İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ BOYUTLU YALPA HAREKETİNDEKİ HİDRODİNAMİK KATSAYILARIN İNTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

DOKTORA TEZİ

Onur ÖLMEZ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

EYLÜL 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ BOYUTLU YALPA HAREKETİNDEKİ HİDRODİNAMİK KATSAYILARIN İNTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

DOKTORA TEZİ

Onur ÖLMEZ
(508092004)

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ömer GÖREN

EYLÜL 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508092004 numaralı Doktora Öğrencisi Onur ÖLMEZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "İKİ BOYUTLU YALPA HAREKETİNDEKİ HİDRODİNAMİK KATSAYILARIN İNTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Ömer GÖREN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Şakir BAL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Kadir SARIÖZ İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Mehmet YILDIZ Sabancı Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Fahri ÇELİK Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 14 Temmuz 2016
Savunma Tarihi : 27 Eylül 2016

Eşim, kızım ve aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezde danışman hocam olarak beni yönlendiren, umutsuzluğa düştüğüm durumlarda bana yol göstererek cesaretlendiren ve engin hidrodinamik bilgisi ile her görüştüğümüzde bana mesleki olarak katkı sağlayan hocam Dr. Ömer GÖREN'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Aradan geçen 6.5 yıl sonunda, sanayide çalışarak doktora yapmanın çok zor olduğunu defaatle neden söylediğini daha iyi anlıyor ve kendisine bu sureçte beni yalnız bırakmadığı için müteşekkir olduğumu ifade etmek istiyorum.

6.5 yıl süren bu meşakkatli yolda bana olan inancını kaybetmeyen, İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği konusundaki derin deneyimi ile yaptığım hataları daha ilk bakışta tespit eden ve tatlı sert tavrıyla motivasyonumu bir şekilde üst seviyede tutmayı başaran sayın hocam Dr. Mehmet YILDIZ'a teşekkür ederim.

Doktora tez izleme komitesinde yer alan, bu tez dışından yaptığım çalışmalar için dahi bana yol gösteren, kendisine danıştığım her konuda bilgi ve tecrübeye sahip sayın hocam Dr. Kadir SARIÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Hem damdan düşen, hem de doktor olan bir arkadaşa sahip olmanın ne kadar büyük bir şans olduğunu ve kendisinin katkısını, desteğini tam manası ile ifade etmenin ne kadar zor olduğunu söylemek istediğim değerli arkadaşım Dr. Murat ÖZBULUT'a içtenlikle teşekkür ederim.

Literatür taraması esnasında ve analizlerin yapılmasında elinde bulunan imkanları hiç tereddütsüz olarak benimle paylaşan Dr. Tufan ARSLAN'a değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Eğitim ve öğrenim hayatım boyunca beni destekleyen, her zaman yanımda olan anneme, babama ve son olarak doktora sürecinde beni her zaman anlayışla karşılayıp sabırla bu sürecin sona ermesini bekleyen sevgili eşim ve biricik kızıma teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2016

Onur Ölmez
(Gemi İnşaatı Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ... **vii**
İÇİNDEKİLER ... **ix**
KISALTMALAR ... **xi**
SEMBOLLER ... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ... **xvii**
ÖZET ... **xix**
SUMMARY ... **xxiii**
1. GİRİŞ ... **1**
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı ... 6
1.2 Özgün Değer ... 7
2. LİTERATÜR TARAMASI ... **9**
2.1 Yalpa Hareketi ile İlgili Çalışmalar ... 10
2.1.1 Analitik çalışmalar ... 11
2.1.2 Deneysel çalışmalar ... 12
2.1.3 Sayısal çalışmalar ... 19
2.2 Ağsız Yöntemler ve İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği ile İlgili Çalışmalar ... 21
2.2.1 Ağsız yöntemler ... 22
2.2.2 İnterpolasyonlu parçacık hidrodinamiği ... 24
3. İNTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİNİN UYGULANMASI ... **27**
3.1 Çekirdek/Ağırlık Yaklaşımı ... 27
3.2 Parçacık Yaklaşımı ... 30
3.3 Ağırlık Fonksiyonu ... 32
3.4 İPH Yönteminde Hata ... 36
3.5 Sınır Koşulları ... 38
3.5.1 Katı sınır koşulları ... 39
3.5.2 Cisim sınır koşulları ... 44
3.5.3 Serbest su yüzeyi sınır koşulu ... 46
3.6 Zaman İntegrasyonu ve Stabilite Koşulu ... 46
3.7 Etkileşime Girecek Parçacık Tespiti ... 48
4. İPH YÖNTEMİ İLE SAYISAL ÇÖZÜM GELİŞTİRİLMESİ ... **49**
4.1 Akışkan Denklemlerinin İfade Edilişi ... 49
4.2 Sayısal Düzeltme Algoritmaları ... 54
4.2.1 Yoğunluk düzeltmesi ... 54
4.2.2 XSPH hız varyantı ... 55
4.2.3 Yapay parçacık ötelemesi ... 56
4.2.4 Bileşik serbest su yüzeyi ve parçacık ötelemesi düzeltmesi ... 56
4.2.5 Parçacık paketleme algoritması ... 57

4.3 Geliştirilen Bilgisayar Programına Ait Algoritma 63
5. YALPA PROBLEMİNİN İPH YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ 67
5.1 Hidrostatik Doğrulama 70
5.2 Hidrodinamik Moment Doğrulaması 75
5.3 Hidrodinamik Katsayıların Doğrulaması 80
5.4 Girdaplılık Doğrulaması 83
5.5 Serbest Su Yüzeyi Dalgalarının Doğrulaması 89
6. DUYARLILIK ANALİZLERİ 93
6.1 Parçacık Mesafesi Duyarlılığı 93
6.2 Zaman Adımı Duyarlılığı 94
6.3 Problem Geometrisi Duyarlılığı 95
7. SONUÇLAR 97
KAYNAKLAR 101
ÖZGEÇMİŞ 109

KISALTMALAR

BNM : Boundary Node Method
BPIM : Boundary Point Interpolation Method
BRPIM : Boundary Radial Point Interpolation Method
CFD : Computational Fluid Dynamics
CSPM : Corrective Smoothed Particle Method
DSPH : Discontinuous Smoothed Particle Hydrodynamics
DVM : Discrete Vortex Method
EFG : Element-Free Galerkin
EOS : Equation of State
FDM : Finite Difference Method
FEM : Finite Element Method
FORTRAN : Formula Translation
FPM : Finite Particle Method
FPoM : Finite Point Method
FSRVM : Free Surface Random Vortex Method
FVM : Finite Volume Method
GB : Gigabyte
HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HBRPIM : Hybrid Boundary Radial Point Interpolation Method
ISPH : Incompressible SPH
İPH : İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği
LBIE : Local Boundary Integral Equation Method
LFPoM : Lagrangian Finite Point Method
LRPIM : Local Radial Point Interpolation Method
MAC : Marker and Cell Methodu
MFree : Mesh Free Method
MLPG : Meshless Local Petrov-Galerkin Method
MWS : Mesh Free Weak-Strong Form Method
PIM : Point Interpolation Method
PPA : Particle Packing Algorithm
PUFEM : Partition of Unity Finite Element Method
RAM : Random-Access Memory
RANS : Reynolds Averaged Navier Stokes
RPIM : Radial Point Interpolation Method
RVM : Random Vortex Method
SPH : Smoothed Particle Hydrodynamics
WCSPH : Weakly Compressible SPH
YPÖ : Yapay Parçacık Ötelemesi

SEMBOLLER

a_{66} : Yalpa hareketi ek su kütle atalet momenti (kgm^2)

$\bar{a}_{66}$: Yalpa hareketi boyutsuzlaştırılmış ek su kütle atalet momenti

B : Genişlik (m)

b : Yarı genişlik (m)

b_{66} : Yalpa hareketi sönüm moment katsayısı (kgm^2/s)

$\bar{b}_{66}$: Yalpa hareketi boyutsuzlaştırılmış sönüm moment katsayısı

c_0 : Referans ses hızı (m/s)

c_{66} : Geri getirme momenti katsayısı (kgm^2/s^2)

D_t : Başlangıç fonksiyonu

g : Yer çekimi ivmesi (m/s^2)

h : İnterpolasyon uzunluğu (m)

m : Kütle (kg)

M, M0 : Moment (Nm)

M^* : Boyutsuzlaştırılmış moment

$\vec{n}$: Yüzey normali

t : Zaman (s)

T : Periyot (s)

T^* : Su çekimi (m)

V : Hacim (m^3)

α_d : Ağırlık fonksiyonu katsayısı

Γ : Düzensizliğin ölçümü değişkeni

$\delta\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)$: Dirac delta fonksiyonu

δx_0 : Sönüm bölgesi uzunluğu (m)

κ : Ağırlık fonksiyonunun etkili olduğu mesafeyi belirleyen katsayı

ν : Kinematik viskozite (m^2/s)

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

τ : Kayma Gerilmesi (N/m^2)

φ : Yalpa açısı (rad)

φ_a : Yalpa genliği (rad)

ψ : Sönümleme katsayısı

Ω : Problem bölgesi

ω : Açısal frekans (rad/s)

ω_e : Karşılaşma dairesel frekansı (rad/s))

ω^* : Boyutsuzlaştırılmış açısal frekans

$W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)$: Ağırlık fonksiyonu

$\vec{w}$: Girdaplılık (1/s)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Yalpa sönümleme sistemlerinin seçim ve değelerlendirilmesine yönelik karşılaştırma. …….....……..…….……3
Çizelge 2.1: Ağsız yöntemlere ilişkin üç kategori. ……..……...….22
Çizelge 6.1: Farklı *dx* dağılımlarında boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayısı değerlerinin mukayesesi. ……....93
Çizelge 6.2: Farklı *dt* kullanımlarında boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayısı değerlerinin mukayesesi. ……94
Çizelge 6.3: Farklı havuz geometrilerinin kullanımlarında boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayısı değerlerinin mukayesesi. …….……...95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Gemi hareketleri. ……..…….……...…….....2
Şekil 2.1: B/T*=2 olan diktörgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen ek su kütle atalet momenti değerleri. …….....14
Şekil 2.2: B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen sönüm moment katsayısı değerleri. ……...……..……...……....15
Şekil 2.3: B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin ω^*=1.0'da φ_a = 0.1 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen boyutsuz momente ilişkin grafik. …….....……..……..16
Şekil 2.4: B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve φ_a = 0.1 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen ek su kütle atalet momenti değerleri. ...…….....17
Şekil 2.5: B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve φ_a = 0.1 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen sönüm moment katsayısı değerleri. .....…….17
Şekil 2.6: B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve φ_a = 0.2 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen ek su kütle atalet momenti değerleri. …….……...….18
Şekil 2.7: B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve φ_a = 0.2 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen sönüm moment katsayısı değerleri. ……...…….....18
Şekil 2.8: FEM ve Ağsız Yöntem ile bir parçanın temsili. …….....21
Şekil 3.1: Ağırlık fonsiyonun, Ω ile tanımlanmış problem bölgesi içerisindeki değişimi ve ağırlık fonksiyonu destek bölgesi teriminin gösterimi. ….....28
Şekil 3.2: Ağırlık fonsiyonun, Ω ile tanımlanmış problem bölgesinin sınırları ile kesişmesi durumunda kullanımı. ...….……..……...29
Şekil 3.3: Problem bölgesinin parçacıklara ayrıklaştırılması. ..…..…..……....31
Şekil 3.4: Lucy (1977) tarafından kullanılan çan şekilli ağırlık fonksiyonu ve türevi. ...…….……...…….…….……34
Şekil 3.5: Morris (1996a, 1996b) tarafından kullanılmış olan dördüncü dereceden ağırlık fonksiyonu ve türevi. ...……..……...…….……35
Şekil 3.6: Morris (1996a, 1996b) tarafından kullanılmış olan beşinci dereceden ağırlık fonksiyonu ve türevi. ……....…….……..….36
Şekil 3.7: Tezde kullanılan problem geometrilerine ilişkin gösterim. ....…….39
Şekil 3.8: Hayalet parçacıkların oluşturulması. ..…..…..…….....42

Şekil 3.9: Akışkan parçacıkları ve hayalet parçacıkların birbirlerine göre mevkileri ve hızlarının gösterimi. ...43
Şekil 3.10: Cisme ait parçacıkların döndürülme algoritması. 45
Şekil 3.11: Şekil 3.7a'te verilen problem geometrisinin parçacıklar ile ayrıklaştırılması ve cisim-akışkan komşuluğunun incelenmesi. 46
Şekil 4.1: Eksik parçacığın olduğu bölgeye doğru hareket eden parçacıklara ait hız vektörleri ve parçacık dağılımlarının zamana göre değişimi. 61
Şekil 4.2: Eğik bir havuzda parçacıkların dağılımı. 62
Şekil 4.3: Değişik zaman adımlarında akışkan parçacıklarındaki hız vektörlerinin ve akışkan parçacıklarının nihai konumlarının gösterimi. 62
Şekil 4.4: Geliştirilen bilgisayar programına ait algoritma. 66
Şekil 5.1: Dik sınırlı havuz uygulamasında sönüm bölgeleri. 67
Şekil 5.2: Yalpa açısının t / T oranına karşı grafiği. 69
Şekil 5.3: Dikdörtgen kesitli problem geometrisi ve parçacıklara atanmış başlangıç basınç değerleri. 70
Şekil 5.4: Dik sınırlı havuzda zaman içerisinde hidrostatik basıncın değişimi. 72
Şekil 5.5: Eğik sınırlı havuzda zaman içerisinde hidrostatik basıncın değişimi. 74
Şekil 5.6: Cismin hareketinde kullanılan eksen takımı ve yüzey normalleri. 75
Şekil 5.7: Hidrostatik durumda cisme etkiyen momentin zamana göre değişimi. 78
Şekil 5.8: İPH yöntemi ile elde edilmiş moment sonuçlarının diğer sayısal yöntem ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılması. 79
Şekil 5.9: Cismin yalpa açısı ve cisme etkiyen moment değerleri arasındaki faz farkının karşılaştırılması. 80
Şekil 5.10: φ_a = 0.1 radyan için ek su kütle atalet momenti değerleri. 81
Şekil 5.11: φ_a = 0.1 radyan için sönüm moment katsayısı değerleri. 82
Şekil 5.12: φ_a = 0.2 radyan için ek su kütle atalet momenti değerleri. 82
Şekil 5.13: φ_a = 0.2 radyan için sönüm moment katsayısı değerleri. 83
Şekil 5.14: ω^* = 0.3 ve t / T=10'da farklı yalpa genlikleri için girdaplılık sonuçları. 85
Şekil 5.15: ω^* = 0.3 ve t / T=10'da farklı yalpa genlikleri için akışkan parçacıklarına ait hız vektörleri. 86
Şekil 5.16: Ikeda ve diğ. (1978b) ve ITTC (2011)'de yer alan, cismin boyut parametrelerinin değişimine göre yalpa hareketi esnasında oluşan girdapların sayısı ve mevkileri. 87
Şekil 5.17: İPH Yöntemi ile elde edilen girdap sayısı ve mevkileri. 88
Şekil 5.18: φ_a =0.1 radyan T=0.573s'lik yalpa hareketinde oluşan dalgalar. 89
Şekil 5.19: φ_a = 0.2 radyan T=0.49 s'lik yalpa hareketinde oluşan dalgalar. 90

İKİ BOYUTLU YALPA HAREKETİNDEKİ HİDRODİNAMİK KATSAYILARIN İNTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

ÖZET

Su yüzeyinde salınım yapan cisimlerde meydana gelen hidrodinamik kuvvetlerin ve momentlerin tahmini için birçok analitik, deneysel ve sayısal çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada, sayısal yöntemlerden biri olan İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (Smoothed Particle Hydrodynamics) kullanılarak zorlanmış yalpa hareketi yapan ikiboyutlu dikdörtgen kesitli bir cisme etkiyen moment, ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayıları, cisim çevresinde oluşan girdaplılık ve cismin hareketi nedeni ile serbest su yüzeyinde oluşan dalgalar incelenmiş ve elde edilen sonuçların literatürde yer alan diğer sonuçlarla ile mukayesesi yapılmıştır. Ayrıca tez kapsamında elde edilen sonuçlar çeşitli duyarlılık analizlerine tabi tutularak oluşturulmuş olan İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (İPH) sayısal çözüm algoritmasının gürbüz (robust) olup olmadığı araştırılmıştır. İPH yönteminin uygulamasında değişik algoritmalar kullanılmakta olup, bu çalışma çerçevesinde geliştirilmiş bilgisayar programı temelde, Yapay Viskozite Terimi'ni (Artificial Viscosity Term) içeren Euler Hareket Denklemi ve Süreklilik Denklemini, Zayıf Olarak Sıkıştırılabilir İPH Yaklaşımı (WCSPH) yardımı ile çözmektedir.

İPH yöntemi ilk olarak 1970'li yılların sonlarında astrofizik problemlerinin çözümünde eş zamanlı olarak Monaghan ve Gingold (1977) ve Lucy (1977)tarafından kullanılmaya başlanmış, daha sonra akışkan ve katı cisim problemlerine uygulanmıştır. Bu yöntem, 1990'lı yıllardan sonra su altı patlaması, şok, bio-mekanik, çarpışma, çeşitli akışkan ve katı mekaniği problemlerinde kullanılmış olup günümüzde halen geliştirilmeye devam edilmektedir. İPH yöntemi, çözüm bölgesini oluşturan parçacıklarda yoğunluk, basınç, hız vb. kinematik ya da dinamik büyüklüklerinin zaman içerisindeki değişiminin takip edildiği Lagrange temelli bir yöntem olup ağsız yöntemlerden bir tanesidir. İPH formülasyonu kullanılarak oluşturulacak bir sayısal çözüm prosedüründe iki adet temel adım vardır. Bu adımlardan birincisi çekirdek/ağırlık yaklaşımı, ikincisi ise parçacık yaklaşımıdır. Bahsedilen yaklaşımlar birer cümle ile şu şekilde özetlenebilir.

- Çekirdek yaklaşımı; herhangi bir kinematik ya da dinamik büyüklüğün, çözüm bölgesi içerisinde dağıtılmış parçacıklara bir ağırlık fonksiyonu ile atanması,
- Parçacık yaklaşımı; çekirdek yaklaşımı yapılarak integral haline dönüştürülen fonksiyonun parçacıklara ayrıklaştırılarak bir toplam ile gösterilmesi,

Çekirdek/ağırlık yaklaşımı ve parçacık yaklaşımı uygulanmış olan Süreklilik ve Euler denklemlerine WCSPH yaklaşımı yapılmıştır. İPH sayısal yöntemi ile geliştirilmiş algoritma ile kararlı çözüme ulaşabilmek ve sistemin sayısal stabilitesini arttırmak için Euler hareket denklemi içerisindeki basınç terimlerine yapay viskozite terimi

eklenmiştir. Yapay viskozite teriminin doğrudan momentum korunumu denklemine eklenmesinin sebebi akışkana belli bir mertebede difüzyon eklenerek sayısal çözümün kararlılığının arttırılmasının sağlanmasıdır. Bu terim ilk olarak sonlu farklar algoritmaları için Von Neumann ve Richtmyer (1950) tarafından kullanılmaya başlanmış olup birçok İPH çalışmasında da kapsamlı olarak kullanılmıştır (Delorme ve diğ., 2005). Eklenen bu yapay viskozite değerinin sayısal kararlılığı sağlarken çözüm üzerindeki etkilerinin en aza indirilecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Ayrıca dikkat edilmesi gereken başka bir husus da parçacık çözünürlüğünün arttırılması ile (örneğin interpolasyon uzunluğunun (h) sıfıra yakınsaması ile) yapay viskozite terimi sıfıra yakınsar ve böylece hareketi temsil eden denklem sistemi Euler denklemlerine indirgenmiş olur (Antuono ve diğ., 2011).WCSPH yaklaşımını ise akışkanı oluşturan parçacıkların yoğunluk değerinin başlangıçtaki durumlarından %1 sapmasına müsaade eden ve parçacıkların basınç değerlerinin yoğunluk değerlerinden faydalanılarak çözüldüğü bir hal denklemini içeren yaklaşım olarak özetleyebiliriz.

Tez kapsamında ayrıca literatürde sıklıkla kullanılan Yoğunluk Düzeltmesi (Shephard Filtering), Birleşik Serbest Su Yüzeyi Yapay Parçacık Ötelemesi (VXSPH) ve Parçacık Paketleme Algoritması (Particle Packing Algorithm) sayısal düzeltme algoritmaları kullanılmıştır. Yoğunluk Düzeltmesi WCSPH kullanımında basınç değerlerinin değişimini düzenleyen ve problem bölgesindeki sayısal gürültünün (numerical noise) azaltılması maksadıyla Süreklilik denkleminden elde edilen yoğunluk değerlerinin parçacıklar arasında ağırlıklandırılmış interpolasyon kullanılarak düzenlenmesi olarak ifade edilebilir ve literatürde WCSPH yaklaşımını kullanan bir çok araştırmacı tarafından (Colagrossi ve Landrini, 2003, Dalrymple ve Rogers, 2006 ve Özbulut ve diğ., 2014) kullanılmıştır. VXSPH çözüm algoritması, XSPH Hız Varyantı (Monaghan, 1994) ve Yapay Parçacık Ötelemesi (Shadloo ve diğ., 2011)'nin ortak uygulamasını içeren hibrit bir yöntem olup su yüzeyinde parçacıkların hız ve konumlarının düzenlenmesine, su altında ise parçacıkların kümelenmesinin engellenmesine etki etmektedir. Ayrıca problem sınırlarının eğik olduğu durumlarda ise sayısal algoritma içinde parçacıkların çözüm bölgesine daha homojen dağıtılmasına yarayan Colagrossi ve diğ. (2012), tarafından geliştirilen Parçacık Paketleme Algoritması (Particle Packing Algorithm) kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında geliştirilmiş olan algoritmanın doğrulanmasına yönelik beş değişik test uygulanmış olup her bir doğrulama kapsamında probleme ilişkin farklı parametrelerin değiştirildiği uygulamalara da yer verilmiştir. Birinci doğrulamada cismin hareketsiz olduğu durumda basınç değerlerinin gözlemlenmesi için yapılmıştır. Birinci doğrulamada dik havuz sınırlarına sahip ve eğik havuz sınırlarına sahip iki farklı havuz geometrisi kullanılmış ve havuz içerisindeki basınç değişiminin başlangıç şartı olarak verilen hidrostatik basınçlardan sapması zaman içerisinde incelenmiştir. Yine bu doğrulamada eğik havuz sınırlarında uygulanan PPA algoritmasının beklenildiği gibi çalışıp çalışmadığı da test edilmiştir.

İkinci doğrulama, cisim hareketli ve hareketsiz haldeyken elde edilen moment değerlerinin sınanmasına yönelik yapılmıştır. Cisim hareketli haldeyken elde edilen moment değerleri literatürde yer alan deneysel ve sayısal yöntemler ile mukayese edilmiştir. Yine bu doğrulama kapsamında cismin hareketli olduğu durumda cismin açısı ve cisme etkiyen moment değerlerinin arasında bir faz farkının oluşup oluşmadığı da incelenmiştir.

Üçüncü doğrulama, değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde hareket eden cisimden elde edilen ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarının, literatürdeki deneysel ve sayısal sonuçlar ile karşılaştırılması şeklinde yapılmıştır. Dördüncü doğrulamada cismin hareketi nedeni ile cismin çevresinde oluşan girdapların adet ile mevkilerinin ve cismin çevresindeki akışkan hızlarının literatürde yer alan diğer çalışmalar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Beşinci ve son doğrulama kapsamında ise cismin hareketi nedeni ile serbest su yüzeyinde oluşan dalgalar incelenmiştir.

Doğrulama faaliyetlerinden sonra, geliştirilmiş olan algoritmanın gürbüz (robust) olup olmadığının kontrolü için parçacıklar arası mesafe (dx), zaman adımı (dt) ve problem geometrisinin değişiminin sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Her üç duyarlılık analizinde de mukayese kriteri olarak boyutsuz ek su kütle atalet momenti (a_{66}) ve boyutsuz sönüm moment katsayısı (b_{66}) seçilmiştir.

Oluşturulmuş olan İPH algoritması farklı doğrulama ve duyarlılık analizleri ile çeşitli denemelere tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen bütün denemelerde literatürde yer alan deneysel çalışmalara tatmin edici doğruluklarla cevap veren algoritma, literatürde bulunan deneysel veriler baz alındığında literatürdeki diğer bir sayısal yöntem olan FSRVM'ye göre daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Başarılı sonuçlar alınmasına rağmen geliştirilen İPH algoritmasının çözüm süresi bir hayli uzun olup kısaltılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Daha önce farklı problemlerin çözüm/doğrulaması için kullanılmış olan İPH yönteminin su içinde yalpa hareketi yapan 2 boyutlu bir cisme uygulanmasına yönelik herhangi bir çalışmaya literatür taraması esnasında rastlanmamıştır. Dolayısı ile tez kapsamında İPH yöntemi kullanılarak iki boyutlu yüzen cisimlerin yalpa hareketine ilişkin elde edilecek sonuçların literatüre bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Tez kapsamında irdelenmiş olan yalpa hareketi yapan cisme etkiyen moment, yalpa hareketindeki ek su kütle atalet momenti, sönüm moment katsayısı ve serbest su yüzeyinde meydana gelen dalgalar literatüre nicel olarak katkı sağlanmaktadır. Ayrıca yine tez kapsamında incelenmiş olan girdaplılık ve cisim çevresindeki parçacıklarda meydana gelen hız vektörleri literatüre nitel olarak katkı sağlamaktadır.

CALCULATION OF HYDRODYNAMIC COEFFICIENTS FOR ROLLING IN TWO DIMENSION BY SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS METHOD

SUMMARY

Many different analytical, experimental and numerical works have been done for the prediction of hydrodynamic forces and moments exerted on the oscillating body on the water surface. In this thesis, added mass of inertia and damping moment coefficient, vorticity around the body and surface waves generated due to roll motion of the body are investigated for 2-D rectangular bodies which are subjected to forced roll motion by means of Smoothed Particle Hydrodynamics Method (SPH) which is one of the meshless numerical methods. Obtained results have been compared with those of the numerical and experimental studies, by taking a rectangular cross-section into account. Moreover, sensitivity analysis have been performed to determine whether obtained results and generated SPH algorithm is robust or not. Various different numerical algorithms are still in development in order to tackle the problems of SPH method by researchers and engineers. Fundamentally, Continuity Equation and Euler's Equation of motion including Artificial Viscosity Terms are used as governing equations within the frame of Weakly Compressible SPH (WCSPH) approximation scheme.

SPH method was first simultaneously introduced by Monaghan and Gingold (1977) and Lucy (1977)to find a numerical solution to the astrophysical problems. Then the method is applied to the fluid and solid mechanics problems. In 1990's SPH's usage is extended to the underwater explosion, shock, bio-mechanical, crash and variety of fluid and solid mechanics problems. Nowadays, different algorithms to find a sound and effective solution to the different kind of problems are still investigated. SPH method is one of meshless methods which has a Lagrangian nature. Concisely in SPH method, problem domain is discretized to the particles which represent fluid and fluid kinematic and dynamic properties such as velocity, force and etc. Mentioned properties can be taken from each particle throughout in analysis time. There shall be two indispensable steps in SPH numerical solution algorithm. First step is named as integral respresentation or kernel approximation. The second one is the particle approximation.

- First step, the kernel approximation, is based on an interpolation process where the values of any field variable (such as velocity, pressure etc.) are calculated by using the integral representation of SPH approach. Kernel function, smoothing kernel function or smoothing kernel plays important role in the application of kernel approximation and it is explained in detail in this study.
- Second step, particle approximation provides the discretization of these integral equations by using the relation through a summation procedure over all the particles in the problem domain.

With the application of the kernel and particle approximations to the Continuity and Euler's Equation; WCSPH approximation is utilized. Artificial viscosity term is added to the pressure terms inside the Euler's Equation to obtain better stability for the generated İPH algorithm. With the addition of artificial viscosity term to the Euler's momentum equation, slight diffusion that contributes the numerical stability is acquired. This term is firstly used by Von Neumann and Richtmeyer (1950) in FDM analysis and then it is used in many SPH algoritms (Delorme et. al., 2005). Optimization of the artificial viscosity term by observing artificial viscosity effects in results when acquiring numerical stability is required. With the decrease of smoothing length artificial viscosity effects converges to zero and used governing equation for the momentum degraded to Euler's equation (Antuono et. al., 2011). WCSPH assumes that the fluid is incompressible, however it allows %1 variation from the intial value of the density distribution and it employs Equation of State (EOS) to couple density and pressure values of particles.

After application of SPH discretization, Density Correction (Shephard filtering), Velocity Updated XSPH (VXSPH) and Particle Packing Algorithms (PPA) are employed. As the pressure is coupled with density in WCSPH approximation, precise calculation of density has utmost importance. When one uses the density evolution following from directly the continuity equation, the pressure field may fluctuate rapidly. Therefore, SPH computations which use WCSPH method usually employ density correction as introduced by Colagrossi and Landrini (2003), Dalrymple and Rogers (2006) and Özbulut et. al. (2014). It is also called as Shephard filtering. VXSPH is developed by Özbulut (2013) and it is a hybrid combination of Monaghan's (1994) Velocity Variant Algorithm (XSPH) and Shadloo et. al.'s (2011) Artificial Particle Displacement (APD) algorithms. In VXSPH, particle velocities and positions are updated on water surface by using XSPH algorithm to have better prediction and particle positions are shifted for the rest of the particles by using APD algorithm to obstruct particle accumulation. Additionally, Colagrossi et. al.'s (2012) Particle Packing Algorithm (PPA), which assures more homogenous particle distribution, is employed when the problem domain have oblique boundaries.

Five different validations are executed to test the SPH algorithm presently developed. In the first case of validation, pressure values of the particles are observed for a satisfactory time interval while the body is at rest. Moreover in the first validation case two different tank geometries (one has vertical/horizontal boundaries and another one has oblique/horizontal boundaries) are tested. At the beginging hydrostatic pressure conditions are assigned to the fluid particles and variation of pressure values are observed. PPA algorithm success is sought for the tank which have oblique boundaries.

In the second validation, moments are investigated in both when body is stable and it is harmonically oscillating. Obtained moment when the body is subjected to the harmonical oscillation is compared with that of experimental and numerical studies in the literature. Additionally, another test is executed for the oscillating with a harmonic charasteristics. Roll angle and moment obtained are taken into account and phase difference between these two parameters is also investigated.

In the third validation, added mass of inertia and damping coefficients of the body are investigated for different angular frequencies and various roll amplitudes. Roll motion added mass of inertia and damping coefficient are compared with those of experimental and numerical studies in the literature.

In the fourth validation, the number and location of the vortexes that occur around the body because of the motion of the body and the fluid particle velocities around the body are compared with the other studies in the literature. Fifth and the last; validation covers the analysis of the free waves that occur on free surface that is caused by the motion of the body.

Validation activities are followed by the analysis of the impacts of the differences of the distance between the particles (dx), time step (dt) and problem geometry over the results to control whether the developed algorithm is robust. Nondimensional added mass of inertia (a_{66}) and nondimensional damping moment coefficient (b_{66}) are selected as the comparison criteria in all three sensitivity analyses.

Through multiple validation and sensitivity analysis, the generated SPH algorithm is put to various tests. The algorithm, responded in satisfactory level of correctness to the experimental studies in the literature in all the tests implemented, and it is observed to yield more promising results to FSRVM which is another numerical method in the literature when the experimental data in the literature is taken as a basis. Even though successful results are obtained, the developed SPH Algorithm has a long computational time which needs to be shortened.

During the literature review usage of IPH method, which was previously used for solution/verification of various problems, to the two dimensional body which is subjected to roll motion on the surface is not obtained. Therefore results that are achieved in the thesis through using IPH method to the two dimensional rolling body on the free surface are determined to contribute to the literature. Results that are examined in the scope of thesis regarding moment that is exerted on the rolling body, added mass of inertia moment, damping moment coefficient for the rolling body and surface waves generated due to roll motion of the body, contribute to the literature quantitatively. In addition vorticity and velocity vectors occur on the particles around the body that are examined in the scope of thesis contribute literature in a qualitative way.

1. GİRİŞ

Dünya ticaretinin %90[1]'nına yakın bir bölümünün deniz yolu ile gerçekleştirildiği, savunma sanayi harcamalarının yaklaşık %47[2]'sine yakın tutarının deniz platformlarına yapıldığı, deniz turizm gelirlerinin[3] ise gün geçtikçe arttığı ve önemli bir kalem olarak karşımıza çıktığı düşünüldüğünde deniz taşıtlarının ticari, askeri ve mali olarak ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Ülkelerin savunmasında, ticari faaliyetlerinde ve mali döngüsünde bu denli önemli unsurlar olan deniz taşıtlarının kendilerinden beklenen görevleri her türlü hava ve deniz şartlarında yerine getirebilmesi gemilerin denizciliği kavramı altında irdelenebilir. Gemilerin denizciliğini, her türlü sert deniz ve hava koşulunda can ve mal güvenliğini sağlayacak şekilde hızını muhafaza ederek seyrebilmesi ve tasarım amacına uygun olarak kendisinden beklenen görevleri yerine getirebilmesi şeklinde tanımlayabiliriz. (Sabuncu, 1983)

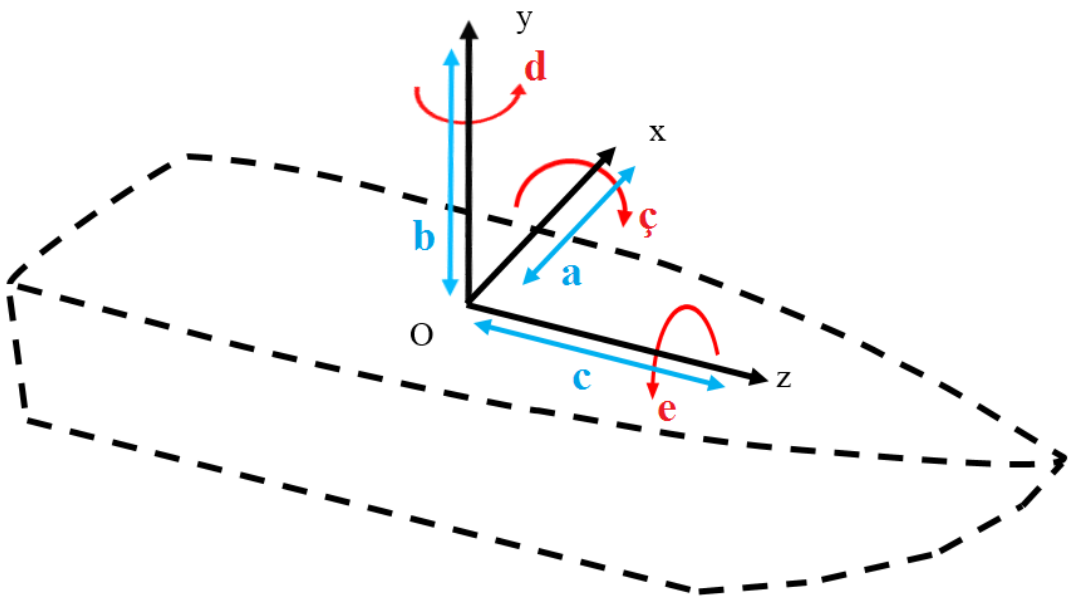
Gemiler çok nadir olarak dalgasız sularda ilerlemekte, çoğunlukla karışık deniz olarak adlandırılan dalgaların girişim yaptığı denizlerde hareket etmektedirler. Karışık denizlerdeki seyirler esnasında bir gemi, Şekil 1.1'de görülen 6 serbestlik dereceli öteleme ve dönme hareketlerine maruz kalmaktadır.

---

[1] Birleşmiş Milletler (UN) internet sayfasında, Dünya Denizcilik Örgütü (IMO) tanıtımının yapıldığı metin içerisinde dünya ticaretinde deniz taşımacılığının önemini vurgulamak için kullanılmaktadır. Benzer şekilde, dünya üzerindeki denizcilik ve deniz taşımacılığı gibi konularında otorite olarak kabul gören Uluslararası Deniz Ticaret Odası'nın (ICS) internet sayfasında, kuruluşun genel tanımının yapıldığı metin içerisinde de benzer ifadelerin kullanımın görülmesi üzerine yukarıda belirtilmiş olan rakam yazılmıştır. (URL-1)

[2] Türkiye Cumhuriyeti'nin savunmaya yaptığı harcamalara ilişkin detay bilgiler bulunamadığından referans verilen rakam için ABD savunma harcalamalarına ilişkin açık kaynaklarda yer alan bilgilerden faydalanılmıştır. 2010 yılı ABD bütçesi içerisinde deniz kuvvetleri ve deniz piyadelerine ilişkin ayrılmış bütçenin, ABD savunma harcamalarına ilişkin verilerin oranlanması ile bu rakam yazılmıştır. (URL-2)

[3] Dünya turizminde deniz taşımacığının ve yolcu gemilerinden elde edilen gelirlerin artış eğiliminde olduğundan hareketle turizm gelirlerine yönelik vurguda bulunulmuştur. 2011 yılındaki turistik yolcu taşımacılığı gelirleri 2010 yılındaki verilere göre %9.5, yolcu sayısında ise %4.1 artış olmuştur. (URL-3)



Şekil 1.1: Gemi hareketleri.

Şekil 1.1'de verilmiş olan hareketlerin isimleri seçilmiş olan koordinat sistemine uygun olarak aşağıdaki gibi isimlendirilmektedir;

(a) Yanal öteleme (sway)

(b) Dalıp çıkma (heave)

(c) Boyuna öteleme (surge)

(ç) Baş kıç vurma (pitch)

(d) Savrulma (yaw)

(e) Yalpa (roll).

Yalpa hareketi, 6 serbestlik derecesi içindeki hareketler arasında diğerlerine göre daha karmaşık bir fenomendir. Himeno (1981), Yılmaz (2008) ve Falzarano ve diğ. (2015) gibi bir çok araştırmacı tarafından gemi hareketleri arasında en kritik hareket olarak tanımlanan yalpa hareketinin personel, yolcu, teçhizat ve platform üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Yalpa hareketinin başlıca etkileri,

(a) Yaşanılabilirlik şartlarının ve konforun bozulması,

(b) İşletim ve çalışma koşullarını etkilemesi,

(c) Tam dolu olmayan tanklarda meydana gelen çalkantı olayına neden olması,

(ç) Kargo, bağlama donanımlarına gelen ek yükler nedeni ile yük kayması ve yük kayıplarına neden olması,

(d) Geminin tehlikeli yalpa açılarına maruz kalması veya alabora olma riski,

olarak sayılabilir. Diğer taraftan gemi hareketleri içerisinde yalpa hareketi diğer hareketlerine oranla daha iyi sönümlenebilmektedir. Bunun nedeni baş kıç vurma hareketine ile karşılaştırıldığında kütle atalet momentinin daha düşük olması ve yalpa hareketindeki rezonans bölgesinin küçük olmasını ifade edebiliriz (Bhattacharyya, 1978; Yang, 1998). Yalpa hareketinin sönümlenmesinde aşağıda belirtilen örnekler etkin olarak askeri ve sivil platformlarda kullanılmaktadır;

(a) Yalpa omurgaları

(b) Yalpa kanatçıkları

(c) Aktif ve pasif yalpa tankları

(d) Dümenlerde kullanılan yalpa sönümlendirme sistemleri

(e) Jiroskopik sönümleyiciler

(f) Yük hareketli sönümleyiciler

(g) Su jetleri.

Yalpa sönümleme sistemlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları olup gemi tiplerine göre yukarıda belirtilmiş olan uygulamaların kullanımı değişmektedir. Yalpa sönümleme sistemlerinin seçim ve değerlendirmesine yönelik karşılaştırmaya Çizelge 1.1'de yer verilmiştir.

Çizelge 1.1: Yalpa sönümleme sistemlerinin seçim ve değerlendirilmesine yönelik karşılaştırma, Sellars ve Martin (1992).

Sönümleme Sistemi	Uygulama	% Yalpa Sönüm	Fiyat ($x1000)
Yalpa Kanatçığı (Küçük ve Sabit)	Mega yatlar Yardımcı gemiler (askeri)	90	100-200
Yalpa Kanatçığı (Geri Çekilebilir)	Yolcu gemileri, Feribotlar, Ro-Ro, Savaş gemileri	90	400-1500

Çizelge 1.1 (devam): Yalpa sönümleme sistemlerinin seçim ve değerlendirilmesine yönelik karşılaştırma, Sellars ve Martin (1992).

Yalpa Kanatçığı (Büyük ve Sabit)	Savaş gemileri	90	300-1300
Yalpa Sönümleme Tankı (Serbest Su Yüzeyi)	Feribotlar, Küçük yolcu gemileri, Kargo gemileri, İş gemileri	75	30-50
Yalpa Sönümleme Tankı (U tipi)	İş gemileri, Ro-Ro	75	200-300
Dümen Yalpa Sönümleme Sistemi	Yüksek Hızlı Tekneler	50-75	50-250
Yalpa Omurga	Bütün gemi tipleri	25-50	---

Yalpa hareketinin tahmini ise gemi inşa mühendisleri ve bilim insanları için günümüzde dahi halen büyük çaba gerektiren bir iştir. Halihazırda mevcut olan analitik ve sayısal uygulamaların birçoğu ya tam doğru sonuç verememektedir ya da günlük mühendislik uygulamalarında kullanılmayacak kadar emek ve zaman istemektedir. Günümüzde yalpa hareketinin kestiriminde analitik çalışmalar, sayısal modeller, ampirik uygulamalar veya bunların kombinasyonları kullanılmaktadır.

Buraya kadar yalpa hareketinin önemi ve önlemeye yönelik metodlardan bahsedilmiştir. Bu başlık altındaki diğer paragraflarda ise mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal çalışmalarından bahsedelicektir.

Akışkan ile ilgili problemlerin sayısal yöntemler kullanılarak çözülmesi ve/veya analiz edilmesi ile ilgilenen bilim dalına "Hesaplamalı Akışlanlar Dinamiği" (HAD) denilmektedir. HAD/CFD ile ilgili çalışmalara 1960'larda ve 1970'lerde havacılık sanayindeki ihtiyaçlar nedeni ile başlanmıştır (Anderson, 1995). 2-boyutlu (2-D) ve 3-boyutlu (3-D) Euler denklemi çözümleri 1980'lerin başlarında, Navier-Stokes denklemlerinin (bazı özel problemler için) çözümleri ise 1980'lerin ortalarında başarılı bir şekilde yapılmış olup 1980'lerin sonlarına doğru ise gerçek zamanlı gaz modellemesinin gerektiği akış problemlerine ait simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Günümüzde; uçaklar, turbomakineler, gemiler, kara taşıtlarının tasarımda ve meteoroloji, oşinografi, astrofizik gibi birçok bilim dalında çeşitli HAD yöntemleri kullanılmaktadır.

Mühendislik problemleri çözümünde halen yaygın olarak kullanılmakta olan HAD metodları arasında "Sonlu Farklar", "Sonlu Elemanlar", "Sonlu Hacimler" ve "Sınır Elemanlar" sayılabilir. Bahse konu yöntemlerden FDM, FEM ve FVM'in ortak özelliği probleme ait fiziksel bölgede ayrıklaştırma işleminin yapılırken bir ağ sisteminin kullanılmasıdır. Bu yöntemler literatürde "Ağ temelli yöntemler" olarak adlandırılmaktadır. Fiziksel bölgede ayrıklaştırma işlemi yapılırken herhangi bir ağ sistemi oluşturulmadan, bölge içerisinde serbest olarak dağıtılmış düğüm noktaları ile çözüm yapılan yöntemler ise "Ağdan Bağımsız" veya "Ağsız" yöntemler olarak adlandırılmaktadır. Liu ve Liu (2003)'e göre ağdan bağımsız yöntemlerin, ağ temelli yöntemlere göre avantajları şu şekilde sıralanabilir;

(a) Ağsız yöntemlerde, çözüm bölgesinde birbirlerine sabitlenmiş elemandüğüm noktası, komşuluk olmaması nedeni ile deformasyonların yüksek olduğu problemlerin çözümü nispeten daha kolay olmaktadır.

(b) Karmaşık geometrilerde ayrıklaştırma ağsız yöntemlerde daha kolaydır.

(c) Hesap yapılacak bölgenin daha küçük parçacıklara ayrılması ağsız yöntemlerde daha basittir.

(ç) Serbest su yüzeyi, kayan arayüzler ve deforme olan sınırların olduğu problemlerde bütün çözüm bölgesindeki değişkenlerin elde edinilmesi daha kolaydır.

(d) Çözüm bölgesini oluşturan bütün parçacıkların hareketleri izlendiği için malzeme üzerindeki herhangi bir noktaya ilişkin bilgilere kolay bir şekilde ulaşılabilinmektedir.

Yukarıda sayılan avantajların yanı sıra ağsız yöntemlerin dezavantajlarıda vardır. Liu ve Gu (2005)'e göre;

(a) Ağsız yöntemler, ağ temelli yöntemlere oranla daha uzun hesaplama süresi gerektirmektedir.

(b) Ağ temelli yöntemler, kullanımlarının daha eskiye dayanması nedeni ile, gelişimlerini sağlamış ve gürbüz (robust) algoritmalara sahipken ağsız yöntemlerin geliştirilme süreçleri devam etmektedir.

(c) Ağ temelli yöntemlere ilişkin bir çok ticari yazılım bulunmakta olmasına karşın, ağsız yöntemler için az sayıda ticari yazılım bulunmaktadır.

(ç) Özel sınır koşullarının tanımlanması ağ temelli yöntemlerde, ağsız yöntemlere nazaran daha kolay yapılabilinmektedir.

Bu çalışmada kullanılacak olan İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (İPH) (Smoothed Particle Hydrodynamics) yöntemi ağdan bağımsız yöntemlerden bir tanesidir ve Lagrange yaklaşımı ile analitik denklemler çözümde kullanılmaktadır. İPH yöntemi ilk olarak ilk olarak 1970'li yılların sonunda eş zamanlı olarak Monaghan ve Gingold (1977) ve Lucy (1977)tarafından astrofizik problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra 1990'lı yıllarda su altı patlaması, şok, bio-mekanik, çarpışma, çeşitli akışkan ve katı cisimler mekaniği problemlerinde kullanılmış olup günümüzde çeşitli hidrodinamik problemlerin çözümü içinde kullanılmaktadır. Bahse konu hidrodinamik problemlerinin başında, çalkantı problemi ve geminin dalgalar arasında yaptığı hareketler gelmektedir.

İPH yönteminin hidrodinamik problemlerine uygulanmasına yönelik çalışmalara ülkemizde, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'nde de devam edilmekte olup, Özbulut (2008) İPH yöntemini kullanarak bir boyutlu şok-tüp ve iki boyutlu bir kanal içerisindeki daimi akım problemlerini çözmüştür. Özbulut doktora çalışması esnasında ise yüksek süratli akışlar ve baraj yıkılması problemlerini Euler denklemini kullanarak İPH yöntemi ile başarı ile çözmüş ve geliştirmiş olduğu bilgisayar kodunu değişik gemi problemlerine uygulamaya devam etmektedir (Özbulut, 2014).

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, geminin yalpa hareketinde katsayıların İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (İPH) yöntemi kullanılarak araştırılmasıdır/hesaplanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda İPH yöntemi ve literatürde yöntemin kullanımında kabul gören çeşitli sayısal düzeltmeler kullanılarak zorlanmış yalpa hareketi çözdürülecek ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayıları elde edilmeye çalışılacaktır.

Bu çalışmanın 1. Bölümü içerisinde, yalpa hareketi ve İPH yöntemi ile ilgili genel bilgilerin yanısıra doktora tezinin amacı, kapsamı ve literatüre getirmiş olduğu yenilik konuları açıklanacaktır. Çalışmanın 2. Bölümünde yalpa hareketinin kestiriminde önemli yeri olan ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarına ait literatür taramasından bahsedilecektir. Ayrıca, literatür taraması içerisinde ağsız yöntemlerin

genel karakteristikleri ve literatürde kabul görmüş kullanımları ele alınacak ve çalışmada kullanılacak sayısal çözüm metodu olan İPH yöntemine dair literatürde yer alan çalışmalar irdelenecektir. Doktora tezinin 3. bölümü içerisinde İPH yönteminin temel adımlarından, ağırlık fonksiyonlarından, hatasından, sınır koşullarından, zaman integrasyonu şemasından ve komşuluk belirleme yöntemlerinden bahsedilecek olup literatürde yer alan farklı uygulamalara yer verilecektir. Ayrıca yine bu bölüm altında 3. bölüm içerisinde yer alan konu başlıklarından, doktora çalışması kapsamında geliştirilmiş olan bilgisayar kodunda bahsi geçen uygulamalardan hangilerinin kullanıldığı açıklanacaktır. 4. Bölüm içerisinde İPH yönteminin, akışkanlar mekaniğinde kullanılan denklemlere uygulanmasına ve parçacıklardaki basınç değerlerinin hesaplanmasına yönelik yönteme değinilmiştir. Bilgisayar kodunda sistemin sayısal kararlılığının geliştirilmesi amacıyla uygulanmış sayısal düzeltme algoritmalarından bahsedilmektedir. Bu başlık altında son olarak geliştirilmiş bilgisayar kodunun algoritmasının hangi adımlardan oluştuğu açıklanmış olup bir akış diyagramı üzerinde bu adımlar gösterilmiştir. 5. bölüm içerisinde geliştirilmiş olan bilgisayar kodunun değişik yalpa genliği ve frekansında koşturulması ile elde edilen sonuçlar ile literatürde yer alan değerlerin karşılaştırılmaları yapılmış olup geliştirilmiş olan bilgisayar kodu beş farklı doğrulama testi ile denenmiştir. 6. bölüm içerisinde çözüm algoritması üç değişik tipte duyarlılık analizine tabi tutularak geliştirilmiş olan algoritmanın gürbüz (robust) olup/olmadığı araştırılmıştır. Sonuç ve önerilere yer verilen 7. bölüm içerisinde kullanılan yöntem ve uygulanan problem üzerideki başarısı değerlendirilecek olup yönteme ve algoritmaya yönelik tartışmalara ve geleceğe yönelik beklentilere yer verilecektir.

1.2 Özgün Değer

Bilindiği üzere deniz taşıtlarının değişik deniz durumlarındaki 6 serbestlik dereceli hareketi konvansiyonel metotlarla veya sayısal yöntemler ile hesaplanırken, özellikle yalpa hareketine ilişkin hesaplamalarda kullanılan katsayıların tahmininde zorluklar yaşanmaktadır. Günümüzde yalpa hareketinin kestiriminde kullanılan ticari kodların (Shipmo, Maxsurf Seakeeper modulü, Wamit, SINTEF VERES, SINTEF ShipX, OCTOPUS vb.) halen ampirik verilerden yararlanıldığı düşünüldüğünde tez kapsamında geliştirilen bilgisayar kodu ile deniz taşıtlarının ve platformlarının yalpa hareketlerinin hesaplanmasında daha doğru/duyarlı sonuçlara ulaşılacağı

düşünülmektedir. Bu sayede, tasarım çalışmalarının sonucunda ortaya çıkacak deniz taşıt ve platformlarının kullanıma/ihtiyaca daha etkin bir şekilde cevap verebileceği öngörülmektedir. Yalpa hareketindeki hidrodinamik katsayıların interpolasyonlu parçacık hidrodinamiği yöntemi kullanılarak elde edilmesinin özgün bir değer yaratacağı öngörülmektedir. Ayrıca geliştirilmiş olan bilgisayar kodu ile değişik genlik ve frekanslarda yalpa hareketi yapan bir cismin çevresinde oluşan girdap oluşumları ve cisim çevresindeki akışkan parçacıklarının hızları da gözlemlenecektir.

Ayrıca daha önce farklı problemlerin çözüm/doğrulaması için kullanılmış olan İPH yönteminin su içinde yalpa hareketi yapan bir cisme etkiyen moment, ek su kütle atalet momenti, sönüm moment katsayısı vb. parametrelerin bulunması için kullanılması daha önce literatürde irdelenmemiş bir konudur. Dolayısı ile tezkapsamında İPH yöntemi kullanılarak iki boyutlu yüzen cisimlerin yalpa hareketine ilişkin elde edilecek sonuçların literatüre bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Akışkanlar mekaniği problemleri analitik, deneysel, sayısal çalışmalar veya bunların kombinasyonlarının kullanımı ile çözümlenmektedir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Herhangi bir akış probleminde aranacak çözümde kullanıcı bu avantaj ve dezavantajları değerlendirerek en uygun çözümü veya çözüm kombinasyonlarını seçmelidir.

Analitik çalışmalar genellikle basit geometriler için uygulanmakta veya olayın basitleştirilmiş fiziği ile sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle mühendislik problemlerinin bir çoğunda analitik çözüm doğrudan kullanılmamaktadır. Her ne kadar direk olarak analitik yöntemler kullanılmasa da dolaylı olarak problemlerin çözümünde analitik çalışmalara başvurulmaktadır. Problemlerin mekaniğinin ve fiziğinin anlaşılmasında veya sayısal çözüm algoritmasının doğrulamasında analitik yöntemlerin kullanılması ulaşılmış olan çözümlerin güvenilirliğini arttırmaktadır.

Deneysel çalışmalar, yüksek ilk yatırım maliyetleri, pahalı deney tesisatları ve çözülecek problemin çoğu zaman daha küçük ölçekli modelinin kullanılarak yapılmasını gerektirmektedir. Model hazırlığı ve test düzeneğinin probleme uygun şekilde uyarlanması gibi nedenler ile çözüm, genellikle diğer yöntemlere nazaran daha uzun zaman gerektirir. Ayrıca, problemlerin çözümünde tam ölçekli testlerden de yararlanılmaktadır. Tam ölçekli testler ile tasarım sürecine girdi sağlayabilecek yeterlilikte sonuçlar almak oldukça pahalı olmaktadır (Bhattacharyya R., 1978). Yine de deneysel yöntemler problemin fiziksel olarak anlaşılması ve diğer yöntemler ile elde edilmiş sonuçların doğrulanmasında kullanılması bakımından oldukça önemlidir.

Sayısal çalışmalar ise gün geçtikçe bilgisayarların hesaplama kabiliyetlerinin artması, deneysel çalışmaların artan maliyetleri, gürbüz çözüm algoritmalarının geliştirilmesi ve diğer yöntemlere göre uygun maliyetli olması gibi nedenlerden gün geçtikçe daha popüler hale gelmektedirler. Sayısal çalışmalar problem geometrisinin karmaşıklığına ve problemin boyutlarının büyüklüğüne göre bir sınırlaması olmamakla beraber sınır şartlarının doğru tanımlanmasına, hata terimlerinin takibine, doğrulama ve duyarlılık

analizlerine ihtiyaç duymaktadır. Eğer bu saydığımız hususlara dikkat edilirse sayısal yöntemlerin problemlerde kullanılması verimli ve etkin olabilmektedir.

Bu çalışmanın literatür taramasının birinci alt başlığı altında yalpa hareketi ile ilgili olarak yapılmış çalışmalara yer verilecektir. Yalpa ile ilgili yapılmış olan çalışmalardan bazıları sonraki bölümlerde geliştirilmiş olan bilgisayar kodunun doğrulanmasında kullanılacaktır.

Literatür taramasının ikinci alt başlığında ise ağsız yöntemlerin genel karakteristikleri ve diğer sayısal yöntemler ile karşılaştırılmasına yer verilecek olup ağsız yöntemlerden biri olan İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği'nin irdelenmesi ve yöntemin kullanım alanlarına yer verilecektir.

Literatür taraması esnasında incelenmiş olan kaynaklarda ek su kütle atalet momenti (a_{66}) ve sönüm moment kaysayısı (b_{66}) terimlerinin farklı şekilde isimlendirildiği görülmektedir. Bu tez içerisinde, yalpa hareketine ilişkin hareket denklemde; açısal ivmenin çarpımı olan terim "ek su kütle atalet momenti (a_{66})", açıcal hızın çarpımı olan terim "sönüm moment katsıyısı (b_{66})" olarak isimlendirilecektir. Yalpa hareketine ilişkin hareket denklemi (2.1)'de verilmiş olup denklemde φ yalpa açısını, $d\varphi/dt$ açısal hızı, $d^2\varphi/dt^2$ açısal ivmeyi, a_{66} ek su kütle atalet momentini, b_{66} sönüm moment katsayısını, c_{66} geri getirme momenti katsayısını, ω_e karşılaşma dairesel frekansı, t zamanı, $a_{66}\left(d^2\varphi/dt^2\right)$ atalet momentini, $b_{66}\left(d\varphi/dt\right)$ sönüm momentini, $c_{66}\varphi$ geri getirme momentini, $M_0\cos\left(\omega_e t\right)$ zorlayıcı momenti ifade etmektedir.

$$a_{66}\frac{d^2\varphi}{dt^2}+b_{66}\frac{d\varphi}{dt}+c_{66}\varphi=M_0\cos\left(\omega_e t\right) \tag{2.1}$$

2.1 Yalpa Hareketi ile İlgili Çalışmalar

Yalpa hareketi ile mücadele binlerce yıl öncesine kadar uzanmaktadır. İlk olarak Yunanlılar gemilerinin omurgasını düz yaparak gemilerinin yalpa açısını ve geminin yalpa hareketine olan duyarlılığını düşürmeye çalışmışlardır (Hajiarab, 2013). Zaman içerisinde yalpa hareketinin anlaşılması, geminin maruz kalacağı maksimum yalpa açısının kestirimi ve bu fenomeni azaltmak amacı ile analitik çözümler, deneysel

çalışmalar ve sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçların, deneylerde kullanılan gövde tiplerinden farklı gövde tiplerine uygulanabilmesi için deney datalarından yararlanılarak elde edilen ampirik formuller de literatürde bir hayli geniş yer tutmaktadır.

2.1.1 Analitik çalışmalar

Hidrodinamik kuvvetler ve akışkan-cisim (fluid-structure) etkileşimini analitik olarak inceleyen bilim insanlarının başında biri olarak Lamb'ı (1932) sayılabilir. Basit bir geometri için yalpa probleminin tam çözümünün Ursell (1949) tarafından verilmesinin ardından sınır elemanlar yöntemi kullanılarak hidrodinamik tekilliklerin dağıtılması ve konform tasvir (conformal mapping) gibi metodlar Frank (1967) ve diğer araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Bu gelişmeler ışığında viskoz olmayan akışın temel alındığı "dilim teorisi" (strip teory) ve "ince-uzun gemi" (slender body) modelleri Wehausen (1969), Salvesen ve diğ. (1970), Webster (1975) gibi araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Bu modellerin bilgisayar uygulamalarını geliştiren Ankudinov (1991) ve Journee (1992) oldukça hızlı, tatminkar doğrulukta ve gayet kullanışlı sonuçlar almışlardır.

Faltinsen (1969) tarafından çeşitli şekillere sahip 2-boyutlu cisimlerin dalıp çıkma, yatay öteleme ve yalpa hareketindeki ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayısı hesaplanmıştır. Bilgisayar uygulamasının da yer aldığı çalışma yalpa hareketindeki katsayıların tespitine yönelik ilk çalışmalar arasında olup sıkıştırılamaz, vizkoz olmayan ve serbest yüzey geriliminin ihmal edildiği sonuçlar teorik değerlere oldukça yakın sonuçlar vermiştir.

Dilim teorisinin ek su kütle atalet momentinin hesabında kullanıldığı, kaldırma yüzeylerinin sönüme etkisinin incelendiği, yalpa omurganın viskoz yalpa sönümlenmesine etkisinin irdelendiği Schmitke'nin (1978) çalışmasın da çeşitli gemiler için teorik ve deneysel ölçümlerin karşılaştırılması da yapılmıştır. Yalpa, yanal öteleme ve savrulma hareketi için geliştirilmiş olan önerilen teorik modelde yalpa hareketinin tahmininde bilgisayar programlarından elde edilen sonuçlara benzer doğrulukta değerlere ulaşılmıştır.

Taylan (2000), eş zamanlı borda dalgalarına maruz kalan bir gemideki yalpa hareketini lineer olmayan formdaki denklem ile çözmüştür. Lineer olmayan diferansiyel denklemlerin frekans alanında çözdürülmesi için kullanılan bir yaklaşım olan Duffing

metodundan yararlanarak yalpa hareketinin geminin alabora olmasına etkisini bulmak için araştırmıştır. Birbirinden farklı dört gemi tipinin lineer olmayan yalpa sönüm ve geri getirme kuvvetleri incelenmiştir. Yalpa sönüm ve geri getirme katsayılarının lineer olmayan model oluşturmada ne kadar önemli olduğu ve yanlış seçilmeleri durumunda özellikle en büyük yalpa genliklerinde hatalara sebep olduğu ortaya konmuştur.

2.1.2 Deneysel çalışmalar

Deneysel çalışmaları üçe ayırabiliriz. Birinci yöntem sakin suda modele bir yalpa genliği verilmesi ardından su içerisinde yalpa açısı sönümlenene kadar modelin hareketinin takibi şeklindedir. Yalpa hareketinin zamana göre dataları alınarak yalpa parametrelerinin tayini yapılmaktadır. İkinci yöntemde ise sakin suda modele belirli genlik ve frekansta harmonik bir hareket yaptırılmaktadır. Hareket boyunca dağılan enerjinin ölçülmesi ile yalpa hareketine dair parametrelerin tayini yapılmaktadır. Üçüncü yöntemde ise gerçek bir gemiye belli bir yalpa genliği verilmekte ve serbest bırakılmaktadır. Aynı birinci yöntemde olduğu gibi yalpa hareketinin zamana göre datalarının kaydedilmesi suretiyle yalpa parametrelerinin tayini yapılmaktadır.

Gemilerin yalpa hareketi ve yalpa hareketinin sönümlenmesi ile ilgili ilk deneysel çalışmalardan biri Froude (1861) tarafından yapılmıştır. Froude yalpa sönümünü lineer ve kuvadratik hız bağımlısı bir formda düşünmüş olup çalışmalarında dalga yüksekliği ve dalga dikliğinin gemilerin yalpa hareketi üzerine etkilerini de araştırmıştır. Ayrıca çalışmasında tekne tasarımında geminin doğal frekansı ve gelen dalgaların frekansının göz önünde tutulması gerektiğini vurgulamış olup çalışmasında rezonans teriminin önemini belirtmiştir. 1. bölümde bahsedilmiş olan yalpa sönümleme sistemlerinden yalpa omurgası ve pasif tank sönümleyicilerinin de kullanımını öneren ilk araştırmacılardan biri olarak anılmaktadır.

Vugts (1968)'un yalpa hareketi konusunda yapmış olduğu deneysel çalışmalar bir çok araştırmacı için referans noktası teşkil etmiştir. Vugts yaptığı deneylerde daire, dikdörtgen (3 farklı B/T oranında), üçgen ve iki değişik boyutta Lewis formlu kesitlerdeki silindirler için yanal öteleme, dalıp-çıkma ve yalpa hareketlerini incelemiştir. Bu hareketlerde şekillerin dönme merkezleri dikdörtgen kesitli olanların B/T oranı 4 ve 8 olan denemeler haricinde hepsi şekillerin ağırlık merkezleri olmuştur. Dikdörtgen kesitli cisimlerin B/T oranı 4 ve 8 olan denemelerde dönme merkezi

serbest su yüzeyinde seçilmiştir. Deneyde, kullanılan şekillere farklı frekans ve genlikler verilerek hareketler yaptırılmış,

(a) Dalıp-çıkma hareketindeki ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayıları,

(b) Yanal öteleme hareketindeki ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayıları,

(c) Yanal öteleme hareketinin yalpa hareketine etkileri,

(ç) Yanal öteleme ve dalıp-çıkma hareketlerindeki dalga genliği/hareket genliği oranı,

(d) Yalpa hareketindeki ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayıları,

(e) Yalpa hareketinin yanal öteleme hareketine etkileri,

(f) Yalpa hareketindeki dalga genliği/hareket genliği oranı,

(g) B/T oranın değişimi ile yalpa hareketindeki ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarının değişimi,

(ğ) Yatay ve dikey dalga uyarma kuvvetleri,

(h) Dalga uyarma momenti,

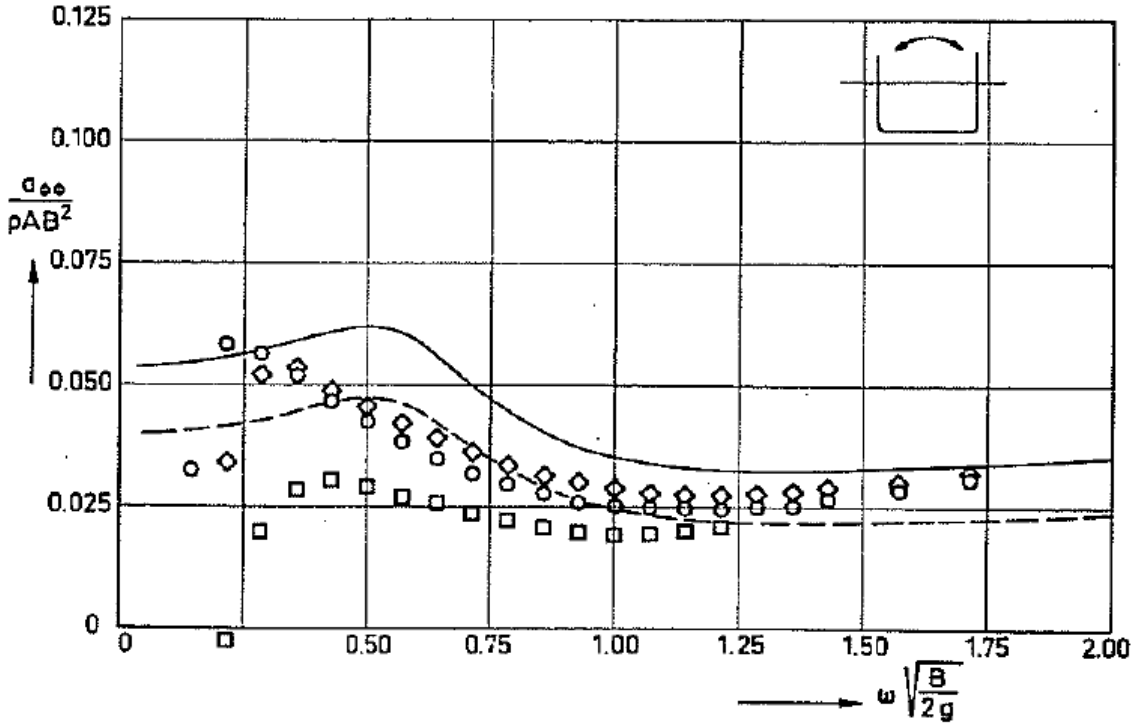
(ı) Uyarma kuvvetlerinin ve momentinin faz açısı,

incelenmiş ve teorik sonuçlar (potansiyel teoriye dayanan) ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Yanal öteleme ve dalıp-çıkma hareketlerinde deneylerden elde edilen sonuçlar ile teorik öngörüler birbirlerine gayet yakın çıkarken yalpa deneylerinden elde edilen sonuçlar ile teorik öngörüler arasında nispeten daha fazla farklar tespit edilmiştir. Özellikle B/T oranı 4 ve 8 olan deneylerde elde edilen sonuçlar ile teorik sonuçlar arasında daha fazla fark raporlanmıştır.

Yukarıdaki paragraflarda da ifade edildiği üzere Vugts (1968)'un çalışması gemi hareketleri ile ilgili hazırlanmış çok detaylı ve oldukça geniş bir kaynaktır. Doktora çalışmamda, dikdörtgen kesitli cismin (B/T = 2) yalpa hareketi üzerine odaklanıldığı için Vugts (1968)'un sonuçlarından sadece belirtilen geometriye ilişkin değerlendirmelere yer verilmiştir.

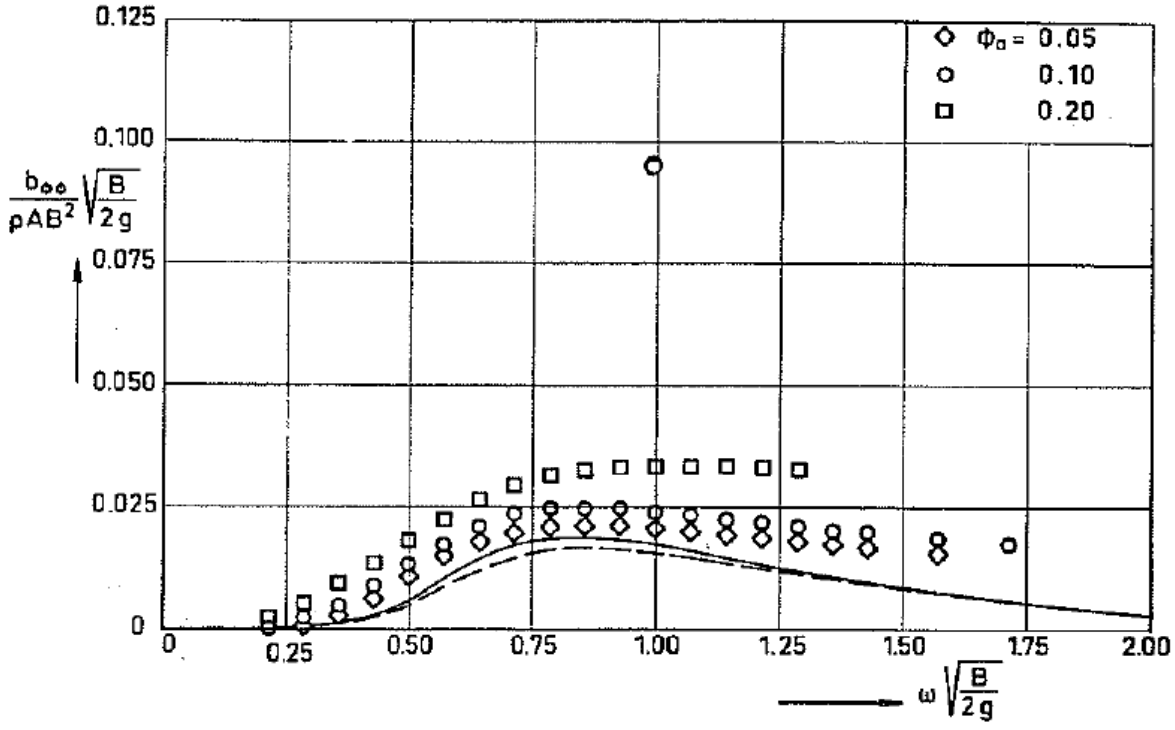
Yalpa hareketinde, B/T=2 olduğu durumda yalpa ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayısı sonuçları teorik sonuçlara oldukça yakın çıkmaktadır . Aynı

frekanstaki hareket için yalpa genliğinin arttırıldığı durumda viskozitenin etkisinin lineere yakın olarak arttığı tespit edilmiştir. Tez kapsamında incelenen konulara yönelik Vugts (1968)'un çalışmasında yer alan grafikler Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1 : $B/T^*=2$ olan diktörgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen ek su kütle atalet momenti değerleri, Vugts (1968).

Şekil 2.1 diktörgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen ek su kütle atalet momenti irdelenmektedir. Dikdörtgen kesitli cismin B/T^* oranı 2'ye eşittir. Şekil 2.1'de yalpa genliğinin değişimi grafik üzerindeki şekillerin değişimi ile takip edilmekte olup şekillere ilişkin lejant Şekil 2.2'de yer almaktadır. Şekil 2.2'de ise dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen sönüm moment katsayısı değerleri görülmektedir. Şekil 2.1'dekine benzer şekilde dikdörtgen kesitli cismin B/T^* oranı 2'ye eşit alınmıştır.



Şekil 2.2 : $B/T^*=2$ olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen sönüm moment katsayısı değerleri, Vugts (1968).

Yeung ve diğ. (1998)'nin California Universitesi'nin model havuzunda yapmış olduğu deneyler konu ile ilgili olarak yapılmış olan bir diğer değerli çalışmadır. Yeung ve diğ. (1998)'nin yaptığı deneylerde dikdörtgen kesitdeki silindir kullanılmıştır. Bu çalışmada deneysel sonuçların yanı sıra yalpa hareketine ilişkin ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayısının hesaplanmasında kullanılan ve ilk olarak Yeung ve Vaidhyanathan (1994) tarafından kullanılan "Free-Surface Random Vortex Method" (FSRVM) sayısal modelinden elde edilen sonuçların karşılaştırması da yapılmıştır. Çalışmada, kullanılan şekle farklı frekans ve genlikler verilerek hareketler yaptırılmış,

(a) Cisime etkiyen moment,

(b) Serbest su yüzeyinde oluşan dalga oluşumu,

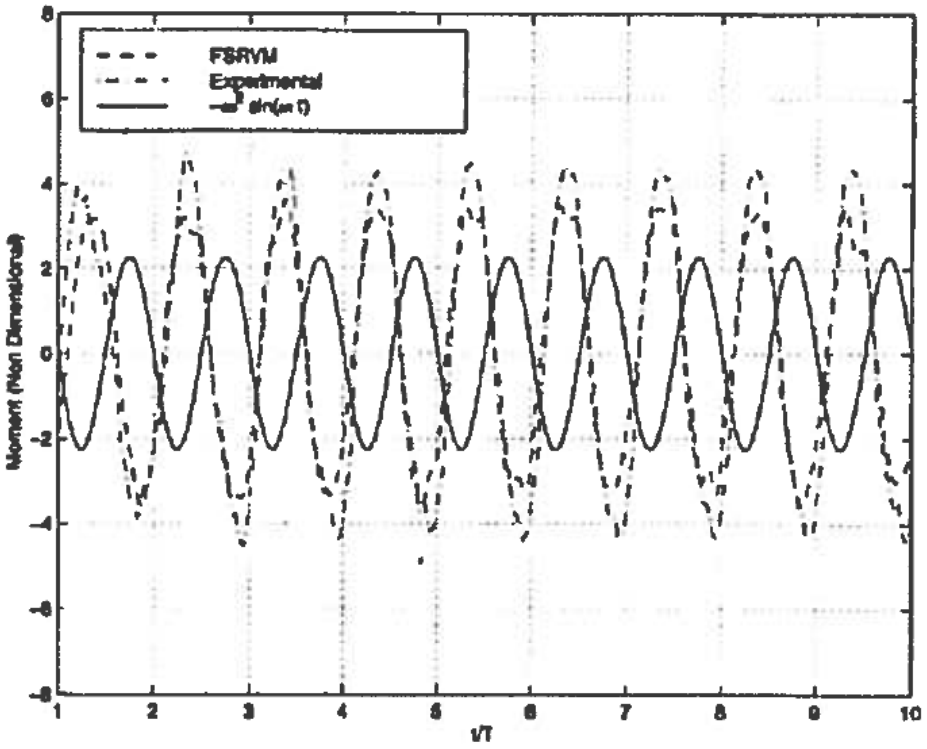
(c) Yalpa hareketi için ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayısı,

(ç) Yanal öteleme hareketinin yalpa hareketine etkileri,

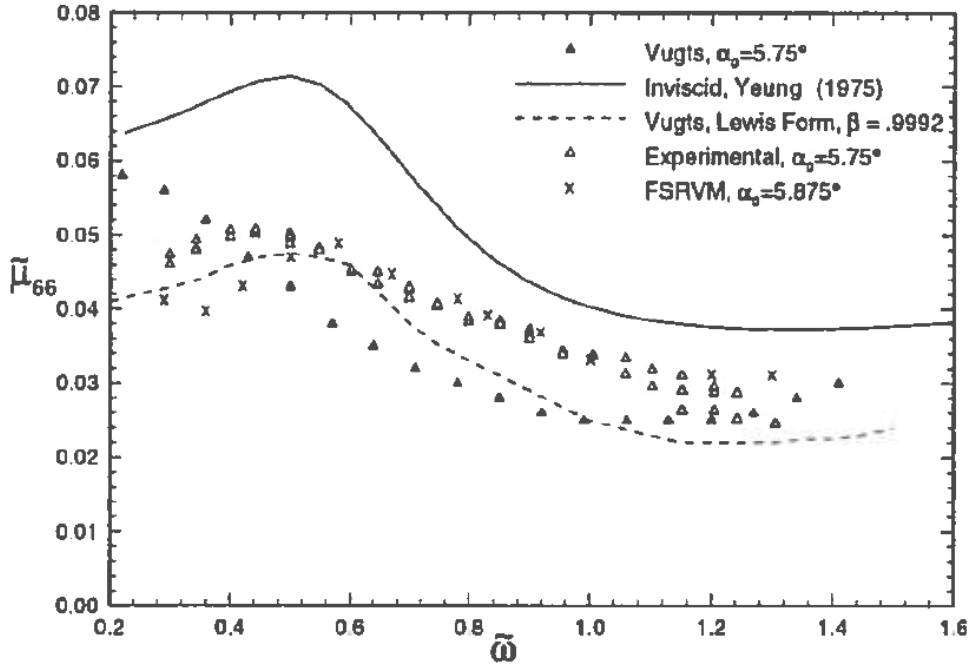
(d) Cisim çevresinde oluşan girdap ve hız vektörleri,

incelenmiş ve FSRVM yönteminin hem viskoz hem de viskoz olmayan kullanımına dair sayısal sonuçlara yer verilmiştir.

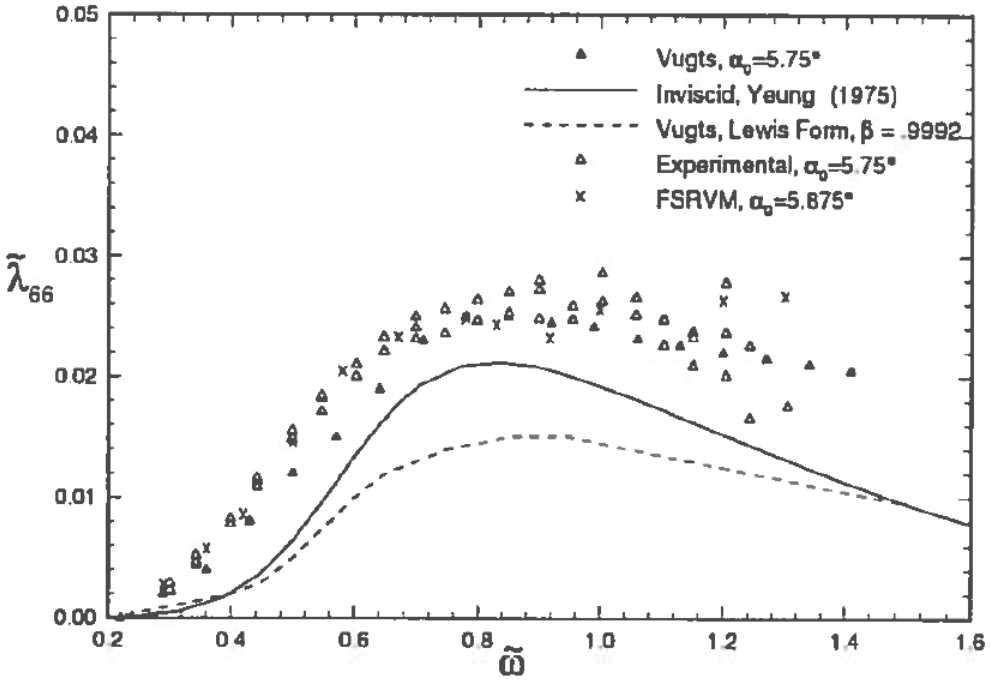
Yalpa hareketindeki sönüm moment katsayısının viskozitenin etkisi ile arttığı, viskoz olmayan sonuçlar ile deney ve sayısal çalışmaların karşılaştırılması suretiyle, tespit edilmiştir. Viskoz modellerin kullanımı nedeni ile uzak bölgedeki dalga genliklerinin, viskoz olmayan modellere göre düştüğü ifade edilmektedir. Viskoz modelin kullanımı sonucu elde edilen ek su kütle atalet momenti viskoz olmayan modellere nazaran düşük olduğu tespit edilmiştir. Vugts'un çalışmasının aksine, 0.1 radyanın üzerindeki hareketlerde ek su kütle atalet momentinde bir değişim olmadığını ifade etmiştir. Tez kapsamında incelenen konulara yönelik Yeung ve diğ. (1998)'nin çalışmasında verilmiş olan grafikler Şekil 2.3 - Şekil 2.7'de verilmiştir.



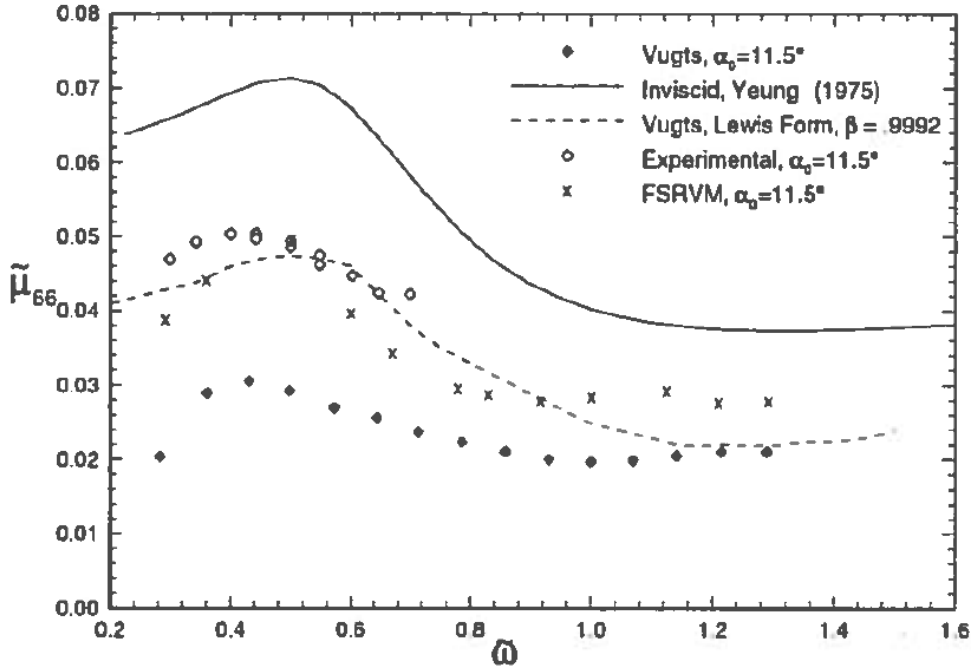
Şekil 2.3 : B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin ω^*=1.0'da φ_a = 0.1 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen boyutsuz momente ilişkin grafik, Yeung ve diğ. (1998).



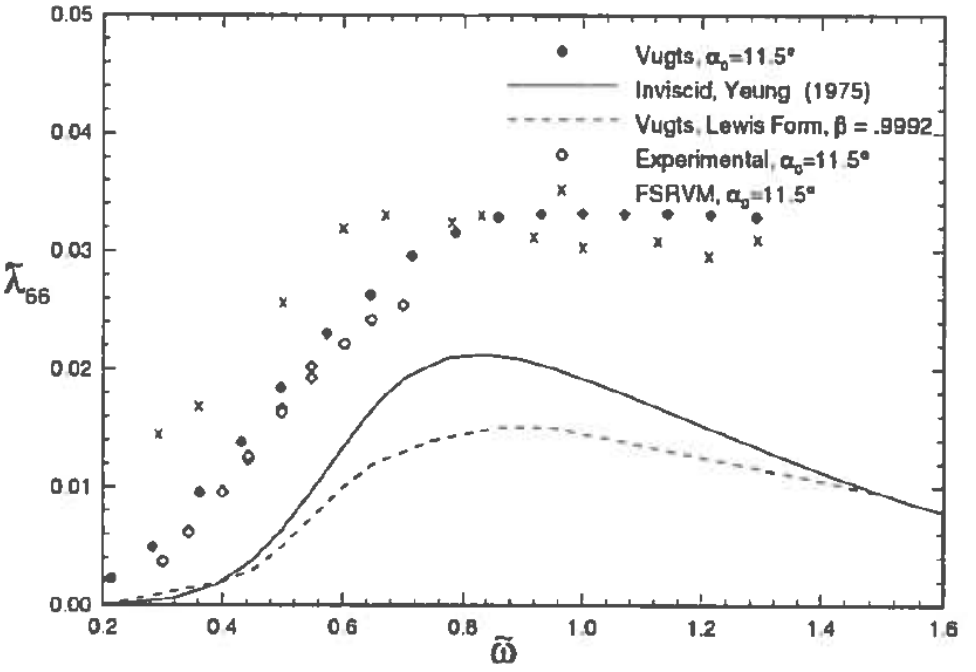
Şekil 2.4 : B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve φ_a = 0.1 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen ek su kütle atalet momenti değerleri, Yeung ve diğ. (1998).



Şekil 2.5 : B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve φ_a = 0.1 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen sönüm moment katsayısı değerleri, Yeung ve diğ. (1998) .



Şekil 2.6 : B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve φ_a = 0.2 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen ek su kütle atalet momenti değerleri, Yeung ve diğ. (1998).



Şekil 2.7 : B/T*=2 olan dikdörtgen kesitli cismin değişik açısal frekans ve φ_a = 0.2 radyan yalpa genliğinde hareket ettirilmesi neticesinde elde edilen sönüm moment katsayısı değerleri, Yeung ve diğ. (1998) .

Tez kapsamında karşılaştırma yapılmayacak olan fakat literatürde özel bir yeri olup bahsedilmesinde önem görülen çalışmalar ve içerikleri kısaca aşağıda belirtilmiştir:

(a) Ikeda ve diğ. (1978a, 1978b, 1979): 1970'lerin sonunda yapılan çalışmalar sonucunda sönüm moment katsayısının hesabı için ampirik bir formulasyon oluşturulmuştur. Sönüm moment katsayısını radyasyon, yüzey sürtünmesi, kaldırma, girdap (eddy) yapma ve yalpa omurgası bileşenlerinden oluştuğuna yönelik oluşturulmuş formulasyon halen endüstride ve akademik camiada kullanılmaktadır.

(b) Himeno (1981): Yalpa sönümünün kestirimine ilişkin hazırlanmış bir çalışmadır. Yalpa sönüm moment katsayısının radyasyon, yüzey sürtünmesi, girdap yapma, kaldırma ve yalpa omurga bileşenlerinden oluştuğuna işaret eden çalışma, Ikeda'nın formulasyonuna benzerlik göstermektedir. Vizkoz etkilerin çoğunluklar akış ayrışması ve girdap oluşumundan kaynakladığına vurgulayan Himeno, yüzey sürtünmesinin vizkoz sönümlenmede küçük bir etkisi olduğundan bahsedilmektedir.

(c) Standing (1992): Açık deniz ve petrol endüstrisinde kullanılan dubaların değişik B/T oranlarında yapılmış deneylerini içeren çalışmada DVM ile hesaplanmış sounçların da karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Deneyler esnasında kullanılan modellerde değişik boyutlarda yalpa omurgaları takılmış ve farklı sintine dönüm geometrileri de test edilmiştir. DVM yönteminin, keskin köşeli ve yalpa omurgası takılmış modellerde sönüm moment katsayısını gayet yakın bir şekilde yakaladığı fakat yuvarlatılmış modellerde sönüm moment katsayısını fazla verdiğine dikkat çekilmiştir. Yapılmış olan denemelere ilişkin için geniş bir test matrisi bu çalışma içerisinde bulunmaktadır.

2.1.3 Sayısal çalışmalar

Yalpa hareketinin incelenmesinde "Discrete Vortex Method" (DVM), "Random Vortex Method" (RVM), "Reynold Averaged Navier Stokes" (RANS) gibi çeşitli sayısal modeller kullanılmıştır. DVM yöntemi, sayılan yöntemler içerisinde popüler metodlardan biridir ve genellikle 70'lerin sonu ve 80'lerde tercih edilmiştir. Yalpa sönümlenmesinin hesaplanmasında DVM yöntemini ilk kullanan araştırmacılardan biri Bearman ve Graham (1979)'dır. Daha sonrasında Brown ve Patel (1981, 1986) tarafından DVM metodu kullanılarak duba için zorlanmış yalpa hareketinde yalpa sönüm moment katsayısının hesabı gerçekleştirilmiş olup serbest su yüzeyi ihmal edilmiştir. Downie ve diğ. (1984) ve Cozens (1987) yöntemi gemi kesitlerine uyarlamışlardır. Braathan ve Faltinsen (1988) serbest su yüzeyini çalışmalarına dahil etmişlerdir. Standing ve diğ. (1988) ile Brook ve Standing (1990) çalışmalarında DVM

yönteminin sönüm moment katsayısını yüksek yalpa genliklerinde fazla hesap ettiklerini ifade etmişlerdir.

Viskoz etkileri de içerecek şekilde RVM ilk olarak Chorin (1978) tarafından uygulanmıştır. Bu metodun sınırlarda akışı iyi bir şekilde tahmin edemediğini belirtmesinin ardından Chorin (1990) "Vortex Sheet Algorithm" kullanımı ile bu sorunun iyileştirilebilindiğini ifade etmiştir. Yeung ve Vaidyanathan (1994) RVM yöntemine serbest su yüzeyini de eklemişler ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

DVM yönteminin yalpa olayının fiziği ile bilgiye ihtiyaç duyması sebebi ile kullanımını kısıtlamakta olup RVM yönteminde ise böyle bir kısıt bulunmamaktadır. Ayrıca DVM ve RVM yöntemleri akış bölgesine vizkoziteyi suni olarak uygulamaktadır. Bilgisayarların hesaplama kapasitelerinin son yıllarda artması ile beraber gemi hareketleri, denizcilik ve manevra problemlerinde RANS denklemleri daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Chang ve diğ. (1996) ve Korpus Falzarano (1997) serbest su yüzeyini ihmal ederek ilk RANS uygulamalarını yapan bilim insanlarıdır. Gentaz ve diğ. (1996, 1997) ise serbest su yüzeyini çalışmalarına ekleseler de uygun sonuçlar üretememişlerdir. Jouette ve diğ. (1999) yılında 3-boyutta yalpa hareketi problemine ilişkin gayet olumlu sonuçlar yakalamışlardır fakat çözüm zamanının uzun olması nedeni ile verimli olmadığı değerlendirilmiştir. Daha sonrasında Sarkar ve diğ. (2000), Sarkar ve Vassalos (2000), Chen ve diğ. (2000), Wilson ve diğ. (2006) yine RANS yöntemini kullanarak yalpa hareketine ilişkin katsayıların tespitinde olumlu sonuçlara ulaşmışlardır. Sarkar ve diğ. (2000) ile Sarkar ve Vassalos (2000)'un çalışmalarında COMET programını kullanmışlardır.

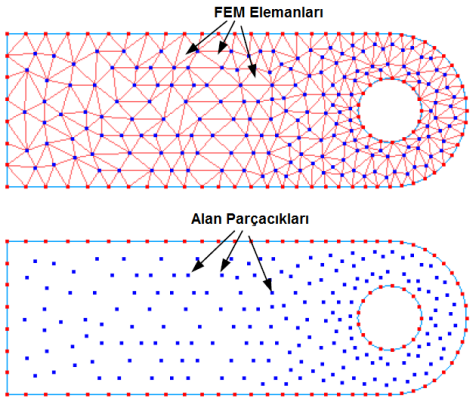
Son yıllarda paket programlar ve açık bilgisayar programlarının geliştirilmesi ve ek algoritmalar eklemesi suretiyle yalpa hareketine ilişkin incelemelerde bulunulmuştur. Querard ve diğ. (2009) 2 boyutlu cisimlere ANSYS-CFX 10.0'da dalıp-çıkma, yanal öteleme ve yalpa hareketleri yaptırmış ve Vugts (1968)'un deneysel çalışmalarına yakın sonuçlar elde etmiştir. Bonfiglio ve diğ. (2011) tarafından Navier-Stokes denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi ile çözümünü yapan OpenFOAM kullanılarak elde edilen katsayısıların karşılaştırılması yapılmış ve deneylerden elde edilen sonuçlara oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Henning (2011), Fluent ticari kodunu kullanarak 2-boyutlu gemi kesitleri için ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarını incelemiştir. Henning (2011)'in dalıp çıkma, yanal öteleme ve yalpa için FLUENT 2009'da çeşitli formlar için elde ettiği sonuçların Vugts (1968)'un

çalışmaları ile genelde uyumlu olduğunu ifade etmiştir. Jaouen ve diğ. (2011) MARIN'nin ReFRESCO kodunu kullanarak ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarını tespit etmişlerdir. RANS denklemlerini çözen ReFRESCO kodu ile elde ettikleri sayısal sonuçları, testlerden alınan sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve ReFRESCO'nun ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayısılarını doğru bir şekilde tespit ettiğini belirtmişlerdir. Yalnız çalışmalarında, grid ve zaman adımındaki değişimlerde ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayısının değişiminin yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

DVM, RVM ve RANS dışında Marker-and-cell (MAC) metodu kullanılarak iki ve üç boyutlu viskoz akışlar ve iki boyutta dalıp çıkma hareketi Nicholas ve Hirt (1977) tarafından çalışılmıştır.

2.2 Ağsız Yöntemler ve İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği ile İlgili Çalışmalar

Son zamanlarda, parçacıkların veya çözüm noktalarının problem bölgesine dağıtılması esasına dayanan yeni nesil sayısal çözümleyiciler kısmi türevli diferansiyel denklemlere uygulanmaya başlamıştır. Son on yıl içerisinde hızla gelişen bu çözümleyiciler FDM, FEM veya BEM gibi yöntemlerin çözmekte zorlandıkları problemlere verimli bir şekilde çözüm üretebilmektedirler (Colagrossi, 2004). Gelecek yıllarda ticari kodların gelişimi ile kullanımın daha da yaygınlaşacağı farz edilen yöntemin eleman yapısının oluşturulması aşamasında harcananan zamana ihtiyaç duyulmaması gibi nedenler ile tercih edileceği düşünülmektedir (Liu ve Liu, 2010). FEM ve ağsız yöntem ile bir parçanın temsili Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8 : FEM ve Ağsız Yöntem ile bir parçanın temsili, Liu ve Gu (2005).

2.2.1 Ağsız yöntemler

Son yıllarda günümüz problemlerin çözümünde sıkça kullanılmaya başlayan ve gün geçtikçe popüler bir hale gelen ağsız yöntemler üç ayrı şekilde sınıflandırılabilir. Ağsız yöntemlerin sınıflandırılması için Liu ve Gu (2005) tarafından önerilen tablo Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Ağsız yöntemlere ilişkin üç kategori, Liu ve Gu (2005).

Sınıflandırma	Categori	Örnek Ağsız Yöntem
Formulasyon prosedürüne dayalı	Güçlü formda yazılmış denklem sistemleri	MFree collocation metodu, FPoM, vb.
	Zayıf formda yazılmış denklem sistemleri	EFG, RPIM, MLPG, LRPIM, vb.
	Güçlü ve Zayıf formların kombinasyonları ile yazılmış denklem sistemleri	MWS, vb.
İnterpolasyon /yaklaşıma dayalı	MLS metodunu kullanan ağsız yöntemler	EFG, MLPG, vb.
	Fonksiyon yaklaşımını integral gösteriminde kullanan ağsız yöntemler	İPH, vb.
	PIM metodunu kullanan ağsız yöntemler	RPIM, LRPIM, vb.
	Diğer ağsız interpolasyon şekillerini kullanan yöntemler	PUFEM, hp-cloud, vb.
Çözüm bölgesi temsiline dayalı	Çözüm bölgesi tipindeki ağsız yöntemler	İPH, EFG, RPIM, MLPG, LRPIM, vb.
	Sınır tipine göre ağsız yöntemler	BNM, LBIE, BPIM, BRPIM, HBRPIM, vb.

Çizelge 2.1'de birinci sınıflandırma yöntemi olarak yer alan "formulasyon prosedürüne dayalı" tasnifin temelinde, sayısal olarak çözümlenecek denklemlerin zayıf ve/veya güçlü formda olmalarına bakılmaktadır. Güçlü form, diferansiyel denklemin klasik/geleneksel haliyken, zayıf form ise klasik halin alternatif bir şekilde gösterilmesidir. Güçlü formdaki bir diferansiyel denklemin, zayıf forma çevirimi denklem (2.1) – (2.8) arasında görülmektedir.

$$\frac{d}{dx}\left(-a\frac{du(x)}{dx}\right)=f(x) \qquad u(0)=0;\ -au_x(1)=-\theta \tag{2.1}$$

(2.1) denkleminde u, x'e bağlı bir değişken a bir katsayı olmak üzere, güçlü formdaki (2.1) denkleminin $g(0)=0$ olan sınır şartını sağlayan bir g fonksiyonu ile çarpılması sonucunda (2.2) denklemi elde edilir.

$$\left(-au(x)_x\right)_x g(x) = f(x)g(x) \tag{2.2}$$

(2.2) denkleminin sol tarafı, (2.3) denkleminin bir parçası olarak düşünülüp yeniden düzenlenmesi sonucunda (2.4) denklemi elde edilir.

$$\left(-au(x)_x\, g(x)\right)_x = \left(-au(x)_x\right)_x g(x) + \left(-au(x)_x\right)g(x)_x \tag{2.3}$$

$$\left(-au_x g\right)_x - \left(-au_x\right)g_x = fg \tag{2.4}$$

(2.4) denkleminin integre edilmesi sonucunda sırası ile (2.5) ve (2.6) denklemlerine ulaşılır.

$$\int_0^1 \left(-au(x)_x\, g(x)\right)_x dx - \int_0^1 \left(-au(x)_x\right)g(x)_x\, dx = \int_0^1 f(x)g(x)dx \tag{2.5}$$

$$\left|-au(x)_x\, g(x)\right|_0^1 + \int_0^1 \left(au(x)_x\right)g(x)_x\, dx = \int_0^1 f(x)g(x)dx \tag{2.6}$$

Sınır koşullarının (2.6) denkleminde oluşturulması sonrasında denklem (2.7) elde edilir.

$$-\theta g(1) + \int_0^1 \left(au(x)_x\right)g(x)_x\, dx = \int_0^1 f(x)g(x)dx \tag{2.7}$$

(2.7) denkleminin düzenlenmesi sonrasında, (2.8)'de verilmiş olan zayıf forma ulaşılır.

$$\int_0^1 \left(au(x)_x\right)g(x)_x\, dx = \int_0^1 f(x)g(x)dx + \theta g(1) \tag{2.8}$$

Zayıf formdaki denklemlerin kullanımı bir çok sayısal yöntemin karmaşık problemlere uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısı ile bir çok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır (Liu ve Gu, 2005), (Barth ve diğ., 2007).

Diğer bir sınıflandırma yönteminde ise çözüm bölgesi içerisine keyfi dağıtılmış olan noktaların arasında yapılan interpolasyon/yaklaşıma göre tasniftir. Bu sınıflandırma altında kullanılan yöntemler arasında hareketli en küçük kareler yöntemi, elemansız Galerkin yöntemi, lokal Petrov-Galerkin yöntemi, nokta interpolasyon yöntemi, fonksyonların integral fomundaki yaklaşımlar ve daha bir çok yöntem sayılabilir.

Diğer bir sınıflandırma ise çözüm bölgesinin temsiline göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırma çeşitinde, çözüm bölgesini oluşturan tüm noktalar ya problem bölgesindeki (dahili-field) parçacıklar yada sınır bölgesinde kullanılan parçacıklar ile temsil edilmelerine göre ayrılmaktadırlar.

Ağsız yöntemler ile ilgili olarak her geçen gün yeni bir uygulama literatüre dahil olmaktadır. Bu konu ile ilgili olarak daha detaylı bilgiye Liu ve Gu (2005)'ten erişilebilir.

2.2.2 İnterpolasyonlu parçacık hidrodinamiği

İlk olarak 1970 yılların sonunda astrofizik problemlerinin çözümünde Monaghan ve Gingold (1977)ve Lucy (1977) tarafından kullanılmaya başlayan İPH yöntemi daha sonra akışkan ve katı cisim problemlerine uygulanmıştır. İPH yöntemi, çözüm bölgesini oluşturan parçacıklarda yoğunluk, basınç, sıcaklık vb. parametrelerinin zaman içerisindeki değişiminin takip edildiği Lagrange temelli bir yöntemdir. FEM, FDM ve diğer ağ tabanlı yöntemlerin aksine İPH çözüm bölgesinde bir ağ yapısına ihtiyaç duymamaktadır.

İPH yöntemi literatürde bir çok farklı problem için uygulanmaktadır. Yıldız çarpışmaları ve ikili yıldızlar (Benz, 1990), çarpışma ve samanyolu oluşumu (Monaghan ve Lattanzio, 1991), magneto-hidrodinamik (Morris, 1996b), ısı iletimi (Monaghan, 1995), ısı transferi ve kütle akışı (Cleary, 1998), çalkantı problemi (Özbulut, 2014), metal şekillendirme (Bonet ve Kulasegaram, 2000), akışkan-katı etkileşimi problemleri (Eghtesad ve diğ., 2012) gibi bir çok problem uygulaması mevcuttur.

Problem uygulamaları dışında İPH yönteminin sayısal stabilitesi, yakınsaklığı, doğruluğu ve verimli olup olmadığı da literatürde bir çok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Morris (1996b), parçacıkların problem geometrisine dağıtılmasının sonuca etkilerini araştırmıştır. Fulk (1994) ve Benz (1990) İPH yöntemindeki hata

teriminin tespitine yönelik bir hayli detaylı çalışmalarda bulunmuşlardır. Belytschko ve diğ. (1998) İPH yönteminin stabilitesi ve yakınsaklığına ilişkin değişik analizler yapmışlar, ağsız yöntemler ve İPH'ın daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmuşlardır.

Literatürde, yöntemin uygulandığı problemlerde daha iyi sonuçlar alabilmek için, İPH'nin bir çok türevi de geliştirilmiştir. Chen ve diğ. (1999), problem bölgesinde ve sınırlardaki sonuçların daha iyi alınabilmesi için Düzeltici İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiğini (Corrective Smoothed Particle Method - CSPM) geliştirmiştir. CSPM yöntemi Liu ve diğ. (2003) tarafından süreksiz bölgelerdeki şok dalgalarının incelenmesine yönelik geliştirildi ve Süreksiz İnterpolasyonlu Parçacık Dinamiği (DSPH) adıyla yeni bir yöntem olarak literatüre girdi. Yine Liu ve diğ. (2005) tarafından İPH ve CSPM yöntemlerinin geliştirilmesi sonucunda Sonlu Parçacık Yöntemi (FPM) geliştirilmiştir. FPM'de problem geometrisine keyfi olarak dağıtılmış parçacıklarda temel fonksiyonların kullanılarak dinamik ve kinematik değişkenler takip edilmektedir. Batra ve Zhang (2004), FDM ile eş zamanlı olarak Değiştirilmiş İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (MSPH) yöntemini katı cisimler mekaniği problemlerinde kullanılmak üzere literatüre kazandırmıştır. Fang ve diğ. (2006) ise MSPH yöntemini serbest su yüzeyi problemlerine uygulanacak şekilde geliştirmiş ve sıkıştırılamaz viskoz akış problemlerinde uygulamışlardır. Sıkıştırılamaz viskoz akış problemlerinde geliştirdikleri bu yöntemin adını da Lagrange Sonlu Noktalar Yöntemi (LFPoM) olarak adlandırımışlardır. (Fang ve Parriaux, 2008). Literatürde İPH yönteminin daha bir çok türevi bulunmakta olup her geçen gün başka bir probleme uygulanmakta ve yeni bir yöntem geliştirilmektedir.

Yapılan literatür taramasında yalpa haretindeki ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarının İPH yöntemi kullanılarak tespitine yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu yönü ile bahsekonu çalışma literatürde bir ilk olma özelliğini taşımaktadır.

3. İNTERPOLASYONLU PARÇACIK HİDRODİNAMİĞİ YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği'nin uygulanmasında iki ana adım vardır. Bunlar sırası ile çekirdek/ağırlık yaklaşımı ve parçacık yaklaşımıdır. Çekirdek/ağırlık yaklaşımında problem bölgesi içerisindeki herhangi bir değişkenin bir ağırlık fonksiyonu yardımıyla ifade edilmesinden bahsedilecektir. Parçacık yaklaşımında ise problem bölgesinin parçacıklara ayrıklaştırılması neticesinde çekirdek/ağırlık yaklaşımı yapılmış olan değişkene ait integralin bir toplam ile ifade edilmesi incelenecektir. Yine bu bölüm altında ağırlık fonksiyonları, İPH yöntemindeki hata, sınır koşulları, zaman integrasyonu, stabilite koşulu ve etkileşime girecek parçacık tespiti konularına da değinilecektir.

3.1 Çekirdek/Ağırlık Yaklaşımı

Birinci adım olan çekirdek/ağırlık yaklaşımı (kernel approximation) olarak adlandırılmaktadır. Çekirdek yaklaşımı; herhangi bir kinematik ya da dinamik büyüklüğün, çözüm bölgesi içerisinde dağıtılmış parçacıklara bir ağırlık fonksiyonu ve türevleri ile atanması şeklinde ifade edilir. Çekirdek yaklaşımının, herhangi bir sürekli $f\left(x\right)$ fonksiyonu üzerindeki uygulaması (3.1)'den başlayarak özetlenmiştir. Bir fonksiyonun herhangi bir konumdaki değerinin diğer konumlardaki değerlerinin integrali şeklinde gösterimi (3.1)'da yer almaktadır.

$$f\left(\vec{x}_i\right)=\int_{\Omega} f\left(\vec{x}_j\right)\delta\left(\vec{x}_i-\vec{x}_j\right)d\vec{x}_{ij} \tag{3.1}$$

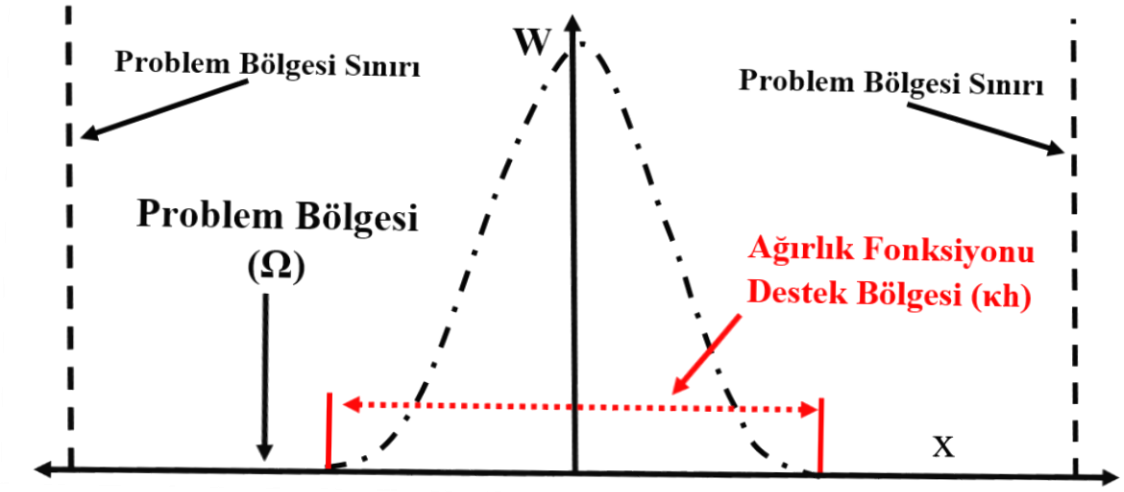
(3.1)'de Ω problem bölgesini, **i** indisi ilgilenilen parçacığını, **j** indisi etkileşime girilen parçacığı, $d\vec{x}_{ij}$ ağırlık fonksiyonunun etki alanı içerisindeki elemanter hacmi göstermektedir. $\delta\left(\vec{x}_j-\vec{x}_i\right)$ ise Dirac delta fonksiyonu olup açık yazılmış hali (3.2)'de verilmiştir.

$$\delta\left(\vec{x}_i - \vec{x}_j\right) = \begin{cases} 1 & \vec{x}_i = \vec{x}_j \\ 0 & \vec{x}_i \neq \vec{x}_j \end{cases} \tag{3.2}$$

(3.1)'deki delta fonksiyonu $\delta\left(\vec{x}_i - \vec{x}_j\right)$ yerini bir ağırlık fonksiyonu $W\left(\vec{x}_i - \vec{x}_j, h\right)$ ile değiştirirse, fonksiyonun integral gösterimi (3.3)'deki halini alır.

$$f\left(\vec{x}_i\right) \cong \int_{\Omega} f\left(\vec{x}_j\right) W\left(\vec{x}_i - \vec{x}_j, h\right) d\vec{x}_{ij} \tag{3.3}$$

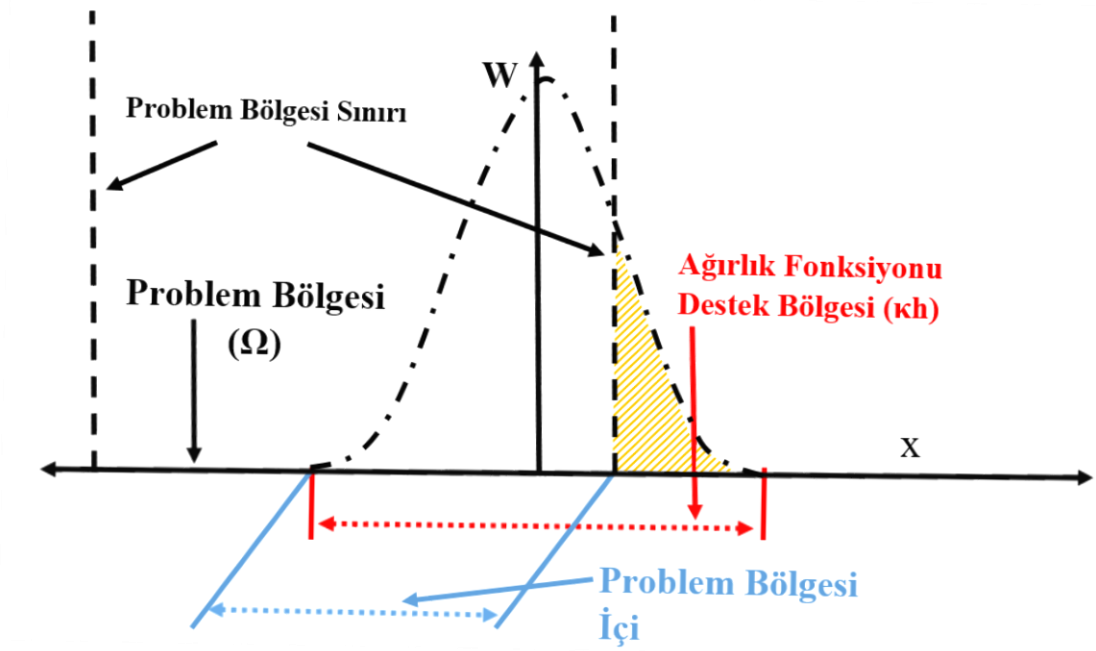
(3.3)'de $W\left(\vec{x}_i - \vec{x}_j, h\right)$ terimi ağırlık fonksiyonu (smoothing function / kernel function) olarak adlandırılmaktadır. $\vec{x}_{ij} = \vec{x}_i - \vec{x}_j$ parçacıklar arasındaki uzaklık vektörünü göstermek üzere ağırlık fonksiyonu $W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)$ şeklinde yazabiliriz. Ağırlık fonksiyonu içerisindeki h, interpolasyon uzunluğunu ifade etmektedir. İnterpolasyon uzunluğu, ağırlık fonksiyonun etkili olduğu mesafeyi κ katsayısının çarpımı ile birlikte belirlemektedir. Bu çalışmada κ=3 olarak alınmıştır. Ağırlık fonksiyonu, problem bölgesi, ağırlık fonksiyonu destek bölgesi terimleri ve birlikte kullanımları Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Ağırlık fonsiyonun, Ω ile tanımlanmış problem bölgesi içerisindeki değişimi ve ağırlık fonksiyonu destek bölgesi teriminin gösterimi.

Ağırlık fonksiyonun problem sınırı ile kesişmesi durumunda (Şekil 3.2'de gösterilmiştir), ağırlık fonksiyonunun problem bölgesi içi için aldığı değerler

kullanılmakta sınır dahil olmak üzere sınır dışına taşan kısmı (turuncu ile taranmış alan) sıfır değerini almaktadır.



Şekil 3.2: Ağırlık fonsiyonun, Ω ile tanımlanmış problem bölgesinin sınırları ile kesişmesi durumunda kullanımı.

Herhangi bir fonksiyonun integral gösterimi için kullanılmış olan (3.1) içerisindeki Dirac delta fonksiyonu $\delta\left(\vec{x}_i-\vec{x}_j\right)$, (3.3) içerisindeki ağırlık fonksiyonu $W\left(\vec{x}_i-\vec{x}_j,h\right)$ terimine eşit olmadığı için burada bir yaklaşım yapılmıştır. Literatürde çekirdek/ağırlık yaklaşımı olarak kullanılan isimlendirmenin kaynağı burada yapılan yaklaşımdır.

İPH yönteminde çekirdek yaklaşımı yapılmış olan fonksiyon "< >" ayraçlar arasında gösterilmektedir (Liu ve Liu, 2003), (Fulk, 1994). Ağırlık fonksiyonu $W\left(\vec{x}_{ij},h\right)$ terimi (3.3) çekirdek yaklaşımının yapıldığını göstermek amacıyla (3.4)'deki gibi ifade edilir.

$$f\left(\vec{x}_i\right)\cong\left\langle f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle=\int_{\Omega} f\left(\vec{x}_j\right)W\left(\vec{x}_{ij},h\right)d\vec{x}_{ij} \tag{3.4}$$

İPH yönteminde bir fonksiyonun türevini hesaplamak için (3.4) ifadesi kullanılırsa (3.5) elde edilir,

$$\vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right) \cong \left\langle \vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right) \right\rangle = \int_{\Omega} \vec{\nabla}\left[f\left(\vec{x}_j\right) W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} \tag{3.5}$$

$\vec{\nabla}\left[ab\right] = \left[\vec{\nabla} a\right] b + \left[\vec{\nabla} b\right] a$ çarpımın türevinin kullanılması ve ağırlık fonksiyonunun $-\partial W\left(r_{ij}, h\right) / \partial x_j = \partial W\left(r_{ij}, h\right) / \partial x_j$ özelliğinin kullanılması ile (3.6)'ya ulaşılır.

$$\left\langle \vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right) \right\rangle = \int_{\Omega} \vec{\nabla}\left[f\left(\vec{x}_j\right) W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} + \int_{\Omega} f\left(\vec{x}_j\right)\left[\vec{\nabla} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} \tag{3.6}$$

(3.6)'nın sağ tarafındaki ilk terime diverjans teoreminin ugulanması sonrasında (3.7) bulunmakta olup *S* problem bölgesinin sınırlarını, $\vec{n}$ ise yüzey normalini ifade etmektedir.

$$\left\langle \vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right) \right\rangle = \int_{S} f\left(\vec{x}_j\right) W\left(\vec{x}_{ij}, h\right) \vec{n} dS + \int_{\Omega} f\left(\vec{x}_j\right)\left[\vec{\nabla} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} \tag{3.7}$$

Hatırlanacağı üzere ağırlık fonksiyonunun sadece problem bölgesi içerisinde geçerli olduğundan bahsedilmişti, bu nedenle (3.7)'de yüzey integraline ilişkin kısım sıfır değerini almaktadır ve türev için (3.8)'deki ifade elde edilmektedir.

$$\left\langle \vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right) \right\rangle = \int_{\Omega} f\left(\vec{x}_j\right)\left[\vec{\nabla} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} \tag{3.8}$$

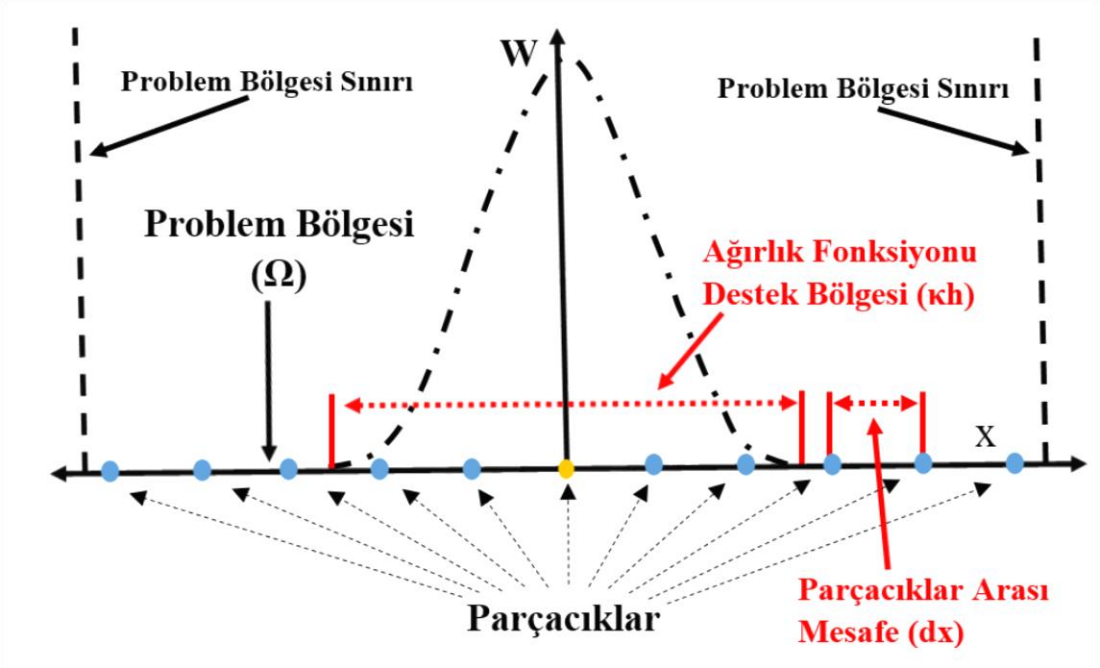
(3.8)'den de görüldüğü üzere bir fonksiyonun türevi alınmak istenildiğinde sadece ağırlık fonksiyonun türevi alınmaktadır. Daha yüksek mertebeden türev alınmak istenirse (3.9)'deki *d* indisinin değiştirilmesi suretiyle türev işlemi yapılır.

$$\left\langle \vec{\nabla}^d f\left(\vec{x}_i\right) \right\rangle = \int_{\Omega} f\left(\vec{x}_j\right)\left[\vec{\nabla}^d W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} \tag{3.9}$$

3.2 Parçacık Yaklaşımı

İkinci adım ise parçacık yaklaşımıdır (particle approximation). Parçacık yaklaşımı, çekirdek yaklaşımı yapılarak integral haline dönüştürülen fonksiyonun parçacıklara ayrıklaştırılarak bir toplam şeklinde ifade edilmesidir. Ağırlık fonksiyonun, Ω ile tanımlanmış problem bölgesi içerisindeki değişimine yönelik verilmiş olan Şekil 3.1

içerisine parçacıkların dağıtılmasıyla ayrıklaştırılmış problem bölgesi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Problem bölgesinin parçacıklara ayrıklaştırılması.

Çekirdek yaklaşımında belirtilmiş olan sonsuz küçük hacim $d\vec{x}_{ij}$'nin bir parçacığın hacmi olduğu ve ΔV_j'ye eşit olduğu kabul edilir . Dolayısı ile (3.3)'teki çekirdek yaklaşımı (3.10) şeklinde yazılabilir.

$$f\left(\vec{x}_i\right) \cong \left\langle f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle = \int_{\Omega} f\left(\vec{x}_j\right) W\left(\vec{x}_{ij}, h\right) d\vec{x}_{ij} \cong \sum_{j=1}^{N} f\left(\vec{x}_j\right) W\left(\vec{x}_{ij}, h\right) \Delta V_j \qquad (3.10)$$

(3.10)'da kullanılan *N*, *h* interpolasyon uzunluğu içerisinde kalan ve ilgilenilen parçacıkla etkileşime giren bütün parçacıkların toplam adedini ifade etmektedir. (3.10) parçacıklara yoğunlukları sabit olmak kaydıyla (3.11)'e göre bir ağırlık tayin edildikten sonra (3.12) gibi gösterilebilir:

$$m_j = \Delta V_j \rho_j \qquad (3.11)$$

$$\left\langle f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle \cong \sum_{j=1}^{N} f\left(\vec{x}_j\right) \frac{m_j}{\rho_j} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right) \qquad (3.12)$$

Benzer şekilde, sürekli herhangi bir fonksiyonun türevine parçacık yaklaşımı yapılırsa (3.13) edilir:

$$\left\langle \vec{\nabla}^d f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle \cong -\sum_{j=1}^{N} f\left(\vec{x}_j\right)\frac{m_j}{\rho_j}\vec{\nabla}^d W\left(\vec{x}_{ij},h\right) \tag{3.13}$$

Herhangi bir fonksiyonun ağırlık fonksiyonu kullanılarak ifade edilmiş olan halinin (3.3), problem bölgesine rastgele dağıtılmış parçacıklar ile ayrıklaştırılması sonrasında uygulanması ile (3.13) ikinci bir yaklaşım yapılmıştır. Literatürde parçacık yaklaşımı olarak kullanılan isimlendirmenin kaynağı burada yapılan yaklaşımdır.

3.3 Ağırlık Fonksiyonu

Ağsız yöntemler ile doğru sonuçlar almak için en önemli öğelerden biri doğru ağırlık fonksiyonun seçilmesidir. Ağırlık fonksiyonu 3.1 ve 3.2 bölümlerinde bahsedilmiş olan çekirdek ve parçacık yaklaşımlarının uygulanmasında rol oynamaktadır. Fulk, (1994) 1-boyutlu problemler için çeşitli ağırlık fonksiyonlarını araştırmış ve düzgün dağıttılmış parçacıklar için elde ettiği sonuçları doğrulamasını yapmıştır. Morris (1996a, 1996b) bir çok ağırlık fonksiyonun performansını değerlendirmiş ve uygun ağırlık fonksiyonunun seçimi ile sonuçların duyarlılık, stabilitelerinin arttırılabileceğini ifade etmiştir. Capuzzo ve Di Lisio (2000) yaptığı çalışmalarında ağırlık fonksiyonun seçimine yönelik kriter belirlemişlerdir. Seçimine, kullanımına yönelik çok çeşitli araştırmaların yapıldığı ağırlık fonksiyonlarının temel özellikleri ve sağlaması gereken kriterler şu şekilde sıralanabilir.

(a) Birim özelliği (Unity property): Ağırlık fonksiyonu problem bölgesi içerisinde integrasyonu bire eşit olmalıdır (3.14).

$$\int_{\Omega} W\left(\vec{x}_{ij},h\right)d\vec{x}_{ij} = 1 \tag{3.14}$$

(b) Pozitif olma özelliği (Positivity): Ağırlık fonksiyonu çözüm bölgesi içerisindeki bütün noktalarda pozitif değer almalıdır (3.15).

$$W\left(\vec{x}_i - \vec{x}_j\right) \geq 0 \tag{3.15}$$

(c) Dirac delta fonksiyonu özelliği (Delta function): Ağırlık fonksiyonu interpolasyon uzunluğu 0'a yaklaşırken, Dirac delta fonksiyonu sağlamalıdır.

$$\lim_{h\to 0} W\left(x_i - x_j, h\right) = \delta\left(x_i - x_j\right) \tag{3.16}$$

(ç) Monoton olarak azalma özelliği (Decay): Ağırlık fonksiyonu, ilgilenilen parçacıktan uzaklaştıkça azalmalıdır. Bir başka deyişle *h* içerisinde, en uzaktaki noktanın ilgilenilen parçacığa etkisi en az olmalıdır. Bu özellik Şekil 3.3'te görülmektedir.

(d) Simetriklik özelliği (Symmetric property): Ağırlık fonksiyonu çift fonksiyon olmalıdır ve ilgilenilen parçacıktan aynı uzaklıkta fakat farklı doğrultudaki etkileşim parçacıkları için eşit değer vermelidir. Şekil 3.3'te x ekseni üzerinde ortadaki parçacığa eşit uzaklıktaki sağ ve sol parçacıklarının ağırlık fonksiyonu değerleri eşittir.

(e) Süreklilik/Düzgünlük özelliği (Smoothness): Problemlerin çözümün parçacık dağılımından etkilenmemesi ve sayısal stabilitesinin yeterli olabilmesi için, ağırlık fonksiyonun bu özelliği sağlaması gerekmektedir.

(f) Tam desteklenme özelliği (Compact support): Ω bölgesi dışında ağırlık fonsiyonu 0'a eşit olmalıdır (3.17).

$$W\left(x_i - x_j, h\right) = 0, \quad \left|x_i - x_j\right| > h \tag{3.17}$$

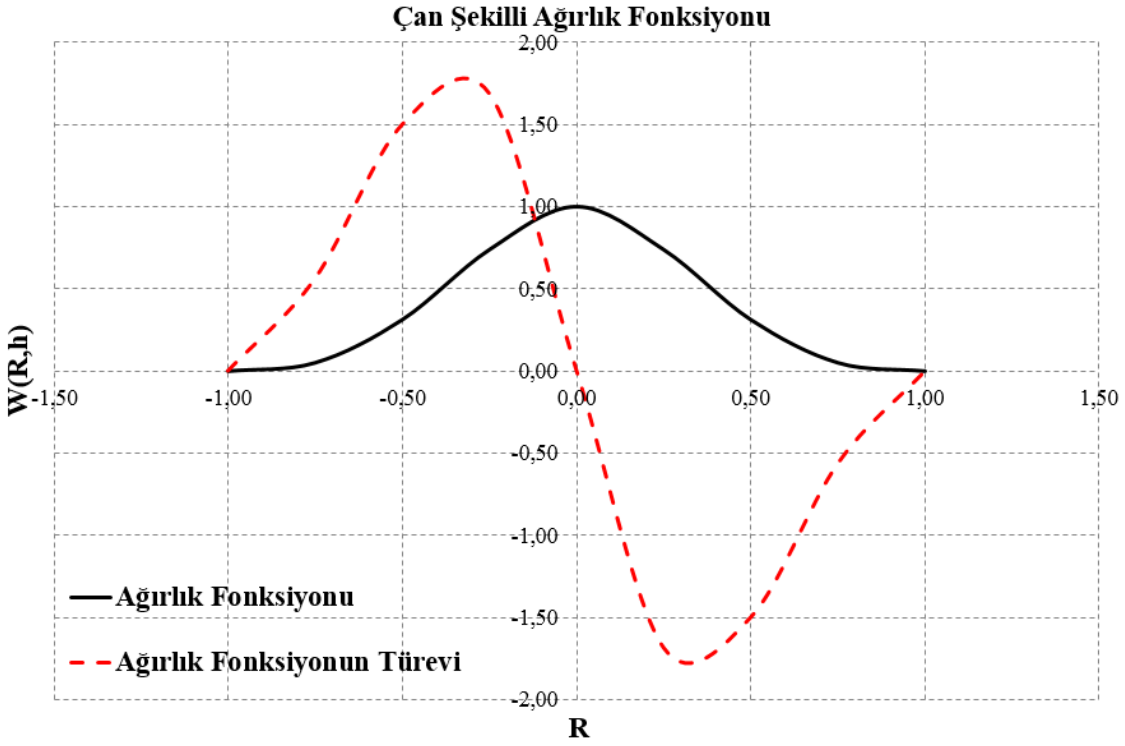
Yukarıda belirtilmiş olan koşulları sağlayan çeşitli tipte ağırlık fonksiyonları vardır. Bunlar arasında en bilinenleri ve ilk kullanıldıkları çalışmalar Gauss fonksiyonları (Monaghan ve Gingold, 1977), kübik eğri (cubic spline) (Monaghan ve Lattanzio, 1985), çan şekilli fonksiyon (Lucy, 1977), dördüncü (quadratic) dereceden eğri fonksiyonlar (Morris, (1996a, 1996b), Johnson ve diğ., (1996), beşinci (quintic) dereceden eğri fonksiyonlar (Morris, 1996a, 1996b) şeklindedir.

Lucy (1977) tarafından kullanılmış olan çan şekilli fonksiyon (3.18)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} W\left(x_i - x_j, h\right) &= W\left(R, h\right) \\ &= \alpha_d \begin{cases} \left(1+3R\right)\left(1-R\right)^3, & R \le 1, \\ 0, & R > 1, \end{cases} \end{aligned} \tag{3.18}$$

İPH yönteminde kullanılan ilk parçalı fonksiyon olan (3.18)'de, α_d problemin geometrisine göre değişmektedir. Problemin boyutuna göre 1-boyutta $5/4h$'ye, 2-boyutta $5/\pi h^2$'ye ve 3-boyutta $105/16\pi h^3$'e eşittir. R uzalığı parçacıklar arasındaki

bağıl mesafe olup $R = \frac{r}{h} = \frac{|x_i - x_j|}{h}$'e eşittir. Şekil 3.4'te çan şekilli ağırlık fonksiyonu ve fonksiyonun türevi gösterilmiştir.



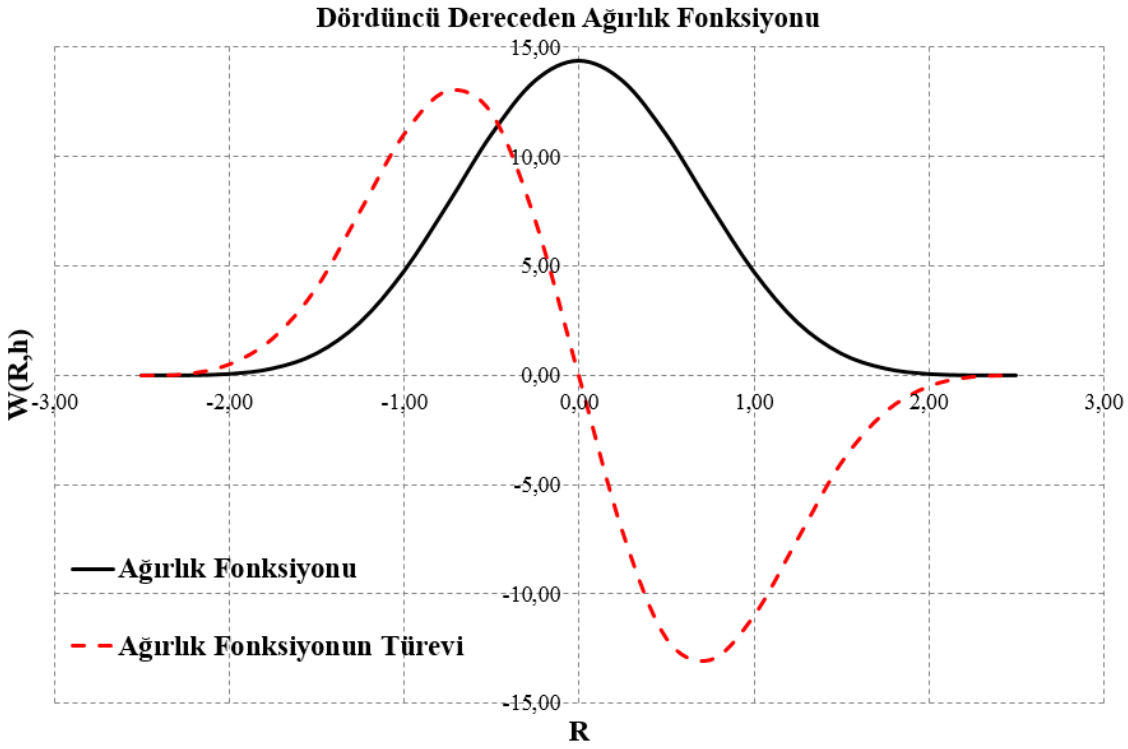
Şekil 3.4: Lucy (1977) tarafından kullanılan çan şekilli ağırlık fonksiyonu ve türevi.

İlk olarak Morris (1996a, 1996b) tarafından önerilmiş olan yüksek merteben ağırlık fonksiyonlarının, Gauss fonksiyonlarına oranla daha yaklaşık ve stabil çözüm verdiği Liu ve Liu (2010) tarafından belirtilmektedir. Morris (1996a, 1996b)'e ait olan dördüncü dereceden ağırlık fonsiyonu (2.27)'de verilmiştir.

$$W\left(x_i - x_j, h\right) = W\left(R, h\right)$$

$$= \alpha_d \begin{cases} \left(R+2.5\right)^4 - 5\left(R+1.5\right)^4 + 10\left(R+0.5\right)^4, & 0 \le R < 0.5, \\ \left(2.5-R\right)^4 - 5\left(1.5-R\right)^4, & 0.5 \le R < 1.5, \\ \left(2.5-R\right)^4, & 1.5 \le R < 2.5 \\ 0, & R \ge 2.5 \end{cases} \quad (3.19)$$

α_d katsayı olup, 1-boyutta $1/24\,h$'ye eşittir. Şekil 3.5'te Morris (1996a, 1996b) tarafından kullanılmış olan dördüncü dereceden ağırlık fonksiyonu ve fonksiyonun türevi gösterilmiştir.



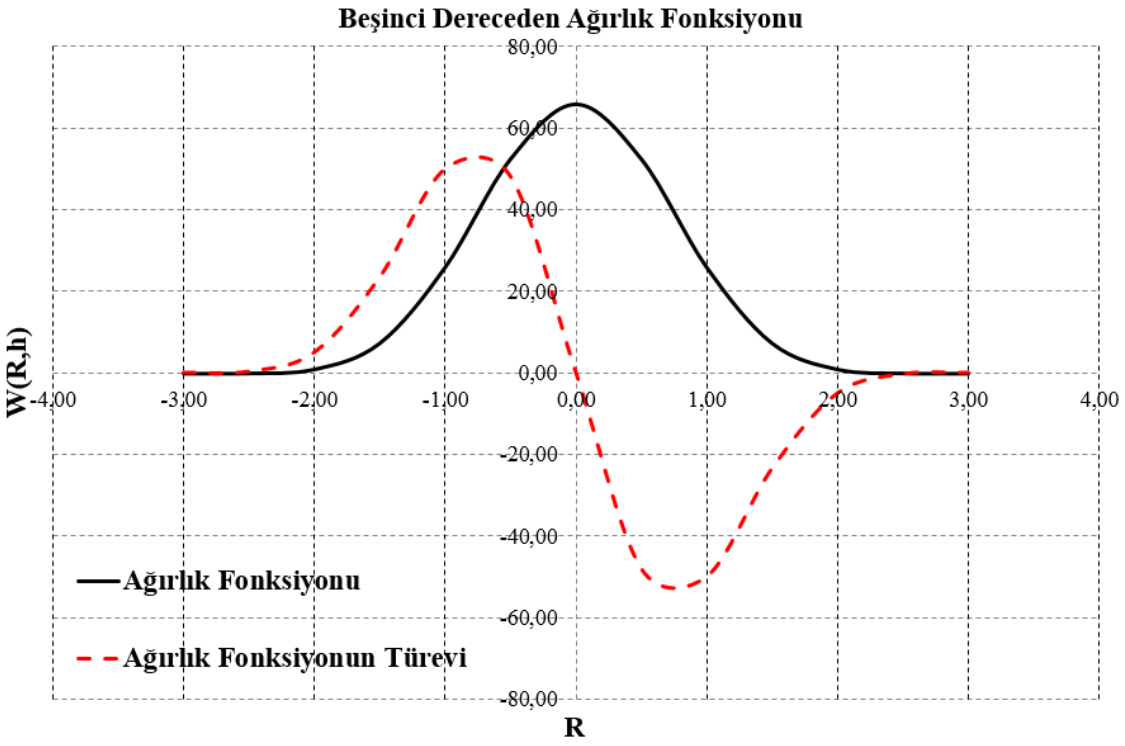
Şekil 3.5: Morris (1996a, 1996b) tarafından kullanılmış olan dördüncü dereceden ağırlık fonksiyonu ve türevi.

Morris (1996a, 1996b) tarafından kullanılmış olan beşinci dereceden ağırlık fonsiyonu (2.28)'de verilmiştir. Fonksiyonun ve türevinin değeri Şekil 3.6'da verilmiştir.

$$W\left(x_i - x_j, h\right) = W\left(R, h\right)$$

$$= \alpha_d \begin{cases} \left(3-R\right)^5 - 6\left(2-R\right)^5 + 15\left(1-R\right)^5, & 0 \le R < 1, \\ \left(3-R\right)^5 - 6\left(2-R\right)^5, & 1 \le R < 2, \\ \left(3-R\right)^5, & 2 \le R < 3 \\ 0, & R \ge 3 \end{cases} \qquad (3.20)$$

Literatürde yer alan diğer ağırlık fonksiyonları, ağırlık fonksiyonların oluşturulma koşulları, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları, ağırlık fonksiyonu seçim kriterleri ile ilgili daha detaylı bilgilere Liu ve Liu (2003), Liu ve Liu (2010) ve Özbulut (2013)'ten ulaşılabilir.



Şekil 3.6: Morris (1996a, 1996b) tarafından kullanılmış olan beşinci dereceden ağırlık fonksiyonu ve türevi.

3.4 İPH Yönteminde Hata

Çekirdek yaklaşımının hatası $O(h^2)$ veya diğer bir deyişle ikinci dereceden bir metoddur (Monaghan, (1982), Benz, (1990), Colagrossi, (2004), Pakozdi, (2008)). Hata teriminin tespiti için sürekli herhangi bir $f\left(\vec{x}_j\right)$ fonksiyonuna Taylor açılımını uygularsak (3.21)'u elde ederiz.

$$\begin{aligned} f\left(\vec{x}_j\right) &= f\left(\vec{x}_i\right)+\left(\vec{x}_j-\vec{x}_i\right)\vec{\nabla}f\left(\vec{x}_i\right)+\frac{1}{2}\left(\vec{x}_j-\vec{x}_i\right)^2\vec{\nabla}^2 f\left(\vec{x}_i\right)+\ldots \\ &= f\left(\vec{x}_i\right)+h\frac{\left(\vec{x}_j-\vec{x}_i\right)}{h}\vec{\nabla}f\left(\vec{x}_i\right)+\frac{1}{2}h^2\frac{\left(\vec{x}_j-\vec{x}_i\right)^2}{h^2}\vec{\nabla}^2 f\left(\vec{x}_i\right)+O\left(h^3\right) \end{aligned} \tag{3.21}$$

(3.21)'i (3.3) içerisine koyarsak,

$$\left\langle f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle = \int_{\Omega}\left[f\left(\vec{x}_i\right) + h\frac{\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)}{h}\vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right) + \frac{1}{2}h^2\frac{\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)^2}{h^2}\vec{\nabla}^2 f\left(\vec{x}_i\right) + O\left(h^3\right)\right] W\left(\vec{x}_{ij}, h\right) d\vec{x}_{ij} \tag{3.22}$$

düzenlersek,

$$\left\langle f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle = f\left(\vec{x}_i\right)\int_{\Omega} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right) d\vec{x}_{ij} + h\vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right)\int_{\Omega}\left[\frac{\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)}{h} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} + \frac{1}{2}h^2\vec{\nabla}^2 f\left(\vec{x}_i\right)\int_{\Omega}\left[\frac{\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)^2}{h^2} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} + O\left(h^3\right) \tag{3.23}$$

Çekirdek fonksiyonun birim özelliği (3.14) gereği $\int_{\Omega} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right) d\vec{x}_{ij} = 1$, dir o zaman $f\left(\vec{x}_i\right)\int_{\Omega} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right) d\vec{x}_{ij} = f\left(\vec{x}_i\right)$ olur, ağırlık fonksiyonun bu özelliğini kullanarak (3.23)'ü yeniden düzenlersek,

$$\left\langle f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle = f\left(\vec{x}_i\right) + h\vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right)\int_{\Omega}\left[\frac{\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)}{h} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} + \frac{1}{2}h^2\vec{\nabla}^2 f\left(\vec{x}_i\right)\int_{\Omega}\left[\frac{\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)^2}{h^2} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} + O\left(h^3\right) \tag{3.24}$$

$W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)$ fonksiyonunun çift, $\frac{\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)}{h}$ fonksiyonun tek olması nedeni ile,

$$h\vec{\nabla} f\left(\vec{x}_i\right)\int_{\Omega}\left[\frac{\left(\vec{x}_j - \vec{x}_i\right)}{h} W\left(\vec{x}_{ij}, h\right)\right] d\vec{x}_{ij} = 0 \tag{3.25}$$

(2.25)'i (2.24) içine eklenip, $b=\int_{\Omega}\left[\frac{\left(\vec{x}_j-\vec{x}_i\right)^2}{h^2}W\left(\vec{x}_{ij},h\right)\right]d\vec{x}_{ij}$ katsayısı olduğunu farz edilirse, (3.26) eşitliği elde edilmektedir.

$$\left\langle f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle = f\left(\vec{x}_i\right)+c\left(\vec{\nabla}^2 f\left(\vec{x}_i\right)\right)h^2+O\left(h^3\right) \tag{3.26}$$

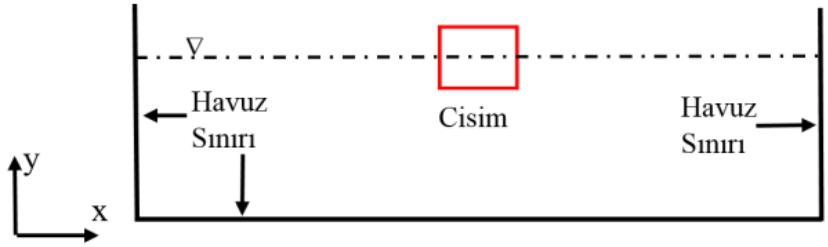
(2.26) eşitliğinden dolayı; herhangi sürekli bir $f\left(\vec{x}_i\right)$ fonksiyonuna, $\left\langle f\left(\vec{x}_i\right)\right\rangle$ ile çekirdek yaklaşımı yapıldığında ikinci dereceden yakınsaklık sağlanmaktadır.

3.5 Sınır Koşulları

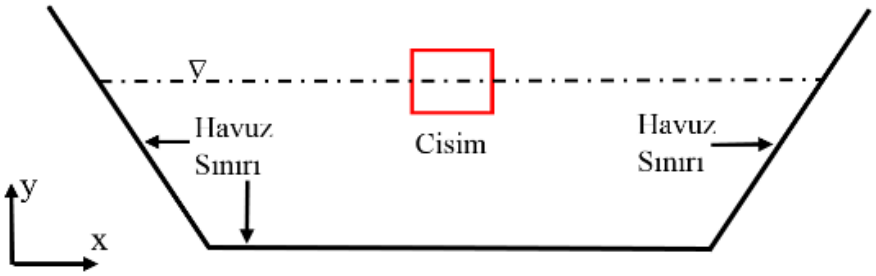
Benz (1990), İPH yönteminin diğer sayısal yöntemlere nazaran en zayıf yönünün sınır şartları olduğunu belirtmektedir. Diğer taraftan, Colagrossi (2004) ise katı sınır şartlarının İPH için bir geri adım olduğunu fakat serbest su yüzeyi şartının sağlanmasının bir avantaj olduğunu savunmaktadır. Benzer şekilde, Abbas (2008) hareketli ve şekil değiştiren sınırların tanımlanmasının İPH yönteminde ağlı yöntemlere nazaran daha kolay olduğunu ifade etmektedir. İPH literatürü incelendiğinde bu konuya ilişkin halen net bir karara varılamadığı gibi farklı tipteki sınır koşullarının uygulanmasına yönelik çeşitli uygulamalar yer almaktadır. Bu başlık altında İPH yönteminde en çok tercih edilen sınır koşullarından ve bu çalışmada kullanılan sınır koşullarının özelliklerinden bahsedilecektir.

Sınır koşulları ile ilgili detaylara geçmeden önce bu tez kapsamında çözülmesi hedeflenen problemin geometrisinin verilmesinin hangi tip sınır koşullarının oluştuğunun anlaşılmasında faydalı olacağı düşünülmüştür. Şekil 3.7'de verilen iki farklı tipteki havuz içerisinde yalpa problemi çözdürülecek olduğundan katı sınır koşulları yatay, düşey ve eğik duvarlara uygulanacaktır. Bunun yanı sıra her iki tip havuz geometrisindeki çözümde serbest su yüzeyi sınır ve cisim sınır şartlarından yararlanılacaktır.

a. Dikdörtgen Kesitli Havuz



b. Yamuk Kesitli Havuz



Şekil 3.7: Tezde kullanılan problem geometrilerine ilişkin gösterim.

3.5.1 Katı sınır koşulları

Katı cisimlerin duvarlarının oluşturulmasında birçok yöntem olmakla beraber bu çalışmada en yaygın kullanımı olan üç yönteme yer verilecektir.

İlk yöntem literatüre Monaghan (1994) tarafından kazandırılan, katı sınır parçacıkları tarafından akışkan parçacıklarına bir kuvvet uygulanan ve bu sayede akışkan parçacıklarının problem bölgesi içerisinde tutulmasının sağlandığı yöntemdir (Bui ve diğ., 2007). Bu yönteme geri ittirme (repellent) yöntemi de denilmektedir.

$$F = \begin{cases} D\left[\left(\dfrac{r_0}{r_{ij}}\right)^{n_1} - \left(\dfrac{r_0}{r_{ij}}\right)^{n_2} \dfrac{\vec{x}_{ij}}{r_{ij}^2}\right], & \left(\dfrac{r_0}{r_{ij}}\right) \le 1 \\ 0, & \left(\dfrac{r_0}{r_{ij}}\right) > 1 \end{cases} \tag{3.27}$$

(3.27)'de n_1, n_2 katsayıları sırası ile 12 ve 6'ya eşittir. D parametresi ise problem bölgesi içerisindeki parçacıklar arasındaki en yüksek hız değerinin karesi ile orantılı bir sayıdır. r_0 kesme mesafesi (cut off distance) olarak anılmakta ve h mesafesine

yakın bir değer seçilmektedir. r_{ij} ise hayalet parçacık ve ile ilgili akışkan parçacığı arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Birinci yöntemin değişik bir uygulaması yine Monaghan (2004) tarafından geliştirilmiş olup katı sınırlardan içeri akışkan parçıklarının sızmasını engellemek amacıyla akışkan parçacıklarına bir itme kuvvetinin uygulanması esasına dayanmaktadır. Su içerisinde hareket eden bir nesneye uygulanan bileşke kuvvetin analitik olarak elde edilmesinden yola çıkan Monaghan (2004), cisme etki eden kuvvetleri teğet ve normal kuvvetler olmak üzere ikiye ayırmıştır. Monaghan (2004)'ün toplam kuvvete ilişkin yaklaşımı (3.28)'da görülmektedir.

$$B(x,y)=\chi(x)\Gamma(y) \tag{3.28}$$

(3.28)'de $\chi(x)$ normal kuvvet bileşenini, $\Gamma(y)$ ise teğet kuvveti bileşenini ifade etmekte olup kuvvetlerin açılmış halleri sırası ile (3.29) ve (3.30)'de verilmiştir.

$$\chi(x)=\begin{cases}\left(1-\dfrac{x}{\Delta p}\right), & 0<x<\Delta p,\\ 0 & x\le 0, x\ge \Delta p,\end{cases} \tag{3.29}$$

$$\Gamma(y)=\beta\begin{cases}\dfrac{2}{3}, & 0<q\le\dfrac{2}{3},\\ \left(2q-\dfrac{3}{2}q^2\right), & \dfrac{2}{3}<q<1,\\ \dfrac{1}{2}(2-q), & 1\le q<2,\\ 0 & q\ge 2\end{cases} \tag{3.30}$$

(3.29)'de Δp sınır parçacıkları arasındaki mesafedir. Bu parametre akışkan parçacıklarının paralel olarak hareket etmesine olanak sağlamaktadır. (2.38)'deki q yatay uzaklığın interpolasyon uzunluğuna oranı $\left(y/h\right)$, β ise c ses hızı olmak üzere, $\left(0.02c^2/y\right)$'e eşit bir katsayıdır.

İkinci yöntem dinamik sınır şartları olarak geçmektedir ve Crespo (2008)'ya göre İPH dünyasında en çok kullanılan sınır şartıdır. Katı cisme ait duvar parçacıkları akışkan parçacıkları ile aynı özelliklere sahiptir ve akışkan parçacıklarına uygulanan hal denklemi, süreklilik denklemi, momentum ve enerji denklemleri aynen uygulanmaktadır. Akışkan parçacıklarından tek farkları ise yer değiştirmemekte sabit

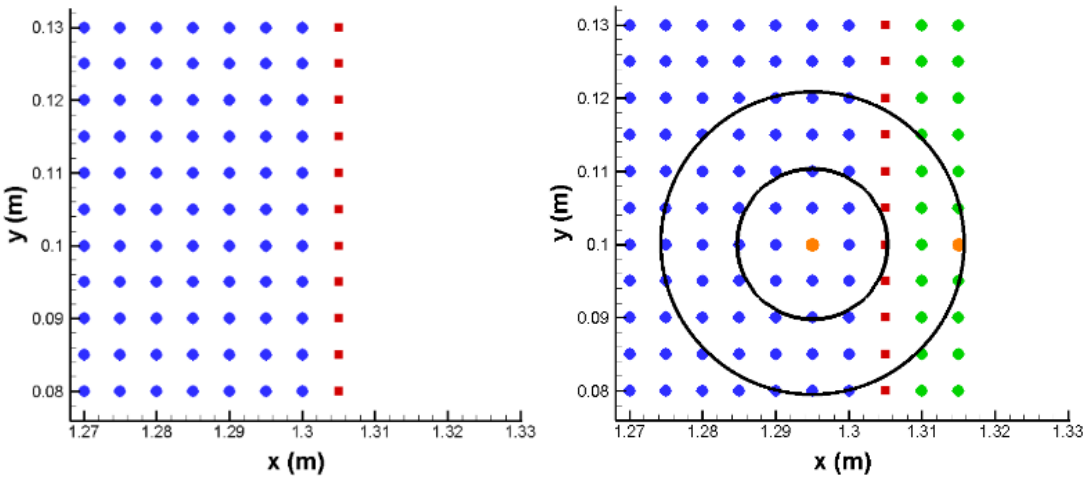
pozisyonlarını korumalarıdır. Bu yöntem ilk olarak Dalrymple ve Knio (2001) tarafından kullanılmış daha sonraları Gomez-Gesteira ve diğ. (2005), Crespo ve diğ. (2007) gibi araştırmacılar tarafından da uygulanmıştır. Yine bu yöntemde de birinci yönteme benzer olarak duvar parçacıkları tarafından akışkan parçacıklarına bir itme (repulsive) kuvvet uygulanmakta olup, özellikle dalga yapıcılara ve kayan yüzeylere ihtiyaç olduğu durumlarda uygulanmıştır. Yöntemin sayısal formülasyonu, farklı problemlere uygulanması ve elde edilen sonuçlar için Crespo (2008)'e bakılabilir.

Katı sınırların oluşturulmasında üçüncü olarak sabit ve hayalet (ghost/virtual) parçacıkların birlikte kullanımlarını içeren ve bu çalışmada da bir türünün kullanıldığı yöntemden bahsedilecektir. İlk olarak Libersky ve diğ. (1993) tarafından uygulanan daha sonra Randles ve Libersky (1996) tarafından geliştirilen yöntemin temelinde sabit sınır elemanlarına belirli bir uzunluktan daha yakın olan akışkan parçacıkları için hayalet parçacık oluşturulması ve bu hayalet parçacığa parçacığın oluşturulmasına neden olan akışkan parçacığın alan değerlerinin atanarak ilgili denklemlerin işletilmesi yatmaktadır. Yöntemin uygulaması Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

Şekil 3.8'de mavi parçacıklar akışkanı, kırmızı parçacıklar sınırları, yeşil parçacıklar ise hayalet parçacıkları göstermektedir. Şekil 3.8a'da görülen akışkan parçacıkları ile sınır parçacıkları arasında belirlenenden daha az mesafe olanlar için oluşturulmuş hayalet parçacıklar Şekil 3.8b'de görülmektedir. Belirlenmiş olan mesafe Şekil 3.8b'de iki adet çemberden içteki siyah daire olup, dıştaki siyah daire ile ağırlık fonksiyonunun etkili oluduğu bölgenin sınırları belirtilmektedir. İçteki siyah çemberin merkezinde olan akışkan parçacığı için üretilmiş olan hayalet parçacık yine Şekil 3.8b'de turuncu ile görülmektedir. Üretilmiş olan hayalet parçacıklar sınır parçacıklarına göre akışkan parçacıklarının ayna simetriği konumundadır.

a. Akışkan ve Sınır Parçacıkları

b. Akışkan, Sınır ve Hayalet Parçacıkları



Şekil 3.8: Hayalet parçacıkların oluşturulması.

Bu çalışmada uygulanmış olan katı sınır, üçüncü yönteme benzeyen ve ilk defa Colagrossi ve Landrini (2003) tarafından uygulanmış ve sınırlar yakınındaki veya sınırlara yaklaşan akışkan parçacıklarına mümkün olduğunca homojen bir kuvvet etkilettirerek, akışkan parçacıklarının sınırlara sızmasını engelleyen bir metoddur. Hayalet parçacıkların mevkilerinin belirlenmesinde Şekil 3.9'da gösterilmiş olan mantık kullanılmakta olup düşey duvarda uygulamaya ilişkin matematiksel ifadeler x ekseninde ve y ekseninde olmak üzere sırası ile (3.31) ve (3.32)'da verilmiştir. "G" indisi hayalet parçacığı, "F" indisi akışkanı, "B" indisi ise duvarı temsil etmektedir.

$$x_{G_i} = \left(2x_B - x_{F_i}\right) \tag{3.31}$$

$$y_{G_i} = y_{F_i} \tag{3.32}$$

Hayalet parçacıklarına ait diğer parametrelerin atanmasında;

- Basınç ve yoğunluk için ς herhangi bir değişkeni temsil etmek üzere, Neumann sınır koşulu (3.33),

$$\varsigma_{tG_i} = \varsigma_{tF_i} \tag{3.33}$$

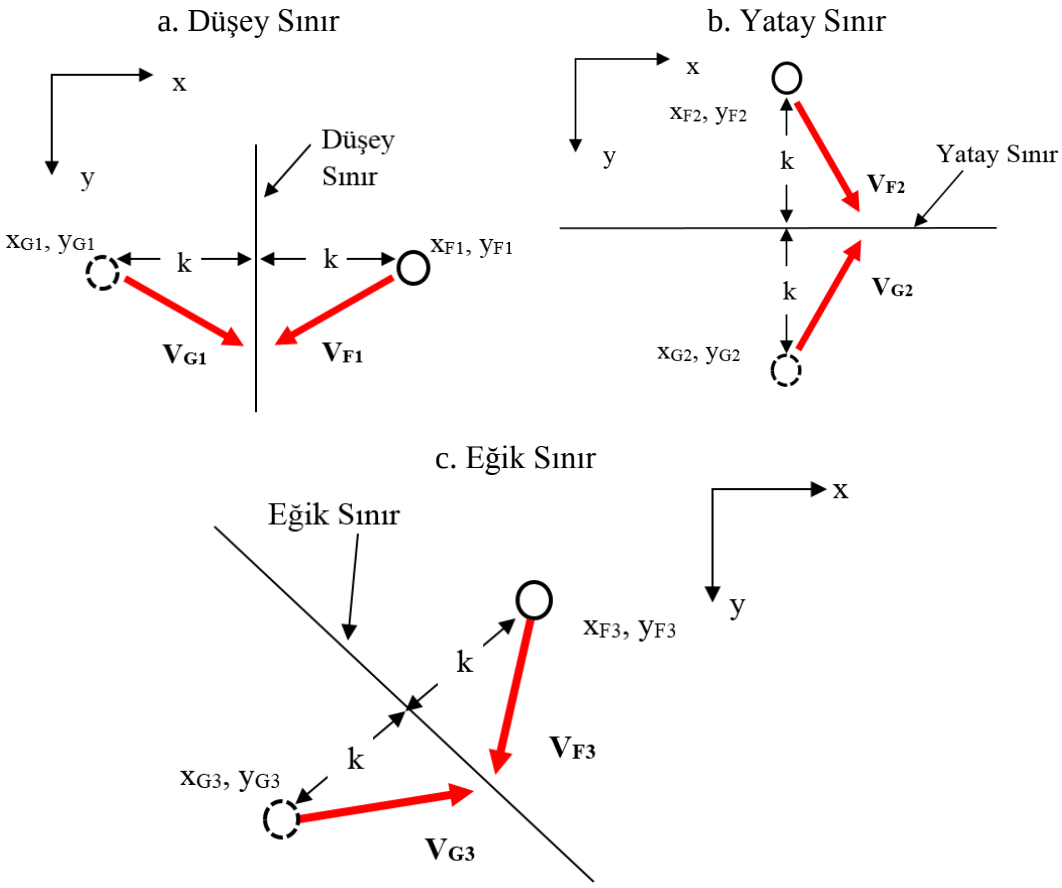
- Hız için, Dirichlet sınır koşulu için (3.34)'deki lineer interpolasyon ve (3.35), uygulanmıştır.

$$u_{nG_i} = \left(2u_B - u_{nF_i}\right), \tag{3.34}$$

$$u_{tG_i} = u_{tF_i} \tag{3.35}$$

3.33 - 3.35'te "*n*" indisi normal ve "*t*" indisi teğet bileşenini ifade etmektedir.

Yalpa hareketinin incelendiği bu çalışmada düşey, yatay ve eğik katı sınır uygulamalarına yer verilmiş olup hayalet parçacıklarının oluşturulmasına ilişkin prosedür Şekil 3.9'da görülmektedir. Her üç katı sınırda da serbest kayma koşulu kullanılmıştır.



Şekil 3.9: Akışkan parçacıkları ve hayalet parçacıkların birbirlerine göre mevkileri ve hızlarının gösterimi.

Ağırlık fonsiyonun etkili olduğu alanın yarı çap değeri ile hayalet parçacığın oluşturulması için belirlenen yarı çap değerleri arasında 2 oranı geçerlidir. Şekil 3.8b üzerinden anlatılması gerekirse dıştaki ve içteki çemberlerin yarıçapları arasındaki oran 1/2'dir.

3.5.2 Cisim sınır koşulları

Şekil 3.7'de görülen ve zorlanmış yalpa hareketine tabi tutulan cismi oluşturan parçacıklar akışkan parçacıklarının başlangıç yoğunluk ve kütlesine sahiptir. Cisim parçacıklarının hız değerleri ise cismin yalpa frekansı, yalpa genliği ve parçacıkların dönme merkezlerinden uzaklıklarına bağlı olarak değişen değerlerde atanmaktadır. Vugts (1968) veYeung ve diğ. (1998)'un çalışmalarında cismin dönme merkezi su hatta ile cismin yarı genişliğinin çakıştığı yer olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalar benzer şekilde, bu çalışmada da aynı nokta dönme merkezi olarak alınmıştır. Parçacıkların yer değişimlerine ve hızlarına ilişkin algoritma Şekil 3.10'da verilmiş olup şu şekilde özetlenebilir;

(a) Parçacığın dönme merkezine taşınması,

$$x = x_1 - x_0 \tag{3.36}$$

$$y = y_1 - y_0 \tag{3.37}$$

(b) Parçacığın döndürülmesi,

$$x_1 = r\cos(\theta) \tag{3.38}$$

$$y_1 = r\sin(\theta) \tag{3.39}$$

$$x' = r\cos(\theta+\alpha) = r[\cos(\theta)\cos(\alpha) - \sin(\theta)\sin(\alpha)] = r\cos(\theta)\cos(\alpha) - r\sin(\theta)\sin(\alpha) \tag{3.40}$$

$$y' = r\sin(\theta+\alpha) = r[\sin(\theta)\cos(\alpha) + \cos(\theta)\sin(\alpha)] = r\sin(\theta)\cos(\alpha) + r\cos(\theta)\sin(\alpha) \tag{3.41}$$

$$x' = x\cos(\alpha) - y\sin(\alpha) \tag{3.42}$$

$$y' = y\cos(\alpha) + x\sin(\alpha) \tag{3.43}$$

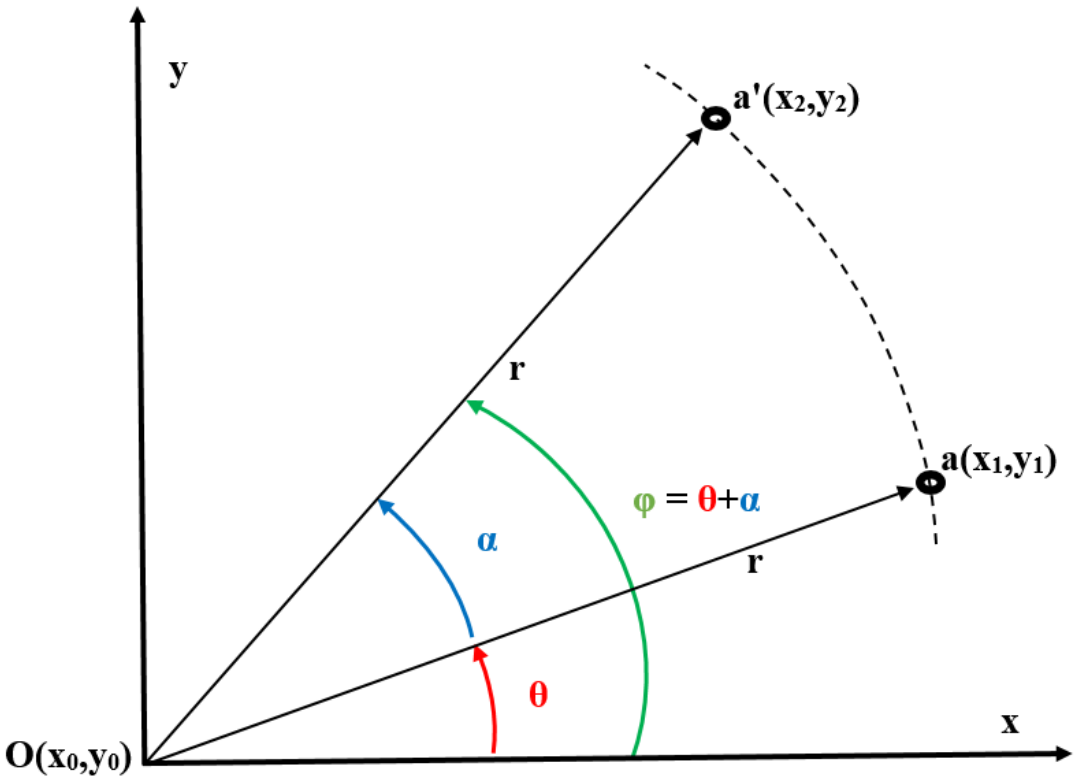
$$x' = (x_1 - x_0)\cos(\alpha) - (y_1 - y_0)\sin(\alpha) \tag{3.44}$$

$$y' = (x_1 - x_0)\sin(\alpha) + (y_1 - y_0)\cos(\alpha) \tag{3.45}$$

(c) Parçacığın merkezden mesafesine tekrar taşınması,

$$x_2 = x' + x_0 = (x_1 - x_0)\cos(\alpha) - (y_1 - y_0)\sin(\alpha) + x_0 \tag{3.46}$$

$$y_2 = y' + y_0 = (x_1 - x_0)\sin(\alpha) + (y_1 - y_0)\cos(\alpha) + y_0 \tag{3.47}$$



Şekil 3.10: Cisme ait parçacıkların döndürülme algoritması.

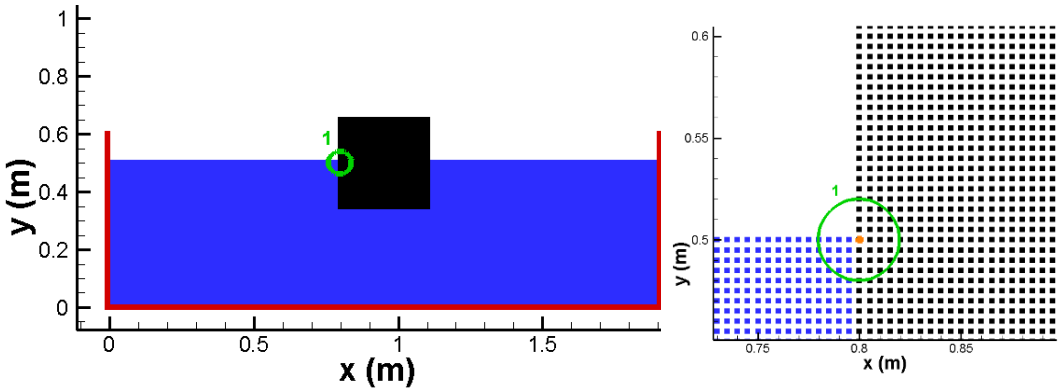
Cisme ait parçacıklara ilişkin gerçekleştirilmiş son düzenleme cisim yalpa hareketine başladıktan sonra hangi parçacıklardaki basınç değerlerinin moment değerine katkı yapacağının belirlenmesi problemi olmuştur. Bu problemin çözümü için, başlangıç anında momente katkı sağlanması beklenen ve akışkan parçacıkları ile en az komşuluğa sahip cisim parçacığı tespit edilmiştir. Şekil 3.7a'da verilen problem geometrisinin parçacıklara ayrıştırılması sonrasında elde edilen Şekil 3.11'de mavi parçacıklar akışkanı, siyah parçacıklar cismi, kırmızı parçacıklar ise havuz sınırlarını göstermektedir. *1* ile çizilmiş bölge ise hidrodinamik analizlerde kullanılmaya elverişli ve akışkan parçacıkları ile en az komşuluğu olan cisim parçacığının olduğu yeri göstermektedir. Hidrodinamik analizlere katkı sağlayacak ve akışkan parçacıkları ile en az komşuluğa sahip parçacığın 11 adet akışkan parçacığı ile iletişime geçtiği görülmektedir. Dolayısı ile analizler esnasında hidrodinamik analizlerde veri sağlayacak cisim parçacığı aşağıda verilmiş olan kriterleri sağlaması beklenmektedir.

a. Akışkan parçacıkları ile en az 11 komşuluğu bulunmalıdır,

b. Cismin en dış sırasını oluşturmalıdır.

a. Problem geometrisi

b. Cisim-Akışkan komşuluğu



Şekil 3.11: Şekil 3.7a'da verilen problem geometrisinin parçacıklar ile ayrıklaştırılması ve cisim-akışkan komşuluğunun incelenmesi.

3.5.3 Serbest su yüzeyi sınır koşulu

Şekil 3.11'de görülen problem geometrisinde serbest su yüzeyinde yer alan akışkan parçacıklarının en az 25 adet parçacık (akışkan, cisim, sınır ve hayalet olmak üzere) ile komşuluk kurduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile herhangi bir akışkan parçacığının toplamda 26'dan az komşuluğu var ise bu akışkan parçacığı serbest su yüzeyinde olduğu kabul edilmiştir.

Akışkan parçacıklarından hangisinin serbest su yüzeyinde olduğunun tespit edilmesinden sonra bu parçacıklara yoğunluk olarak referans yoğunluk değeri atanmıştır. Bu şekilde parçacıkların basınçlarının atmosfer basıncına eşit olması sağlanmıştır. Bu uygulamaya literatürde dinamik sınır koşulu denmektedir.

3.6 Zaman İntegrasyonu ve Stabilite Koşulu

İPH denklemlerinin zaman içerisinde ilerletilmesine yönelik literatürde değişik tipte metodlar kullanılmaktadır. Kullanılmakta olan en populer metodlar; Beeman (Beeman, 1976), Kurbağa-Sıçraması (Leap-Frog), Runge-Kutta modelleri (Benz, 1990), Verlet algoritması (Verlet, 1967), İki Adımlı Verlet Hız algoritması (Monaghan, 2006) ve tahmin-düzeltme (predictor-corrector) (Monaghan, 1989) şemasıdır. Crespo (2008) en azından ikinci dereceden doğruluğa sahip bir yöntemin kullanılmasını önermektedir. Liu ve Liu (2003), düşük hafıza kullanım gereksinimi nedeni ile Kurbağa-Sıçraması (Leap-Frog) aloritmasının daha avantajlı olduğunu savunmaktadır. Benz (1990) ise değişken zaman adımı ve hatanın düşürülmesi için

zaman adımının belirli toleranslar içerisinde azaltması gereken durumlarda Runge-Kutta modelinin avantajlı olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada tahmin-düzeltme (predictor-corrector) şeması kullanılmıştır. Parçacıkların konum, hız ve yoğunluklarının türevleri için (3.48)'de verilen ifadeler kullanılmak üzere,

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{u}_i\,, \qquad \frac{d\vec{u}_i}{dt} = \vec{a}_i\,, \qquad \frac{d\rho_i}{dt} = d_i \tag{3.48}$$

parçacıkların konum ve yoğunluklarının ara zaman adımında tahmin edilmesi ile başlar.

$$\vec{r}_i^{\left(n+1/2\right)} = \vec{r}_i^{(n)} + 0.5\vec{u}_i^{(n)}\Delta t \tag{3.49}$$

$$\rho_i^{\left(n+1/2\right)} = \rho_i^{(n)} + 0.5 d_i^{(n)}\Delta t \tag{3.50}$$

Ara zaman adımında elde edilen yoğunluk değeri (3.50), bir hal denklemi (4.13) içerisinde yerine konularak basınç değerine ulaşılır. Elde edilen basınç değeri Euler hareket denklemi içerisine yerine yazılır ve çıkan ivme değerleri düzeltme adımında yeni zaman adımındaki hız değerinin bulunmasında kullanılır.

$$\vec{u}_i^{(n+1)} = \vec{u}_i^{(n)} + \vec{a}_i^{\left(n+1/2\right)}\Delta t \tag{3.51}$$

Düzeltme adımında konum ve yoğunluk değerleri için sırası ile (3.52), (3.53) uygulanır ve bir zaman adımı için iterasyon tamamlanmış olur.

$$\vec{r}_i^{(n+1)} = \vec{r}_i^{\left(n+1/2\right)} + 0.5\vec{u}_i^{(n+1)}\Delta t \tag{3.52}$$

$$\rho_i^{(n+1)} = \rho_i^{\left(n+1/2\right)} + 0.5 d_i^{(n)}\Delta t \tag{3.53}$$

Tahmin-düzeltme şemasına ilişkin kullanılan denklemlerde n üst indisi zaman adımınına ilişkin sayacı, Δt ise zaman adımını göstermektedir. Zaman adımı Δt Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşuluna göre belirlenmektedir. Anderson (1995)'a göre CFL, sayısal analizde hesaplama bölgesinin fiziksel bölge tarafından içerilmesi diğer bir deyişle çözümdeki sayısal ilerlemenin azami hızının, fiziksel ilerlemenin azami hızını geçmesi olarak ifade etmektedir. CFL'in İPH yöntemindeki ifadesini ise

problem bölgesinin ayrıklaştırılmasında kullanılan parçacıklar arasındaki en küçük interpolasyon uzunluğunun, sayısal analizin ilermesinde kullanılacak zaman adımı ile orantılı seçilmesi olarak yapabiliriz. Bu çalışmada, $h_{ij,\min}$, problem bölgesi içerisindeki parçacıklar arasındaki en düşük interpolasyon uzunluğunu göstermek üzere, (3.54)'te verilmiş olan CFL şartı kullanılmıştır:

$$\frac{\Re h_{ij\min}}{c_i + v_{\max}} \geq \Delta t \tag{3.54}$$

(3.54)'te $\Re$ bir katsayı olup 0.5'e eşit alınmış, c_i referans ses hızını, $v_{\max}$ ise problem bölgesindeki parçacıkların azami hızını ifade etmektedir.

3.7 Etkileşime Girecek Parçacık Tespiti

Problem bölgesi içerisinde ilgili parçacığa ait değişkenin hesaplanması için ağırlık fonksiyonun geçerli olduğu κh mesafesindeki etki alanı içerisinde (Şekil 3.3'de görülmekte olan) kalan tüm parçacıkların tespiti gerekmektedir. Ağ ile çözüm yapan sayısal yöntemlerin tersine İPH yönteminde zaman içerisinde interpolasyon noktaları arasındaki komşuluklar değişmektedir. Literatürde en çok kullanılan tespit algoritmaları bağlı liste (linked-list) arama, ağaç arama (tree search), doğrudan arama (all-pair search, direct search) yöntemleridir.

Doğrudan arama yönteminde, ilgilenilen parçacık ile problem bölgesi içerisindeki diğer tüm parçacıkların arasındaki mesafe hesaplanır ve ağırlık fonksiyonun geçerli olduğu κh mesafesindeki etki alanı içerisinde kalan parçacıkların hepsi bu parçacığın komşusu olarak hesap döngüsüne sokulur. Programlanması kolay bir yöntemdir. Parçacık sayısının çok olduğu problemlerde, her bir parçacığın diğer parçacıklar ile arasındaki mesafenin bulunmasını gerektirdiği için çözüm zamanın bir hayli uzamasına yol açmaktadır. Bu çalışmada doğrudan arama yöntemi kullanılmış olup κ katsayısı 3'e eşit alınmıştır.

Bağlı liste (linked-list) arama ve ağaç arama (tree search) yöntemlerine ilişkin detaylar için Fulk (1994), Liu ve Liu (2003),'e bakılabilir.

4. İPH YÖNTEMİ İLE SAYISAL ÇÖZÜM GELİŞTİRİLMESİ

İster ağ tabalı (FEM, BEM, vb.), isterse ağsız yöntem (İPH, MLPG, vb.) olsun sayısal çözüm algoritmalarının hepsi sonuca ulaşabilmek için benzer adımları takip etmektedir. Bu adımları kısaca özetlemek gerekirsek ilk önce incelenecek probleme ilişkin matematiksel modelin oluşturulması gerekmektedir. Matematiksel model, probleme ilişkin çözülmesi gereken denklemlerin, uygun sınır şartları (boundary conditions) ve başlangıç koşullarını (initial conditions) içerecek şekilde ifade edilmesini içermektedir. İkinci olarak problem bölgesinin ayrıklaştırılması gerekmektedir. Problem bölgesi, kullanılmak istenen sayısal yönteme göre hücre (cell), ağ (mesh veya grid), düğüm noktası (node) ve parçacık (particle) kullanılarak ayrıklaştırılmaktadır. Bir sonraki adımda, matematik modelin ayrıklaştırılmış problem bölgesi içerisinde çözümüne yönelik sayısal algoritma oluşturulmaktadır. Bu adımda analitik denklemler çeşitli yöntemler kullanılarak sayısal hale getirilmekte ve kabul edilebilir hatalarla çözüme ulaşılmaya çalışılmaktadır. Dördüncü ve son adımda ise problem bölgesindeki sayısal algoritmaya ait sonuçların gösterimi (postprocessing) yapılmaktadır. Sonuçların gösteriminde, dinamik veya kinematik değerler veya değişimleri grafik, tablo veya şekiller kullanılarak gösterilmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde İPH yönteminin uygulanmasına yönelik bir önceki bölümde verilen bilgiler ışığında akışkan denklemlerinin ifade edilmesi ve basınç değerinin elde edilmesinde kullanılan yaklaşımdan bahsedilecektir. Çözümün elde edilmesi için kullanılan sayısal düzeltmelerin ardından en son olarak hazırlanan bilgisayar programına ait algoritmanın bir döngüsü yine bu bölüm içerisinde açıklanacaktır.

4.1 Akışkan Denklemlerinin İfade Edilişi

Yukarıda da bahsedildiği gibi akışa ait dinamik ve kinematik parametrelerin değişiminin matematik olarak ifade eden denklemlerin değişik sayısal yöntemler kullanılarak çözümlenmesi sayısal çözüm algoritmalarının önemli adımlarından biridir. Bilindiği gibi süreklilik denklemi akışın kesintisiz olmasını bir başka deyişle akış içerisinde boşlukların olmamasının matematiksel olarak gösteren denklemdir ve

kütlenin korunumuna $\left(dm/dt = 0\right)$ dayanmaktadır. Herhangi bir kontrol hacmi içerisinde bulunan toplam kütleyi, δV akışkan parçacıklarının hacmini ve ρ yoğunluğu göstermek üzere (4.1) eşitliği ile yazabiliriz.

$$\delta m = \rho \delta V \tag{4.1}$$

Kütlenin korunduğunu farz edildiği durumda, kontrol hacmi içerisindeki zamana göre kütle değişimini ise (4.2) ile gösterebiriz.

$$\frac{D(\delta m)}{Dt} = \frac{D(\rho \delta V)}{Dt} = \delta V \frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{D(\delta V)}{Dt} = 0 \tag{4.2}$$

(4.2)'yi düzenlersek ve ikinci terimini hızın diverjansı ile yer değiştirirsek, en genel haliyle süreklilik denklemini (4.3)'deki gibi elde ederiz.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \tag{4.3}$$

(4.3)'te $\vec{v}$ parçacıkların hız vektörünü, a ($\vec{x}$,t) herhangi bir değişken olmak üzere $\frac{Da}{Dt} \equiv \frac{\partial a}{\partial t} + v \cdot \nabla a$ terimi ise parçacığın hareketini takiben türevini (material derivative, Lagrangian derivative, substantial derivative) göstermektedir. Süreklilik denklemi içerisinde yer alan yoğunluk terimi, İPH yönteminde parçacıkların dağılımını ve interpolasyon uzunluğunun düzenlenmesini etkilediği için önemli rol oynamaktadır. İPH yönteminde iki farklı yaklaşım ile yoğunluğun değişimi takip edilmektedir. Birinci yaklaşıma toplama yoğunluğu (summation density) denilmektedir. Bu yaklaşımda (4.4) denklemi kullanılarak herhangi bir parçacığın yoğunluğu kendisine komşu olan diğer parçacıkların ağırlıklı ortalaması alınarak bulunmaktadır.

$$\langle \rho_i \rangle = \sum_{j=1}^{N} m_j W_{ij} \tag{4.4}$$

İkinci yaklaşıma süreklilik yoğunluğu (continuity density) adı verilmektedir. Bu yaklaşımda yoğunluk, İPH yönteminin özellikleri ve bazı matematiksel işlem kullanılarak süreklilik denkleminden elde edilmektedir. $v_{ij} = v_i - v_j$ parçacıkların hızları arasındaki fark olmak üzere, (4.5), (4.6) ve (4.7) literatürde en çok kabul gören kullanım biçimleridir.

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} \vec{v}_j \vec{\nabla} W_{ij} \tag{4.5}$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} \vec{v}_{ij} \vec{\nabla} W_{ij} \tag{4.6}$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^{N} m_j \vec{v}_{ij} \vec{\nabla} W_{ij} \tag{4.7}$$

Toplama yoğunluğu ve süreklilik yoğunluğu yaklaşımlarının kullanımlarında birbirlerine göre avantajlı veya dezavantajlı olduğu yönler vardır. Toplama yoğunluğu uygulamalarında özellikle sınır bölgelerinde ve yoğunluğu farklı katı-sıvı/sıvı-sıvı komşuluğunun olduğu durumlarda problemler yaşanabilmektedir. Literatürde bu soruna köşe etkisi (edge effect, boundary particle deficiency) denilmektedir ve gidermek için hayalet parçacık kullanımı, artık sınır terimleri (residue boundary term) vb. uygulamalar kullanılmaktadır. Toplama yönteminin diğer bir dezavantajı ise her iterasyon adımında parçacık yoğunluklarının hesaplanmasını gerektirmesi nedeniyle problem bölgesi içerisindeki bütün parçacıklar için ek bir hesap döngüsü yapılmaktadır. Süreklilik yoğunluğu yaklaşımında ise kütlenin korunumu tam olarak sağlanamayabilinmektedir (Liu ve Liu, 2003). Bu çalışmada kütlenin korunumu denklemi için süreklilik yoğunluğu yaklaşımı (4.7)'nin kullanımı ile uygulanmıştır.

Akışı temsil eden diğer bir denklem ise momentum korunumu denklemleridir. Hareket denklemlerinin uygulamasında viskozitenin yer almadığı Euler denklemi (4.8) ve viskozitenin yer aldığı Navier-Stokes denkleminin kullanımından bahsedilebilir. (4.8) denkleminde $\vec{B}$ birim kütleye uygulanan dış kuvveti (body force)'u temsil etmektedir. Literatürde her iki denklemin uygulamasına yönelik bir çok uygulama yer almaktadır. Bu çalışmada İPH yönteminin Euler denklemine yönelik uygulaması olan (4.9) ifadesi kullanılmıştır.

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \vec{B} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p \tag{4.8}$$

$$\frac{D\vec{u}_i}{Dt} = -\sum_{j=1}^{N} m_j \left(\frac{p_i + p_j}{\rho_i \rho_j} \right) \cdot \vec{\nabla} W_{ij} \tag{4.9}$$

Bu çalışmada kullanılan Euler denklemine (4.9), sayısal yöntemin stabilitesini arttırmak amacıyla yapay viskozite (artificial viscosity) terimi eklenmiştir. Yapay viskozite teriminin doğrusal momentum korunumu denklemine eklenmesinin sebebi akışkana belli bir mertebede difüzyon eklenerek sayısal çözümün kararlılığının arttırılmaktadır. Bu terim ilk olarak sonlu farklar algoritmaları için Von Neumann ve Richtmyer (1950) tarafından kullanılmaya başlanmış olup birçok İPH çalışmasında da kapsamlı olarak kullanılmıştır (Delorme ve diğ. 2005). Eklenen bu yapay viskozite değerinin sayısal kararlılığı sağlarken çözüm üzerindeki etkilerinin en aza indirilecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Ayrıca dikkat edilmesi gereken başka bir husus da parçacık çözünürlüğünün arttırılması ile (örneğin interpolasyon uzunluğunun (h) sıfıra yakınsaması ile) yapay viskozite terimi sıfıra yakınsar ve böylece hareketi temsi eden denklem sistemi Euler denklemlerine indirgenmiş olur (Antuono, ve diğ. 2011). Π_{ij} yapay viskozite terimini göstermek üzere Euler denkleminin son hali (4.10)'da verilmiştir.

$$\frac{D\vec{u}_i}{Dt} = -\sum_{j=1}^{N} m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \cdot \vec{\nabla} W_{ij} \tag{4.10}$$

(4.10)'dan da görüldüğü üzere yapay viskozite terimi Euler denklemi içerisinde basınç terimlerine eklenmektedir. Literatürde Lucy (1977), Monaghan ve Gingold (1983), Evrard (1988) tarafından önerilen birçok yapay viskozite formülasyonu bulunmakta olup çalışmada kullanılmış olan yapay viskozite terimi Monaghan ve Kos (1999) tarafından kullanılanın aynısıdır ve (4.11)'de verilmiştir.

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} -\alpha \mu_{ij} \dfrac{c_i + c_j}{\rho_i + \rho_j}, & \vec{u}_{ij} \cdot \vec{r}_{ij} > 0 \\ 0, & \vec{u}_{ij} \cdot \vec{r}_{ij} \le 0 \end{cases} \tag{4.11}$$

(4.11)'de α bir katsayıdır ve $\alpha = 8\upsilon / hc_0$ denklemi ile hesaplanmaktadır. υ kinematik viskozite, c_0 ise referans ses hızı değerine eşittir. c_i parçacıkların lokal ses hızı olup, $c_i = c_0 \left(\rho_i / \rho_0 \right)^{(\gamma-1)/2}$'ye eşittir. ρ_i parçacığın yoğunluğunu, ρ_0 referans yoğunluk değerini, γ suyun spesifik ısı oranını ifade etmektedir. μ_{ij} ise (4.12)'de yer alan formulasyon ile hesaplanmaktadır.

$$\mu_{ij} = h\frac{\left(\vec{u}_i - \vec{u}_j\right)\cdot\left(\vec{r}_i - \vec{r}_j\right)}{\left\|\vec{r}_i - \vec{r}_j\right\|^2 + \theta h^2} \tag{4.12}$$

(4.12)'de θ paydanın 0 olmaması için genellikle 10^{-2} gibi küçük bir değerin kullanıldığı bir katsayısıyıyı, r ise parçacıklarının konumlarını belirtmektedir. Bu çalışmada yapılan analizlerde $\rho_0 = 1000$ ve $c_0 = 40$ olarak alınmıştır.

Bu başlık altında son olarak İPH yönteminde sıkıştırılamazlığın sağlanmasına yönelik yaklaşımlardan bahsedilecektir. İPH yönteminde sıkıştırılamaz akış için üç farklı yaklaşım uygulanmakta olup temelde basınç değerinin hesaplanmasındaki farklılık nedeni ile birbirinden ayrılmaktadır.

Birincisi, Zayıf Olarak Sıkıştırılabilir (Weakly Compressible SPH, WCSPH) basınç yaklaşımı olarak adlandırılmakta olup ilk olarak Monaghan (1994) tarafından uygulanmıştır. Bockmann ve diğ. (2012)'ye göre parçacık yöntemlerinin akışkanlar dinamiğine uygulanmasında en çok kullanılan yöntemdir. Zayıf Olarak Sıkıştırılabilir İPH yaklaşımında basınç ve yoğunluk değerlerini birbirlerine bağlayan açık hal denklemleri (equation of state, EOS) kullanılmaktadır. Hal denkleminin etkisiyle yoğunluk değerlerindeki çok küçük değişiklikler basınç değerlerindeki değişimi tetiklemekte ve parçacıkların yoğunlukları iyi bir yakınsaklıkla hesaplanmaktadır (Shadloo ve diğ., 2011). Bu yaklaşımda akışkanın hacim değişimi %1'den az olmakta olup ihmal edilebilecek kadar küçük olan bu hacim değişimini sağlayabilmek için akış hızının ses hızına oranının 0.1'den daha büyük olmaması gerekmektedir (Özbulut, 2013). Literatürde özellikle su altı patlamalarına yönelik problemlerde değişik tipte hal denklemleri kullanılmakta olup EOS'nin diğer formülasyonları için Liu ve Liu (2003)'e bakılabilir. Bu çalışmada (4.13)'te verilmiş olan hal denklemi kullanılmıştır.

$$p_i - p_0 = c_0^2\left(\rho_i - \rho_0\right) \tag{4.13}$$

(4.13)'te p_0 açık hava basıncı, p_i ilgilenilen parçacığın basınç değeri, ρ_0 referans yoğunluk değeri, ρ_i ilgilenilen parçacığın yoğunluk değeri ve c_0 referans ses hızı değerine eşittir.

Basınç hesaplamakta kullanılan ikinci yaklaşım ise Tam Sıkıştırılamaz (Fully Incompressible SPH, ISPH) basınç yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır. Cummins ve Rudman tarafından İzdüşüm Yöntemi (Projection SPH) olarak literatüre giren yöntem

yaygın olarak ISPH olarak adlandırılmaktadır. Bu yaklaşımda basınç değerlerine Poisson basınç denklemi çözülerek ulaşılır, ardından hareket denklemi içerisindeki basınç terimleri olmaksızın çözülür ve ara hız değeri elde edilir. Poisson denkleminden elde edilen basınç değerleri, hareket denkleminden elde edilen ara hız değerleri ile birlikte değerlendirilerek bir sonraki adımdaki hız değerlerine ulaşılır.

Basınç hesabına yönelik kullanılan üçüncü ve son yöntem ise literatüre Koshizuka ve Oka (1996) tarafından kazandırılan Yarı Kapalı Hareketli Parçacık Yöntemi (Moving-Particle Semi Implicit Method, MPS) olup, detayları için Koshizuka ve Oka (1996)'ya bakılması tavsiye edilir.

ISPH yönteminde parçacıklardaki basınç değerlerine ulaşılması için ayrı bir denklem (Poisson) çözülmektedir, bu nedenle WCSPH'e göre çözüm zamanının uzamasına neden olmaktadır. Diğer taraftan WCSPH yöntemindeki zaman adımları ISPH'e göre daha küçük seçilmektedir aynı analiz için daha fazla zaman adımı kullanılmaktadır. Bu çalışmada basınç değerlerinin tespitinde bilgisayar koduna uyarlaması daha kolay olduğu için WCSPH yaklaşımı kullanılmıştır.

4.2 Sayısal Düzeltme Algoritmaları

Geliştirilmiş olan bilgisayar kodunda; İPH yöntemi'nin WCSPH yaklaşımından elde edilen basınç değerlerinin değişimini düzenleyen ve literatürde sıklıkla kullanılan Yoğunluk Düzeltmesi (Shephard Filtering), Colagrossi ve diğ. (2012) tarafından önerilen Parçacık Paketleme Algoritması (PPA) ve Özbulut (2013) tarafından geliştirmiş olan Birleşik Serbest Su Yüzeyi Yapay Parçacık Ötelemesi (VXSPH) çözüm algoritması kullanılmıştır. Bu başlık altında VXSPH sayısal düzeltmesinin daha iyi açıklanabilmesi için Monaghan (1994) tarafından önerilen XSPH Hız Varyantı (XSPH Velocity Variant) ve Shadloo ve arkadaşları (2011) tarafından geliştirilen Yapay Parçacık Ötelemesi (SPÖ) düzeltme algoritmalarına da yer verilmiştir.

4.2.1 Yoğunluk düzeltmesi

Bu çalışmada uygulanan ilk sayısal düzeltme algoritması Yoğunluk Düzeltme algoritmasıdır. İPH yönteminde basınç değerlerinin yoğunluk ile bağlantılı olması nedeni ile yoğunluk değerlerinin hassas ve doğru bir şekilde hesaplanmaması durumunda basınç alanında gürültüye (noise) sebep olabilmektedir. Basınç

değerlerinin yoğunluk değerlerinden etkilenmesi nedeni ile yoğunluk değişiminin düzenlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İPH denklemlerinden elde edilen yoğunluk değerlerinin düzgünleştirilmesi amacıyla (4.14) kullanılmıştır.

$$\tilde{\rho}_i = \rho_i - \sigma \frac{\sum_{j=1}^{N} \left(\rho_i - \rho_j \right) W_{ij}}{\sum_{j=1}^{N} W_{ij}} \tag{4.14}$$

(4.14)'te, $\tilde{\rho}_i$ düzgünleştirilmiş yoğunluk değeri olup basınç değerlerinin tespitinde bu değerden faydalanılmaktadır. σ ise katsayıdır ve bu çalışmada 1 olarak alınmıştır. (4.14)'ten de görüldüğü üzere parçacıkların yoğunluk değerlerinden ağırlıklandırılmış ortalama yoğunluk değerinin çıkarılması suretiyle birbirine komşu olan parçacıkların yoğunluklarının arasında çok fark olmaması sağlanmaktadır.

4.2.2 XSPH hız varyantı

İPH yönteminde yakınsaklığının arttırılması ve stabilitenin sağlanabilmesi için parçacıkların mümkün olduğunca düzenli bir şekilde hareket etmesi istenir. Bahse konu özelliğin sağlanabilmesi için, serbest su yüzeyli akış problemleri için Monaghan (1994) tarafından önerilen XSPH Hız Varyantı (XSPH Velocity Variant) sayısal düzeltmesinin benzer bir uygulaması bu çalışmada kullanılmıştır. Bu düzenleme sayesinde parçacıkların birbirleri içerisine geçmesi önlenmekte ve parçacıkların hareketlerinin düzenlenmesine yardımcı olunmaktadır.

İlk önce ilgili parçacık için, hareket denkleminden elde edilen parçacık hız değerleri kullanılarak ağırlıklı ortalama hız değeri bulunur (4.15).

$$\Delta \vec{u}_i = \varepsilon \frac{\sum_{j=1}^{N} \left(\vec{u}_i - \vec{u}_j \right) W_{ij}}{\sum_{j=1}^{N} W_{ij}} \tag{4.15}$$

(4.15)'de ε bir katsayı olup 0.003'e eşit alınmıştır. Görüldüğü üzere (4.15)'te ilgili parçacığın komşu parçacıklarına ait hız değerleri de kullanılmaktadır. Bulunan ağırlıklı ortalama hız değeri, (4.16) kullanılarak hareket denkleminden elde edilen parçacık hızından çıkarılır ve aynı zaman adımında güncellenmiş bir hız değeri elde edilir.

$$\widehat{\vec{u}}_i = \vec{u}_i - \Delta \vec{u}_i \tag{4.16}$$

(4.16)'da $\vec{u}_i$ hareket denkleminden gelen hız değerini, $\hat{\vec{u}}_i$ ise XSPH uygulaması sonrasındaki hız değerini göstermektedir. Son olarak, elde edilmiş olan $\hat{\vec{u}}_i$ değerinden parçacığın yeni konumuna (4.17) ulaşılır.

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \hat{\vec{u}}_i \tag{4.17}$$

Bu şekilde birbirine komşu olan parçacıkların hem birbirlerine yakın hız değerlerine sahip olmaları hemde konumlarının düzenlemesi sağlanmaktadır.

4.2.3 Yapay parçacık ötelemesi

İPH yönteminde, parçacıkların dağılımlarında düzensiz bir dağılım olduğu durumlarda beklenmeyen sonuçlar alınabilmektedir. Parçacık dağılımlarının uniform olmaması sebebiyle tespit edilmiş olan bir problemden Bölüm 4.2.5'te bahsedilmektedir. Sayısal stabilite ve yakınsaklığının arttırılması için parçacıkların mümkün olabildiğince problem bölgesinde homojen bir şekilde dağılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için parçacıkların konumları problemin fiziğinin bozulmayacağı bir büyüklükte $\delta\vec{r}_i$ kadar ötelenmektedir. Parçacıkların konumlarının ötelenmesine yönelik, ilk olarak Shadloo ve arkadaşları (2011) tarafından önerilen Yapay Parçacık Ötelemesi (YPÖ) terimi (4.18)'de verilmiştir.

$$\delta\vec{r}_i = \beta \sum_{j=1}^{N} \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3} r_0^2 v_{\max} \Delta t \tag{4.18}$$

(4.18)'de β bir katsayı olup 1.0'e eşit alınmıştır. $v_{\max}$ problem bölgesindeki maksimum parçacık hızıdır, r_0 ise kesme uzunluğu (cut-off distance) olarak adlandırılmakta ve (4.19) ile hesaplanmaktadır.

$$\vec{r}_0 = \sum_{j=1}^{N} \frac{\vec{r}_{ij}}{N} \tag{4.19}$$

4.2.4 Bileşik serbest su yüzeyi ve parçacık ötelemesi düzeltmesi

Bu çalışmada kullanılan ikinci sayısal düzeltme Birleşik Serbest Su Yüzeyi ve Yapay Parçacık Ötelemesi (VXSPH) düzeltmesi olarak adlandırılan ve XSPH Hız Varyantı (Monaghan, 1994) ve Yapay Parçacık Ötelemesi (Shadloo ve diğ., 2011)'nin ortak uygulamasını içeren hibrit bir yöntem olup serbest su yüzeyi problemlerinde ilk olarak

Özbulut (2013) tarafından uygulanmıştır. Serbest su yüzeyinin daha hassas bir şekilde modellenmesi için geliştirilmiş olan VXSPH sayısal düzeltmesi temelde, serbest su yüzeyine yakın bölgelerde XSPH algoritmasının, parçacıkların yoğun olduğu bölgelerde SPÖ düzeltmesinin uygulanmasını içermektedir.

Bölüm 4.2.2'de anlatılan XSPH düzeltmesinde, ağırlıklı hız ortalaması teriminin hareket denklemlerinden elde edilen hız değerlerinden çıkarılması ile elde edilen yeni hız değerinin sadece parçacıkların konumlarını güncellemek amacıyla kullanılmasını önermekteydi, VXSPH düzeltmesinde ise elde edilen hız değerinin hem parçacıkların ötelenmesinde hem de akışkan parçacığının yeni hız değeri olarak hareket denklemlerinde kullanılmasını da gerektirmektedir. Ayrıca VXSPH sayısal düzeltmesi içerisinde yer alan SPÖ algoritması ile de parçacıkların bir bölgede kümelenmesi engellenerek daha yakınsak sonuçların alınması sağlanmaktadır.

4.2.5 Parçacık paketleme algoritması

Eğik havuz sınırı uygulamasında, eğik olan yüzeyin yakınındaki parçacıklar (akışkan-sınır) ile havuz içerisine kartezyen koordinat sistemine uygun olarak dağıtılmış akışkan parçacıkları arasındaki mesafelerin eşit olmaması nedeni ile özellikle eğik havuz sınırlarına yakın parçacıklarda beklenmedik hareketlere rastlanmıştır. Bu husus ilk olarak hidrostatik durumda yani cisim hareketsizken eğik yüzeye yakın akışkan parçacıklarındaki hız vektörlerinin incelenmesi esnasında tespit edilmiştir. Sorunun çözümüne yönelik Colagrossi ve diğ. (2012) tarafından geliştirilen Parçacık Paketleme Algoritması (PPA) kullanılmıştır. PPA, analizin başlangıcından devreye girerek parçacıklar arasındaki mesafelerin yeniden düzenlenerek sayısal gürültü (numerical noise) düşürülmesini sağlayan bir yöntemdir. Algoritma, yapısı nedeni ile problemin çözümünde kullanılan İPH metodunun sıkıştırılabilir, sıkıştırılamaz gibi kabullerden hangisinin yapıldığından etkilenmeden çalışabilmektedir. Yöntemin temelini, (4.20), (4.21)'deki denklemler oluşturmaktadır.

$$\Gamma_i = \sum_j W_{ij} V_j \tag{4.20}$$

$$\vec{\nabla}\Gamma_i = \sum_j \vec{\nabla} W_{ij} V_j \tag{4.21}$$

Γ_i 'ye parçacık dağılımdaki düzensizliğin ölçümü değişkeni denilmektedir. Problem bölgesine dağıtılmış parçacıkların dağılımlarının uniform olması durumunda $\Gamma_i = 1$ ve $\vec{\nabla}\Gamma_i = 0$ 'a eşit olmaktadır. Aksi taktirde $\Gamma_i < 1$ ve $\vec{\nabla}\Gamma_i \neq 0$ 'dır.

Colagrossi ve diğ. (2012) Γ_i *ve* $\vec{\nabla}\Gamma_i$ değişkenlerinin hidrostatik durumlarda kullanılmasını İPH yöntemindeki hata terimi üzerinden şu şekilde açıklanmaktadır. Analitik çözüm yerine İPH yönteminin kullanıması nedeni ile iki tür hatadan bahsedilmektedir. Birincisi, problem bölgesinin parçacıklara ayrıklaştırması nedeni ile bölgenin bütünü yerine belli noktalarda çözüm yapılmasından kaynaklanan (h, parametresine bağlı olarak değişmektedir) hatalar. İkinci ise çözümde kullanılacak integrallerin yerine toplam ifadelerinin kullanılmasından kaynaklanan hatalar. Hata teriminin büyüklüğünün azaltılması, problem bölgesindeki parçacık sayısının mümkün olduğunca arttırılması olduğu kabul edilirse, yeterince küçük *h* seçilmiş bir çözüm için hatanın *O(h)* olacağı ifade edilebilir. Bu kabulden hareketle problem bölgesindeki hız ve basıncın hataları için süreklilik ve momentum denklemleri için sırası ile (4.22) ve (4.23)'yı yazabiliriz:

$$\left\langle \vec{\nabla} u \right\rangle_i = \sum_j \left(\vec{u}_j - \vec{u}_i \right) \vec{\nabla}_i W_{ij} V_j = \Gamma_i \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{u} \right)_i + O(h) \tag{4.22}$$

$$\left\langle \vec{\nabla} p \right\rangle_i = \sum_j \left(p_j + p_i \right) \vec{\nabla}_i W_{ij} V_j = \Gamma_i \left(\vec{\nabla} p \right)_i + 2 p_i \vec{\nabla}\Gamma_i + O(h) \tag{4.23}$$

Hidrostatik bir denemede yapıldığında başlangıç koşulları olarak $\vec{u}_i = 0$, $\rho_i = \rho(\vec{r}_i)$ parçacıklara atanacak ve parçacıklardaki basınç değeri bulunmaya çalışılacaktır. Verilmiş olan başlangıç koşulları nedeni ile (4.22)'de verilmiş olan süreklilik denklemi sağlanacak fakat (4.23)'daki momentum denklemi, (4.24)'deki hale dönecektir.

$$\Gamma_i \left(\vec{\nabla} p \right)_i + 2 p_i \vec{\nabla}\Gamma_i - \rho \vec{\nabla}\Phi = O(h) \tag{4.24}$$

(4.24) denklemi, Φ yer çekimi potansiyeli (gravitational potential) olmak üzere, sadece $\Gamma_i = 1$ ve $\vec{\nabla}\Gamma_i = 0$ şartında sağlanabilmektedir. Bu bağlamda, (4.24)'de Γ_i sadece basıncın basınç gradyanın artış veya azalışına yönelik yoğunluğu verdiği için düşük bir öneme sahipken, $\vec{\nabla}\Gamma_i$ değeri hem İPH diferansiyel operatörünün yönünü hemde yoğunluğu verdiği için önemlidir. Dolayısıyla, hidrostatik durumda İPH

çözümünde iyi bir başlangıç yapabilmek için basınç operatöründeki gürültüyü yakından ilgilendien $\vec{\nabla}\Gamma_i$ değerinin mümkün olduğunca küçük olması gerekmektedir. $-\vec{\nabla}\Gamma_i$ vektörü her zaman kütlenin az olduğu ve parçacık dağılımının düzensiz olduğu bölgeyi işaret edecektir.

PPA algoritmasının çalıştırılması öncesinde problem geometrisine parçacıklar dağıtılmaktadır. Sonrasında süreklilik denklemi göz önüne alınmadan, momentum denkleminin (4.25)'de verilmiş olan hali kullanılmakta ardından parçacıkların konumları (4.26)'a uygun olarak yer değiştirmektedir.

$$\frac{D\vec{u}_i}{Dt} = -\beta\vec{\nabla}\Gamma_i + \vec{T}_i^{(\zeta)} \tag{4.25}$$

$$\frac{D\vec{r}_i}{Dt} = \vec{u}_i \tag{4.26}$$

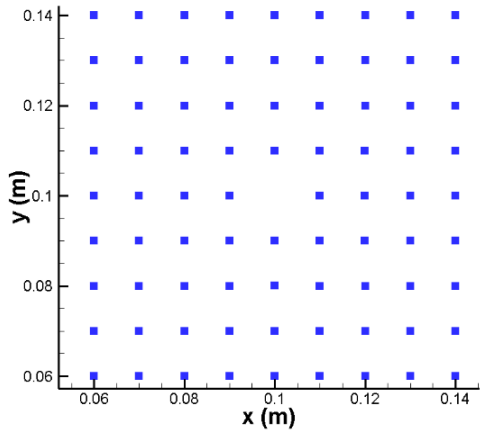
(4.25)'de $\beta = \left(2p_0 \middle/ \rho_0\right)$'a eşit bir katsayı, $\vec{T}_i^{(\zeta)} = \alpha \frac{\sqrt{\beta}}{V_0^{1/d}} \vec{u}_i$ eşitliğini sağlayan linear sönüm terimi olup Monaghan (1994) tarafından da kullanılmıştır. Sönüm teriminde yer alan α 5x10^{-3}'e eşit bir katsayıyı, *d* ise problemin boyutunu ifade etmektedir. ρ_0, p_0 sırasıyla yoğunluk ve basınç değerleri olup sabit bir katsayıya eşit alınmaktadır. V_0 hacim değeri olup toplam alan/hacmin (problemin boyutuna göre), toplam parçacık sayısına oranı olarak $\left(V_{top} \middle/ N_{top}\right)$ alınmaktadır. Son olarak zaman adımı değerinden bahsedilmesi gerekmektedir, PPA algoritmasının çalıştırılması için seçilecek zaman adımı değeri İPH için seçilen değerden farklı olup (4.27)'da verilmiştir. CFL değeri 1'e eşit alınmıştır.

$$\Delta t = CFL \frac{V_0^{1/d}}{\sqrt{\beta}} \tag{4.27}$$

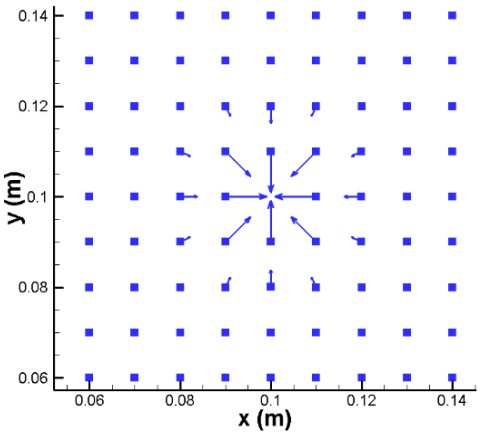
PPA algoritması, çözüm için oluşturulmuş olan İPH algoritmasından önce devreye girerek çalışmaya başlamakta ve problem geometrisine dağıtılmış parçacıkların konumlarını yeniden düzenlemektedir. Düzenlenmiş konumlar İPH algoritması tarafından problem geometrisi olarak algılanmakta ve bu parçacık konumlandırmasını dikkate alarak çözüme başlamaktadır.

Oluşturulmuş PPA algoritmasının denenmesi için kartezyen koordinat sistemine göre dağıtılmış bir geometride parçacıklardan bir tanesinin yeri eksik bırakılmıştır. Eksik bırakılmış olan parçacığın yerinin diğer parçacıklar tarafından doldurulması ve parçacıkların birbirleri arasındaki mesafenin homojen olacak şekilde tekrar düzenlenmesi beklenmiştir. Şekil 4.1a'da eksik bırakılmış olan parçacığın yeri, Şekil 4.1b'de 0.0003s sonunda parçacıklarda oluşan hız vektörleri, Şekil 4.1c'de 0.05 sonunda parçacıkların dizilimleri, Şekil 4.1ç'de 0.05 sonunda parçacıklardaki hız vektörleri, Şekil 4.1d'de 0.1s sonunda parçacıkların yeni dizilimleri, Şekil 4.1e'de ise 0.1s sonunda parçacıkların homojen dağılımı sağladıkları haldeki hız vektörleri verilmiştir.

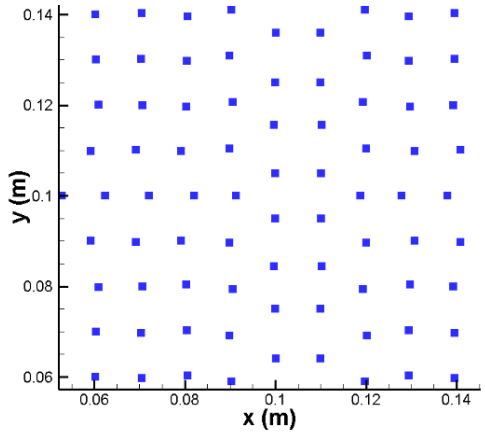
a. Eksik Bırakılmış Parçacık



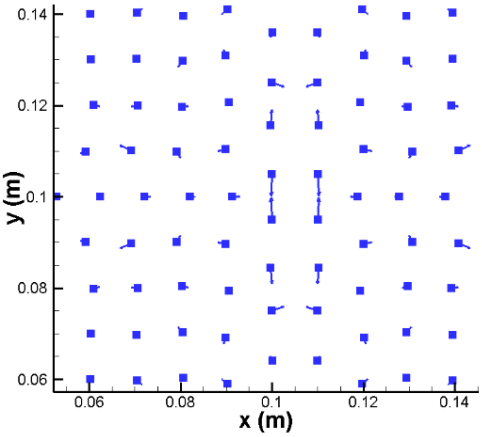
b. Diğer Parçacıklardaki Hızlar



c. 0.05 s'de Parçacık Dağılımı

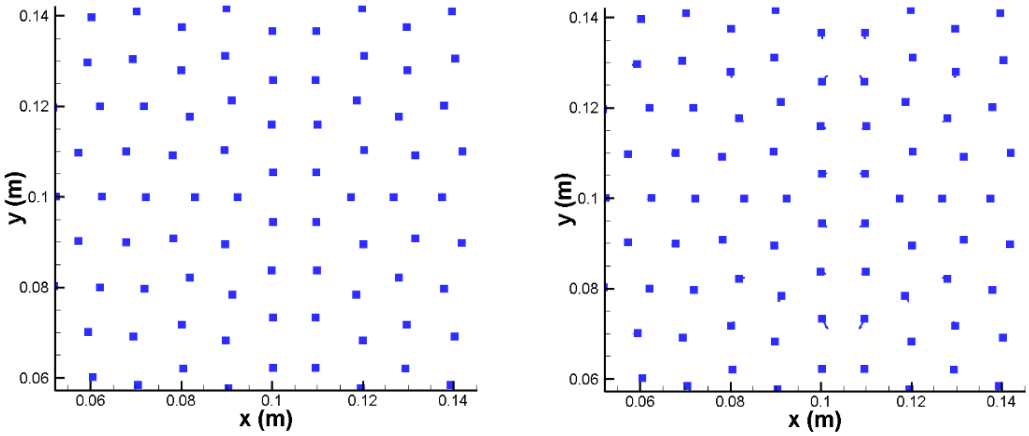


ç. 0.05 s'de Hızlar



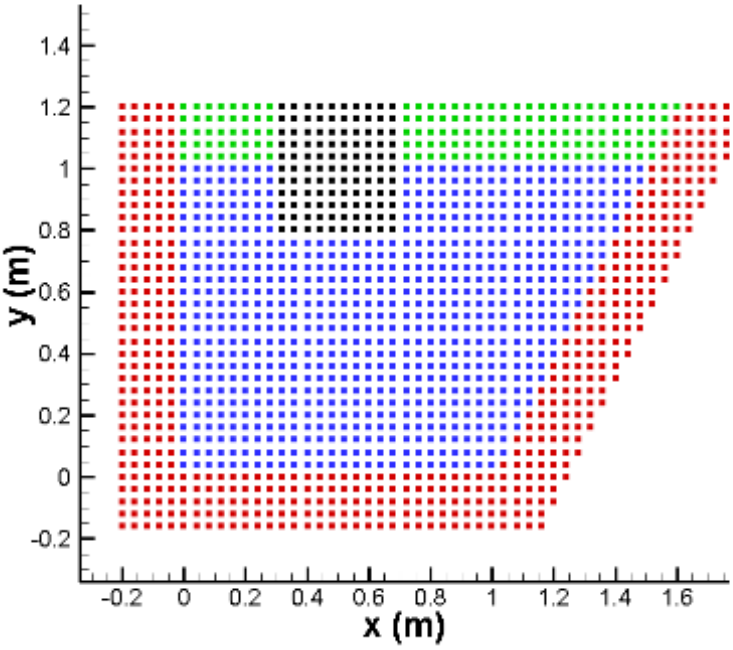
d. 0.1 s'de Parçacık Dağılımı

e. 0.1 s'de Hızlar



Şekil 4.1: Eksik parçacığın olduğu bölgeye doğru hareket eden parçacıklara ait hız vektörleri ve parçacık dağılımlarının zamana göre değişimi.

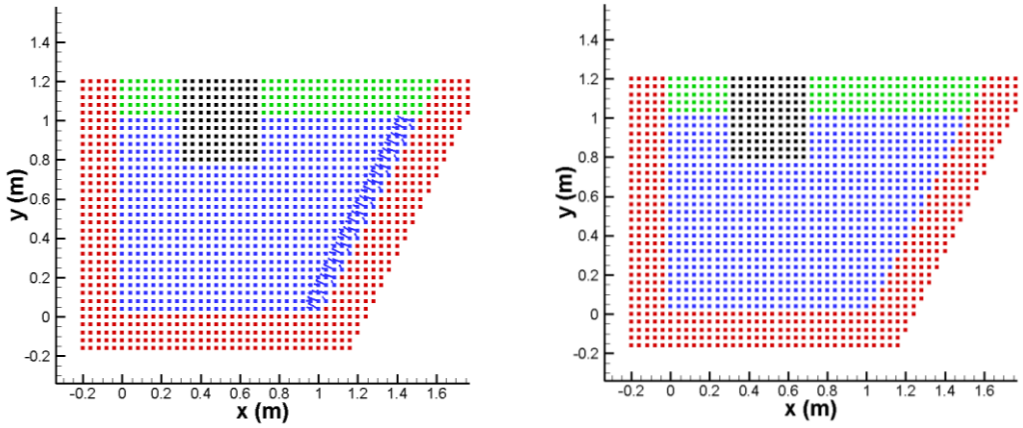
Oluşturulmuş PPA algoritması ile ikinci yapılan denemede, Colagrossi ve diğ. (2012) tarafından da benzer bir uygulaması yapılmış olan, eğik havuz sınırlarına sahip bir tank içerisindeki hız dağılımı incelenmiştir. Bu denemede, birinci adım olarak serbest su yüzeyi üzerinde sanal bir duvar oluşturulmaktadır. İkinci adımda ise sanal duvardaki parçacıklara (akışkan, cisim, havuz sınırı ve sanal duvar) yoğunluk, basınç ve hız değerlerinin ataması yapılmaktadır. Daha sonra PPA algoritması çalıştırılmakta ve parçacıkların yerlerinin homojen hale gelmesi beklenmektedir. Parçacıkların konumlarının homojen olması ardından sanal duvar kaldırılarak İPH yöntemi kapsamında oluşturulmuş olan algoritma PPA'dan elde edilen parçacık konumlarını kullanarak çalıştırılmaktadır. Böylece parçacıkların ilk durumlarındaki düzensiz dağılımlardan kaynaklı fiziksel olmayan hareketler engellenmektedir. Şekil 4.2'deki gibi bir havuzda kartezyen sistemde dağıtılmış parçacıklarda PPA algoritmasının çalıştırılması sonucunda parçacıklarda oluşan hız vektörlerinin zaman içerisindeki değişimleri ve parçacıkların nihai konumları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2: Eğik bir havuzda parçacıkların dağılımı.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te mavi renkteki parçacıklar akışkanı, kırmızı renkteki parçacıklar havuz sınırlarını, siyah renkteki parçacıklar havuz içerisindeki cismi, yeşil renkteki parçacıklar ise serbest su yüzeyinde oluşturulan sanal duvarı temsil etmektedir.

a. 1. Zaman Adımı Sonu b. 2000. Zaman Adımı Sonu



Şekil 4.3: Değişik zaman adımlarında akışkan parçacıklarındaki hız vektörlerinin ve akışkan parçacıklarının nihai konumlarının gösterimi.

Colagrossi ve diğ. (2012) tarafından geliştirilmiş olan PPA algoritmasının başarı ile tatbik edildiği 2 farklı deneme ile görülmüştür. PPA algoritmasına ilişkin daha detaylı bilgiye Colagrossi ve diğ. (2012)'den ulaşılabilir.

4.3 Geliştirilen Bilgisayar Programına Ait Algoritma

Bu başlık altında FORTRAN bilgisayar programı kullanılarak bu tez kapsamında İPH yöntemi ve sayısal uygulamaları temel alınarak oluşturulan bilgisayar programının algoritması maddeler halinde açıklanacaktır.

(a) Problem Bölgesinin/Geometrisinin Oluşturulması: Problem bölgesinin belirlenmesi, akışkan, sınır, cisim parçacıklarının belirlenmiş olan problem bölgesi içerisine dağıtılmasının yapıldığı adımdır. Akışkan, sınır ve cisim parçacıklarına başlangıç koşulları bu adım içerisinde verilmektedir. Problem sınırlarının eğik olduğu durumlarda kartezyen koordinat sistemine göre problem bölgesine dağıtılmış akışkan parçacıklarının PPA algoritması kullanılarak homojenize edilmiş yeni konumları hesaplanmaktadır.

(b) Zaman Döngüsü Başlangıcı: Zaman döngüsü bu adımdan itibaren başlamaktadır. Bu adım içerisinde cisim parçacıklarının (yalpa hareketine uygun olarak) yeni konumları belirlenmektedir.

(c) Akışkan Parçacıklarının Konumlarının Tahmini: Akışkan parçacıklarının ara zaman adımındaki konumları bir önceki zaman adımındaki hız değerlerinden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca akışkan parçacıklarının konumlarına bağlı olarak hayalet parçacıkları oluşturulmaktadır.

(ç) Komşuluk Belirleme: Problem bölgesini oluşturan tüm (akışkan, sınır, cisim, hayalet) parçacıkların hangi parçacıklar ile komşu olduğu belirlenir.

(d) Ağırlık Fonksiyonu Değerlerinin Hesabı: Parçacıkların ve komşularının birbirleri arasındaki mesafeye göre ağırlık fonksiyonu ve ağırlık fonksiyonun türev değerleri hesaplanmaktadır.

(e) Parçacıkların Yoğunluklarının Tahmini: Parçacıkların ara zaman adımında yoğunluklarının süreklilik denklemi, hesaplanmış olan ağırlık fonksiyonu ve ağırlık fonksiyonu türev değerleri ile birlikte, kullanılarak elde edilmektedir.

(f) Yoğunluk Düzeltmesi: Ağırlıklandırılmış ortalama yoğunluk değerinin, parçacığın yoğunluk değerinden çıkarılması suretiyle parçacıkların yoğunluklarında bir sayısal düzeltme yapılmaktadır. Parçacıkların serbest su yüzeyinde olup olmadığının kontrolü de bu adım içerisinde yapılmaktadır. Şayet akışkan parçacığı serbest su yüzeyinde ise yoğunluk düzeltmesi uygulanmamaktadır.

(g) Hal Denklemi: Yoğunluk düzeltmesi sayısal düzeltmesi sonrasında elde edilen parçacık yoğunluklarının hal denklemi içerisinde yerine yazılması ile parçacıkların basınç değerleri bulunmaktadır.

(ğ) Euler Denklemi: Yoğunlukları, basınçları belirlenen parçacıkların, ağırlık fonksiyonu türev değerlerinin yardımıyla ara zaman adımındaki ivme değerleri hesaplanmaktadır.

(h) Toplam İvme Değerlerinin Tespiti: Yapay viskozite ve dış kuvvetler (body forces) nedeni ile parçacıklara etkiyen ivmelerin değerlerinin Euler denkleminden gelen ivme değerine eklenmektedir.

(ı) VXSPH: Serbest su yüzeyine yakın bölgelerde XSPH sayısal düzeltmesi ve parçacıkların yoğun olduğu bölgelerde YPÖ sayısal düzeltmesine ilişkin hesapların yapıldığı adımdır.

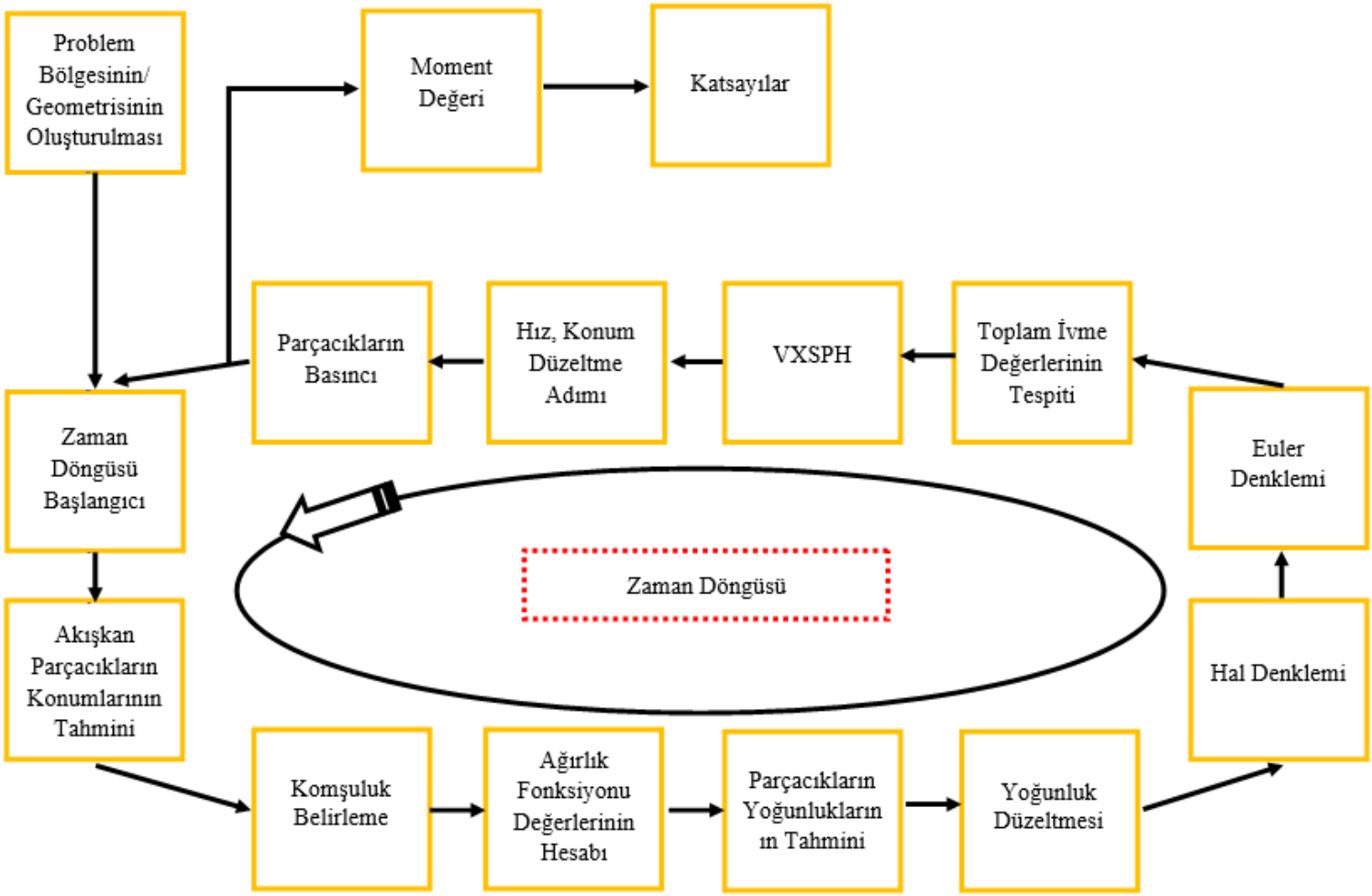
(i) Hız, Konum Düzeltme Adımı: Yarı zaman adımında Euler Denkleminden elde edilen ivme değerlerinin, bir önceki zaman adımındaki hız değerleri ve XSPH sayısal düzeltmesinden elde edilen hız değerinin kullanılması ile yeni zaman adımındaki hız değeri elde edilmektedir. Yeni zaman adımı için elde edilen hız değerleri, parçacıkların bir önceki zaman adımındaki konum değerleri ve YPÖ sayısal düzeltmesinden elde edilen öteleme değerleri ile beraber kullanılarak parçacıkların yeni zaman adımındaki konumları elde edilir. Ayrıca bu adımda hız değerlerinin kullanılması suretiyle girdaplılık değerleri de elde edilmektedir.

(j) Parçacıkların Basıncı: Yeni zaman adımı için parçacıkların yoğunluk değerleri (düzeltme) hesaplanmaktadır. Yeni zaman adımına ait basınç değerleri düzeltme adımında elde edilmiş yoğunluk değerlerinin hal denklemi içerisine konulması ile tayin edilir. Cismin en dış sınırını oluşturan parçacıklara ait yüzey normalleri de bu adımda hesaplanır. Bu adımdan sonra tekrar (b) adımına gidilir ve zaman döngüsü istenilen peryodun sonuna kadar devam eder.

(k) Moment Değeri: Parçacıklardaki basınç değerleri ile yer vektörünün vektörel çarpımı değerlerin elde edildiği zaman adımı dikkate alınarak yapılır ve cismine etkiyen moment değerleri tayin edilir. Moment boyutsuzlaştırılması, frekans boyutsuzlaştırılması gibi işlemler bu adımda hesaplanır.

(l) Katsayılar: Elde edilen moment değerlerinin zaman içerisindeki (bir peryotluk zaman aralığına dikkat edilecek şekilde) integrasyonu yapılarak ek su kütle atalet momenti ve moment katsayıları hesaplanır.

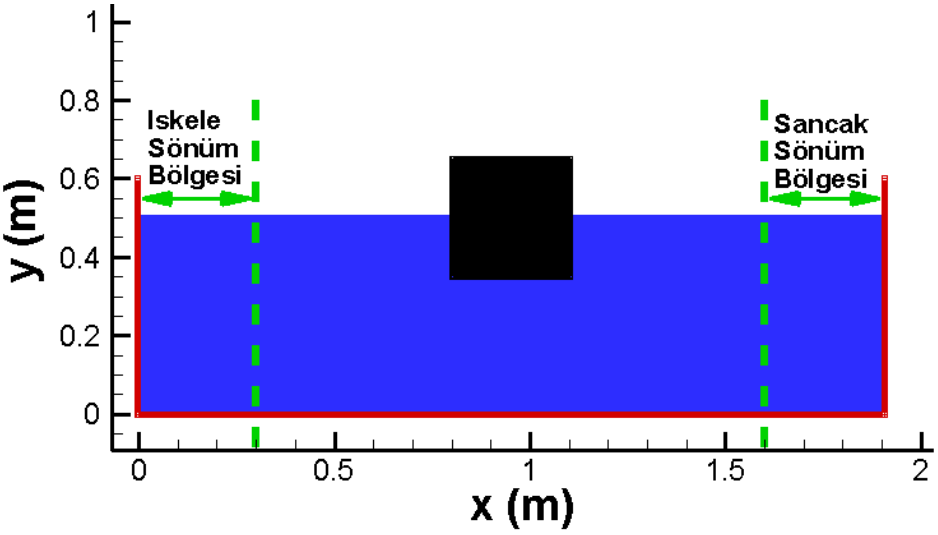
Yukarıda ayrıntıları belirtilen adımların bir akış diyağramı olarak gösterildiği sayısal çözüm algoritması Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4: Geliştirilen bilgisayar programına ait algoritma.

5. YALPA PROBLEMİNİN İPH YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

İPH algoritması ile zorlanmış yalpa hareketinin inceleneceği bu tez kapsamında iki farklı havuz geometrisi için çözüm yapılmıştır. İlk geometride havuz yan duvar sınırları dik alınmıştır. Dik havuz sınırının kullanıldığı analizlerde havuzun sancak ve iskele uçlarına yakın bölgelerde sönüm bölgeleri oluşturulmuştur. Problem geometrisi ve oluşturulmuş olan sönüm bölgeleri Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1: Dik sınırlı havuz uygulamasında sönüm bölgeleri.

Sönüm bölgelerinde akışkan parçacıklarının hızları (5.1) ve (5.2) kullanılarak azaltımış ve yalpa hareketi yapan cismin çevresindeki akışın, havuz sınırlarından yansıyan dalgalar nedeni ile bozulması engellenmiştir.

$$\vec{u} = \vec{u}_0 f(x) \tag{5.1}$$

$$f(x) = 1 - e^{\left(-\psi\left(\delta x_0 - (x - x_0)\right)\right)} \tag{5.2}$$

(5.2)'deki ψ sönümleme katsayısıdır ve 4'e eşit alınmıştır. δx_0 sönüm bölgesi uzunluğudur ve bu çalışmada 0.3 olarak alınmıştır. x_0 sönüm bölgesinin x eksenindeki başlangıç noktasıdır. Sancak için 0.3m, iskele için ise 1.6m'ye eşittir.

İkinci geometride ise havuz yan duvar sınırları eğik olarak kullanılmıştır. Havuz sınırlarının eğik yapılmasının amacı havuz sınırlarında dalgaları sönümleyerek havuz sınırlarından dalga yansımasını engellemek ve cisim çevresindeki akışın bozulmamasını sağlamaktır. Eğik havuz sınırlarının olduğu durumlarda kullanılan PPA algoritmasına yönelik detaylı bilgi Bölüm 4.2.5'te yer almaktadır.

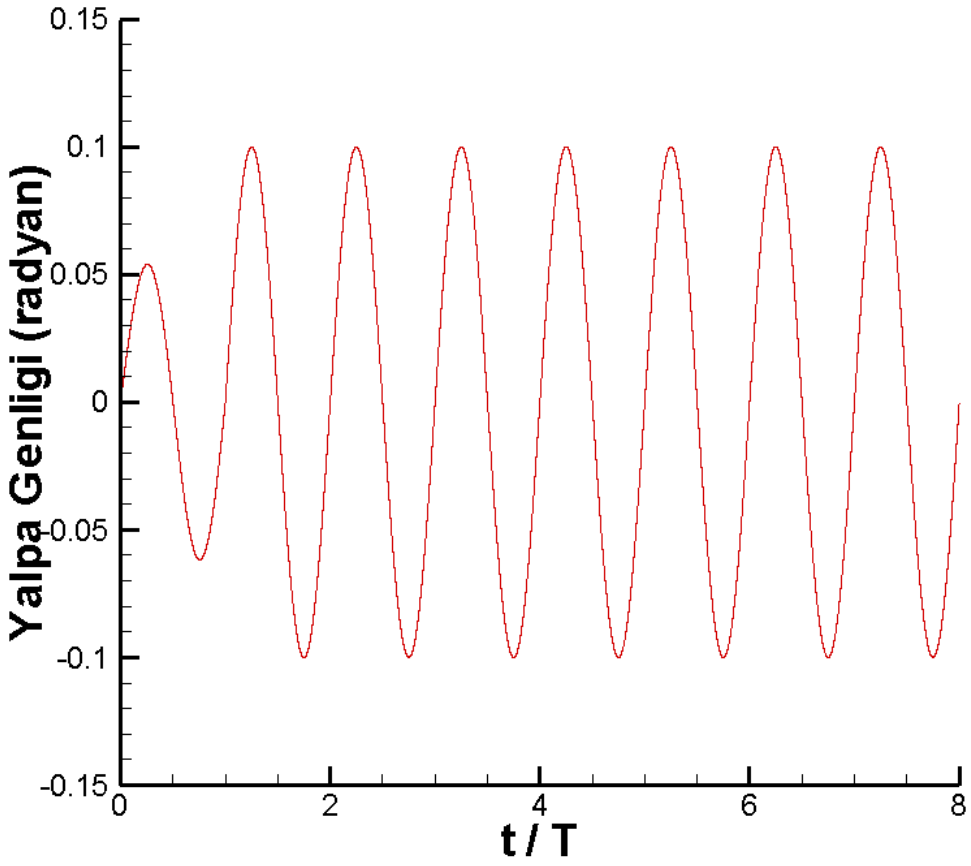
Ayrıca hareketli analizlerde, cismin hareketinin başlangıcında yalpa genliğine kademeli olarak ulaşılması için bir sayısal düzenleme yapılmıştır. Yalpa hareketinin ilk periyodunda (özellikle hareketin periyotu düşük bir değer ise) güçlü geçici akışlar görülmektedir. Analizlerden alınan sonuçlarının bu geçici akışlardan etkilenmemesi için cismin hareketi için başlangıç fonksiyonu (start-up function/ramped function) kullanılmıştır. Literatürde Yeung ve diğ. (1998), Jaouen ve diğ. (2011), Yıldız ve diğ. (2016) ve daha birçok araştırmacı tarafından başlangıç fonksiyonunun değişik formları kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılmış olan başlangıç fonksiyonu (5.3)'te verilmiştir.

$$D(t)=\begin{cases}\dfrac{1}{2}\sin\left(\dfrac{\pi}{10T}t-\dfrac{1}{2}\pi\right)+\dfrac{1}{2} & t<T\\ 1 & t\geq T\end{cases} \tag{5.3}$$

Başlangıç fonksiyonunun zorlanmış cismin yalpa hareketi ile çarpılması neticesinde (5.4) elde edilmekte olup yalpa hareketi cisme aynı denklem ile yaptırılmaktadır.

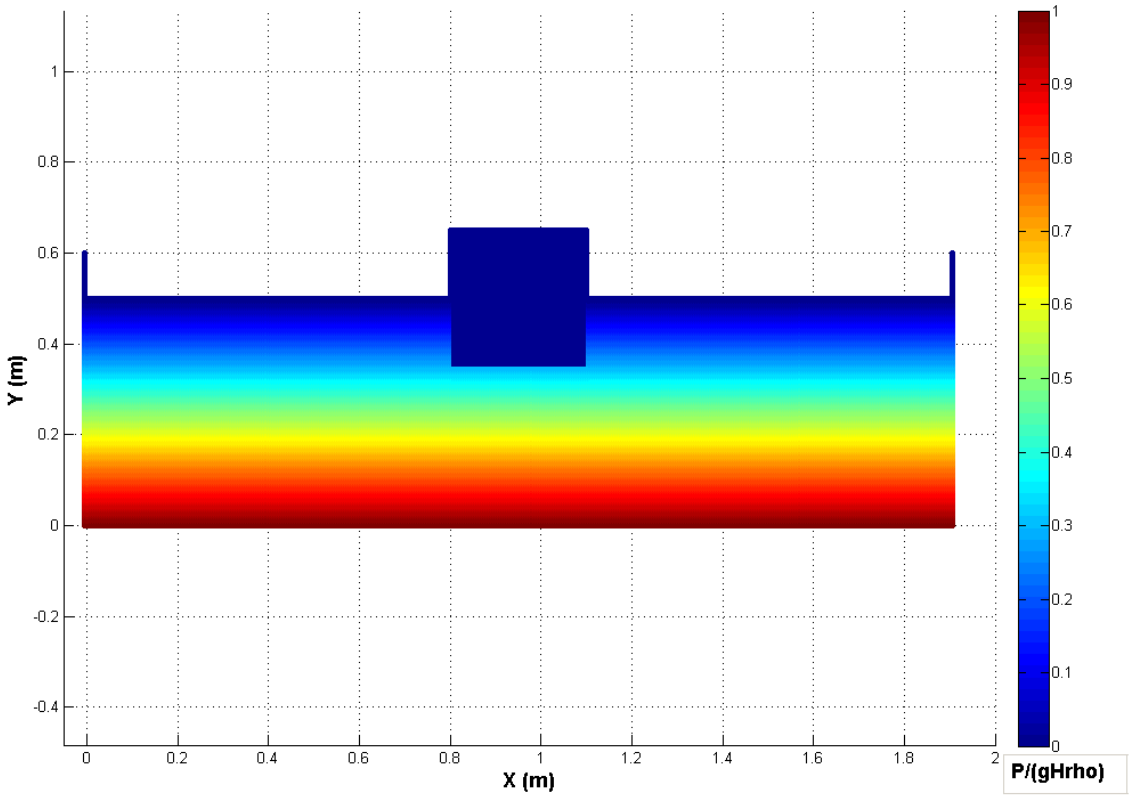
$$\varphi = D(t)\varphi_a \sin(\omega t) \tag{5.4}$$

Cisme yaptırılan yalpa hareketinde başlangıç fonksiyonun etkisi Şekil 5.2'de görülmektedir. Dikkat edilecek olursa cismin genliği ilk periyotta ikinci periyoda göre yarı yarıya düşüktür ve zamana bağlı olarak genlik değeri artmaktadır. Başlangıç fonksiyonun kullanılması nedeni ile cismin analizinde kullanılacak sonuçlarda ikinci periyottan sonraki değerler alınmıştır.



Şekil 5.2: Yalpa açısının t / T oranına karşı grafiği.

Doğrulama amacıyla yapılmış olan analizlerin çoğunluğunda Şekil 5.3'te görülen problem geometrisi ve başlangıç koşulları kullanılmıştır. Görüldüğü üzere akışkan parçacıklarına başlangıç koşulu olarak parçacıkların konumlarına uygun şekilde hidrostatik basınç değeri ve referans yoğunluk değeri olan 1000kg/m^3 değeri atanmıştır. Problem geometrisini oluşturmak için 0.5 m havuz yüksekliği, 1.9 m havuz uzunluğu, 0.3 m cisim yüksekliği ve 0.3 m cisim genişliği kullanılmıştır. Şekil 5.3'te yer alan problem geometrisinin oluşturulması için 36209 tane akışkan, 623 tane sınır, 3721 cisim, 1170 adet hayalet parçacık kullanılmış olup toplamda 41723 adet parçacık kullanılmıştır. Parçacıklar arası mesafe *dx*'in 0.005 m *dt*'nin 0.00004 s olarak seçildiği geometri bundan sonra cismin hareket ettiği, ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment momenti katsayısının tespitinde bulunulan bütün analizde başlangıç koşuludur.



Şekil 5.3: Dikdörtgen kesitli problem geometrisi ve parçacıklara atanmış başlangıç basınç değerleri.

5.1 Hidrostatik Doğrulama

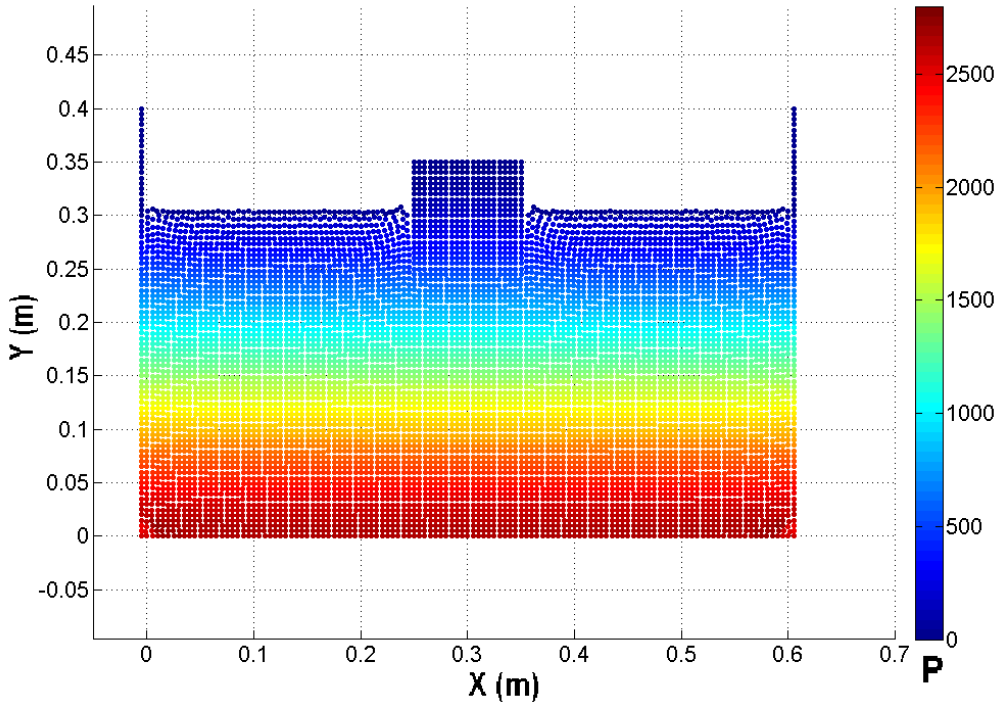
Çözüm algoritması ile yapılmış olan ilk deneme hidrostatik durumun kontrolü içindir. Hidrostatik durumda problem geometrisi içerisindeki cisme herhangi bir hareket verilmemiş olup havuz içerisindeki akışkan parçacıklarındaki hidrostatik basıncın zaman içerisindeki takibi yapılmıştır. Zaman içerisinde hidrostatik basıncın değişimi Şekil 5.4'de dik sınırlı havuz için Şekil 5.5'te eğik sınırlı havuz için verilmiştir.

Hidrostatik durumun takibi için dik sınırlı havuzda yapılmış olan kontrolde Şekil 5.3'te verilmiş olan havuz geometrisi ve cisim geometrisi küçültülmüştür. Havuz yüksekliği, havuz uzunluğu, cisim yüksekliği, cisim genişliği sırası ile 0.6 m, 0.3 m, 0.1 m, 0.1 m alınmıştır. Havuz ve cisim geometrisindeki bu değişikliğin sebebi analiz zamanın kısaltılmak istenmesidir. Parçacık sayısının artışı ile analiz zamanının ne kadar arttığına ilişkin sonuçlar Tablo 6.1'de verilmiş olup, bu konuya dair değerlendirmelere 7 Sonuçlar bölümünde yer verilmiştir.

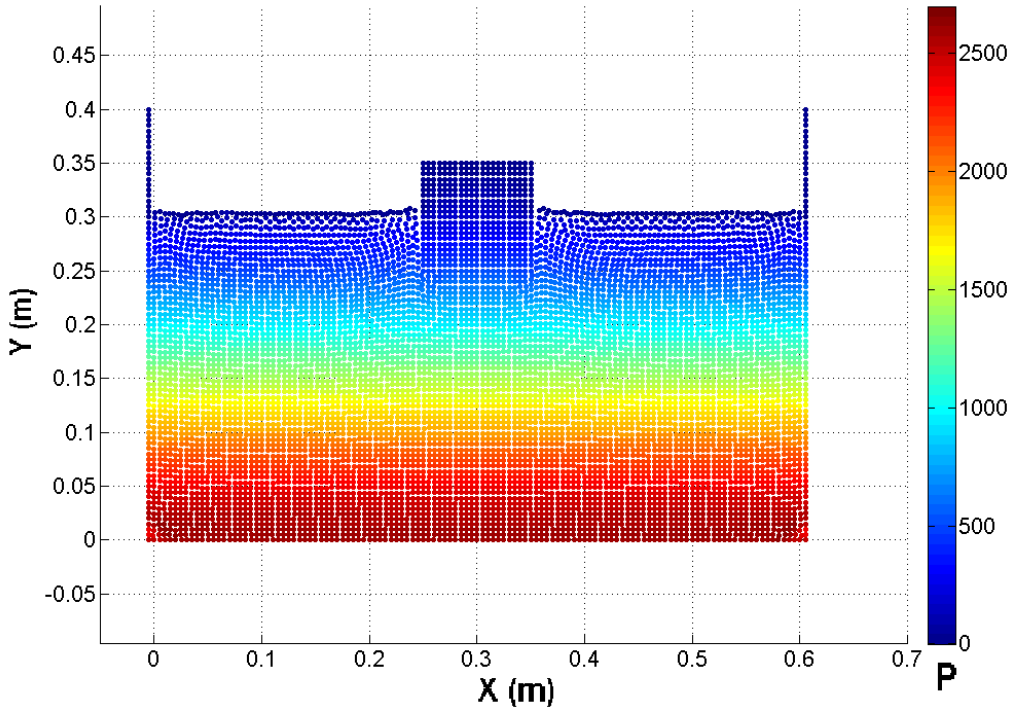
Dik sınırlı havuzaki hidrostatik durumun takibine ilişkin yapılmış olan analizde dx ve dt sırası ile 0.005 m ve 0.00003 s alınmıştır. Toplamda 8250 (akışkan, sınır, cisim ve

hayalet) parçacık kullanılmıştır. Şekil 5.4'te de görüldüğü üzere havuz içerisindeki basınç dağılımında zaman içerisinde ihmal edilebilir düzeyde çok küçük değişiklikler gözlemlenmiş olup zaman içinde algoritmanın stabil olduğu anlaşılmaktadır.

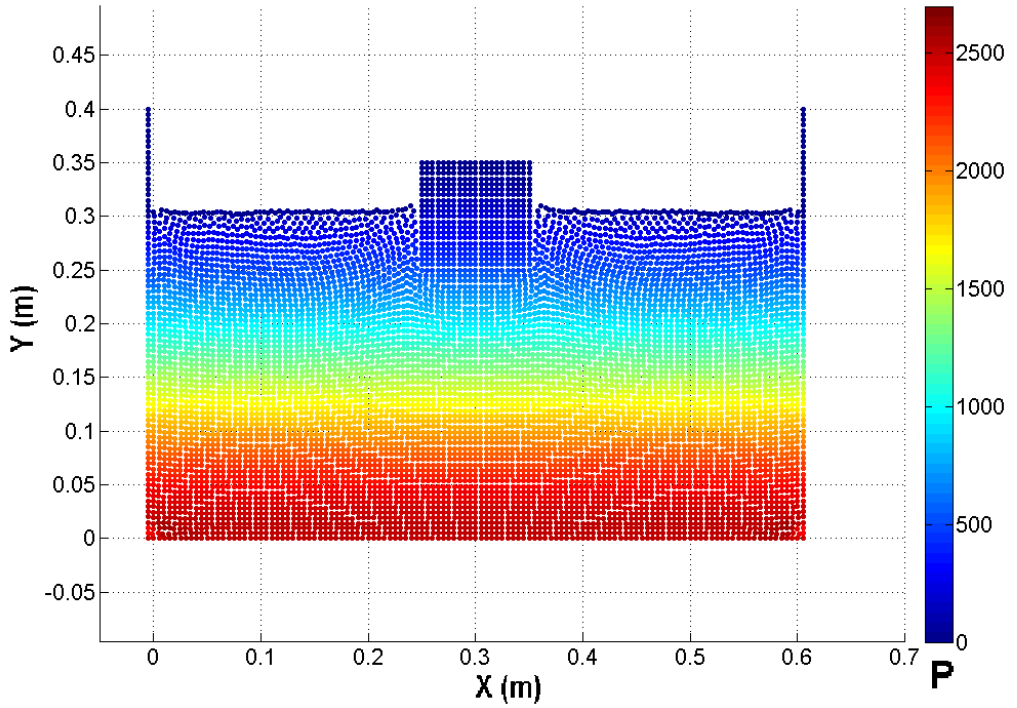
a. t = 0.5s'de



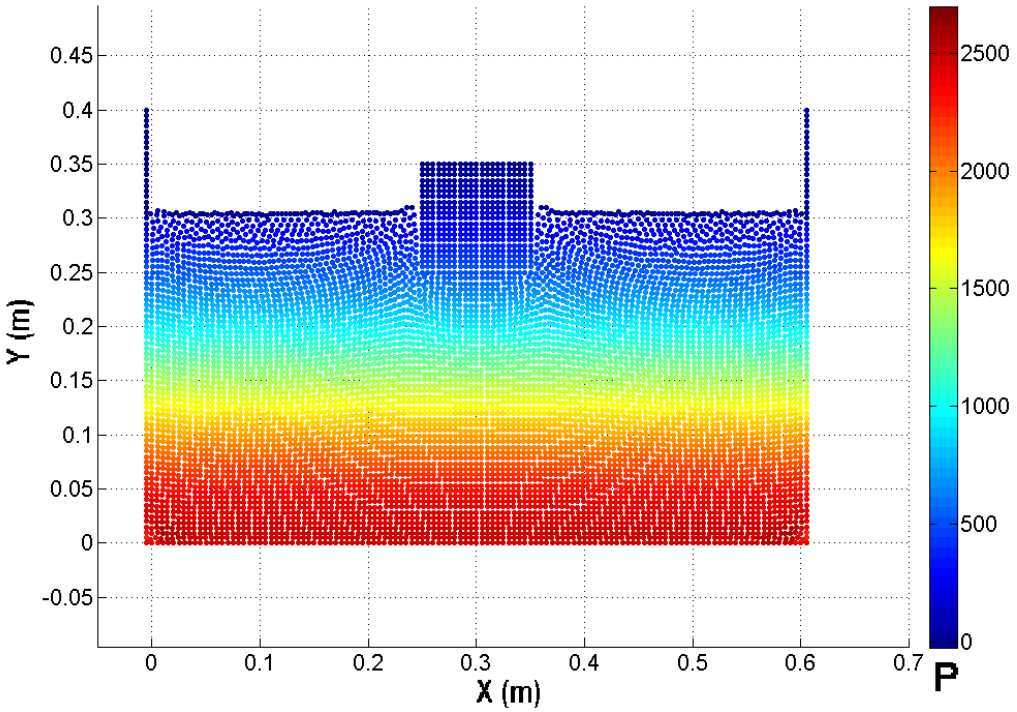
b. t = 1.0s'de



c. t = 1.5s'de



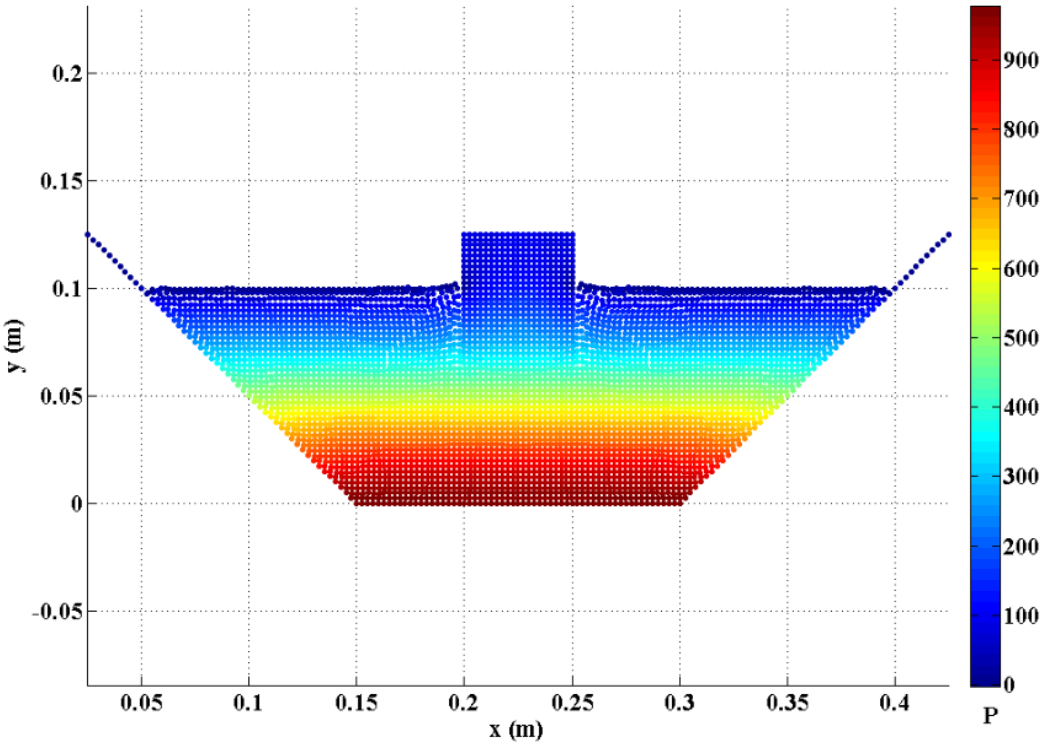
ç. t = 2.0s'de



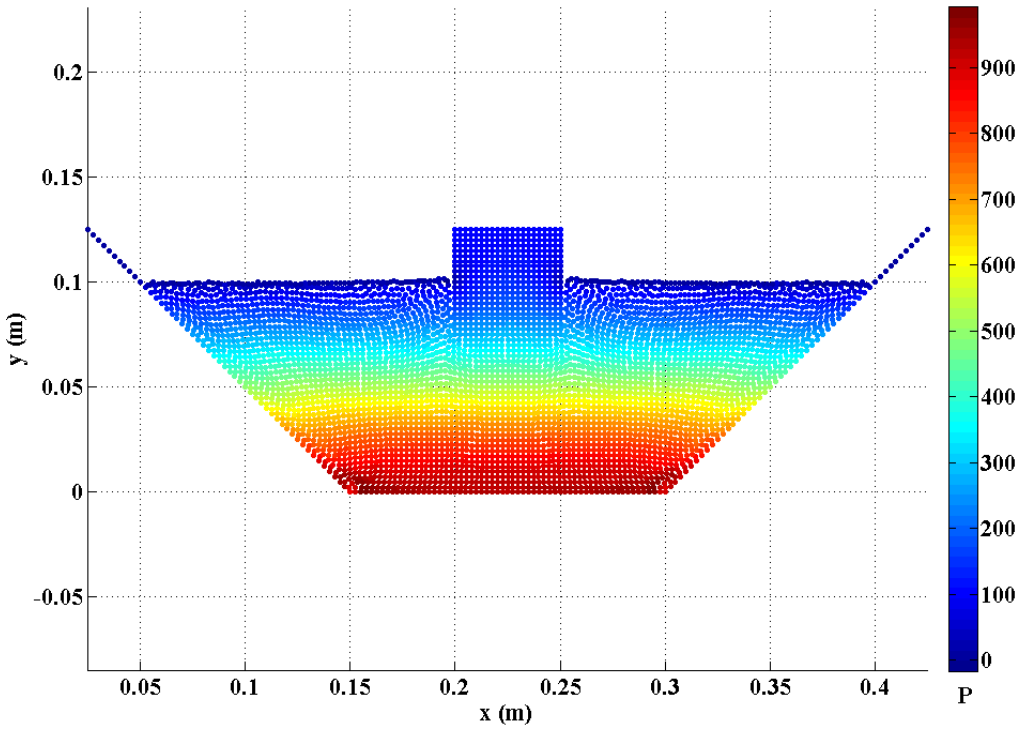
Şekil 5.4: Dik sınırlı havuzda zaman içerisinde hidrostatik basıncın değişimi.

Eğik sınırlı havuzaki hidrostatik durumun takibine ilişkin yapılmış olan analizde dx ve dt sırası ile 0.0025 m ve 0.00003 s alınmıştır. Toplamda 5884 (akışkan, sınır, cisim ve hayalet) parçacık kullanılmıştır. Şekil 5.5'de de görüldüğü üzere havuz içerisindeki basınç dağılımında zaman içerisinde ihmal edilebilir düzeyde çok küçük değişiklikler gözlemlenmiş olup zaman içinde algoritmanın stabil olduğu anlaşılmaktadır.

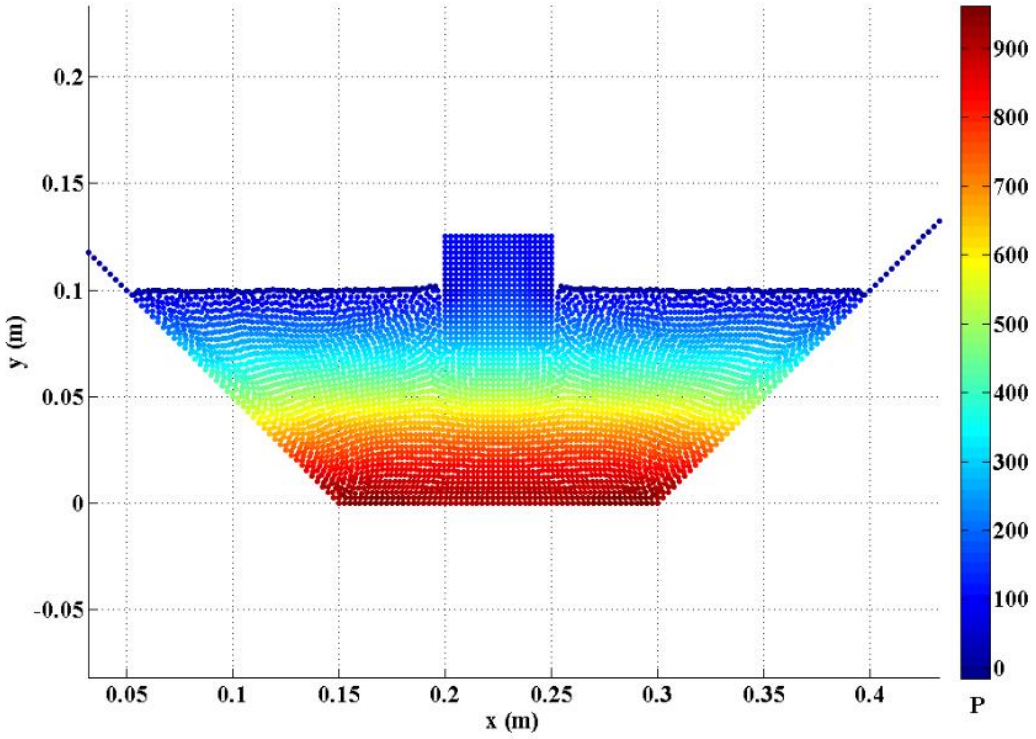
a. t = 0.5s'de



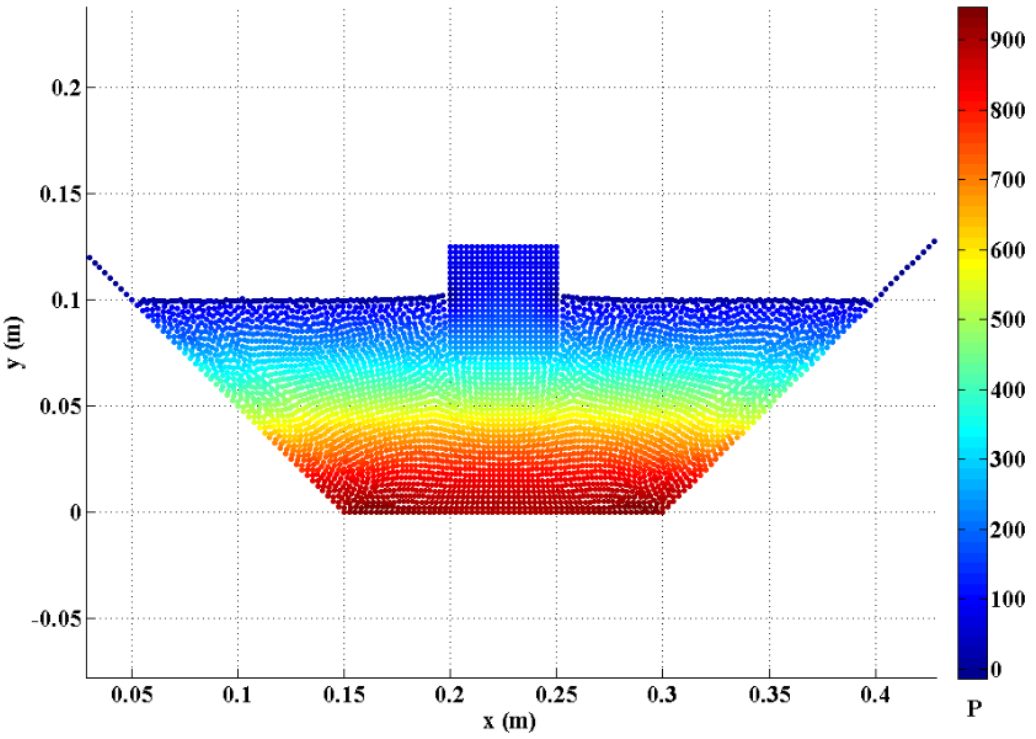
b. t = 1.0s'de



c. t = 1.5s’de



ç. t = 2.0s’de



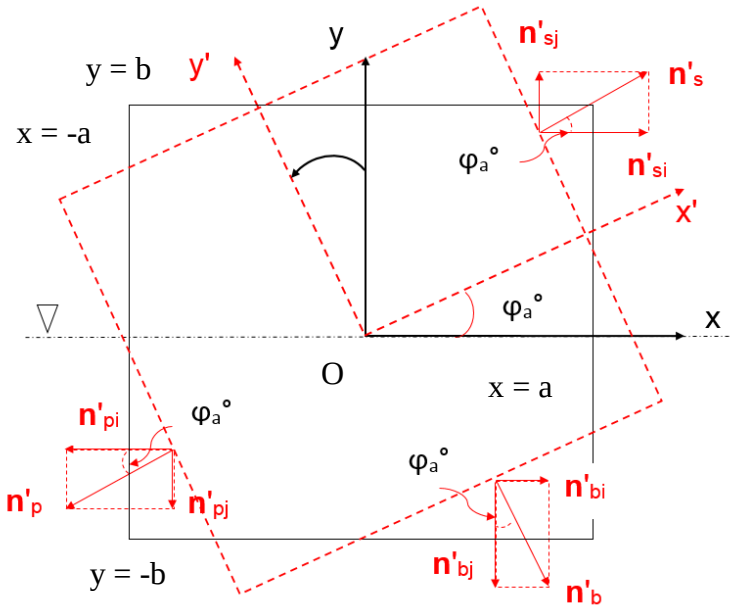
Şekil 5.5: Eğik sınırlı havuzda zaman içerisinde hidrostatik basıncın değişimi.

5.2 Hidrodinamik Moment Doğrulaması

Hidrostatik durumda cismin dış sınırını oluşturan parçacıklar üzerindeki basınç değerleri ve parçacık normalleri kullanılarak cismin zorlanmış hareketi nedeniyle cisme etkiyen hidrodinamik moment de hesaplanmıştır. Cisme etkiyen hidrodinamik momentin hesaplanmasında kullanılan denklem (5.5)'te verilmiştir.

$$M = \int_B p_d \left(n_x y - n_y x\right) ds + \int_B \left(\vec{r} \times \tau\right) ds \qquad (5.5)$$

(5.5)'te p_d dinamik basıncı, *x* ve *y* parçacığın dönme merkezinden olan uzaklıklarını, *B* cismin su altında kalan tüm yüzeyini, n_x ve n_y parçacığın yüzey normali bileşenlerini, *ds* yüzeyi, τ kayma gerilmesini, r cismin dönme merkezi ile parçacık arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Euler denkleminin kullanımı ve analizlerde kullanılan cisimlerin dikdörtgen kesitli olması nedeni ile bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde momentin sadece basınç bileşeni hesaplamalara dahil edilmiştir. Benzer şekilde Yeung ve diğ. (1998) ve Salui ve diğ. (2000)'de dikdörtgen kesit ile yaptıkları analizlerde basınca ilişkin birinci terimin, kayma gerilmelerinin yer aldığı ikinci terim ile karşılaştırıldığında daha baskın olduğunu ifade etmiş ve hesapladıkları moment değerinde kayma gerilmelerine ilişkin kısmı ihmal etmişlerdir. Yüzey normallerinin hesaplanması için Şekil 5.6'te gösterilen eksen takımı ve işaretler kullanılmıştır.



Şekil 5.6: Cismin hareketinde kullanılan eksen takımı ve yüzey normalleri.

Şekil 5.6'da *p* iskeleyi, *s* sancağı, *b* ise cismin tabanını ifade etmektedir. Yüzey normallerinin hesaplanması ise aşağıda özetlenmiştir. Şekil 5.6'daki eksen takımı göz önüne alındığında cismin tabanının döndürülmeden önceki denklemi ve tabanın yüzey normali (5.6)'da verildiği gibidir.

$$y = -b \quad ve \quad \vec{n} = -\vec{j} \tag{5.6}$$

Cismin, O noktası etrafında $\varphi = \varphi_a \sin(\omega t)$ ile harmonik bir hareket yaptığını farzedersek, cisim tabanını oluşturan herhangi bir parçacığının polar koordinatlardaki denklemi $r\sin\theta = -b$ olduğundan, hareketli halde tabandaki parçacığın denklemi (5.7)'te gösterildiği gibi olur.

$$\vec{r}\sin[\theta + \varphi] = \vec{r}\sin\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right] = -b \tag{5.7}$$

Taban üzerinde normal vektörü ise

$$S = \vec{r}\sin\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right] + b = 0 \tag{5.8}$$

için,

$$\vec{n} = \frac{\nabla S}{|\nabla S|} = \frac{\sin\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right]\vec{e}_r + \cos\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right]\vec{e}_\theta}{1} \tag{5.9}$$

$$\vec{n} = \sin\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right]\left(\cos\theta\vec{i} + \sin\theta\vec{j}\right) + \cos\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right]\left(-\sin\theta\vec{i} + \cos\theta\vec{j}\right) \tag{5.10}$$

$$\vec{n} = \left\{\sin\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right]\cos\theta - \cos\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right]\sin\theta\right\}\vec{i} + \left\{\sin\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right]\sin\theta + \cos\left[\theta + \varphi_a \sin(\omega t)\right]\cos\theta\right\}\vec{j} \tag{5.11}$$

Şekil 5.6'daki eksen takımı göz önüne alındığında cismin sancak tarafındaki duvarının döndürülmeden önceki denklemi ve yüzey normali (5.12)'da verildiği gibidir.

$$x = a \quad ve \quad \vec{n} = \vec{i} \tag{5.12}$$

Cismin, O noktası etrafında $\varphi = \varphi_a \sin(\omega t)$ ile harmonik bir hareket yaptığını farzedersek, cisim sancak duvarını oluşturan herhangi bir parçacığının polar koordinatlardaki denklemi $r\cos\theta = a$ olduğundan, hareketli halde sancak duvarındaki parçacığın denklemi (5.13)'te gösterildiği gibi olur.

$$\vec{r}\cos\left[\theta+\varphi\right]=\vec{r}\cos\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]=a \tag{5.13}$$

Taban üzerinde normal vektörü ise

$$S=\vec{r}\cos\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]-a=0 \tag{5.14}$$

için,

$$\vec{n}=\frac{\nabla S}{\left|\nabla S\right|}=\frac{\cos\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]\vec{e}_r-\sin\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]\vec{e}_\theta}{1} \tag{5.15}$$

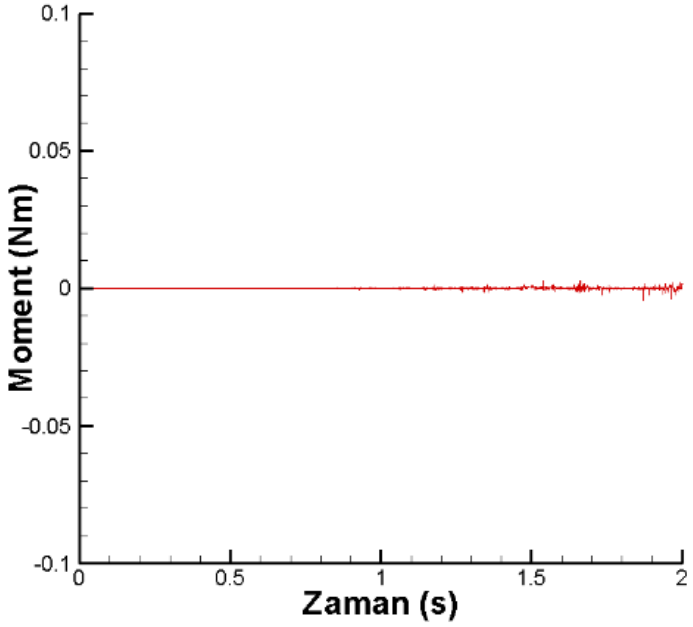
$$\vec{n}=\cos\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]\left(\cos\theta\vec{i}+\sin\theta\vec{j}\right)- \sin\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]\left(-\sin\theta\vec{i}+\cos\theta\vec{j}\right) \tag{5.16}$$

$$\vec{n}=\left\{\cos\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]\cos\theta+\sin\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]\sin\theta\right\}\vec{i}+ \left\{\cos\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]\sin\theta-\sin\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]\cos\theta\right\}\vec{j} \tag{5.17}$$

Benzer şekilde iskeleye ait duvarın normalide (5.18)'den hesaplanmaktadır.

$$S=\vec{r}\cos\left[\theta+\varphi_a\sin\left(\omega t\right)\right]+a=0 \tag{5.18}$$

Yüzey normallerinin elde edilmesine yönelik algoritma bilgisayar programına eklendikten sonra "Bölüm 5.1 Hidrostatik Doğrulama" adımında elde edilen basınç değerleri kullanılarak moment hesaplanmıştır. Hidrostatik doğrulama adımında cisim hareketsiz durduğu, dönme merkezi cismin orta noktası olduğu ve cisme ait şeklin simetrik olması sebeplerinden cisme etkiyen hidrodinamik momentin "0" a eşit olması beklenmektedir. Hidrostatik durum için elde edilen momentin zamana göre grafiği Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7: Hidrostatik durumda cisme etkiyen momentin zamana göre değişimi.

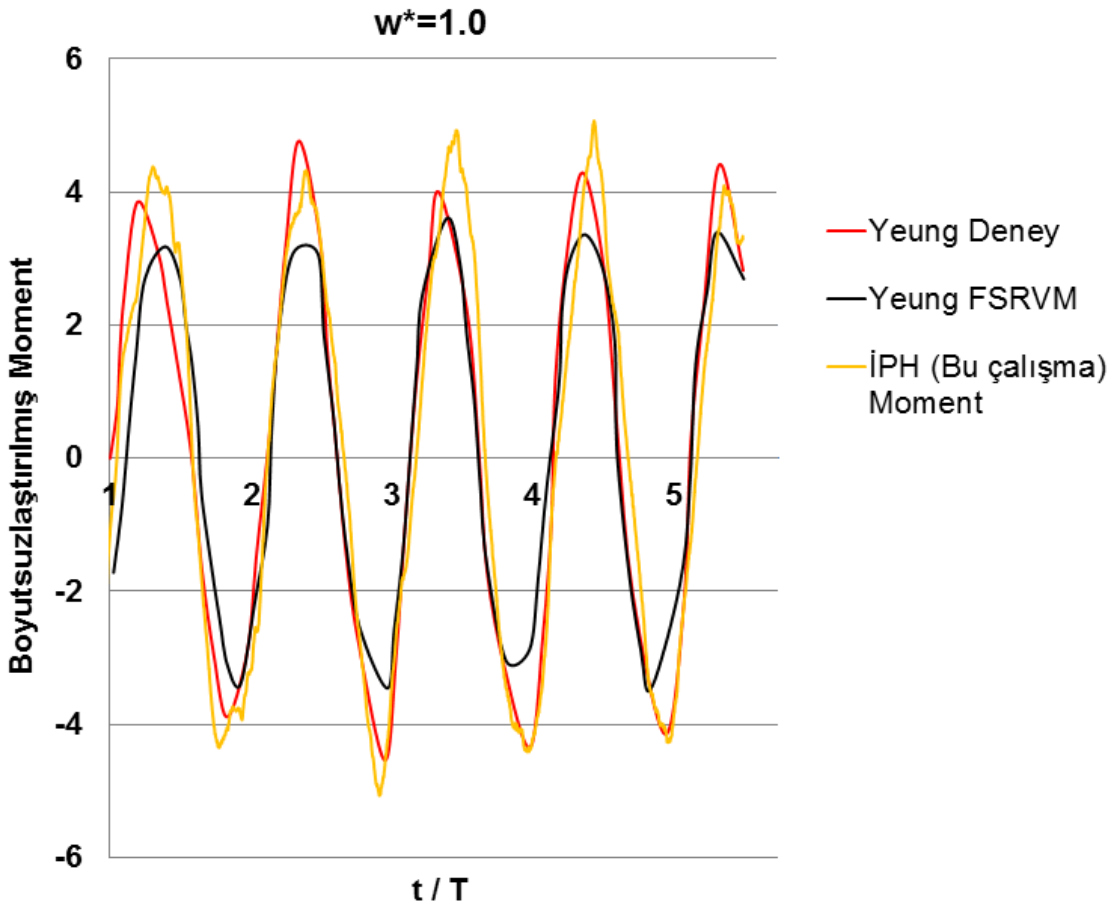
Şekil 5.7'den da görüleceği üzere momentteki değişim çok küçük olup 10^{-1} Nm mertebesinde bile moment değerinde herhangi bir dalgalanma/değişim gözlemlenmemektedir.

Bu başlık altında yapılan ikinci doğrulama cisim hareketli iken tespit edilen moment için yapılmıştır. Cisim hareketli iken İPH algoritması ile elde edilen sonuçlar Yeung ve diğ., (1998)'de yer alan deneysel ve sayısal sonuçlar ile Şekil 5.8'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için yapılan analizde cismin yalpa hareketinin genliği 0.1 radyan'a, boyutsuz açısal frekansı 1.0'e eşittir. Yukarıda da belirtildiği üzere bundan sonra cismin hareketini içeren bütün analizlerde Şekil 5.3 için geçerli olan problem geometrisi ve başlangıç koşulları kullanılmıştır. Moment ve açısal frekansın boyutsuzlaştırılmasında kullanılan denklemler sırası ile (5.19) ve (5.20)'de verilmiştir.

$$M^* = \frac{M}{\rho \varphi_a^2 \omega^2 b^4} \tag{5.19}$$

$$\omega^* = \omega \sqrt{b/g} \tag{5.20}$$

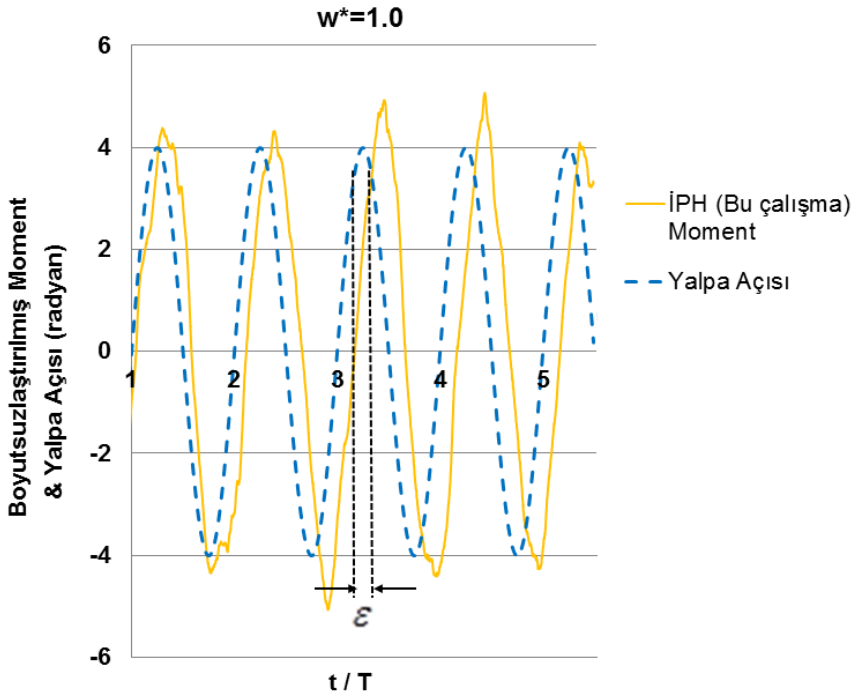
(5.19) ve (5.20)'de b yarı genişlik, φ_a cismin yalpa genliği ve ω cismin açısal frekansıdır.



Şekil 5.8: İPH yöntemi ile elde edilmiş moment sonuçlarının diğer sayısal yöntem ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılması.

Şekil 5.8'den de görüldüğü üzere bu çalışmada elde edilen sonuçlar yalpa hareketinin kestiriminde kullanılmakta olan sayısal metodlardan biri olan FSRVM'ye göre deney sonuçlarına daha yakın değerler vermiştir.

Bu doğrulamada, elde edilen moment değerleri ile cismin hareketi arasında bir faz farkı olup olmadığı da kontrol edilmiştir. Bu faz farkının oluşup oluşmadığının kontrolü için cismin hareketi ile bu doğrulamada elde edilen moment değerleri Şekil 5.9'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.9: Cismin yalpa açısı ve cisme etkiyen moment değerleri arasındaki faz farkının karşılaştırılması.

Şekil 5.9'dan görüldüğü üzere yalpa hareketi ile elde edilen moment değerleri arasında ε'luk bir faz farkı elde edilmiştir. Şekil 5.9'da cismin hareketine ilişkin grafik moment değerleri ile daha iyi karşılaştırılması için 40 ile çarpılmıştır.

5.3 Hidrodinamik Katsayıların Doğrulaması

Çözüm algoritmasına ilişkin üçüncü doğrulama, değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde elde edilen ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarının, literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılması şeklinde yapılmıştır. Şekil 5.10- Şekil 5.13'de elde edilen sonuçlar ve literatürdeki deneysel ile sayısal çalışmalar görülmektedir. Ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarının tespiti için (5.5)'in birinci kısmından elde edilen moment değerleri ek su kütle atalet momenti için (5.21), sönüm moment katsayısı için (5.22)'nin içerisinde yerine konulmuştur.

$$a_{66}(t_0) = \frac{1}{\pi \varphi_a \omega} \int_{t_0-\frac{T}{2}}^{t_0+\frac{T}{2}} M(t) \sin(\omega t)\, dt \tag{5.21}$$

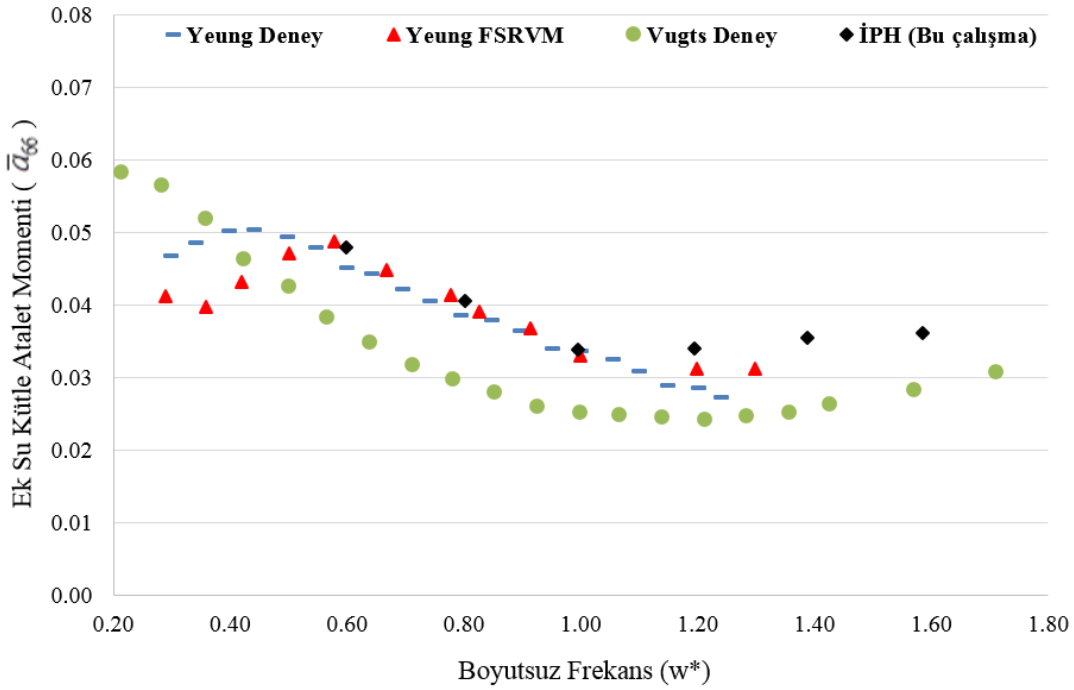
$$b_{66}(t_0) = \frac{1}{\pi \varphi_a} \int_{t_0-\frac{T}{2}}^{t_0+\frac{T}{2}} M(t) \cos(\omega t)\, dt \tag{5.22}$$

(5.21) ve (5.22) numaralı denklemlerden elde edilen katsayıların boyutsuzlaştırılmış halleri,

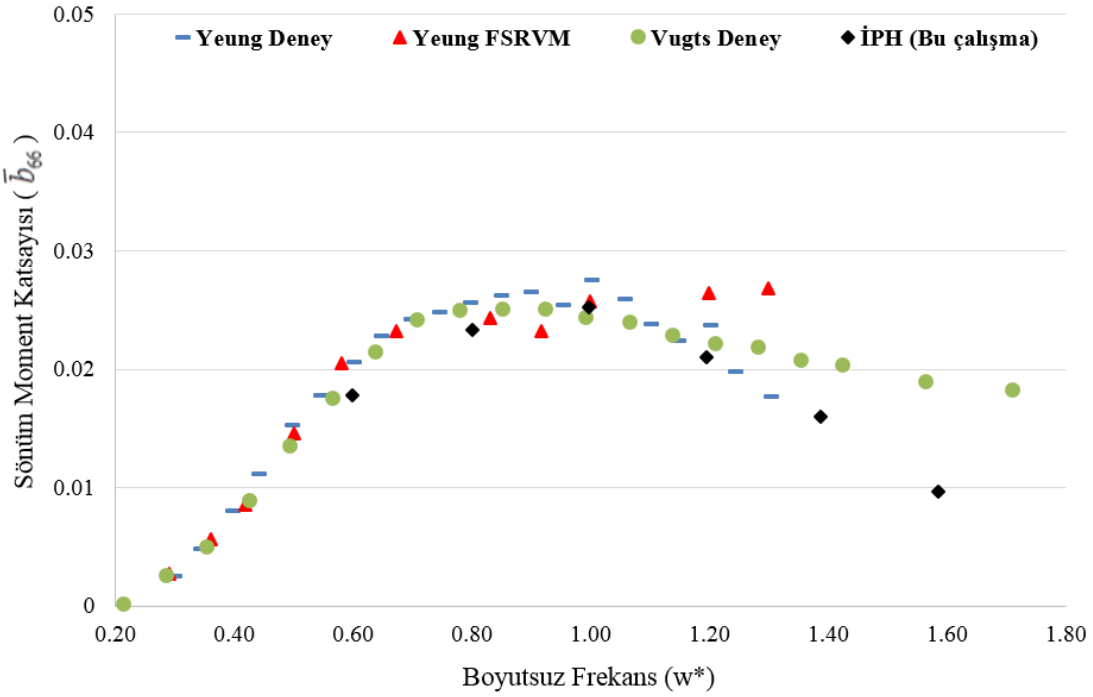
$$\overline{a_{66}} = \frac{a_{66}}{4\rho\nabla b^2} \tag{5.23}$$

$$\overline{b_{66}} = \frac{b_{66}}{4\rho\nabla b^2} \tag{5.24}$$

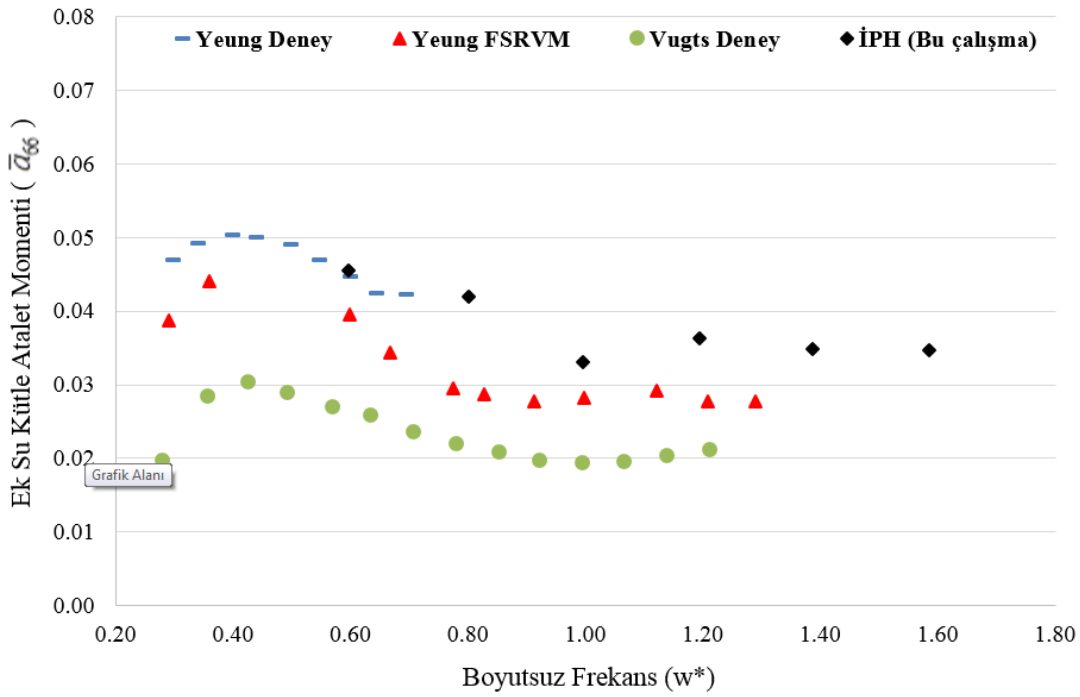
(5.21)-(5.24)'de kullanılmış olan a_{66}, $\overline{a_{66}}$, b_{66}, $\overline{b_{66}}$, ∇ terimleri sırasıyla ek su kütle atalet momenti, boyutsuz ek su kütle atalet momenti, sönüm moment katsayısı, boyutsuz sönüm moment katsayısı ve deplasmanı ifade etmektedir.



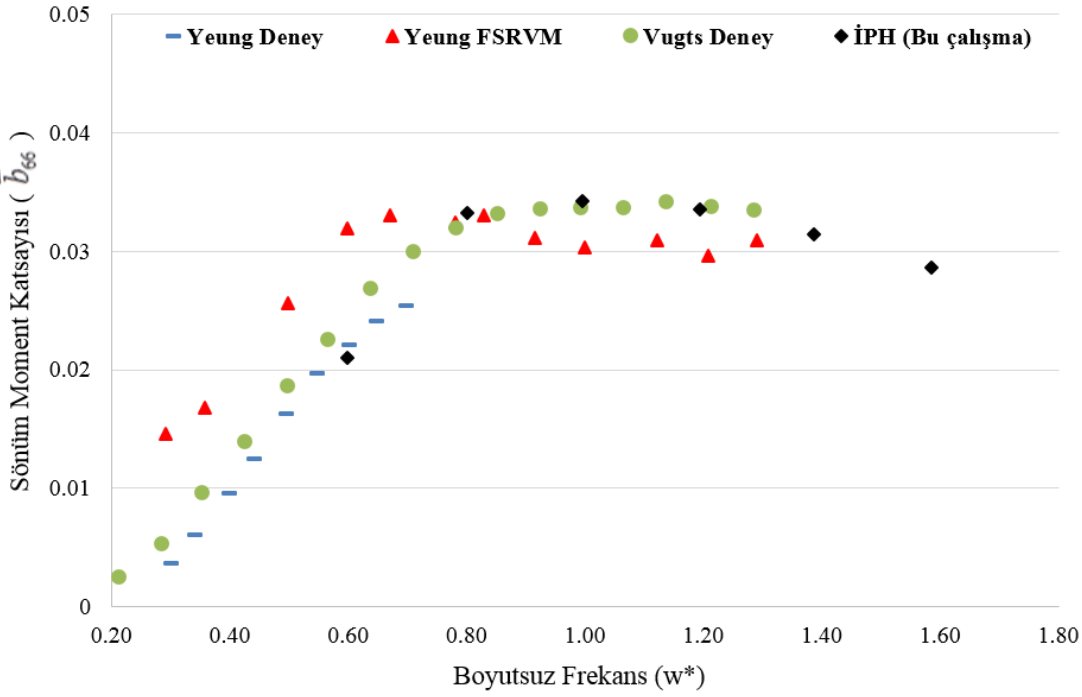
Şekil 5.10: φ_a = 0.1 radyan için ek su kütle atalet momenti değerleri.



Şekil 5.11: φ_a = 0.1 radyan için sönüm moment katsayısı değerleri.



Şekil 5.12: φ_a = 0.2 radyan için ek su kütle atalet momenti değerleri.



Şekil 5.13: $\varphi_a = 0.2$ radyan için sönüm moment katsayısı değerleri.

Şekil 5.10-5.13'ten de görüldüğü üzere tezde öngörülmüş olan algoritma ile tespit edilen ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayıları, FSRVM sayısal yöntemine göre Vugts (1968) ve Yeung ve diğ. (1998) tarafından yapılmış deneysel çalışmalara daha yakın sonuçlar vermektedir.

5.4 Girdaplılık Doğrulaması

Çözüm algoritmasına ilişkin dördüncü doğrulama, cismin çevresinde oluşan girdapların ve akışkan hızlarının literatürde yer alan diğer çalışmalar ile karşılaştırılması şeklinde yapılmıştır. Bu başlık altında ilk olarak aynı açısal frekansta, farklı genliklerde hareket eden cisme dair incelemelerde bulunulmuştur. Yeung ve diğ. (1998) çalışmalarında, küçük yalpa açılarında girdapların cismin sınırlarına bitişik oluştuğunu, artan yalpa genlik değerinde ise cismin köşe noktalarından daha büyük girdapların çevreye yayıldığını belirtmişlerdir. Bu doğrulamada cisim geometrisi için Yeung ve diğ. (1998)'nin belirttiği boyutlar kullanılmıştır.

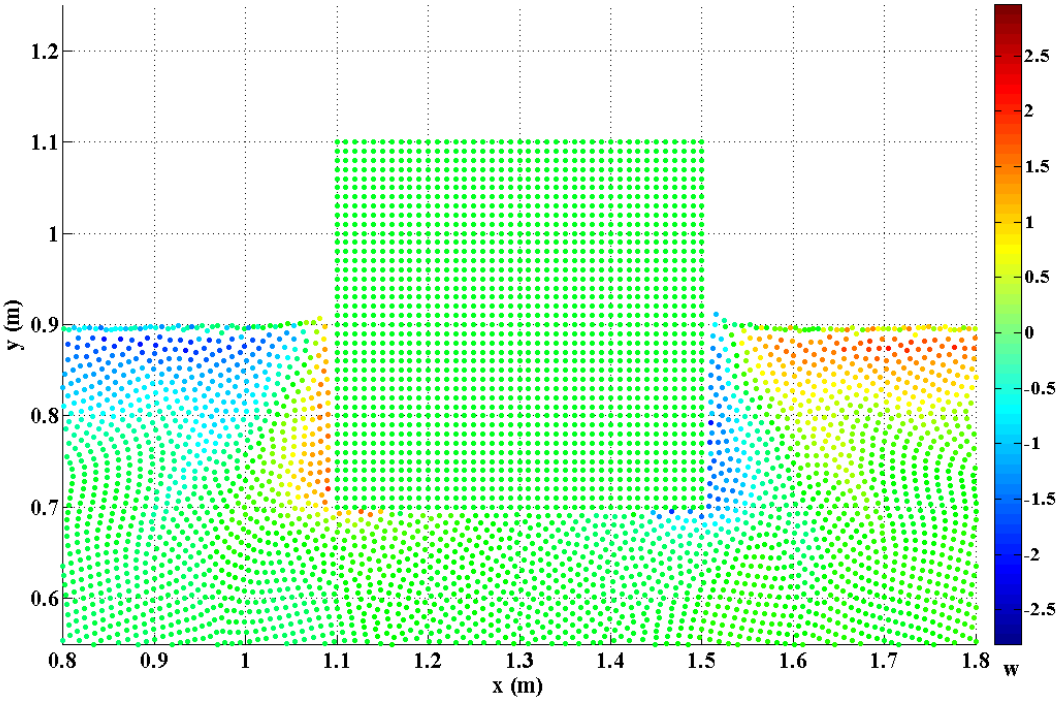
Havuz yüksekliği, havuz uzunluğu, cisim yüksekliği, cisim genişliği sırası ile 0.9 m, 2.6 m, 0.4 m, 0.4 m alınmıştır. Dik sınırlı havuz geometrisinin kullanıldığı doğrulamada *dx* ve *dt* sırası ile 0.01 m ve 0.0001 s alınmıştır. Toplamda 25663 (akışkan, sınır, cisim ve hayalet) parçacık kullanılmıştır. Yalpa hareketinin $\omega^* = 0.3$

alındığı analizde 2-boyutlu akımın dikkate alındığı girdaplılık (5.25)'e göre hesaplanmış olup alınmış olan sonuçlar Yeung ve diğ. (1998)'dekine benzer şekilde t/T=10 için gösterilmektedir.

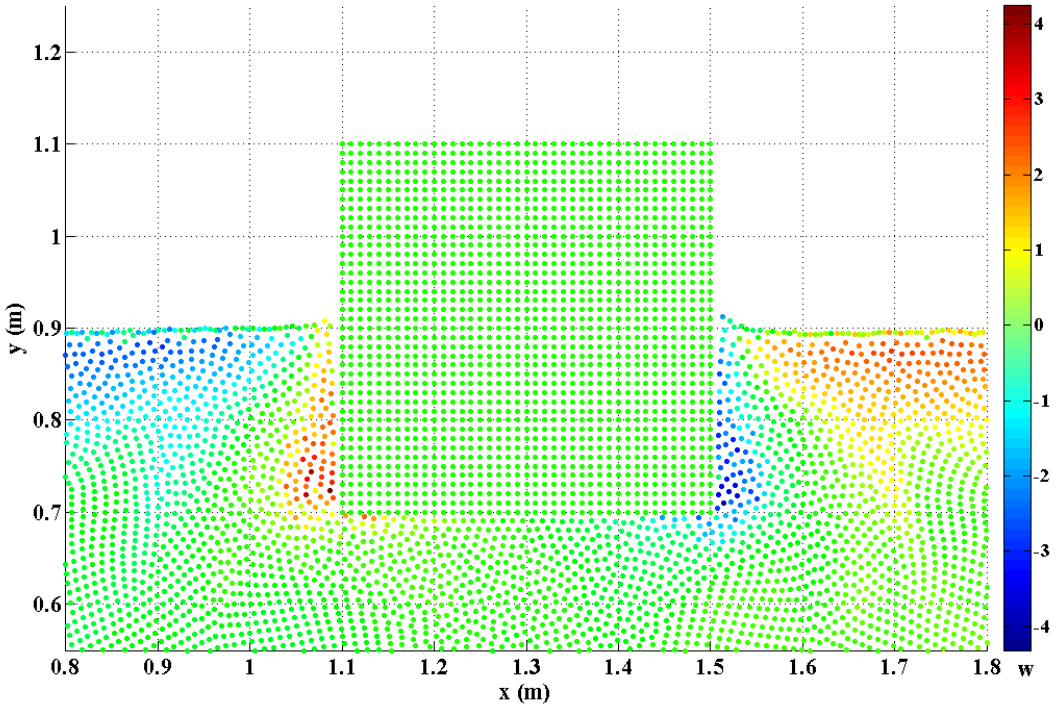
$$\vec{w} = \vec{\nabla} \times \vec{V} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ \vec{u} & \vec{v} & \vec{w} \end{vmatrix} = \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial x} - \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} \right) \vec{k} \qquad (5.25)$$

Şekil 5.14'te İPH algoritması ile farklı yalpa genliklerinde (0.05 radyan, 0.1 radyan ve 0.2 radyan) alınmış sonuçlar görülmektedir. Yeung ve diğ. (1998)'e benzer şekilde girdaplılık sonuçlarının verildiği analiz için akışkana ait hız vektörleri de incelenmiştir. Aynı analiz için akışkan parçacıklarına ait hız vektörlerine Şekil 5.15'te yer verilmiştir. Yeung ve diğ. (1998)'ne benzer şekilde yalpa genliğinin büyümesi ile akışkan parçacıklarındaki hızlarının arttığı gözlemlenmiştir.

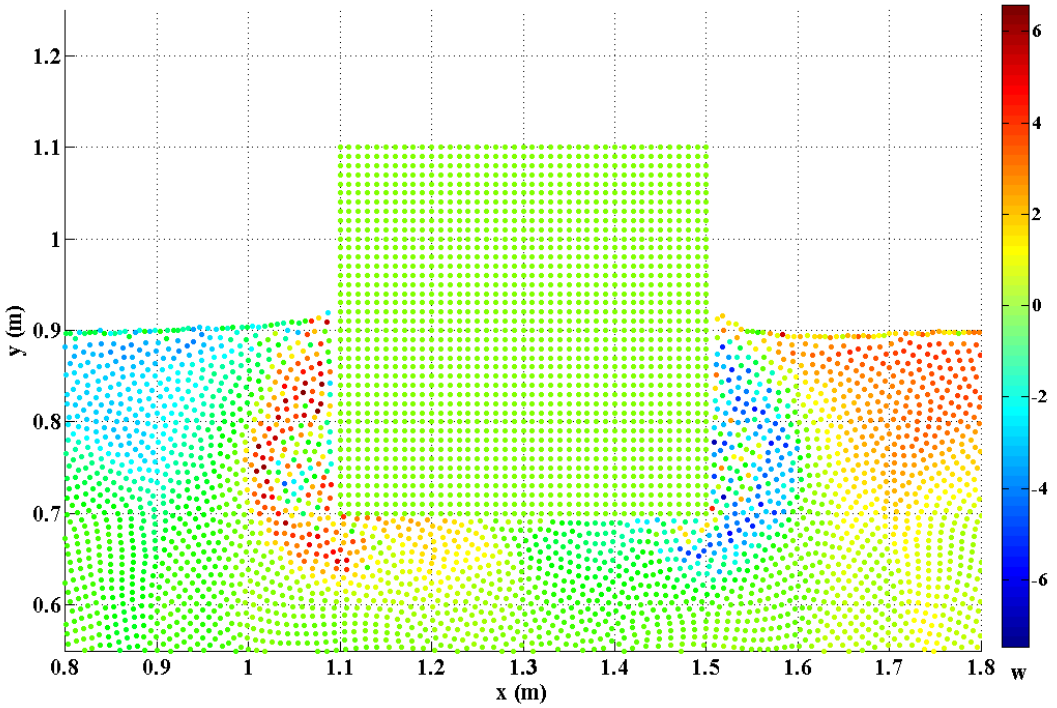
a. φ_a = 0.05 radyan



b. φ_a = 0.1 radyan



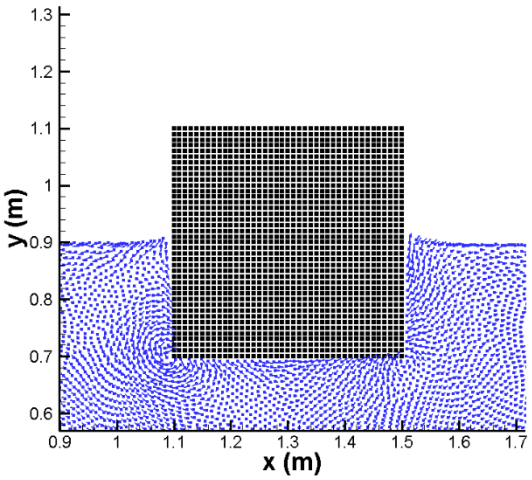
c. φ_a = 0.2 radyan



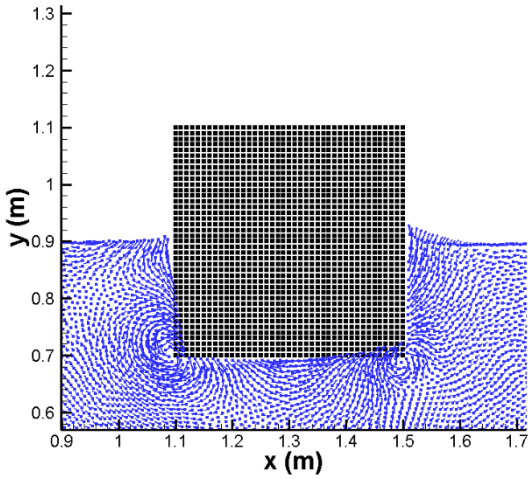
Şekil 5.14: ω^* = 0.3 ve t / T=10'da farklı yalpa genlikleri için girdaplılık sonuçları.

Şekil 5.15'te akışkan parçacıkları için mavi ve cisim parçacıkları için siyah renkler kullanılmıştır. Farklı yalpa genliklerine ait şekillerin gösteriminde parçacık hızlarına ait vektörlerin gösteriminde aynı oran kullanılmıştır.

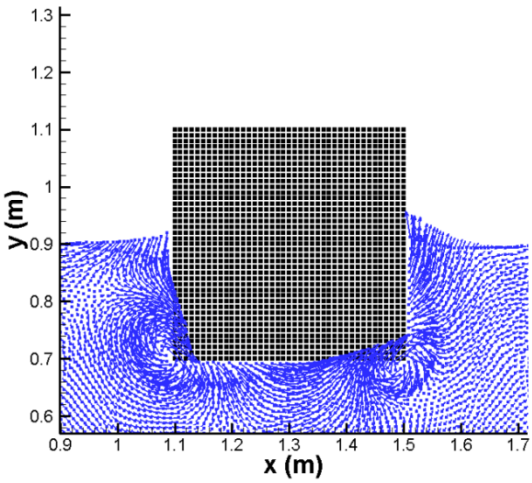
a. φ_a = 0.05 radyan



b. φ_a = 0.1 radyan

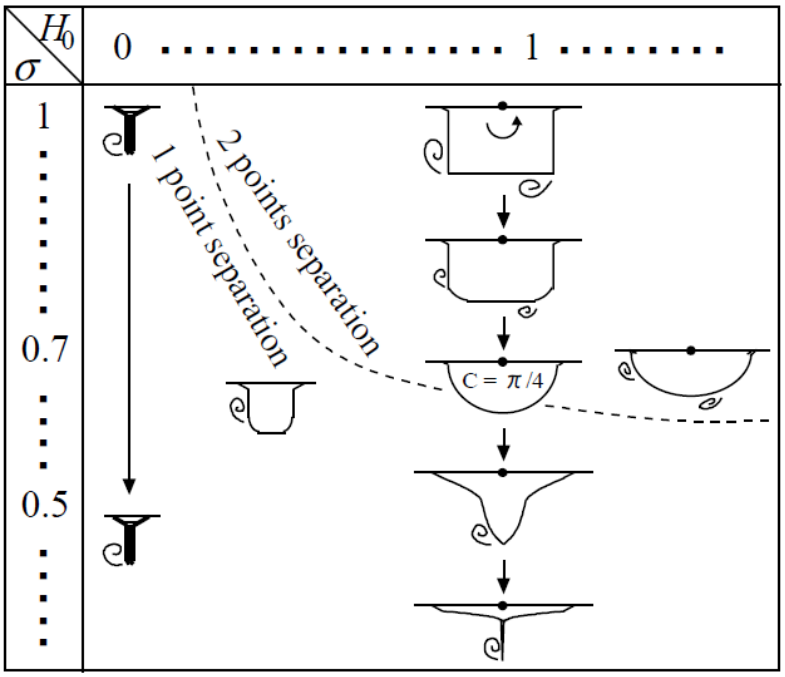


c. φ_a = 0.2 radyan



Şekil 5.15: ω^* = 0.3 ve t / T=10'da farklı yalpa genlikleri için akışkan parçacıklarına ait hız vektörleri.

Girdap oluşumu ile ilgili diğer bir doğrulama ise yalpa hareketi esnasında girdabın oluştuğu bölgelerin karşılaştırılması ile yapılmıştır. ITTC (2011)'ye göre yalpa yapan cisim çevresinde oluşacak girdapların mevkileri Şekil 5.16'da verilmiştir. Grafik, Ikeda (1977, 1978b)'nın yaptığı çalışmalardan derlenmiş olup girdap oluşumu iki parametrenin değişimine göre gösterilmektedir.



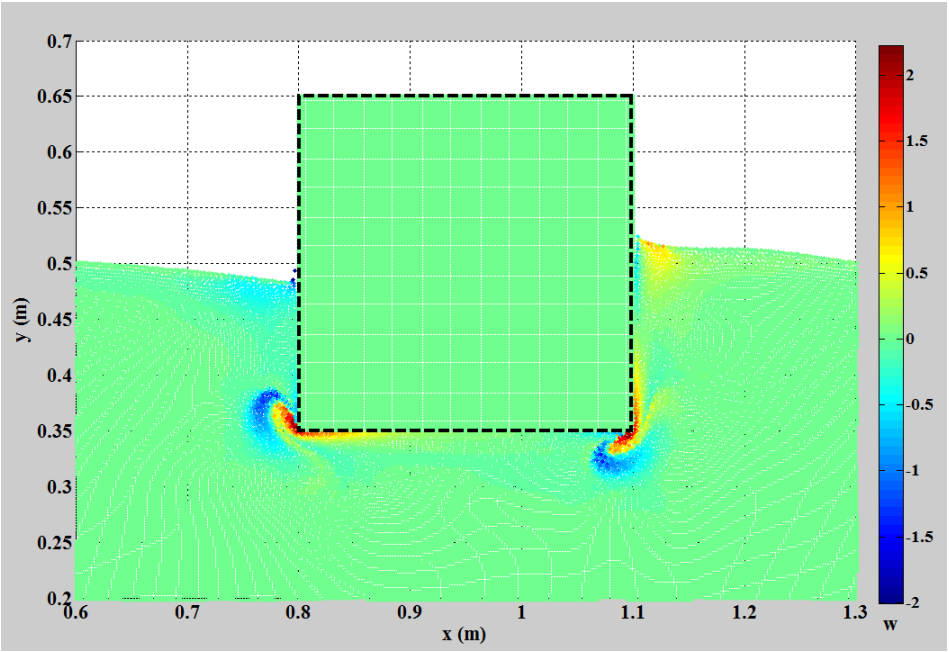
Şekil 5.16: Ikeda ve diğ. (1978b) ve ITTC (2011)'de yer alan, cismin boyut parametrelerinin değişimine göre yalpa hareketi esnasında oluşan girdapların sayısı ve mevkileri.

H_0 cismin yarı genişliğinin cismin su çekimine oranı (*b/d*), σ ise alan katsayısı olarak adlandırılmaktadır ve cismin su altı alanının, cismin genişlik ve su çekimine çarpımının oranına eşittir $\left(\frac{A_j}{Bd}\right)$.

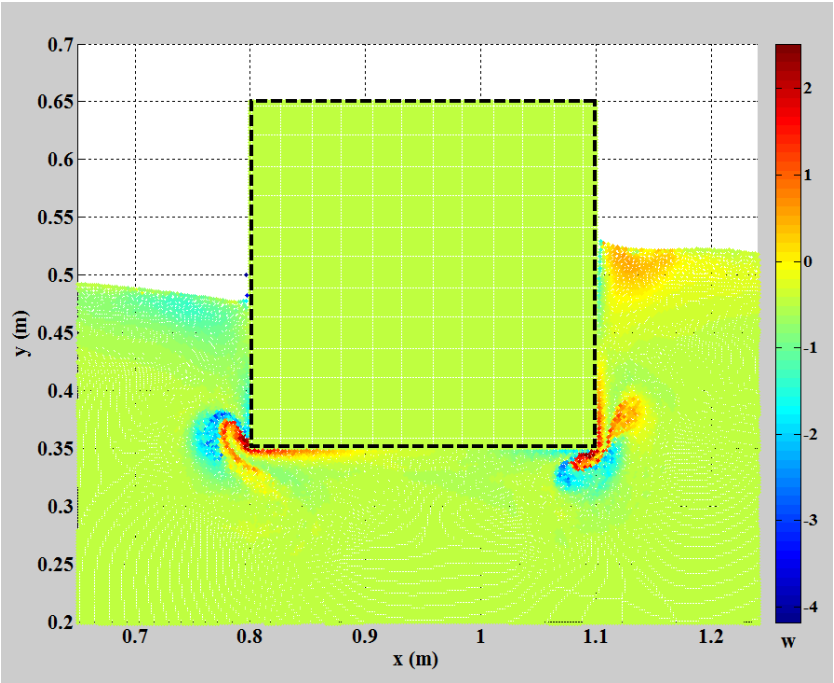
Bu doğrulamada için yapılmış olan analizdeki problem geometrisi ve başlangıç koşulları Şekil 5.3'teki ile aynı alınmıştır. *dx* ve *dt* sırası ile 0.0025 m ve 0.00003 s alınmıştır. Toplamda 163027 (akışkan, sınır, cisim ve hayalet) parçacık kullanılmıştır. Cismin Yalpa hareketinin $\omega^* = 1.0$ alındığı analizde cismin yalpa genliği ise $\varphi_a = 0.2$ radyan'dır. Oluşturulmuş olan İPH algoritması ile elde edilmiş olan sonuçlar Şekil 5.17'de verilmiştir. Yapılmış olan analizde zorlanmış yalpa hareketine tabi tutulmuş cismin H_0 parametresi 1.0'e, σ alan katsayısı da 1.0'e eşittir. Şekil 5.16'ya göre bu parametrelere sahip bir cismin yalpa hareketine tabi tutulması sonrasında 2 adet

girdabın oluşması gerekmektedir. Oluşacak girdapların mevkisinin ise cismin sağ alt köşesinin altında ve sol alt köşesinin solunda yer alması öngörülmektedir. Şekil 5.17'de cismi oluşturan parçacıkların, akışkan parçacıklarından daha iyi ayırt edilebilmesi için cismi oluşturan parçacıkların en dış sırası siyah aralıklı çizgi ile çizilmiştir. İPH algoritması ile iki farklı t / T değeri için alınmış olan sonuçlar girdap oluşumunun sayısının ve mevkisinin Ikeda ve diğ. (1978b) ile ITTC (2011) ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

a. t / T = 2



b. t / T = 3



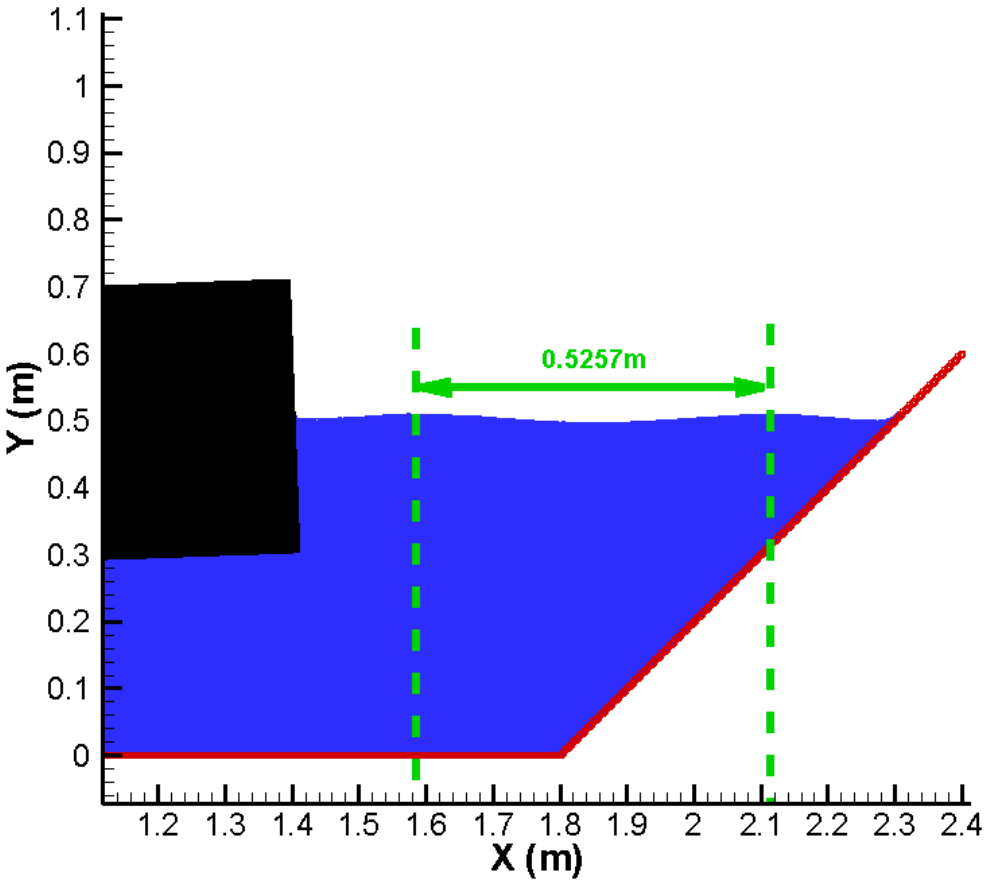
Şekil 5.17: İPH yöntemi ile elde edilen girdap sayısı ve mevkileri.

5.5 Serbest Su Yüzeyi Dalgalarının Doğrulaması

Çözüm algoritması ile yapılan beşinci ve son doğrulama kapsamında cismin hareketi nedeni ile serbest su yüzeyinde oluşan dalgalar incelenmiştir. Serbest su yüzeyinde yalpa hareketi yapan cisimle aynı frekansa sahip yüzey dalgası beklenmektedir. Dalgaların frekansı bilindiğinden, (5.26)'da verilmiş olan derin su kabulü yapılarak oluşan dalgaların dalga boylarına bakılmıştır.

$$\frac{1}{2} \leq \frac{d_w}{\lambda} \tag{5.26}$$

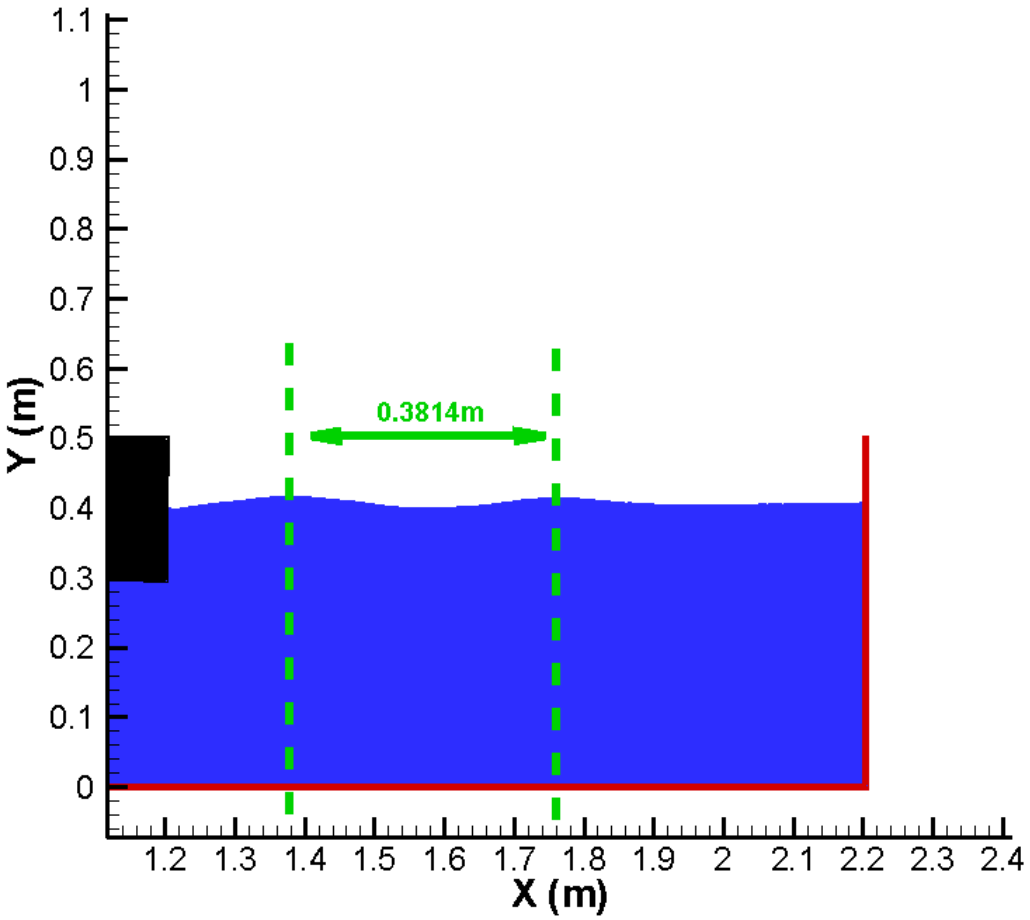
(5.26)'da λ dalga boyunu, d_w ise su derinliğini ifade etmektedir. Oluşan dalgaların doğrulanması amacıyla farklı boyuttaki iki cisime değişik frekanslarda ve yalpa genliklerinde harekete tabi tutulmuştur. Elde edilen dalgalar ve dalga boyları Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Ayrıca doğrulamalar esnasında dik ve eğik havuz sınırları uygulanmıştır. Bu sayede eğik sınır için uygulanmakta olan PPA algoritmasının da (4.2.5 Bölüm'de belirtilmiş olan) denemesi yapılmıştır.



Şekil 5.18: φ_a =0.1 radyan T=0.573 s'lik yalpa hareketinde oluşan dalgalar.

Şekil 5.18 için yapılmış olan analizde siyah parçacıklar cismi, mavi parçacıklar akışkanı, kırmızı parçacıklar sınırları temsil etmektedir. Problemin boyutları, havuz uzunluğu 2.2 m, havuz derinliği 0.5 m, cisim yüksekliği 0.4 m ve cisim genişliği 0.4 m olacak şekilde seçilmiştir. Cismin peryodunun 0.573 s ve yalpa genliğinin 0.1 radyan olduğu denemede *dx* 0.0025 m, *dt* ise 0.00005 s olup toplamda (akışkan, sınır, cisim, hayalet) 153300 parçacık kullanılmıştır. T dalga periyodu olmak üzere, dalga boyları (5.27) ile hesaplandığında, yaklaşık 0.5129 m olması beklenmektedir. Şekil 5.18'den görüldüğü üzere elde edilen dalga uzunluğu 0.5257 m olup geliştirilen sayısal çözüm şemasının oluşan dalgaları modellemekte başarılı olduğu değerlendirilmiştir.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tag{5.27}$$



Şekil 5.19: φ_a = 0.2 radyan T=0.49 s'lik yalpa hareketinde oluşan dalgalar.

Yine aynı doğrulama kapsamında farklı boyuttaki bir cisme değişik bir frekansta yalpa hareketi yaptırılarak oluşan dalgalar Şekil 5.19'da görülmektedir. Problemin boyutları,

havuz uzunluğu 2.2 m, havuz derinliği 0.4 m, cisim yüksekliği 0.2 m ve cisim genişliği 0.2 m olacak şekilde seçilmiştir. Cismin peryodunun 0.49 s ve yalpa genliğinin 0.2 radyan olduğu denemede dx 0.0025 m, dt ise 0.00004 s olup toplamda 147981 adet parçacık kullanılmıştır. Oluşan dalgaların dalga boylarını hesaplamak için (5.27) kullanıldığında 0.3751 m olarak hesaplanırken, simulasyon sonucunda elde edilen dalga boyu ise 0.3814 m'dir. Havuz yan duvarlarının dik kullanıldığı geometri için sönüm bölgesinin (5. Bölüm başlığı altında bahsedilmiş olan) işlevini ne kadar iyi bir şekilde gerçekleştirdiği de göz ardı edilmemelidir.

Yüzey dalga boyları için yapılan doğrulamalarda elde edilen sonuçların herhangi bir parametrenin değişiminden etkilenmediğinin ispatı için analizlerde açısal frekans, sınır şartları, cisim boyutları, yalpa genlikleri, *dt* gibi birçok parametre değiştirilmiştir. Kullanılan değişik parametrelere rağmen yüzey dalga boylarının hesaplanmasında başarılı sonuçlar alınmıştır. Su yüzeyinde oluşan dalgaların (5.27)'ye göre bağıl hatası eğik sınırlı havuz için 0.025, düşey sınırlı havuz içinse 0.016'dır.

6. DUYARLILIK ANALİZLERİ

Bu çalışmada kullanılmış olan algoritmanın gürbüz (robust) olup olmadığının kontrolü için parçacıklar arası mesafe (bundan sonra dx olarak anılacaktır), zaman adımı (bundan sonra dt olarak anılacaktır) ve problem geometrisinin değişiminin sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Her üç duyarlılık analizinde mukayese kriteri olarak boyutsuz ek su kütle atalet momenti katsayısı (a_{66}) ve boyutsuz sönüm moment katsayısı (b_{66}) (katsayıların boyutsuz ifadeleri için bkz. (5.23) ve (5.24)) seçilmiştir. Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'te yer alan "Analiz Zamanı" satırında yer alan değerler, yalpa hareketinin bir periyodunu çözdürmek için geçen (bilgisayar) zamanın saat cinsinden değeridir. Her üç duyarlılık analizinde kullanılan problem geometrisinde de Şekil 5.1'de verilmiş olan başlangıç koşulları ve problem geometrisi kullanılmış olup (Bölüm 6.3'te havuz uzunlukları hariç olmak üzere) havuz sınırları düşey alındığı analizlerde havuz sınırlarına yakın bölgelerde sönüm bölgeleri kullanılmıştır.

6.1 Parçacık Mesafesi Duyarlılığı

Parçacık mesafine ilişkin duyarlılık analizde cismin yalpa genliği φ_a = 0.2 radyan ve ω^* = 1.0'e (boyutsuz açısal frekansın eşitliği (5.20)'te yer almaktadır) eşit seçilmiştir. *dx* değişimine göre yapılmış duyarlılık analizinin sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Farklı dx dağılımlarında boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayısı değerlerinin mukayesesi.

	Birinci Analiz	İkinci Analiz	Üçüncü Analiz
dx [m]	0.006	0.005	0.00375
Toplam Parçacık Adedi	29079	41723	73054
dt [s]	0.00005	0.00005	0.00005
Analiz Zamanı [sa]	6.53	12.46	37.88

Çizelge 6.1 (devam): Farklı dx dağılımlarında boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayısı değerlerinin mukayesesi.

a_{66}	0.033907	0.033078	0.033301
b_{66}	0.033570	0.034207	0.033209

Çizelge 6.1'den de görüldüğü üzere oluşturulmuş olan İPH algoritması ve analizler için seçilmiş olan *dx* değerinin sonuçlar üzerindeki etkisi mutlak olarak en fazla 10^{-3} mertebesinde olup ihmal edilebilir düzeydedir.

6.2 Zaman Adımı Duyarlılığı

İkinci duyarlılık analizinde, *dt*'nin değişimine bağlı olarak boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayılarının değişimi izlenmiştir. Cismin yalpa genliği φ_a = 0.2 radyan ve ω^* = 1.0'e eşit seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2'de yer almaktadır.

Çizelge 6.2: Farklı *dt* kullanımlarında boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayısı değerlerinin mukayesesi.

	Birinci Analiz	İkinci Analiz	Üçüncü Analiz
dx [m]	0.005	0.005	0.005
Toplam Parçacık Adedi	41723	41723	41723
dt [s]	0.00005	0.00004	0.00003
Analiz Zamanı [sa]	12.46	15.64	21.12
a_{66}	0.033078	0.032978	0.032971
b_{66}	0.034207	0.034112	0.034110

Oluşturulmuş olan İPH algoritması ve analizler için seçilmiş olan *dt* değerinin sonuçlar üzerindeki etkisi Çizelge 6.2'den de görüldüğü üzere mutlak olarak en fazla 10^{-3} mertebesinde olup ihmal edilebilir düzeydedir.

6.3 Problem Geometrisi Duyarlılığı

Üçüncü ve son duyarlılık analizi ise problem geometrisinin seçimi için yapılmıştır. Yapılmış olan analizlerde problem geometrisi değiştirilmiş ve boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayılarının değişimi izlenmiştir. Cismin yalpa genliği φ_a = 0.2 radyan ve ω^* = 1.0'e eşit seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3'te yer almaktadır.

Çizelge 6.3'ten de görüldüğü üzere oluşturulmuş olan İPH algoritması ve analizler için seçilmiş havuz boyutlarının sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Çizelge 6.3: Farklı havuz geometrilerinin kullanımlarında boyutsuz ek su kütle atalet momenti ve boyutsuz sönüm moment katsayısı değerlerinin mukayesesi.

	Birinci Analiz	İkinci Analiz	Üçüncü Analiz
dx [m]	0.005	0.005	0.005
Toplam Parçacık Adedi	41723	62323	82923
dt [s]	0.00005	0.00005	0.00005
Analiz Zamanı [sa]	12.46	27.64	49.31
Havuz Uzunluğu [m]	1.9	2.9	3.9
Havuz Yüksekliği [m]	0.5	0.5	0.5
a66	0.033078	0.034976	0.033943
b66	0.034207	0.033259	0.033671

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği yöntemi, Süreklilik ve Euler denklemlerinin Zayıf Olarak Sıkıştırılabilir İPH Yaklaşımı temel alınarak, yoğunluk düzeltmesi, Özbulut (2013) tarafından geliştirmiş olan Birleşik Serbest Su Yüzeyi Yapay Parçacık Ötelemesi çözüm algoritması, Colagrossi ve diğ. (2012) tarafından geliştirilmiş olan PPA algoritması, dalga sönüm algoritması gibi sayısal algoritmaları içerecek şekilde birleştirilerek bir İPH algoritması oluşturulmuş ve serbest su yüzeyindeki zorlanmış yalpa problemine uygulanmıştır. Oluşturulmuş olan algoritma farklı doğrulama ve duyarlılık analizleri ile denemelere tabi tutulmuştur.

Yalpa hareketi esnasında yalpa yapan cisme etkiyen moment değerine yönelik karşılaştırma yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen moment değerleri ile geliştirilmiş olan algoritmadan elde edilen moment sonuçları birbirlerine uyumlu sonuçlar vermiştir. Başka bir sayısal yöntem olan FSRVM'ye göre ise deney sonuçlarına daha yakın değerler elde edilmiştir.

Ayrıca geliştirilmiş olan İPH algoritmasından elde edilen yalpa hareketindeki ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarının, literatürdeki diğer bir sayısal yöntem olan FSRVM'den elde edilen sonuçlar ile literatürde bulunan deneysel veriler baz alınarak karşılaştırılması sonrasında geliştirilmiş olan İPH algoritmasının FSRVM sonuçlarına göre deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Değişik yalpa genliği, yalpa frekansı, havuz sınırları kullanılmış olan analizlerde dahi geliştirilmiş olan İPH algoritması ile elde edilen serbest su yüzeyi dalga boylarının, derin su kabulü için dalga boyu formülasyonuna göre bağıl hatası eğik sınırlı havuz için 0.025, dik sınırlı havuz içinse 0.016'dır. Görüldüğü üzere serbest su yüzeyinde oluşan dalga boylarının karşılaştırılmasında da geliştirilmiş olan İPH algoritması, analitik denklem sonuçlarına tatmin edici doğruluklarda cevap vermiştir.

Yine diğer bir doğrulama testinde; geliştirilmiş olan İPH algoritmasından elde edilen girdaplılık sayısı ile girdaplılık yerleri endüstride kullanılmakta olan ve 1970 yılların sonunda yapılmış yalpa hareketinin anlaşılmasına öncülük eden deneysel

çalışmalardan elde edilen verilere dayanarak hazırlanmış şekiller ile karşılaştırılmıştır. Girdaplılık sayısı ve girdaplılık yerleri hususunda literatürde yer alan çalışmalara paralellik arz eden sonuçlar alınmıştır. Girdaplılığın, yalpa genliğinin değişimine göre izlendiği sayısal çalışma verilerine benzer nitelikte sonuçlar alınması geliştirilmiş olan algoritmanın kendini ispat ettiği diğer bir yön olarak karşımıza çıkmıştır.

Gerçekleştirilen bütün doğrulama denemelerine tatmin edici doğruluklarla cevap veren algoritmadan elde edilen sonuçlar duyarlılık testlerine de tabi tutulmuştur. Parçacıklar arası mesafenin, zaman adımının ve problem geometrisinin değiştirildiği duyarlılık analizlerinde elde edilen sonuçların karşılaştırılması neticesinde sonuçların hassasiyetinin birbirine yakın değerler verdiği ispatlanmıştır. Bahse konu duyarlılık testleri geliştirilmiş olan algoritmanın gürbüz (robust) olduğunu işaret etmektedir.

Bu çalışma ile literatüre nicel olarak yapılmış katkılar için ek su kütle atalet momenti, sönüm moment katsayısı, cisme etkiyen moment ve cismin hareketi sonrasında serbest su yüzeyinde meydana gelen dalgalara ilişkin değerlerin tespitini sayabiliriz. Bahse konu verilere ilişkin değerler hidrodinamik alanında bundan sonra yapılacak çalışmalarda mukayese kriteri olarak kullanılabileceği gibi İPH yöntemi kullanılarak oluşturulacak değişik algoritmalara da referans teşkil edeceği kıymetlendirilmektedir.

1.2 Özgün Değer ve 2.2.2 İnterpolasyonlu parçacık hidrodinamiği bölümlerinde de ifade edildiği üzere tez kapsamında yapılan çalışma, İPH yönteminin yalpa hareketine uygulanmasına yönelik orijinalliği olan bir metindir. Yalpa hareketine ilişkin İPH yöntemi ile geliştirilecek farklı algoritmalar için tez kapsamında yapılmış olan duyarlılık analizleriden elde edilen verilerin, karşılaştırma kriteri olarak kullanılmasının, İPH yönteminin gelişimine katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Ayrıca yine tez kapsamında elde edilen girdaplılık mevkileri, sayıları ve büyüklükleri literatüre nitel olarak katkı sağlamıştır. Bahse konu verilerden girdaplılığın büyüklüğüne ilişkin değerlerin hidrodinamik alanında bundan sonra yapılacak çalışmalar için mukayese kriteri olabileceği düşünülmektedir.

Geliştirilmiş olan algoritmanın ve kullanılan yöntemin iki adet dezavantajı bulunmakta olup bu dezavantajlar hali hazırda İPH dünyasında çözümlenmeye çalışılan sorunların başında gelmektedir. Birinci dezavantaj olarak yöntemin ihtiyaç duyduğu sayısal düzeltme algoritmalarından bahsedilebilir. Bilindiği üzere İPH yöntemi diğer ağ

tabanlı sayısal yöntemlere oranla daha geç irdelenmeye ve değişik problemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Dolayısı ile akademik camiada ve endüstrideki çoğu probleme yönelik uygulama ya yapılmamıştır yada yeni yeni yapılmaya başlanılmıştır. Dolayısı ile her problemin çözümünde yeni algoritmalar literatüre eklenmekte ve diğer problemler ile uğraşan araştırmacılara yardımcı olmakta veya ilham vermektedir. Bir örnek verilecek olurda, Colagrossi ve diğ. (2012) tarafından geliştirilmiş olan Parçacık Paketleme Algoritması bu çalışmadaki bir doğrulamanın sonuçlarının neden beklenildiği şekilde bulunamadığına yönelik araştırmanın sonucunda tespit edilmiş olup, eğik sınırlı havuz geometrisine uygulanmıştır. Bu tür sayısal düzeltme algoritmalarının artması yöntemin kullanımında ortaya çıkacak problemlerin çözümlenerek bertaraf edilmesinde ve sonuçlarının kısa bir zaman içerisinde elde edilmesine destek olmaktadır.

İkinci büyük dezavantajın ise çözüm süresinin uzunluğu olduğu değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilmiş olan bilgisayar programı FORTRAN'da yazılmış olup analizlerde kullanılan bilgisayar 2.70 Ghz işlemcili 4 çekirdekli, 64 bit işletim özelliği olan ve 8GB RAM'ı haizdir. 6. Bölümde verilmiş olan sayısal değerler için analizler ortalama 8 günlük bir çözüm zamanına ihtiyaç duyulmaktadır. Ortalama 150000 parçacığın kullanıldığı serbest su yüzeyindeki dalgaların oluşumuna yönelik yapılmış analizlerde ise bu süre 30 günlere çıkmaktadır. Görüldüğü üzere parçacık sayısının artması ile analizlerin süreleri üssel olarak artmakta fakat bir o kadar da sonuçlar yakınsamaktadır. Bu tam olarak bir getiri-götürü (trade off) analizi olup, problemin tipine ve elde etmek istenilen değerlerin hassasiyetine göre yöntemi kullanan kişinin seçim yapması gereken bir durumdur.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarla ilgili olarak bahsedilmesi gerekli ilk husus bilgisayar programının paralelleştirilmesidir. Paralelleştirme hedefinde ilk adım; geliştirilen kodun, standart masaüstü bilgisayarlardan süper bilgisayarlara varana kadar paralel uygulamaları geliştirmek için programcılara basit ve uygun bir arayüz veren OpenMP programına entegrasyonunun sağlanmasıdır. Solaris, IBM AIX , HP-UX, GNU/LINUX, MAC OS X ve Windows işletim sistemleri üzerinde FORTRAN, C gibi programlama dillerinde çoklu platform paylaşımlı, çoklu işlemeyi destekleyen bir uygulama geliştirme arayüzü olan OpenMP kullanımı ile parçacık sayısının 100.000 ve daha üzerinde kullanılması esnasında hata alınmadan analizlerin yapılabilmesi hedeflenmektedir. Yine paralelleştirmenin sağlanması ile geliştirilen

hesaplamalı bilgisayar programın çok daha hızlı sonuçlar vereceği de düşünülmektedir. Paralelleştirme hedefinde ikinci adım ise günümüzde kullanımı çok popüler olan çözüm algoritmasının GPU üzerinde koşturulması yer almaktadır. Bu sayede geliştirilmiş olan kodun daha karmaşık geometrilere uygulanarak endüstride kullanılmaya elverişli hale getirilmesi mümkün kılınabilecektir.

Geleceğe yönelik bahsedilmesi gereken diğer bir husus ise geliştirilmiş olan programın içerisine yeni modüller eklemek suretiyle diğer gemi hareketlerinin çözümünde kullanılan katsayıların tespiti hedeflenmektedir. Yalpa hareketinden sonra dalıp-çıkma hareketi ile ilgili çalışmalara başlanacaktır. Dalıp-çıkma hareketi için de literatürde hem sayısal hem de deneysel olarak bir çok çalışma yapılmış olup, elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kullanılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Abbas, K. (2008). Improved particle methods by refined differential operator models for free-surface fluid flows. (Doktora Tezi). Kyoto University.

Anderson D. J. (1995). *Computational fluid dynamics, the basics with applications.* New York. McGraw-Hill Inc.

Ankudinov, V. (1991). Hydrodynamic hull damping (Phase I). Washington D.C.: Ship Structure Comitee.

Antuono, M., Colagrossi, A., Marrone, S. ve Lugni, C. (2011). Propagation of gravity waves through an SPH scheme with numerical diffusive terms. *Computer Physiscs Communications*, 182:866-877.

Barth, T. J., Griebel, M., Keyes, D. E., Nieminen, R. M., Roose, D., ve Schlick, T., (2007) *Meshfree methods for partial differential equations*. New York. Springer.

Batra, R. C. ve Zhang, G. M. (2004). Analysis of adiabatic shear bands in elasto-thermo-viscoplastic materials by modified smoothed particle hydrodynamics (MSPH) method. *Journal of Computational Physics*, 201(1), 172-190.

Braathan, A. ve Faltinsen, O. M. (1988). Application of a vortex tracking method to roll damping, Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Offshore Engineering

Bearman, P. W. ve Graham, J. M. (1979). Force on cylindrical bodies in oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers, Mechnics of Wave Induced Forces on Cylinders. Proceedings 2nd International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, London, 1:309-322.

Beeman, D. (1976). Some multistep methods for use in molecular dynamics calculations. Journal of Computational Physics, 20, 130-139.

Belytschko, T., Krongauz, Y., Dolbow, J. ve Gerlach, C. (1998). On the completeness of the meshfree particle methods. International Journal of Numerical Methods in Engineering. 43(5), 785-819.

Benz, W. (1990). Smooth particle hydrodynamics: a review, in numerical modelling of nonlinear stellar pulsation: problems and prospects, Kluwer Academic, Boston. 269-288.

Bhattacharyya, R. (1978). Dynamics of Marine Vehicles. New York. Wiley.

Bockmann, A., Shipilova, O. ve Skeie, G. (2012). Incompressible SPH for free surface flows. *Computers & Fluids*, 67, 138-151.

Bonet, J. ve Kulasegaram, S. (2000). Correction and stabilization of smoothed particle hydrodynamics method with application in metal forming simulations. Internation Journal for Numerical Methods in Engineering, 47, 1189-1214.

Bonfiglio, L., Brizzolara, S. ve Chryssosstomidis, C. (2011). Added mass and damping of oscillating bodies: a fully viscous numerical approach. Recent Advances in Fluid Mechanics, Heat & Mass Transfer and Biology. 210-215.

Brook, A. K. ve Standing, R. G. (1990) A theoretical and experimental investigation of barge roll damping. Conference Stability of Ships and Ocean Vehicles, Stap 90, Naples, 253-260.

Brown, D. T. ve Patel, M. H. (1981). The calculation of vorticity effects on the motion response of a flat bottom barge to waves. International Symposium Ocean Engineering, Norwegian Institute of Technology, Trondheim.

Brown, D. T. ve Patel, M. H. (1986). On prediction of resonant roll motions for flat bottomed barges, RINA Supplementary papers 128.

Bui, H. H., Sako, K. ve Fukagawa, R. (2007). Numerical simulation of soil-water interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, Journal ıf Terramechanics 44, 339 - 346.

Capuzzo, D. R., Di Lisio R. (2000). A Criterion for the choise of the interpolation kernels in stable field. Journal of Computational Physics, 202(2): 699-709.

Chang, H. X., Miao, G. P. ve Liu, Y. Z. (1996). Numerical study on roll damping of ship by solving incompressible N-S equations, in hydrodynamics.

Chen, J. K., Beraun, J. E. Ve Carney, T. C. (1999). A corrective smoothed particle method for boundary value problems in heat conduction. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 46(2), 231-252.

Chen, H. C., Liu, T., Huang, E.T. ve Davis, D. A. (2000). Chimera RANS simulation of ship and fender coupling for berthing operations. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 10, (2), 112-122.

Chorin, A. J. (1978). Vortex sheet approximation of boundary layers, Journal of Computational Physics 27, 428-442.

Cleary, P. W. (1998). Modeling confined multi-material heat and mass flows using SPH. Applied Mathematical Modeling, 22, 981-993.

Colagrossi, A. (2004). *A meshless Lagragian method for free-surface and interface flows with fragmentation.* (Doktora Tezi), Roma Universitesi, La Sapienza.

Colagrossi, A., Bouscasse, B., Antuono, M. ve Marrone, S. (2012). Particle packing algorithm for SPH schemes. *Computer Physics Communications.* 183, 1641-1653.

Colagrossi, A. ve Landrini, M. (2003). Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics, *Journal of Computational Physics,* 191, 448-475.

Cozens, P. D. (1987). *Numerical modeling of the roll damping of ships due to the vortex shedding.* (PDH thesis), Imperial College London, Department of Aeronautics, London.

Crespo, A. J. C. (2008). Application of the smoothed particle hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics. (Doktora Tezi). Universidade de Vigo. Departamento de Fisica Aplicada.

Crespo, A. J. C., Gomez-Gesteira, M. ve Dalrymple, R. A. (2007). 3D SPH simulation of large waves mitigation with a dike. *Journal of Hydraulic Research,* 45(5): 631 - 642.

Dalrymple, R. A. ve Knio, O. (2001). SPH modelling of water waves. Proc. Coastal Dynamics, Lund.

Dalrymple, R. A. ve Rogers, B. D. (2006). Numerical modeling of water waves with the SPH method. Coastal Engineering 53:141–147.

Delorme, T., Iglesias, A. S. ve Perez, S. A. (2005). Sloshing loads simulation in LNG tankers with SPH. *International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Barcelona.

Downie, M. J., Bearman, P. W. ve Graham, J. M. (1984). Prediction of the roll damping of barges including the effect of vortex shedding. (R.188), Department of Aeronautics, Imperial College London.

Eghtesad, A., Shafiei, A. R. ve Mahzoon, M. (2012). A new fluid-solid interface algorithm for simulating fluid structure problems in FGM plates. Journal of Fluids and Structures, 30, 141-158.

Evrard, A. E. (1988). Beyond N-body: 3D cosmological gas dynamics. Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 235, 911.

Faltinsen, O. M. (1969). A study of the two-dimensional added-mass and damping coefficients by the Frank Close-Fit Method. Det Norske Veritas. Report No. 69-10-S.

Falzarano, J., Somayajula, A. ve Seah, R. (2015). An overview of the prediction methods for roll damping of ships. Ocean System Engineering, 5, (2), 55-76.

Fang, J. N., Owens, R. G., Tacher, L. ve Parriaux, A. (2006). A numerical study of the SPH method for simulating transient viscoelastic free surface flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 139(1-2), 68-84.

Fang J. N. ve Parriaux, A. (2008). A regularized Lagrangian Finite Point Method for the simulation of incompressible viscous flows. Journal of Computational Physics. 227(20), 8894-8908.

Frank, W. (1967). *On the oscillation of cylinders in or below free surface of deep fluids.* (No. 2375) Washington D.C.: Naval Ship Research and Development Center.

Froude, W. (1861). On the rolling of ships, Transactions of the Institution of Naval Architects, 2, 180-227.

Fulk, D. A. (1994). A numerical analysis of smoothed particle hydrodynamics, (Doktora tezi), Faculty of the School of Engineering of the Air Force Institute of Technology. Air University.

Gentaz, L. Alessandrini, B. ve Delhommeau, G. (1996). Motion simulation of a cylinder at the surface of a viscous fluid. Ship Technology Research 43, 3-18.

Gentaz, L. Alessandrini, B. ve Delhommeau, G. (1997). Motion simulation of a two dimensional body at the surface of a viscous fluid by a fully coupled solver. 12th WWWFB, 85-89.

Gomez-Gesteira, M., Cerqueiro, D., Crespo, C. ve Dalrymple, R. A. (2005). Green water overtopping analyzed with a SPH model. *Ocean Engineering*, 32: 223 - 238.

Hajiarab, M. (2013). *Roll Damping Prediction of a Free Floating Barge.* (PHD Thesis). Newcastle University.vSchool of Marine Science and Technology, Newcastle.

Himeno, Y. (1981). *Prediction of Ship Roll Damping State of the Art.* (No. 239 September 1981) Ann Arbor: Naval Architect & Marine Engineering, The University of Michigan.

Henning, H. L. (2011). *Investigation of the heave, sway and roll motions of typical ship like hull sections using RANS numerical methods.* (Msc. Thesis) University of Stellenbosch, Department of Mechnical and Mechatronic Engineering, South Africa.

Ikeda, Y., Himeno, Y. ve Tanaka, N. (1977). On Eddy Making Component of Roll Damping Force on Naked Hull, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.142, pp.54-64.

Ikeda, Y., Himeno, Y. ve Tanaka, N. (1978a). Components of roll damping of ship at forward speed. Journal of the Society of Naval Architects of Japan. 143, 113-125.

Ikeda, Y., Himeno, Y. ve Tanaka, N. (1978b). On eddy making component of roll damping force on naked hull. (00403) Osaka. University of Osaka Prefecture.

Ikeda, Y., Komatsu, K., Himeno, Y. ve Tanaka, N. (1979). On roll damping force of ship effect of hull surface pressure created by bilge keels. (00402) Osaka. University of Osaka Prefecture.

ITTC (2011). Recommended Procedures and Guideline, Numerical Estimation of Roll Damping, 7.5-02-07-04.5, 5-6.

Jaouen, F., Koop, A. ve Guilherme, V. (2011). Predicting roll added mass and damping of a ship hull section using CFD. 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 1-11.

Johnson, G. R., Stryk, R. A. ve Beissel, S. R. (1996). SPH for high velocity impact computations. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 139(1-4): 347-373.

Jouette, C., Laget, O. ve Gouez, J. M. (1999). Vers la tenue a la mer des navires par une fomulation en fluide visqueux, 7. Journees de L'Hydrodynamique, Marseille.

Journee, J. M. J. (1992). Quick strip theory calculations in ship desing. Prads'92 Conference on Practical Design o Ships and Mobile Structures. I, 1-11. Newcastle Upon Tyne, UK.

Korpus, R. A. ve Falzarano, J. M. (1997). Prediction of viscous ship roll damping by unsteady Navier-Stokes technique, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 108-113.

Koshizuka, S., ve Oka, Y. (1996). Moving-Particle Semi İmplicit Method for fragmentation of incompressible fluid. Nuclear Science Engineering, 123(3), 412-434.

Lamb, H. (1932). Hydrodynamics. New York. Dover Publications.

Libersky, L. D., Petschek, A. G., Carney, T. C., Hipp, J. R. ve Allahdadi F. A. (1993) High strain Lagrangian hydrodynamics: a three dimensional SPH code for dynamic material responce. Journal of Computational Physics, 109(1): 67-75.

Liu, G. R. ve Gu, Y. T. (2005). *An introduction to meshfree methods and their programming*. Dordrecht, Netherlands. Springer.

Liu, G. R. ve Liu, M. B. (2003). *Smoothed particle hydrodynamics a meshfree particle method.* Singapore. World Scientific.

Liu, M. B. ve Liu, G. R. (2010). Smoothed particel hydrodynamics (SPH): an overview and recent development. Arch. Comput. Methods Eng., 17, 25-76.

Liu, M. B., Liu, G. R. ve Lam, K. Y. (2003). A one-dimensional meshfree particle formulation for simulating shock waves. Shock Waves, 13(3), 201-211.

Liu, M. B., Xie, W.P. ve Liu, G. R. (2005). Modeling incompressible flows using a Finite Particle Method. Applied Mathematical Modelling, 29(12), 1252-1270.

Lucy, L. (1977). Numerical Approach to testing the fission hypothesis, Astronomical Journal, 82, 1013-1024.

Monaghan, J. J. (1982).Why particle methods work. *Society for Industrial and Mathematics (SIAM), Journal on Scientific and Statistical Computing*, 3, 422-433.

Monaghan, J. J. (1989). On the problem of penetration in particle methods. *Journal Computational Physics*, 82(1), 1-15.

Monaghan, J. J. (1994). Simulating free surface flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, 110(2), 399 - 406.

Monaghan, J. J. (1995). Heat conduction with discontinuous conductivity. Applied Mathematics Reports and Preprints. Monash University. (95/18).

Monaghan, J. J. (2006). Time stepping algorithms for SPH. Technical report, Monash University.

Monaghan, J. J. ve Gingold, R. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181, 375-389.

Monaghan, J. J. ve Gingold, R. (1983). Shock simulation by the particle method SPH. Journal of Computational Physics, 52, 374-389.

Monaghan, J. J. ve Lattanzio, J. C. (1985). A refined particle method for astrophysical problems. *Astronomy and Astrophysics*. 149(1): 135-143.

Monaghan, J. J. ve Price, D. J. (2004). Toy stars in one dimension. *Montly Notices of the Royal Astronomical Society*. 350: 1149 - 1456.

Morris, J. P. (1996a). A study of the sability properties of smooth particle hydrodynamics. Publications of the Astronomical Society of Australia, 13(1): 97- 102.

Morris, J. P. (1996b). Analysis of Smoothed Particle Hydrodynamics with application. Doktora Tezi. Monash University.

Nicholas, B. D. ve Hirt, C. W. (1977). Nonlinear hydrodynamic forces on floating bodies. 2. International Conference in Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley, 382-394.

Özbulut, M. (2008). *İnterpolasyonlu parçacık hidrodinamiğinde bir ve iki boyutlu uygulamalar*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Ünivesitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özbulut, M. (2013). *İnterpolasyonlu parçacık hidrodinamiği yöntemi ile serbest su yüzeyli şiddetli akış problemlerinin incelemesi.* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özbulut, M. Yildiz, M. ve Goren, O. (2014). A Numerical Investigation into the Correction Algorithms for SPH Method in Modeling Violent Free Surface Flows. *International Journal of Mechanical Sciences*, 79, 56-65.

Pakozdi, C. (2008). A smoothed paticle hydrodynamics study of two-dimensional nonlinear sloshing in rectangular tanks. (Doktora Tezi), Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology.

Randles, P. W. ve Libersky, L. D. (1996). Smoothed particle hydrodynamics: some recent improvements and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139(1): 375 - 408.

Querard, A., Yermarel, P. T. ve Turnock, S. (2009). The hydrodynamics of ship-like sections in heave, sway and roll motions predicted using an unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes method. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 223, (2), 227-238.

Sabuncu, T. (1983). Gemi Hareketleri. İstanbul. Matbaa Teknisyenleri Basım Evi.

Salui, B. K., Sarkar, T. ve Vassalos, D. (2000). An improved method for determining hydrodynamic coeffcients in roll motion using CFD techniques. Schiffstechnik Bd. 47, 161-174.

Salvesen, N., Tuck, E. O. ve Faltinsen, O. (1970). Ship motions and sea loads. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. 78, 250-287.

Sarkar, T. ve Vassalos, D. (2000). A RANS-based tecnique for simulation of the flow near a rolling cylinder at the free surface. Journal of Marine Science and Technology, 5, 66-77.

Schmitke, R. T. (1978). Ship sway, roll and yaw motions in oblique seas. SNAME Transactions, Vol. 86, 26-46.

Sellars, H. F. ve Martin, P. J. (1992). Selection and evaluation of ship roll stabilization systems. Marine Technolohy, 29, (2), 84-101.

Shadloo, M. S., Zainali, A., Yildiz, M. ve Suleman, A. (2011). A Robust Weakly Compressible SPH Method and Its Comparison with an Incompressible SPH. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 89 (8): 939-956.

Standing, R. G., Cozerns, P. D. ve Downie, M. J. (1988). Numerical prediction of roll damping and response of ship and barges based on discrete vortex method. Computer Modelling in Ocean Engineering,

Standing, R. G., Jackson, G. E. ve Brook, A. K. (1992). Experimental and theoretical investigation into the roll damping of a systematic series of two-dimensional barge sections. Behaviour of offshore structures. London.

Taylan, M. (2000). The effect of nonlinear damping and restoring in ship rolling. Ocean Engineering 27, 921-932.

URL-1 <https://business.un.org/en/entities/13> erişim tarihi: 29.05.2016.

URL-2 <https://en.wikipedia.org/wiki/Military_budget_of_the_United_States> erişim tarihi: 29.05.2016.

URL-3 <http://www.cruisemarketwatch.com/articles/cruise-market-watch-announces-2011-cruise-line-market-share-and-revenue-projections/> erişim tarihi: 29.05.2016.

Ursell, F. (1949). On the rolling motion of cylinders in the surface of a fluid. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics 2, 335-353.

Verlet, L. (1967). Computer experiments on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules. *Physical Review*, 159, 98-103.

Von Neumann, J., Richtmyer, R. A. (1950). Method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks. *Journal of Applied Physics*, 21:232–247.

Vugts, J. H. (1968). The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface. (112 S) Shipbuilding Laboratory, Technical University Delft.

Webster, W. C. (1975). The flow about arbitrary, three dimensional smooth bodies. Journal of Ship Research, 19, 206-218.

Wehausen, V. C. (1969). Use of Lagrangian coordinates for ship wave resistance (first and second order thin ship theory). Journal of ship research. 13. (1). 12-22.

Wilson, R., Carrica, P. ve Stern, F. (2006). Unsteady RANS method for ship motions with application to roll for a surface combatant. Journal of Computers and Fluids, 35, 501-524.

Yang, C. (1998). *Robust rudder roll damping control.* (Doktora Tezi), Dalian University/Aalborg University, Dalian.

Yeung, R. W. ve Vaidhyanathan, M. (1994). Highly separated flows near a free surface. International Conference on Hydrodynamics, Wuxi, China.

Yeung, R. W., Liao, S. W. ve Roddier, D. (1998). Hydrodynamic coefficient of rolling rectangular cylinders. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 8, (4).

Yıldız, B., Çakıcı, F., Katayama, T. ve Yılmaz, H., (2016). URANS Prediction of Roll Damping for a Ship Hull Section at Shallow Draft, *Journal of Marine Science and Technology,* 21:48-56.

Yılmaz, T. (2008). Gemi Mühendisliği El Kitabı. Sarıöz K., Kükner A., Alkan A. D., Denizcilik (6. Bölüm, sayfa 6.1-6.85). İstanbul: Gemi Mühendisleri Odası.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Onur ÖLMEZ

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 05 Mayıs 1981, Kırıkkale

E-posta **:** olmezonur@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2004, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi.
- **Yükseklisans** **:** 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2004-2005 yılları arasında Figes A.Ş.'de, Hesaplama Akışkanlar Dinamiği Mühendisi olarak çalıştı.
- 2005-2010 yılları arasında Savunma Sanayii Müsteşarlığı'nda, Kalite Güvence Temsilcisi olarak çalıştı.
- 2010-2013 yılları arasında Savunma Sanayii Müsteşarlığı'nda, SSM Ofisi Lideri olarak çalıştı.
- 2013-…. Savunma Sanayii Müsteşarlığı'nda Kıdemli Danışman olarak çalışmakta.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ölmez, O.**, Özbulut, M., Yıldız, M. ve Gören, Ö. 2015. Vortical and Nonlinear Effects in the Roll Motion of a 2-D Body in the Free Surface Investigated by SPH. *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM) 2015*, Vol 1738, 030033-1 − 030033-4, doi: 10.1063/1.4951789, Rhodes, Greece, September 2015.
- **Ölmez, O.**, Özbulut, M., Yıldız, M. ve Gören, Ö. 2016. Zorlanmış Yalpa Hareketi Yapan İki Boyutlu Cisimlerin Hidrodinamik Katsayılarının İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Metodu ile Hesaplanması. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, (2016).