

Kısmen Batık Bir Bariyerin Su Dalgaları ile Etkileşiminin Açık Kaynaklı Hesaplama Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi

Erdem KAYA¹, Utku ŞENTÜRK*¹

¹Ege Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir

Geliş tarihi: 09.01.2018

Kabul tarihi: 25.12.2018

Öz

Bu çalışmada, düşey, düzlemsel ve rijit bir bariyerin, sabit genlik ve frekansa sahip su dalgaları ile etkileşimi problemi ele alınmıştır. Öncelikle problemin lineer dalga teorisi altında analitik çözümüne ilişkin yöntem verilmiştir. Daha sonra bir açık kaynaklı hesaplama akışkanlar dinamiği yazılımı olan OpenFOAM kapsamındaki modüller aracılığıyla problemin sayısal çözümü gerçekleştirilmiştir. Ön aşama olarak, iki boyutlu sayısal dalga kanalı testleri ile, bu modüllerin dalga oluşturma ve sönmeme gibi özellikleri sınanmıştır. Analitik çözümlere kıyasla görülen en yüksek hata %1 olarak bulunmuştur. Belirlenen ağ ve çözücü özellikleri, batık bariyer probleminin modellenmesinde kullanılmıştır. Bariyerden yansıyan ve üreteçten çıkan dalgalar, lineer dalga teorisine dayalı olarak ayrıştırılmış, böylece yansıma ve iletme katsayıları hesaplanmıştır. Çeşitli dalga frekansları için bulunan sonuçlar, hem analitik çözümlerle hem de literatürde yer alan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmalı olarak değerlendirildiğinde, nicel ve nitel olarak yüksek uyum yakalandığı görülmüştür. Ayrıca, viskozite etkilerinin de hesaba katılmasıyla, lineer teoride ihmal edilen enerji kayıpları da belirlenmiş; bu kayıpların başlıca nedeninin bariyer ucundaki çevri oluşumu olduğu görülmüştür. Bir kısmen batık bariyer uygulaması olan salınan su sütunu ön duvarındaki enerji kayıplarının, salınan su sütunu hidrodynamic verimi üzerindeki etkisi tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Su dalgaları, Lineer dalga teorisi, Hesaplama akışkanlar dinamiği, OpenFOAM

Investigating the Interaction of a Partially Submerged Barrier with Water Waves Using Open-Source Computational Fluid Dynamics

Abstract

The interaction of a vertical, flat, rigid barrier with monochromatic water waves of constant amplitude is considered in this study. The method for the analytical solution to the problem under the assumptions of linear wave theory is introduced. This is followed by the numerical solution to the problem using the modules under the open-source computational fluid dynamics code OpenFOAM. As an initial stage, two-dimensional, numerical wave flume tests are carried out where the wave generation and absorbing features are tested. Maximum error relative to analytical solutions is found to be 1%. Grid and solver properties to be used for the submerged barrier problem are determined at this stage. The reflected and incident wave signals are decomposed with an approach based on the linearized theory. Results obtained

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Utku ŞENTÜRK, utku.senturk@ege.edu.tr

for several frequencies are found to be in good agreement with the analytical computations performed here and the experimental results obtained by other researchers. Taking the viscosity effects into account, the amount of energy loss which is neglected in the linearized theory is computed. The vortex formation at the tip is found to be the primary reason for this loss. Effects of the energy losses of the oscillating water column front wall which is a partially submerged barrier application, on the the oscillating water column hydrodynamic efficiency are investigated.

Keywords: Water waves, Linear wave theory, Computational fluid dynamics, OpenFOAM

1. GİRİŞ

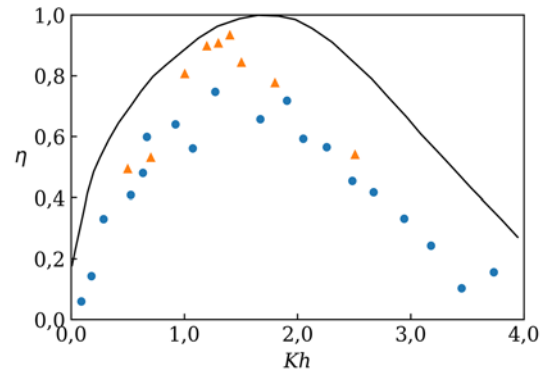
Su dalgalarının cisimlerle etkileşimini içeren problemler, hidrodinamik alanında sıkça ele alınmaktadır. Şüphesiz bunun başlıca sebebi, çeşitli kabuller altında ve uygun matematiksel araçlar ile analitik çözümlerinin yapılabilmesidir. Bu kapsamda yer alan, kısmen batık bir bariyerin su dalgaları ile etkileşimi de, analitik çözümü mevcut olan nadir hidrodinamik problemlerinden biridir. Böylesi temel bir problemin çözümü ile elde edilen sonuçlar, çok çeşitli mühendislik uygulamalarına ışık tutarlar.

Bu tip bir dalga-yapı etkileşimine, bir yenilenebilir enerji kaynağı olan dalga enerjisinden yararlanmak üzere tasarlanmış sistemlerde rastlanır. Buna örnek olarak, salınan su sütunu verilebilir [1, 2]. Salınan su sütunu (Şekil 1), denize kısmen batırılmış ve tabanı açık bir basınç odası olarak düşünülebilir. Oda içindeki su seviyesi, dalga hareketinden ötürü yükselip alçalır ve oda içindeki havayı bir piston gibi sıkıştırır. Odanın üzerine, atmosfere açılan bir kanal yerleştirilir ve buraya bir hava türbini konursa, kanaldaki hava hareketinden elektrik enerjisi elde edilebilir.



Şekil 1. Salınan su sütunu tipi dalga enerjisi dönüştürücü [3]

Salınan su sütunu veriminin dalga frekansına göre değişimi analitik [1,2] ve deneysel [4,5] çalışmalarla incelenmiştir. Bu çalışmalarda salınan su sütunu hidrodinamik verimi η 'nin, birimsiz dalga sayısı Kh 'a göre değişimi Şekil 2'deki gibi verilmiştir. Analitik çalışmada ideal ve dönüşsüz akış kabulleri yapılarak sürtünme, girdap oluşumu ve akış ayrılması gibi sebeplerden doğan enerji kayıpları ihmal edildiği için deneysel çalışmalarda görülen hidrodinamik verimlerin analitik çalışmaya göre daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Salınan su sütunu hidrodinamik verim eğrisinin analitik [1] ve deneysel [4, 5] karşılaştırılması

Yapıdaki enerji kayıplarının temelinde yayılım ve saçılım adı verilen iki temel hidrodinamik etki bulunmaktadır. Enerji dönüşümünü sağlayacak mekanik bir yapının hacim içerisinde oluşturacağı basınç dağılımı kaynaklı dalga oluşumu, yayılım problemini ortaya çıkmaktadır. Daha basite indirgenerek, mekanik yapı dalga üretici görevini görmektedir denilebilir. Dalga saçılımı problemi ise, ilerleyen dalgalar ile salınan su sütunu yapısının etkileşiminden ibarettir. Yapıdan gerçekleşen saçılım, bariyerdeki yansıma

problemine benzer şekilde ilerleyen dalga yönündeki dalga iletimi ve zıt yöndeki dalga yansımasından oluşmaktadır. Salınan su sütununun analitik hesaplamalarında yayılım ve saçılım problemleri birbirinden ayırt edilebilmektedir. Buna karşın, deneysel çalışmalarda bu iki problemi birbirlerinden ayırmak oldukça zordur.

Salınan su sütunu problemi deneysel çalışmalarla olduğu gibi, sayısal olarak da bütünüyle ele alınabilmektedir. Salınan su sütunu problemindeki geometrik değişkenleri sayısal olarak inceleyen [6,7] hidrodinamik verimde iyileştirmeler gerçekleştirebilmişlerdir. Enerji kayıplarının dalga frekanslarına bağlı olarak değiştiği çalışmalardan görülmektedir, ancak yine de enerji kayıpları söz konusudur ve bu çalışmalarda enerji kayıpları bir bütün olarak ele alınmıştır. Salınan su sütunu yapısındaki bariyer kaynaklı enerji kayıplarının büyüklüğü literatürde daha önce incelenmemiştir.

Salınan su sütununun ön duvarı, kısmen batık bir bariyer olup, makinanın enerji verimliliğinde önemli etkiye sahip bir bileşendir. Bu ön duvarın suya batıklık miktarına bağlı olarak makinanın optimum verime sahip olduğu dalga frekansının değiştiği bilinmektedir [1,2].

Batık bariyer–dalga etkileşimi problemi, lineer dalga teorisi altında birçok kez ele alınmış ve farklı matematiksel yöntemler ile analitik çözümü gerçekleştirilmiştir [8-11]. Böylece, su içindeki hız ve basınç, bariyerin maruz kaldığı kuvvetler, iletilen ve yansıyan dalga genlikleri gibi birçok önemli mühendislik parametresi hesaplanabilmektedir. Bu analitik çözüm, düşey ve düzlemsel bir bariyer geometrisi için söz konusu olup, dönümsüz akışkan tanımına uyan su içerisinde çok küçük genlikli dalgaların ilerlediği kabulüne dayalıdır. Lineer dalga teorisine ait bu kabullerin dışında, ya da, karmaşık geometriye sahip bir yapının dalgalar ile etkileşimi halinde, sözü edilen analitik çözüm yapılamaz. Bu durumda genellikle, deneysel yöntemlere başvurulmakta olup, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) araçlarının kullanımının giderek arttığı görülmektedir [12-14].

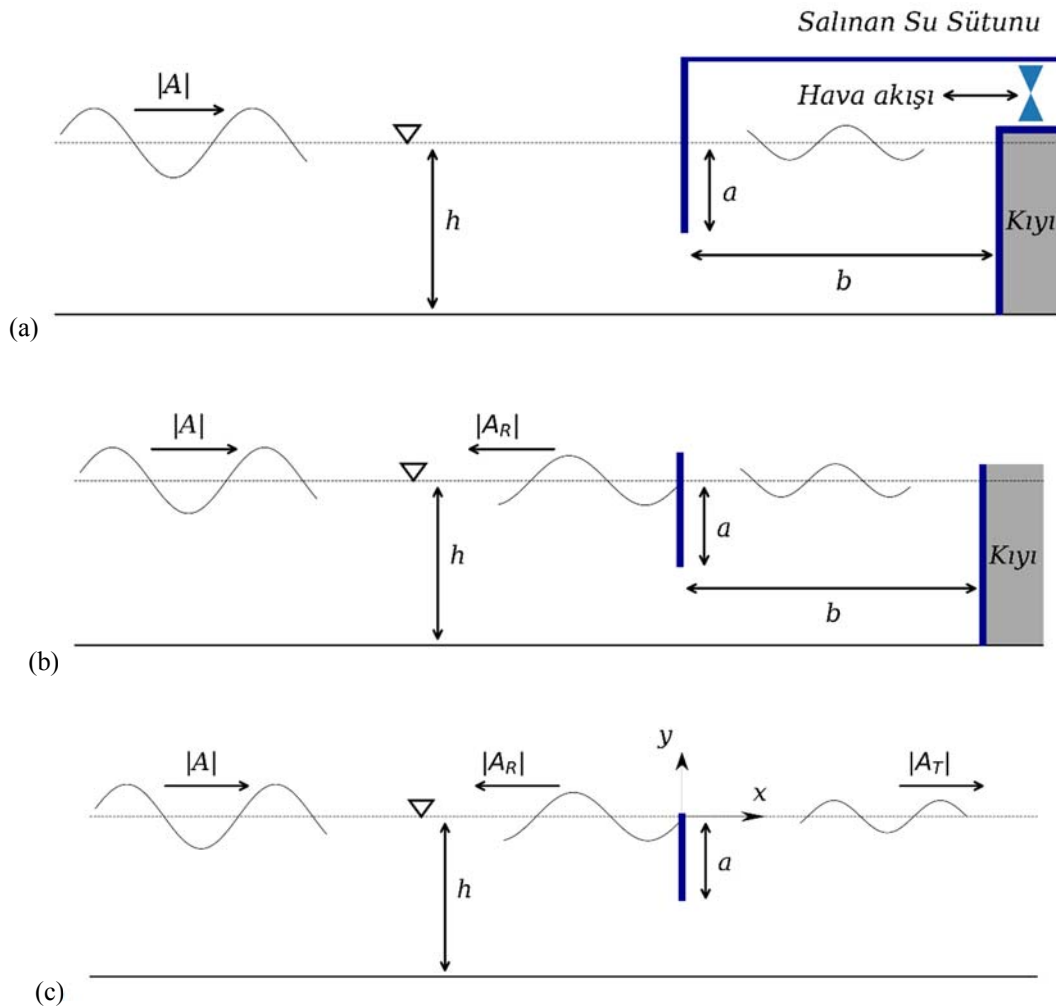
Günümüzde HAD araçları gerek akademik gerekse endüstriyel birçok problemin çözümünde başarıyla kullanılmaktadır. Bunlar arasında yer alan ticari yazılımlar, ülkemizde de sıkça tercih edilmektedirler. Son yıllarda bunlara alternatif olarak kullanılan ve giderek önem kazanan açık kaynaklı HAD araçları göze çarpmaktadır. Bunlardan başlıcası, OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) yazılımıdır. Kısaca OpenFOAM, akışkan hareketi denklemleri gibi kısmi diferansiyel formdaki denklemleri, sonlu hacimler yöntemine dayalı olarak çözen, herhangi bir ticari lisans gerektirmeyen, C++ dilinde geliştirilmiş açık kaynaklı bir yazılımdır. Bu sayede, yazılımın kaynak kodu dilendiği gibi değiştirilebilmekte, amaca uygun olarak düzenlenerek yeni çözümler elde edilebilmektedir. Yakın dönemde, özellikle gemi hidrodinamiği alanında OpenFOAM uygulamalarının arttığı görülmektedir. [12, 15]. Bu kapsamda geliştirilen modüllerin genel dalga–yapı etkileşimlerinde kullanılmak üzere sınanması ve mevcut araştırmalarda kullanılabilir hale getirilmesi, yerli alternatif çözüm araçları sağlanması açısından önemlidir.

Bu kapsamda mevcut çalışmanın amacı, kısmen batık, düşey, düzlemsel ve rijit bir bariyerin, sabit genlik ve frekansa sahip su dalgaları ile etkileşiminin, OpenFOAM kullanılarak modellenmesidir. Sayısal çözüm, mevcut analitik çözüm ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Öncelikle, laboratuvar ortamındaki dalga kanalı deneylerine benzer şekilde, bir sayısal dalga kanalı modellenecek ve lineer dalga teorisine dayalı kontrol edilen bir dalga üreticinin doğruluğu sınanacaktır. Daha sonra, sayısal dalga kanalı içerisine kısmen batık bariyer geometrisi yerleştirilecek, çeşitli dalga frekansları için çözümler yapılacaktır. Bariyerden aktarılan ve yansıyan dalga genliği (enerjisi) değerleri başta olmak üzere, çeşitli parametreler analitik çözümler ve literatürden alınan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Çalışmada saçılım probleminde bariyer kaynaklı enerji kayıpları incelenerek, kısmen batık bariyer çevresindeki enerji kayıplarının salınan su sütunu hidrodinamik verimi üzerindeki etkisi ortaya koyulacaktır.

2. PROBLEMİN TANIMI

Salınan su sütununda bahsedilen yayılım problemini ihmal edebilmek için Şekil 3a'daki salınan su sütununun mekanik unsurları kaldırılabilir ve Şekil 3b'de verilen gösterime dönüşebilir. Bu durum saçılım problemindeki enerji kayıplarının incelenebilmesine olanak

sağlayabilir. Burada sabit su derinliğine (h) sahip bir kanalda, $+x$ yönünde ilerleyen belirli bir genliğe (A) sahip su dalgaları ile yapılardan yansıyan dalgaların girişimi gerçekleşmektedir. Salınan su sütunu derinliği (b) ve bariyerin su içerisinde kalan kısmı (a) olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3. (a) Salınan su sütunu, (b) Saçılım problemi ve (c) Kısmen batık bariyer şematik gösterimleri

Saçılıma neden olan yapılar, bariyerden çok uzaklaştırılarak bariyer yalnız bırakılır ve problem Şekil 3c'deki gösterime dönüşür. Burada, ilerleyen dalgalar kısmen batık, düşey, düzlemsel ve rijit bir bariyere çarpmakta, dalgaların bir kısmı bariyerden

yansırken, bir kısmı ise bariyerin altındaki boşluktan $+x$ yönüne iletilmektedir. Her iki problemin başlıca parametreleri, yansıyan (A_R) ve iletilen (A_T) dalgaların genlikleridir.

Sabit frekanslı ve küçük genlikli dalgalar için geçerli lineer dalga teorisi ele alındığında dalga potansiyelinin (Eşitlik 1),

$$\phi(x, y) = -\frac{igA}{\omega} \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh} e^{ikx} \quad (1)$$

serbest su yüzeyi denkleminin (Eşitlik 2) de,

$$\eta(x) = A e^{ikx} \quad (2)$$

olduğu bilinmektedir [16, 17]. Burada ϕ ve η , kompleks değerli fonksiyonlardır. Eşitliklerde dalga sayısı k , genlik A , yerçekimi ivmesi g ve açısal frekans ω ile gösterilmiştir. Su içerisinde bariyer olması halinde genel çözüm (Eşitlik 3a ve 3b),

$$\phi_1 = \left(e^{ikx} + R e^{-ikx} \right) \psi_0(y) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{k_n x} \psi_n(y), \quad x < 0 \quad (3a)$$

$$\phi_2 = T e^{ikx} \psi_0(y) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-k_n x} \psi_n(y), \quad x > 0 \quad (3b)$$

olarak yazılır [11, 17]. Bu eşitlikler, bariyerin yukarı akım ve aşağı akım tarafındaki bölgeler için ayrı ayrı yazılmış potansiyel fonksiyonlardır. Toplam sembollerini altındaki terimler, bariyer civarında görülen yerel dalga modlarını ifade ederler. Bu modlar bariyerden uzaklaştıkça kaybolurlar [8]. Eşitlik 8a'nın sağ tarafındaki ilk terim, $x \rightarrow -\infty$ 'dan bariyere gelen dalgaları temsil eden kısımdır. R ve T terimleri ise, yansıyan ve iletilen dalgaların kompleks genlikleri A_R ve A_T ile (Eşitlik 4 ve 5),

$$R = A_R / A \quad (4)$$

$$T = A_T / A \quad (5)$$

uyarınca ilişkilidirler. Dolayısıyla bunlar, boyutsuz dalga genlikleridir. Birim dalga genişliğinde mevcut dalga gücü,

$$W = \frac{1}{2} \rho g |A|^2 \left[\frac{1}{2} \frac{\omega}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] \quad (6)$$

Eşitlik 6 ile ifade edilir [17]. Buna göre, enerjinin korunumu gereği (Eşitlik 7),

$$|R|^2 + |T|^2 = 1 \quad (7)$$

eşitliğinin sağlandığı görülebilir. Eşitlik 3a ve 3b'de görülen $\psi_n(y)$ ise, problemin analitik çözümüne ilişkin ortonormal fonksiyon seti olarak ifade edilmektedir [11, 17]. R ve T katsayılarının dalga frekansına bağlı değişimlerinin bulunması için, literatürde çok çeşitli yöntemler mevcuttur [8-11]. Bu katsayılar Porter [11] tarafından verilen eşleştirilmiş özfonksiyon açılımları yöntemi kullanılarak bulunacaktır. Kısaca bu yöntemde, Eşitlik 3a ve 3b ile verilen potansiyel fonksiyonlar, bariyer düzlemi olan $x=0$ 'da eşleştirilir ve bunlara bariyer sınır koşulları uygulanır. Ortonormal fonksiyonların ortogonalliğinden yararlanılarak, N adet katsayı için N adet eşitlik elde edilir ve bu sistem çözülerek Eşitlik 3a ve 3b'deki bilinmeyen katsayılar bulunur [8-11].

3. HAD DENKLEMLERİ

HAD simülasyonlarında, OpenFOAM ortamında geliştirilmiş *waves2Foam* adlı çözücü kullanılmıştır. *waves2Foam*, birbirine karışmayan akışkanlardan ibaret çok fazlı sistemler için geliştirilmiş akışkan hacmi (volume of fluid) yöntemine dayalı bir çözücüdür. OpenFOAM'da halihazırda bulunan *interFoam* adlı çözücünden türetilmiştir [12, 19]. Simülasyonlarda çözülen temel denklemler (Eşitlik 8-10), sıkıştırılmaz akış için,

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}\mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{V}) + \mathbf{g} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{V}) = 0 \quad (10)$$

olarak yazılırlar. Burada p , statik basıncın yoğunluğa bölünmesi ile bulunan kinematik basınç ve g ise yerçekimi vektörüdür. α ile gösterilen faz indikatörü, akış bölgesinin herhangi bir hücresindeki su hacminin, hücrenin toplam hacmine oranıdır. Buna göre α 'nın değeri su içinde 1 ve hava içinde 0 iken, hava – su arayüzeyinde (0, 1) aralığındadır. Yoğunluk ve kinematik viskozite gibi akışkan özellikleri (Eşitlik 11 ve 12),

$$\rho = \alpha\rho_{su} + (1-\alpha)\rho_{hava} \quad (11)$$

$$v = \alpha v_{su} + (1-\alpha)v_{hava} \quad (12)$$

şeklinde, faz indikatörüne bağlı süreksiz fonksiyonlar olarak tanımlıdır. Eşitlikler sonlu hacimler yöntemine dayalı ayrıklaştırılmışlar ve PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) adlı basınç düzeltme algoritması ile çözülmüşlerdir.

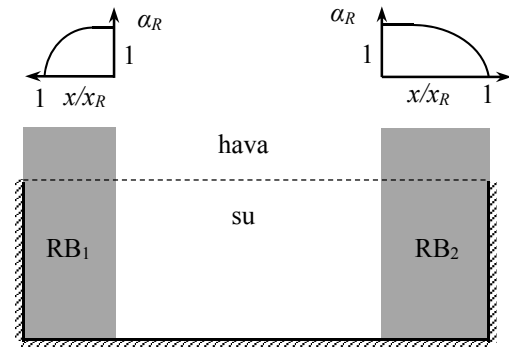
waves2Foam, iki veya üç boyutlu sayısal dalga tanklarının simülasyonu için özelleşmiş bir araç olup, çeşitli dalga modellerine dayalı dalga üretici tiplerine sahiptir. Buna göre, problem bölgesinin dalga üretici olarak tayin edilen sınır koşulunda hızlar tanımlanarak, arzu dalgalar oluşturulabilmektedir. Lineer dalga teorisi için bu hızlar, Eşitlik 1 ile verilen potansiyel fonksiyonun tanımı gereği, $(u, v) = (\partial\phi/\partial x, \partial\phi/\partial y)$ ile bulunurlar. Ayrıca *waves2Foam* bünyesinde, sonlu uzunluğa sahip sayısal dalga kanalının uçlarında oluşacak istenmeyen yansımaları engellemek için rahatlatma bölgeleri tanımlanabilmekte, bu bölgelerde filtreleme ve sönümleme yapılabilmektedir. Bunun için, Şekil 4'te gri renkli görülen rahatlatma bölgelerinde (Eşitlik 13),

$$F = \alpha_R F_{hesap} + (1-\alpha_R) F_{hedef} \quad (13)$$

uygulanır. Burada F , u, v veya α 'nın herhangi birini temsilen yapılmış bir kısaltmadır. Eşitlik 14'teki α_R ise, x_R bölgenin uzunluğu olmak üzere,

$$\alpha_R(x/x_R) = 1 - \frac{\exp\left[(x/x_R)^{3.5}\right] - 1}{\exp(1) - 1} \quad (14)$$

olarak tanımlanmış bir rampa fonksiyonudur [15] (Şekil 4). Örneğin, bir sayısal dalga kanalı simülasyonunun herhangi bir anı ele alınsın. F_{hesap} , Şekil 4'te gri renkli bölgelerde HAD çözümünden bulunan u, v ve α değerlerine karşılık gelmektedir. F_{hedef} ise, her bölgede farklıdır. Kanalın üreteç tarafındaki rahatlatma bölgesinde (RB_1), F_{hedef} , lineer dalga teorisinden bulunan ve $+x$ yönünde ilerleyen dalgalara ait çözümdür. Yani, bariyerden yansıyıp tekrar üretece ulaşan dalgalar, bu bölge içinde filtrelenip sönümlenir. Böylece, bunların üreteçten yansıyıp tekrar bariyere gitmeleri önlenir. Kanalın diğer ucunda (RB_2), F_{hedef} yerine hızlar için $u=v=0$ yazılır. Faz indikatörü α ise kanalın sakin su seviyesi $y=0$ 'ın altında su ve üstünde hava olacak şekilde değerler alır. Böylece seçili bölge, bariyerden geçip bu uca ulaşan su dalgalarını tamamen sönümleyen yapay bir kıyı görevi görür.



Şekil 4. Dalga yansımalarını engellemek için oluşturulan rahatlatma bölgeleri

Kısaca, rahatlatma bölgeleri sayesinde, probleme ait büyüklüklerin harmonik rejime girdikleri andan itibaren, $x>0$ için, yalnızca bariyerden iletilen dalgalar görülecektir. $x<0$ için ise, üreteçten çıkan dalgalar ve bariyerden yansıyan dalgaların girişimi mevcut olacaktır. Artık dalga yüksekliğinin seçilen konumlardaki anlık değerleri kaydedilebilir. Bu veriler ile $|T|$ doğrudan belirlenebilir (Eşitlik 5). Ancak yansıyan dalgalar, üreteçten gelen dalgalar ile girişim halinde buldukları için $|R|$ doğrudan belirlenemez. Girişim halindeki dalgaların ayrıştırılması için çeşitli yöntemler önerilmiş olup burada, Dean ve Dalrymple [16] tarafından sunulan yöntem kullanılacaktır. Bu yöntemde, su yüzeyi formu $H(x, t)$, bir periyotluk zaman dilimi

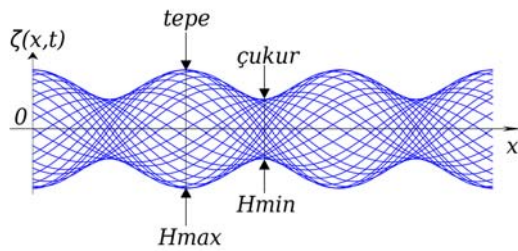
boyunca N defa kaydedilerek tek bir grafik üzerinde toplanır (Şekil 5). Bu grafikte görülen en büyük ve en küçük genlik (A_{\max} ve A_{\min}) okunarak yansıyan dalga genliği (Eşitlik 15)

$$|A_R| = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{2} \quad (15)$$

ile bulunabilir. Ayrıca, yine bu veriler (Eşitlik 16),

$$|A| = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2} \quad (16)$$

ile hesaplanarak üreteçten çıkan dalga karakteristiklerinin kontrolü yapılabilir. Bu iki genliğin oranı da $|R|$ katsayısını verecektir.



Şekil 5. Bir periyot için üst üste bindirilen dalga örgüsünün şematik gösterimi

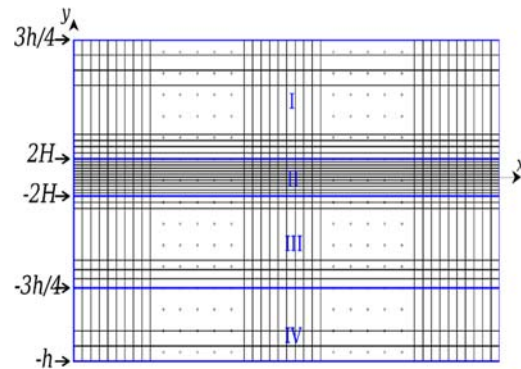
4. BULGULAR

Çalışmanın ilk aşamasında, OpenFOAM yazılımı ile lineer su dalgalarının modellenmesi üzerinde doğrulama testleri yapılmıştır. Daha sonra dalga-bariyer etkileşimi problemi ele alınmıştır. Tüm incelemelerde, suyun ve havanın kinematik viskozite değerleri $\nu_{su} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $\nu_{hava} = 1,48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak sabit alınmış ve akış laminer kabul edilmiştir. Dalga frekansı, dalga sayısı (k) aracılığıyla değiştirilmiştir. Dalga yüksekliği, lineer dalga teorisi için dalga eğiminin üst sınırı [18] gözetilerek her bir frekans için ayrıca hesaplanmış ve kullanılmıştır. Tüm simülasyonlarda, zaman integrasyonu için örtülü Euler yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca, taşınım terimleri için ikinci mertebeden akışyonü (upwind) düzeni, basınç ve difüzyon terimleri için ise

hücreler arası doğrusal değişim kabulü kullanılarak ayrıklaştırma uygulanmıştır. Elde edilen doğrusal denklem sistemlerinin iteratif çözümünde, hız, basınç ve faz indikatörü için toleranslar 10^{-9} , 10^{-7} ve 10^{-7} alınmıştır. Zaman adımı için bir ön çalışma yapılmış ve $\Delta t = T/1500$ olarak belirlenmiştir. Ard işlemlerde görselleştirmeler, Python programlama dili bünyesindeki modüller ile yapılmıştır.

4.1. Sayısal Dalga Kanalı Testi

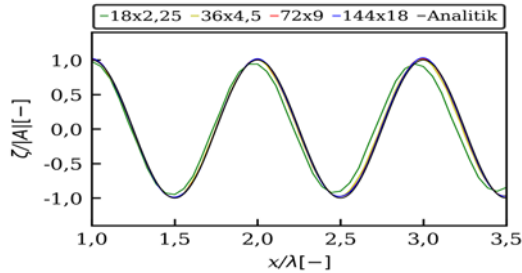
Çalışmada öncelikle, waves2Foam çözücüsünün dalga oluşturma ve sönümleme becerileri test edilmiştir. Dolayısıyla bu problemde bariyer olmayıp, kanalın bir ucundaki üreteçten çıkan dalgalar, kanalın diğer ucundaki rahatlatma bölgesinde sönümlenmiştir. Bu bölümde birimsiz dalga sayısının (kh) 0,8 olduğu dalga frekansı incelenmiştir.



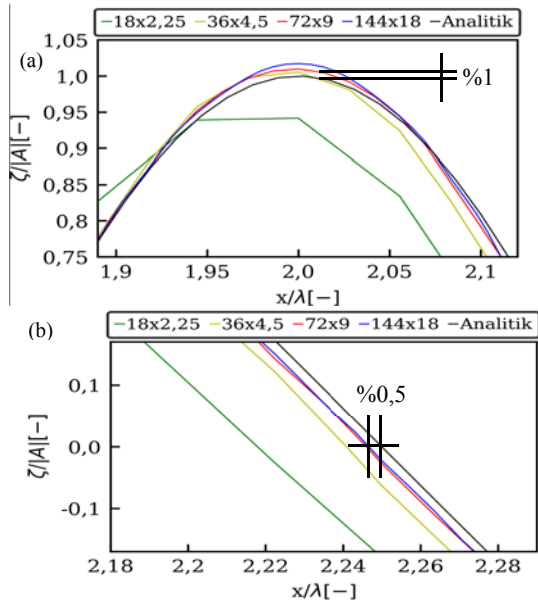
Şekil 6. Sayısal dalga kanalı ağ örgüsü

Bu aşamada öncelikle ağ çözünürlüğünün hesaplamalara etkisi incelenmiştir. Hesaplama bölgesi Şekil 6'daki gibi dört farklı bölgeye ayrılmış, su ve hava fazlarının etkileşime girdiği bölge olan Blok II temel alınarak dört ağ çözünürlüğü test edilmiş olup, en düşük çözünürlükte, bir dalga boyunda 18 hücre ve bir dalga yüksekliğinde 2,25 hücre bulunmaktadır. Eleman sayıları her yönde ikiye katlanarak diğer üç çözünürlük elde edilmiştir. Böylece dört farklı ağ, $18 \times 2,25$, $36 \times 4,5$, 72×9 ve 144×18 olarak ifade edilebilir. Blok II'de elde edilen yapı dikeyde 1,02-1,05 büyüme oranlarıyla süpürülerek diğer blokların ağ örgüleri oluşturulmuştur.

Şekil 7’de görüldüğü üzere, özellikle 72×9 ve 144×18 için eğrilerin uyumu çok iyi bulunmuş olup dalga genlikleri arasındaki en yüksek bağıl hata %1 olarak hesaplanmıştır (Şekil 8a). Bu iki dalga sinyalinde, analitik çözüme kıyasla en yüksek faz kayması %0,5 olarak bulunmuştur (Şekil 8b). Bu durum, sonuçlarda faz kayması probleminin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir. Sonuçlar göz önünde bulundurularak dalga-bariyer incelemelerine 72×9 çözünürlüğü ile devam edilmiştir. Çalışmada, analiz edilen farklı dalga özelliklerine göre az miktarda değişim gösterse de, yaklaşık olarak 200.000 hücre kullanılmıştır.

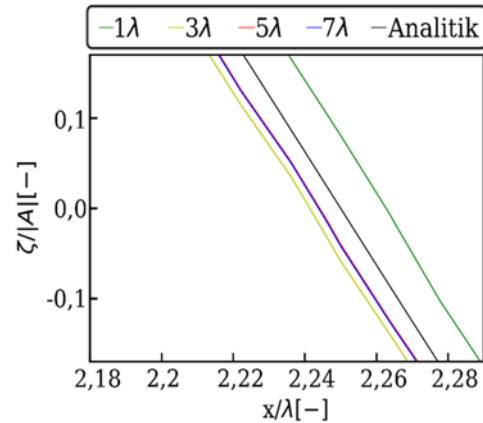
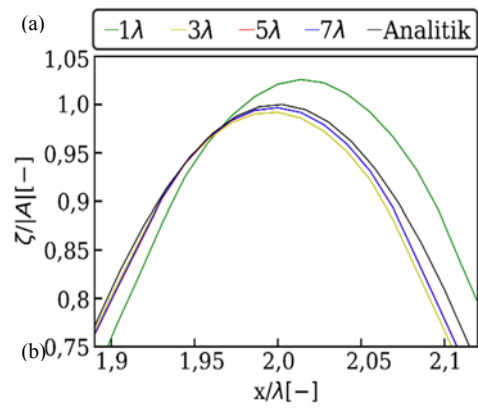


Şekil 7. Ağ çözünürlüğünün serbest su yüzeyi formuna etkisi



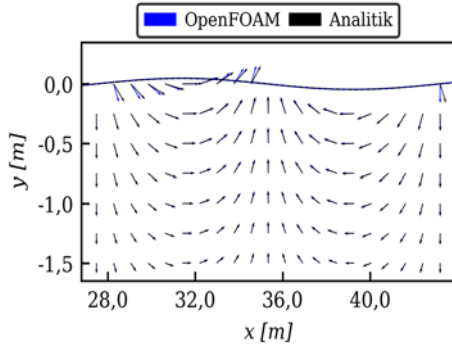
Şekil 8. Farklı ağ çözünürlükleri için bağıl hata: (a) Dalga genliği (b) Faz kayması

Rahatlatma bölgesindeki yansıma etkilerinin ne ölçüde engellendiği de bu bölümde sınanmıştır. Şekil 4’te görülebilen $x_{R,RB1} = \lambda$ ve dalgaların serbestte geliştiği orta bölgenin uzunluğu 7λ olacak $x_{R,RB2}$ uzunluğu değiştirilerek rahatlatma bölgesi sönümlenme kabiliyeti incelenmiştir. Şekil 9a ve Şekil 9b’den görülebileceği gibi, $x_{R,RB2} = 5\lambda$ değerinde eğrilerin uyumunun oldukça yeterli olduğu görülmektedir.



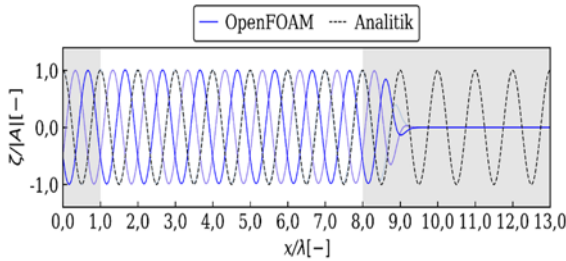
Şekil 9. Farklı $x_{R,RB2}$ değerleri için bağıl hata: (a) Dalga genliği (b) Faz kayması

Şekil 10’da, her iki çözümden elde edilen hız alanları, $t=30T$ anında görülmektedir. Hızlar, serbest yüzey civarında yüksek değerlere sahip olup derinlere inildikçe süratle azalır. Bu yüzden serbest yüzey civarındaki değerler şekilde verilmiştir. Sonuçların genel olarak yüksek uyuma sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 10. Su içindeki hızların karşılaştırılması

Son olarak kanaldaki serbest su yüzeyinin formu, $t=30T$ anı için lineer dalga teorisi çözümü ile karşılaştırmalı olarak Şekil 11'de verilmiştir. Ayrıca aynı grafikte, bir periyot boyunca üç farklı ana ait olan serbest yüzey dağılımları görülmektedir. Gri bölgeler ise, rahatlatma bölgelerini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde; arzu edilen dalga profilinin elde edildiği, faz kayması etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve dalgaların başarıyla sönmüldüğü görülebilmektedir.

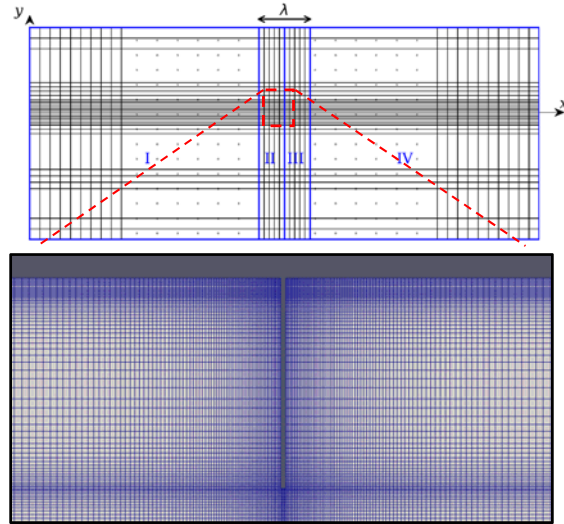


Şekil 11. Sayısal dalga kanalı problem bölgesi

4.1. Dalga-Bariyer Etkileşimi

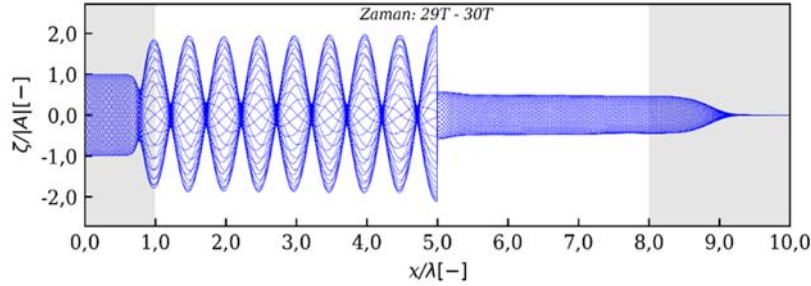
Şekil 2'de şematik gösterimi verilen bariyer, dalga üretici testinde doğruluğu sınanan rahatlatma bölgeleriyle birlikte çözülemeye dahil edilmiştir. Dalgaların bariyerden yansıma/iletme karakteristikleri, çeşitli dalga frekansları için incelenmiştir. Dalga sayısı, 0,2-1,4 aralığında, 0,2 artımlarla değiştirilmiştir. Bariyer, su içine batık uzunluğu $a/h=0,1$ olacak şekilde, kanalın tam ortasına konumlandırılmıştır. Rahatlatma

bölgeleri ile bariyer arasındaki mesafeler, bariyerden yansıyan ve iletilen dalgaların incelenmesi için yeterli uzunlukta modellenmiştir. Şekil 6'da verilen bloklama mantığı korunarak, bariyer etrafında bir dalga boyu λ uzunluğunda Şekil 12'deki gibi ek bloklar ağ örgüsüne dahil edilmiştir. Burada II ve III bloklarında oldukça küçük elemanlar kullanılarak bariyer etrafında su hareketinin iyi çözümlenebilmesi sağlanmıştır. I ve IV blokları ile II ve III blokları arasındaki elemanların geçişi 1,05 büyüme oranı ile tanımlanmıştır.



Şekil 12. Bariyer etrafında ağ örgüsü

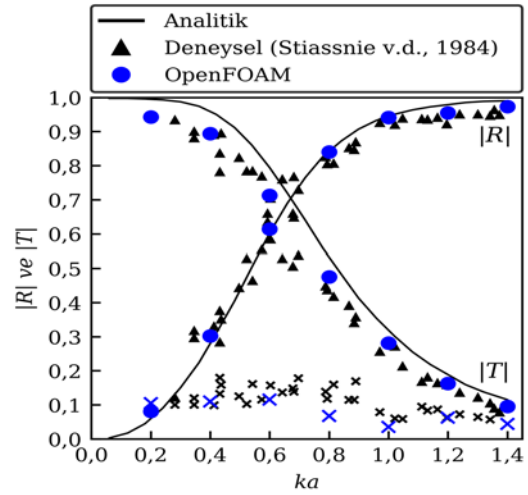
Şekil 13'te, $29T-30T$ zaman diliminde, eşit zaman aralıklı 30 adet su yüzeyi dağılımı üst üste bindirilmiştir ($ka=0,4$). Daha önce olduğu gibi gri bölgeler, rahatlatma bölgelerini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, dalga üretici tarafındaki rahatlatma bölgesinin de istenen fonksiyonu sağladığı, böylece bariyerden yansıyan dalgaların burada sönmüldüğü görülmektedir. Ayrıca, bariyerin altından iletilen dalgaların diğer uçta sönmüldüğü neredeyse bir dalga boyu mesafede başarıyla tamamlanmıştır. Bariyerden yansıyan dalgaların, üretecten gelen dalgalar ile girişimi sebebiyle, $x<0$ 'da genlik artışının olduğu görülmektedir. İletilen dalgaların genliği ise, üretecten çıkan dalga genliğinden daha azdır.



Şekil 13. Dalga-bariyer etkileşimi problem bölgesi ve sınır koşulları ($ka=0,4$) (Görselde rahatlama bölgesinin son 3λ uzunluğu gösterilmemiştir)

Sayısal olarak bulunan dalga karakteristiklerinin nicel olarak değerlendirilebilmesi için Eşitlik 4 ve 5 ile verilen katsayıların hesaplanması gereklidir. Başlık 4'te verilen yöntem ile H_{min} ve H_{max} değerleri belirlenmiş, R ve T katsayıları bulunmuştur.

Şekil 14'te yansıma ve iletilme katsayıları, analitik olarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılmaktadır. Ayrıca bu şekilde, Stiassnie ve arkadaşları [20] tarafından verilen deneysel sonuçlar da görülmektedir. Deneyde, 27 m uzunluğunda, 60 cm genişliğine ve 1,3 m derinliğinde bir dalga kanalı, piston tipi dalga üretici ile donatılmıştır. Tankın sonunda dalgaların sönmünebilmesi için pürüzlü 1:3 eğimli bir yüzey kullanılmıştır. Farklı boylarda bariyer üretecten 14 m uzağa yerleştirilmiştir. Bariyerin önünden ve arkasından alınan ölçümlerle yansıyan, iletilen ve tankın sonunda sönmüne dalga genlikleri ölçülmüştür [21]. Buna göre, geniş bir frekans aralığında HAD ile bulunan katsayıların, analitik ve deneysel çözümler ile nicel ve nitel uyuma sahip oldukları ortaya konmuştur. Problemdaki dalga karakteristikleri incelendiğinde, dalga frekansı arttıkça dalga yansımasının arttığı, dalga iletilmesinin de azaldığı görülmektedir. Hatta, bariyerin suya batıklığı görece küçük ($a/h=0,1$) olmasına rağmen, yüksek frekanslarda, dalgaların neredeyse tamamı yansıtılabilmektedir. Buna karşılık, küçük dalga frekansları için dalgaların neredeyse tamamının bariyerden geçtiği ve çok azının yansıtılabildiği görülmektedir. Özetle, bariyerin yansıtma yeteneği, dalga frekansına bağlı değişmektedir.



Şekil 14. Çeşitli ka değerleri için bariyerden yansıyan $[R]$ ve iletilen $[T]$ dalga katsayıları ("x" ile işaretli değerler kayıpları gösterir).

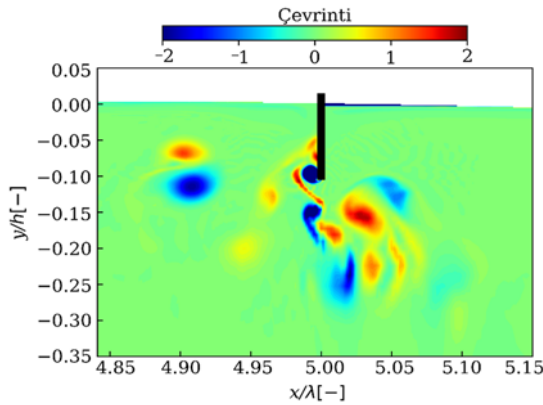
Lineer teoremin sürtünmesiz ve dönümsüz akışkan için türetilmiş olmasından ötürü, bariyer üzerindeki kayma gerilmeleri ve bariyer alt ucundaki çevri oluşumları göz ardı edilmektedir. Bir diğer deyişle enerji kayıpları göz ardı edilmektedir. HAD simülasyonlarında ise, bu etkiler dikkate alınmaktadır. Söz konusu enerji kayıpları için, Eşitlik 17 yardımıyla

$$K=1-|R|^2-|T|^2 \quad (17)$$

değeri tanımlanabilir. Şekil 14'te bu değer incelenen frekanslar için hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir ("x" ile işaretli değerler). Genel olarak uyumlu bulgular

ışığında, ele alınan probleme ilişkin, viskozite etkilerinin de hesaba katıldığı, yüksek doğruluklu hesaplamaların yapılabildiği görülmüştür.

Söz konusu kayıpların çevrinti oluşumu ile ilişkisini ortaya koymak için, HAD ile elde edilen hız alanından çevrinti (vortisite) değerleri hesaplanmıştır. Şekil 15'te, $ka=0,4$ değerinde ve $t=30T$ anında çevrinti şiddeti dağılımı görülmektedir. Sonuçlara göre, çevrinti oluşumu bariyer alt ucunda gerçekleşmekte ve daha sonra çevriller (vorteksler) dalga hareketi ile taşınarak difüzyona uğramaktadır. Çevrinti oluşumunu ve çevri bölgelerinin hareketini görselleştirmek analitik yöntem ile olanaksız, deneysel yöntem ile çok zahmetlidir. Bu noktada HAD simülasyonlarının önemli avantaj oluşturduğu ortadadır.



Şekil 15. $ka=0,4$ için çevrinti dağılımı

Salınan su sütunu tipi enerji dönüşüm makinalarında türbinden geçen havanın hacimsel debisi, ön duvar batıklığına ilişkin yansımaya katsayısı R 'ye bağlıdır [1,2]. Bu da enerji dönüşüm verimini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple bu uygulamalarda sahanın hakim dalga karakteristiklerinin dikkate alınarak boyutlandırma yapılması gereklidir. Buna göre, Şekil 2'de salınan su sütunu hidrodinamik veriminin analitik ve deneysel çalışmaları arasındaki farkın irdelenmesi için Şekil 3b'de şematik gösterimi verilen salınan su sütunu saçılım problemi çalışmanın bu bölümünde ele alınmıştır. Deneysel çalışmayla [4] uygun bir şekilde, bariyer batıklık oranı $a/h=0,163$, salınan su sütunu derinlik oranı $b/h=0,696$

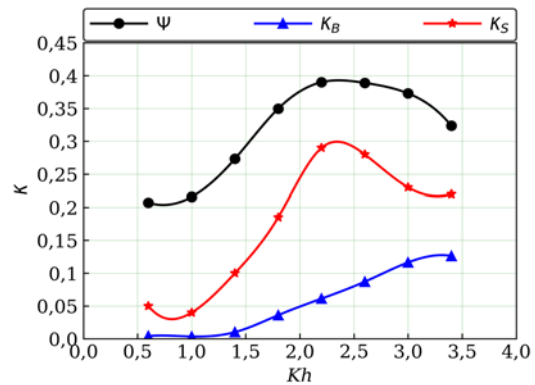
değerinde tanımlanarak geometri düzenlenmiş ve sayısal dalga tankında RB2 bölgesi ortadan kaldırılmıştır. Birimsiz dalga sayısı kh 'ın 0,6 ile 3,4 arasında değiştirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonrası Bölüm 4'te verilen yöntem ile H_{min} ve H_{max} değerleri belirlenmiş ve R katsayısı bulunmuştur. Bu problemde T katsayısının söz konusu olmadığı dikkat alınarak, salınan su sütununda saçılım kaynaklı enerji kaybı bulunmuş ve K_S ile ifade edilmiştir.

Şekil 3c'de şematik gösterimi, Şekil 6 ve Şekil 12'de ağ yapısı verilen kısmen batık bariyerli sayısal dalga tankından bariyer batıklık oranı $a/h=0,163$ için simülasyonlar gerçekleştirilmiş, bariyer çevresindeki enerji kayıpları Eşitlik 17 ile elde edilerek K_B ile ifade edilmiştir.

Şekil 2'de salınan su sütunu hidrodinamik veriminin analitik ($\eta_{Analitik}$) [1] ve deneysel ($\eta_{Deneysel}$) [4] değerleri arasındaki fark (Eşitlik 18),

$$\Psi = \eta_{Analitik} - \eta_{Deneysel} \quad (18)$$

ile ifade edilmiştir. Böylece, bariyer alt ucundaki çevri oluşumları sebebiyle oluşan enerji kayıpları, diğer bulgularla birlikte birimsiz dalga sayısına bağlı olarak grafiğe dökülmüştür. Şekil 16'da enerji kaybı eğrilerinin belirgin bir uyum içinde olduğu görülebilmektedir. Analitik ve deneysel çalışmalarında elde edilen hidrodinamik verim farkı, Ψ 'nin dalga özelliklerine göre %20-40 gibi oldukça yüksek oranlarda değiştiği görülmektedir.



Şekil 16. Salınan su sütunu saçılım probleminde enerji kaybı analizi sonuçları

Saçılım probleminden ortaya çıkan enerji kaybı K_S , beklendiği gibi Ψ 'nin altında kalmış ve dalganın özelliklerine bağlı olarak Ψ 'ye göre daha fazla değişim göstermiştir. Bu değerler, deneysel hidrolik verimlerin analitik hesaplamalara göre düşük çıkmasında, saçılım probleminin önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir. K_S 'nin en yüksek değerlere ulaştığı durumlarda, Ψ 'nin de en yüksek değerlerde olduğu görülmekteydi. K_B ise bu değişimden etkilenmemiş, çalışmasının önceki bölümündeki tespitlerle uyumlu bir değişimle elde edilmiştir. Bariyer etrafındaki enerji kayıpları, kayıpların bu denli artışının önemli bir etkenidir. Bu problemde K_B , dalga özelliklerine göre değişiklik göstererek kaybın %1-13'ünü oluşturmuş bulunmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, bir salınan su sütunu cihazının ön duvarı olan kısmen batık, düşey, düzlemsel bir bariyerin su dalgaları ile etkileşiminin söz konusu olduğu temel bir problem ele alınmış ve sayısal olarak incelenmiştir. Açık kaynaklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan OpenFOAM bünyesindeki *waves2Foam* modülü yardımıyla sayısal çözümler yapılmıştır. Bu modül kapsamında yer alan dalga oluşturma ve dalga sönmeme gibi fonksiyonların ön testleri için, iki boyutlu bir kanalda küçük genlikli dalgaların ilerlemesi problemi ele alınmıştır. Sonuçlar, analitik çözümlerle karşılaştırmalı olarak sınanmış, yeterli doğruluğa sahip sonuçlar elde edilmiş, uygun ağ ve çözücü özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra dalga-bariyer etkileşimi problemine geçilmiştir. Sayısal simülasyonlarla, bariyerden yansıyan ve iletilen dalgaların genliklerine ilişkin hidrodinamik katsayıların dalga frekansına bağlı değişimi hesaplanmıştır. Bariyerden yansıyan dalgalar ile üreteçten gelen dalgaların ayrıştırılması da bu süreçte gerçekleştirilmiştir. Bulgular, analitik ve deneysel sonuçlar ile uyuma sahiptirler. Ayrıca, viskoz etkilerin de hesaba katılmasından ötürü, bariyerdeki enerji kayıplarının irdelenmesi yapılmış ve bariyer alt ucundaki çevri oluşumu görselleştirilmiştir.

Çalışmada ayrıca salınan su sütununda enerji kayıpları ve nedenleri irdelenmiş, salınan su

sütununda saçılım kaynaklı enerji kayıpları ve bariyer çevresindeki enerji kayıpları sayısal olarak elde edilmiştir. Bariyer çevresindeki enerji kayıplarının özellikle yüksek dalga sayılarında arttığı görülmüş olup, salınan su sütunu uygulamalarında sahanın hakim dalga karakteristiklerinin dikkate alınarak boyutlandırma yapılmasının gerekliliği gösterilmiştir.

Bu çalışmada yeterli doğruluğa sahip sonuçlar ürettiği görülen araştırma yöntemi ile, daha karmaşık ve gerçekçi yapıların dalga karakteristikleri belirlenebilir. *waves2Foam* modülü kapsamında yüksek mertebeden dalga teorilerine dayalı dalga oluşturma özellikleri mevcut olup, bunlar, laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilen deneysel yöntemleri bütünleyici araçlar olarak kullanılabilir. Özellikle, deneylerde tespit edilmesi zahmetli olan cisimler etrafındaki çevri oluşumu ve taşınımına ilişkin, HAD ard-ışlemleri ve görselleştirme araçlarının önem taşıdığı görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

1. Evans, D.V., Porter, R., 1995. Hydrodynamic Characteristics of an Oscillating Water Column Device. *Applied Ocean Research*, 17(3), 155-164.
2. Şentürk, U., Özdamar, A., 2012. Wave Energy Extraction by an Oscillating Water Column with a Gap on the Fully Submerged Front Wall. *Applied Ocean Research*, 37, 174-182.
3. Manasseh, R., McInnes, K., Hemer, M., 2017. Pioneering Developments of Marine Renewable Energy in Australia, *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 8, 50-67.
4. Morris-Thomas, M., Irvin, R.J., Thiagarajan, K.P., 2007. An Investigation into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 129, 273-278.
5. Ning, D.Z., Wanga, R.Q., Zou, Q.P., Teng, B., 2016. An Experimental Investigation of Hydrodynamics of a Fixed OWC Wave Energy Converter, *Applied Energy*, 168, 636-648.
6. Zhang, Y., Zou, Q.P., Greaves, D., 2012. Air-water Two-phase Flow Modelling of

- Hydrodynamic Performance of an Oscillating Water Column Device, *Renewable Energy*, 411, 59-170.
7. Ning, D.Z., Wanga, R.Q., Zou, Q.P., Teng, B., 2015. Investigation of Hydrodynamic Performance of an OWC (Oscillating Water Column) Wave Energy Device Using a Fully Nonlinear HOBEM (Higher-order Boundary Element Method), *Energy*, 83, 177-188.
 8. Ursell, F., 1947. The Effect of a Fixed Vertical Barrier on Surface Waves in Deep Water, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Cambridge University Press, 43(3), 374-382.
 9. Mei, C.C., Black, J.L., 1969. Scattering of Surface Waves by Rectangular Obstacles in Waters of Finite Depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 38(3), 499-511.
 10. McIver, P., 1985. Scattering of Water Waves by Two Surface-Piercing Vertical Barriers. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 35(3), 339-355.
 11. Porter, R., Evans, D.V., 1995. Complementary Approximations to Wave Scattering by Vertical Barriers. *Journal of Fluid Mechanics*, 294, 155-180.
 12. Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R., Fredsøe, J., 2012. A Wave Generation Toolbox for the Open-Source CFD Library: OpenFOAM®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), 1073-1088.
 13. Kamath, A., Chella, M.A., Bihs, H., Arntsen, Ø.A., 2015. CFD Investigations of Wave Interaction With a Pair of Large Tandem Cylinders. *Ocean Engineering*, 108, 738-748.
 14. Kamath, A., Bihs, H., Arntsen, Ø.A., 2015. Numerical Modeling of Power Take-off Damping in an Oscillating Water Column Device. *International Journal of Marine Energy*, 10, 1-16.
 15. Vukčević, V., Jasak, H., Malenica, Š., 2016. Decomposition Model for Naval Hydrodynamic Applications, Part II: Verification and Validation. *Ocean Engineering*, 121, 76-88.
 16. Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Publishing Co Inc, Singapore.
 17. Mei, C.C., Stiassnie, M., Yue, D.K.P., 1989. *Theory and Applications of Ocean Surface Waves: Part 1: Linear Aspects*, World Scientific Publishing Co Inc, Singapore.
 18. Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Springer, Berlin.
 19. Ubbink, O., 1997. *Numerical Prediction of Two Fluid Systems with Sharp Interfaces*, Doktora Tezi, Imperial College.
 20. Stiassnie, M., Naheer, E., Boguslavsky, I., 1984. Energy Losses Due to Vortex Shedding From the Lower Edge of a Vertical Plate Attacked by Surface Waves. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 396(1810), 131-142.
 21. Knott, G., Flower, J., 1979. Wave-tank Experiments on an Immersed Parallel-plate Duct. *Journal of Fluid Mechanics*, 90(2), 327-336.

