıklıkla başvurulan GPK temelli ve hem akışkan hem de katı alanın tahmin-düzeltilme adımları içeren bir zaman integrasyon şeması ile güncellendiği referans modeller oluşturularak incelenecektir. İlgili iki zaman integrasyonu yaklaşımına ait bir özet, bu tez çalışması kapsamında kullanılacak adlandırmalarıyla birlikte Çizelge 2.1’de sunulmaktadır. Burada *ZI1*, referans olarak alınacak yaklaşımı temsil ederken, *ZI2* mevcut tez çalışması kapsamında benimsenen hibrit yaklaşımı temsil etmektedir.

Çizelge 2.1. Mevcut tez çalışması kapsamında numerik analizlerde kullanılan zaman integrasyonu yaklaşımları

	<i>Akışkan Alanı</i>	<i>Katı Alanı</i>	<i>Zaman Adımı</i>	<i>Zaman İntegrasyon Yaklaşımı</i>
<i>ZI1</i>	Simplektik	Simplektik	Tekdüze	GPK
<i>ZI2</i>	Simplektik	Yarı-Örtük Euler	Çoklu	MESK

İlerleyen alt bölümlerde *ZI1*’in akışkan ve katı, *ZI2*’nin ise yalnızca akışkan alanında kullanılacak olan Simplektik ve *ZI2*’nin katı alanında kullanılacak olan Yarı-Örtük Euler integrasyon şemalarının teorik altyapısı detaylı bir özet olarak sunulmaktadır. İlgili anlatımlarda kullanılacak olan notasyon aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = \mathbf{F}_i \quad (2.53a)$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = R_i \quad (2.53b)$$

2.6.1. Simplektik zaman integrasyon şeması

Bu tez çalışmasının *ZI1* analizleri kapsamında akışkan ve katı, *ZI2* analizleri kapsamında ise yalnızca akışkan alanı Simplektik tahmin-düzeltilme zaman integrasyon şeması [77,111,112] kullanılarak güncellenmektedir. Mevcut Simplektik zaman integrasyon şeması, konum-bazlı Verlet [82,113] şeması ile oldukça benzer bir yaklaşıma sahip olmakla birlikte, bu şemadan farklı olarak tahmin adımı kapsamında konum değerleri ile birlikte hız değerleri de hesaplanmaktadır [77].

Simplektik zaman integrasyon şeması ile akışkan alanının güncellenmesi

Simplektik zaman integrasyon şeması ile akışkan alanının güncellenmesinde ilk olarak tahmin adımı kapsamında akışkan parçacıklarının ara adım konum, hız ve yoğunluk değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenmektedir;

$$\mathbf{x}_i^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{x}_i^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{v}_i^n \quad (2.54a)$$

$$\mathbf{v}_i^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{v}_i^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{F}_i^n \quad (2.54b)$$

$$\rho_i^{n+\frac{1}{2}} = \rho_i^n + \frac{\Delta t}{2} R_i^n \quad (2.54c)$$

Ara adım konum, hız ve yoğunluk değerlerinin hesaplanması sonrasında, bu değerlere bağlı olarak gerçekleştirilen bir numerik döngü ile ilgili parçacıkların ara adım ivme $\mathbf{F}_i^{n+\frac{1}{2}}$ ve yoğunluk değişimi $R_i^{n+\frac{1}{2}}$ değerleri hesaplanmaktadır. Ardından, düzeltme adımı kapsamında bir sonraki zaman adımına ait konum, hız ve yoğunluk değerleri;

$$\mathbf{v}_i^{n+1} = \mathbf{v}_i^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \mathbf{F}_i^{n+\frac{1}{2}} \quad (2.55a)$$

$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \mathbf{x}_i^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \left(\frac{\mathbf{v}_i^{n+1} + \mathbf{v}_i^{n+\frac{1}{2}}}{2} \right) \quad (2.55b)$$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^{n+\frac{1}{2}} \frac{2 - \varepsilon_i^{n+\frac{1}{2}}}{2 + \varepsilon_i^{n+\frac{1}{2}}} \quad (2.55c)$$

eşitlikleri kullanılarak güncellenmektedir. Burada $\varepsilon_i^{n+\frac{1}{2}}$;

$$\varepsilon_i^{n+\frac{1}{2}} = - \left(R_i^{n+\frac{1}{2}} / \rho_i^{n+\frac{1}{2}} \right) \Delta t \quad (2.56)$$

eşitliği kullanılarak elde edilmektedir.

Simplektik zaman integrasyon şeması ile katı alanının güncellenmesi

Simplektik zaman integrasyon şeması kullanılarak katı alan değişkenlerinin güncellenmesinde akışkan alanına benzer bir yaklaşım benimsenirken, BLİPH yaklaşımında momentumun korunumu denkleminin başlangıç yoğunluk değerine bağlı olması nedeniyle numerik döngü içerisinde yoğunluk değeri için herhangi bir güncellemeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu doğrultuda ilk olarak, katı alan ara adım konum ve hız değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır;

$$\mathbf{x}_i^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{x}_i^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{v}_i^n \quad (2.57a)$$

$$\mathbf{v}_i^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{v}_i^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{F}_i^n \quad (2.57b)$$

Ara adım konum ve hız değerlerinin hesaplanması akabinde bu değerlere bağlı olarak gerçekleştirilen bir numerik döngü sonucu katı alan ara adım ivme değerleri $\mathbf{F}_i^{n+\frac{1}{2}}$ elde edilmekte ve düzeltme adımı ile bir sonraki zaman adımına ait konum ve hız değerleri;

$$\mathbf{v}_i^{n+1} = \mathbf{v}_i^n + \Delta t \mathbf{F}_i^{n+\frac{1}{2}} \quad (2.58a)$$

$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \mathbf{x}_i^n + \Delta t \left(\frac{\mathbf{v}_i^{n+1} + \mathbf{v}_i^n}{2} \right) \quad (2.58b)$$

eşitlikleri kullanılarak güncellenmektedir.

2.6.2. Yarı-Örtük Euler zaman integrasyon şeması

Zİ2 analizleri kapsamında, katı alan değişkenlerinin güncellenmesinde kullanılacak olan Yarı-Örtük Euler (Simplektik Euler) zaman integrasyon şemasında katı parçacıklarının konum ve hız değerleri herhangi bir ara adım hesaplaması gerektirmeden tek bir numerik döngü içerisinde;

$$\mathbf{v}_i^{n+1} = \mathbf{v}_i^n + \Delta t \mathbf{F}_i^n \quad (2.59a)$$

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta t v_i^{n+1} \quad (2.59b)$$

eşitlikleri kullanılarak güncellenmektedir. Burada, katı parçacıklarına ait konum değerlerinin güncellenirken simplektik zaman integrasyonu şeması ile benzer şekilde bir sonraki zaman adımına ait hız değerini v_i^{n+1} içeren bir eşitliğin kullanıldığına dikkat edilmelidir.

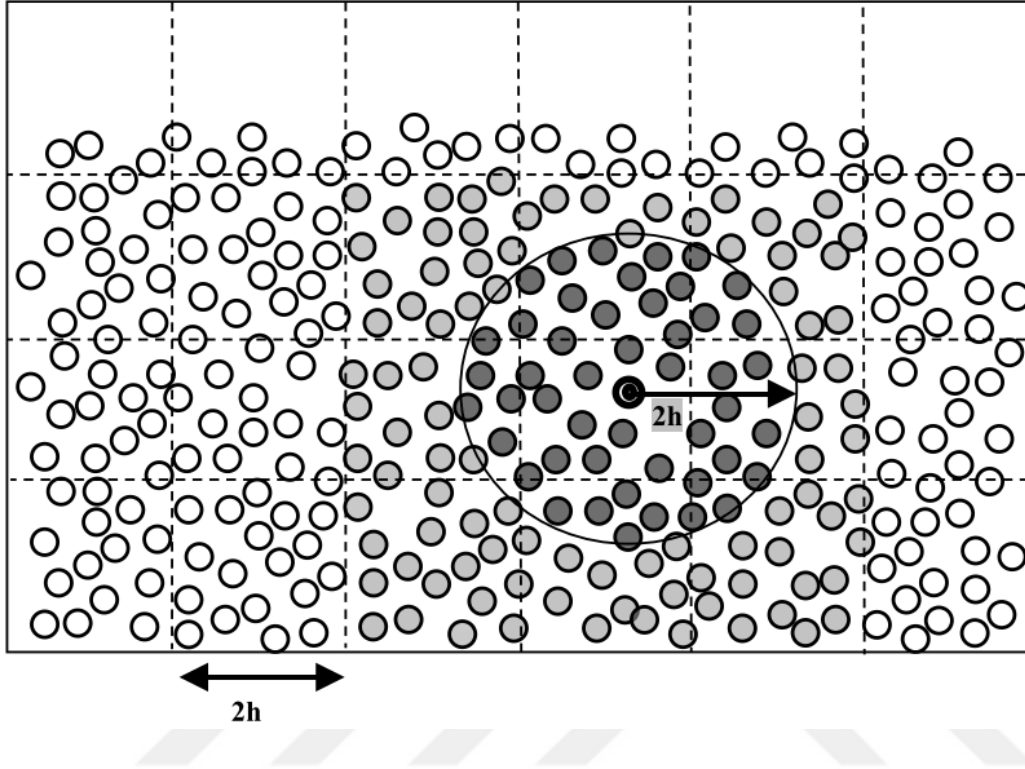
2.7. Komşu Parçacık Arama Şeması

İPH yönteminde her bir parçacık, ağırlık fonksiyonunun destek alanı içerisindeki komşu parçacıklar ile etkileşim içerisinde. Bu nedenle çözümün ilk adımı olarak, her bir parçacığın etkileşim içerisinde olduğu komşu parçacıkların belirlenmesi gerekmektedir. Bu gereklilik, kullanılan parçacık sayısı ile orantılı olarak analizlerde yüksek hesaplama maliyetlerine neden olmaktadır. Bu doğrultuda araştırmacılar tarafından çeşitli komşu parçacık arama şemaları geliştirilerek İPH yönteminin hesaplama verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır [114,115]. Bu tez çalışması kapsamında ise Dominguez ve diğerlerinin [114] çalışmasını takiben hücre bağlantılı liste (cell-linked list) yöntemi komşu parçacık arama şeması olarak benimsenmiştir.

İPH yaklaşımında problem alanını oluşturan her bir parçacığın etkileşim içerisinde olduğu komşu parçacıklar, kullanılan ağırlık fonksiyonu ile ilişkili olarak, κ katsayısı ile belirlenen ağırlık fonksiyonunun kompakt destek alanı üzerinden belirlenmektedir. Mevcut tez çalışması kapsamında kullanılan Wendland C2 tipi ağırlık fonksiyonunda bu değer $\kappa=2$ olup, bununla ilişkili olarak iki boyutlu analizlerde ağırlık fonksiyonu destek alanını temsil eden dairenin yarıçapı $2h$ değerini almaktadır.

Hücre bağlantılı liste komşu parçacık arama şemasının ilk adımı olarak problem alanı, ağırlık fonksiyonu destek alanının boyutunu belirleyen $2h$ değeri temel alınarak oluşturulan kare hücreler ($2h \times 2h$) yardımıyla alt hücrelere ayrılmakta ve ilgili alt hücreler ayırt edici bir hücre numarası ile tanımlanmaktadır. Böylece, numerik analizler sırasında herhangi bir hücre içerisinde yer alan bir parçacığa muhtemel komşu olabilecek parçacıkların sayısı, iki boyutlu analizler için toplam 9, üç boyutlu analizler için ise toplam 27 hücrenin barındırdığı parçacık sayısına indirgenebilmektedir. Bahse konu yaklaşımın iki boyutlu analizler için temsili bir gösterimi Şekil 2.6'da sunulmuştur. İlgili görselde ağırlık fonksiyonu destek alanı

içerisindeki komşu parçacıklar koyu gri renk ile boyanmışken, komşu hücreler içerisindeki sayıları indirgenmiş muhtemel komşu parçacıklar açık gri renk ile boyanmıştır.



Şekil 2.6. Komşu parçacık arama şemasında problem alanının hücelere ayrıklaştırılması [115]

Mevcut tez çalışması kapsamında problem alanının alt hücelere bölünmesi sonrasında, hücre bağlantılı komşu parçacık arama şeması kapsamında gerçekleştirilen işlemler maddeler halinde aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir;

- **Adım 1:** Problem alanını temsil eden her bir parçacığın ait olduğu hücrenin tespit edilmesi
- **Adım 2:** Ait olduğu hücre tespit edilen bu parçacıkların hücre numaralarına göre sıralandığı bir dizinin oluşturulması
- **Adım 3:** Adım 2'de belirlenen sıralı dizi içerisinde her bir hücre için kapsanan parçacık aralığının başlangıç ve bitiş indekslerinin belirlenmesi

Burada, parçacık etkileşimlerinin ele alındığı fonksiyonlarda kullanılmak üzere gerekli komşu parçacık verilerinin (örn. konum, hız, yoğunluk) taşındığı dizilerin de Adım 2 ile

paralel olarak sıralanması gerektiği ayrıca not edilmelidir.

Belirlenen ilgili hücre başlangıç ve bitiş indeksleriyle, herhangi bir parçacık için etkileşim içerisinde bulunan komşu parçacıkların belirlenmesi adımı, tüm parçacıkları kapsayan bir tarama yapılması gerekliliğinden sadece komşu hücrelerin kapsadığı indeks aralığında gerçekleştirilecek bir taramaya indirgenmekte ve böylece yüksek hesaplama maliyetinden kaçınılmaktadır.

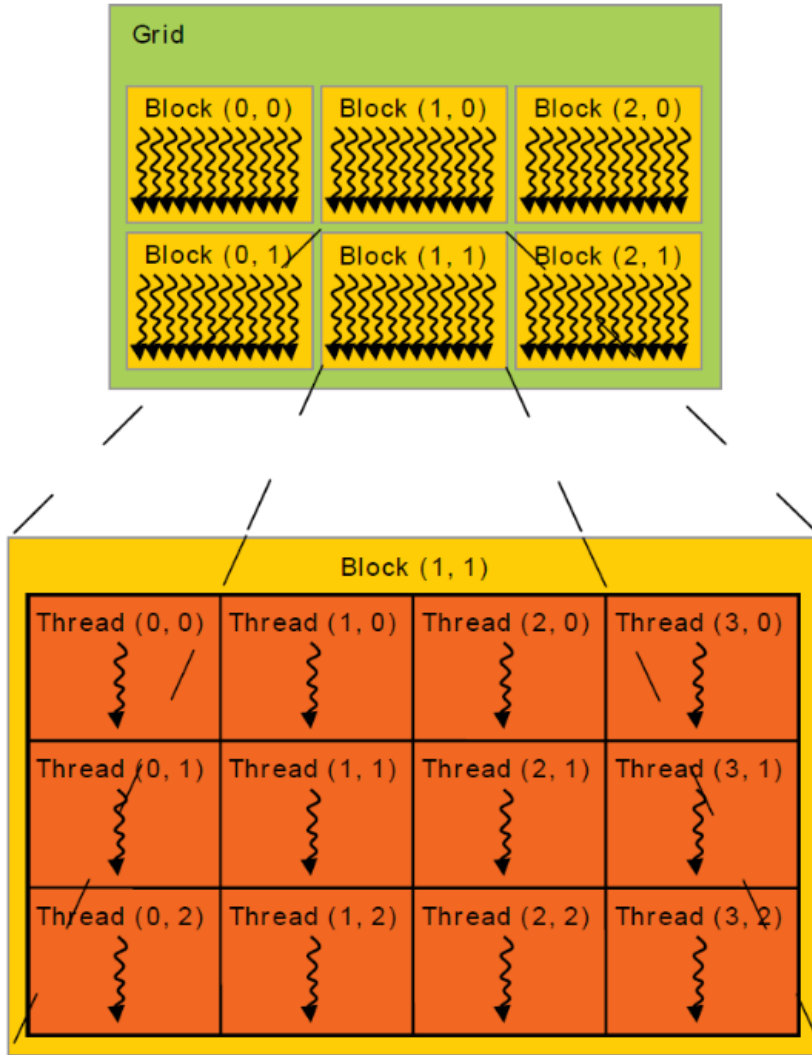
Mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH kodunda yukarıda maddeler halinde sıralanan tüm işlemlerin, problem tipine bağlı olarak kapsanan sınırlı, katı ve akışkan parçacık grupları için ayrı ayrı gerçekleştirildiği not edilmelidir. Bununla birlikte, katı parçacıkları, akışkan ve katı alanlarında farklı interpolasyon uzunluğu değerlerinin kullanılabilmesi ihtimali ve dahili etkileşimlerin ele alındığı BLİPH formülasyonunun başlangıç değerlerine dayanması nedeniyle, yalnızca akışkan-katı etkileşiminde kullanılan yapay katı parçacıkları ve esas katı parçacıkları olarak iki ayrı grup üzerinden ele alındığı da vurgulanmalıdır.

2.8. GİB Tabanlı Programlama Modeli

Bir donanım olarak GİB kartları, yüksek yoğunlukta aritmetik işlemlerin paralel olarak yürütülebilmesi için özelleşmiş elemanlardır. CUDA (Compute Unified Device Architecture) ise Nvidia GİB kartları ile programlama yapılabilmesini mümkün kılan bir mimari olup, bünyesinde bir C++ programlama dili uzantısı içermektedir [115]. GİB kartlarının yüksek paralel işlem kabiliyetleri, İPH uygulamaları için oldukça uygun bir yapı sunmakta olup, ilgili yapı bazı araştırmacılar tarafından İPH uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmıştır [6,30,51,77]. Bu doğrultuda, mevcut tez çalışması kapsamında sunulan Riemann-İPH-BLİPH numerik birleşimi, C++ programlama dili uzantısı kullanılarak CUDA mimarisi üzerinden geliştirilmiştir. Bu bölümde geliştirilen numerik kod kapsamında CUDA mimarisi hakkında bir özet sunulacak olup, detaylı bilgilere CUDA C++ Programlama Kılavuzu'ndan (CUDA C++ Programming Guide) ulaşılabilmektedir.

CUDA mimarisi üzerinde geliştirilen kod yapıları, "kernel" adı verilen ve "__global__" etiketi ile tanımlanıp, "<<<...>>>" yapılandırması kullanılarak yürütülen fonksiyonlara dayanmaktadır. Kernel fonksiyonları içerisindeki her bir öge, "thread" adı verilen bağımsız

iş parçacıkları tarafından yönetilmekte olup, bir kernel fonksiyonu çağırıldığında ilgili işlem otomatik olarak kullanılan iş parçacığı sayısı kadar paralelleştirilmektedir. GİB yapıları içerisinde iş parçacıkları bir araya gelerek “blok (block)” yapılarını oluştururken, blokların bir araya gelmesi ile “ızgara (grid)” yapıları oluşmakta (Şekil 2.7) ve ilgili yapılar ihtiyaçlara göre bir, iki veya üç boyutlu olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 2.7. GİB üzerindeki iş parçacığı, blok ve ızgara yapıları (Kaynak: CUDA C++ Programlama Kılavuzu)

Bir blok yapısı içerisindeki iş parçacığı sayısı, kullanılan GİB kartı özelliklerine bağlı şekilde azami olarak 512 veya 1024 değerine ulaşabilmekte olup, ilgili her bir iş parçacığı, diğer iş parçacıkları tarafından erişilemeyen kendi yerel belleğine (local memory) sahiptir. Ek olarak, bir blok yapısı içerisindeki iş parçacıklarının ortak olarak kullanabildikleri bir paylaşımlı bellek (shared memory) yapısı mevcut olmakla birlikte, bir kernel fonksiyonu

özelinde tanımlanan iş parçacıklarının tamamı GİB global bellek (global memory) yapısına erişim sağlayabilmektedir.

GİB tabanlı İPH uygulamaları, kullanılan kodların optimizasyon seviyeleri ve problem tipine bağlı olarak Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit, CPU) tabanlı uygulamalara kıyasla ortalama 10 ile 100 kat arası bir hızlanma sağlayabilmektedir [30]. Bu noktada, mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH kodunda yüksek optimizasyon seviyesinin öncelenmediği vurgulanmalıdır. Mevcut çalışma kapsamında Bölüm 2.7’de ifade edilen komşu parçacık arama şeması gibi bazı temel optimizasyon tekniklerinin kullanılmasının yanı sıra, GİB tabanlı İPH uygulamalarındaki ileri optimizasyon teknikleri hakkında detaylı bilgilere Dominguez ve diğerlerinin [116] gerçekleştirdiği çalışmadan ulaşılabilmektedir.

Çözüm hızı üzerinde temel etkilerden birine sahip olan değişkenlerin duyarlık seviyesi göz önüne alındığında, mevcut Riemann-İPH-BLİPH kodu kapsamında Dominguez’in çalışmasını [115] takiben, sadece parçacıkların konum verilerinin çift duyarlıklı (double precision) olarak saklanması tercih edilmiştir. İlgili parçacıklara ait zaman adımı güncellemesi ve komşu parçacık arama hesaplamaları da benzer şekilde çift duyarlıklı olarak ele alınırken, parçacık etkileşimlerinin ele alındığı fonksiyonlarda, merkez ve komşu parçacıklar arasındaki görelî konum değerleri çift duyarlıklı olarak hesaplanırken, çözüm hızı dikkate alınarak devam eden işlemlerde tek duyarlıklı (single precision) olarak saklanmaktadır. Geliştirilen GİB tabanlı mevcut numerik koda ait sistem güncellemesi ve akışkan parçacıklarının diğer parçacıklar ile etkileşimlerinin ele alındığı kernel fonksiyonlarının sadeleştirilmiş özet gösterimleri EK-1’de sunulmaktadır.

2.9. Geliştirilen Bilgisayar Kodundaki Bir Numerik Döngünün Özeti

Mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen bilgisayar kodu, temel olarak $ZI2$ zaman integrasyon şeması ile bir çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH numerik birleşimine dayanmakta olsa da çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği araştırmalarında referans olarak kullanılmak üzere ayrıca $ZI1$ temelli ZSİPH-BLİPH ve Riemann-İPH-BLİPH analizleri gerçekleştirilmektedir. Bu iki farklı zaman integrasyonu şeması, geliştirilen bilgisayar kodunda iki farklı numerik döngünün kullanımını mecbur kılmaktadır. Bu bölümde, $ZI1$ ve $ZI2$ zaman integrasyon şemasına dayanan bu modellerin, bir zaman adımı

kapsamındaki numerik döngüleri özet halinde açıklanacak olup, her iki yaklaşım için ana döngü öncesinde yapılan işlemler;

- **Adım 1:** Akışkan, katı ve sınır parçacıklarının oluşturularak ve ilgili parçacıklara ait başlangıç değerlerinin (yoğunluk, basınç, hız vb.) atanması
- **Adım 2:** Sınır ve katı parçacıklarının komşu parçacık arama işlemlerinin gerçekleştirilmesi
- **Adım 3:** BLIPH analizleri kapsamında uygulanacak ağırlık fonksiyonu düzeltme matrisinin L_i hesaplanması

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada, sınır parçacıklarının komşu parçacık arama şeması kapsamındaki işlemlerinin ilgili parçacıkların mevcut tez çalışması kapsamında ele alınacak kıyaslama durumlarında yer değiştirmeden sabit kalmaları, katı parçacıklarına ait komşu parçacık arama işlemi ve ağırlık fonksiyonu düzeltme matrisi L_i hesaplamasının ise ilgili işlemlerin başlangıç durumuna ait değerlere dayanması nedeniyle ana döngü öncesinde gerçekleştirildiği not edilmelidir.

2.9.1. Zİİ numerik döngüsü

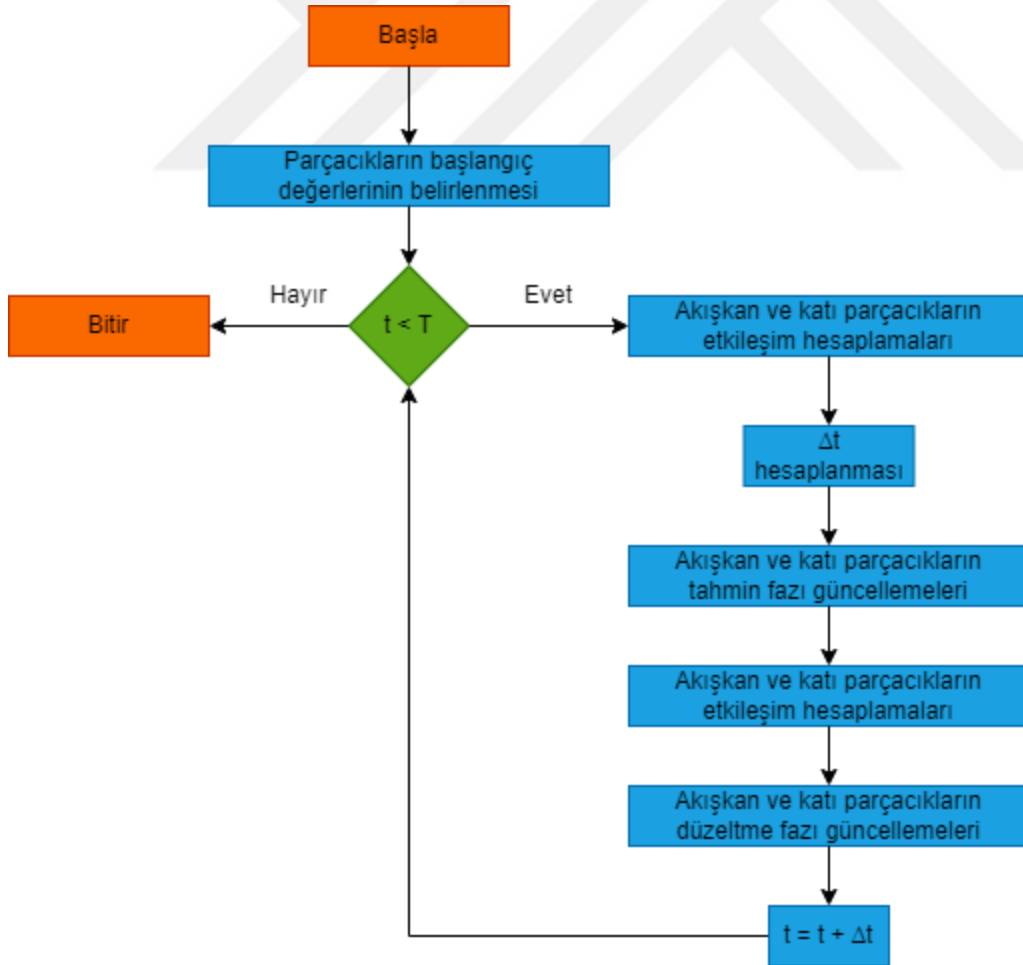
Zİİ zaman integrasyon şemasında akışkan ve katı alana ait değişkenler, tahmin-düzeltilme adımları içeren Simplektik zaman integrasyon formülasyonu kullanılarak *GPK* yaklaşımı ile güncellenmektedir. İlgili zaman integrasyonu yaklaşımına ait ana döngü içerisinde sırasıyla;

- **Adım 1:** Akışkan parçacıklarının komşu parçacık arama işlemlerinin gerçekleştirilmesi
- **Adım 2:** Akışkan-katı parçacık etkileşimde kullanılacak yapay katı parçacıklarının komşu parçacık arama işlemlerinin gerçekleştirilmesi
- **Adım 3:** Sınır ve yapay katı parçacıklarının basınç ve yoğunluk değerlerinin belirlenmesi
- **Adım 4:** Akışkan parçacıklarının akışkan, sınır ve yapay katı parçacıkları ile etkileşimlerinin hesaplanması
- **Adım 5:** Katı parçacıklarının P değerlerinin hesaplanması
- **Adım 6:** Katı parçacıklarının katı ve akışkan parçacıkları ile etkileşimlerinin

hesaplanması

- **Adım 7:** Simplektik zaman integrasyon şeması ile tahmin fazı kapsamında akışkan ve katı parçacıklarının ara zaman adımı değerlerinin hesaplanması
- **Adım 8:** Hesaplanan ara zaman adımı değerleri kullanılarak ilk altı adımın tekrarlanması
- **Adım 9:** Simplektik zaman integrasyon şeması ile düzeltme adımı kapsamında akışkan ve katı parçacıklarına ait bir sonraki adım değerlerinin hesaplanması

işlemleri gerçekleştirilmektedir. Burada, parçacık etkileşimlerini temel alan her adım öncesinde, komşu parçacıklara ait verilerinin taşındığı ana dizilerin, komşu parçacık arama şeması kapsamında belirlenen sıralamaya uygun olarak düzenlenmesi gerektiği ayrıca not edilmelidir. *Z1* zaman integrasyonu yaklaşımı ile gerçekleştirilen analizlere ait sadeleştirilmiş bir akış şeması Şekil 2.8’de sunulmaktadır.



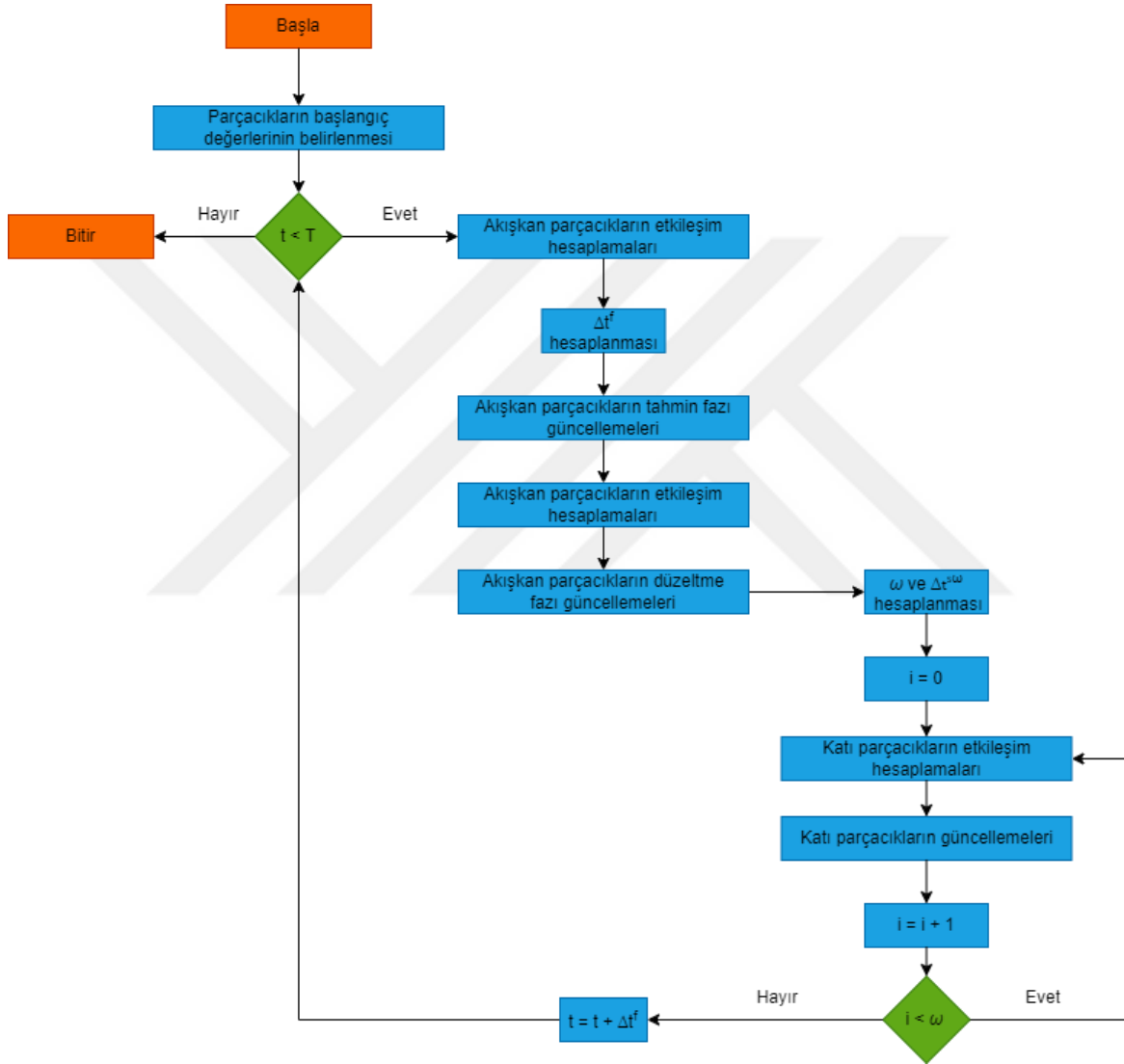
Şekil 2.8. *Z1* zaman integrasyonu yaklaşımı ile gerçekleştirilen analizlere ait sadeleştirilmiş akış şeması

2.9.2. Zİ2 numerik döngüsü

Zİ2 zaman integrasyon şemasında akışkan ve katı alan değişkenleri sırasıyla Simplektik ve Yarı-Örtük Euler zaman integrasyon formülasyonları kullanılarak *MESK* yaklaşımı ile güncellenmektedir. İlgili zaman integrasyonunun ana döngüsü kapsamında yapılacak işlemler sırasıyla;

- **Adım 1:** Yapay katı parçacıklarının komşu parçacık arama işlemlerinin gerçekleştirilmesi
- **Adım 2:** Akışkan parçacıklarının komşu parçacık arama işlemlerinin gerçekleştirilmesi
- **Adım 3:** Sınır ve yapay katı parçacıklarının basınç ve yoğunluk değerlerinin belirlenmesi
- **Adım 4:** Akışkan parçacıklarının akışkan, sınır ve yapay katı parçacıkları ile etkileşimlerinin hesaplanması
- **Adım 5:** Simplektik zaman integrasyon şeması ile tahmin fazı kapsamında akışkan parçacıklarının ara zaman adımı değerlerinin hesaplanması
- **Adım 6:** Hesaplanan akışkan ara zaman adımı değerleri kullanılarak Adım 2, 3 ve 4'ün tekrarlanması
- **Adım 7:** Simplektik zaman integrasyon şeması ile düzeltme fazı kapsamında akışkan parçacıklarının bir sonraki zaman adımı değerlerinin hesaplanması
- **Adım 8:** Δt^f ve Δt^s değerleri kullanılarak ω ve bu değere bağlı olarak güncel $\Delta t^{s\omega}$ değerinin hesaplanması
- **Adım 9:** Akışkan parçacıklarının komşu parçacık arama işlemlerinin gerçekleştirilmesi
- **Adım 10:** Katı parçacıklarının P değerlerinin hesaplanması
- **Adım 11:** Katı parçacıklarının katı ve akışkan parçacıkları ile etkileşimlerinin hesaplanması
- **Adım 12:** Yarı-Örtük Euler zaman integrasyon şeması ile katı parçacıklarının bir sonraki zaman adımı değerlerinin hesaplanması
- **Adım 13:** Yapay katı parçacıklarının komşu parçacık arama işlemlerinin gerçekleştirilmesi
- **Adım 14:** Toplamda ω adet olacak şekilde Adım 10, 11, 12 ve 13'ün tekrarlanması

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada $ZI1$ döngüsü ile benzer şekilde, parçacık etkileşimlerini temel alan her adım öncesinde, komşu parçacıklara ait verilerinin taşındığı ana dizilerin, komşu parçacık arama şeması kapsamında belirlenen sıralamaya uygun olarak düzenlenmesi gerektiği ayrıca not edilmelidir. $ZI2$ zaman integrasyonu yaklaşımı ile gerçekleştirilen analizlere ait sadeleştirilmiş bir akış şeması Şekil 2.9'da sunulmaktadır.



Şekil 2.9. $ZI2$ zaman integrasyonu yaklaşımı ile gerçekleştirilen analizlere ait sadeleştirilmiş akış şeması

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

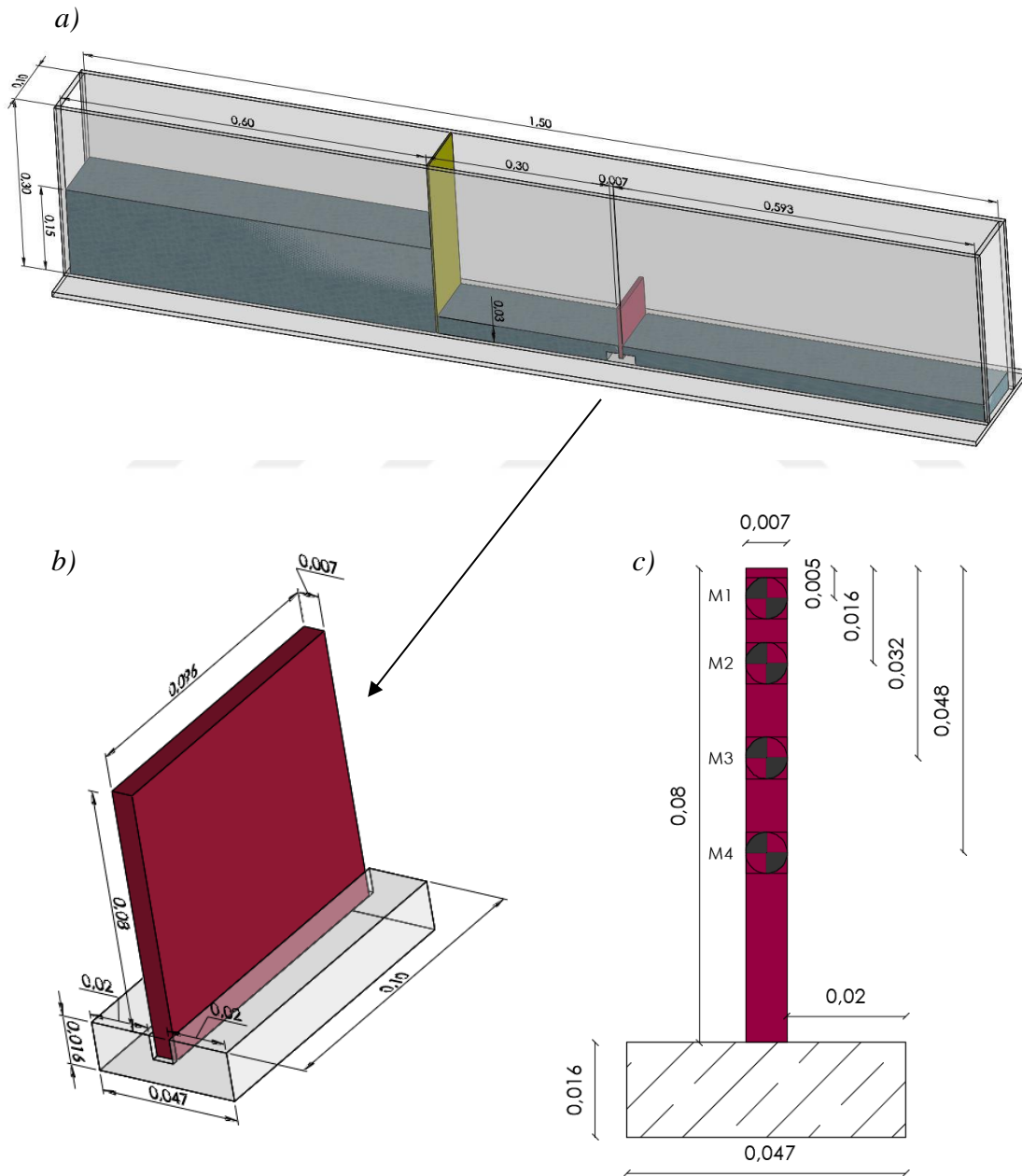
Mevcut tez çalışması kapsamında, hidroelastik AYE problemlerinin analizinde başvurulan numerik modeller için bir kıyaslama durumu olarak kullanılmak üzere, ıslak yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimine dayanan deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaya ait veriler ayrıca bir makaleye dönüştürülerek yayımlanmış [7] ve açık kaynak kodlu DualSPHysics-Project Chrono [77,117] birleşimi ile numerik olarak modellenmiştir. Bu bölümde, ilgili deney düzeneği ve ölçüm tekniği hakkında detaylı bir bilgi verilerek, elde edilen deneysel ölçüm verileri sunulacak olup, bu veriler geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin çözüm yakınsaklığı araştırmalarında kullanılacaktır.

3.1. Deney Düzeneği

Deneysel, 8 mm kalınlığında akrilik malzemeden imal edilmiş, 150 cm uzunluğunda, 30 cm yüksekliğinde ve 10 cm genişliğinde dikdörtgen bir tank kullanılarak, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen tank, 3 mm kalınlığında ve tank kesitini tamamen kapatacak şekilde 10 cm genişlik ve 30 cm yükseklik değerine sahip rijit bir plaka yardımıyla memba ve mansap olarak iki bölüme ayrılmıştır. $B=60$ cm genişliğindeki memba kısmı başlangıçta $H=15$ cm derinliğinde su ile doldurulurken, 89,7 cm uzunluğundaki mansap kısmı başlangıçta $H^t=3$ cm derinliğinde su ile doldurulmuştur. Başlangıçta durağan halde bulunan ilgili memba ve mansap su kütleleri, analizlerde hava-su arayüzünün kolaylıkla ayırt edilebilmesini sağlamak amacıyla gıda boyası yardımıyla mavi renge boyanmıştır. Memba ve mansap bölgesini ayıran rijit plaka, makara sistemi yardımıyla bir ağırlığa bağlanmış olup, ilgili ağırlığın belirli bir yükseklikten serbest bırakılmasıyla rijit kapağın memba su kütlesi önünden ani bir şekilde kaldırılması ve bu doğrultuda ıslak yatak üzerinde idealize edilmiş bir baraj yıkılması akımının oluşturulması amaçlanmaktadır.

$d^s=7$ mm kalınlığa ve $L^s=80$ mm uzunluğa sahip, kauçuk malzemeden imal edilmiş elastik engel, memba su yüzeyinden 30 cm ileriye, 47 mm genişlik ve 16 mm yüksekliğinde akrilik malzemeden imal edilmiş rijit bir temel içerisine sabitlenmiştir. Elastik engelin genişliği, maruz kalacağı deformasyon sırasında tank yüzeyleri ile oluşacak temasları engellemek

amacıyla dikdörtgen tank genişliğinden 4 mm daha az olacak şekilde 96 mm olarak belirlenmiş ve engel, tankın yan yüzeyleri ile eşit açıklıklar bırakılacak şekilde tank genişliğinin orta noktasına konumlandırılmıştır. Bununla birlikte, elastik engel üzerindeki hidrodinamik yükler neticesinde oluşacak noktasal yer değiştirmelerin ölçülebilmesi amacıyla engel yüzeyine dört adet işaretleyici ($M1-M4$) yapılandırılmıştır. Deney düzeneğinin genel bir görünümü, elastik engelin detaylı bir gösterimi ve ölçüm noktalarının elastik engel yüzeyi üzerindeki konumlarıyla birlikte Şekil 3.1’de sunulmuştur.

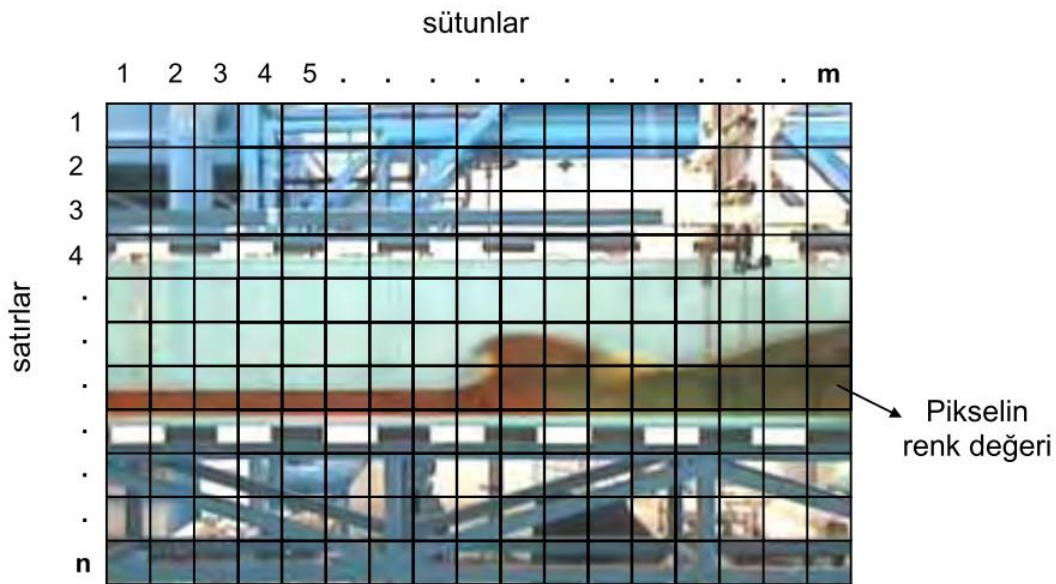


Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik bir görünümü ve ölçüm noktalarının ($M1-M4$) konumu

3.2. Ölçüm Tekniği

Mevcut deneysel çalışma ile ıslak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının neden olduğu hidrodinamik yükler sonucu elastik engel üzerinde meydana gelecek noktasal yer değiştirmelerin ölçülerek, hidroelastik AYE problemlerinin analizinde kullanılacak numerik modellerin çözüm yakınsaklığı araştırmasında bir kıyaslama durumu olarak kullanılabilmesi amaçlanmaktadır. İlgili ölçümler, dijital video görüntüleri üzerinden görüntü işleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme tekniği, baraj yıkılması problemlerinde su yüzü profilleri ve noktasal su derinliği değerlerinin [118–125] ve mevcut tez çalışmasına benzer şekilde hidroelastik AYE problemlerindeki katı alanların noktasal yer değişimi değerlerinin [59,97] elde edilmesi amacıyla araştırmacılar tarafından başarı ile kullanılmıştır.

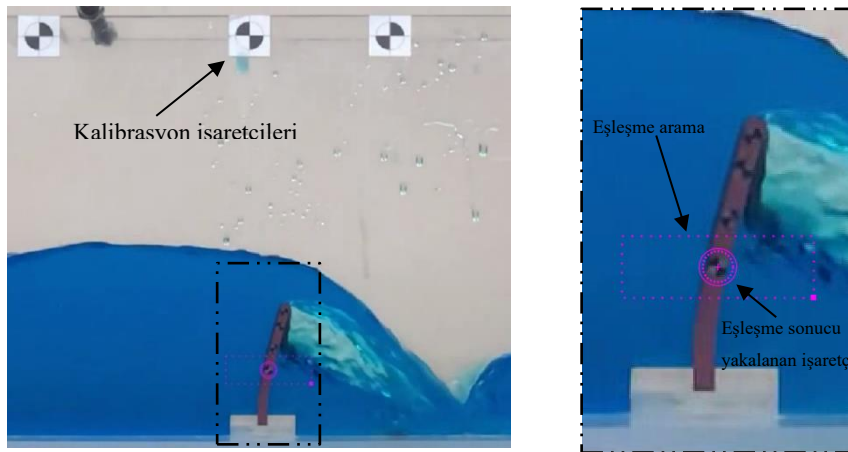
Görüntü işleme tekniğinde kaynak olarak kullanılan video görüntüleri, ardışık olarak sıralanmış resim karelerinden oluşmakta ve bir saniyelik görüntü kesitinin içerdiği resim karelerinin sayısı Saniyelik Görüntü Sayısı (Frames Per Second, FPS) olarak adlandırılmaktadır. Video görüntülerini oluşturan resim kareleri ise piksel adı verilen küçük hücrelerin bir araya gelmesiyle meydana gelmektedir. Bu doğrultuda görüntüler, piksellerin oluşturduğu satır ve sütunlardan meydana gelen bir matris olarak tanımlanabilmekte [121] ve bu matrisi oluşturan piksellerin sayısı videonun çözünürlüğünü ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Bir resim karesini oluşturan piksellerin şematik bir görünümü [121]

Pikseller, resim kareleri içerisinde sahip oldukları özgün koordinat değerlerinin yanı sıra genellikle Kırmızı Yeşil Mavi (Red Green Blue, RGB) kodlaması kullanılarak ifade edilen bir renk değeri taşımaktadır (Şekil 3.2). Görüntü işleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler bu iki temel veri üzerinden şekillenmektedir. Serbest yüzeyli akımlarda noktasal su derinliği ölçümleri ve serbest yüzey profillerinin belirlenmesi, bir eksen boyunca dizilen pikseller içerisinde keskin renk değişiminin gerçekleştiği piksel koordinatının görüntü işleme kapsamında kullanılan yazılımlar tarafından tespit edilip bir arayüzey olarak tanımlanması ile hayata geçmektedir. Benzer şekilde video görüntüleri içerisinde ayırt edici renk dağılımına sahip bir alan, video görüntülerini oluşturan resim kareleri boyunca ilgili alandaki piksellerin temsil ettiği renk dağılımı ile eşleşen bölgelerin bilgisayar kodları yardımıyla tespit edilmesi sonucu takip edilebilmekte ve yer değiştirmeleri hesaplanabilmektedir. Görüntü işleme tekniği ile yer değiştirme ve uzunluk ölçümlerinde ilk olarak piksellerin resim karesi içerisindeki koordinatları belirlenirken, sonrasında bu koordinat değerleri metrik kalibrasyonlar ile uzunluk değerlerine çevrilebilmektedir [97,121].

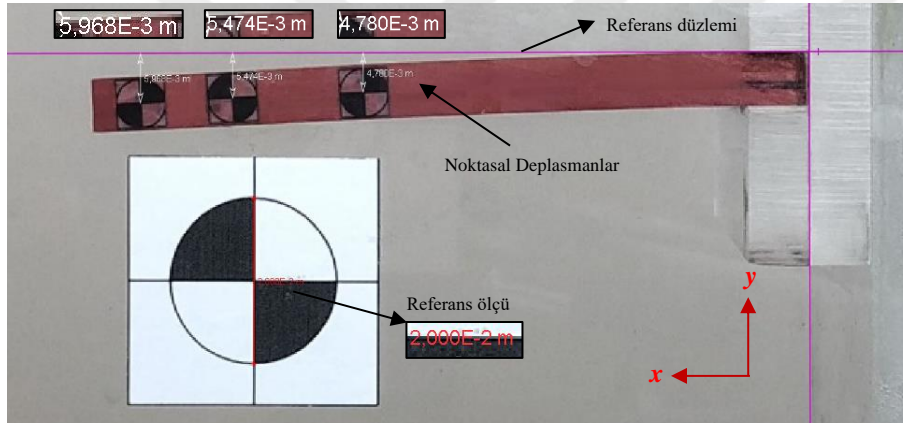
Bu tez çalışması kapsamındaki deneysel ölçümler açık kaynak kodlu Tracker (<https://physlets.org/tracker>) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda tüm deneysel süreç, daha sonrasında işlenmek üzere bir kamera yardımıyla 1080p (1920x1080 piksel) çözünürlükte ve 240 Saniyelik Görüntü Sayısı değeri kullanılarak kaydedilmiştir. Kaydedilen video görüntüleri Tracker yazılımına yüklenerek elastik engel kesitine yapıştırılan işaretçilerin analiz boyunca takibi yapılmış ve bir referans uzunluk yardımıyla metrik kalibrasyonları gerçekleştirilerek işaretçilerin noktasal yer değişimleri elde edilmiştir. Ölçüm sürecine ait bir görsel kesit Şekil 3.3'te sunulmaktadır.



Şekil 3.3. Görüntü işleme tekniği ile elastik engel üzerindeki noktasal yer değişimi ölçümleri

3.3. Elastik Engel Elastisite Modülünün Tahmin Edilmesi

Bu bölümde kauçuk malzemeden imal edilmiş elastik engelin numerik modellemelerde kullanılmak üzere Elastisite modülünün yaklaşık olarak hesaplanması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda deneylerde kullanılacak elastik engelin, kendi ağırlığı altındaki noktasal deplasmanlarının ölçülmesi ve Euler-Bernoulli kiriş teorisi yardımıyla ilgili deplasman değerlerinden Elastisite modülünün tahmin edilmesi planlanmaktadır. Problemin statik doğası doğrultusunda, ölçümler kendi ağırlığı altında denge haline ulaşmış elastik plakanın bir resim karesi üzerinden görüntü işleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlgili ölçümler Şekil 3.1b’de sunulan işaretçilerin ilk üçü ($M1-M3$) üzerinden gerçekleştirilmiş olup, ölçüm sürecine ait bir görsel Şekil 3.4’te sunulmuştur.



Şekil 3.4. Elastik engelin kendi ağırlığı altındaki noktasal deplasman değerlerinin görüntü işleme yöntemi ile ölçülmesi

Şekil 3.4’te görülebileceği üzere, ilgili ölçümler ilk olarak elastik engel üst kenarı baz alınarak gerçekleştirilmiş (u_y^{REF}) ve bu değerlerden elastik engel kalınlığının yarısına eşdeğer bir büyüklük çıkarılarak Elastisite modülü hesaplamalarında kullanılacak olan kiriş kesitindeki noktasal deplasman değerleri (u_y) elde edilmiştir. İlgili Elastisite modülü hesaplamaları, aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek Euler-Bernoulli kiriş teorisi yardımıyla gerçekleştirilmiştir;

$$u_y(x) = \frac{qx^2(6L^2 - 4Lx + x^2)}{24EI} \quad (3.1)$$

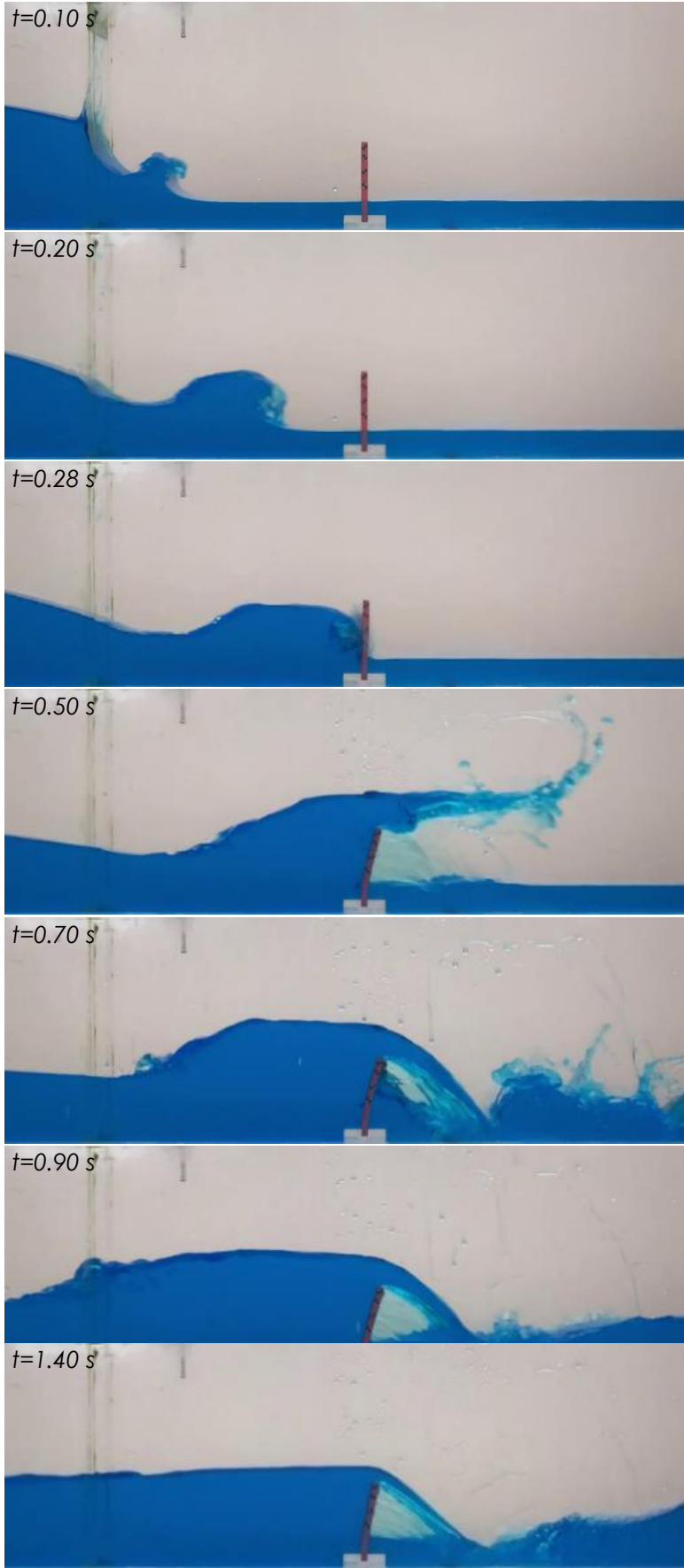
burada x ve L sırasıyla ölçüm noktasının yatay düzlemdeki koordinatını ve elastik engelin uzunluğunu temsil ederken, I engelin atalet momentidir. q , elastik engelin öz ağırlığından kaynaklanan düzgün yayılı yükü temsil ederken, bu değer deney öncesinde tespit edilen malzeme yoğunluğu $\rho^s=1250 \text{ kg/m}^3$ üzerinden hesaplanabilmektedir. Gerçekleştirilen hesaplamalara ait detaylı bir özet Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Eşitlik 3.1 yardımıyla $M1$, $M2$ ve $M3$ noktalarındaki deplasman verilerinden sırasıyla $E=5,71$, $5,72$ ve $5,71 \text{ MPa}$ değerleri hesaplanmış olup, analizlerde $E=5,7 \text{ MPa}$ kabulünün makul bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir.

Çizelge 3.1. Elastik engel Elastisite modülünün yaklaşık olarak hesaplanması

	x -koordinatı [m]	$u_y(x)^{REF}$ [m]	$u_y(x)$ [m]	E [MPa]
$M1$	0,075	0.005968	0.002468	5,71
$M2$	0,064	0.005474	0.001974	5,72
$M3$	0,048	0.004780	0.001280	5,71

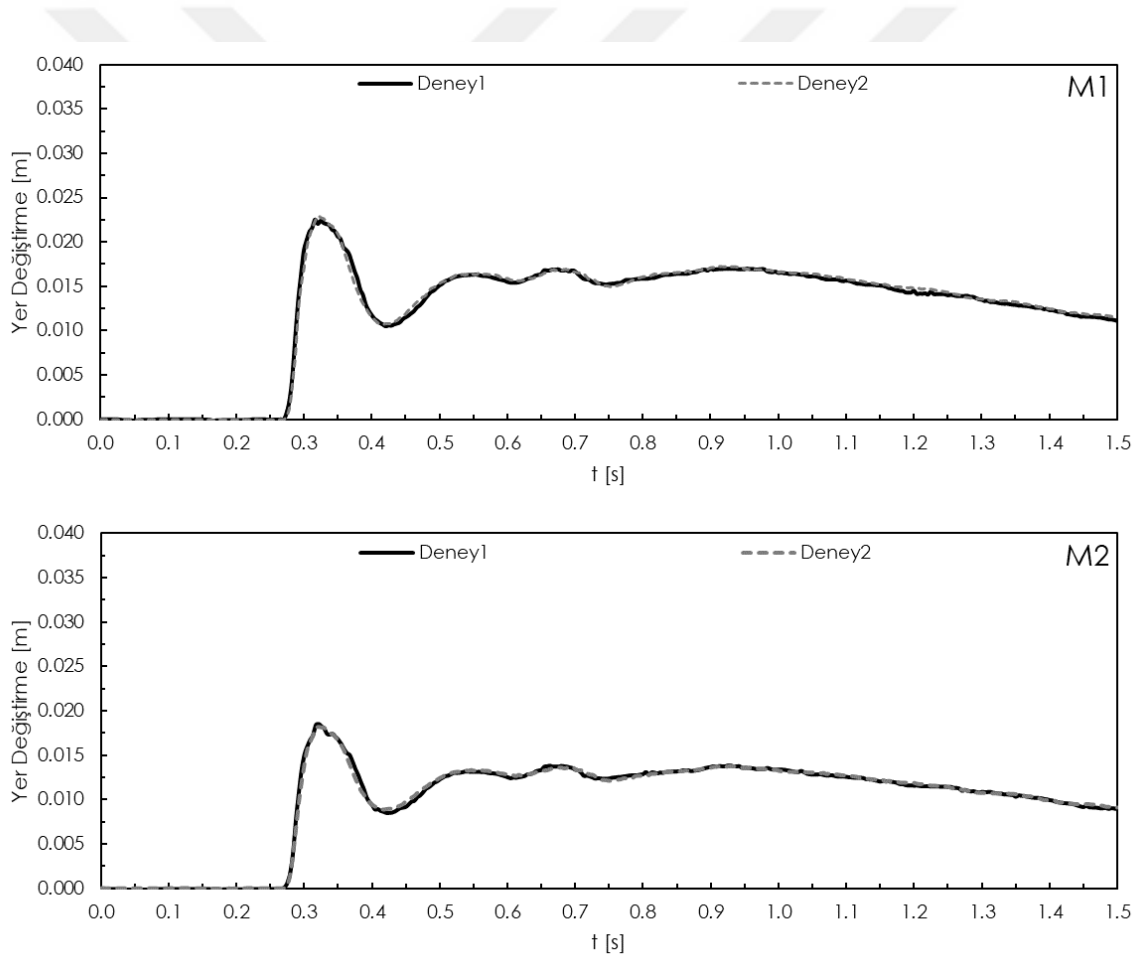
3.4. Deney Sonuçları

Mevcut deneysel çalışma ıslak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile olan etkileşimine dayanmaktadır. Memba ve mansap kısımlarını ayıran rijit plakanın ani bir şekilde durağan su kütlesi önünden kaldırılmasıyla, memba su kütesinin mansaptaki su kütesini sürüklemeye başlayarak mantar benzeri bir jet oluşumuna neden olduğu ve bu yapının ıslak yatak üzerinde bir miktar ilerledikten sonra elastik engele oldukça yakın bir noktada kırıldığı gözlemlenmiştir. Oluşan kırılım sonucunda kaotik akışkan-hava karışımı elastik engel ile etkileşime girmekte ve engel üzerinde ani bir şekil değişimine neden olmaktadır. Elastik engelin deforme olmasıyla, akışkan kütesinin bir kısmı engeli aşarak mansap kısmına doğru hareketini devam ettirirken, bir kısmının engelin memba kısmında kabarmaya başladığı görülmektedir. Kabarma sonucu ufak düzeyde bir hidrolik sıçrama ile kırılıp memba kısmına doğru yayılmaya başlayan bir yansıma dalgasının oluşumu dikkat çekerken, paralelinde engel üzerindeki statik etkiler daha baskın hale gelmektedir. Farklı zaman adımlarına ait deneysel görüntüler Şekil 3.5’te sunulmakta olup, mevcut deneysel çalışmanın içerdiği karmaşık serbest yüzeyli akım karakteristiği ile numerik modeller için zorlayıcı bir kıyaslama durumu olduğu düşünülmektedir.

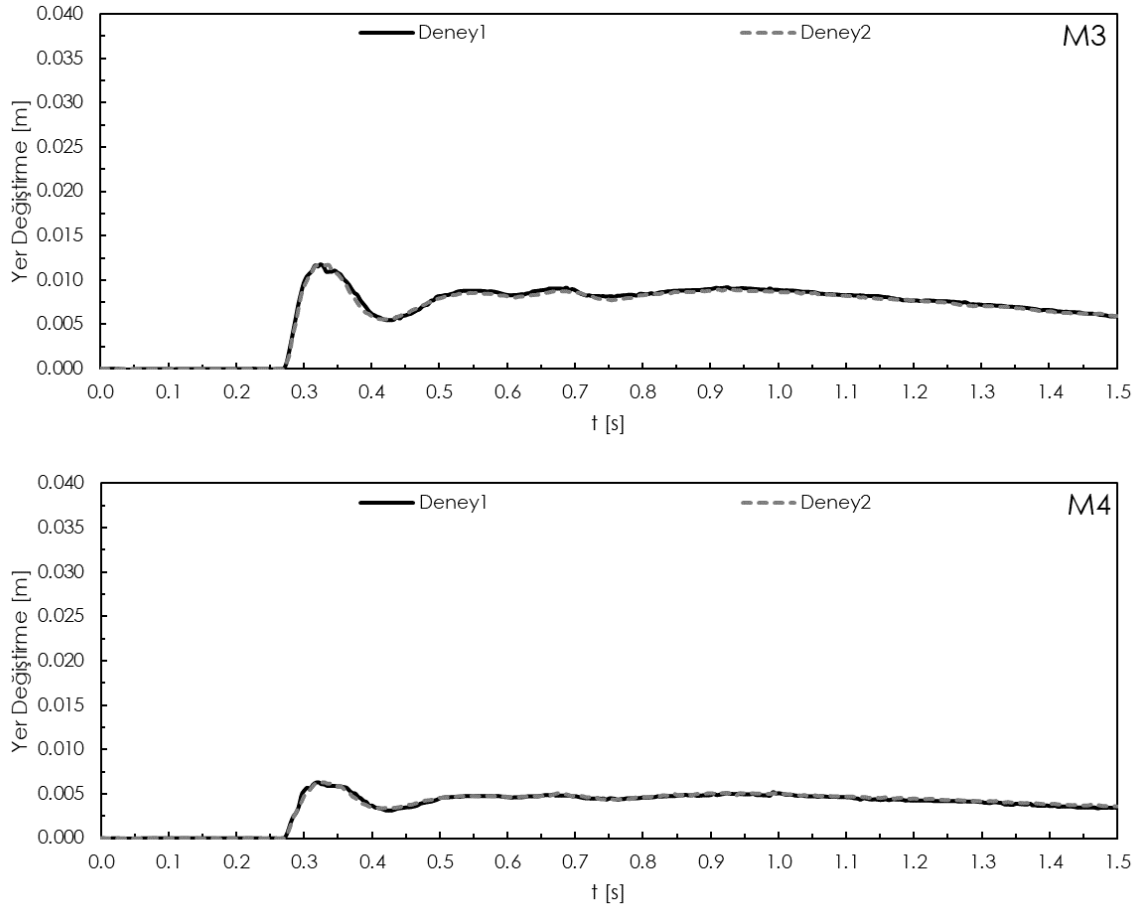


Şekil 3.5. Farklı zaman adımlarında deneysel çalışmaya ait görsel kesitler

Deneysel tekrarlanabilirlik kapsamında deneyler iki kez gerçekleştirilmiş olup, her iki deney için ölçüm noktalarının yatay düzlemdeki yer değiştirmeleri $t=1.5$ s için ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.6'da sunulmuştur. İlgili şekil incelendiğinde, her iki deneyde de birbirlerine oldukça yakın noktasal yer değiştirme verilerinin elde edildiği dikkat çekmektedir. Bununla birlikte elastik engelin dalga önüyle ilk etkileşimi sonrasında maruz kaldığı ani şekil değiştirme ve ardından gelen gevşemenin, yatay yer değiştirme verileri içerisinde belirgin olarak ayırt edilebildiği görülmektedir. Akabinde ilgili şekil değiştirme değerlerinde ufak salınımlarla birlikte tekrardan bir miktar artış gözlemlenmemekte ve statik etkilerin baskın hale gelmesiyle, elastik engelin memba kısmındaki su seviyesi ile orantılı olarak, şekil değiştirme değerlerinin düşüş eğilimine girdiği görülmektedir.



Şekil 3.6. Elastik engel ölçüm noktalarındaki (M1-M4) yatay yer değiştirme ölçümleri



Şekil 3.6. Elastik engel ölçüm noktalarındaki (M1-M4) yatay yer değiştirme ölçümleri (devamı)

4. NUMERİK ANALİZLER

Bu bölümde geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH kodunun çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği çeşitli kıyaslama durumları kullanılarak araştırılacaktır. İlk olarak, mevcut numerik birleşimin katı alan modellemesinde kullanılacak olan, yapay viskozite ve kum saati kontrol şeması ile kararlılık seviyesi artırılmış BLİPH modeli, bir konsol kirişin serbest titreşimi problemi üzerinden düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme koşulları altında ele alınıp, parçacık çözünürlüğünün çözüm yakınsaklığına etkisi, konsol kiriş uç nokta deplasmanının analitik çözüm sonuçları üzerinden incelenecektir. Akabinde, mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin hidroelastik AYE problemlerindeki çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği, elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi, baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi, kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi ve son olarak, mevcut tez çalışması kapsamında hidroelastik AYE analizlerinde kıyaslama durumu olarak kullanılması amacıyla deneysel olarak ele alınan, ıslak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi problemleri üzerinden araştırılacaktır.

İlgili araştırmalar, deneysel ölçümler, analitik çözümler ve mevcut tez çalışması kapsamında karşılaştırmalarda referans olarak kullanılmak üzere geliştirilen, tekdüze çözünürlüklü ve geleneksel zaman integrasyonu (*ZII*) yaklaşımını ZSİPH-BLİPH ve Riemann-İPH-BLİPH numerik birleşimlerinin hesaplamaları ile literatürdeki diğer numerik model sonuçları kullanılarak gerçekleştirilecektir. Böylece, mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH yaklaşımının çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği araştırmalarının yanı sıra, zaman integrasyonu ve akışkan alanında kullanılan İPH yaklaşımının numerik hesaplamalar üzerine etkilerini de kapsayan bir incelemenin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Burada, kullanılacak referans modellerden biri olan ZSİPH-BLİPH birleşiminin, mevcut tez çalışması kapsamında bir yayına [80] dönüştürülerek hidroelastik AYE problemlerinin analizlerinde kullanıldığı not edilmelidir.

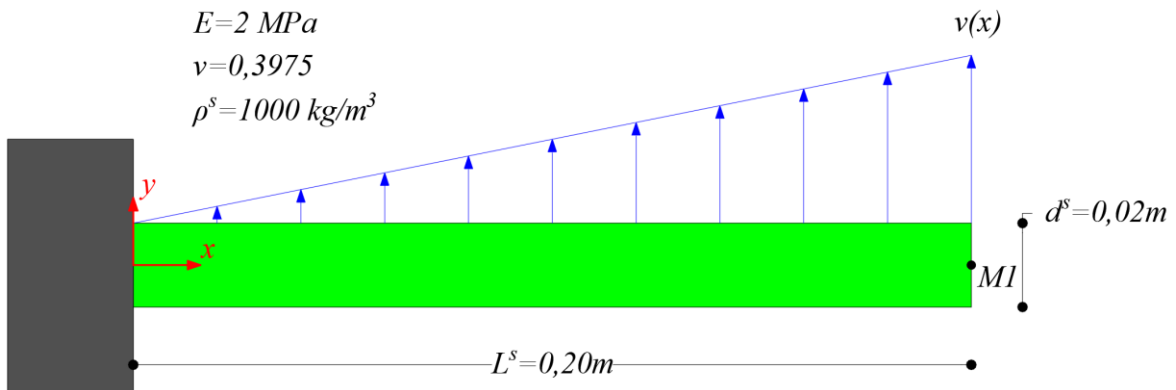
4.1. Konsol Kirişin Serbest Titreşimi Problemi

Bu bölümde bir konsol kirişin serbest titreşimi problemi [47,94] mevcut BLİPH modeliyle ele alınacaktır. Konsol kiriş, $L^s=0,2$ m boyunda ve $d^s=0,02$ m kalınlığında olup, $\rho^s=1000$ kg/m^3 yoğunluk, $E=2$ MPa Elastisite modülü ve $\nu=0,3975$ Poisson oranı değerlerine sahiptir. İlgili kiriş, başlangıç sınır koşulu olarak, yer çekimsel ivme değerleri ihmal edilmiş halde aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek bir $v_y(x)$ hız dağılımına maruz kalmaktadır;

$$v_y(x) = \xi c^s \frac{f(x)}{f(L^s)} \quad (4.1a)$$

$$f(x) = (\cos k_w L^s + \cosh k_w L^s)(\cosh k_w x - \cos k_w x) + (\sin k_w L^s - \sinh k_w L^s)(\sinh k_w x - \sin k_w x) \quad (4.1b)$$

burada ξ hız büyütme faktörü olup, analizlerde $\xi = 0,01$ değeri kullanılmıştır. k_w , dalga numarasını temsil ederken, konsol kirişin temel titreşim frekansı için $k_w L^s = 1,875$ değeri benimsenmiştir. Geliştirilen BLİPH modelinin çözüm yakınsaklığı konsol kiriş uç nokta (MI) deplasman değerleri kullanılarak araştırılacak olup, mevcut problemin şematik bir görünümü ilgili ölçüm noktasının konumuyla birlikte Şekil 4.1’de sunulmaktadır.



Şekil 4.1. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminin şematik bir görünümü ve ölçüm noktasının konumu

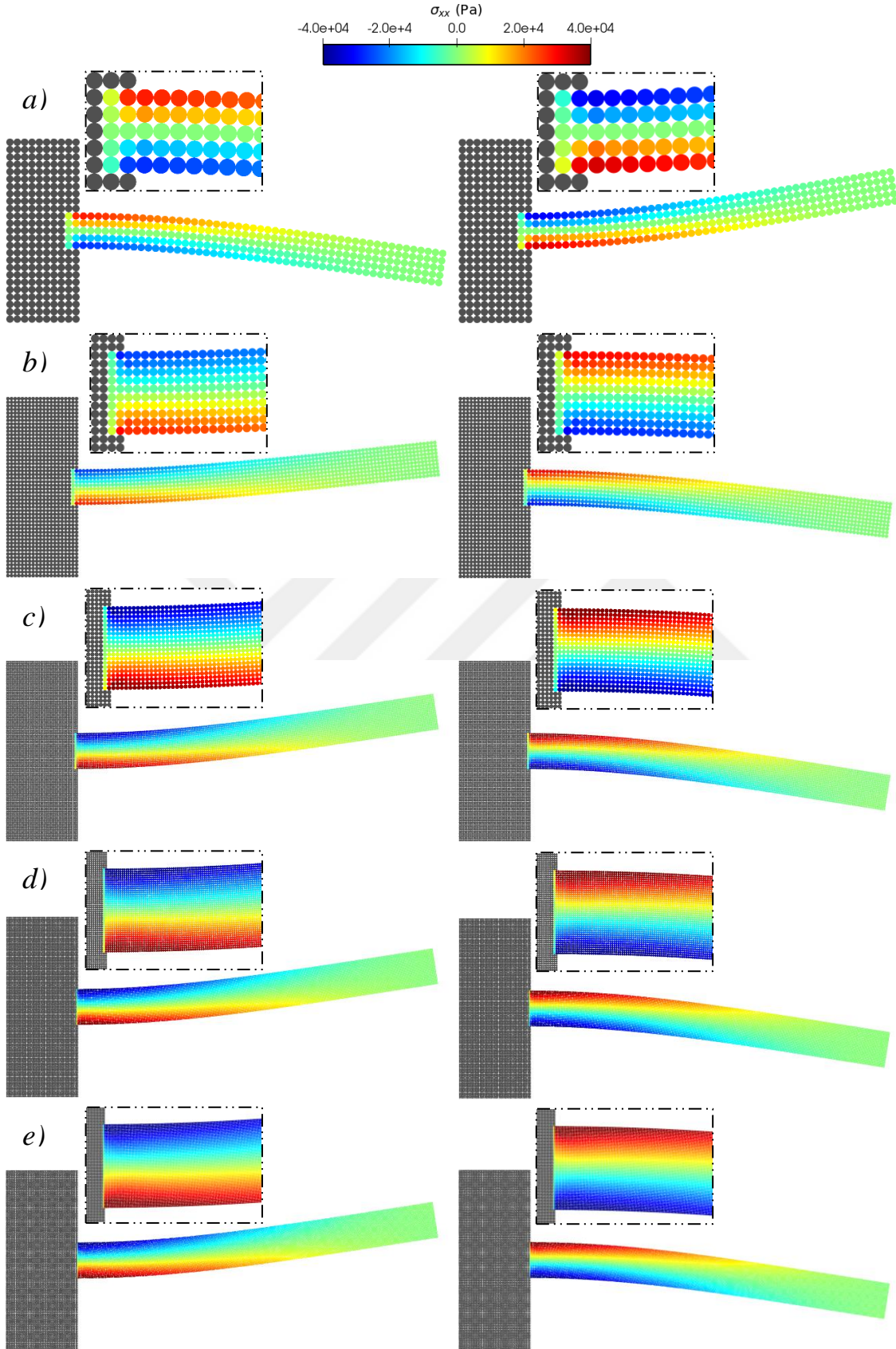
BLİPH analizleri, interpolasyon uzunluğu $h^s=1,35\Delta x^s$, yapay viskozite sabiti $\alpha^s=0,03$ ve kum saati kontrol şeması sabiti $\kappa=50$ değerleri benimsenerek, düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme kurucu modelleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Parçacık çözünürlüğünün çözüm

yakınsaklığına etkisinin araştırılması amacıyla $\Delta x^s=4 \text{ mm}$, $\Delta x^s=2 \text{ mm}$, $\Delta x^s=1 \text{ mm}$, $\Delta x^s=0,5 \text{ mm}$ ve $\Delta x^s=0,25 \text{ mm}$ olmak üzere beş farklı başlangıç parçacık aralığı değeri kullanılmıştır. Bu değerler konsol kiriş kalınlığı ile oranlandığında, sırasıyla $d^s/\Delta x^s=5$, $d^s/\Delta x^s=10$, $d^s/\Delta x^s=20$, $d^s/\Delta x^s=40$ ve $d^s/\Delta x^s=80$ değerleri elde edilmektedir. Numerik analizlerde hesaplama maliyeti göz önüne alınarak Yarı-Örtük Euler zaman integrasyon şeması kullanılmış olmakla birlikte, yapılan ön çalışmalarda Yarı-Örtük Euler ve Simplektik zaman integrasyon şemalarının birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen numerik analizler hakkında bir özet Çizelge 4.1’de sunulmaktadır.

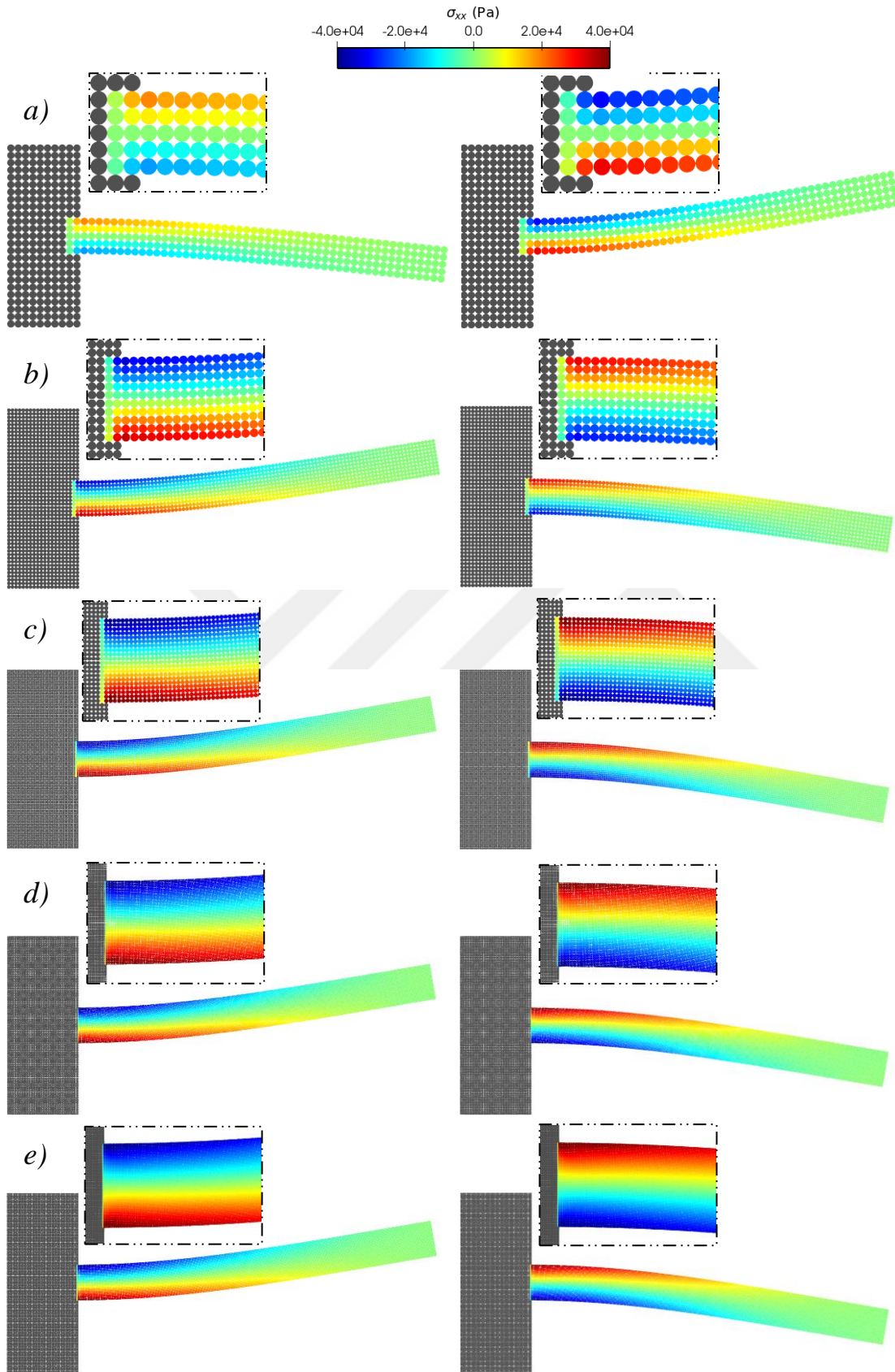
Çizelge 4.1. Konsol kirişin serbest titreşimi problemi için gerçekleştirilen numerik analizler

	Δx^s [mm]	$d^s/\Delta x^s$	$h^s/\Delta x^s$	α^s	κ	Kurucu Denklem	Zİ
NA1	4,00	5					
NA2	2,00	10					
NA3	1,00	20	1,35	0,03	50	Düzlem-Gerinim/ Düzlem-Gerilme	Yarı-Örtük Euler
NA4	0,50	40					
NA5	0,25	80					

Çizelge 4.1’de sunulan tüm analizler $t=1 \text{ s}$ için gerçekleştirilmiş olup, farklı parçacık çözünürlüklerinde düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme sonuçlarına ait görseller sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te sunulmuştur. İlgili şekillerden, tüm parçacık çözünürlüklerinde herhangi bir kararlılık veya düzensiz parçacık dağılımı problemi yaşamadan mevcut BLIPH modeli ile düzgün bir gerilme alanının üretilebildiği görülmektedir. Bununla birlikte, çözünürlük gruplarının genelinde, aynı zaman adımlarında benzer deplasman karakteristikleri gözlemlenirken, her iki kurucu denklemde de $d^s/\Delta x^s=5$ çözünürlük değerine sahip analiz sonuçlarında deplasman karakteristiğinin farklılaştığı dikkat çekmektedir.



Şekil 4.2. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminin $t=0.57$ s (sol) ve 0.71 s (sağ) zaman adımlarında a) $d^s/\Delta x^s=5$, b) $d^s/\Delta x^s=10$, c) $d^s/\Delta x^s=20$, d) $d^s/\Delta x^s=40$ ve e) $d^s/\Delta x^s=80$ için BLIPH sonuçları (düzlem-gerinim)



Şekil 4.3. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminin $t=0.57$ s (sol) ve 0.71 s (sağ) zaman adımlarında a) $d^s/\Delta x^s=5$, b) $d^s/\Delta x^s=10$, c) $d^s/\Delta x^s=20$, d) $d^s/\Delta x^s=40$ ve e) $d^s/\Delta x^s=80$ için BLİPH sonuçları (düzlem-gerilme)

Parçacık çözünürlüğünün BLİPH hesaplamalarına etkisi, MI noktasındaki konsol giriş uç deplasmanının analitik çözüm sonuçları kullanılarak araştırılmıştır. İlgili deplasman değerinin analitik çözümü, aşağıdaki şekilde ifade edilebilecek bir eşitlik yardımıyla elde edilmektedir [70];

$$u_y(t) = \frac{\xi c^s}{\omega_1} \sin(\omega_1 t) \quad (4.2)$$

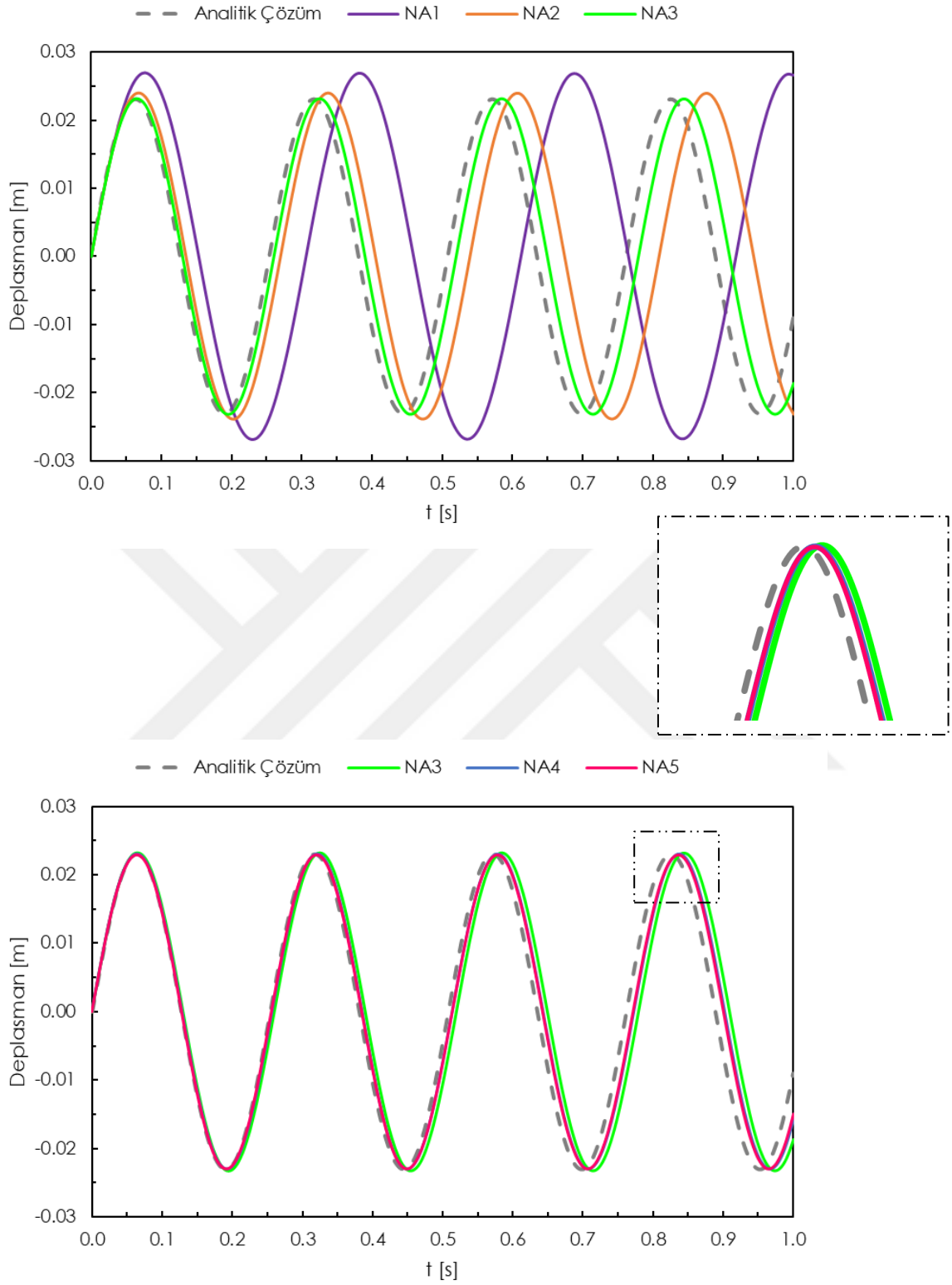
burada ω_1 , konsol giriş temel titreşim frekansı olup düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme kurucu modelleri için sırasıyla;

$$\omega_1 = (k_w)^2 \sqrt{\frac{E(d^s)^2}{12\rho^s(1-\nu^2)}} \quad (4.3a)$$

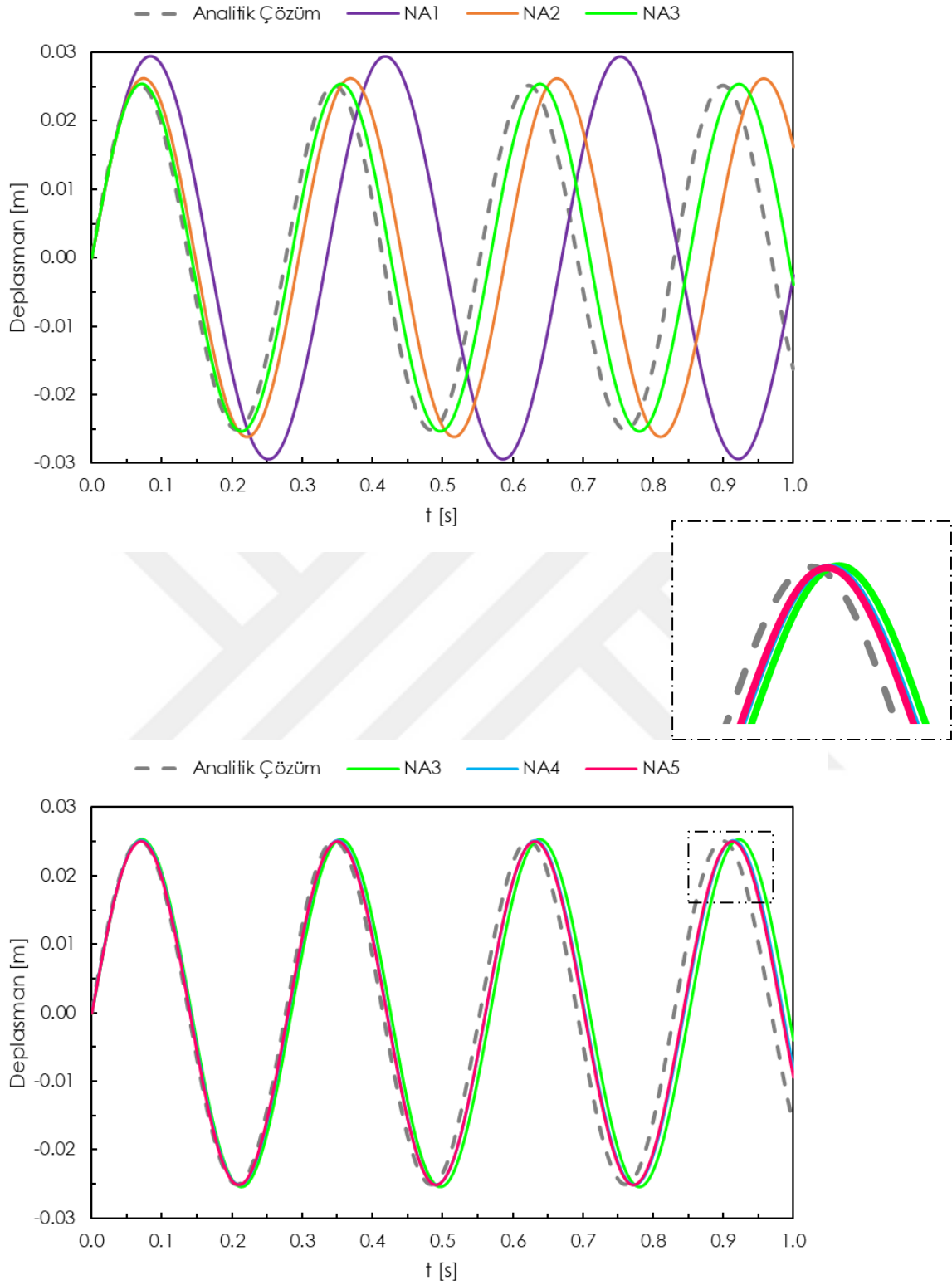
$$\omega_1 = (k_w)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho^s A}} \quad (4.3b)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilmektedir [47,70,94]. Burada A , konsol giriş kesit alanı olup, iki boyutlu analizlerde ilgili değer l m genişlik esas alınarak hesaplanmıştır.

Farklı çözünürlük değerleri kullanılarak gerçekleştirilen BLİPH analizleriyle elde edilen MI noktasındaki numerik deplasman hesaplamalarının analitik çözüm ile karşılaştırmaları, düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme durumları için sırasıyla Şekil 4.4 ve 4.5'te sunulmuştur. Her iki kurucu denklem için kullanılan çözünürlük değerlerinin genelinde, analitik çözüm ile elde edilen davranış karakteristiği yakalanmış olsa da sunulan görseller ile paralel olarak, özellikle $t=0,5$ s analiz süresinden sonra $d^s/\Delta x^s=5$ çözünürlüklü analizlerde düşük çözüm yakınsaklığı ile analitik çözüm ile elde edilen deformasyon karakteristiğinden uzaklaştığı gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, mevcut problem kapsamında her iki kurucu denklemde de numerik hesaplamaların $d^s/\Delta x^s=20$ çözünürlük oranıyla birlikte makul bir yakınsaklık seviyesine ulaşabildiği görülmektedir.



Şekil 4.4. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminde farklı çözünürlükteki BLİPH hesaplamalarının analitik çözüm ile karşılaştırmaları (*düzlem-gerinim*)



Şekil 4.5. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminde farklı çözünürlükteki BLİPH hesaplamalarının analitik çözüm ile karşılaştırmaları (*düzlem-gerilme*)

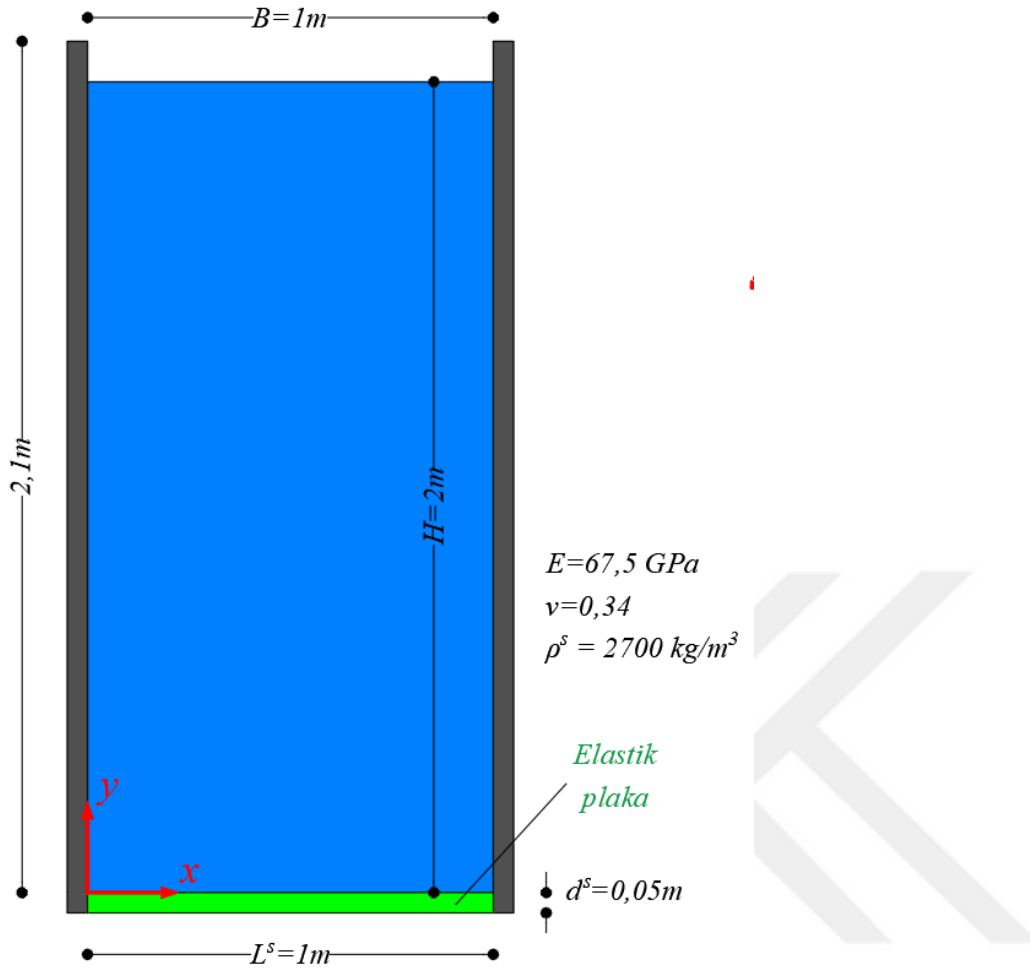
Farklı çözünürlük değerleri kullanılarak düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme kurucu modelleri üzerinden gerçekleştirilen BLİPH analizlerinden elde edilen hesaplamalar ile analitik çözümler arasındaki Ortalama Karesel Hataların Karekökü (Root Mean Square Error, RMSE) oranları Çizelge 4.2’de sunulmaktadır. İlgili çizelgeden, çözünürlük değerleri arttıkça beklendiği üzere her iki kurucu modelde de hata oranlarının düştüğü gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, $d^s/\Delta x^s=20$ çözünürlük oranı ile hata oranlarındaki değişim hızının yavaşladığı ve hesaplama yakınsaklığının belirli bir kararlılık seviyesine ulaştığı dikkat çekmektedir. Düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme durumları için elde edilen hata oranları karşılaştırıldığında ise düzlem-gerilme hesaplamalarının, tüm başlangıç parçacık aralığı değerlerinde düzlem-gerinim modeline kıyasla daha yüksek hata oranlarına sahip olduğu dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.2. Konsol kirişin serbest titreşimi probleminde farklı çözünürlükteki BLİPH hesaplamalarının Kök Ortalama Kare Hata oranları

	d^s [mm]	$d^s/\Delta x^s$	Ortalama Karesel Hataların Karekökü	
			Düzlem-Gerinim	Düzlem-Gerilme
NA1	4,00	5	2.78E-02	2.93E-02
NA2	2,00	10	1.26E-02	1.39E-02
NA3	1,00	20	4.90E-03	5.81E-03
NA4	0,50	40	2.89E-03	3.60E-03
NA5	0,25	80	2.59E-03	3.20E-03

4.2. Elastik Bir Plaka Üzerindeki Durağan Su Kütlesi

Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi problemi [60,96], mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH kodunun numerik kararlılık, çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliğini araştırmak üzere kullanılmıştır. Elastik plaka, $L^s=1$ m boyunda ve $d^s=0,05$ m kalınlığında olup, $\rho^s=2700$ kg/m³ yoğunluk, $E=67,5$ GPa Elastisite modülü ve $\nu=0,34$ Poisson oranı değerlerine sahiptir. Başlangıçta durağan haldeki su kütlesi $H=2$ m derinliğinde ve $B=1$ m genişliğindedir. Elastik plaka, uç noktalarından ankastre olarak sınırlandırılmış olup, mevcut problemin şematik bir görünümü Şekil 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.6. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesinin şematik bir görünümü

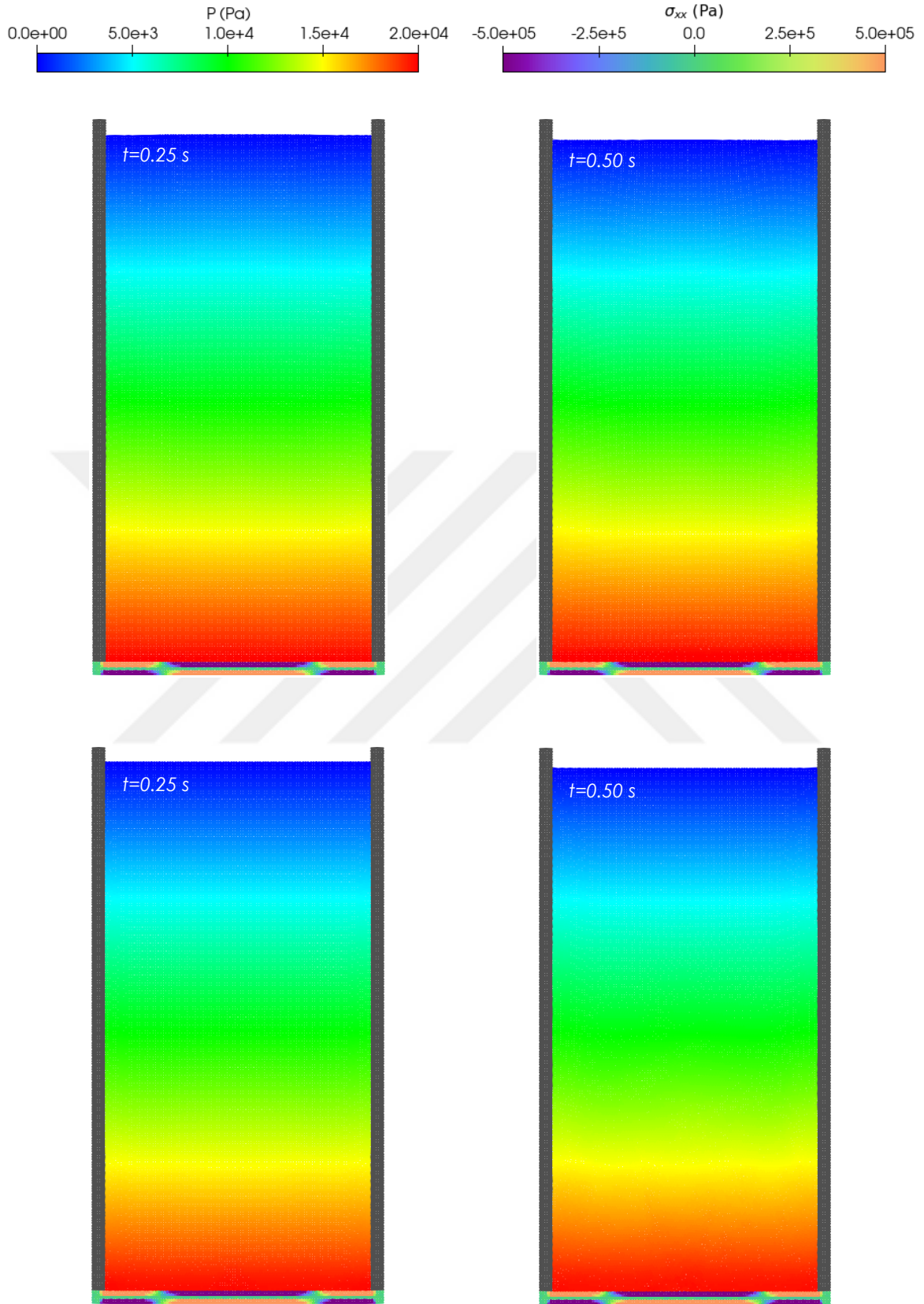
Geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH kodunun çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği beş farklı analiz gerçekleştirilerek araştırılmıştır. Gerçekleştirilen tüm analizlere ait detaylı bir özet Çizelge 4.3'te sunulmaktadır. Araştırmalarda referans olarak kullanılması planlanan $R1$ ve $R2$ analizleri, $\Delta x^f/\Delta x^s=1$ oranı ile tekdüze çözünürlük değeri altında, geleneksel $ZI1$ zaman integrasyonu yaklaşımlı $ZSİPH-BLİPH$ ve Riemann-İPH-BLİPH birleşimlerini kapsamaktadır. $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizleri ise mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen $ZI2$ zaman integrasyonu ile çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi altında sırasıyla $\Delta x^f/\Delta x^s=1, 2$ ve 4 olmak üzere üç farklı çözünürlük oranının kullanımını temel almaktadır. Bu doğrultuda yazar, $R1$, $R2$ ve $NA1$ analizleri üzerinden farklı zaman integrasyonu ve İPH yaklaşımlarının, $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizleri üzerinden ise çoklu-çözünürlük uygulamasının numerik kararlılık, çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği üzerine etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır.

Çizelge 4.3. Bir elastik plaka üzerindeki durağan su kütlesi problemi için gerçekleştirilen analizler

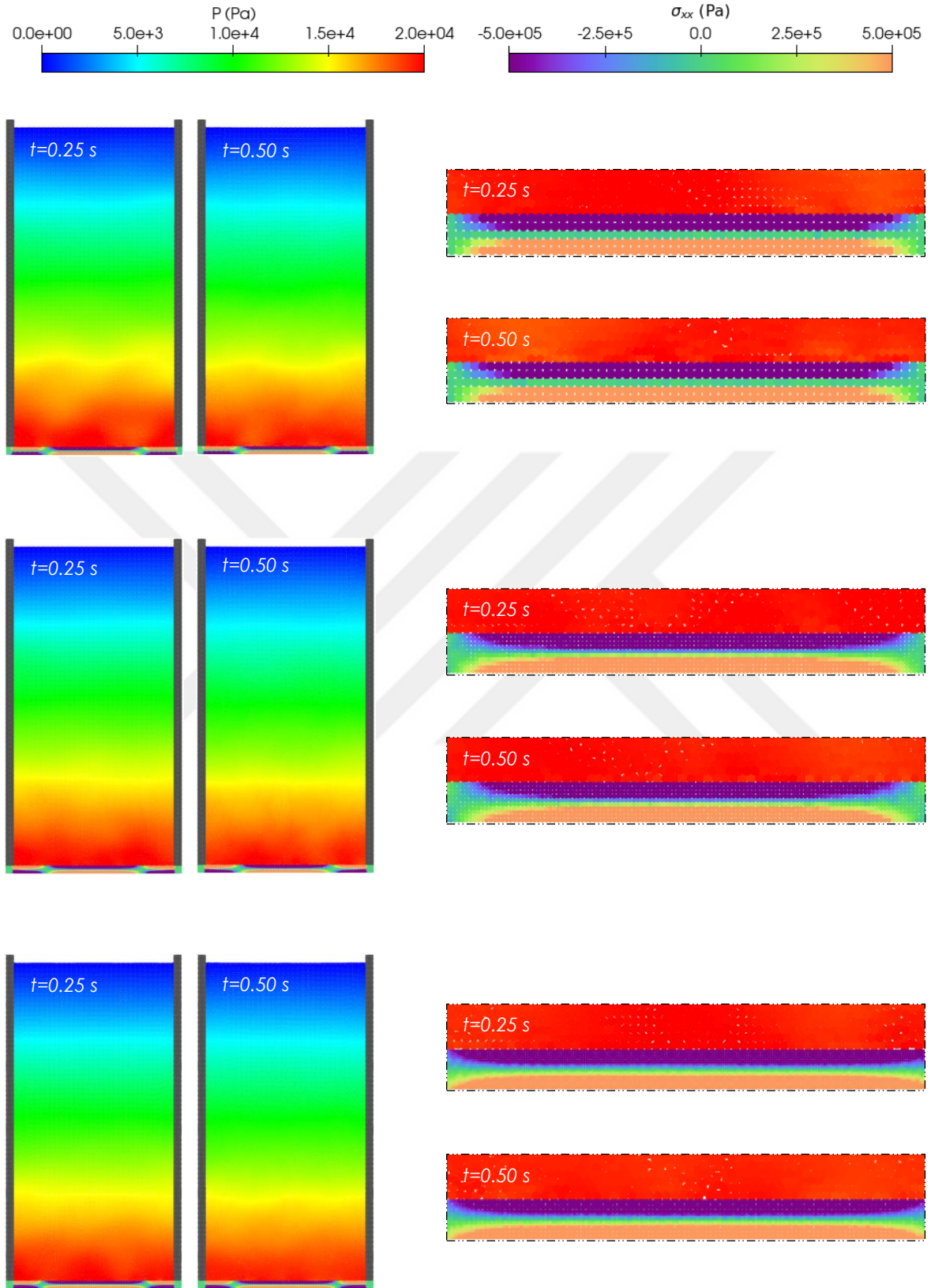
	Δx^f [cm]	Δx^s [cm]	$H/\Delta x^f$	$d^s/\Delta x^s$	$\Delta x^f/\Delta x^s$	Akışkan Modeli	Zİ
R1	1,00	1,00	200	5	1	Geleneksel ZSİPH	Zİ1
R2	1,00	1,00	200	5	1	Riemann-İPH	Zİ1
NA1	1,00	1,00	200	5	1	Riemann-İPH	Zİ2
NA2	1,00	0,50	200	10	2	Riemann-İPH	Zİ2
NA3	1,00	0,25	200	20	4	Riemann-İPH	Zİ2

Numerik analizler, akışkan alanı için $h^f=1,35\Delta x^f$ interpolasyon uzunluğu ve $\rho_0=1000 \text{ kg/m}^3$ başlangıç yoğunluk değeri, katı alan için ise $h^s=1.35\Delta x^s$ interpolasyon uzunluğu, $\kappa=50$ kum saati kontrol şeması sabiti ve $\alpha^s=0,03$ yapay viskozite sabiti değerleri kullanılarak $t=0,5 \text{ s}$ için gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, akışkan alanının ZSİPH yaklaşımına dayandığı R1 analizinde, yapay viskozite sabiti $\alpha^f=0,1$ olarak seçilmiştir. Katı alan düzlem-gerinim kurucu modeli benimsenerek modellenirken, akışkan alanı içerisindeki numerik ses hızı $c^f = 10\sqrt{gH}$ olarak ayarlanmıştır.

Aynı başlangıç parçacık aralığı değeri ($\Delta x^f/\Delta x^s=1$) ve zaman integrasyon şeması (Zİ1) altında, akışkan alanı için farklı İPH yaklaşımlarının benimsendiği R1 ve R2 analizlerinden elde edilen sonuçlara ait görseller karşılaştırmalı olarak Şekil 4.7’de, mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi ile farklı $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarının ele alındığı NA1, NA2 ve NA3 analizlerinden elde edilen sonuçlara ait görseller ise karşılaştırmalı olarak Şekil 4.8’de sunulmuştur. İlgili şekillerden, R1 ve R2 analizlerinde, sırasıyla akışkan ve katı alanlarına ait basınç ve gerilme değerlerinin akışkan-katı arayüzeyinde herhangi bir fiziksel olmayan boşluk oluşmadan düzgün olarak üretilebildiği gözlemlenmektedir. Zİ2 zaman integrasyonu yaklaşımının benimsendiği NA1, NA2 ve NA3 analizlerinde ise akışkan alanının basınç değerlerinde ufak salınımlar gözlemlenirken, tüm $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarında akışkan-katı arayüzeyinde herhangi bir fiziksel olmayan boşluk oluşmadan, katı alan gerilme değerlerinin düzgün olarak üretilebildiği dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, yapılan ön çalışmalarda, katı alan modellemesinde yapay viskozite teriminin kullanılmadığı durumlarda ($\alpha^s=0$) tüm analiz sonuçları için katı alanda gerilme gürültüsü oluşumu ve NA3 için akışkan-katı arayüzeyinde kararlılık sorunlarının gözlemlendiği not edilmelidir. İlgili analizlere ait detaylı görseller EK-2’de sunulmaktadır.



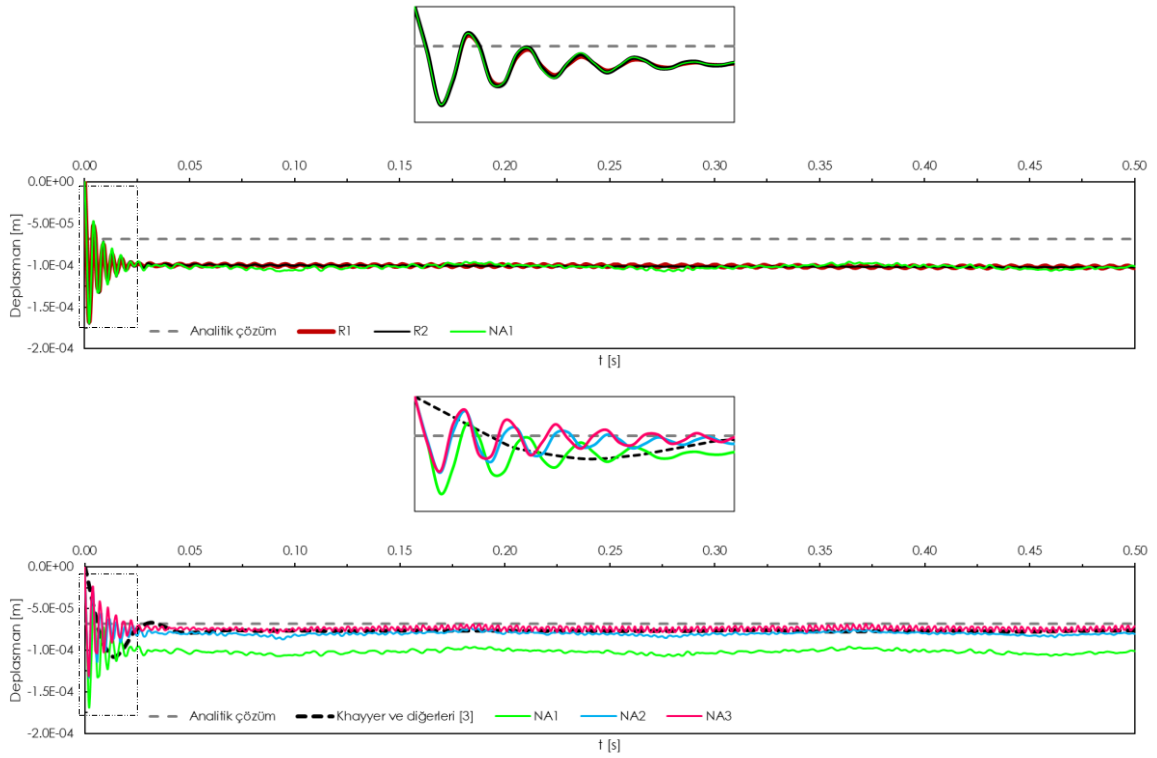
Şekil 4.7. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminin farklı zaman adımlarında $R1$ (üst) ve $R2$ (alt) analizlerine ait görseller



Şekil 4.8. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminin farklı zaman adımlarında NA1 (üst), NA2 (orta) ve NA3 (alt) analizlerine ait görseller

Geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH birleşimin çözüm yakınsaklığı, durağan su kütlelerinin elastik plaka orta noktasında neden olduğu deplasman değerinin analitik çözüm sonuçları üzerinden araştırılmıştır. Mevcut numerik hesaplamaların analitik çözüm sonucu ile karşılaştırmaları iki grup halinde Şekil 4.9’da sunulmaktadır. Gerçekleştirilen tüm numerik analizlerde, elastik plaka orta nokta deplasmanının, maruz kalınan ani basınç kuvveti etkisiyle başlangıçta şiddetli salınımlar sergilediği ve ardından denge durumuna ulaştığı görülmektedir. Akışkan alanında, geleneksel zaman integrasyonu yaklaşımı ($ZI1$) ile farklı İPH yaklaşımlarının benimsendiği $R1$ ve $R2$ analizlerine ait sonuçlar incelendiğinde, her iki modelinde başlangıçtaki salınım ve sonrasında takip eden denge durumlarında oldukça benzer davranışlar sergilediği gözlemlenmiştir. Aynı çözünürlük oranına sahip ancak farklı zaman integrasyonu yaklaşımı ile mevcut Riemann-İPH-BLİPH birleşimine dayanan $NA1$ hesaplamaları incelendiğinde ise başlangıçtaki salınım davranışının oldukça benzer geliştiği gözlemlenirken, denge durumunda ilgili modelin ufak salınımlar sergilemeye devam ettiği dikkat çekmektedir. İlgili durumun, Şekil 4.8’de alıntılanan, $ZI2$ zaman integrasyonu kullanan analizlerdeki basınç salınımlarıyla ilişkili olarak geliştiği düşünülmektedir. Bu doğrultuda, mevcut problem özelinde, akışkan alanında kullanılan geleneksel $ZSİPH$ ve Riemann-İPH modellerinin oldukça benzer hesaplamalar sağlarken, $ZI1$ zaman integrasyonu yaklaşımının daha kararlı sonuçlar sağladığı ifade edilebilmektedir.

Mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi ile farklı çözünürlük oranlarının ele alındığı $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analiz sonuçları incelendiğinde, katı alan çözünürlük oranı arttıkça beklendiği üzere numerik hesaplardaki deplasman değerlerinin azaldığı ve buna paralel olarak çözüm yakınsaklığının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, katı alandaki çözünürlük artışının denge durumundaki deplasman salınımlarında bir miktar azalmaya neden olduğu da dikkat çekmektedir. Mevcut model hesaplamaları ile Khayyer ve diğerlerinin [3] $SİPH$ -İPH modeli hesaplamaları karşılaştırıldığında ise başlangıçtaki su kütlelerinin neden olduğu ani basınç etkisi nedeniyle $SİPH$ -İPH modelinin mevcut modele kıyasla farklı bir salınım karakteristiği sergilediği ancak benzer denge durumuna ulaşma zamanından sonra, her iki modelinde oldukça yakın deplasman hesaplamaları sunduğu gözlemlenebilmektedir. Burada, ilgili $SİPH$ -İPH hesaplamalarının, $d^s/\Delta x^s=10$ çözünürlük değeri kullanılarak elde edildiği not edilmelidir.



Şekil 4.9. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminde plaka orta nokta deplasman hesaplamalarının analitik çözüm ile karşılaştırmaları

Mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH birleşimindeki $ZI2$ zaman integrasyonunun hesaplama maliyeti üzerine etkileri, $R1$ analiz süresinin referans olarak kabul edildiği hızlanma oranları kullanılarak araştırılmıştır. Gerçekleştirilen tüm analizler için harcanan süreler, $R1$ analiz süresine oranlanarak elde edilen ilgili hızlanma değerleri Çizelge 4.4'te sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, geleneksel $ZI1$ zaman integrasyonu altında, akışkan alını için ZSİPH ve Riemann-İPH modellerinin kullanıldığı $R1$ ve $R2$ analizlerinin oldukça yakın hesaplama sürelerine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, aynı parçacık sayısı altında $ZI2$ zaman integrasyonu ile $NA1$ analizi ile yaklaşık olarak 4,80 kat hızlanma sağlandığı dikkat çekmektedir. Benzer şekilde, $\Delta x^f/\Delta x^s=2$ oranına sahip $NA2$ analizi ile katı alandaki parçacık sayısındaki artışa rağmen yaklaşık 2,39 kat hızlanma kaydedilirken, $\Delta x^f/\Delta x^s=4$ ile $NA3$ analizinde bu oran 0,91'e düşmüş ve referans $R1$ analizinden daha yüksek hesaplama süresi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

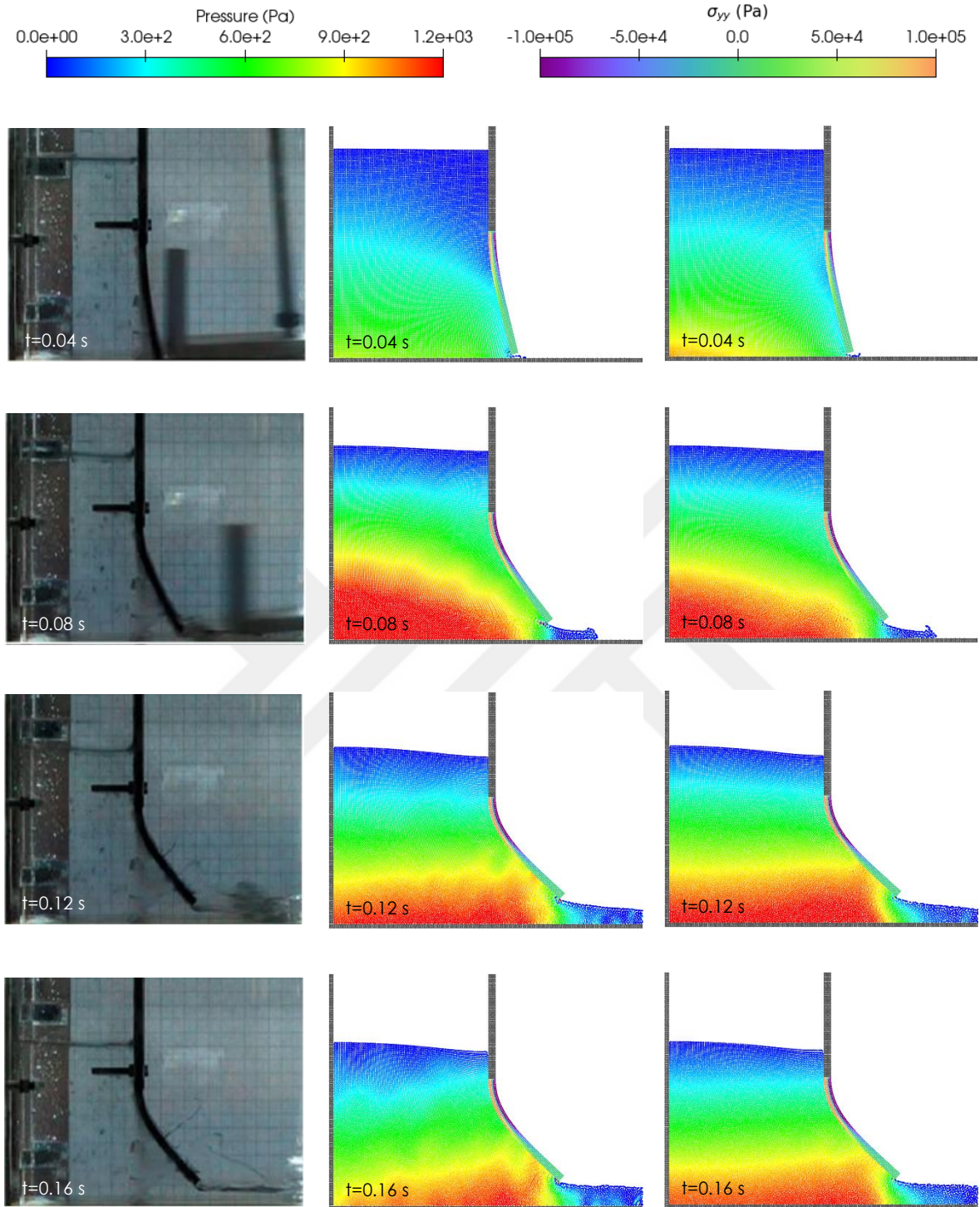
Mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH numerik birleşim şemasının çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği beş farklı analiz üzerinden araştırılmıştır. Gerçekleştirilen tüm analizlere ait detaylı bir özet Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Araştırmalarda referans olarak kullanılmaları amaçlanan *R1* ve *R2* analizleri, tekdüze çözünürlük ve geleneksel *Zİ1* zaman integrasyon şeması ile ele alınmış ZSİPH-BLİPH ve Riemann-İPH-BLİPH birleşimlerine dayanırken, *NA1*, *NA2* ve *NA3* analizleri, mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi altında sırasıyla $\Delta x^f/\Delta x^s=1,2$ ve 4 olmak üzere üç farklı akışkan-katı başlangıç parçacık aralığı oranının kullanıldığı numerik modellere dayanmaktadır.

Çizelge 4.5. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi problemi için gerçekleştirilen analizler

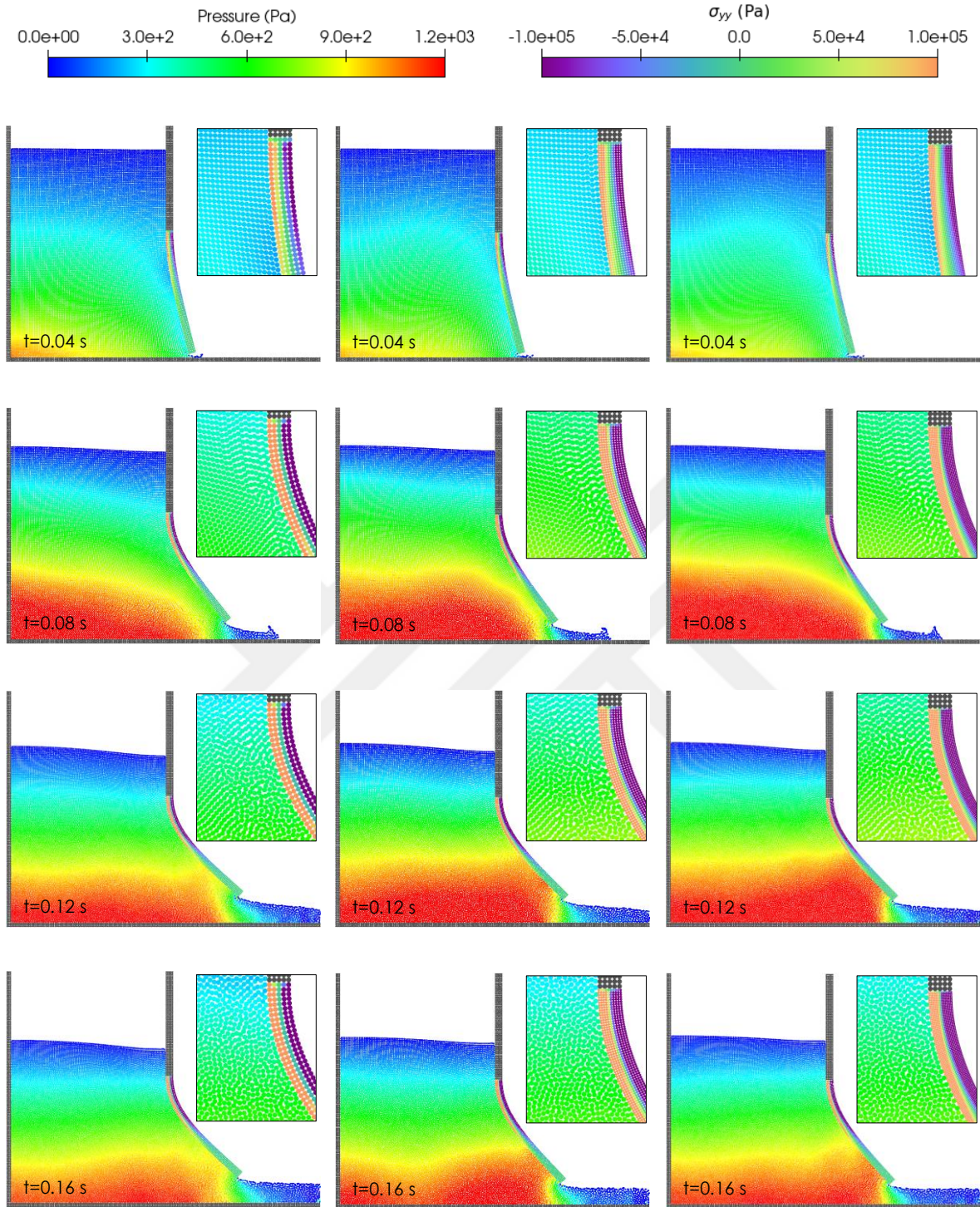
	Δx^f [mm]	Δx^s [mm]	$H/\Delta x^f$	$d^s/\Delta x^s$	$\Delta x^f/\Delta x^s$	Akışkan Modeli	Zİ
<i>R1</i>	1,00	1,00	140	5	1	Geleneksel ZSİPH	Zİ1
<i>R2</i>	1,00	1,00	140	5	1	Riemann-İPH	Zİ1
<i>NA1</i>	1,00	1,00	140	5	1	Riemann-İPH	Zİ2
<i>NA2</i>	1,00	0,50	140	10	2	Riemann-İPH	Zİ2
<i>NA3</i>	1,00	0,25	140	20	4	Riemann-İPH	Zİ2

Mevcut analizler, akışkan alanında interpolasyon uzunluğu $h^f=1.35\Delta x^f$ ve başlangıç yoğunluk değeri $\rho_0=1000 \text{ kg/m}^3$, katı alanında ise interpolasyon uzunluğu $h^s=1.35\Delta x^s$, kum saati kontrol şeması sabiti $\kappa=50$ ve yapay viskozite sabiti $\alpha^s=0.03$ değerleri benimsenerek gerçekleştirilmiştir. *R1* analizi kapsamında akışkan alanının analiz edilmesinde kullanılan ZSİPH modelinde yapay viskozite sabiti $\alpha^f=0,04$ olarak seçilmiştir. Analiz süresi olarak $t=0.4 \text{ s}$ belirlenmiş olup, katı alan düzlem-gerinim kurucu modeli ile ele alınmış ve akışkan alanı içerisindeki numerik ses hızı $c^f = 20\sqrt{gH}$ olarak ayarlanmıştır.

R1 ve *R2* analizlerinden elde edilen farklı zaman adımlarına ait numerik sonuçlar Şekil 4.11'de sunulurken, *NA1*, *NA2* ve *NA3* analizlerinden elde edilen farklı zaman adımlarına ait görseller ise Şekil 4.12'de sunulmuştur. Durağan su kütlelerinin serbest bırakılması ile elastik geçit hızlı bir şekilde deforme olarak azami yer değiştirme değerine ulaşmakta ve paralellinde geçit altında bir akım oluşmaktadır.



Şekil 4.11. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında deney (*sol*) ve *R1* (*orta*) ve *R2* (*sağ*) analizlerine ait görseller



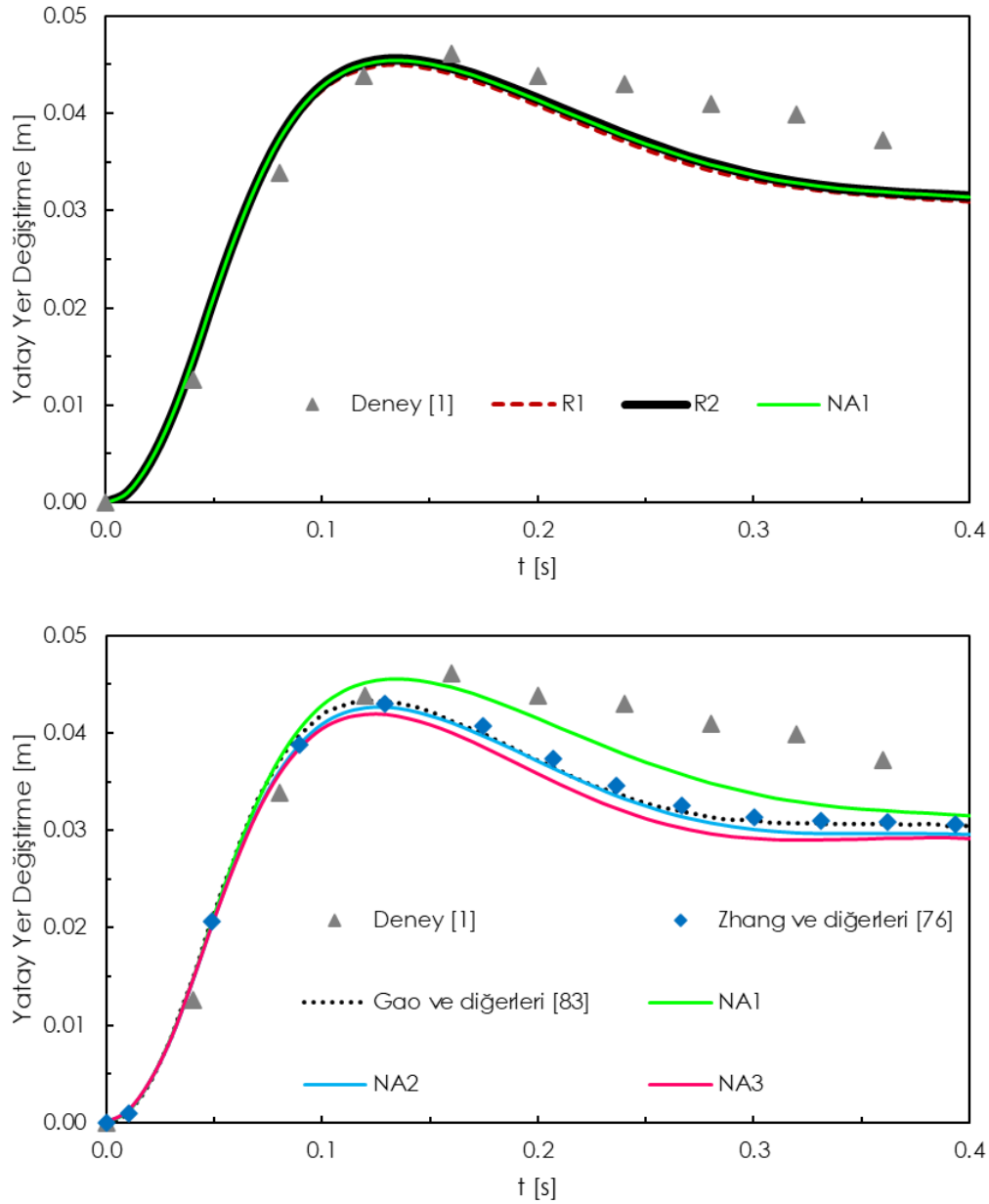
Şekil 4.12. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında NA1 (sol), NA2 (orta) ve NA3 (sağ) analizlerine ait görseller

İlgili şekillerden, $R1$ ve $R2$ analizlerinde, akışkan-katı arayüzeyinde herhangi bir fiziksel olmayan boşluk oluşmadan, sırasıyla akışkan ve katı alanlar için düzgün basınç ve gerilme alanlarının elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, ZSİPH yaklaşımının benimsendiği $R1$ analiz sonuçlarında, şok dalgaları kaynaklı akışkan alanındaki düşük

ölçekli yerel basınç salınımları dikkat çekmekte olup, ilgili salınımların kullanılan interpolasyon uzunluğu ve yapay viskozite sabiti gibi değişkenler üzerinde yapılacak parametrik bir çalışma ile iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Akışkan alanının Riemann-İPH ile ele alındığı $R2$ analizinde ise basınç alanı için benzer bir durum gözlemlenmemiş olup, ilgili modelin daha kararlı sonuçlar sağladığı ifade edilebilmektedir. Mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH modeli ile farklı $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarının ele alındığı $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizlerine ait görseller incelendiğinde ise mevcut çoklu-çözünürlük uygulamasının analizlerde herhangi bir kararlılık sorununa sebebiyet vermeden, sırasıyla akışkan ve katı alanlar için düzgün basınç ve gerilme alanları sağladığı gözlemlenmiştir. Burada, akışkan alanında Riemann-İPH yaklaşımının benimsendiği referans $R2$ analizi ile benzer şekilde, mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH modelinin farklı çözünürlük oranlarına sahip analiz sonuçlarında da akışkan basınç alanına ait şok dalgaları kaynaklı herhangi bir salınım gözlemlenmediği vurgulanmalıdır.

Mevcut numerik modelin çözüm yakınsaklığı, elastik geçit uç noktasının (MI) yatay düzlemdeki yer değiştirme değerleri üzerinden, deneysel ölçümler ve literatürdeki diğer numerik model hesaplamaları kullanılarak araştırılmış olup, ilgili karşılaştırma sonuçları iki grup halinde Şekil 4.13'te sunulmaktadır. Şekil 4.13'ün üst kısmında sunulan ilk grup, deneysel ölçümler ile $R1$, $R2$ ve $NA1$ analizlerine ait numerik hesaplamaları içermektedir. İlgili analiz sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın hesaplamalar sundukları gözlemlenmekte olup, mevcut problem özelinde, zaman integrasyonu ve akışkan alanında kullanılan İPH yaklaşımının hesaplamalarda belirgin farklılaşmalara neden olmadığı ifade edilebilmektedir. Farklı numerik yaklaşımlar ile elde edilen oldukça benzer hesaplamalarda, mevcut kıyaslama durumunun düşük hidrodinamik etkiler içeren karakteristiğinin belirgin bir rol oynadığı düşünülmektedir.

Şekil 4.13'ün alt kısmında sunulan ikinci grup ise mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi kapsamında, akışkan ve katı alanlar için farklı başlangıç parçacık aralığı değerlerinin kullanıldığı $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizlerinden elde edilen numerik hesaplamaların, deneysel sonuçlar ve literatürdeki diğer numerik model hesaplamalar ile karşılaştırılmalarını kapsamaktadır. İlgili şekilden, katı alandaki çözünürlük oranının artması ile paralel olarak elastik geçit deformasyon değerlerinin düştüğü ve numerik hesaplamaların kararlılık seviyelerinin arttığı gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.13. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminde elastik geçit uç nokta (MI) yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması

Bununla birlikte, mevcut numerik birleşim ile elde edilen hesaplamaların deneysel ölçümler ile arasında düşük bir uyum olduğu dikkat çekmektedir. Literatürde mevcut kıyaslama durumu için gerçekleştirilen numerik çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların analizlerinde lineer elastik malzeme modeli kapsamında farklı Elastisite modülü değerleri kullandıkları görülmektedir. Bazı araştırmacıların mevcut kıyaslama durumu kapsamında $E=12 MPa$ değeri ile analizlerini gerçekleştirirken [3,84], bazı araştırmacıların $E=7,8 MPa$

değerini benimsedikleri tespit edilmiştir [82,90]. Bununla birlikte, Yang ve diğerleri [58] çalışmalarında ilgili kıyaslama durumu için hiperelastik malzeme modellerinin deneysel sonuçlar ile daha uyumlu hesaplamalar sağladığını bildirmişlerdir. Bu tez çalışması kapsamında ise Zhang ve diğerleri [82] ve Gao ve diğerlerinin [90] çalışmalarını takiben $E=7,8 MPa$ elastisite modülü değeri benimsenmektedir. Yazar, mevcut numerik birleşim ve deneysel ölçümler arasındaki ilgili düşük uyum oranının, malzeme modeli ve buna bağlı olarak kullanılan parametrelerdeki belirsizliklerden kaynaklandığını düşünmektedir. Farklı $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarının kullanıldığı mevcut Riemann-İPH-BLİPH hesaplamalarının, Zhang ve diğerleri [82] ve Gao ve diğerlerinin [90] numerik model sonuçları ile karşılaştırıldığında ise tüm çözünürlük değerlerinde benzer noktasal yer değiştirme karakteristiğinin yakalanmış olmasının yanı sıra mevcut modelde $d^s/\Delta x^s=10$ oranı ile ilgili analiz sonuçları arasında makul bir uyum olduğu görülmektedir. Burada, karşılaştırmalarda kullanılan Zhang ve diğerlerinin [82] doğrusallaştırılmış Riemann-İPH-BLİPH ve Gao ve diğerlerinin [90] ZSİPH-PD birleşimi hesaplamalarının $d^s/\Delta x^s=8$ oranı ile elde edildiği not edilmelidir.

Çizelge 4.6. Baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi probleminde hesaplama verimliliği karşılaştırmaları

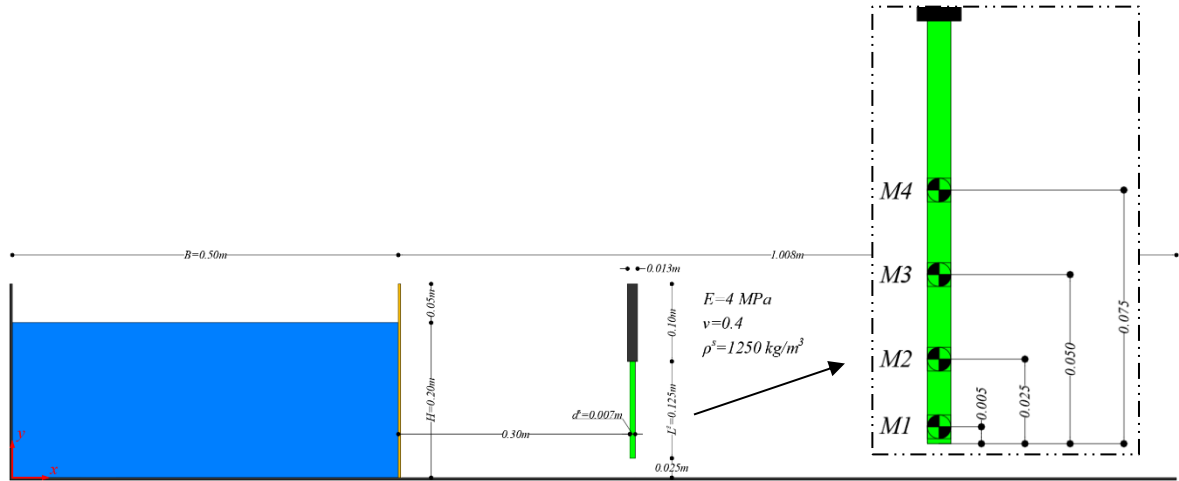
	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>NA1</i>	<i>NA2</i>	<i>NA3</i>
<i>Akışkan parçacık sayısı</i>	14000	14000	14000	14000	14000
<i>Sınır parçacık sayısı</i>	1399	1399	1399	1404	1409
<i>Katı parçacık sayısı</i>	405	405	405	1600	6360
<i>Toplam parçacık sayısı</i>	15804	15804	15804	17004	21769
<i>Hızlanma oranı</i>	1,000x	0,999x	1,911x	1,342x	0,597x

Mevcut numerik birleşimin hesaplama verimliliği, gerçekleştirilen beş analiz sonucu elde edilen veriler üzerinden değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm analizler için gerek duyulan hesaplama süreleri, referans alınan *R1* analiz süresi ile oranlanarak elde edilen hızlanma oranları Çizelge 4.6’da sunulmaktadır. Bu doğrultuda, aynı parçacık çözünürlüğü şartları altında *Zİ1* zaman integrasyonu yaklaşımının kullanıldığı *R1* ve *R2* analizlerinin oldukça yakın hesaplama süreleri gerektirdiği görülürken, *Zİ2* zaman integrasyon şemasının kullanıldığı *NA1* analizinin, referans alınan *R1* analizine kıyasla yaklaşık 1,91 kat daha hızlı çözüm sağlandığı dikkat çekmektedir. Benzer şekilde, $\Delta x^f/\Delta x^s=2$ oranına sahip *NA2* analizi, katı alanın çözünürlük değeri ile ilişkili olarak artan parçacık sayısına rağmen *R1* analizine

kıyasla yaklaşık 1,34 kat hızlanma sağlamıştır. $\Delta x^f/\Delta x^s=4$ oranını kullanan *NA3* analizinde ise bu oran yaklaşık olarak 0,60 seviyesine düşerek referans alınan *RI* analizine göre daha yüksek hesaplama maliyeti gerekliliği ortaya çıkmıştır.

4.4. Kuru Bir Yatak Üzerindeki Baraj Yıkılması Akımının Elastik Bir Kapak ile Etkileşimi

Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi [59,97] problemi mevcut Riemann-İPH-BLİPH bileşimi kullanılarak modellenmiştir. Başlangıçta durağan halde bulunan su kütlesi, $B=0,5\text{ m}$ genişliğinde ve $H=0,2\text{ m}$ derinliğindedir. $L^s=125\text{ mm}$ uzunluğunda ve $d^s=7\text{ mm}$ kalınlığında elastik bir plaka, başlangıç su kütlesinden 300 mm uzağa, üst tarafından ankastre bağlanarak monte edilmiştir. İlgili plaka, $E=4\text{ MPa}$ Elastisite modülü ve $\nu=0,4$ Poisson oranı değerlerine sahiptir. Plaka kesiti üzerine, baraj yıkılması akımı ile etkileşimi sonrası maruz kalacağı deformasyonlar sonucu oluşacak noktasal yer değişimlerinin ölçülebilmesi amacıyla dört adet işaretçi (*M1-M4*) yapıştırılmıştır. Problem alanının şematik bir görünümü, ilgili ölçüm noktalarının konumlarıyla birlikte Şekil 4.14’te sunulmuştur.



Şekil 4.14. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin şematik bir görünümü

Geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH kodunun çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği gerçekleştirilen beş farklı analiz üzerinden araştırılmıştır. İlgili analizlere ait detaylı bir özet Çizelge 4.7’de sunulmaktadır. Araştırmalarda referans olarak kullanılmak üzere gerçekleştirilen *RI* ve *R2* analizleri, $d^s/\Delta x^s=1$ ile tekdüze çözünürlük

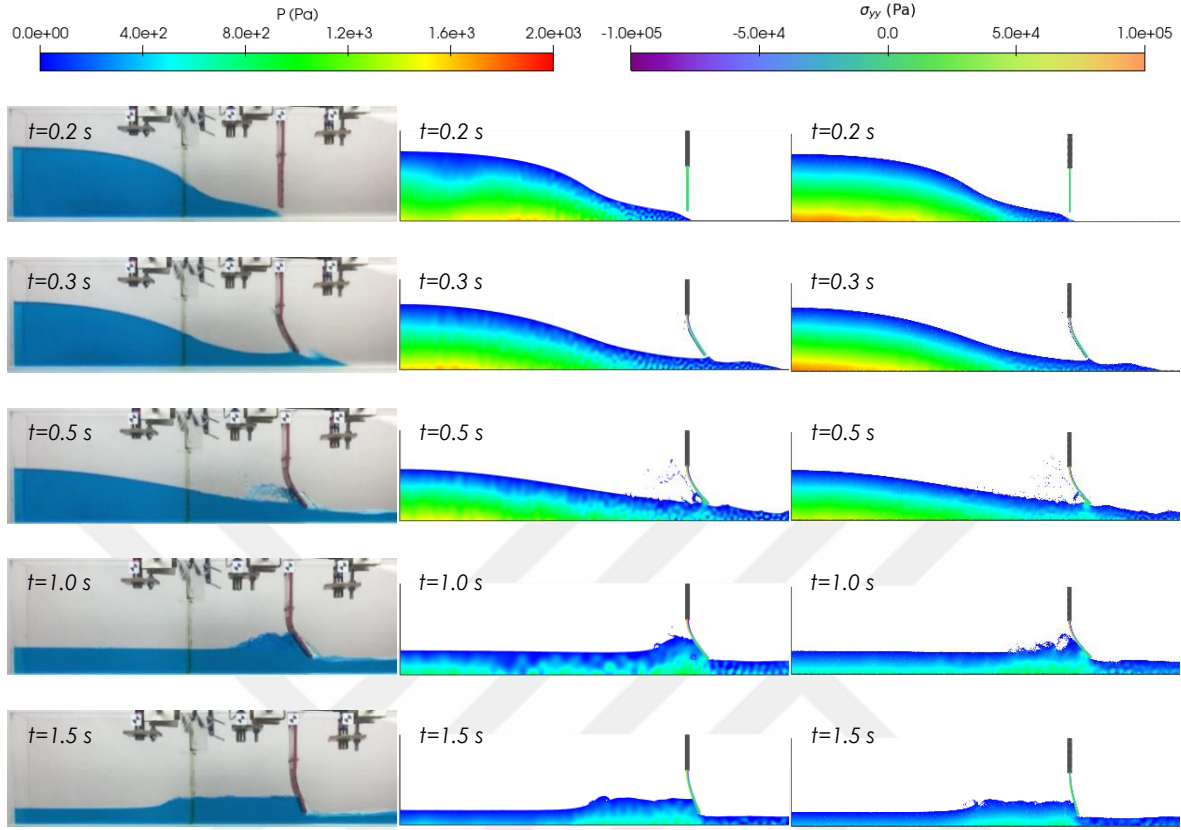
koşulu altında, geleneksel $ZI1$ zaman integrasyon şeması ile ZSİPH-BLİPH ve Riemann-İPH-BLİPH birleşimleri kullanılarak ele alınırken, $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizleri, $\Delta x^f/\Delta x^s=1,2$ ve 4 olmak üzere üç farklı akışkan-katı başlangıç parçacık aralığı oranı ile mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.7. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi problemi için gerçekleştirilen analizler

	Δx^f [mm]	Δx^s [mm]	$H/\Delta x^f$	$d^s/\Delta x^s$	$\Delta x^f/\Delta x^s$	Akışkan Modeli	Zİ
$R1$	1,00	1,00	200	7	1	Geleneksel ZSİPH	Zİ1
$R2$	1,00	1,00	200	7	1	Riemann-İPH	Zİ1
$NA1$	1,00	1,00	200	7	1	Riemann-İPH	Zİ2
$NA2$	1,00	0,50	200	14	2	Riemann-İPH	Zİ2
$NA3$	1,00	0,25	200	28	4	Riemann-İPH	Zİ2

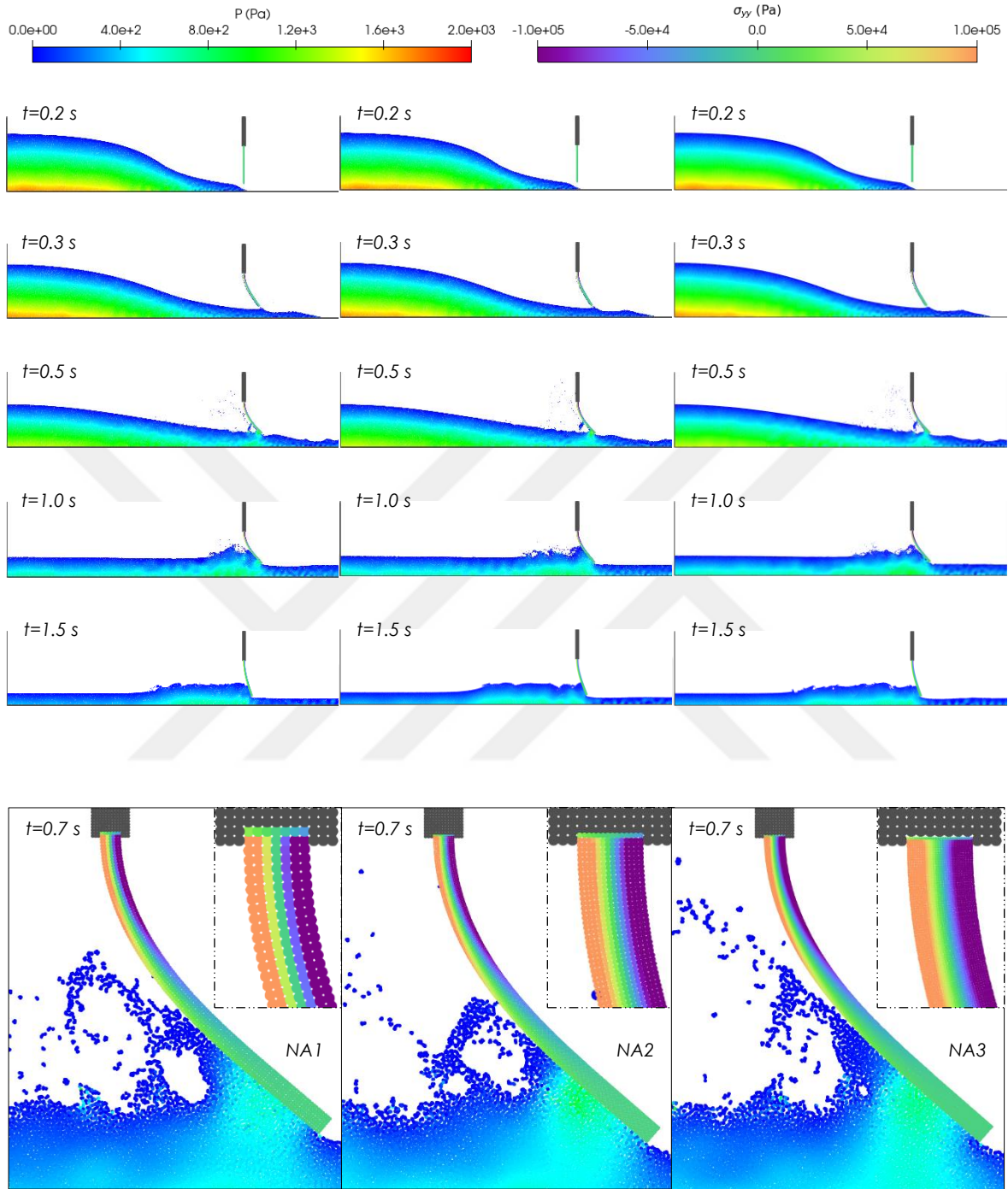
Tüm numerik analizlerde, akışkan alanı interpolasyon uzunluğu $h^f=1,2\Delta x^f$ ve başlangıç yoğunluk değeri $\rho_0=1000 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlenmiştir. BLİPH formülasyonu ile modellenen katı alanda ise interpolasyon uzunluğu $h^s=1,35\Delta x^s$, kum saati kontrol şeması sabiti $\kappa=50$ ve yapay viskozite sabiti $\alpha^s=0,03$ olarak seçilmiştir. Akışkan alanının geleneksel ZSİPH ile ele alındığı $R1$ analizinde yapay viskozite sabiti $\alpha^f=0,03$ olarak ayarlanmıştır. Analizler, katı alan için düzlem-gerilme koşulu benimsenerek $t=1,5 \text{ s}$ için gerçekleştirilirken, akışkan alanı içerisindeki numerik ses hızı $c^f = 20\sqrt{gH}$ olarak seçilmiştir.

Başlangıçta durağan halde bulunan su kütlelerinin serbest bırakılmasıyla oluşan baraj yıkılması akımı, kuru yatak üzerinde ilerleyerek yaklaşık $t=0,23 \text{ s}$ zaman adımıında elastik kapak ile ilk temasını gerçekleştirmektedir. Gerçekleşen bu ilk temas sonucu elastik kapağın, üzerindeki ince bir jet tabakasıyla ani bir şekilde deforme olduğu ve akabinde tekrar başlangıç konumuna dönmek üzere hareketine devam ettiği gözlemlenmiştir. İlgili akım ile ikinci teması sonrası, elastik kapak deformasyonu tekrar artış gösterirken paralelinde akışkan-katı arayüzeyinde hidrolik sıçrama ve şiddetli girdap hareketlerini içeren kaotik bir akım oluşumu dikkat çekmektedir. Memba kısmında kabarmaya başlayan su seviyesi ile ikinci pik değerine ulaşan elastik kapak deplasmanının, kabaran su seviyesinin düşmeye başlaması ile paralel olarak düşüş eğilimine girdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.15. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında deney (*sol*) ve *R1* (*orta*) ve *R2* (*sağ*) analizlerine ait görseller

R1 ve *R2* analiz sonuçlarına ait görseller, deney fotoğrafları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.15'te sunulmaktadır. İlgili şekilden, *R1* ve *R2* analizleriyle akışkan-katı arayüzünde herhangi bir kararlılık sorunu yaşamadan hesaplamaların gerçekleştirilebildiği görülebilmektedir. Ayrıca, her iki analizde de katı alan, düzgün bir gerilme alanıyla herhangi bir düzensiz parçacık dağılımı sorunu yaşanmadan hesaplanabilmiştir. Bununla birlikte, Bölüm 4.3 ile paralel olarak, ZSİPH yaklaşımının kullanıldığı *R1* analizinde şok dalgası kaynaklı yerel basınç salınımları gözlemlenmiş olup, bu noktada parametrik çalışmanın gerekliliği bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, akışkan alanının Riemann-İPH yaklaşımına dayandığı *R2* analizinin, daha düşük şiddette olsa da basınç alanında benzer yerel salınımlardan muzdarip olduğu dikkat çekmektedir. Burada, nispeten daha yüksek bir interpolasyon uzunluğu kullanarak ilgili salınımların elimine edilebileceği düşünülmele birlikte, mevcut Riemann-İPH yaklaşımı ile P^* değerinin hesaplanmasında yüksek viskoz etkilerin sınırlanması amacıyla kullanılan eşitlik içerisindeki λ sabitinin sonuçlar üzerindeki etkisinin de ayrıca araştırılması gerektiği vurgulanmalıdır.



Şekil 4.16. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında $NA1$ (sol) ve $NA2$ (orta) ve $NA3$ (sağ) analizlerine ait görseller

Mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi ile farklı $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarının ele alındığı $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analiz sonuçlarının farklı zaman adımlarına ait görselleri Şekil 4.16'da sunulmaktadır. İlgili şekilden, tüm $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranları için, etkileşim arayüzünde

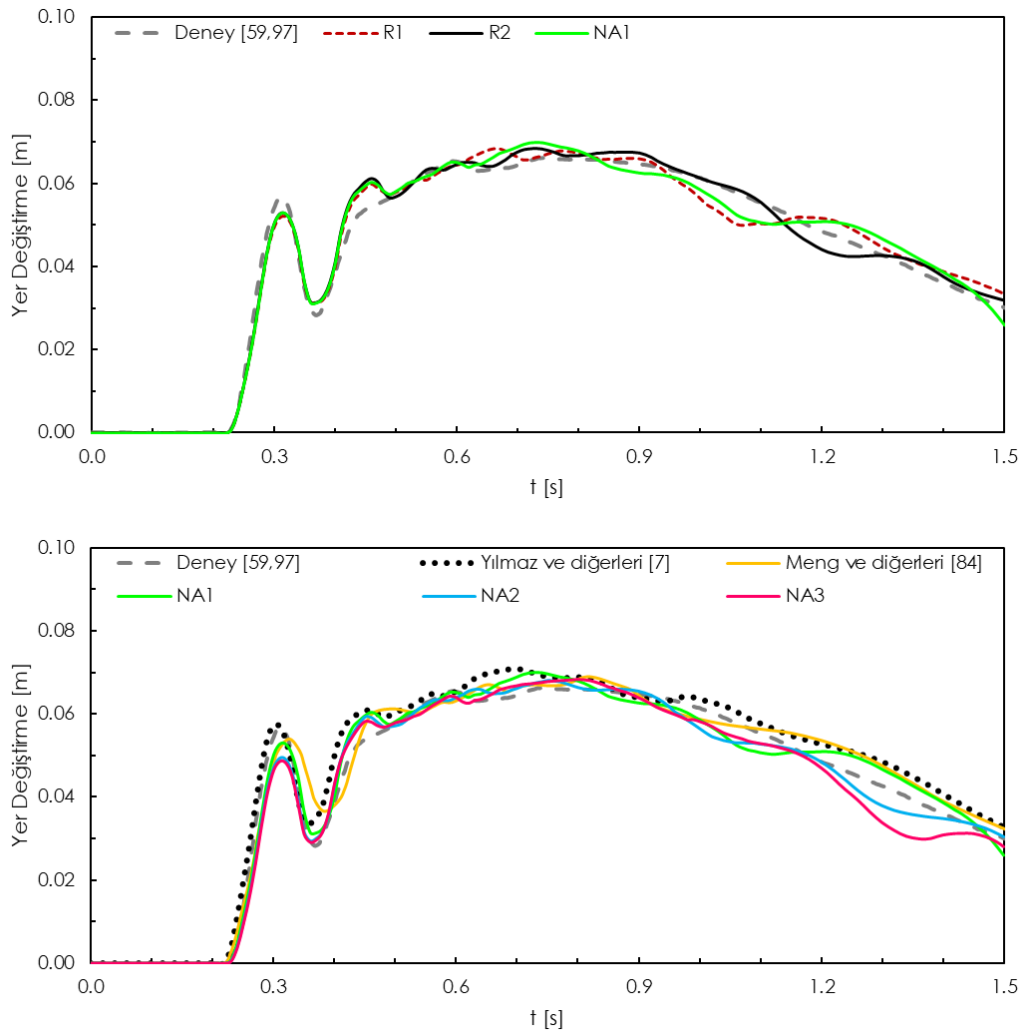
herhangi bir fiziksel olmayan boşluk oluşmadan, numerik kararlılık seviyesinin korunduğu görülmektedir. Ayrıca, katı alandaki artan parçacık çözünürlüğü ile gerilme alanındaki detay seviyelerinde beklendiği üzere bir artış gözlemlenmiş ve ilgili alanlarda herhangi bir gerilme kararsızlığı veya düzensiz parçacık dağılımı sorunuyla karşılaşılması gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, akışkan alanı Riemann-İPH ile ZII zaman integrasyon şeması kullanılarak ele alınan referans $R2$ analiz sonuçlarıyla paralel olarak, ilgili analiz sonuçlarında da bazı noktalarda ufak basınç salınımlarının varlığının devam ettiği vurgulanmalıdır.

Mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin çözüm yakınsaklığı, MI ölçüm noktasının yatay düzlemdeki numerik yer değiştirme hesaplamalarının, deneysel ölçümler ve literatürdeki diğer numerik model hesaplamaları ile karşılaştırılması üzerinden araştırılmıştır. Elde edilen karşılaştırma sonuçları iki gruba ayrılarak Şekil 4.17’de sunulmaktadır. İlgili şeklin üst kısmında sunulan ilk grup, deneysel ölçüm verileri ile $R1$, $R2$ ve $NA1$ analiz sonuçlarını içermektedir. İlgili sonuçlardan, elastik engelin baraj yıkılması akımı ile ikinci temas anına kadar, analizlerde kullanılan zaman integrasyonu ve akışkan alanının ele alındığı İPH yaklaşımının belirgin farklar yaratmadığı görülmektedir. Bu noktadan sonra, akışkan-katı arayüzeyinde gelişen karmaşık akım karakteristikleri sonucu ilgili $R1$, $R2$ ve $NA1$ analizlerinin elastik plaka noktasal yer değişimi hesaplamalarında deneysel ölçümlerden ayrılarak farklı düzeylerde salınımların oluştuğu dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, elde edilen tüm ilgili analiz sonuçlarının, deneysel ölçümler ile makul bir uyumluluk seviyesini yakalayabildiği ifade edilebilmektedir.

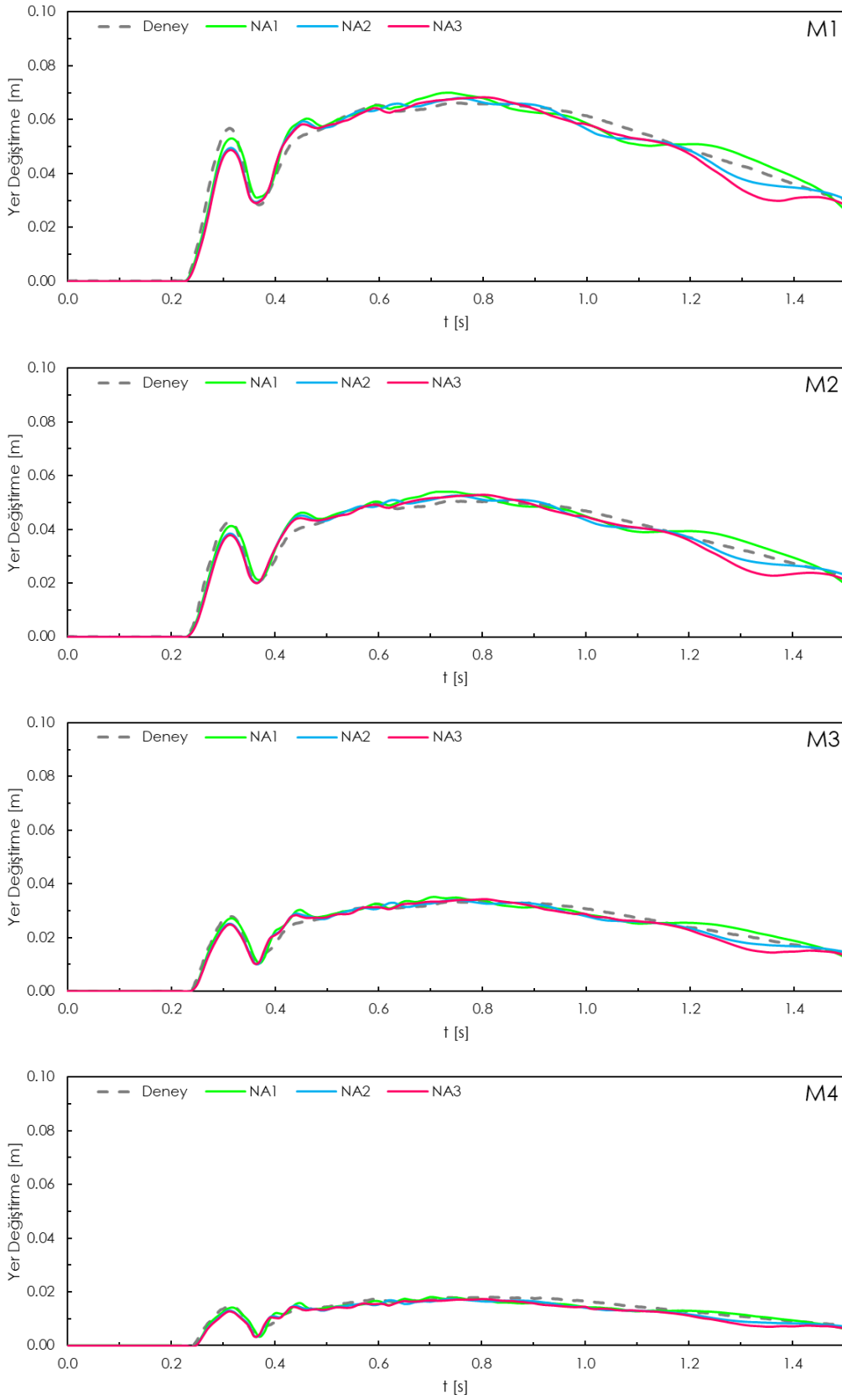
Mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi ile farklı $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarının ele alındığı $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analiz sonuçları, deneysel ölçümler ve literatürdeki diğer numerik model sonuçları ile karşılaştırarak, ikinci grup kapsamında Şekil 4.17’nin alt kısmında sunulmaktadır. İlgili sonuçlar, katı alan için artan çözünürlük oranının, baraj yıkılması akımının elastik plaka ile ilk teması sonrası oluşan ani yer değiştirme değerindeki düşüş dışında belirgin bir farklılaşmaya neden olmamasının yanı sıra, $R1$ ve $R2$ analiz sonuçlarında alıntılanan yer değiştirme salınımlarının ilgili analizlerde de korunduğunu göstermektedir. İlgili yer değiştirme salınımlarının akışkan-katı arayüzeyi etrafında oluşan vortisite gelişiminden kaynaklandığı düşünülmekte olup, ilgili vortisite oluşumlarına ait görseller EK-3’te sunulmaktadır. Bununla birlikte, farklı $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranları ile elde edilen analiz sonuçlarında, deneysel ölçümler ve literatürdeki diğer numerik model hesaplamaları ile makul seviyedeki uyumun devam ettiği dikkat çekmektedir. Burada, karşılaştırmalarda

kullanılan diğer numerik modellerin Yılmaz ve diğerlerinin [7] DualSPHysics-Project Chrono ve Meng ve diğerlerinin [84] Riemann-İPH-Riemann-BLİPH birleşimlerine dayandığı not edilmelidir.

NA1, NA2 ve NA3 analizlerine ait numerik hesaplamaların tüm ölçüm noktaları için deneysel veriler ile karşılaştırması ise Şekil 4.18’de sunulmaktadır. Deneysel ölçümlerde, noktasal yer değiştirme temel karakteristiklerinin tüm ölçüm noktalarında farklı ölçeklerde korunduğu dikkat çekerken, benzer durumun mevcut numerik model hesaplamalarında da devam ettiği görülmektedir. Bu noktada, mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi ile tüm ölçüm noktaları için makul seviyede bir çözüm yakınsaklığının yakalandığı ifade edilebilmektedir.



Şekil 4.17. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminde MI noktasındaki yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması



Şekil 4.18. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminde elastik geçit ölçüm noktalarındaki (M1-M4) yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması

Mevcut kıyaslama durumu kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin hesaplama verimliliği gerçekleştirilen beş analiz üzerinden karşılaştırılmıştır. İlgili tüm analizler için gerek duyulan hesaplama süreleri, referans alınan *R1* analiz süresi ile oranlanarak elde edilen hızlanma oranları Çizelge 4.8’de sunulmaktadır. İlgili çizelgeden, aynı parçacık çözünürlüğü ve geleneksel *Zİ1* zaman integrasyonu yaklaşımları altında sırasıyla *ZSİPH-BLİPH* ve Riemann-İPH-BLİPH birleşimlerine dayanan *R1* ve *R2* analizlerinin oldukça yakın hesaplama süreleri gerektirdiği gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, aynı parçacık sayısı değeriyle mevcut tez çalışması kapsamında önerilen *Zİ2* zaman integrasyon şemasının kullanıldığı *NA1* analizinin referans alınan *R1* analizine kıyasla yaklaşık 1,25 kat daha hızlı çözüm sağlandığı dikkat çekmektedir. Benzer şekilde, $\Delta x^f/\Delta x^s=2$ oranına sahip *NA2* analizi, katı alanın çözünürlük değeri ile ilişkili olarak artan parçacık sayısına rağmen *R1* analizine kıyasla yaklaşık 1,14 kat hızlanma sağlarken, $\Delta x^f/\Delta x^s=4$ oranını kullanan *NA3* analizinde ise bu oran yaklaşık olarak 0,71 seviyesine düşerek referans alınan *R1* analizine göre daha yüksek hesaplama maliyeti gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.8. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminde hesaplama verimliliği karşılaştırmaları

	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>NA1</i>	<i>NA2</i>	<i>NA3</i>
<i>Akışkan parçacık sayısı</i>	100000	100000	100000	100000	100000
<i>Sınır parçacık sayısı</i>	6569	6569	6569	6576	6576
<i>Katı parçacık sayısı</i>	889	889	889	3528	14056
<i>Toplam parçacık sayısı</i>	107458	107458	107458	110104	120632
<i>Hızlanma oranı</i>	1,000x	1,036x	1,250x	1,140x	0,708x

4.5. Islak Bir Yatak Üzerindeki Baraj Yıkılması Akımının Elastik Bir Engel ile Etkileşimi

Bu bölümde, geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği, mevcut tez çalışması kapsamında hidroelastik AYE analizlerinde bir kıyaslama durumu olarak kullanılması amacıyla deneysel olarak ele alınan, ıslak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi problemi üzerinden araştırılmıştır. Deney düzeneği ve ölçüm tekniği hakkında detaylı bir bilgi Bölüm

3'te sunulmuş olup, bu bölümde gerçekleştirilen analizlere ait sonuçlar sunulmaktadır.

Mevcut numerik birleşimin çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği, gerçekleştirilen beş farklı analiz üzerinden değerlendirilmiştir. İlgili tüm analizlere ait detaylı bir özet Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Karşılaştırmalarda referans olarak kullanılmak üzere ele alınan $R1$ ve $R2$ analizleri, $\Delta x^f/\Delta x^s=1$ oranı ile tekdüze çözünürlük ve geleneksel $ZI1$ zaman integrasyon şeması ile sırasıyla ZSİPH-BLİPH ve Riemann-İPH-BLİPH birleşimlerine dayanmaktadır. $NA1$, $NA2$ ve $NA3$ analizleri ise mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen, $ZI2$ zaman integrasyonu yaklaşımı çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi için sırasıyla $\Delta x^f/\Delta x^s=1, 2$ ve 4 oranları benimsenerek gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.9. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi problemi için gerçekleştirilen analizler

	Δx^f [mm]	Δx^s [mm]	$H/\Delta x^f$	$d^s/\Delta x^s$	$\Delta x^f/\Delta x^s$	Akışkan Modeli	Zİ
$R1$	1,00	1,00	150	7	1	Geleneksel ZSİPH	Zİ1
$R2$	1,00	1,00	150	7	1	Riemann-İPH	Zİ1
$NA1$	1,00	1,00	150	7	1	Riemann-İPH	Zİ2
$NA2$	1,00	0,50	150	14	2	Riemann-İPH	Zİ2
$NA3$	1,00	0,25	150	28	4	Riemann-İPH	Zİ2

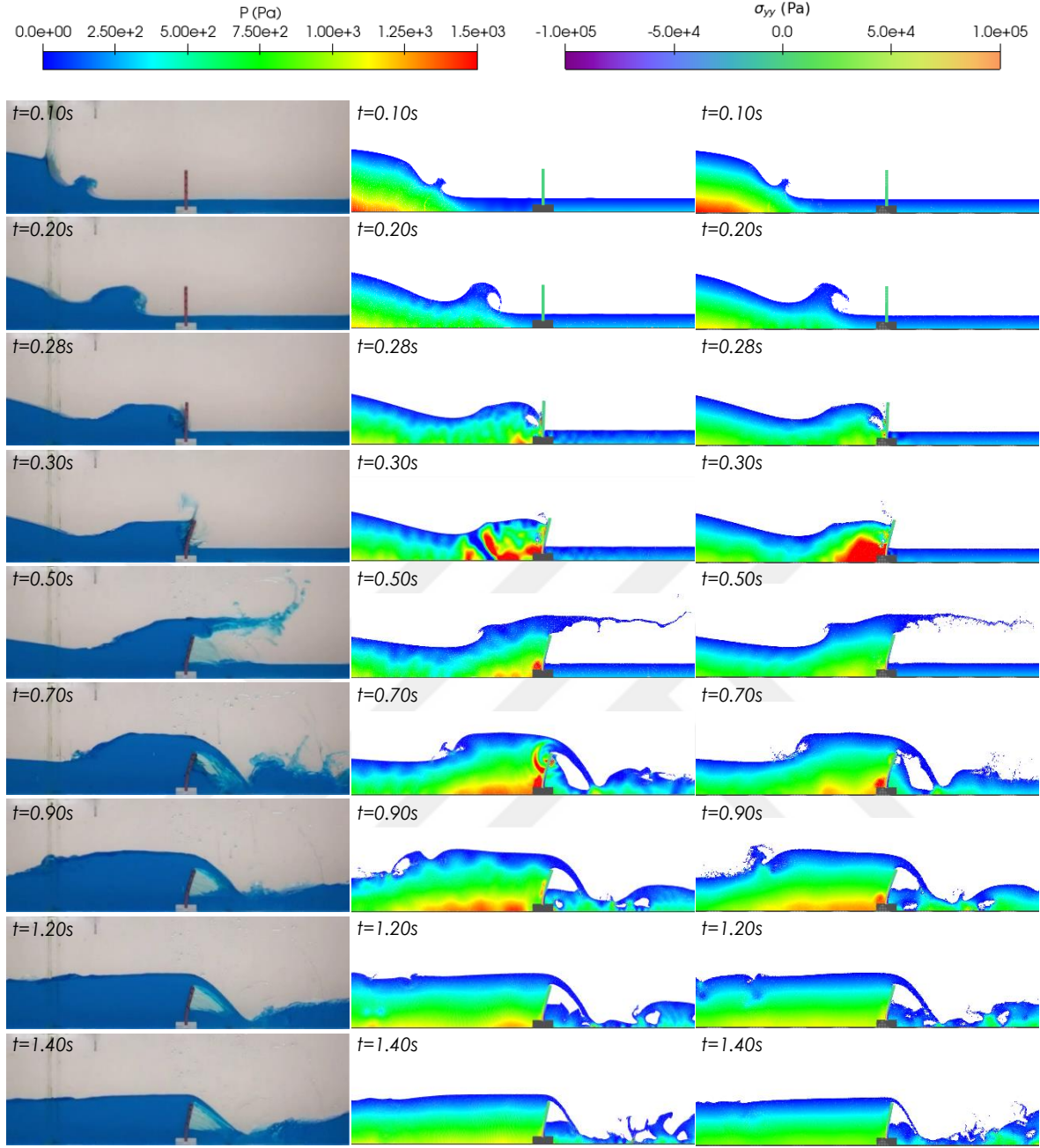
Numerik analizlerde akışkan alanının interpolasyon uzunluğu $h^f=1.25\Delta x^f$ ve başlangıç yoğunluk değeri $\rho_0=1000 \text{ kg/m}^3$ olarak ayarlanmıştır. Akışkan alanı içerisindeki numerik ses hızı $c^f = 20\sqrt{gH}$ olarak seçilmiştir. Katı alan ise interpolasyon uzunluğu $h^s=1.35\Delta x^s$, kum saati kontrol şeması sabiti $\kappa=50$ ve yapay viskozite sabiti $\alpha^s=0.03$ değerleri ile düzleştirilme kurucu modeli benimsenerek ele alınmaktadır. Akışkan alanının ZSİPH yaklaşımı ile ele alındığı $R1$ analizinde ise yapay viskozite sabiti $\alpha^f=0,04$ olarak ayarlanmıştır.

Rijit kapağın ani bir şekilde memba kısmındaki durağan su kütlesi önünden çekilmesi sonrasında, ilgili su kütlesinin yer çekimi etkisiyle mansaptaki su kütlesini sürüklemeye başladığı ve paralellinde bir mantar benzeri jet oluşumu gözlemlenmektedir. Daha sonrasında, oluşan bu jetin ıslak yatak üzerinde bir miktar ilerleyerek elastik engele oldukça yakın bir noktada kırıldığı gözlemlenmiştir. Oluşan dalga kırılımıyla kaotik akışkan-hava karışımı elastik engel ile etkileşime girmekte ve engel üzerinde ani bir şekil değişimine

neden olmaktadır. Elastik engelin deforme olmasıyla akışkan kütesinin bir kısmı engeli aşarak mansap kısmına doğru hareketini devam ettirirken bir kısmının engelin memba kısmında kabarmaya başladığı görülmektedir. Bunu takiben, elastik engelin deformasyonunda bir miktar gevşeme gözlemlenirken, akışkan akımının neden olduğu basınç kuvvetinde statik etkiler daha baskın bir hale gelmektedir. Mevcut problem, içerdiği yüksek hidrodinamik etkiler nedeniyle numerik modeller için zorlayıcı bir kıyaslama durumu olarak düşünülmektedir.

Mevcut problem özelinde gerçekleştirilen referans *R1* ve *R2* analizlerinden elde edilen farklı zaman adımlarına ait görseller, deney görüntüleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.19'da sunulmuştur. İlgili şekillerden, her iki analizin de deney sonuçları ile benzer bir akım karakteristiği sergileyerek, akışkan-katı arayüzeyinde herhangi bir fiziksel olmayan boşluk oluşumuna sebebiyet veren bir kararlılık sorunu barındırmayan hesaplamalar sunduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, akışkan alanının ZSİPH ile ele alındığı *R1* analizine ait sonuçlar incelendiğinde, bazı zaman adımlarında şok dalgası yayılımı kaynaklı basınç salınımlarının oluşumu dikkat çekerken, benzer salınımlar akışkan alanının Riemann-İPH yaklaşımı ile ele alındığı *R2* analizinde gözlemlenmemiştir. Bu doğrultuda, geliştirilen Riemann-İPH modelinin mevcut şartlar altında akışkan alanında daha kararlı sonuçlar sağladığı ifade edilebilmektedir.

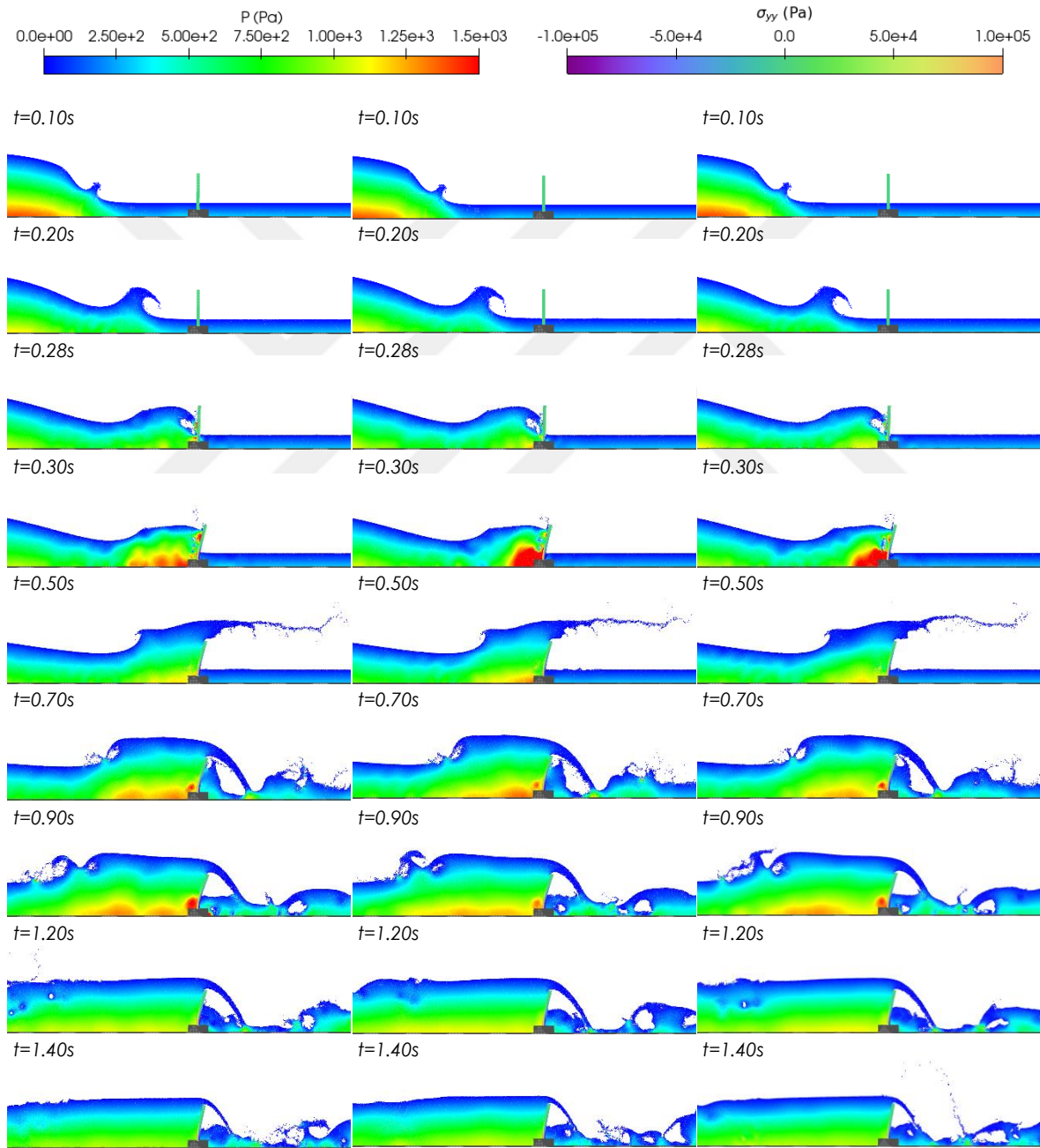
Ek olarak, *R1* ve *R2* analizlerinde oluşan dalga önü profillerinin, birbirleriyle ve deneysel profiller ile kıyaslandığında birtakım farklılıklar barındırdığı dikkat çekmektedir. Numerik analizlerde ihmal edilen kapağın durağan su kütesi önünden kalkma hareketinin, deneysel profil ile farklılaşmanın bir nedeni olabileceğini düşünülürken, *R1* ve *R2* analizleri arasındaki farklılaşmanın ilgili analizlerin dayandıkları ZSİPH ve Riemann-İPH yaklaşımlarının analizlerdeki numerik viskoz etkileri ele alış biçimlerinden kaynaklanabileceği varsayılmaktadır.



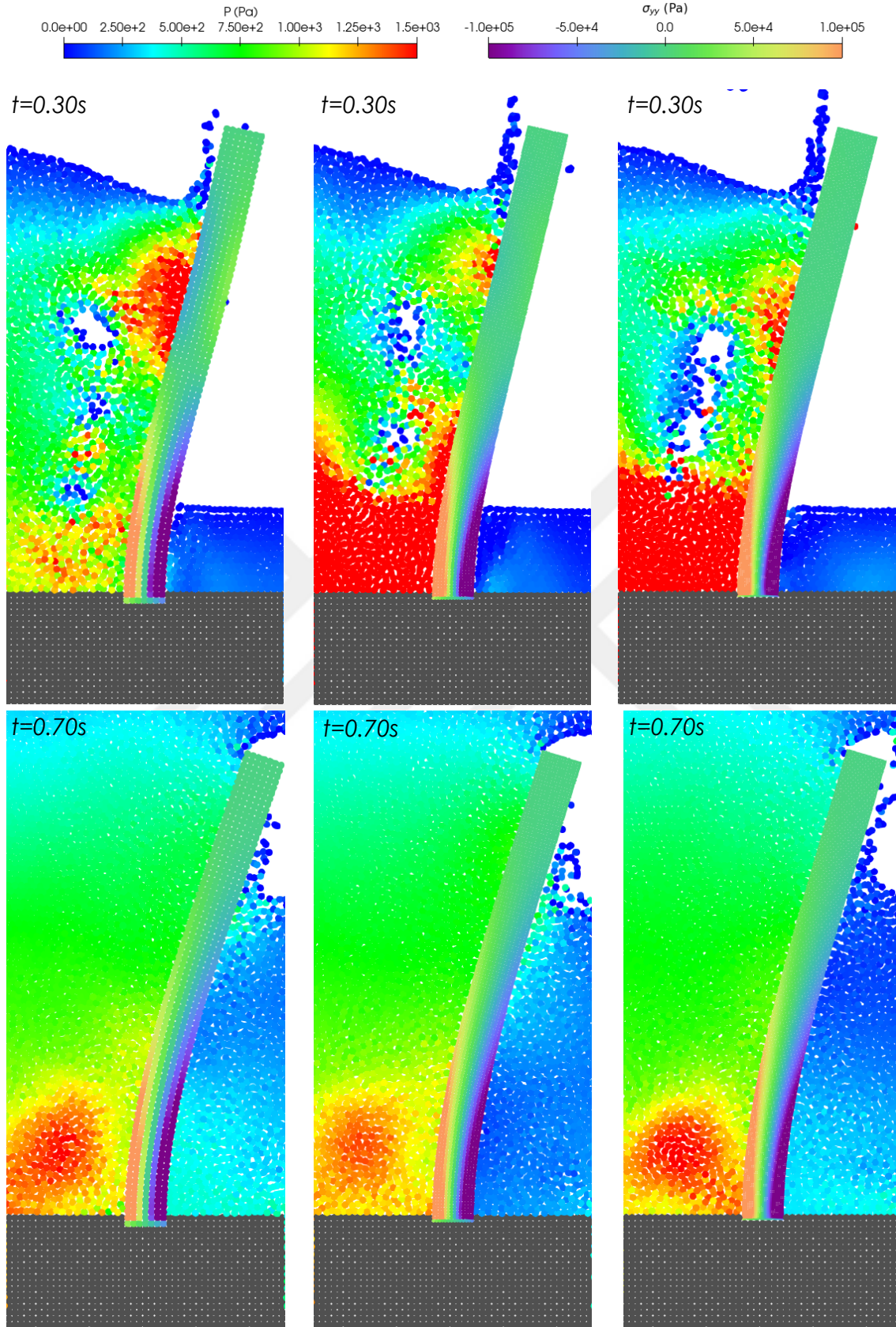
Şekil 4.19. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında deney (*sol*) ve *R1* (*orta*) ve *R2* (*sağ*) analizlerine ait görseller

Geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi ile farklı $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarının ele alındığı *NA1*, *NA2* ve *NA3* analiz sonuçlarının farklı zaman adımlarına ait görselleri Şekil 4.20’de sunulmaktadır. İlgili görsellerden, tüm $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarında, akışkan-katı arayüzeyinde herhangi bir kararlılık problemi yaşamadan, geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşimi ile düzgün basınç ve gerilme alanlarının elde edilebildiği gözlemlenmektedir. Referans olarak gerçekleştirilen *R1* ve *R2* analiz sonuçlarıyla paralel

olarak, ıslak yatak üzerindeki dalga önu profili farklılaşmasının mevcut analizlerde de devam ettiği görülürken, tüm $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranlarında serbest yüzeyli akım karakteristiklerinin deneysel çalışma ile uyumlu olarak hesaplanabildiği dikkat çekmektedir. Akışkan-katı arayüzüne ait detay görseller Şekil 4.21’de sunulmaktadır. İlgili şekilden, katı alan için tüm çözünürlük oranlarında, gerilme gürültüsü ve düzensiz parçacık dağılımı gibi herhangi bir kararlılık sorununun yaşanmadığı görülmektedir.

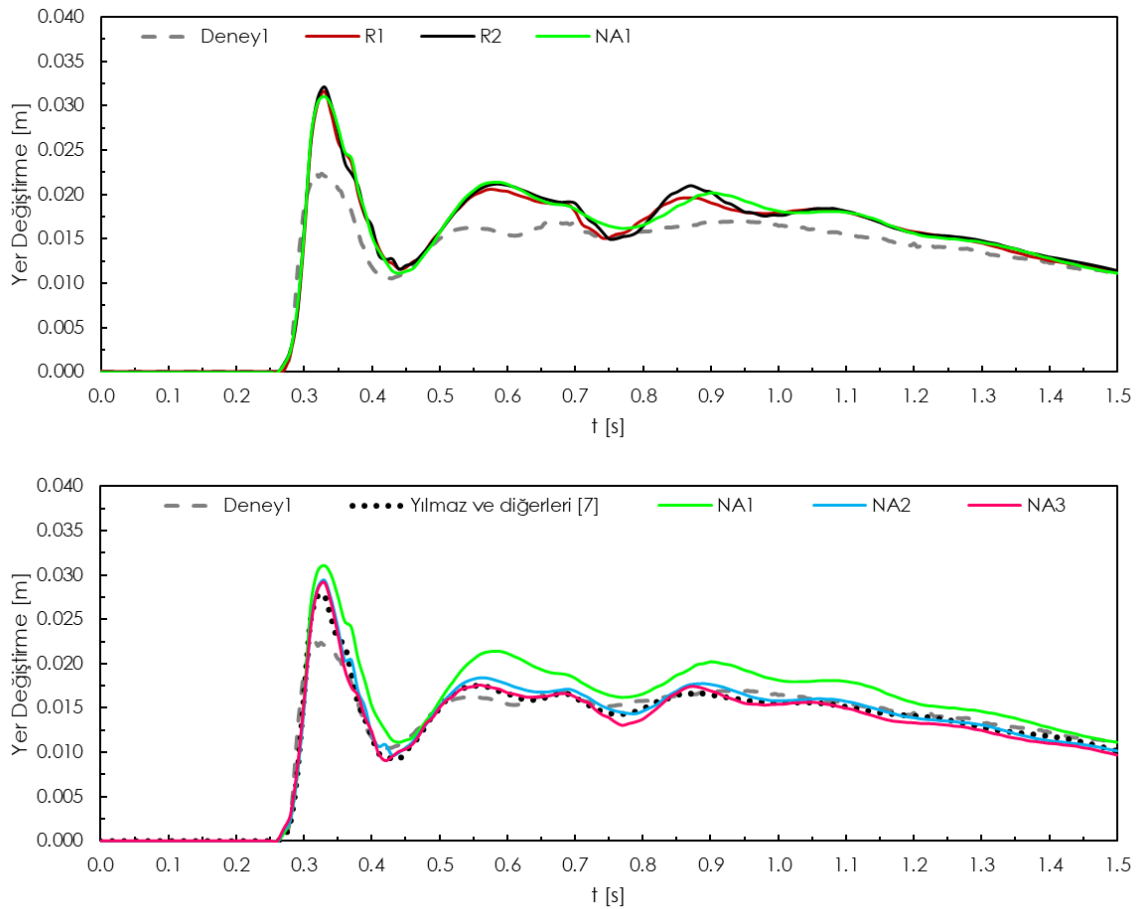


Şekil 4.20. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminin farklı zaman adımlarında NA1 (sol) ve NA2 (orta) ve NA3 (sağ) analizlerine ait görseller

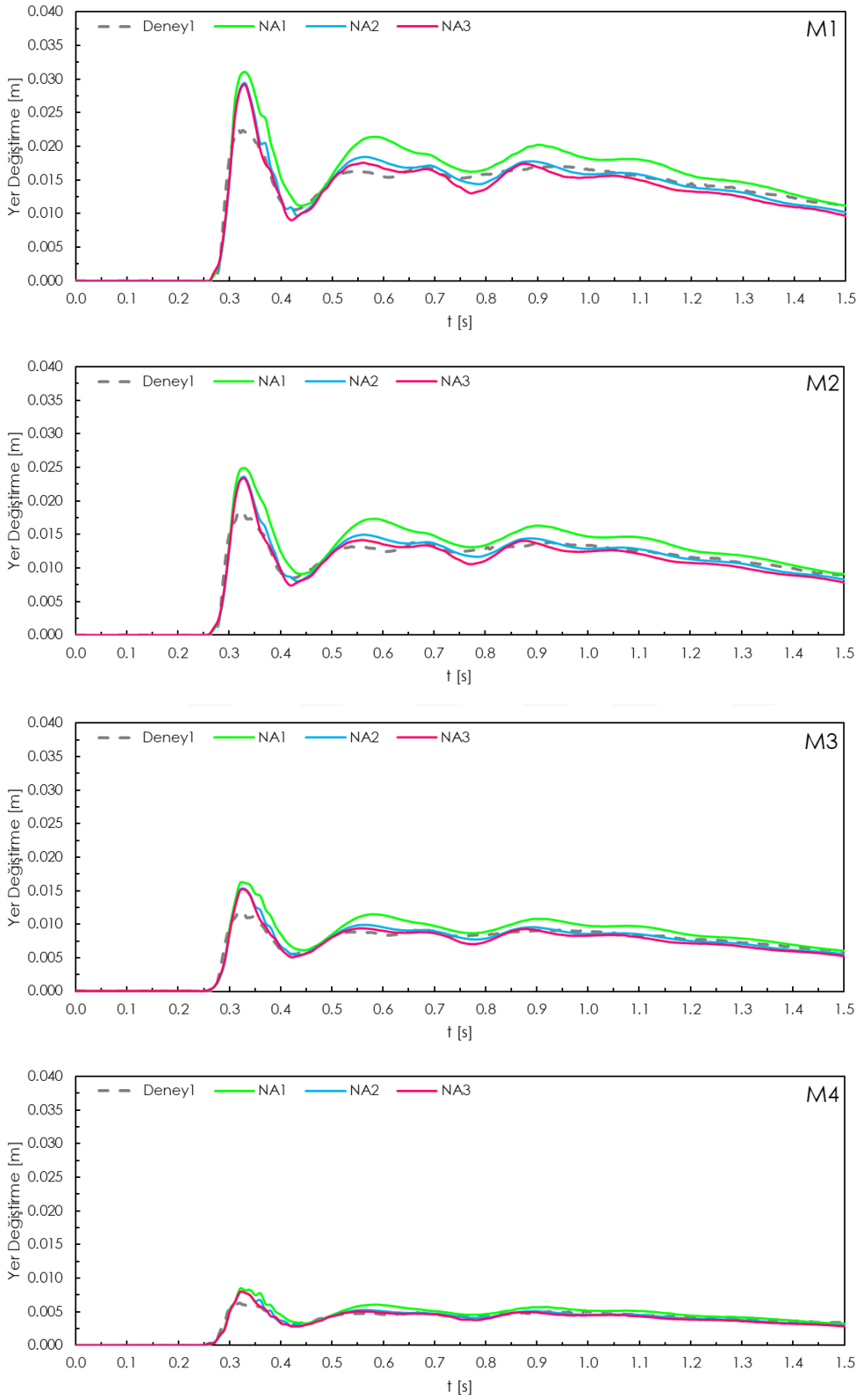


Şekil 4.21. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminde NA1 (sol), NA2 (orta) ve NA3 (sağ) analizlerine ait detay kesitler

Mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin çözüm yakınsaklığı, MI ölçüm noktasındaki yatay yer değiştirme değeri üzerinden deneysel ölçümler ve diğer numerik model hesaplamalarıyla karşılaştırarak araştırılmıştır. Bu doğrultuda, gerçekleştirilen tüm analiz sonuçlarına ait hesaplamalar Şekil 4.22’de iki grup halinde sunulmaktadır. Şekil 4.22’nin üst kısmında sunulan ilk grup, $R1$ ve $R2$ referans analizleriyle birlikte tekdüze çözünürlük koşulu altında mevcut Riemann-İPH-BLİPH modeli olan $NA1$ analiz sonuçlarını içermektedir. İlgili şekilden, $R1$, $R2$ ve $NA1$ analizlerinin mevcut kıyaslama durumunda oldukça benzer sonuçlar sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, ilgili hesaplamaların deneysel ölçüm verileri ile düşük bir uyuma sahip olduğu dikkat çekmektedir. Bu doğrultuda, katı alanda kullanılan $d^s/\Delta x^s=7$ çözünürlük oranının çözüm yakınsaklığı kapsamında yetersiz olduğu ve mevcut zaman integrasyonu yaklaşımları ve akışkan alanında kullanılan İPH formülasyonunun, mevcut kıyaslama durumu kapsamında belirgin bir farklılık yaratmadığı ifade edilebilmektedir.



Şekil 4.22. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminde MI noktasındaki yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması



Şekil 4.23. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminde elastik geçit ölçüm noktalarındaki (M1-M4) yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırması

Şekil 4.22'nin alt kısmında sunulan ikinci grupta, mevcut çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin farklı $\Delta x^f/\Delta x^s$ oranları ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının, deneysel ölçüm verileri ve literatürdeki diğer numerik model sonuçları ile karşılaştırmalarını kapsamaktadır. İlgili şekilden, katı alandaki çözünürlük artışı ile hesaplanan yatay düzlemdeki yer değiştirme verileri düşerken, deneysel ölçüm verileri ve Yılmaz ve diğerlerinin [7] DualSPHysics-Project Chrono birleşimi hesaplamaları ile uyum seviyesinin arttığı gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, mevcut kıyaslama durumu kapsamında, $d^s/\Delta x^s=14$ ve $d^s/\Delta x^s=28$ oranları ile gerçekleştirilen analizlerin birbirleri ile oldukça yakın hesaplamalar sunduğu ve bu doğrultuda $d^s/\Delta x^s=14$ oranı ile analizlerde belirli bir kararlılık seviyesinin yakalandığı ifade edilebilmektedir.

Mevcut *NA1*, *NA2* ve *NA3* analiz sonuçlarının, tüm ölçüm noktalarındaki deneysel ölçümler ile karşılaştırmaları Şekil 4.23'te sunulmaktadır. İlgili şekilden, tüm ölçüm noktalarında mevcut çözüm yakınsaklığının korunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, mevcut tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm numerik hesaplamalarda, ilgili baraj yıkılması akımı ile elastik engelin ilk etkileşiminden kaynaklanan ani yer değiştirme verisinin deneysel ölçüm ile kıyaslandığında daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Benzer bir durum, farklı numerik modeller kullanılarak elde edilen sonuçlarda da görünmekle birlikte [7], ilgili farkın numerik analizlerdeki dalga önü profili farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.10. Islak bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir engel ile etkileşimi probleminde hesaplama verimliliği karşılaştırmaları

	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>NA1</i>	<i>NA2</i>	<i>NA3</i>
<i>Akışkan parçacık sayısı</i>	116060	116060	116060	116060	116060
<i>Sınır parçacık sayısı</i>	6456	6456	6456	6463	6463
<i>Katı parçacık sayısı</i>	574	574	574	2268	9016
<i>Toplam parçacık sayısı</i>	123090	123090	123090	124791	131539
<i>Hızlanma oranı</i>	1,000x	1,027x	1,688x	1,472x	0,918x

Mevcut kıyaslama durumu kapsamında geliştirilen çoklu-çözünürlüklü Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin hesaplama verimliliği gerçekleştirilen beş analiz üzerinden karşılaştırılmıştır. İlgili tüm analizler için gerek duyulan hesaplama süreleri, referans alınan

R1 analiz süresi ile oranlanarak elde edilen hızlanma oranları Çizelge 4.10'da sunulmaktadır. İlgili çizelgeden, aynı parçacık sayısı ile geleneksel *ZI1* zaman integrasyonu yaklaşımları altında sırasıyla *ZSİPH-BLİPH* ve Riemann-*İPH-BLİPH* birleşimlerine dayanan *R1* ve *R2* analizlerinin oldukça yakın hesaplama süreleri gerektirdiği gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, aynı parçacık sayısı değeriyle mevcut tez çalışması kapsamında önerilen *ZI2* zaman integrasyon şemasının kullanıldığı *NA1* analizinin referans alınan *R1* analizine kıyasla yaklaşık 1,69 kat daha hızlı çözüm sağlandığı dikkat çekmektedir. Benzer şekilde, $\Delta x^f/\Delta x^s=2$ oranına sahip *NA2* analizi, katı alanın çözünürlük değeri ile ilişkili olarak artan parçacık sayısına rağmen *R1* analizine kıyasla yaklaşık 1,47 kat hızlanma sağlarken, $\Delta x^f/\Delta x^s=4$ oranını kullanan *NA3* analizinde ise bu oran yaklaşık olarak 0,92 seviyesine düşerek referans alınan *R1* analizine göre daha yüksek hesaplama maliyeti gerekliliği ortaya gerektirdiği dikkat çekmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Mevcut tez çalışması kapsamında, hidroelastik AYE problemlerinin analizinde kullanılmak üzere çoklu-çözünürlüklü ve çoklu zaman adımlı Riemann-İPH-BLİPH birleşimine dayanan bir bilgisayar kodunun geliştirilmesi amaçlanmıştır. İlgili numerik birleşiminin akışkan alanı, Roe'nun yaklaşık Riemann çözücüsüne dayanan Riemann-İPH formülasyonu ile ele alınırken, katı alan, yapay viskozite ve kum saati kontrol şeması ile kararlılık seviyesi artırılmış BLİPH modeli ile analiz edilmektedir. Çoklu-çözünürlük şeması, akışkan ve katı alanlar için farklı başlangıç parçacık aralığı değerlerinin kullanımına dayanmaktadır. Bununla birlikte, mevcut numerik birleşimde literatürdeki benzer modellerde kullanılan genel yaklaşımdan farklı olarak, akışkan ve katı alan zaman integrasyonlarının sırasıyla tahmin-düzeltilme fazlı Simplektik ve tek adımlı Yarı-Örtük Euler şemalarına dayandığı hibrit bir yaklaşım benimsenmektedir. Bu doğrultuda, özellikle çoklu-çözünürlük uygulamasıyla katı alandaki artan parçacık sayısı ile paralel olarak artması beklenen çözüm maliyetinin herhangi bir ara adım hesaplaması gerektirmeyen tek adımlı bir şema ile ele alınarak hesaplama verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır.

Geliştirilen numerik birleşimin çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği çeşitli kıyaslama durumları üzerinden araştırılmıştır. İlk olarak, yapay viskozite ve kum saati kontrol şeması ile kararlılık seviyesi artırılmış BLİPH modelinin çözüm yakınsaklığı, düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme koşulları altında konsol bir kirişin serbest titreşimi problemi üzerinden ele alınarak kullanılan çözünürlük oranının sonuçlar üzerinde etkileri incelenmiştir. Akabinde, geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği, elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi, baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi, kuru yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi ve son olarak, mevcut tez çalışması kapsamında hidroelastik AYE problemlerinde bir kıyaslama durumu olarak kullanılması amacıyla deneysel olarak ele alınan, ıslak yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir geçit ile etkileşimi problemleri üzerinden araştırılmıştır.

İlgili araştırmalar, mevcut kıyaslama durumları kapsamında analitik çözümler, deneysel ölçümler ve literatürdeki diğer numerik model hesaplamalarının yanı sıra bu tez çalışması kapsamında karşılaştırmalarda referans olarak kullanılabilmesi amacıyla geliştirilen, geleneksel tek düze zaman integrasyon şemalı ZSİPH-BLİPH ve Riemann-İPH-BLİPH birleşimlerine ait hesaplamalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Referans analizler kapsamında geliştirilen her iki modelin akışkan ve katı alanları, geleneksel tahmin-düzeltilme fazlı Simplektik zaman integrasyon şeması kullanılarak güncellenirken, ilgili analiz sonuçları vasıtasıyla zaman integrasyon şemalarının ve akışkan alanında kullanılan İPH yaklaşımının çözüm yakınsaklığı ve hesaplama verimliliği üzerinde etkilerinin de ayrıca araştırılması amaçlanmıştır. Tüm kıyaslama durumları ele alındığında mevcut tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır;

- Mevcut tez çalışması kapsamında katı alan analizlerinde kullanılan, yapay viskozite ve kum saati kontrol şeması ile kararlılık seviyesi arttırılmış BLİPH modelinin, konsol kirişin serbest titreşimi problemi üzerinden düzlem-gerinim ve düzlem-gerilme koşulları altında elastik dinamikleri herhangi bir gerilme kararsızlığı ya da düzensiz parçacık dağılımı problemi yaşamadan başarılı bir şekilde modelleyebildiği görülmüştür.
- Farklı başlangıç parçacık aralığı değerlerinin sınındığı ilgili BLİPH analizlerinde, $d^s/\Delta x^s=20$ oranı ile çözüm yakınsaklığının makul bir seviyeye ulaşabildiği gözlemlenirken, $d^s/\Delta x^s=5$ oranının ilgili problem kapsamında elastik dinamikleri modellemede yetersiz kaldığı tespit edilmiştir.
- Mevcut tez çalışması kapsamında hidroelastik AYE problemlerinin analizinde kullanılmak üzere geliştirilen çoklu-çözünürlük ve çoklu zaman adımlı Riemann-İPH-BLİPH birleşiminin dört farklı kıyaslama durumu üzerinden gerçekleştirilen analizlerinde, mevcut numerik birleşimin, $\Delta x^f/\Delta x^s=1, 2$ ve 4 olmak üzere üç farklı çözünürlük oranında da akışkan-katı arayüzeyinde herhangi bir kararlılık problemi yaşamadan ilgili numerik analizleri tamamladığı görülmüştür.
- Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi gibi zorlayıcı statik karakteristikli kıyaslama durumlarında, referans analizlerde kullanılan tekdüze zaman adımlı *GPK* zaman integrasyonu yaklaşımının daha kararlı sonuçlar sağladığı tespit edilmiştir. Mevcut tez çalışması kapsamında kullanılan çoklu-zaman adımlı *MESK* yaklaşımının, ilgili kıyaslama durumunda ufak basınç salınımları ve buna paralel

olarak deplasman değerlerinde ufak salınımlar sergilediği gözlemlenmiş olup, çoklu-çözünürlük uygulaması ile artan katı alan çözünürlük değerleri ile ilgili salınımların şiddetinin azaldığı ayrıca tespit edilmiştir.

- Mevcut tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen hidroelastik AYE analiz sonuçları incelendiğinde, kullanılan parametreler dikkate alınarak nispeten düşük interpolasyon uzunluğu değerlerinde ($h^f=1.20-1.35\Delta x^f$), geleneksel ZSİPH yaklaşımının akışkan alanı basınç değerlerinde şok dalgası kaynaklı yerel basınç salınımları sergilediği gözlemlenmiş olup, ilgili analizlerde Riemann-İPH yaklaşımının düzgün basınç alanıyla daha kararlı sonuçlar sağladığı görülmüştür.
- Mevcut *MESK* yaklaşımli hibrit zaman integrasyonu şemasının hesap verimliliği analizlerinde, $\Delta x^f/\Delta x^s=1$ oranı ile tekdüze çözünürlük şartı altında, referans olarak gerçekleştirilen *GPK* yaklaşımli analizlere nazaran 1,25-4,81 aralığında hızlanma oranlarının elde edilebildiği görülmüştür. Burada, ilgili hızlanma oranlarının katı ve akışkan alanlarının zaman adımı değerleri arasındaki fark ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Çoklu-çözünürlük kapsamında herhangi bir referans analiz gerçekleştirilmemiş olmakla birlikte, teorik olarak tekdüze çözünürlük değerlerindeki hızlanma oranlarından daha yüksek değerlerin elde edileceği düşünülmektedir.

5.2. Öneriler

Mevcut tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen numerik analizler ile elde edilen sonuçlar ışığında, gelecekteki çalışmalarda ele alınarak incelenebilecek hususlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır;

- Özellikle yüksek hidrodinamik yükler ile karmaşık serbest yüzeyli akım karakteristikleri içeren kıyaslama durumlarında, akışkan parçacıklarının analiz süresince homojen dağılımlarını geliştirmeye yönelik Parçacık Öteleme Tekniği uygulamasının mevcut numerik birleşim içerisine entegre edilerek çözüm yakınsaklığı üzerine etkilerinin incelenebileceği düşünülmektedir.
- İlgili karmaşık akım karakteristikleri ile akışkan-hava karışımlarını içeren kıyaslama durumlarında, akışkan alanı modellemesinde çok-fazlı yaklaşımların ele alınarak çözüm yakınsaklığı üzerine etkilerinin incelenebileceği düşünülmektedir.

- Mevcut tez çalışması kapsamında akışkan-sınır ve akışkan-katı arayüzeyinde viskoz etkiler ihmal edilmiş olup, ilgili birleşim şemalarına eklenecek viskoz etkiler ile kaymama (no-slip) sınır şartının çözüm yakınsaklığı üzerine etkilerinin araştırılabileceği düşünülmektedir.
- Mevcut tez çalışması kapsamında geliştirilen Riemann-İPH-BLİPH birleşiminde, akışkan alanının ele alındığı Riemann-İPH yaklaşımının ara durum basınç değerlerinin hesaplanma sürecinde kullanılan sınırlayıcı terimin etkinliği, sabit bir katsayı üzerinden belirlenmektedir. Literatür incelendiğinde, ilgili etkinlik seviyesini belirleyen katsayının, Reynolds sayısı veya ZSİPH yaklaşımına benzer bir şekilde yapay viskozite ile ilişkilendirilip problem karakteristiklerine bağlı olarak ayarlandığı yaklaşımlar bulunduğu görülmüştür. Benzer bir yaklaşımın mevcut numerik model özelinde uygulanarak analiz sonuçları üzerinde etkilerinin incelenebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Antoci, C., Gallati, M., Sibilla, S. (2007). Numerical simulation of fluid–structure interaction by SPH. *Computers & Structures*, 85(11–14), 879–890.
2. Shimizu, Y., Khayyer, A., Gotoh, H. (2022). An SPH-based fully-Lagrangian meshfree implicit FSI solver with high-order discretization terms. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 137, 160–181.
3. Khayyer, A., Gotoh, H., Falahaty, H., Shimizu, Y. (2018). An enhanced ISPH–SPH coupled method for simulation of incompressible fluid–elastic structure interactions. *Computer Physics Communications*, 232, 139–164.
4. Sun, W.-K., Zhang, L.-W., Liew, K.M. (2020). A smoothed particle hydrodynamics–peridynamics coupling strategy for modeling fluid–structure interaction problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 371, 113298.
5. Sun, W., Zhang, L., Liew, K.M. (2022). A coupled SPH-PD model for fluid–structure interaction in an irregular channel flow considering the structural failure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 401, 115573.
6. Zhan, L., Peng, C., Zhang, B., Wu, W. (2019). A stabilized TL–WC SPH approach with GPU acceleration for three-dimensional fluid–structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, 86, 329–353.
7. Yilmaz, A., Kocaman, S., Demirci, M. (2022). Numerical analysis of hydroelasticity problems by coupling WCSPH with multibody dynamics. *Ocean Engineering*, 243, 110205.
8. Liao, K., Hu, C., Sueyoshi, M. (2015). Free surface flow impacting on an elastic structure: Experiment versus numerical simulation. *Applied Ocean Research*, 50, 192–208.
9. Liao, K., Hu, C. (2013). A coupled FDM–FEM method for free surface flow interaction with thin elastic plate. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(1), 1–11.
10. Martínez-Ferrer, P.J., Qian, L., Ma, Z., Causon, D.M., Mingham, C.G. (2018). An efficient finite-volume method to study the interaction of two-phase fluid flows with elastic structures. *Journal of Fluids and Structures*, 83, 54–71.
11. Liu, M., Shao, J., Li, H. (2013). Numerical simulation of hydro-elastic problems with smoothed particle hydrodynamics method. *Journal of Hydrodynamics*, 25(5), 673–682.
12. Long, T., Hu, D., Wan, D., Zhuang, C., Yang, G. (2017). An arbitrary boundary with ghost particles incorporated in coupled FEM–SPH model for FSI problems. *Journal of Computational Physics*, 350, 166–183.
13. Zhang, Z.L., Long, T., Chang, J.Z., Liu, M.B. (2019). A smoothed particle element method (SPEM) for modeling fluid–structure interaction problems with large fluid

- deformations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 356, 261–293.
14. Liu, G.R., Liu, M.B. (2003). *Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method*. World Scientific.
 15. Lucy, L.B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal*, 82(12), 1013–1024.
 16. Gingold, R., Monaghan, J.J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 375–189.
 17. Özbulut, M. (2013). İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Yöntemi ile Serbest Su Yüzeyle Şiddetli Akış Problemlerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
 18. Kolukısa, D.C. (2019). İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Yönteminde Yenilikçi Sıkıştırılmaz Akış Yaklaşımları Ve Uygulamaları, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
 19. Monaghan, J.J. (1994). Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110, 399–406.
 20. Shao, S., 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.
 21. Capasso, S., Tagliaferro, B., Güzel, H., Yılmaz, A., Dal, K., Kocaman, S., Viccione, G., Evangelista, S. (2021). A Numerical Validation of 3D Experimental Dam-Break Wave Interaction with a Sharp Obstacle Using DualSPHysics. *Water*, 13(15), 2133.
 22. Monaghan, J.J., Kos, A. (1999). Solitary Waves on a Cretan Beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125(3), 145–155.
 23. Gómez-Gesteira, M., Dalrymple, R.A. (2004). Using a Three-Dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Wave Impact on a Tall Structure. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130(2), 63–69.
 24. Souto-Iglesias, A., Delorme, L., Pérez-Rojas, L., Abril-Pérez, S. (2006). Liquid moment amplitude assessment in sloshing type problems with smooth particle hydrodynamics. *Ocean Engineering*, 33(11–12), 1462–1484.
 25. Crespo, A.J.C., Gómez-Gesteira, M., Dalrymple, R.A. (2008). Modeling dam break behavior over a wet bed by a SPH technique. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 134(6), 313–320.
 26. Kocaman, S., Dal, K. (2020). A new experimental study and SPH comparison for the sequential dam-break problem. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 1–17.
 27. Sun, P.N., Colagrossi, A., Marrone, S., Zhang, A.M. (2017). The δ plus-SPH model:

- Simple procedures for a further improvement of the SPH scheme. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 315, 25–49.
28. Altomare, C., Domínguez, J.M., Crespo, A.J.C., González-Cao, J., Suzuki, T., Gómez-Gesteira, M., Troch, P. (2017). Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. *Coastal Engineering*, 127, 37–54.
 29. Khayyer, A., Gotoh, H., Shao, S. (2009). Enhanced predictions of wave impact pressure by improved incompressible SPH methods. *Applied Ocean Research*, 31(2), 111–131.
 30. Chow, A.D., Rogers, B.D., Lind, S.J., Stansby, P.K. (2018). Incompressible SPH (ISPH) with fast Poisson solver on a GPU. *Computer Physics Communications*, 226, 81–103.
 31. Lind, S.J., Xu, R., Stansby, P.K., Rogers, B.D. (2012). Incompressible smoothed particle hydrodynamics for free-surface flows: A generalised diffusion-based algorithm for stability and validations for impulsive flows and propagating waves. *Journal of Computational Physics*, 231(4), 1499–1523.
 32. Khayyer, A., Gotoh, H., Shimizu, Y. (2017). Comparative study on accuracy and conservation properties of two particle regularization schemes and proposal of an optimized particle shifting scheme in ISPH context. *Journal of Computational Physics*, 332, 236–256.
 33. Rezavand, M., Zhang, C., Hu, X. (2020). A weakly compressible SPH method for violent multi-phase flows with high density ratio. *Journal of Computational Physics*, 402, 109092.
 34. Zhang, C., Hu, X.Y., Adams, N.A. (2017). A weakly compressible SPH method based on a low-dissipation Riemann solver. *Journal of Computational Physics*, 335, 605–620.
 35. Antuono, M., Colagrossi, A., Marrone, S. (2012). Numerical diffusive terms in weakly-compressible SPH schemes. *Computer Physics Communications*, 183(12), 2570–2580.
 36. Monaghan, J.J., Gingold, R.A. (1983). Shock simulation by the particle method SPH. *Journal of Computational Physics*, 52(2), 374–389.
 37. Colagrossi, A., Landrini, M. (2003). Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 191(2), 448–475.
 38. Molteni, D., Colagrossi, A. (2009). A simple procedure to improve the pressure evaluation in hydrodynamic context using the SPH. *Computer Physics Communications*, 180(6), 861–872.
 39. Marrone, S., Antuono, M., Colagrossi, A., Colicchio, G., Touzé, D. Le, Graziani, G. (2011). δ -SPH model for simulating violent impact flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(13–16), 1526–1542.

40. Wang, P.P., Zhang, A.M., Meng, Z.F., Ming, F.R., Fang, X.L. (2021). A new type of WENO scheme in SPH for compressible flows with discontinuities. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 381, 113770.
41. Meng, Z.F., Wang, P.P., Zhang, A.M., Ming, F.R., Sun, P.N. (2020). A multiphase SPH model based on Roe's approximate Riemann solver for hydraulic flows with complex interface. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 365, 112999.
42. Parshikov, A.N., Medin, S.A. (2002). Smoothed Particle Hydrodynamics Using Interparticle Contact Algorithms. *Journal of Computational Physics*, 180(1), 358–382.
43. Parshikov, A.N., Medin, S.A., Loukashenko, I.I., Milekhin, V.A. (2000). Improvements in SPH method by means of interparticle contact algorithm and analysis of perforation tests at moderate projectile velocities. *International Journal of Impact Engineering*, 24(8), 779–796.
44. Yang, Q., Xu, F., Yang, Y., Wang, L. (2020). A multi-phase SPH model based on Riemann solvers for simulation of jet breakup. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 111, 134–147.
45. Meng, Z.-F., Zhang, A.-M., Wang, P.-P., Ming, F.-R., Khoo, B.C. (2022). A targeted essentially non-oscillatory (TEN0) SPH method and its applications in hydrodynamics. *Ocean Engineering*, 243, 110100.
46. Fang, X.L., Ming, F.R., Wang, P.P., Meng, Z.F., Zhang, A.M. (2022). Application of multiphase Riemann-SPH in analysis of air-cushion effect and slamming load in water entry. *Ocean Engineering*, 248, 110789.
47. Gray, J.P., Monaghan, J.J., Swift, R.P. (2001). SPH elastic dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(49–50), 6641–6662.
48. Libersky, L.D., Petschek, A.G., Carney, T.C., Hipp, J.R., Allahdadi, F.A. (1993). High Strain Lagrangian Hydrodynamics: A Three-Dimensional SPH Code for Dynamic Material Response. *Journal of Computational Physics*, 109(1), 67–75.
49. Belytschko, T., Guo, Y., Liu, W.K., Xiao, S.P. (2000). A unified stability analysis of meshless particle methods. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48(9), 1359–1400.
50. Vignjevic, R., Reveles, J.R., Campbell, J. (2006). SPH in a total lagrangian formalism. *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 14(3), 181–198.
51. O'Connor, J., Rogers, B.D. (2021). A Fluid-Structure Interaction Model for Free-Surface Flows and Flexible Structures using Smoothed Particle Hydrodynamics on a GPU. *Journal of Fluids and Structures*, 104, 103312.
52. Ganzenmüller, G.C. (2015). An hourglass control algorithm for Lagrangian Smooth Particle Hydrodynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 286, 87–106.

53. Leroch, S., Varga, M., Eder, S.J., Vernes, A., Rodriguez Ripoll, M., Ganzenmüller, G. (2016). Smooth particle hydrodynamics simulation of damage induced by a spherical indenter scratching a viscoplastic material. *International Journal of Solids and Structures*, 81, 188–202.
54. Ganzenmüller, G.C., Sauer, M., May, M., Hiermaier, S. (2016). Hourglass control for Smooth Particle Hydrodynamics removes tensile and rank-deficiency instabilities: Hourglass control for SPH. *European Physical Journal: Special Topics*, 225(2), 385–395.
55. Islam, M.R.I., Peng, C. (2019). A Total Lagrangian SPH method for modelling damage and failure in solids. *International Journal of Mechanical Sciences*, 157–158, 498–511.
56. Lin, J., Naceur, H., Coutellier, D., Laksimi, A. (2014). Efficient meshless SPH method for the numerical modeling of thick shell structures undergoing large deformations. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 65, 1–13.
57. Islam, M.R.I., Zhang, W., Peng, C. (2022). Large deformation analysis of geomaterials using stabilized total Lagrangian smoothed particle hydrodynamics. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 136, 252–265.
58. Yang, Q., Jones, V., McCue, L. (2012). Free-surface flow interactions with deformable structures using an SPH–FEM model. *Ocean Engineering*, 55, 136–147.
59. Yilmaz, A., Kocaman, S., Demirci, M. (2021). Numerical modeling of the dam-break wave impact on elastic sluice gate: A new benchmark case for hydroelasticity problems. *Ocean Engineering*, 231, 108870.
60. Fourey, G., Hermange, C., Le Touzé, D., Oger, G. (2017). An efficient FSI coupling strategy between Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element methods. *Computer Physics Communications*, 217, 66–81.
61. Hu, D., Long, T., Xiao, Y., Han, X., Gu, Y. (2014). Fluid-structure interaction analysis by coupled FE-SPH model based on a novel searching algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 276, 266–286.
62. Li, Z., Leduc, J., Nunez-Ramirez, J., Combescure, A., Marongiu, J.C. (2015). A non-intrusive partitioned approach to couple smoothed particle hydrodynamics and finite element methods for transient fluid-structure interaction problems with large interface motion. *Computational Mechanics*, 55(4), 697–718.
63. Yao, X., Zhang, X., Huang, D. (2022). An improved SPH-FEM coupling approach for modeling fluid – structure interaction problems. *Computational Particle Mechanics*, 10(2), 313–330.
64. Wu, K., Yang, D., Wright, N. (2016). A coupled SPH-DEM model for fluid-structure interaction problems with free-surface flow and structural failure. *Computers and Structures*, 177, 141–161.
65. Dai, Z., Xie, J., Jiang, M. (2023). A coupled peridynamics–smoothed particle hydrodynamics model for fracture analysis of fluid–structure interactions. *Ocean*

- Engineering*, 279.
66. Yao, X., Huang, D. (2022). Coupled PD-SPH modeling for fluid-structure interaction problems with large deformation and fracturing. *Computers and Structures*, 270, 106847.
 67. Rahimi, M.N., Kolukisa, D.C., Yildiz, M., Ozbulut, M., Kefal, A. (2022). A generalized hybrid smoothed particle hydrodynamics–peridynamics algorithm with a novel Lagrangian mapping for solution and failure analysis of fluid–structure interaction problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 389, 114370.
 68. Ng, K.C., Low, W.C., Chen, H., Tafuni, A., Nakayama, A. (2022). A three-dimensional fluid-structure interaction model based on SPH and lattice-spring method for simulating complex hydroelastic problems. *Ocean Engineering*, 260, 112026.
 69. Peng, Y.X., Zhang, A.M., Wang, S.P. (2021). Coupling of WCSPH and RKPM for the simulation of incompressible fluid–structure interactions. *Journal of Fluids and Structures*, 102, 103254.
 70. Capasso, S., Tagliaferro, B., Martínez-Estévez, I., Domínguez, J.M., Crespo, A.J.C., Viccione, G. (2022). A DEM approach for simulating flexible beam elements with the Project Chrono core module in DualSPHysics. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 969–985.
 71. Oger, G., Guilcher, P.-M., Jacquin, E., Brosset, L., Deuff, J.-B., Touzé, D. Le (2010). Simulations of hydro-elastic impacts using a parallel SPH model. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 20(3), 181–189.
 72. Rafiee, A., Thiagarajan, K.P. (2009). An SPH projection method for simulating fluid-hypoelastic structure interaction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(33–36), 2785–2795.
 73. Khayyer, A., Gotoh, H., Shimizu, Y., Nishijima, Y. (2021). A 3D Lagrangian meshfree projection-based solver for hydroelastic Fluid–Structure Interactions. *Journal of Fluids and Structures*, 105, 103342.
 74. He, J., Tofighi, N., Yildiz, M., Lei, J., Suleman, A. (2017). A coupled WC-TL SPH method for simulation of hydroelastic problems. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 31(3), 174–187.
 75. Sun, P.N., Touzé, D. Le, Zhang, A.M. (2019). Study of a complex fluid-structure dam-breaking benchmark problem using a multi-phase SPH method with APR. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 104, 240–258.
 76. Antuono, M., Colagrossi, A., Marrone, S., Molteni, D. (2010). Free-surface flows solved by means of SPH schemes with numerical diffusive terms. *Computer Physics Communications*, 181(3), 532–549.
 77. Domínguez, J.M., Fourtakas, G., Altomare, C., Canelas, R.B., Tafuni, A., García-Feal, O., Martínez-Estévez, I., Mokos, A., Vacondio, R., Crespo, A.J.C., Rogers, B.D., Stansby, P.K., Gómez-Gesteira, M. (2022). DualSPHysics: from fluid dynamics

- to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 867–895.
78. Lyu, H.-G., Sun, P.-N., Huang, X.-T., Chen, S.-H., Zhang, A.-M. (2021). On removing the numerical instability induced by negative pressures in SPH simulations of typical fluid–structure interaction problems in ocean engineering. *Applied Ocean Research*, 117, 102938.
 79. Sun, P.N., Touzé, D. Le, Oger, G., Zhang, A.M. (2021). An accurate FSI-SPH modeling of challenging fluid-structure interaction problems in two and three dimensions. *Ocean Engineering*, 221.
 80. Yilmaz, A., Kocaman, S., Demirci, M. (2023). Coupling of stabilized total Lagrangian and weakly compressible SPH models for challenging fluid–elastic structure interaction problems. *Computational Particle Mechanics*, 10(6), 1811–1825.
 81. Xue, B., Wang, S., Peng, Y., Zhang, A. (2022). A novel coupled Riemann SPH–RKPM model for the simulation of weakly compressible fluid–structure interaction problems. *Ocean Engineering*, 266(P1), 112447.
 82. Zhang, C., Rezavand, M., Hu, X. (2021). A multi-resolution SPH method for fluid-structure interactions. *Journal of Computational Physics*, 429, 110028.
 83. Ren, Y., Khayyer, A., Lin, P., Hu, X. (2023). Numerical modeling of sloshing flow interaction with an elastic baffle using SPHinXsys. *Ocean Engineering*, 267, 113110.
 84. Meng, Z.-F., Zhang, A.-M., Yan, J.-L., Wang, P.-P., Khayyer, A. (2022). A hydroelastic fluid–structure interaction solver based on the Riemann-SPH method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 390, 114522.
 85. Crespo, A.C., Dominguez, J.M., Barreiro, A., Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D. (2011). GPUs, a new tool of acceleration in CFD: Efficiency and reliability on smoothed particle hydrodynamics methods. *PLoS ONE*, 6(6).
 86. Crespo, A.J.C., Domínguez, J.M., Rogers, B.D., Gómez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R., Vacondio, R., Barreiro, A., García-Feal, O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computer Physics Communications*, 187, 204–216.
 87. Khayyer, A., Shimizu, Y., Gotoh, H., Hattori, S. (2021). Multi-resolution ISPH-SPH for accurate and efficient simulation of hydroelastic fluid-structure interactions in ocean engineering. *Ocean Engineering*, 226, 108652.
 88. Khayyer, A., Tsuruta, N., Shimizu, Y., Gotoh, H. (2019). Multi-resolution MPS for incompressible fluid-elastic structure interactions in ocean engineering. *Applied Ocean Research*, 82, 397–414.
 89. Chiron, L., Oger, G., Leffe, M. de, Touzé, D. Le (2018). Analysis and improvements of Adaptive Particle Refinement (APR) through CPU time, accuracy and robustness considerations. *Journal of Computational Physics*, 354, 552–575.
 90. Gao, T., Qiu, H., Fu, L. (2022). A Block-based Adaptive Particle Refinement SPH Method for Fluid-Structure Interaction Problems. *Computer Methods in Applied*

- Mechanics and Engineering*, 399, 115356.
91. Ng, K.C., Alexiadis, A., Ng, Y.L. (2022). An improved particle method for simulating Fluid-Structure Interactions: The multi-resolution SPH-VCPM approach. *Ocean Engineering*, 247, 110779.
 92. Roe, P.L. (1997). Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes. *Journal of Computational Physics*, 135(2), 250–258.
 93. Lin, J., Naceur, H., Coutellier, D., Laksimi, A. (2015). Geometrically nonlinear analysis of two-dimensional structures using an improved smoothed particle hydrodynamics method. *Engineering Computations*, 32(3), 779–805.
 94. Landau, L.D., Lifshitz, E.. (1986). *Theory of Elasticity: Volume 7*. Oxford: Pergamon Press.
 95. Fourey, G., Hermange, C., Le Touzé, D., Oger, G. (2017). An efficient FSI coupling strategy between Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element methods. *Computer Physics Communications*, 217, 66–81.
 96. Fourey, G. (2012). Développement D'Une Méthode de Couplage Fluide-Structure SPH- Eléments Finis En Vue de Son Application à L'Hydrodynamique Navale (Ph.D. thesis). *Ecole Centrale de Nantes*.
 97. Yilmaz, A. (2019). Akışkan-Yapı Etkileşimi Problemlerinin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Iskenderun Technical University*, Hatay.
 98. Liu, M.B., Liu, G.R. (2010). Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(1), 25–76.
 99. Dutra Fraga Filho, C.A. (2019). *Smoothed Particle Hydrodynamics Fundamentals and Basic Applications in Continuum Mechanics*. Springer International Publishing.
 100. Monaghan, J.J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 30, 543–574.
 101. Macia, F., Antuono, M., Colagrossi, A. (2011). Benefits of using a Wendland Kernel for free-surface flows. 6th ERCOFTAC SPHERIC workshop on SPH applications.
 102. Wendland, H. (1995). Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in Computational Mathematics*, 4, 389–396.
 103. Batchelor, G.K. (1974). *An Introduction to Fluid Mechanics*. UK: Cambridge University Press.
 104. Zhang, A. man, Sun, P. nan, Ming, F. ren, Colagrossi, A. (2017). Smoothed particle hydrodynamics and its applications in fluid-structure interactions. *Journal of Hydrodynamics 2017 29:2*, 29(2), 187–216.
 105. Yang, Q., Xu, F., Yang, Y., Wang, J. (2020). Two-phase SPH model based on an

- improved Riemann solver for water entry problems. *Ocean Engineering*, 199, 107039.
106. Puri, K., Ramachandran, P. (2014). Approximate Riemann solvers for the Godunov SPH (GSPH). *Journal of Computational Physics*, 270, 432–458.
 107. Randles, P.W., Libersky, L.D. (1996). Smoothed Particle Hydrodynamics: Some recent improvements and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139(1–4), 375–408.
 108. Wu, D., Zhang, C., Tang, X., Hu, X. (2023). An essentially non-hourglass formulation for total Lagrangian smoothed particle hydrodynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 407, 115915.
 109. Adami, S., Hu, X.Y., Adams, N.A. (2012). A generalized wall boundary condition for smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 231(21), 7057–7075.
 110. Hermange, C., Oger, G., Chenadec, Y. Le, Touzé, D. Le (2019). A 3D SPH–FE coupling for FSI problems and its application to tire hydroplaning simulations on rough ground. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 355, 558–590.
 111. Leimkuhler, B.J., Reich, S., Skeel, R.D. (1996). *Integration Methods for Molecular Dynamics* (Springer). New York, NY: 161–185.
 112. Green, M.D., Vacondio, R., Peiró, J. (2019). A smoothed particle hydrodynamics numerical scheme with a consistent diffusion term for the continuity equation. *Computers & Fluids*, 179, 632–644.
 113. Zhang, C., Rezavand, M., Zhu, Y., Yu, Y., Wu, D., Zhang, W., Wang, J., Hu, X. (2021). SPHinXsys: An open-source multi-physics and multi-resolution library based on smoothed particle hydrodynamics. *Computer Physics Communications*, 267, 108066.
 114. Domínguez, J.M., Crespo, A.J.C., Gómez-Gesteira, M., Marongiu, J.C. (2011). Neighbour lists in smoothed particle hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 67(12), 2026–2042.
 115. Domínguez, J.M. (2014). DualSPHysics: Towards High Performance Computing using SPH technique, PhD Thesis, *Universidade de Vigo*, España.
 116. Domínguez, J.M., Crespo, A.J.C., Gómez-Gesteira, M. (2013). Optimization strategies for CPU and GPU implementations of a smoothed particle hydrodynamics method. *Computer Physics Communications*, 184(3), 617–627.
 117. Canelas, R.B., Brito, M., Feal, O.G., Domínguez, J.M., Crespo, A.J.C. (2018). Extending DualSPHysics with a Differential Variational Inequality: modeling fluid-mechanism interaction. *Applied Ocean Research*, 76, 88–97.
 118. Ozmen-Cagatay, H., Kocaman, S., Guzel, H. (2014). Investigation of dam-break flood waves in a dry channel with a hump. *Journal of Hydro-Environment Research*,

- 8(3), 304–315.
119. Ozmen-Cagatay, H., Kocaman, S. (2011). Dam-break flow in the presence of obstacle: Experiment and CFD simulation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(4), 541–552.
 120. Ozmen-Cagatay, H., Kocaman, S. (2012). Investigation of dam-break flow over abruptly contracting channel with trapezoidal-shaped lateral obstacles. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 134(8).
 121. Kocaman, S. (2007). Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
 122. Kocaman, S., Ozmen-Cagatay, H. (2015). Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall. *Journal of Hydrology*, 525, 1–12.
 123. Kocaman, S., Ozmen-Cagatay, H. (2012). The effect of lateral channel contraction on dam break flows: Laboratory experiment. *Journal of Hydrology*, 432–433, 145–153.
 124. Dal, K. (2018). Eğimli kanalda ardışık baraj yıkılmasının deneysel ve sayısal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay.
 125. Erdoğan, B. (2018). Dikdörtgen tank içerisindeki çalkantı hareketinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay.



EKLER

EK-1. Geliştirilen numerik koda ait bazı kernel fonksiyonlarının sadeleştirilmiş özetleri

```

__global__ void time_integration_symplectic1(...)
{
    int i = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x;

    if (i < Nf)
    {
        double2 corl = devfpvec[i].cor;
        float4 velrhopl = devfpvec[i].velrhop;
        float3 gradvelrhol = devfpvec[i].gradvelrho;

        devfpvec[i].precor = corl;
        devfpvec[i].prevelrho = { velrhopl.x, velrhopl.y, velrhopl.z };

        devfpvec[i].cor.x = corl.x + 0.5 * dt * velrhopl.x;
        devfpvec[i].cor.y = corl.y + 0.5 * dt * velrhopl.y;

        devfpvec[i].velrhop.x = velrhopl.x + 0.5f * dt * gradvelrhol.x;
        devfpvec[i].velrhop.y = velrhopl.y + 0.5f * dt * gradvelrhol.y;

        devfpvec[i].velrhop.z = velrhopl.z + 0.5f * dt * gradvelrhol.z;
        devfpvec[i].calcpresurefromrho(B, rho0fluid, gamma);
    }
}

```

Şekil 1.1. Simplektik zaman integrasyon şeması ile akışkan parçacıklarının tahmin fazı güncellemesi

```

__global__ void time_integration_symplectic2(...)
{
    int i = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x;

    if (i < Nf)
    {
        double2 precorl = devfpvec[i].precor;
        float3 prevelrhol = devfpvec[i].prevelrho;
        float4 velrhopl = devfpvec[i].velrhop;
        float3 gradvelrhol = devfpvec[i].gradvelrho;

        devfpvec[i].velrhop.x = prevelrhol.x + dt * gradvelrhol.x;
        devfpvec[i].velrhop.y = prevelrhol.y + dt * gradvelrhol.y;

        devfpvec[i].cor.x = precorl.x + dt * 0.5 * (devfpvec[i].velrhop.x + prevelrhol.x);
        devfpvec[i].cor.y = precorl.y + dt * 0.5 * (devfpvec[i].velrhop.y + prevelrhol.y);

        float eps = -(gradvelrhol.z / velrhopl.z) * dt;
        devfpvec[i].velrhop.z = prevelrhol.z * (2.f - eps) / (2.f + eps);
        devfpvec[i].calcpresurefromrho(B, rho0fluid, gamma);
    }
}

```

Şekil 1.2. Simplektik zaman integrasyon şeması ile akışkan parçacıklarının düzeltme fazı güncellemesi

```

__global__ void time_integration_onestep_solid(...)
{
    int i = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x;

    if (i < Ns)
    {
        double2 corl = devspvec[i].cor;
        float4 velrhopl = devspvec[i].velrhop;
        float2 gradvell = devspvec[i].gradvel;

        devspvec[i].velrhop.x = velrhopl.x + dt * gradvell.x;
        devspvec[i].velrhop.y = velrhopl.y + dt * gradvell.y;

        devspvec[i].cor.x = corl.x + dt * devspvec[i].velrhop.x;
        devspvec[i].cor.y = corl.y + dt * devspvec[i].velrhop.y;
    }
}

```

Şekil 1.3. Yarı-Örtük Euler zaman integrasyon şeması ile katı parçacıklarının zaman adımı güncellemesi

```

for (int j = startindex; j < endindex; j++)
{
    double2 cor2 = devfpvecsorted[j].cor;

    float rx = cor1.x - cor2.x;
    float ry = cor1.y - cor2.y;
    float rr2 = rx * rx + ry * ry;
    float rr = sqrtf(rr2);
    float q = rr / h;

    if (q > 1e-12 && q < 2.0)
    {
        float4 velrhop2 = devfpvecsorted[j].velrhop;

        float rho1 = velrhopl.z;
        float rho2 = velrhop2.z;
        float P1 = velrhopl.w;
        float P2 = velrhop2.w;

        float ex = -rx / rr;
        float ey = -ry / rr;
        float UL = velrhopl.x * ex + velrhopl.y * ry;
        float UR = velrhop2.x * ex + velrhop2.y * ry;
        float S = (cf * rho1 * sqrtf(rho1) + cf * rho2 * sqrtf(rho2)) / (sqrtf(rho1) + sqrtf(rho2));
        float harmonic_avg_rho = (2.f * rho1 * rho2) / (rho1 + rho2);

        float maxU = fmaxf(harmonic_avg_rho * (UL - UR), 0.f);
        float fi = fminf(eta * maxU, S);

        float Ustar = 0.5f * (UL + UR + (1.f / S) * (P1 - P2));
        float Pstar = 0.5f * (P1 + P2 + fi * (UL - UR));
        float vstarx = Ustar * ex + (0.5f * (velrhopl.x + velrhop2.x) - 0.5f * (UL + UR) * ex);
        float vstary = Ustar * ey + (0.5f * (velrhopl.y + velrhop2.y) - 0.5f * (UL + UR) * ey);

        float gradw = calc_grad_w(rr, q, h);
        float dvel = momentum_eq_riemann(Pstar, rho1, rho2, mass, gradw);

        sumdvelx += (dvel * rx);
        sumdvely += (dvel * ry);
        sumdrho += continuity_eq_riemann(rho1, mass, rho2, velrhopl.x, vstarx, velrhopl.y, vstary, rx, ry, gradw);
    }
}

```

Şekil 1.4. Akışkan-akışkan parçacık etkileşimi

```

for (int j = startindex; j < endindex; j++)
{
    double2 cor2 = devspvecsorted[j].cor;

    float rx = cor1.x - cor2.x;
    float ry = cor1.y - cor2.y;
    float rr2 = rx * rx + ry * ry;
    float rr = sqrtf(rr2);
    float q = rr / h;

    if (q > 1e-12 && q < 2.0)
    {
        float4 velrhop2 = devspvecsorted[j].velrhop;

        float vrx = velrhopl.x - velrhop2.x;
        float vry = velrhopl.y - velrhop2.y;
        float rho1 = velrhopl.z;
        float rho2 = velrhop2.z;
        float P1 = velrhopl.w;
        float P2 = velrhop2.w;

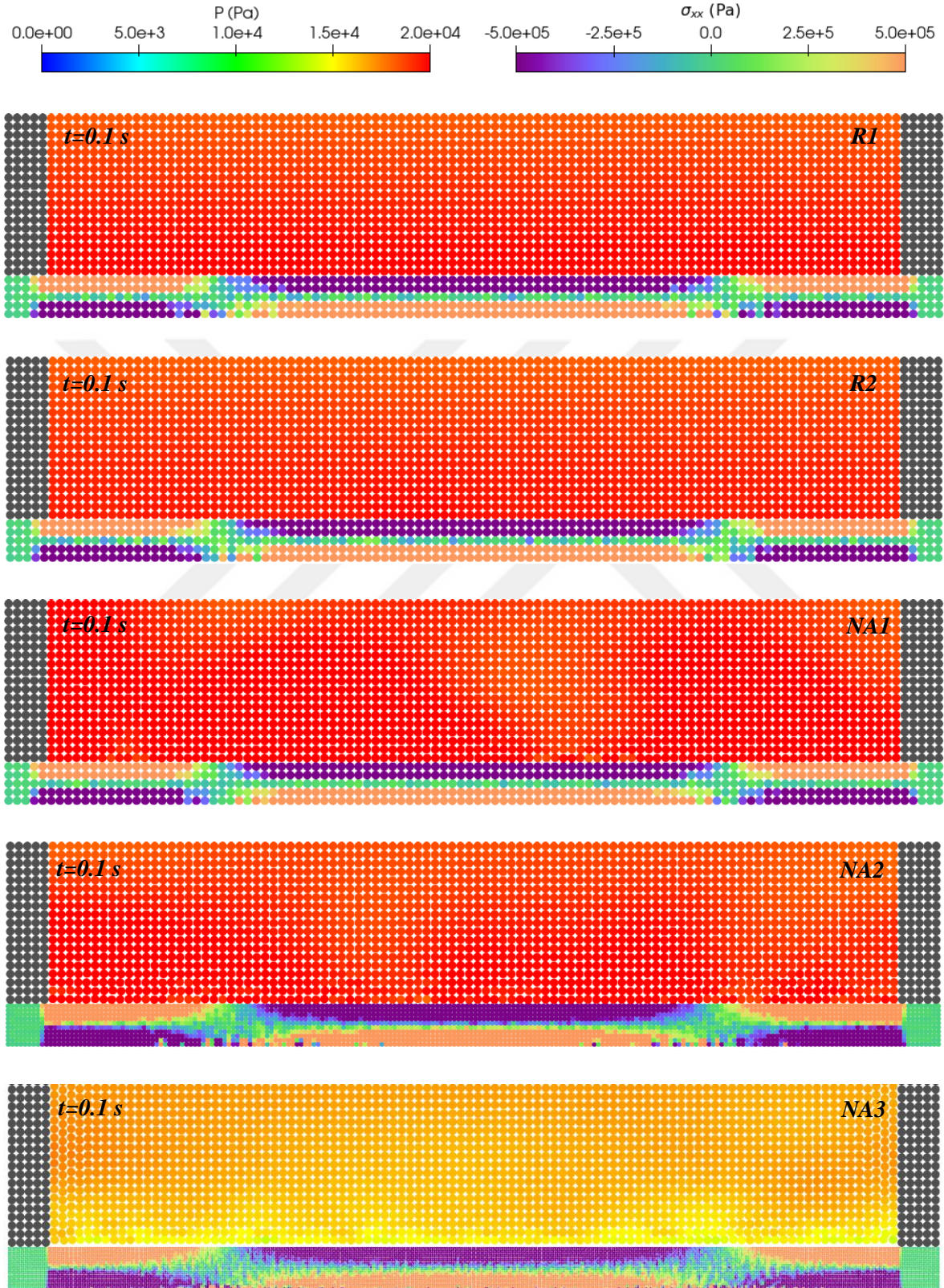
        float gradw = calc_grad_w(rr, q, h);
        float dvel = momentum_eq(massoliddummy, P1, P2, rho1, rho2, 0.f, gradw);

        sumdvelx += (dvel * rx);
        sumdvely += (dvel * ry);
        sumdrho += continuity_eq(massoliddummy, rho1, rho2, vrx, vry, rx, ry, gradw);
    }
}

```

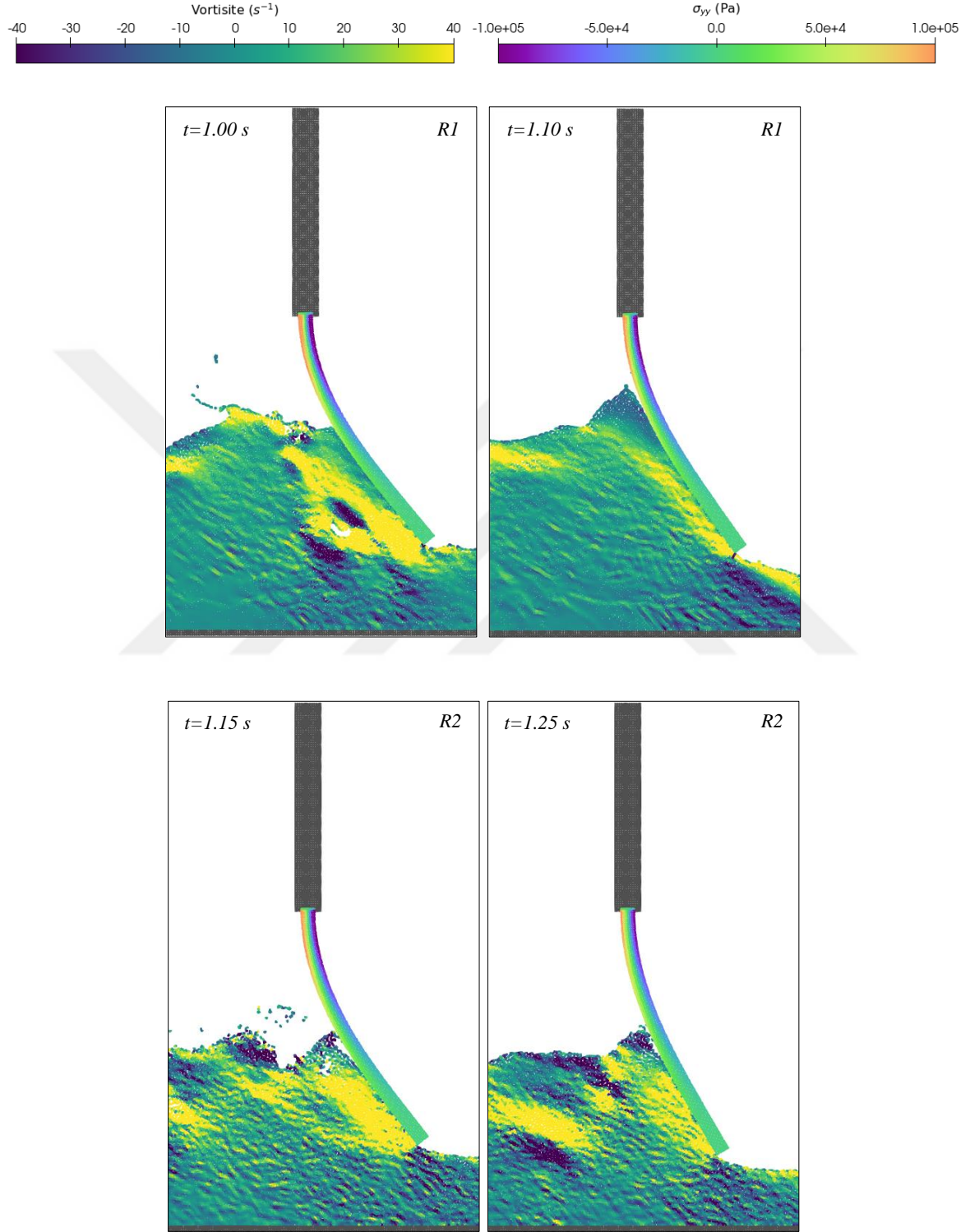
Şekil 1.5. Akışkan-katı parçacık etkileşimi

EK-2. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminde katı alan için yapay viskozite teriminin kullanılmadığı analiz sonuçları

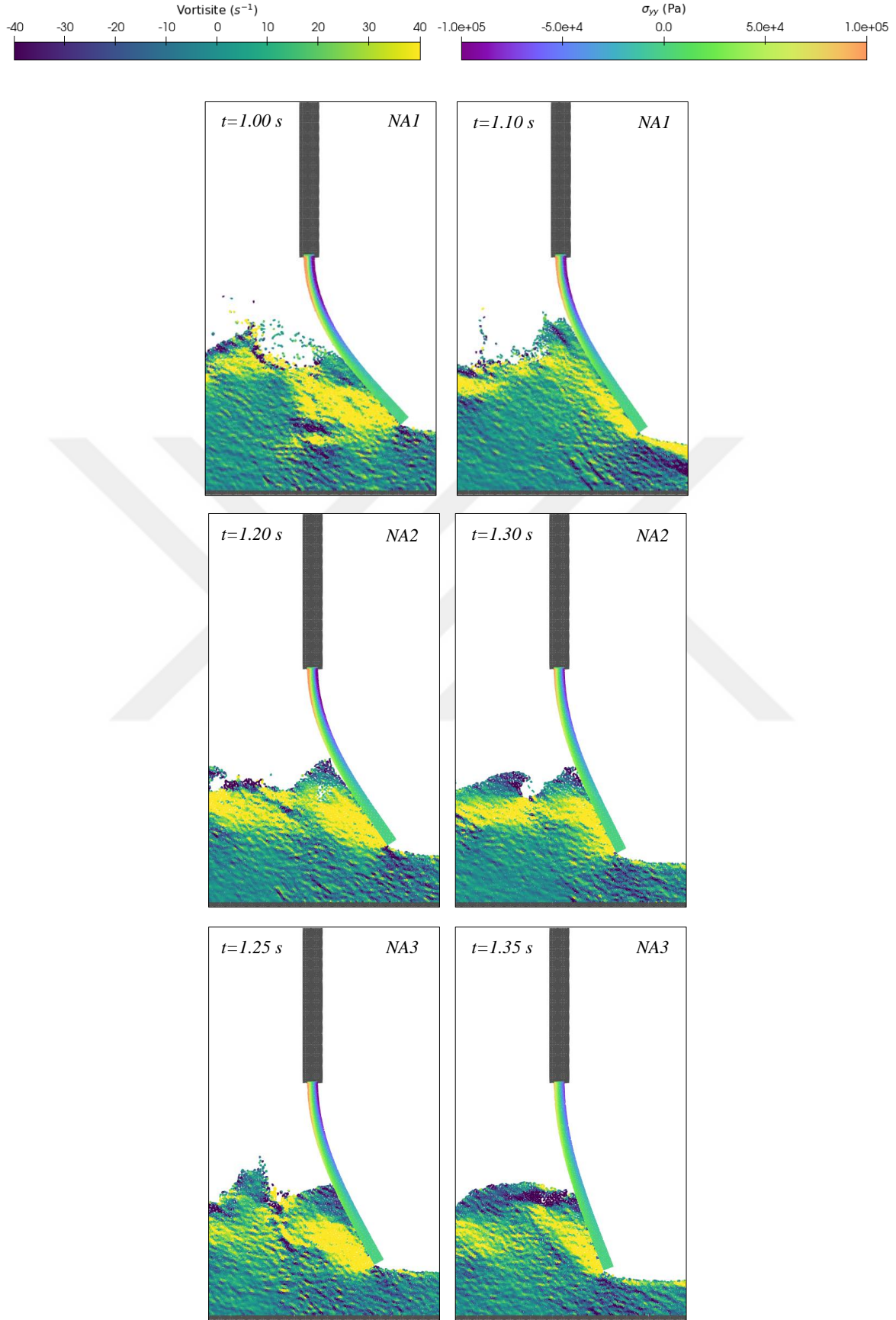


Şekil 2.1. Elastik bir plaka üzerindeki durağan su kütlesi probleminde $\alpha^s=0$ için yaşanan gerilme gürültüsü ve akışkan-katı arayüzey kararlılık problemleri

EK-3. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin analizlerinde vortisite gelişimi



Şekil 3.1. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin analizlerinde vortisite gelişimi



Şekil 3.1. Kuru bir yatak üzerindeki baraj yıkılması akımının elastik bir kapak ile etkileşimi probleminin analizlerinde vortisite gelişimi (devamı)

DİZİN

A

Ara durum · 18, 91
 Ağ esaslı · 1, 5
 Ağırlık fonksiyonu · 3, 4, 5, 10,
 11, 12, 13, 15, 22, 23, 25, 35,
 36, 40

B

Basınç · 2, 3, 5, 14, 15, 17, 25, 26,
 40, 42, 63, 66, 71, 72, 77, 79,
 84, 85, 93, 94, 95
 Bütünsel Lagrange · 3

D

Dirac · 10

E

Elastisite modülü · 21, 48, 49, 54,
 61, 68, 73, 74, 75

F

Frekans · 54, 58

G

GPU · 4
 Grafik İşlemci Birimi · 4, 5

İ

İnterpolasyon uzunluğu · 10, 19,
 24, 25, 37, 54, 63, 69, 72, 76,
 77, 83, 94

K

Kum saati · 4, 5, 7, 9, 23, 24, 53,
 54, 63, 69, 76, 83, 92, 93

M

Matris · 21, 22, 40, 46

P

Poisson · 2, 21, 54, 61, 68, 75

T

Tensör · 20, 21, 22

Y

Yapay viskozite · 3, 4, 5, 7, 9, 15,
 16, 19, 23, 24, 53, 54, 63, 69,
 72, 76, 83, 92, 93, 95



TEKNOVERSİTE



teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

