

DÜZENLİ DALGALAR ÜRETEBİR SAYISAL DALGA TANKININ SPH YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

*Murat ÖZBULUT**

Alınma: 07.01.2019 ; düzeltme: 22.07.2019 ; kabul: 02.08.2019

Öz: Dalga üretici tanklar tarafından üretilen dalga sistemlerine, açık deniz yapıları (petrol çıkarma ve sismik araştırma platformlarının tasarımı) üzerine gelen yüklerin belirlenmesi, kıyı mühendisliği uygulamaları (liman tasarımı ve kıyı dalgalarının incelenmesi), gemi hareketlerinin analizleri ve yeni nesil dalga enerjisi çevirici sistemlerin tasarlanması gibi pek çok mühendislik alanında ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanlarla sınırlı olmamakla birlikte örnek olarak sözü edilen mühendislik problemlerinin sayısal analizlerini gerçekleştirebilecek kararlı ve gerçekçi bir sayısal hesaplama algoritması oluşturulması bu çalışmanın temel hedefidir. Böylece tasarım aşamasında ihtiyaç duyulan problem parametrelerinin hesaplamalı olarak elde edebilmesi ve gelecek araştırma-geliştirme çalışmalarına girdi sağlayacak bir altyapı oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, belirtilen mühendislik problemlerinin çözümüne özgün bir katkı sunmak için parçacık temelli, hareketin Lagrange denklemleri aracılığıyla tanımlanmasına dayanan ve ağdan bağımsız bir yöntem olan İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) olarak Türkçe'ye çevirebileceğimiz sayısal yaklaşım ile çözümler yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar birim dalga boyuna düşen toplam dalga enerjisi ve beklenen teorik dalga karakteristikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar ışığında, simülasyon sonuçlarının teorik verilerle yüksek doğruluk ve hassasiyette uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sayısal Dalga Üretici Tanklar, Dalga Enerjisi, Düzenli Dalga, Serbest Su Yüzeyi Hidrodinamiği, Parçacık Yöntemleri, SPH

Modeling of a Numerical Regular Wave Generator Tank by SPH Method

Abstract: Wave systems produced by wave generator tanks is required in many engineering fields such as offshore structures (design of oil extraction and seismic research platforms), coastal engineering applications (port design and analysis of coastal waves), analysis of ship movements and design of next generation wave energy converter systems. Establishing a stable and realistic numerical algorithm that can perform numerical analysis of the engineering problems mentioned but not limited to these fields is the main theme of this study. Therefore the problem parameters required in the design phase can be obtained by computational methods and an input data will be provided for the future research-development studies. In this work, particle-based, Lagrangian and mesh-free, namely, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method is used to provide a novel contribution to the solution of specified engineering problems. The obtained numerical results were compared with the theoretical total wave energy per unit wavelength and the expected theoretical wave profiles. In the light of these comparisons, it has been observed that the accuracy and precision of the simulation results are highly compatible with the theoretical data.

* Dr. Murat ÖZBULUT Piri Reis Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü 34940 Tuzla-İstanbul. e-posta: mozbulut@pirireis.edu.tr

Keywords: Numerical Wave Generator Tanks, Wave Energy, Regular Waves, Free Surface Hydrodynamics, Particle Methods, SPH

1. GİRİŞ

Yerçekimi dalgaları etkisinde yüzen bir cisme etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin ve cismin bu ortamdaki hareketlerinin belirlenmesi problemlerinin çözümü, serbest su yüzeyi hidrodinamiği alanında çalışan bilim insanlarının yoğun olarak çalıştıkları bir alandır. Dalga mekaniği üzerine yapılan ileri düzeydeki araştırmalara, gemi inşaatı ve deniz bilimleri, kıyı mühendisliği, liman işletmeleri ve yeni nesil dalga enerjisi üretici sistemlerin tasarımı gibi günümüz mühendislik uygulamalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar problemin belli kabuller altında matematiksel olarak modellenmesi ve deneysel ölçümlerle doğrulama çalışmaları yapılmasına dayanmaktadır (Froud, 1861, Krylov, 1896, Lewis, 1929, Havelock, 1942). St. Denis ve Pierson (1953) ise gerçek (düzensiz) dalgalarda gemi hareketlerini inceleyebilmek için mevcut bir dalga spektrumunu birçok düzenli dalganın toplamı olarak kabul edip, her bir düzenli dalgadaki gemi hareketinin hesaplanması ve toplanması ile bu dalga spektrumu içindeki gemi hareketlerinin ifade edilebileceğini önermiştir. Bu kabul ile analitik çözümlerin öne biraz daha açılmış ve düzensiz dalgalarındaki hareketler istatistikî modellerle incelenmeye başlanmıştır. Bu modellere örnek olarak, serbest su yüzeyinde salınım yapan cisimleri potansiyel çok kutuplu teklik (multi-pole expansion) yöntemiyle inceleyen Ursell (1949), bu yöntemi gemiler için genelleştiren Tasai (1959), serbest su yüzeyinde iki boyutlu sabit hızla giden bir geminin hidrodinamik katsayıları ve dış kuvvetlerini iki boyutlu gemi kesitlerinden elde eden Salvesen vd. (1970) çalışmaları verilebilir. Daha sonra panel yönteminin ortaya konulmasıyla (Faltinsen ve Michelsen, 1974) birlikte problem üç boyutlu olarak da ele alınmaya başlanmıştır.

Gelişen bilgisayar teknolojisi ve deneysel imkanların artmasıyla birlikte gemi hareketleri üzerindeki araştırmalar daha gerçekçi ve doğru sonuçlar elde edebilmek için günümüzde de devam etmektedir. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS), Euler denklemlerini kullanan birleşik akışkanın hacmi (Volume of Fluid) ve seviye belirleme (VOF-LS) yöntemleri gibi birçok farklı sayısal çözüm yöntemi halen geliştirilmektedir (Wilson vd., 2007). Aynı zamanda parçacık imge hızı (Particle Image Velocimetry, PIV) ve serbest su yüzeyi görüntüleme gibi teknolojileri kullanarak gemi baş dalgası ve gemi üzerinde yarattığı direnç ve hareketler deneysel olarak çalışılmaktadır (Dong vd.,1997).

Dalga dinamiği ve sıvı katı etkileşim problemlerinin teorik/analitik yöntemlerle incelenmesi genellikle lineer veya zayıf olarak nonlineer kabulleri altında çözümlenebilmesi nedeniyle örneğin dalga kırılması olayındaki veya şiddetli serbest su yüzeyi akışlarındaki lineer olmayan etkilerin arkasındaki kompleks fiziğin anlaşılması mümkün olamamaktadır (Westphalen vd. 2012). Deneysel çalışmalar bu tarz problemlerin doğasını en gerçekçi şekilde yakalamakla birlikte yüksek yatırım ve bakım-onarım maliyetleri, yüksek kaliteli insan gücü gereksinimi ve deney sürelerinin bazı durumlarda çok uzun sürmesi gibi sebeplerden ötürü ekonomik olarak oldukça pahalıdır. Ayrıca LDV veya PIV ölçüm aletleri ile dalga kırılması ve kırılma sonrası serbest yüzeye hava girişi olması gibi durumlarda serbest yüzey civarındaki hız alanları sağlıklı bir şekilde ölçülemez (Padova vd. 2014, Gotoh vd. 2005). Dolayısıyla, dalga mekaniği literatüründe halen birçok yeni deneysel (Pascal vd. 2012, Ueno vd. 2013, Siegel vd. 2012), sayısal (Babarit vd. 2012, Siegel vd. 2011, Bai ve Taylor, 2007) ve hatta olasılıksal yaklaşımlarla (Izadparast ve Niedzwecki, 2011) olası toplam dalga enerjisi, yüzen cisimler üzerindeki dalga yükleri veya bu cisimlerin hareketleri yoğun bir şekilde araştırılmaktadır.

Analitik çözümlerin kısıtları, deneysel çalışmalarda maliyetler ve hassas ölçüm almada yaşanan sorunlar, serbest su yüzeyinin yüksek deformasyonlara uğradığı, sıvı-katı etkileşimli ve tam olarak veya kısmi olarak batmış cisimler etrafındaki akış problemlerinin çözümünde, sayısal olarak daha kararlı ve hesaplama süreleri maliyetleri açısından daha verimli çözümlerin elde edilmesi amacıyla yapılan araştırmaların sayısında ciddi bir artışa yol açmıştır. Gelişen

bilgisayar teknolojisinin de büyük etkisiyle birlikte Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemlerine dayanan Sayısal Dalga Tankları (Numerical Wave Tanks) ile gerçek deniz koşullarının bilgisayar ortamında modellenmesi çalışmaları da devam etmektedir. Günümüzde bu gibi akışkanlar dinamiği mühendislik problemlerinin çözümünde uygulanan sayısal yöntemler ise genellikle problem bölgesi içinde bir ağ sistemi (grid/mesh) oluşturmakta ve bu ağ sistemlerindeki düğüm noktalarının (node) her bir adımda belli kurallara bağlı olarak güncellenmesi ile çözüme ulaşmaktadırlar. Bu tip yöntemlere genel olarak “Ağ Temelli Yöntemler (Grid/Mesh Based Methods)” adı verilmekte olup birçok problem için oldukça güvenilir ve yaygın olarak kabul görmüş, doğru ve hassas çözümler üretebilmektedirler.

Dalga dinamiği problemlerinin sayısal algoritmalar ile çözümünü konu alan ilk çalışmalar genellikle MAC (Marker and Cell), (Sakai vd. 1986), VOF (Volume of Fluid) (Lin ve Liu, 1998, Kawasaki, 1999) ve CIP (Constrained Interpolation Profile) (Watanabe ve Saeki, 1999) gibi ara yüzey yakalamayı esas alan ağ-temelli çalışmalardır. Bu yöntemlerden VOF yaklaşımının literatürde çok büyük bir ilgi uyandırmıştır ve halen birçok farklı sayısal model ile hibrit bir şekilde kullanılmaktadır (Kleefsman vd. 2005, Liang vd. 2010). Bu yöntemlerin dışında sonlu hacimler (Li ve Lin, 2012, Dutykh vd. 2011, Finnegan ve Goggins, 2012), hibrit sonlu hacimler - sonlu farklar (Yin vd. 2015), sonlu elemanlar (Wang ve Wu, 2006), sınır eleman (Sun ve Faltinsen, 2006) ve yüksek dereceden sınır eleman (Ning vd. 2015) yöntemleri gibi pekçok farklı ağ-temelli sayısal yöntem dalga dinamiği problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Literatürde bulunan diğer çalışmalar ile ilgili olarak daha fazla bilgi için Finnegan ve Goggins (2015) çalışmasına bakılabilir.

Bu noktada sayısal denge tankları çeşitlerinden ve bu çalışmada modellemede kullanılan dalga yapıcı sistemden kısaca bahsetmek sayısal modellemede karşılaşılabilecek sorunları irdeleyebilmek açısından yerinde olacaktır. Sayısal modellemeye dayanan dalga yapıcı sistemler genel olarak dahili (internal), statik sınır ve hareketli sınır olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır (Higuera vd. 2015). Dahili dalga sistemleri, kanal içerisinde belli bir iç bölge belirleyerek bu bölgeden kanalın her iki tarafına doğru sıvı pompalayarak sayısal olarak dalga üretmektedirler. Üretilen dalgalar kanal sonlarında belirlenen bölgelerde yine sayısal bir sönmülendirici algoritma aracılığıyla sönmülendirilirler. Statik sınır tipi dalga yapıcılar ise çeşitli dalga teorilerine göre kanalın giriş tarafından sayısal olarak dalga üretip çıkış tarafında belirli bir bölge içerisinde (sünger bölgeleri, sponge layer) bu dalgaları sönmülendirir. Üçüncü tip dalga yapıcı sistem ise hareketli sınır tipi üreticiler olup, kanalın giriş bölgesinde kanat (flap) veya piston tipi bir mekanizmanın istenen dalga karakteristiklerine göre hareket ettirilmesi ile dalga üreten sistemlerdir. Üretilen dalgalar kanal sonunda oluşturulan bir sahil ile sığ su etkisi yaratılarak sönmülendirilmektedir. Bu tipteki sayısal modeller, gerçek bir deney tankında üretilen dalga serilerini ekstradan herhangi bir sayısal model kullanmaksızın sönmülendirerek deneysel ortamı birebir olarak temsil etmeyi hedeflemektedir.

Bu çalışmada düzenli dalga spektrumlarını üretebilecek kanat tipi hareketli sınırlara sahip sayısal bir dalga üretici sistem SPH yöntemi ile geliştirilmiştir. Kanal girişindeki hareketli sınır koşullarını ağ-temelli sayısal yöntemlerle ele almak oldukça zorlayıcı hesaplamaları beraberinde getirmektedir. Bu bölgede dalga frekansına bağlı olarak oluşabilecek yüksek serbest yüzey deformasyonlarını yakalayabilmek için çoğunlukla ağ sisteminin karmaşık algoritmalar ile yenilenmesi zorunluluğu (re-meshing) bulunmaktadır. Serbest su yüzeyli akış problemlerinin modellenmesinde konvansiyonel ağ temelli yöntemlerde yaşanan bu zorluğun aşılabilmesine katkı sunabilmek için parçacık metotları üzerine özellikle son yıllarda yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmanın da temel amacı bu alandaki araştırma-geliştirme faaliyetlerine katkıda bulunmaktır. Bu amaç doğrultusunda çalışmada gerçekleştirilen sayısal hesaplamalarda SPH yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin parçacık temelli doğası gereği akışkan hareketi Lagrange yaklaşımı ile tanımlanmaktadır ve böylece maddesel türev ifadesindeki doğrusal olmayan konvektif türev terimleri ortadan kalkmaktadır. Ağ temelli sayısal çözümlere nazaran oldukça

sadeleşmiş bir hale dönüşen hareket denklemleri çözebilmenin getirdiği avantaj ile sözü edilen serbest su yüzeyindeki yüksek deformasyonlar kolaylıkla modellenebilmektedir.

SPH yöntemi, 90'lı yılların ortalarından itibaren (Monaghan, 1994) serbest su yüzeyli akış problemlerinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Yöntem, akışkanın fiziksel davranışını problem alanı içerisine dağıtılmış olan parçacıkların konumuyla orantılı olarak değişen bir ağırlık fonksiyonu kullanarak yapılan bir interpolasyon üzerinden tanımlanmaktadır. Her bir parçacığın fiziksel özellikleri (yoğunluk, basınç, hız ..vb), her zaman adımında güncellenmekte ve böylece her bir parçacığın fiziksel özelliklerinin zamana göre değişimi anlık olarak takip edilebilmektedir. Bu özellik de; hem türev ifadelerinin daha kolay hesaplanmasıyla matematiksel, hem de çözüm sırasında serbest yüzey gibi belirlenmesi zor olan problem bölgelerinin kendiliğinden oluşturulmasıyla fiziksel modelleme açısından büyük avantajları beraberinde getirmektedir. Yönteme dair tüm matematiksel yaklaşımlar ve ayrıklaştırmada kullanılan formülasyonlar ikinci bölümde detaylı bir şekilde verilmektedir. Çalışmanın üçüncü bölümünde incelenen sayısal dalga üretici sistemin geometrisi, problemin fiziksel arka planı ve elde edilen sayısal sonuçların teorik olarak beklenen toplam enerji değişimi ve dalga karakteristikleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirmesi sunulmaktadır. Son bölümde ise elde edilen mevcut sayısal sonuçlar ışığında çalışmanın ileri fazlarında yapılması planlanan araştırmalar özetlenecektir.

2. MATEMATİKSEL MODELLEME

2.1. Akışkan Hareketini Temsil Eden Denklemler

Serbest su yüzeyli hidrodinamik problemlerinde akışkan hareketini düzenleyen denklem takımı, aşağıda sırasıyla verildiği gibi süreklilik denklemi ve Navier-Stokes denklemlerinden oluşmaktadır:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{u} \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{-1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \quad (2)$$

Akışkan parçacıklarının yer değiştirmesi ise aşağıdaki denklem ile sağlanmaktadır:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{u} \quad (3)$$

Bu denklemlerde \vec{u} hız vektörü, p basınç, ν kinematik viskozite, ρ yoğunluk, \vec{r} parçacık konumları ve \vec{g} yer çekimi ivmesi olarak verilmektedir. Basınç terimi SPH yönteminde tam sıkıştırılamaz (Cummins ve Rudman, 1999) ve zayıf olarak sıkıştırılabilir (Monaghan, 1994) akışkan olarak adlandırılan iki farklı yaklaşım ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, hem zaman integralindeki açık (explicit) yapısının programlama açısından getirdiği kolaylıklar hem de özellikle serbest yüzey civarındaki basınç değerlerinin daha hassas ve doğru bir şekilde hesaplanabilmesinin getirdiği avantajlar nedeniyle zayıf olarak sıkıştırılabilir (weakly compressible) SPH yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre basınç sıkıştırılabilir akışkanlar mekaniğinde kullanılan izantropik hal denklemlerinden biri ile hesaplanırken, akışkan parçacıklarının yoğunluk değerlerinin en fazla %1 mertebesinde salınmasına izin verilmektedir. Navier-Stokes hareket denklemlerinde (2) basınç değerleri aşağıdaki hal denklemi ile hesaplanmıştır (Batchelor, 1974):

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (4)$$

Bu denklemde c_0 referans ses hızı [m/s], ρ_0 referans su yoğunluğu 1000 [kg/m³], γ ise 7 olarak alınan bir sabittir. c_0 referans ses hızının, parçacıkların yoğunluk değişimlerinin referans yoğunluğa göre en fazla $\pm\%1$ aralığında tutabilecek kadar büyük seçilmesi gerekmektedir. Bu koşulun sağlanması da Mach (M) sayısının 0.1'den daha küçük olması yani referans ses hızı değerinin sistemdeki maksimum parçacık hızının 10 katından büyük seçilmesi ile mümkün olabilmektedir (Monaghan, 1999). Bu çalışmada çok sayıda farklı karakteristiklerde dalga sistemi simülasyonları gerçekleştirildiği için tüm test durumlarında tutarlılığı sağlamak açısından c_0 referans ses hızı, dalga yaratıcı sistem tarafından oluşturulan dalga hızının 40 katı olacak şekilde belirlenmiştir.

2.2. SPH Yaklaşımı ve Hareket Denklemlerinin Ayrıklaştırılması

SPH yöntemi temel olarak bir interpolasyon işlemine dayanmaktadır. Bu yaklaşıma göre herhangi bir alan fonksiyonu, tanımlı bölge içerisine düzensiz olarak dağıtılmış parçacıklara (veya noktalara) ait fonksiyon değerlerinin bir ağırlık fonksiyonu aracılığıyla ortalamasının alınmasıyla ifade edilir. Ağırlık fonksiyonu $W(\vec{r}_{ij}, h)$ ise h interpolasyon uzunluğu (smoothing length) değeri sıfıra giderken Delta Dirac (δ) fonksiyonuna eşdeğer olan bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Matematiksel olarak herhangi sürekli bir $A(\vec{r}_i)$ fonksiyonu (skaler, vektörel veya tansörel olabilir) aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$A(\vec{r}_i) = \int_{\Omega} A(\vec{r}_j) \delta(\vec{r}_j - \vec{r}_i) d^3 \vec{r}_{ij} \quad (5)$$

$$\int_{\Omega} \delta(\vec{r}_j - \vec{r}_i) d^3 \vec{r}_{ij} = \begin{cases} 1, \vec{r}_j = \vec{r}_i \\ 0, \vec{r}_j \neq \vec{r}_i \end{cases} \quad (6)$$

Bu denklemlerde $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_j - \vec{r}_i$ parçacıklar arasındaki uzaklık vektörü, i ve j indisleri ise parçacık indislerini göstermektedir. i indisi ilgilenilen parçacığı j indisi ise bu parçacığın etkileşime girdiği parçacıkları temsil etmektedir. Delta Dirac eşitliğinden esinlenerek herhangi bir sürekli $A(\vec{r}_i)$ fonksiyonu SPH yönteminde aşağıdaki yaklaşım ile ifade edilir:

$$A_i \cong \langle A(\vec{r}_i) \rangle \equiv \int_{\Omega} A(\vec{r}_j) W(\vec{r}_{ij}, h) d^3 \vec{r}_{ij} \quad (7)$$

Braket $\langle \rangle$ işareti SPH yaklaşımını, $d^3 \vec{r}_{ij}$ ağırlık fonksiyonunun etki alanı içindeki sonsuz küçük hacim elemanını, Ω ise bu etki alanının tamamının hacmini belirtmektedir. A_i fonksiyonu ise bu çalışmada ele alınan problem için hız, yoğunluk, basınç veya viskozite gibi herhangi bir hidrodinamik büyüklüğü temsil etmektedir. SPH yönteminde herhangi bir fonksiyonun türevi ise ağırlık fonksiyonunun türevini alarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir:

$$\left\langle \frac{\partial A(\vec{r}_i)}{\partial x_i^k} \right\rangle \equiv - \int_{\Omega} A(\vec{r}_j) \frac{\partial W(\vec{r}_{ij}, h)}{\partial x_i^k} d^3 \vec{r}_{ij} \quad (8)$$

SPH yönteminde $W(\mathbf{r}_{ij}, h)$ ağırlık fonksiyonunun seçimi, parçacıkların etki alanlarının belirlenmesi ve sonuçların yakınsaklığı açısından büyük önem arz etmektedir. Literatürde çok sayıda ağırlık fonksiyonu örneği bulunmakla birlikte (Liu ve Liu, 2010), bu çalışmada hesaplama süresi maliyetinin görece yüksekliğine rağmen yüksek sayısal stabiliteye sahip ve daha doğru/hassas sonuçlar verebilmesi açısından aşağıda verilen 5. Dereceden (quintic) ağırlık fonksiyonu kullanılmıştır:

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} (3 - R)^5 - 6(2 - R)^5 + 15(1 - R)^5, 0 \leq R < 1 \\ (3 - R)^5 - 6(2 - R)^5, 1 \leq R < 2 \\ (3 - R)^5, 2 \leq R < 3 \\ 0, R \geq 3 \end{cases} \quad (9)$$

(9) denkleminde $R = |\vec{r}_{ij}|/h$, α_d ise problem boyutuna bağlı olarak değişen ve iki boyutlu problemler için $7/(478\pi h^2)$ olarak alınan bir katsayıdır.

SPH yönteminin temel yaklaşım prensipleri ışığında hareket denklemleri aşağıdaki şekilde ayrıklaştırılmıştır (Monaghan, 2005, Cleary ve Monaghan, 2003, Monaghan ve Kos, 1999):

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (\vec{u}_i - \vec{u}_j) \nabla_i \cdot W_{ij} \quad (10)$$

$$\frac{d\vec{u}_i}{dt} = - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \vec{g} \quad (11)$$

$$\Pi_{ij} = -\alpha \mu_{ij} \frac{c_i + c_j}{\rho_i + \rho_j}$$

$$\mu_{ij} = h \frac{(\vec{u}_i - \vec{u}_j) \cdot (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{\|\vec{r}_i - \vec{r}_j\|^2} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{8\nu}{hc_0}$$

burada parçacıkların lokal ses hızları ise $c_i = c_0(\rho_i/\rho_0)^{(\gamma-1)/2}$ formülü ile belirlenmektedir. Kinematik viskozite (ν) değeri ise su için 10^{-6} (m²/s) olarak alınmıştır. N ilgili parçacığın etki bölgesi içerisinde kalan komşu parçacık sayısını belirtmektedir. Parçacıkların kütleleri ise SPH yaklaşımından hareketle $m_i = \sum_{j=1}^N \rho_i W_{ij}$ her zaman adımında güncellenmektedir.

2.3. Sayısal Düzeltme Algoritmaları

Bu başlıkta SPH sayısal çözüm şemasının kararlılığı, hassasiyeti ve doğruluğunu arttırmak için algoritmaya eklenen düzeltme terimlerinden kısaca bahsedilecektir. Bu düzeltme terimleri sırasıyla ağırlık fonksiyonu türev düzeltmesi, yoğunluk düzeltmesi, serbest su yüzeyi düzeltmesi ve parçacık öteleme düzeltmesi olarak alt başlıklar halinde açıklanacaktır.

2.3.1. Ağırlık Fonksiyonu Türev Düzeltmesi

SPH yönteminde problem bölgesinde tanımlı bir fonksiyon interpolasyon temelli bir yaklaşım ile ikinci mertebe ($O(h^2)$) bir yakınsaklıkla temsil edilebilirken, fonksiyon türevlerinde aynı yakınsaklık mertebesini yakalayabilmek için türev operatörlerinde birtakım düzeltmelere ihtiyaç duyulmaktadır (Liu vd. 2014). Bu çalışmada (9) denklemi ile verilen ağırlık fonksiyonunun türevleri aşağıda verilmekte olan Taylor seri açılımı yardımıyla elde edilebilen yerel tersinir $L(\vec{r}_i)$ matrisi ile çarpılarak düzeltilmiştir:

$$\nabla^c W_{ij} = L(\vec{r}_i) \nabla_i W_{ij} \quad (13)$$

$$L(\vec{r}_i) = \left[\sum_j \begin{pmatrix} x_{ji} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} & y_{ji} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \\ x_{ji} \frac{\partial W_{ij}}{\partial y_i} & y_{ji} \frac{\partial W_{ij}}{\partial y_i} \end{pmatrix} V_j \right]^{-1} \quad (14)$$

SPH yaklaşımı ile ayrıklaştırılmış hareket denklemleri (10-11) ile verilen ağırlık fonksiyonu türev ifadelerinde, (13) denklemi ile oluşturulan düzeltilmiş ağırlık fonksiyonu türevleri kullanılmıştır. Burada V_j parçacıkların hacmini belirtmekte olup, $V_j = \sum_{j=1}^N 1W_{ij}$ formülü ile hesaplanmaktadır.

2.3.2. Yoğunluk Düzeltmesi

Zayıf olarak sıkıştırılabilir SPH yaklaşımında basınç değerleri (4) denklemi ile verilen hal denklemi ile yoğunluk değerlerinin elde edilmesiyle hesaplanmaktadır. Bu durum da yoğunluk değerlerinin oldukça hassas bir şekilde hesaplanmasını zorunlu kılmaktadır. Aksi takdirde akış alanında basınç değerlerinde yüksek salınımlar, gürültü ve nihayetinde oluşan sayısal kararsızlık ile çözümün elde edilememesi problemi ortaya çıkmaktadır (Özbulut vd. 2018). Bu sorunu bertaraf edebilmek için SPH literatüründe yoğunluk düzeltme algoritmaları sıklıkla kullanılmaktadır (Antuono vd. 2012, Meringolo vd. 2015). Bu çalışmada kullanılan yoğunluk düzeltmesi algoritması ise (10) denklemi ile elde edilen yoğunluk değerlerinin (ρ_i), komşu parçacıklar üzerinden bir ağırlıklı ortalama işlemine (smoothing) tabi tutulmasına dayanmaktadır:

$$\hat{\rho}_i = \rho_i - \frac{\sum_{j=1}^N (\rho_i - \rho_j) W_{ij}}{\sum_{j=1}^N W_{ij}} \quad (15)$$

Düzeltilmiş yoğunluk değerlerinin ($\hat{\rho}_i$), önce hal denkleminde (4) yerine konularak basınç değerleri daha sonra da Navier-Stokes (11) denklemlerinde yerine konulmasıyla parçacık ivmeleri hassas ve doğru bir şekilde hesaplanmaktadır.

2.3.3. Serbest Su Yüzeyi Düzeltmesi

Serbest su yüzeyindeki parçacıklarının aşırı saçılmalarının önüne geçerek birarada kalmalarına yardımcı olacak ve bir nevi serbest yüzey gerilimi olarak etkiyen sayısal bir düzeltme algoritması serbest su yüzeyi olarak tanımlanan parçacıklara uygulanmıştır. Bu tanıma göre her zaman adımında problem bölgesindeki akışkan parçacıkları içerisindeki maksimum komşu parçacığı sayısının %65'inden daha az sayıda komşu parçacığına sahip parçacıklar, serbest su yüzeyi parçacığı olarak işaretlenmektedir. Serbest su yüzeyli şiddetli akış problemlerinin ele alındığı önceki çalışmalarımızda (Özbulut vd. 2014 ve Özbulut vd. 2018), bu oranın akışkan hareketinden doğan deformasyonlara bağlı olarak yaklaşık olarak 1-2 sıra parçacığına denk geldiği ve daha düşük veya yüksek değerlerde serbest su yüzeyinin gerçekçi bir

şekilde temsil edilemediği tespit edilmiştir. Bu çalışmada da aynı yaklaşım ile serbest su yüzeyi sayısal olarak modellenmiştir. Kullanılan serbest su yüzeyi düzeltme algoritması aşağıda verilmektedir:

$$\delta \vec{u}_i = \frac{\sum_{j=1}^N (\vec{u}_i - \vec{u}_j) W_{ij}}{\sum_{j=1}^N W_{ij}}, \vec{a}_i = \vec{u}_i - \varepsilon \delta \vec{u}_i \quad (16)$$

Bu düzeltme yalnızca serbest su yüzeyi olarak tanımlanan parçacıklara uygulanmakta olup, \vec{a}_i düzeltilmiş parçacık hızlarını, ε ise yapılan incelemeler sonucunda başlangıç parçacıklar arası mesafenin (dx) 0,05-0,10 katı mertebesinde alınabileceği belirlenmiş olan bir sabittir. Bu çalışmadaki tüm simülasyonlarda ε katsayısı $0,075dx$ olarak alınmıştır.

2.3.4. Parçacık Ötelemesi Düzeltmesi

SPH yöntemi sürekli ortam içerisine dağıtılmış parçacıklar üzerinden gerçekleştirilen interpolasyon yaklaşımı temelinde dayandığı için sayısal stabilite ve yakınsaklığının artması için parçacıkların her zaman adımında olabildiğince homojen bir şekilde dağılmasına ihtiyaç duymaktadır. Akışkan akışı sırasında herhangi bir anda çözüm bölgesindeki parçacıklar homojen olmayan ve belirli bölgelerde kümelenmiş bir dağılıma sahip olursa, sayısal çözümün stabilitesi sürekli olarak kötüleşir ve birçok durumda herhangi bir sayısal çözüm elde edilemez. Parçacıkların bir akım hattını takip ederek kümeleşmelerini engellemek amacıyla Shadloo vd. (2011) kapalı bölgeler içerisindeki akış problemlerinde, her bir parçacığın konum vektörlerine ufak suni bir öteleme vermeyi önermişlerdir. Bu çalışmanın öncülü olan makalelerimizde (Özbulut vd. 2014, Özbulut vd. 2015, Özbulut vd. 2018) bu düzeltme algoritması baz alınmış, serbest su yüzeyli problemlerin modellenmesi için gereksinim duyulan güncelleştirmeler yapılmış ve pek çok zorlayıcı şiddetli akış problemlerinde başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmada da kullanılan parçacık ötelemesi düzeltme algoritması Δt zaman adımı [s] ve r_0 ortalama komşu parçacığı uzaklığı olmak üzere aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\begin{aligned} \delta \vec{r}_i &= \sum_{j=1}^N \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3} r_0^2 u_{cff} \Delta t \\ r_0 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_{ij} \\ u_{cff} &= |\delta \vec{u}_i| \end{aligned} \quad (17)$$

2.4. Zaman İntegrasyonu ve Sınır Koşulları

Bu çalışmada akışkan akışının zaman içerisindeki gelişimi tahmin-düzeltilme (predictor-corrector) ara adımı içeren Euler sayısal şeması kullanılmıştır. Serbest su yüzeyli problemlerin modellenmesinde kullanılan sayısal integrasyon şemalarının sonuçlar üzerindeki etkileri önceki çalışmamızda detaylı olarak karşılaştırılmıştır (Kolukısa vd. 2017). Sözü edilen çalışmamızda tek adımlı Euler, ara zaman adımlı Euler ve 4. mertebe Runge-Kutta zaman integrasyonu şemaları sistematik olarak karşılaştırılmış ve stabilite, doğruluk/hassasiyet ve hesap süreleri maliyetleri açısından değerlendirildiğinde, ara adımlı Euler sayısal şemasının en uygun çözüm olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan zaman integrasyonu şeması konum, yoğunluk ve hızların aşağıdaki denklem ile güncellenmesi şeklinde ilerleyen tahmin-düzeltilme ara adımı içeren Euler yöntemine dayanmaktadır:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{u}_i, \frac{d\rho_i}{dt} = k_i, \frac{d\vec{u}_i}{dt} = \vec{a}_i \quad (18)$$

Fiziksel değişkenlerin zaman içerisindeki değişimi, ara adımdaki parçacık hız, konum ve yoğunluklarının sırasıyla $\vec{u}_i^{(n+1/2)} = \vec{u}_i^{(n)} + 0.5\vec{a}_i^{(n)}\Delta t + \delta\vec{u}_i^{(n)}$, $\vec{r}_i^{(n+1/2)} = \vec{r}_i^{(n)} + 0.5\vec{u}_i^{(n+1/2)}\Delta t + \delta\vec{r}_i^{(n)}$ ve $\rho_i^{(n+1/2)} = \rho_i^{(n)} + 0.5k_i^{(n)}\Delta t$ denklemleri ile hesaplanması ile başlamaktadır. Ara adımda hesaplanan yeni yoğunlukların (15) denklemi ile düzeltilmesi ve basınç değerlerinin (4) denklemi ile hesaplanmasını müteakiben ara ivme değeri $\vec{a}_i^{(n+1/2)}$ (11) ve (12) denklem takımları aracılığıyla elde edilir. Ara zaman adımında bulunan ivme değeri yardımıyla bir sonraki zaman adımına ait hız vektörü, $\vec{u}_i^{(n+1)} = \vec{u}_i^{(n)} + \vec{a}_i^{(n+1/2)}\Delta t + \delta\vec{u}_i^{(n+1/2)}$ denklemi ile hesaplanır. Elde edilen hız vektörü değeri ile parçacıklar $\vec{r}_i^{(n+1)} = \vec{r}_i^{(n+1/2)} + 0.5\vec{u}_i^{(n+1/2)}\Delta t + \delta\vec{r}_i^{(n+1/2)}$ denklemi ile hareket ettirilerek zaman adımı sonlandırılmış olur. Zaman adımı (Δt) kriteri olarak Courant-Freidrichs-Lewy (CFL) koşulu aşağıdaki gibi alınmıştır (Özbulut vd. 2014):

$$\Delta t = CFL \frac{h}{c_0 + c_d} \quad (19)$$

Bu denklemde $CFL=0,4$ olarak alınmıştır. c_d oluşturulacak düzenli dalganın hızı olup, dalga boyunun dalga periyoduna bölünmesi ile elde edilmektedir.

Sayısal hesaplamalarda tank duvarları üzerinde kaymama (no-slip) sınır koşulu uygulanmıştır. Bu koşulu sağlayabilmek için tüm duvar sınırlarına 4 sıra halinde sabit parçacıklar yerleştirilmiştir. Özel olarak 4 sıra parçacık konulmasının sebebi kullanılan ağırlık fonksiyonunun etki alanının $3h$ uzunluğunda olması ve tüm simülasyonlarda interpolasyon uzunluğu h değerinin $1,33dx$ olarak alınmasıdır. Böylece sınıra yakın bir parçacığın etki alanının tamamında katı sınır parçacıkları ile etkileşime girebilmesi sağlanmaktadır.

3. PROBLEMİN TANIMLANMASI VE SAYISAL SONUÇLAR

Bu başlıkta öncelikle incelenen probleme ait tüm geometrik boyutlar ve dalga üretici sistemin kanat hareket denklemleri verilecektir. Daha sonra simülasyonlar sonucunda elde edilen dalga yükseklikleri zaman serileri ve bu zaman serilerinden FFT analizi ile elde edilen dalga frekansı ve dalga yükseklikleri analizleri grafik olarak verilecektir. Son olarak da elde edilen dalga yükseklikleri, dalga boyları ve birim boya düşen dalga enerjilerinin, teorik olarak beklenen değerler ile karşılaştırılması yapılacaktır.

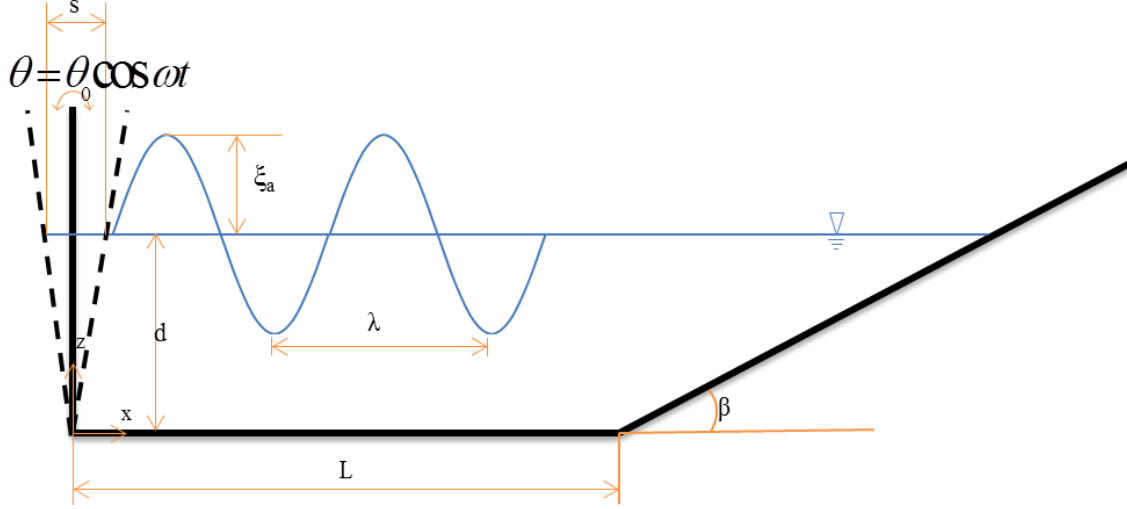
3.1 Problem Geometrisi ve Parametreleri

Şekil 1’de modellenmesi gerçekleştirilen dalga üretici sisteme ve oluşan dalga karakteristiklerine ait problem boyut parametreleri şematik olarak gösterilmektedir. Simülasyon sürelerini tüm test durumlarında sabit tutabilmek adına problem bölgesi, beklenen teorik dalga boyu (λ) ile ölçeklendirilmiştir. Derin su kabulünü sağlayabilmek adına tank başlangıç derinliği $d=\lambda$, kanat bölgesi ile sahil bölümü arasında yeterli sayıda dalga oluşturabilmek adına kanal yatay boyu $L=5\lambda$ ve başlangıç anı parçacıklar arası mesafe $dx=\lambda/100$ olarak alınmıştır. Doğrusal dalga teorisi sınırları içerisinde kalabilmek adına dalga dikliği oranı, ζ_a dalga genliğini göstermek üzere $\zeta_a/\lambda=1/20$ olarak belirlenmiştir. Üretilen dalgaları herhangi bir sayısal sönüm algoritması kullanmadan, fiziksel olarak sönümlendirmek adına tank sonuna eğim açısı $\beta=21,8^\circ$ olan bir sahil oluşturulmuştur.

Bu çalışmada incelenen dalga boyları $0,25, 0,50, 0,75$ ve $1,00$ [m] olarak alınmıştır. Tüm simülasyonlar en az 25 düzenli dalga oluşacak kadar süre ile gerçekleştirilmiştir. Dalga üretici kanatın genliği (s), oluşturulacak düzenli dalganın genliği ve tank boyutları arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilmektedir (Hyun, 1975):

$$s = \frac{\xi_a kd [\sinh(kd) \cosh(kd)]}{2[kd \sinh(kd) - \cosh(kd) + 1] \sinh(kd)}, \theta_0 = \tan^{-1} \frac{s}{d} \quad (20)$$

(20) denkleminde k dalga sayısı olup $k=2\pi/\lambda$ formülasyonu ile hesaplanmaktadır.



Şekil 1:

Dalga üretici sisteme ve oluşan düzenli dalgalara ait problem boyut parametrelerinin şematik gösterimi

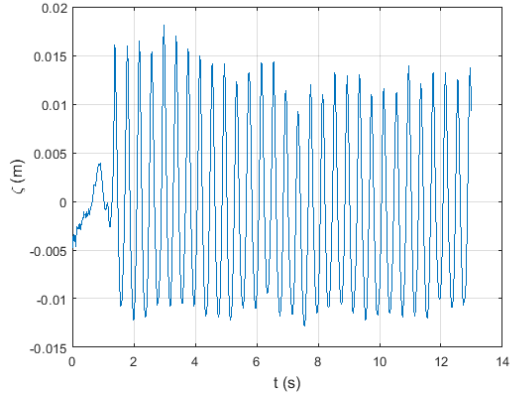
Dalga üretici kanadın başlangıç anında ani yükler oluşturmasını engellemek amacıyla hareket tedrici olarak başlatılmaktadır. Ani başlangıç yüklerini sönümlendiren ve kanat hareketini temsil eden denklem aşağıda verilmektedir:

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega t), \quad x = x_0 + z_0 \sin(\theta) \tanh(\omega t) \quad (21)$$

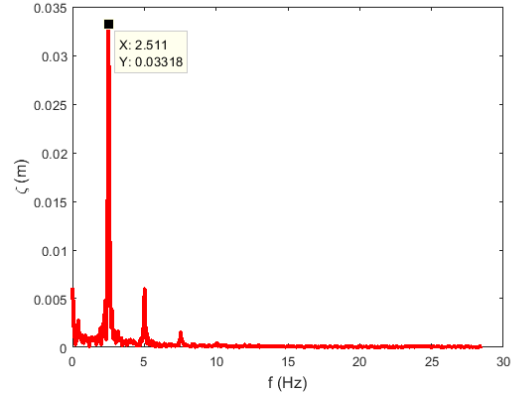
(21) denkleminde x_0 ve z_0 kanat üzerindeki parçacıkların başlangıç konumlarını göstermekte olup, kanat başlangıç açısı 90° 'dir. Çalışmada ele alınan düzenli dalgalarda maksimum açısal genlik (θ_0) değeri $3,5^\circ$ 'yi geçmediği için kanat parçacıklarının düşey konumları yaklaşık olarak aynı olarak alınmıştır.

3.2 Sayısal Sonuçlar

Bu çalışmada 2. bölümde tüm detayları ile açıklanan SPH çözüm şeması ile dört farklı dalga boyu ve dalga yüksekliklerinde düzenli dalga simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Dalga yükseklikleri zaman serileri kanat tipi dalga üretici sistemden iki dalga boyu uzaklıkta okunmuştur. Şekil 2-5'te dalga yükseklikleri zaman serileri ve bu zaman serilerine ait FFT analizleri verilmektedir. Ayrıca Tablo 1'de dört dalga boyu için teorik olarak beklenen dalga frekansları, minimum dalga genlikleri ve birim dalga boyuna düşen toplam enerji değerlerinin SPH çözümlerinden elde edilen değerlerle karşılaştırmaları verilmektedir. Tabloda derin su kabulü için teorik dalga frekansı değerleri $\omega_{\text{teorik}} = \sqrt{g/(2\pi\lambda)}$ ile hesaplanmıştır (Sabuncu, T. 1983). Birim dalga boyuna, birim alanda, birim zamanda düşen dalga enerjisi (dalga enerji yoğunluğu) ise $E = \frac{1}{8} \rho g H^2$ formülasyonu ile hesaplanmış olup, $H=2\xi_a$ beklenen minimum dalga yüksekliği değeri olarak alınmaktadır (Sabuncu, T. 1983).



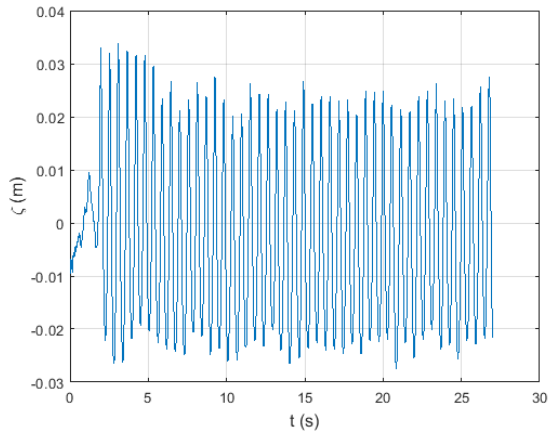
a.



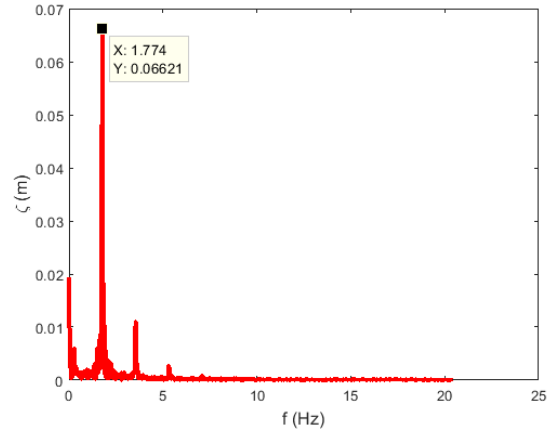
b.

Şekil 2:

0,25m dalga boyu durumunda oluşan a. zaman serisi b. FFT analizi grafikleri



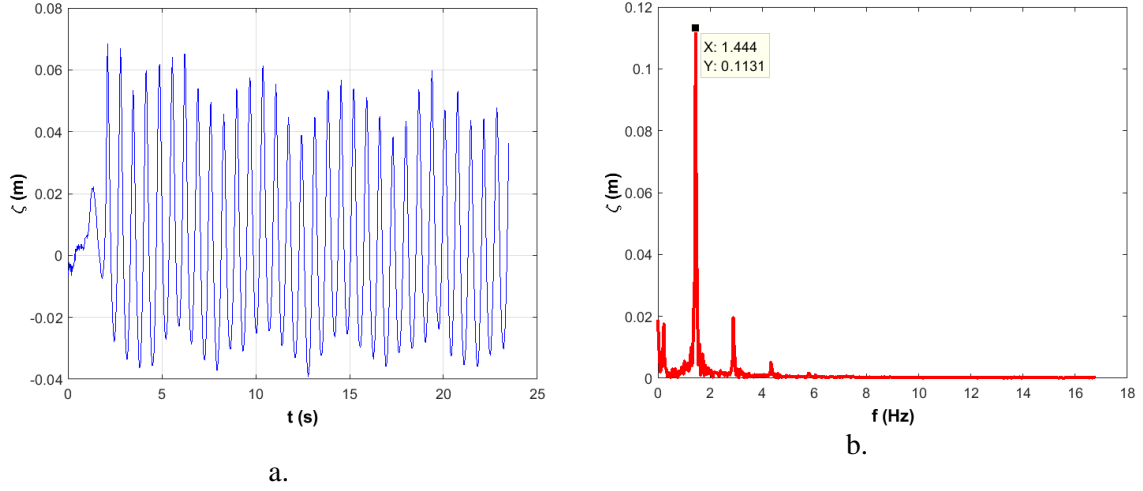
a.



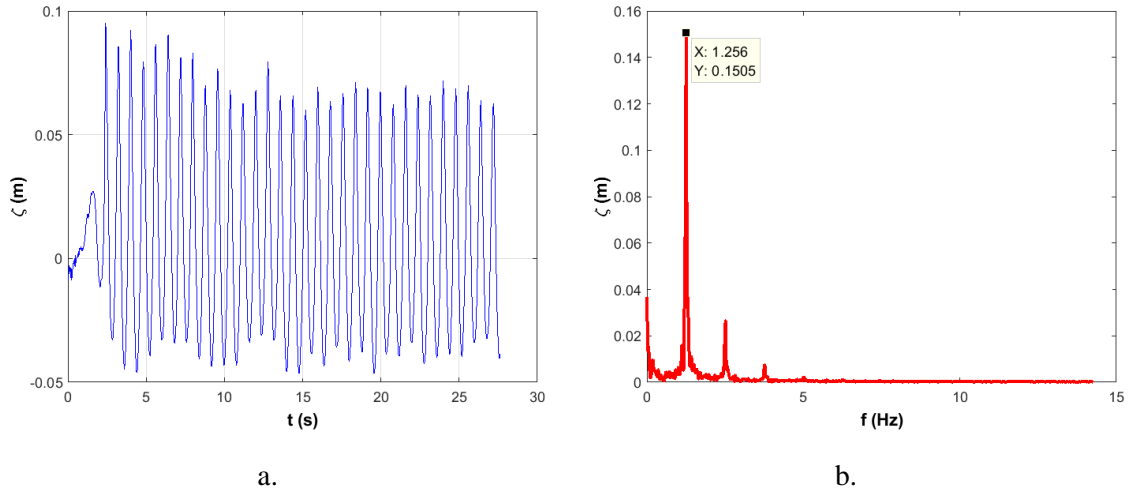
b.

Şekil 3:

0,50m dalga boyu durumunda oluşan a. zaman serisi b. FFT analizi grafikleri



Şekil 4:
0,75m dalga boyu durumunda oluşan **a.** zaman serisi **b.** FFT analizi grafikleri



Şekil 5:
1,00m dalga boyu durumunda oluşan **a.** zaman serisi **b.** FFT analizi grafikleri

Elde edilen grafiklere ve tablo değerlerine bakıldığında baskın frekans modunda beklenen dalga frekansları ile simülasyon sonucunda elde dalga frekanslarının en az %99,5 gibi çok yüksek bir doğruluk oranı ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 2-5'te verilmekte olan FFT analizlerinden görülebileceği üzere her bir test durumunda ikinci ve üçüncü harmonik modlarda frekanslar oluşmakta ve bu yüksek mertebeden modlar dalga yüksekliklerinin belirli periyotlarla kısmi olarak salınımlar yapmasına sebebiyet vermektedirler. Bununla birlikte baskın frekans değerlerinin çok altındaki bu modlar dalga karakteristikleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmektedir. Teorik olarak beklenen minimum dalga genlikleri ise her dalga boyu durumunda sağlanmıştır.

Geliştirilen SPH sayısal çözüm şemasının doğruluğunun ve kararlılığının test edilmesi açısından bir diğer önemli irdeleme üretilen dalgaların enerji yoğunluklarının ve beklenen teorik enerji değerleri ile karşılaştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla her test durumunda dalga yüksekliklerinin okunduğu noktanın yarım dalga boyu önü ve yarım dalga boyu arkasında bulunan tüm akışkan parçacıklarının (serbest yüzey problemleri açısından viskoz etkilerin çok sınırlı etkisi göz önüne alınmadan) kinetik ve potansiyel enerjileri her periyot için hesaplanmış ve başlangıç anında mevcut bulunan potansiyel enerji çıkarılarak dalga hareketinden oluşan enerji aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$E_{SPH} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N_{\lambda}} \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 + m_i g z_i - m_i g z_i^{(0)} \right) \quad (22)$$

(22) denkleminde verilen N_{λ} dalga yüksekliklerinin okunduğu noktanın yarım dalga boyu önü ve arkasında bulunan akışkan parçacıkları sayısını, v_i bu parçacıkların hızlılık değerini (sürat), z_i ise parçacıkların düşey konumlarını, $z_i^{(0)}$ ise başlangıç anındaki düşey konumlarını belirtmektedir. Tablo 1’de SPH çözümleri ve beklenen teorik dalga enerji yoğunlukları karşılaştırıldığında; dalga boyu değerinin artmasıyla bağıl hataların da tedrici olarak arttığı gözlemlenmektedir. En düşük dalga boyunda lineer dalga teorisi sonuçlarına göre yaklaşık %1,7 bağıl hata bulunurken, maksimum dalga boyu durumunda ise yaklaşık %10,9’luk bir bağıl hata bulunmaktadır. Bu durumun çalışmada incelenen tüm test durumlarında problem bölgesinin aynı sayıda parçacık sayısı ile temsil edilmesinden kaynaklandığı açıkça görülebilmektedir. Problem çözüm bölgesinin 1,00m dalga boyu durumunda ciddi orandaki artışına rağmen, enerji değerlerindeki %10,9 oranındaki bir bağıl hata; önerilen çözüm yönteminin görece düşük sayısal çözünürlüklerde bile iyi bir yaklaşıklıkla enerji değerlerini sağladığına işaret etmektedir. Bununla birlikte yüksek dalga boylarının inceleneceği problemler için hassas ve doğru sonuçlar alabilmek için problem bölgesinde daha yüksek sayıda parçacık kullanılması önerilmektedir.

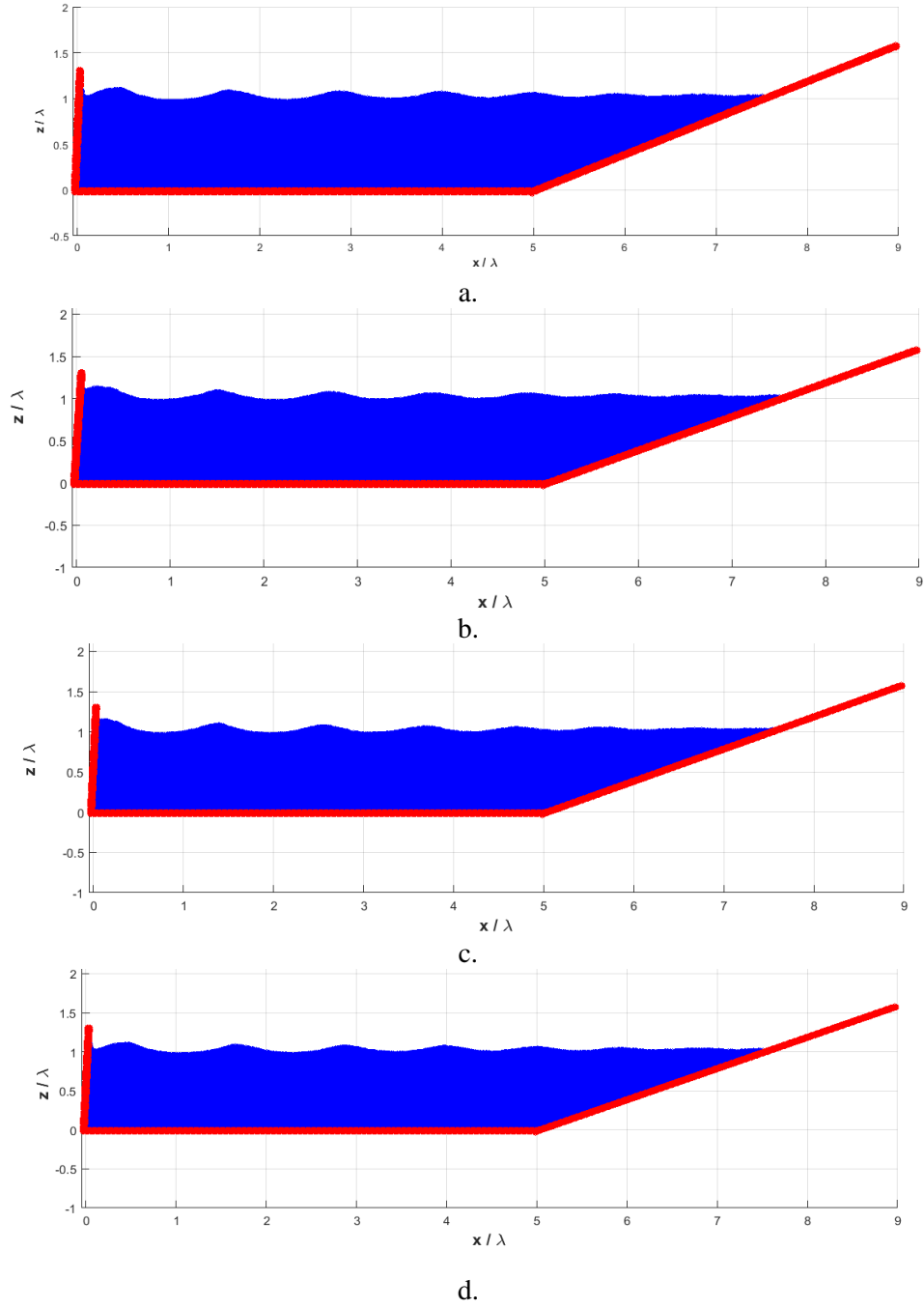
Tablo 1. Teorik ve SPH çözümlerine ait dalga frekansları, genlikleri ve enerji yoğunluklarının karşılaştırması.

λ (m)	ω_{SPH} (Hz)	ω_{Teorik} (Hz)	$\xi_{a,SPH}$ (m)	$\xi_{a,min}$ (m)	E_{SPH}	E_{Teorik}
0,25	2,511	2,499	0,0165	0,0125	0,7536	0,7664
0,50	1,774	1,767	0,0331	0,0250	3,0330	3,0654
0,75	1,444	1,443	0,0565	0,0375	6,7134	6,8980
1,00	1,256	1,250	0,0750	0,0500	13,600	12,260

Şekil 6’da tüm dalga boyu durumlarında elde edilen dalga profilleri ve parçacık dağılımları gösterilmektedir. Yatay ve düşey eksenler dalga boyu ile bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. $x=4\lambda$ konumundan itibaren sahilin etkisini göstererek oluşturulan dalgaların sönümlendiği görülebilmektedir.

Geliştirilen SPH tabanlı kod ile gerçekleştirilen tüm simülasyonlar aynı parçacık sayısı (66690) kullanılarak yapılmış ve bir zaman adımı (Δt) çevriminin tamamlanması Intel (R) Xeon (R) E5-2690 v3 @2.60GHz işlemci ile yaklaşık 4,63s sürmüştür. Bu bilgisayar kapasitesi ile tek

işlemci üzerinde gerçekleştirilen 25 dalga periyotluk bir simülasyon yaklaşık olarak 11 gün sürmektedir.



Şekil 6:

$t = t \sqrt{\frac{g}{\lambda}} = 32,56$ anındaki dalga profilleri **a.** $\lambda=0,25m$ **b.** $\lambda=0,50m$ **c.** $\lambda=0,75m$ **d.** $\lambda=1,00m$

4. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada gemi inşaatı ve deniz bilimleri, kıyı mühendisliği, liman tasarımı ve işletmeciliği ve dalga enerjisi üretici sistemlerin tasarlanması gibi pek çok mühendislik alanlarında ihtiyaç duyulan düzenli dalga üretici bir sistem sayısal olarak modellenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda sözü edilen mühendislik problemlerinin çözümüne özgün bir katkı sunabilmek için parçacık temelli SPH algoritması tüm detayları ile birlikte açıklanmış ve gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen sonuçlar teorik olarak hesaplanan dalga karakteristikleri ve enerji yoğunlukları ile karşılaştırılmıştır. Kanat tipi dalga üretici sisteme ait tüm geometrik boyutlar, oluşturulmak istenen dalga boyuna göre parametrik olarak bağlanmış ve dört farklı dalga boyu durumu için geometrik benzerlik kurulmuştur. Tüm simülasyonlarda derin su kabulü geçerli olacak şekilde dalga tankı derinliği, dalga boyuna eşit olarak alınmıştır. Simülasyonlarda kullanılan parçacık sayıları da dalga boyuna bağlı olarak belirlenmiş ve böylece her test durumunda eşit sayıda parçacık kullanılarak tüm test durumlarında hesaplama sürelerinin aynı olması hedeflenmiştir. Tüm simülasyonlar yeterli sayıda veri toplayabilmek için en az 25 dalga periyodu süresince sürdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar ışığında dalga karakteristikleri ve dalga enerji yoğunlukları açısından teorik sonuçlarla çok iyi bir uyumluluk sağlandığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, geliştirilen SPH temelli sayısal çözüm şemasının dalga üretici sistemlere ihtiyaç duyulan problemlerin incelenmesinde kullanılacak önemli bir araç olabileceği değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda öncelikle daha fazla sayıda dalga boyu için düzenli dalga üretilmesi ve aynı analizlerin gerçekleştirilmesi üzerinde çalışılacaktır. Daha sonra karışık dalga durumlarını yaratarak, JONSWAP ve Pierson-Moskowitz gibi sıklıkla kullanılan dalga enerji spektrumlarının modellenmesi planlanmaktadır. Ayrıca simülasyon sürelerini azaltmak amacıyla seri halde oluşturulmuş bilgisayar yazılımımızın çok işlemciye dağıtılarak paralel hale getirilmesi hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazar, 117M091 numaralı projesi kapsamında finansal desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür eder. Ayrıca yazar, bu çalışmada elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanması sırasındaki değerli katkılarından ötürü Prof. Mehmet Yıldız (Sabancı Üniversitesi, Tümleştirilmiş Üretim Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, SU-TÜMER) ve Prof. Ömer Gören'e (İstanbul Teknik Üniversitesi) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

1. Antuono, M., Colagrossi, A. ve Marrone, S. (2012) Numerical Diffusive Terms in Weakly-Compressible SPH Schemes, *Computer Physics Communications*, 183(12), 2570-2580. doi: 10.1016/j.cpc.2012.07.006
2. Babarit, A. Hals, J., Muliawan, M.J., Kurniawan, A., Moan, T., ve Krokstad, J. (2012) Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters, *Renewable Energy*, 41, 44-63. doi:10.1016/j.renene.2011.10.002
3. Batchelor, G.K. (1974) An introduction to fluid mechanics, *Cambridge University Press*.
4. Bai, W. ve Taylor, RE. (2007) Numerical simulation of fully nonlinear regular and focused wave diffraction around a vertical cylinder using domain decomposition, *Ocean Engineering*, 29, 55-71. doi:10.1016/j.apor.2007.05.005

5. Cleary, P.W. ve Monaghan, J.J. (2003) Conduction modelling using smoothed particle hydrodynamics, *Journal of Computational Physics*, 148, 227-264. doi: 10.1006/jcph.1998.6118
6. Cummins, S. ve Rudman, M. (1999). An SPH Projection Method, *Journal of Computational Physics*, 2, 584-607. doi:10.1006/jcph.1999.6246
7. Dong, R.R., Katz, J. ve Huang, T.T. (1997) On the structure of bow waves on a ship model, *Journal of Fluid Mechanics*, 346, 77-115. doi:10.1017/S0022112097005946
8. Dutykh, D., Theodoros Katsaounis, T. ve Mitsotakis, D. (2011) Finite volume schemes for dispersive wave propagation and runup, *Journal of Computational Physics*, 230, 3035-3061. doi:10.1016/j.jcp.2011.01.003
9. Faltinsen, O. ve Michelsen, F. C. (1974) Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, *International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves*, London, 91–106.
10. Finnegan, W. ve Goggins, J. (2012) Numerical simulation of linear water waves and wave–structure interaction, *Ocean Engineering*, 43, 23-31. doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.01.002
11. Froude, W. (1861) On the Rolling of Ships, *Trans. INA*. 2, 180-227.
12. Gotoh, H., Ikari, H., Memita, T. ve Sakai, T. (2005) Lagrangian Particle Method for simulation of Wave Overtopping on a Vertical Seawall, Japan Society of Civil Engineers and Coastal Engineering Committee, 47, 157-181. doi: 10.1142/S0578563405001239
13. Havelock, T. H. (1942) The Damping of the Heaving and Pitching Motion of a Ship, *Philosophical Magazine*, 33(7), 666–673.
14. Higuera, P., Lara, J.L ve Losada, I.J. (2013) Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models Application to OpenFOAM®, *Coastal Engineering*, 71, 102-118. doi:10.1016/j.coastaleng.2012.07.002
15. Hyun, J.M. (1975) Theory of Hinged Wavemakers of Finite Draft in Water of Constant Depth, *Journal of Hydronautics*, 10(1), 2-7. doi:10.2514/3.63046
16. Izadparast, A.D., Niedzwecki, J.M. (2011) Estimating the potential of ocean wave power resources, *Ocean Engineering*, 38, 177-185. doi:10.1016/j.oceaneng.2010.10.010
17. Kawasaki, K. (1999) Numerical simulation of breaking and post-breaking wave deformation process around a submerged breakwater, *Coastal Engineering*, 41(3-4), 201-223. doi:10.1142/S0578563499000139
18. Kleefsman, K.M.T., Fekken, G., Veldman, A.E.P., Iwanowski, B. ve Buchner. B. (2005) A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems, *Journal of Computational Physics*, 206, 363-393. doi:10.1016/j.jcp.2004.12.007

19. Kolukisa, D.C., Özbulut, M. ve Peşman, E. (2017) An Investigation on the Effects of Time Integration Schemes on Weakly Compressible SPH Method, *VII. International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017*, Nantes, France. doi:
20. Krylov, A. N. (1896) A New Theory of Pitching of Ships on Waves and of the Stresses Produced by this Motion, *Trans. INA*, 37, 326 – 359.
21. Lewis, F. M. (1929) The Inertia of Water Surrounding a Vibrating Ship, *Trans SNAME*, 37, 1–20.
22. Li, Y ve Lin, M. (2012) Regular and irregular wave impacts on floating body, *Ocean Engineering*, 42, 93-101. doi:10.1016/j.oceaneng.2012.01.019
23. Liang, X-f., Yang, J-m., Li, J.,Xiao, L-f ve Li, X. (2010) Numerical Simulation of Irregular Wave-Simulating Irregular Wave Train, *Journal of Hydrodynamics Ser. B*. 22(4), 537-545. doi:10.1016/S1001-6058(09)60086-X
24. Lin, PZ. ve Liu, LF. (1998) A numerical study of breaking waves in the surf zone, *Journal of Fluid Mechanics*, 359, 239-264. doi:10.1017/S002211209700846X
25. Liu, M.B. ve Liu, G.R. (2010) Smoothed Particle Hydrodynamics: An Overview and Recent Developments, *Archives of Computational Methods in Engeneering*, 17(1), 25-76. doi: 10.1007/s11831-010-9040-7
26. Liu, M.B., Shao, J.R. ve Li, H.Q. (2014) An SPH model for free surface flows with moving rigid objects, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 74, 684-697. doi: 10.1002/flid.3868
27. Meringolo, D., Colagrossi, A., Aristodemo, F. ve Veltri, P. (2015) SPH Numerical Modeling of Wave-Perforated Breakwater Interaction, *Coastal Engineering*, 101, 48-68. doi:10.1016/j.coastaleng.2015.04.004
28. Monaghan, J.J. (1994) Simulating free surface flow with SPH, *Journal of Computational Physics*, 110, 399–406. doi:10.1006/jcph.1994.1034
29. Monaghan, J.J. (2005) Smoothed Particle Hydrodynamics, *Reports on Progress in Physics*, 68(8), 1703-1759. doi:10.1088/0034-4885/68/8/R01
30. Monaghan, J.J. ve Kos, A. (1999) Solitary Waves on a Cretan Beach, *Journal of Water Way, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125(3), 145–154. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X
31. Ning, DZ. ve Teng, B. (2007) Numerical simulation of fully nonlinear irregularwave tank in three dimension, *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 53, 1847-1862. doi: https://doi.org/10.1002/flid.1385
32. Özbulut, M., Tofighi, N., Gören, Ö. ve Yildiz, M. (2015) On the SPH Modelling of Flow over Cylinder Beneath a Free-Surface, VI Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE), Rome, Italy.

33. Özbulut, M., Tofighi, N., Gören, Ö. ve Yıldız, M. (2018) Investigation of Wave Characteristics in Oscillatory Motion of Rectangular Tanks, *ASME Journal of Fluids Engineering*, 140/041204, 1-11. doi: 10.1115/1.4038242
34. Özbulut, M., Yıldız, M. ve Gören, Ö. (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. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2013.11.021
35. Padova, DD., Dalrymple, RA., ve Mossa, M. (2014) Analysis of the artificial viscosity in the smoothed particle hydrodynamics modelling of regular waves, *Journal of Hydraulic Research*, 52, 836-848. doi:10.1080/00221686.2014.932853
36. Pascal, R., Payne, G., Theobald, CM., ve Bryden, I. (2012) Parametric models for the performance of wave energy converters, *Applied Ocean Research*, 30, 112-124. doi: 10.1016/j.apor.2012.06.003
37. Sabuncu, T. (1983) Gemi Hareketleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi Yayını.
38. Sakai, T., Mizutani, T., Tanaka, H. ve Tada, Y. (1986) Vortex Formation in Plunging Breaker, *Proceedings of 20th ICCE*, 711-723. doi: 10.9753/icce.v20.54
39. Salvesen, N., Tuck, E. O. ve Faltinsen, O. (1970) Ship Motions and Sea Loads, *Trans. SNAME*, 78, 250–287.
40. St. Denis M. ve Pierson, W. J. (1953) On the Motion of Ships in Confused Seas, *Transactions of SNAME*, 69, 280–357.
41. Sun, H. ve Faltinsen, OM. (2006). Water impact of horizontal circular cylinders and cylindrical shells, *Applied Ocean Research*, 28(5),299-311. doi: 10.1016/j.apor.2007.02.002
42. Siegel, SH., Fagley C. ve Nowlin, S. (2012) Experimental wave termination in a 2D wave tunnel using a cycloidal wave energy converter, *Applied Ocean Research*, 38, 92-99. doi: 10.1016/j.apor.2012.07.003
43. Siegel, SH., Jeans, T., ve McLaughlin, TE. (2011) Deep ocean wave energy conversion using a cycloidal turbine, *Applied Ocean Research*, 30,110-119. doi:10.1016/j.apor.2011.01.004
44. Tasai, F. (1960) On the Damping Force and Added Mass of Ships Heaving and Pitching, *Reports of the Research. Institute for Applied Mechanics. Kyushu University*, 7(26), 131-152. doi:10.2534/jjasnaoe1952.1959.47
45. Ueno, M., Miyazaki, H., Taguchi, H., Kitagawa, Y. ve Tsukada, Y. (2013) Model experiment reproducing an incident of fast ferry, *Journal of Marine Science and Technology*, 18, 192-202. doi:10.1007/s00773-012-0198-6
46. Ursell, F. (1949) On the Heaving Motion of a Circular Cylinder on the Surface of a Fluid, *Quarterly Journal of Mechanical and Applied Maths*, 2, 218–231.

47. Wang, CZ. ve Wu, GX. (2006). An unstructured-mesh-based finite element simulation of wave interactions with non-wall-sided bodies, *Journal of Fluids and Structures*, 22, 441-461. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2005.12.005
48. Watanabe Y. ve Saeki, H. (1999) Numerical study of the hydrodynamics of regular waves breaking over a sloping beach, *Coastal Engineering*, 41(3-4), 281-301. doi:10.1016/j.euromechflu.2011.01.001
49. Westphalen, J., Greaves, DM., Williams, CJK., Hunt-Raby, AJ. ve Zang, J. (2012) Focused waves and wave–structure interaction in a numerical wave tank, *Ocean Engineering*, 45, 9-21. doi:10.1016/j.oceaneng.2011.12.016
50. Wilson, W.R., Carrica, P.M. ve Stern, F. (2007) Simulation of ship breaking bow waves and induced vortices and scars, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 54, 419-451. doi:10.1002/flid.1406
51. Yin, J., Sun, J-w. ve Jiao, Z-f. (2015) A TVD-WAF-based hybrid finite volume and finite difference scheme for nonlinearly dispersive wave equations, *Water Science and Engineering*, 8(3), 239-247. doi:10.1016/j.wse.2015.06.003

