

Zorlanmış yalpa hareketi yapan iki boyutlu cisimlerin hidrodinamik katsayılarının interpolasyonlu parçacık metodu ile hesaplanması

Onur Ölmez^{1,2}, Murat Özbulut³, Mehmet Yıldız⁴, Ömer Gören^{1*}

*ogoren@itu.edu.tr

¹ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi

² Deniz Araçları Daire Başkanlığı, Savunma Sanayi Müsteşarlığı

³ Mühendislik Fakültesi, Piri Reis Üniversitesi

⁴ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi

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 2-Boyutlu cisimlere ait ek-su kütlesi ve sönüm katsayıları için bir hesaplama altyapısı geliştirilmiş ve elde edilen sonuçların literatürde yer alan diğer sonuçlar ile mukayesesi yapılmıştır. İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (İPH) yönteminin uygulamasında değişik algoritmalar kullanılmakta olup, bu çalışma çerçevesinde geliştirilmiş bilgisayar programı temelinde, Yapay Viskozite Terimi'ni (Artificial Viscosity Term) içeren Euler Hareket Denklemi ve Süreklilik Denklemi, Zayıf Olarak Sıkıştırılabilir İPH Yaklaşımı (WCSPH) yardımı ile çözmektedir. Geliştirilmiş olan bilgisayar kodunda; WCSPH kullanımında basınç değerlerinin değişimini düzenleyen Yoğunluk Düzeltmesi (Shephard Filtering) ile Özbulut (2013a) tarafından geliştirmiş olan Birleşik Serbest Su Yüzeyi ve Suni Parçacık Ötelemesi çözüm algoritması kullanılmıştır. Ayrıca problem sınırlarının eğik olduğu durumlarda ise çözüm algoritması içinde parçacıkların çözüm bölgesine daha homojen dağıtılmasına yarayan Colagrossi ve diğerleri (2012) tarafından geliştirilen Parçacık Paketleme Algoritması (Particle Packing Algorithm) kullanılmıştır. Herhangi bir ağ sistemine ihtiyaç duymayan ve Lagrange temelli doğası ile parçacıkların her birinin çözüm süresi boyunca yoğunluk, basınç, hız, vb. kinematik ya da dinamik büyüklüklerinin takibine dayanan İPH yönteminin kullanılması ile elde edilen hidrodinamik katsayıların, literatürde yer alan diğer sayısal yöntemlere oranla deney sonuçlarına daha yakın değer verdiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yalpa hareketi, hidrodinamik katsayılar, interpolasyonlu parçacık hidrodinamiği, sönüm katsayısı, ek-su kütlesi.

1. Giriş

Dünya ticaretinin %90'ının deniz yolu ile gerçekleştirildiği, savunma sanayi harcamalarının %30'una yakının deniz platformlarına yapıldığı 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 hız ve rotasını muhafaza ederek seyrebilmesi ve tasarım amacına uygun olarak kendisinden beklenen görevleri yerine getirebilmesi şeklinde tanımlayabiliriz (Sabuncu, 1983). Falzarano ve diğerleri (2015), Yılmaz (2008), Himeno (1981) gibi birçok araştırmacı tarafından 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 açılarında maruz kalması veya alabora olma riski,

olarak sayılabilir.

Yalpa hareketinin tahmini ise gemi inşa mühendisleri ve araştırmacılar için günümüzde dahi halen önem arz eden bir iştir. Hâlihazırda 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, deneysel uygulamalar veya bunların kombinasyonları kullanılmaktadır.

Yalpa hareketi ile ilgili ilk çalışmalar W. Froude (1861) tarafından yapılmıştır. Froude yalpa sönümünü lineer ve kuadratik hız bağımlısı bir formda düşünmüş olup çalışmalarında dalga yüksekliği ve dalga dikliği terimlerinin, geminin 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. Daha sonrasında yapılmış olan önemli çalışmalarını iki ayrı başlık altında toplayabiliriz.

Geçmişte yapılmış birçok analitik çalışmayı unutmadan sayısal alanda yapılan çalışmalara göz atılacak olursa, Discrete Vortex Method (DVM), Random Vortex Method (RVM) ve Reynold Avaraged Navier Stokes (RANS) metotları en popüler uygulamalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle 1980'lerde daha yoğun olarak kullanılan DVM ve RVM ile çözümler bilgisayarların kapasitelerinin artması ile yerlerini RANS uygulamalarına bırakmışlardır. Günümüzde RANS metodu ağırlıklı olmak üzere birçok araştırmacı tarafından yalpa hareketindeki hidrodinamik katsayıların tespitine ilişkin çalışmalar yayınlanmaktadır. Bahsedilen metotlara ait çalışmalar arasında Yeung ve Vaidyanathan (1994) tarafından geliştirilmiş olan Free-Surface Random Vortex Method (FSRVM) ile İPH çalışmasının sonuçları karşılaştırılacaktır.

İkinci olarak deneysel çalışmalara göz atılacak olursa, Ikeda ve diğerleri (1978), Vugts (1968), Yeung ve diğerleri (1998)'nin çalışmaları ön plana çıkmaktadır. Ikeda tarafından 1970'lerin sonunda yapılan çalışmalar sonucunda sönüm katsayısının hesabı için ampirik bir formülasyon oluşturulmuştur. Sönüm katsayısını radyasyon, yüzey sürtünmesi, kaldırma, girdap yapma ve yalpa omurgası bileşenlerinden oluştuğuna yönelik oluşturulmuş formülasyon halen endüstride ve akademik camiada kullanılmaktadır. Vugts (1968)'un gemi hareketleri konusunda yapmış olduğu deneysel çalışmalar birçok araştırmacı için referans noktası teşkil etmiştir. Vugts yaptığı deneylerde daire, dikdörtgen (3 farklı B/T oranında), üçgen ve iki değişik boyutta Lewis formülü kesitlerdeki silindirler için yanal öteleme, dalıp-çıkma ve yalpa hareketlerini incelemiş ve hidrodinamik katsayılar ile ilgili geniş bir değerlendirme yapmıştır. Yeung ve diğerleri (1998)'nin California Üniversitesi'nin model havuzunda yapmış olduğu deneyler konu ile ilgili olarak yapılmış olan bir diğer değerli çalışmadır. Bu çalışmada cisim çevresinde oluşan moment, serbest su yüzeyinde oluşan dalga oluşumu, ek su kütlesi, sönüm katsayısının yanı sıra yanal öteleme hareketinin yalpaya etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, deneysel sonuçların yanı sıra yalpa hareketine ilişkin sönüm ve ek su kütle atalet momenti katsayılarının hesaplanmasında kullanılan FSRVM sayısal modelinden elde edilen sonuçların karşılaştırması da yapılmıştır.

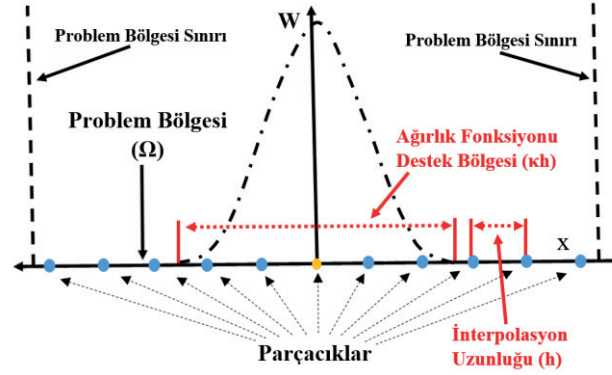
Bu çalışmada ise, yalpa hareketine ait hidrodinamik katsayıların İPH yöntemi ile hesaplanması amaçlanmış olup, elde edilen sonuçların literatürde yer alan diğer çalışmalar ile mukayesesi yapılmıştır. İPH yöntemi ilk olarak 1970 yılların sonunda astrofizik problemlerinin çözümünde Lucy, (1977) ve Monaghan ve Gingold, (1977) tarafından kullanılmaya başlanmış, daha sonra akışkan ve katı cisim problemlerine uygulanmıştır. Bu yöntem, 1990'lı yıllarda su altı patlaması, şok, biomekanik, 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 yöntemdir. Yöntemin Özbulut ve diğerleri, (2013b ve 2014) tarafından serbest su yüzeyi deformasyonlarının yüksek mertebede non-lineer bir karaktere sahip olduğu şiddetli akış problemlerine başarı ile uygulanmasının ardından viskoz ve non-lineer etkilerin yüksek olduğu yalpa hareketinde uygulanmasına karar verilmiştir.

2. İPH metodu, denklemlere uygulanması ve sınır koşulları

Ağırsız sayısal yöntemlerden biri olan İPH metodu, temel olarak iki adımdan oluşmaktadır. İlk adım çekirdek yaklaşımı (kernel approximation) olarak adlandırılmaktadır. Çekirdek yaklaşımı; herhangi bir kinematik ya da dinamik büyüklüğün, çözüm bölgesi içerisinde dağıtılmış parçacıklara bir ağırlık fonksiyonu ile atanması şeklinde ifade edilir.

$$\begin{aligned} F_i &\cong \langle F(\vec{r}_i) \rangle = \int_{\Omega} F(\vec{r}_j) W(\vec{r}_j - \vec{r}_i, h) d\vec{r}_j \\ &= \int_{\Omega} F(\vec{r}_j) W(\vec{r}_j, h) d\vec{r}_j \end{aligned} \quad (1)$$

(1) denkleminde $W(\vec{r}_{ij}, h)$ ağırlık fonksiyonudur ve Ω tanımlanmış problem bölgesindeki her parçacık için h interpolasyon uzunluğundaki (smoothing length) $d\vec{r}_{ij}$ hacim elemanına sahip diğer parçacıklara etki değerine sahiptir. “ h ” Dirac Delta fonksiyonuna eşdeğer özellik göstermektedir. Bu denkleminde hesabı yapılan parçacık i indisi ile ilgilenilen parçacık j indisi ile gösterilmekte olup parçacıkların birbirleri arasındaki uzaklık $\vec{r}_j - \vec{r}_i = \vec{r}_{ij}$ ile ifade edilmektedir. Ağırlık fonksiyonu, problem bölgesi, interpolasyon uzunluğu terimleri ve birlikte kullanımları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Problem bölgesi içerisindeki bir parçacık için ağırlık fonksiyonunun, interpolasyon uzunluğu ile ilişkisi.

Denklem (1)’de gösterilen ifadenin türevi ise (2)’de yer almaktadır. Görüldüğü üzere bir fonksiyonun türevi alınmak istenildiğinde sadece ağırlık fonksiyonun türevi alınmaktadır.

$$\frac{\partial F_i}{\partial x} = \frac{\partial F(\vec{r}_i)}{\partial x_i} = \int_{\Omega} F(\vec{r}_j) \frac{\partial W(\vec{r}_j - \vec{r}_i, h)}{\partial x_i} d\vec{r}_{ij} \quad (2)$$

Bu çalışmada kullanılan ağırlık fonksiyonu (3)’de verilmiş olup literatürde sıkça kullanılmakta olan 5. mertebeden (quintic) bir ağırlık fonksiyonudur. Ağırlık fonksiyonu sadece ayrılaştırılan denkleme yaklaşımı değil elde edilen sonuçların yakınsaklığını da etkilediği için seçim esnasında azami özen gösterilmelidir. Bir ağırlık fonksiyonu en az “Birim Özelliği”, “Pozitif Olmaz Özelliği”, “Tam Desteklenme”, “Konuma Göre Monoton Azalma” ve “Dirac Delta Fonksiyonu Olma” koşullarını sağlamalıdır.

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} (3-R)^5 - 6(2-R)^5 + 15(1-R)^5, & 0 \leq R < 1 \\ (3-R)^5 - 6(2-R)^5, & 1 \leq R < 2 \\ (3-R)^5, & 2 \leq R < 3 \\ 0, & R \geq 3 \end{cases} \quad (3)$$

α_d problemin boyutuna bağlı olarak değişen bir katsayıdır. Bu çalışmada, 2-Boyutta çalışıldığı için $7/(478\pi h^2)$ alınmıştır.

İkinci temel yaklaşım ise parçacık yaklaşımıdır (particle approximation). Parçacık yaklaşımı, çekirdek yaklaşımı yapılarak integral haline dönüştürülen fonksiyonun parçacıklara ayrıştırılarak bir toplam şeklinde ifade edilmesidir. Denklem (4)'te, (2)'deki fonksiyonun parçacık yaklaşımı ile ifade edildiği görülmektedir.

$$\int_{\Omega} F(\vec{r}_i) W(\vec{r}_{ij}, h) d\vec{r}_{ij} = \sum_{j=1}^N F(\vec{r}_i) W(\vec{r}_{ij}, h) \Delta V_j \quad (4)$$

Çekirdek ve parçacık yaklaşımlarının uygulanması sonrasında Euler denklemi ve süreklilik denklemi, sırasıyla, (5) ve (6)'da gösterilen hali almaktadır.

$$\frac{D\vec{u}_i}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (5)$$

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (\vec{u}_j - \vec{u}_i) \nabla_i W_{ij} \quad (6)$$

İPH yönteminde, akıştaki hızlı değişimlerden etkilenmemek için basınç terimlerine yapay viskozite terimleri (artificial viscosity) eklenmektedir. Bu çalışmada kullanılmış olan yapay viskozite terimi denklem (7) ve (8)'de gösterilmiştir.

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \alpha \mu_{ij} \frac{c_i + c_j}{\rho_i + \rho_j}, & \vec{u}_{ij} \cdot \vec{r}_{ij} < 0 \\ 0, & \vec{u}_{ij} \cdot \vec{r}_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{ij} = h \frac{(\vec{u}_i - \vec{u}_j) \cdot (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{\|\vec{r}_i - \vec{r}_j\|^2 + \theta h^2} \quad (8)$$

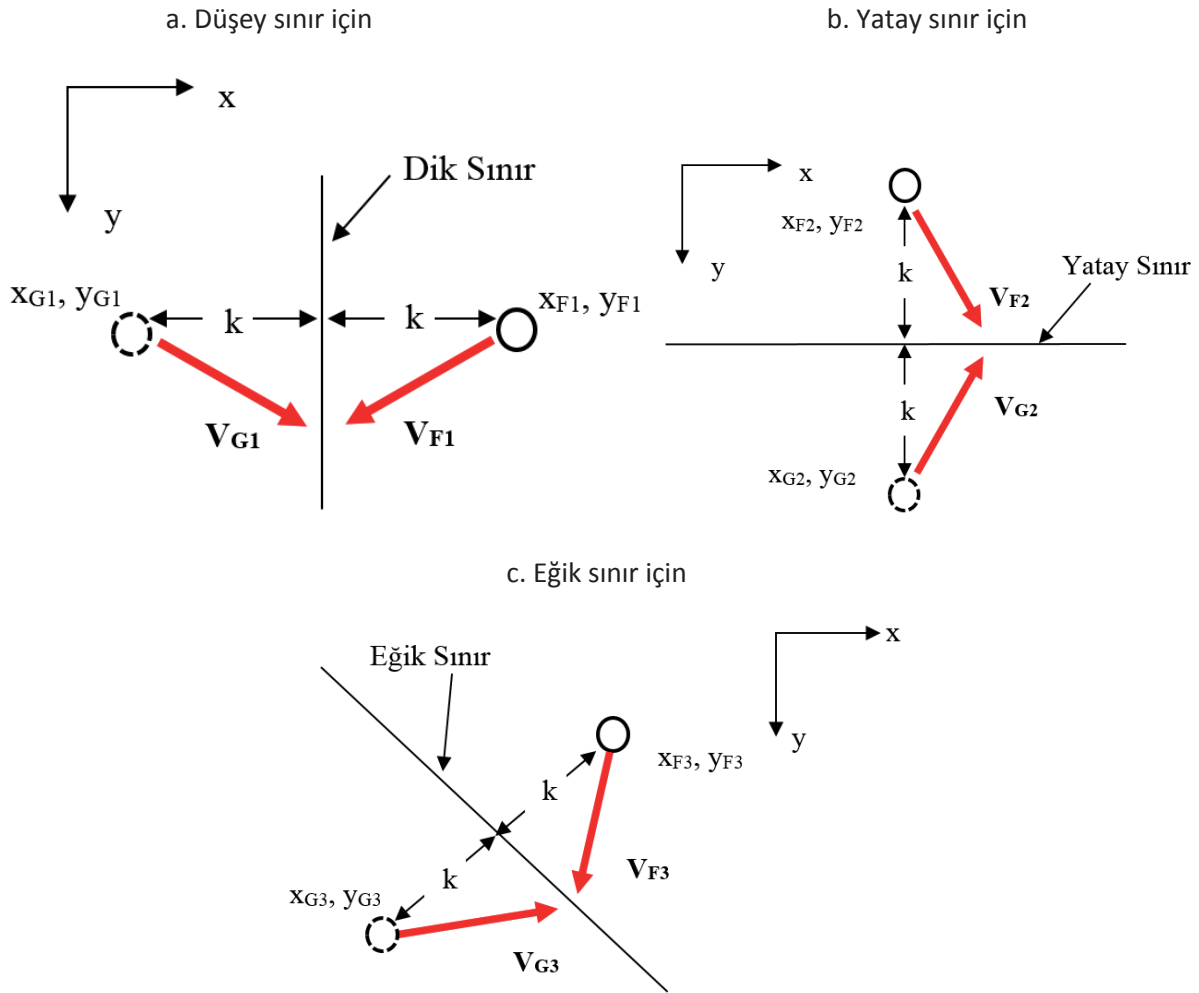
Π_{ij} yapay viskozite terimi, $c_i = c_0 (\rho_i / \rho_0)^{(\gamma-1)/2}$ olup c_i parçacığın lokal ses hızını, c_0 referans ses hızını, ρ_i parçacığın yoğunluğunu, ρ_0 referans yoğunluk değerini, γ suyun spesifik ısı oranını, θ paydanın her hangi bir zaman adımında 0 olmasını engellemek amacı ile 0.01 değerindeki bir katsayıyı ifade etmektedir. α katsayısı ise ν kinematik viskozite, h interpolasyon uzunluğu olmak üzere $\alpha = \frac{8\nu}{hc}$ eşittir. Ancak şunu da unutmamak lazım ki, Zayıf Olarak Sıkıştırılabilir İPH yaklaşımında

suyun viskozitesi gerçek değerinden daha büyük alınmaktadır. Yapay viskozite teriminin doğrusal momentum korunumu denkleminde eklenmesinin sebebi akışkana belli bir mertebede difüzyon eklenerek sayısal çözümün kararlılığının artırılmasının 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 diğerleri 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 artırılması ile (örneğin interpolasyon uzunluğunun (h) sıfıra yakınsaması ile) suni viskozite terimi sıfıra yakınsar ve böylece hareketi temsil eden denklem sistemi Euler denklemlerine indirgenmiş olur (Antuono, ve diğerleri 2011).

Sınır şartlarının belirlenmesi İPH yönteminde önemli bir ayrıntı olup uygulamada farklı sınır şartları verme teknikleri yer almaktadır. Bu çalışmada havuzun sınırlarını oluşturan parçacıkların yanı sıra literatürde hayalet parçacık (ghost particle) olarak adlandırılan teknik uygulanmıştır. Hayalet parçacık tekniği, sınıra yakın parçacıkların ayna simetrisinin alınması ve oluşturulan parçacıklara ilgili parçacığın basınç, yoğunluk ve benzeri alan büyüklüklerin atanması olarak tanımlanabilir. Hız değerlerinin atanması ise ilgili sınırdaki uygulanması istenen serbest kayma (free-slip) veya kaymama (no-slip) koşuluna göre değişmektedir. Problem sınırlarına $1.55h$ uzaklıktaki her bir akışkan parçacığı için bir hayalet parçacık oluşturulmuştur.

Hayalet parçacık oluşumu ve hız değerlerinin serbest kayma koşuluna göre atanmaları Şekil 2'de üç farklı sınır tipinde gösterilmiştir. Şekilde G indisi hayalet parçacık için, F indisi ise akışkan parçacığını temsil etmektedir. Ayrıca Şekil 2'de gösterilmiş olan k değeri $1.55h$ 'a eşittir.



Şekil 2. Farklı tip sınır için hayalet parçacık uygulaması.

Çalışmada zaman artım parametresi için kullanılan Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) şartı (9)'da verilmiştir.

$$\Delta t \leq C_{CFL} \frac{h_{ij}}{(c_0 + v_{\max})} \quad (9)$$

C_{CFL} bir sabit olup $0 \leq CFL \leq 1$ arasında seçilmektedir. h_{ij} minimum interpolasyon uzunluğudur, bu çalışmada interpolasyon uzunluğu parçacıklar için sabit seçildiğinden h 'ye eşit olarak alınmıştır. v_{\max} maksimum akışkan parçacığı hızıdır. Cismin hareketinin genlik ve frekans değerine göre değişkenlik göstermektedir.

Akışın zaman içerisinde ilerlemesinde tahmin-düzeltilme (predictor-corrector) şeması kullanılmıştır. Bu kapsamda ilk önce parçacıkların konum, hız ve yoğunluklarının zamana göre türevleri alınmıştır. Ara zaman adımında parçacıkların konum ve yoğunluklarının tahmin edilmesi (10) ve (11)'e göre yapılmıştır.

$$\frac{d\vec{r}_i^{n+1/2}}{dt} = \vec{r}_i^n + \frac{1}{2}\vec{u}_i^n \Delta t \quad (10)$$

$$\frac{d\rho_i^{n+1/2}}{dt} = \rho_i^n + \frac{1}{2}b_i^n \Delta t \quad (11)$$

(11)'de hesaplanan yoğunluk değerleri basınç değerlerinin hesaplanması için bir hal denklemi içerisinde kullanıldıktan sonra, elde edilen basınç değerleri Euler denkleminde kullanılarak yeni zaman adımındaki hız değerlerine (12) ulaşılır.

$$\vec{u}_i^{n+1} = \vec{u}_i^n + \vec{a}_i^{n+1/2} \Delta t \quad (12)$$

Düzeltilme adımında ise (12)'de elde edilen hız değerleri kullanılarak yeni zaman adımına ait konum ve yoğunluk değerleri (13) ve (14)'teki gibi tespit edilir.

$$\vec{r}_i^{n+1} = \vec{r}_i^{n+1/2} + \frac{1}{2}\vec{u}_i^{n+1} \Delta t \quad (13)$$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^{n+1/2} + \frac{1}{2}b_i^{n+1} \Delta t \quad (14)$$

Değişik zaman ilerletme ve parçacıklar arası bilgi transferi uygulamaları için Ölmez (2008)'e bakılabilir.

3. Sayısal düzeltme ve uygulama algoritmaları

Zayıf Olarak Sıkıştırılabilir İPH (WCSPH) yaklaşımında basınç ve yoğunluk değerlerini birbirlerine bağlayan açık hal denklemleri kullanılmaktadır. Hal denkleminin etkisiyle yoğunluk değerlerindeki çok küçük değişiklikler basınç değerlerindeki değişimi tetiklemektedir (Shadloo ve diğerleri, 2011). Bu

çalışmada hal denklemi olarak Monaghan ve Kos (1999)'un önermiş olduğu (15) denklemi kullanılmıştır.

$$p_i = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right) - 1 \right] \quad (15)$$

Akışkanın sıkıştırılmaz akışkan olduğu kabulünün sağlanabilmesi için (15)'de c_0 referans ses hızı değerinin, parçacıkların yoğunluk değişimlerini referans yoğunluğa göre %1'den daha az tutabilecek kadar büyük seçilmesi gerekmektedir.

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 (16) numaralı denklem kullanılmıştır.

$$\tilde{\rho}_i = \rho_i - \sigma \frac{\sum_{j=1}^N (\rho_i - \rho_j) W_{ij}}{\sum_{j=1}^N W_{ij}} \quad (16)$$

$\tilde{\rho}_i$ düzgünleştirilmiş yoğunluk değeri olup basınç değerlerinin tespitinde bu değerden faydalanılmaktadır. σ ise katsayıdır ve bu çalışmada 1 olarak alınmıştır.

Kullanılan ikinci sayısal düzeltme algoritması ise Birleşik Serbest Su Yüzeyi Suni Parçacık Ötelemesi çözüm algoritmasıdır. Bu algoritmada, Suni Parçacık Ötelemesi (SPÖ) düzeltmesi parçacıkların yoğun olduğu bölgelerde uygulanırken, serbest su yüzeyi algoritması ise sadece serbest su yüzeyi parçacıklarına uygulanmıştır. Serbest su yüzeyi algoritması için (17) denklemi, SPÖ için ise (18)'den yararlanılmış olup VXSPH algoritması'nın detayları için Özbulut ve diğerleri, (2013a, 2014)'e bakılabilir. (17) içerisindeki ε bir katsayı olup 0.003'e eşit alınmıştır.

$$\Delta \vec{u}_i = \varepsilon \frac{\sum_{j=1}^N (\vec{u}_i - \vec{u}_j) W_{ij}}{\sum_{j=1}^N W_{ij}}, \quad (17)$$

$$\hat{\vec{u}}_i = \vec{u}_i - \Delta \vec{u}_i$$

$$\delta \vec{r}_i = \beta \sum_{j=1}^N \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3} r_0^2 v_{\max} \Delta t \quad (18)$$

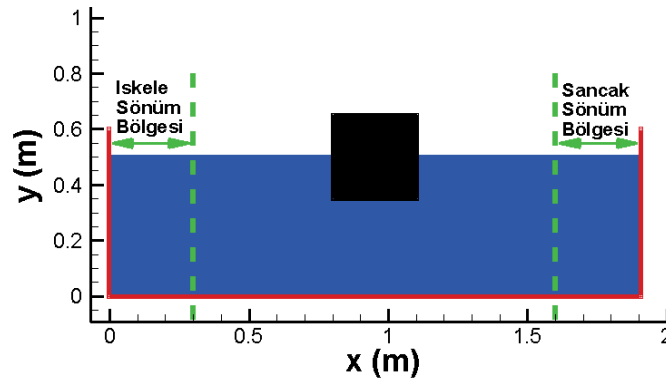
Çalışmada, cismin yalpa hareketi yaptığı iki ayrı havuz geometrisi için iki ayrı sayısal algoritma kullanılmıştır. Birinci algoritma havuz sınırlarının dik olduğu analizlerde havuz sınırlarında (sancak ve iskele yönünde) sönüm bölgeleri oluşturularak yapılmıştır. Dik havuz sınırlarının olduğu analizler için oluşturulmuş olan sönüm bölgeleri Şekil 3'de görülmektedir. Sönüm bölgelerinde akışkan

parçacıklarının hızları (19) ve (20) kullanılarak azaltılmış ve yalpa hareketi yapan cismin çevresindeki akışın, havuz sınırlarından yansıyan dalgalar nedeni ile bozulması engellenmiştir.

$$\vec{u} = \vec{u}_0 f(x) \quad (19)$$

$$f(x) = 1 - e^{(-\psi(\delta x_0 - (x - x_0)))} \quad (20)$$

(20)'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'dir.



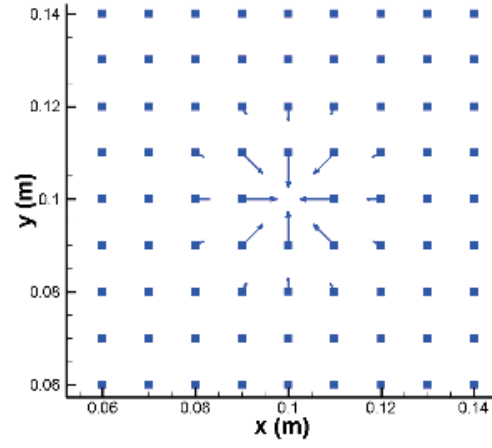
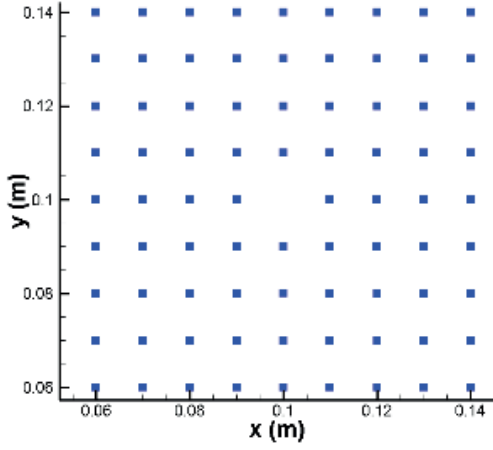
Şekil 3. Dik sınırlı havuz uygulamasında sönüm bölgesi.

İkinci algoritma ise havuz sınırlarının eğik olduğu durumlarda uygulanmıştır. Havuz sınırlarının eğik yapılmasının amacı havuz sınırlarında dalgaları sönümleyerek havuz sınırlarından dalga yansımalarını engellemek ve cisim çevresindeki akışın bozulmamasını sağlamaktır.

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 diğerleri, (2012) tarafından geliştirilen Parçacık Paketleme Algoritması (PPA) kullanılmıştır. 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 4a'da eksik bırakılmış olan parçacığın yeri, Şekil 4b'de 0.0003s sonunda parçacıklarda oluşan hız vektörleri, Şekil 4c'de 0.05s sonunda parçacıkların dizilimleri, Şekil 4ç'de 0.05s sonunda parçacıklardaki hız vektörleri, Şekil 4d'de 0.1s sonunda parçacıkların yeni dizilimleri, Şekil 4e'de ise 0.1s sonunda parçacıkların homojen dağılımı sağladıkları haldeki hız vektörleri verilmiştir.

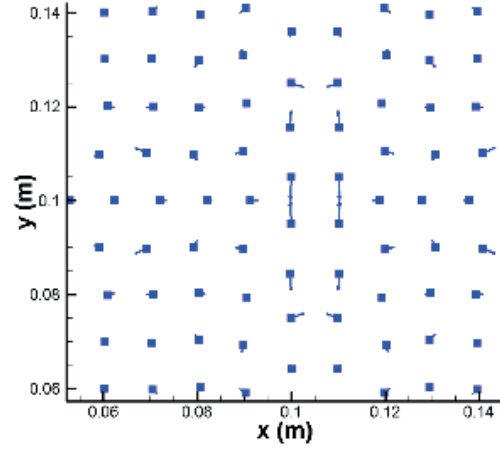
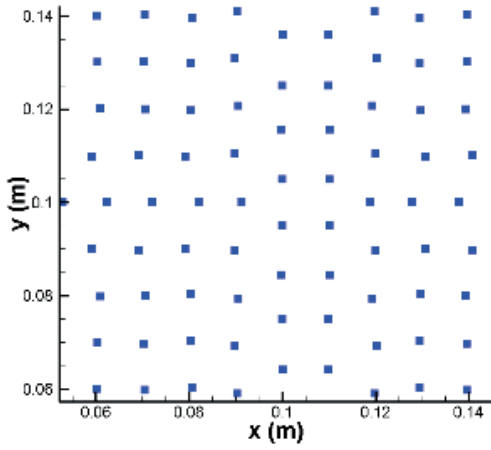
a. Kartezyen koordinat sisteminde eksik bırakılmış parçacık

b. Diğer parçacıklardaki hızlar



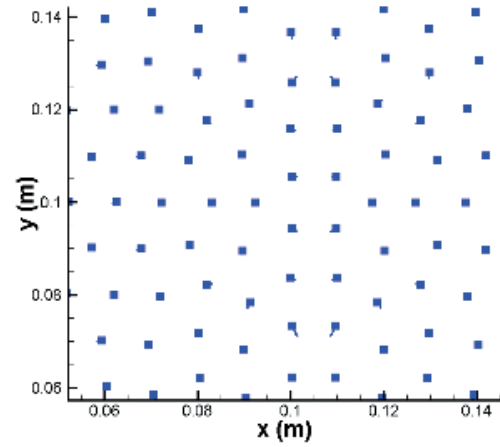
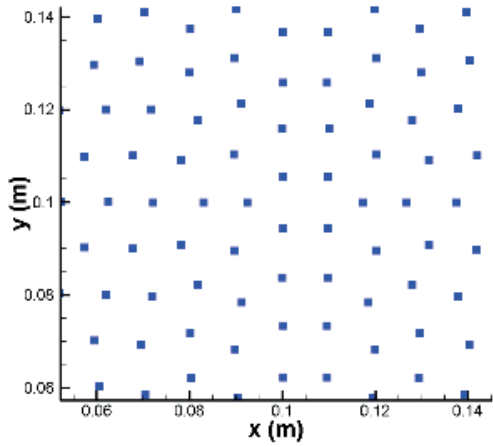
c. 0.05s'de parçacık dağılımı.

ç. 0.05s'de parçacıklardaki hızlar.



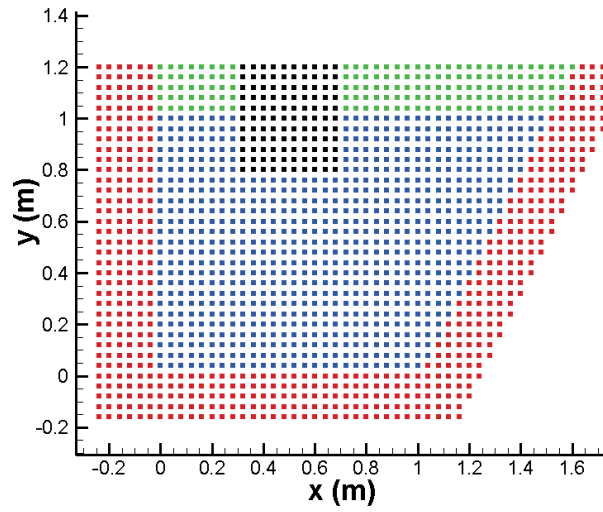
d. 0.1s'de parçacık dağılımı.

e. 0.1s'de parçacıklardaki hızlar.



Şekil 4. Eksik parçacığın olduğu bölgeye doğru hareket eden parçacıklara ait hız vektörleri ve parçacık dağılımlarının zamana göre değişimi.

PPA algoritmasına yönelik ilk denemenin başarılı sonuçlanması sonrasında, eğik sınırlara sahip bir havuz geometrisinde parçacıklara ait hız dağılımı ve konumlar incelenmiştir. Bu denemede, birinci adım olarak serbest su yüzeyi üzerinde sanal bir duvar oluşturulmaktadır. İkinci adımda ise 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 5'teki gibi bir havuzda kartezyen sistemde dağıtılmış parçacıklarda PPA algoritmasının çalıştırılması sonucunda parçacıklarda oluşan hız vektörlerinin zaman içerisindeki değişimleri ve parçacıkların nihai konumları Şekil 6'da verilmiştir.

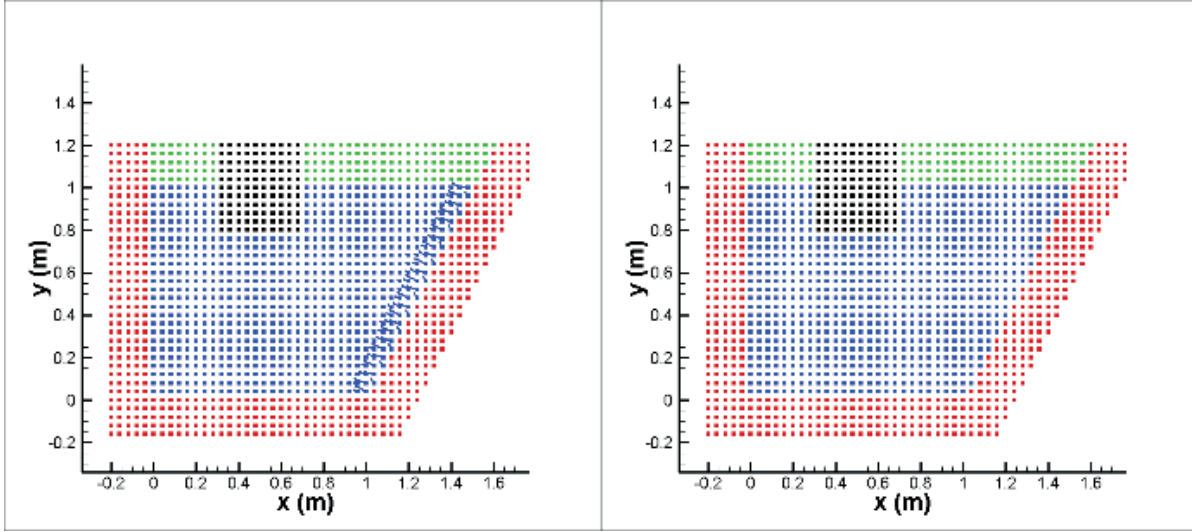


Şekil 5. Eğik bir havuzda parçacıkların dağılımı.

Şekil 5 ve Şekil 6'da 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.

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

Son olarak, cismin hareketi başlangıcında yapılan sayısal düzenlemeden bahsedebiliriz. Yalpa hareketinin ilk periyodunda (özellikle hareketin periyodu 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 diğerleri (1998), Jaouen ve diğerleri (2011), Yıldız ve diğerleri (2016) ve daha birçok araştırmacı tarafından başlangıç fonksiyonunun değişik formları kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılmış olan başlangıç fonksiyonu (21)'de verilmiştir.



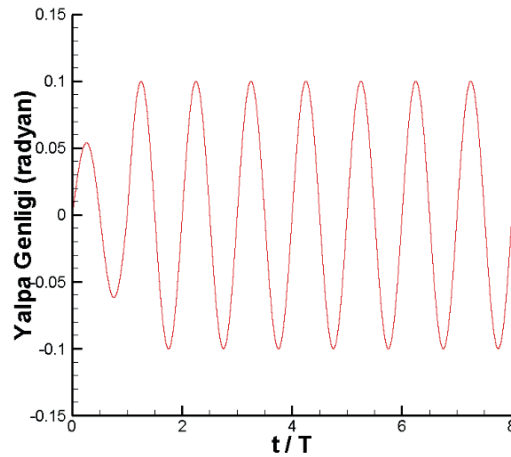
Şekil 6. Değişik zaman adımlarında parçacıklardaki hız vektörlerinin ve parçacıkların nihai konumlarının gösterimi.

$$D(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{10T}t - \frac{1}{2}\pi\right) + \frac{1}{2} & t < T \\ 1 & t \geq T \end{cases} \quad (21)$$

Başlangıç fonksiyonunun zorlanmış cismin yalpa hareketi ile çarpılması neticesinde (22) elde edilmekte olup yalpa hareketi cisme aynı denklem ile yaptırılmaktadır.

$$\varphi = D(t)\varphi_a \sin(\omega t) \quad (22)$$

Cisme yaptırılan yalpa hareketinde başlangıç fonksiyonunun etkisi Şekil 7'de görülmektedir. Dikkat edilecek olursa cismin genliği ilk periyotta ikinci periyoda göre yarı yarıya azdır ve zamana bağlı olarak genlik değeri artmaktadır. Başlangıç fonksiyonunun kullanılması nedeni ile cismin analizinde kullanılacak sonuçlarda ikinci periyottan sonraki değerler alınmıştır.



Şekil 7. Yalpa genliğinin t/T oranına karşı grafiği.

4. Duyarlılık analizleri

Bu çalışmada kullanılmış olan algoritmanın gürbüz (robust) olup olmadığının kontrolü için parçacıklar arası mesafe (bundan sonra dx olarak anılacaktır) ve zaman adımı (bundan sonra dt olarak anılacaktır) değişiminin sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Her iki duyarlılık analizinde mukayese kriteri olarak ek su kütle atalet moment katsayısı (a_{66}) ve sönüm moment katsayısı (b_{66}) (katsayıların boyutsuz ifadeleri için bkz. (28) ve (29)) seçilmiştir. Parçacık mesafesine ilişkin yapılan analizde cismin yalpa genliği $\varphi_a = 0.2$ radyan ve $\bar{\omega} = 1$ 'dir ($\bar{\omega}$ boyutsuz açısal frekansın eşitliği (25)'te yer almaktadır). dx değişimine göre yapılmış duyarlılık analizinin sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı dx dağılımlarında ek su kütlesi ve sönüm katsayılarının mukayesesi.

dx [m]	0.006	0.005	0.00375
Toplam Parçacık Adedi	29079	41723	73054
dt [s]	0.00005	0.00005	0.00005
Analiz Zamanı [h]	6.53	12.46	37.88
a_{66}	0.03391	0.03498	0.03330
b_{66}	0.03357	0.03326	0.03321

İkinci duyarlılık analizinde ise dt 'nin değişimine bağlı olarak ek su kütle atalet momenti ve sönüm moment katsayılarının değişimi izlenmiştir.

Tablo 2. Farklı dt kullanımlarında ek su kütlesi ve sönüm katsayılarının mukayesesi.

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

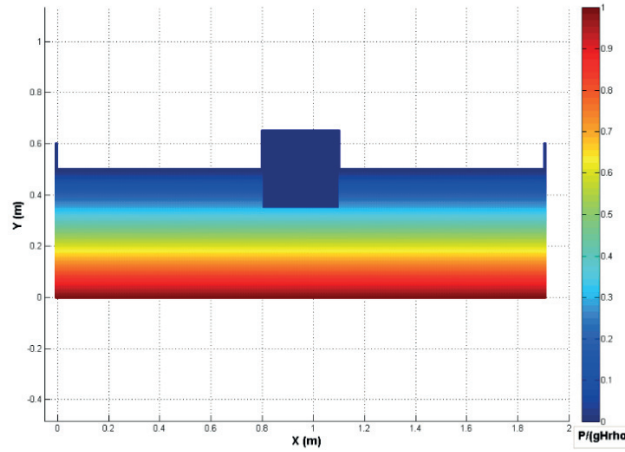
Tablo 1 ve Tablo 2'de yer alan "Analiz Zamanı" satırında yer alan değerler hareketin bir periyodunu çözdürmek için geçen zamandır.

Tablo 1 ve Tablo 2'deki sonuçlardan da görüldüğü üzere bu çalışma için oluşturulmuş algoritma ile farklı dx ve dt değerlerinde ek su kütlesi ve sönüm katsayıları için benzer sonuçlar alınmıştır.

Dolayısıyla analizler için kullanılmış olan algoritmanın gürbüz olduğu duyarlılık analizlerinden görülmektedir.

5. Doğrulama

Doğrulama amacıyla yapılmış olan analizlerin çoğunluğunda Şekil 8’de 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 8’de 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. dx ’in 0.005 m dt ’nin 0.00004 s olarak seçildiği geometri bundan sonra cismin hareket ettiği, ek su kütlesi ve sönüm katsayısının tespitinde bulunulan bütün analizde başlangıç koşuludur.



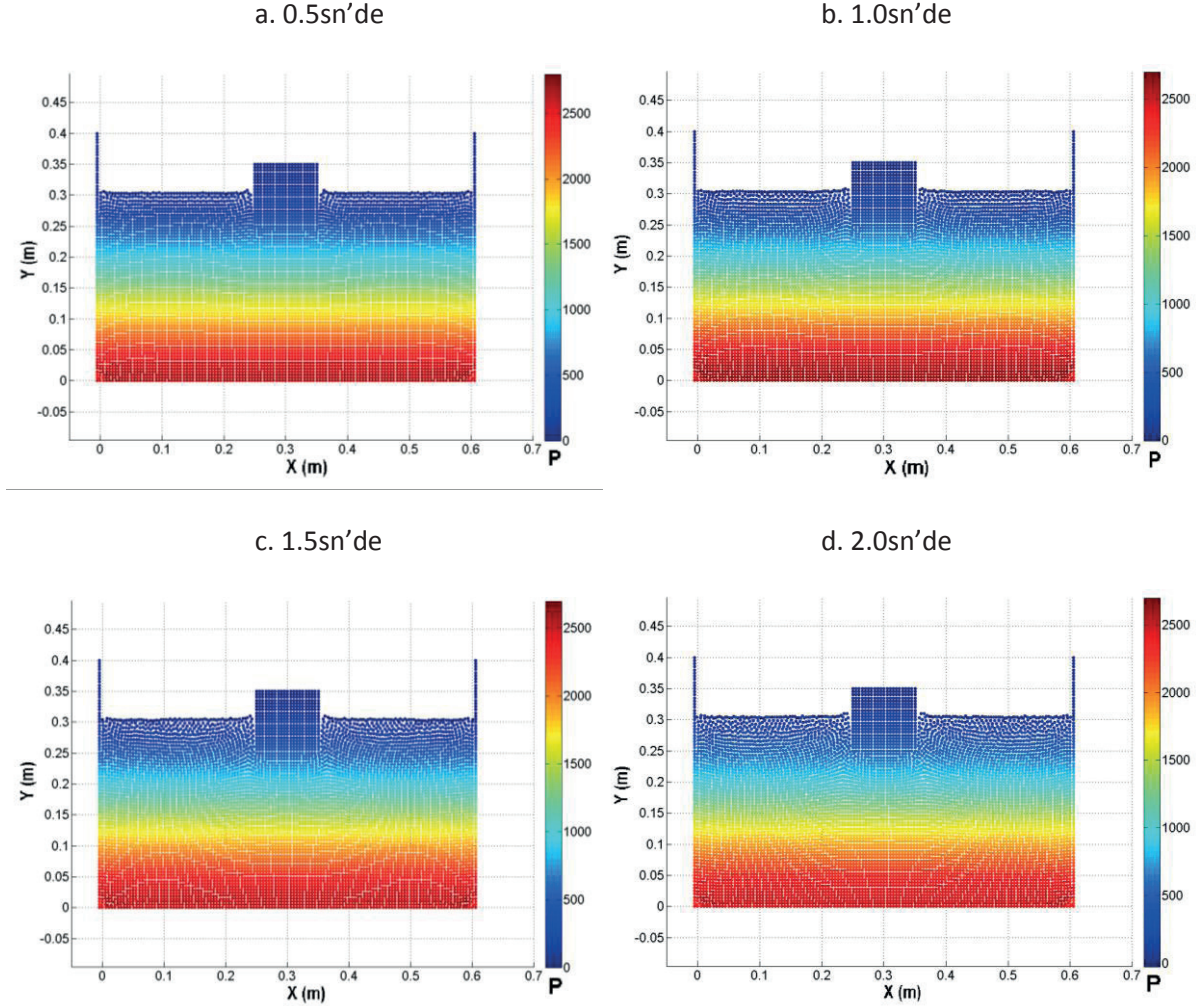
Şekil 8. Problem geometrisi ve parçacıklara verilmiş başlangıç basınç değerleri.

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 9’da verilmiştir.

Hidrostatik durum için yapılmış olan kontrolde havuz geometrisi ve cisim geometrisi küçültülmüş ve havuz yüksekliği, havuz uzunluğu, cisim yüksekliği ve cisim genişliği sırası ile 0.3 m, 0.6 m, 0.1 m ve 0.1 m alınmıştır. Havuz ve cisim geometrisindeki bu değişikliğin sebebi analiz zamanının kısaltılmak istenmesidir. Parçacık sayısının artışı ile analiz zamanının ne kadar arttığına ilişkin sonuçlar Tablo 1’de verilmiş olup, bu konuya dair değerlendirmelere 6. bölüm de yer verilmiştir.

Hidrostatik durum için 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 9’da görüldüğü üzere

havuz içerisindeki basınç dağılımında zaman içerisinde ihmal edilebilir düzeyde çok küçük değişiklikler gözlemlenmiş olup zaman içinde algoritmanın stabil olduğu anlaşılmaktadır.

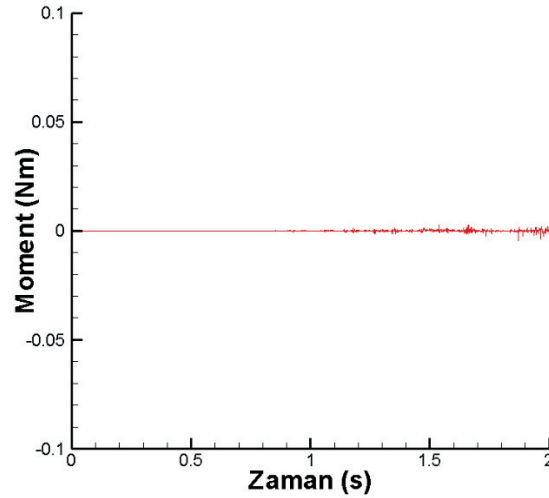


Şekil 9. Zaman içerisinde hidrostatik basıncın değişimi.

Hidrostatik durumda cismin dış sınırını oluşturan parçacıklar üzerindeki basınç değerleri ve parçacık normaleri kullanılarak cismin çevresinde oluşan moment de hesaplanmıştır. Cismin çevresinde oluşan momentin hesaplanmasında kullanılan denklem (23)'de verilmiştir.

$$M = \int_B P (\vec{n}_x y - \vec{n}_y x) ds \quad (23)$$

Şekil 9'da verilmiş olan basınç dağılımlardan alınan değerler ile (23) kullanılarak elde edilen moment Şekil 10'da verilmiştir. Parçacıkların kartezyen olarak dağıtıldığı ve cismin hareketsiz olduğu dikkate alındığında cismin çevresinde hesaplanacak momentin 0'a eşit olması gerekmektedir. Şekil 10'dan da görüleceği üzere momentteki değişim çok küçük olup 10^{-1} Nm mertebesinde bile moment değerinde herhangi bir dalgalanma/değişim gözlemlenmemektedir.



Şekil 10. Hidrostatik durumda cisim çevresinde oluşan momentin zamana göre değişimi.

Çözüm algoritması ile yapılmış olan ikinci deneme, cisim hareketli iken tespit edilen moment değerleri için yapılmıştır. Bu denemede elde edilen sonuçlar Yeung ve diğerleri, (1998)'de yer alan deneysel ve sayısal sonuçlar ile Şekil 11'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için yapılan analizde cismin yaptığı 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 4 için geçerli olan problem geometrisi ve başlangıç koşulları kullanılmıştır. Moment ve açısal frekansın boyutsuzlaştırılmasında kullanılan denklemler sırası ile (24) ve (25)'de verilmiştir.

$$\bar{M} = \frac{M}{\rho \varphi_a^2 \omega^2 b^4} \quad (24)$$

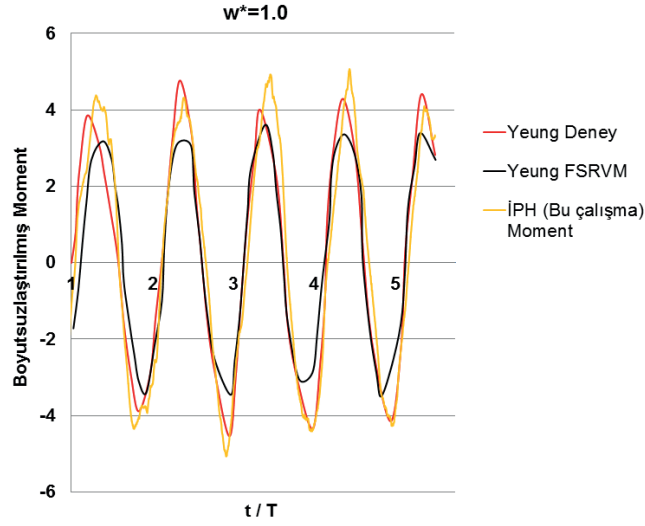
$$\bar{\omega} = \omega \sqrt{b/g} \quad (25)$$

(24) ve (25)'te yer alan b yarı genişlik, φ_a cismin yalpa genliği ve ω cismin açısal frekansıdır.

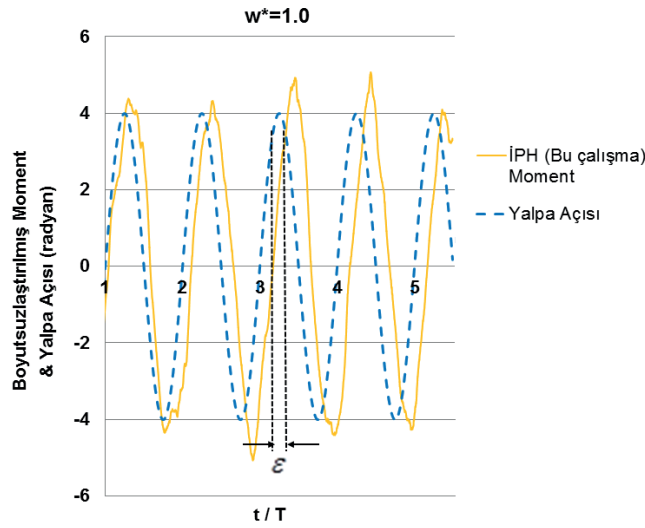
Şekil 11'den de görüldüğü üzere bu çalışmada elde edilen sonuçlar yalpa hareketinin kestiriminde kullanılmakta olan sayısal metodlardan biri olan FSRVM'ye göre deney sonuçlarına daha yakın değerler vermiştir.

Çözüm algoritmasının üçüncü denemesinde elde edilen moment değerleri ile cismin hareketi arasında bir faz farkı olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu faz farkının oluşup oluşmadığının kontrolü için cismin hareketi ve ikinci denemede elde edilen moment değerleri Şekil 12'de karşılaştırılmıştır.

Şekil 12'den görüldüğü üzere yalpa hareketi ile elde edilen moment değerleri arasında ϵ 'luk bir faz farkı elde edilmiştir. Şekil 12'de cismin hareketine ilişkin grafik moment değerleri ile daha iyi karşılaştırılabilmesi için 40 ile çarpılmıştır.



Şekil 11. İPH yöntemi ile elde edilmiş sonuçların sayısal ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılması.



Şekil 12. Cismin hareketi ve moment değerleri arasındaki faz farkının karşılaştırılması.

Çözüm algoritmasına ilişkin dördüncü denemede, değişik açısal frekans ve yalpa genliklerinde elde edilen ek su kütlesi ve sönüm katsayılarının, literatürdeki deneysel ve sayısal yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 13-16'da yapılmıştır. Şekil 13-16'da elde edilen sonuçlar için Şekil 8 için kullanılmış olan parametrelerde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ek su kütlesi ve sönüm katsayılarının tespiti için (23)'den elde edilen moment değerleri ek su kütlesi için (26), sönüm katsayısı için (27)'nin içerisinde yerine konulmuştur.

$$a_{66}(t_0) = \frac{1}{\pi \varphi_a \omega} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} M(t) \sin(\omega t) dt \quad (26)$$

$$b_{66}(t_0) = \frac{1}{\pi \varphi_a} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} M(t) \cos(\omega t) dt \quad (27)$$

(26) ve (27) numaralı denklemlerden elde edilen değerler, (28) ve (29) kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

$$\overline{a_{66}} = \frac{a_{66}}{4\rho\nabla b^2} \quad (28)$$

$$\overline{b_{66}} = \frac{b_{66}}{4\rho\nabla b^2} \quad (29)$$

(26)-(29)'de kullanılmış olan a_{66} , $\overline{a_{66}}$, b_{66} , $\overline{b_{66}}$, ∇ terimleri sırasıyla ek su kütlesi katsayısı, boyutsuz ek su kütlesi katsayısı, sönüm katsayısı, boyutsuz sönüm katsayısı ve deplasmanı ifade etmektedir. Ek su kütlesi ve sönüm katsayısına ilişkin karşılaştırmalar Şekil 13 – Şekil 16'da görülmektedir. Yalpa hareketindeki Reynolds sayısı, (30) ile ifade edilmektedir.

$$Re = \frac{4\varphi_a \omega b^2}{\nu} \quad (30)$$

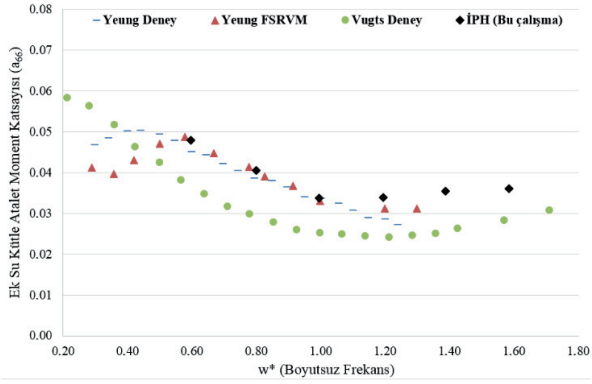
(30) denkleminde, b cismin yarı genişliğini ve ν kinematik viskoziteyi ifade etmektedir. Ek su kütlesi ve sönüm katsayısının tespiti için yapılmış olan 12 farklı analizde Reynolds sayısı 150.01 ile 800.54 arasında değişmiştir.

Şekil 13-16'dan da görüldüğü üzere çalışmada öngörölmüş olan algoritma ile tespit edilen ek su kütlesi ve sönüm katsayıları, FSRVM sayısal yöntemine göre Vugts (1968) ve Yeung ve diğerleri (1998) tarafından yapılmış deneysel çalışmalara daha yakın sonuçlar vermektedir.

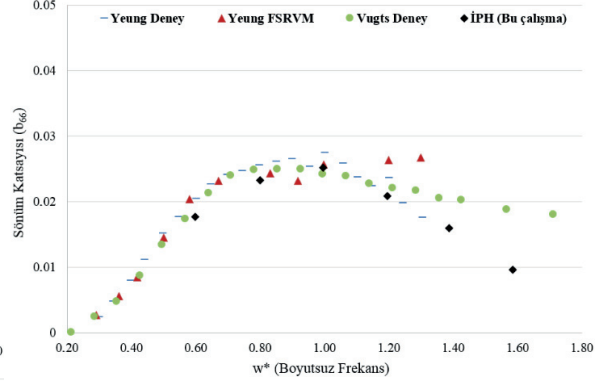
Çözüm algoritması ile yapılan beşinci ve son deneme kapsamında cismin hareketi nedeni ile serbest su yüzeyinde oluşan dalgalar incelenmiştir. Serbest su yüzeyinde yalpa hareketi yapan cisimle aynı frekansa sahip yüzey dalgası beklenmektedir. Dalgaların frekansı bilindiğinden, (31)'de verilmiş olan derin su kabulü yapılarak oluşan dalgaların dalga boylarına bakılmıştır.

$$\frac{1}{2} \leq \frac{d_w}{\lambda} \quad (31)$$

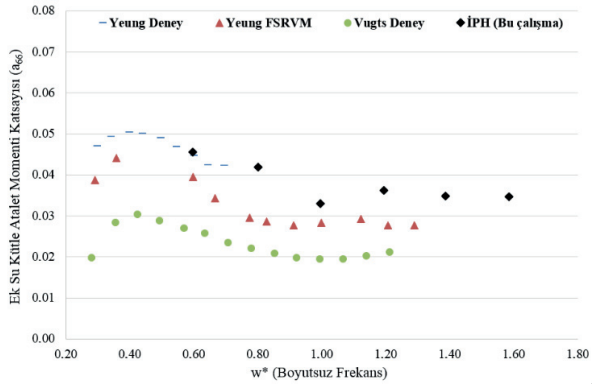
(31)'da λ dalga boyunu, d_w ise su derinliğini ifade etmektedir. Oluşan dalgaların doğrulanması amacıyla farklı boyuttaki iki cisim, değişik frekanslarda ve yalpa genliklerinde harekete tabi tutulmuştur. Elde edilen dalgalar ve dalga boyları Şekil 17 ve 18'de gösterilmektedir. Ayrıca bu denemeler esnasında dik ve yatay havuz sınırları uygulanmıştır. Bu sayede eğik sınır için uygulanmakta olan PPA algoritmasının da (3. Bölüm'de belirtilmiş olan) denemesi yapılmıştır.



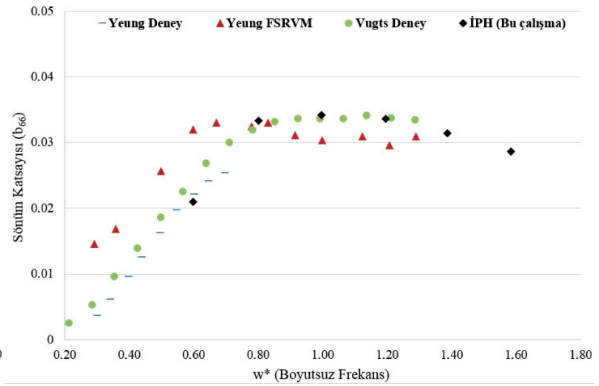
Şekil 13. $\varphi_a = 0.1$ radyan için ek su kütlesi katsayısı.



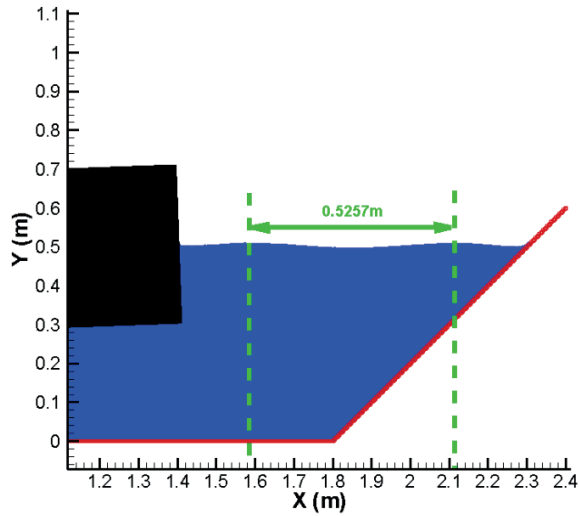
Şekil 14. $\varphi_a = 0.1$ radyan için sönüm katsayısı.



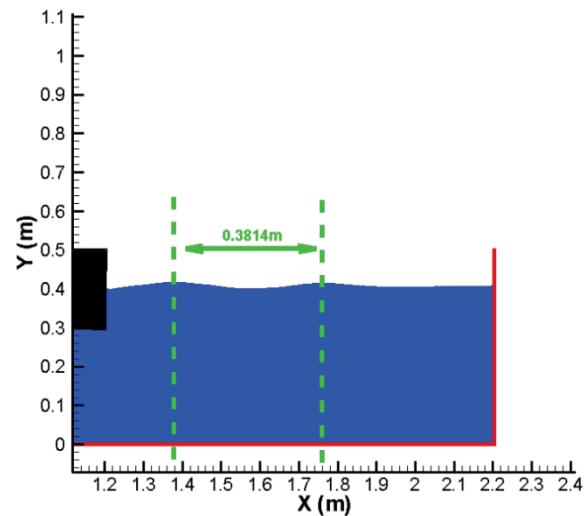
Şekil 15. $\varphi_a = 0.2$ radyan için ek su kütlesi katsayısı.



Şekil 16. $\varphi_a = 0.2$ radyan için sönüm katsayısı.



Şekil 17. $\varphi_a = 0.1$ radyan $T = 0.573$ sn'lik yalpa hareketinde oluşan dalgalar.



Şekil 18. $\varphi_a = 0.2$ radyan $T = 0.49$ sn'lik yalpa hareketinde oluşan dalgalar.

Şekil 17'de yapılmış olan analizde siyah parçacıklar cisimi, 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 periyodunun 0.573 s ve yalpa genliğinin 0.1radyan 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 (32) ile hesaplandığında, yaklaşık 0.5129 m olması beklenmektedir. Şekil 17'den görüldüğü üzere elde edilen dalga uzunluğu 0.5257 m olup geliştirilen sayısal çözüm şemasının oluşan dalgaları modellemekte başarılı olduğu değerlendirilmiştir.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (32)$$

Yine aynı deneme kapsamında farklı boyuttaki bir cisme değişik bir frekansta yalpa hareketi yaptırılarak oluşan dalgalar Şekil 18'de gözlemlenmiştir. 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 periyodunun 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 (31) kullanıldığında 0.3751 m olarak hesaplanırken, simulasyon sonucunda elde edilen dalga boyu ise 0.3814 m olarak bulunmaktadır. Havuz yan duvarlarının dik kullanıldığı geometri için sönüm bölgesinin (3. bölümde bahsedilmiş olan) işlevini ne kadar iyi bir şekilde gerçekleştirdiği de göz ardı edilmemelidir.

Yüzey dalga boyları için yapılan denemelerde elde edilen sonuçların herhangi parametrenin değişiminden etkilenmediğinin ispatı için analizlere ait açılal frekans, sınır şartları, cisim boyutları, yalpa genlikleri, dt gibi birçok parametre değiştirilmiştir. Kullanılan değişik parametrelere rağmen beşinci deneme kapsamında gözlemlenen yüzey dalgalarında da başarılı sonuçlar alınmıştır. Su yüzeyinde oluşan dalgaların (31)'e göre bağıl hatası eğik sınırlı havuz için 0.025, dik sınırlı havuz içinse 0.016'dır.

6. Sonuçlar ve değerlendirme

Bu çalışmada, Özbulut (2013a,b) tarafından geliştirmiş olan Birleşik Serbest Su Yüzeyi Suni Parçacık Ötelemesi çözüm algoritması, Colagrossi ve diğerleri (2012) tarafından geliştirilmiş olan PPA algoritması, dalga sönüm algoritması gibi sayısal algoritmaları içeren bir İPH algoritması oluşturulmuş ve serbest su yüzeyindeki zorlanmış yalpa problemine uygulanmıştır. Oluşturulmuş olan algoritma farklı doğrulama ve duyarlılık analizleri ile denemelere tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen bütün denemelere tatmin edici doğruluklarla cevap veren algoritma, literatürde bulunan deneysel veriler baz alındığında literatürdeki diğer bir sayısal yöntem olan FSRVM'ye göre daha yakınsak sonuçlar vermiştir.

Geliştirilmiş olan algoritmanın en büyük dezavantajının 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. 4. 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.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarla ilgili olarak bahsedilmesi gerekli ilk husus bilgisayar programının paralelleştirilmesidir. Paralleleştirmenin sağlanması ile geliştirilen bilgisayar programın çok daha hızlı sonuçlar vermesi hedeflenmektedir. Daha sonrasında ise geliştirilmiş olan programın içerisine yeni modüller eklemek suretiyle diğer gemi hareketlerinin çözümünde kullanılan katsayıların tespiti hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın ortaya çıkması sürecinde verdikleri geri beslemeler ve yapıcı eleştirilerinden ötürü Prof. Dr. Kadir Sarıöz'e (İTÜ) ve Dr. Tufan Arslan'a (NTNU) teşekkür ederiz. Ayrıca Savunma Sanayii Müsteşarlığı'na bu çalışmaya yönelik destekleri için teşekkür ederiz.

Referanslar

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

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

Colagrossi, A. ve Bouscasse, B. ve Antuono, M. ve Marrone, S. 2012. Particle Packing Algorithm for SPH Schemes. *Computer Physics Communications*, 183: 1641-1653.

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.

Falzarano, J. ve Somayajula, A. ve Seah, R. 2015. An Overview of The Prediction Methods for Roll Damping of Ships. *Ocean System Engineering*, 5, (2), 55-76.

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

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.

Jaouen, F. ve 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.

Ikeda, Y. ve Himeno, Y. ve Tanaka, N. 1978. On Eddy Making Component of Roll Damping Force on Naked Hull. (00403) Osaka. University of Osaka Prefecture.

Monaghan, J. J. 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110: 399-406.

Monaghan, J. J. ve Kos, A. 1999. Solitary waves on a Cretan beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 125(3):145-54.

Ölmez, O. 2008. Numerical analysis of heat conduction and potential flow problems over a sphere and a 3-dimensional prolate spheroidal body, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

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

Özbulut M., Goren O., ve Yildiz M. 2013b, "İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Yönteminde Sayısal Düzeltme Algoritmalarının Baraj Yıkılması Problemi Üzerinde İncelenmesi", *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, Sayı: 196, 36-46.

Özbulut, M. ve 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.

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

Shadloo, M. S. ve Zainali, A. ve 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.

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.

Yang, C. (1998). Robust Rudder Roll Damping Control. Dalian Üniversitesi/Aalborg Üniversitesi, Dalian, Doktora Tezi.

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. and 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. İstanbul. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Gemi Mühendisliği Yayınları.