



# Kompozit deniz yapısının dalga kuvvetleri altında incelenmesi

**Engin GÜCÜYEN**

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa  
engin.gucuyen@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9971-8546, Tel: (236) 231 23 21

**Recep Tuğrul ERDEM\***

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa  
tugrul.erdem@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8895-7602, Tel: (236) 231 23 26

Geliş: 25.03.2019, Revizyon: 29.04.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

## Öz

Deniz yapıları tabana sabitlenmiş ya da yüzer şekilde tasarlanabilmektedirler. Günümüzde, yüzer yapıların kullanımı her derinlikte hizmet vermeleri nedeniyle hızla artmaktadır. Bu yapıların yüzmesini tabanda bulunan pontonlar sağlar. Bu çalışmada farklı malzemelerden üretilmiş iki farklı pontonun dalga kuvvetleri etkisinde nümerik analizi yapılmıştır. Yapılardan ilki (Model 1) dışı beton içi köpük olacak şekilde tasarlanmıştır. İkinci yapı ise sadece sert plastik malzeme kullanılarak tasarlanmıştır. Analizlerde Abaqus sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Yapının bulunduğu deniz ortamı ile arasındaki etkileşim çift yönlü akışkan-yapı etkileşim analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Çift yönlü etkileşim analizinde Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birleşimi (CEL) ile modelleme yapılmıştır. Etkileşim modellemesinde diğer modelleme tekniklerinden farklı olarak herhangi bir yüzey tanımlanmamıştır. Etkileşim sadece genel temas özellikleri tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu tip modellemede (CEL) sadece Abaqus/Explicit çözücüsü kullanılmaktadır. Deniz ortamı Eulerian, yapı ise Lagrangian yaklaşımı ile modellenmiştir. Deniz ortamının modellemesinde Lineer dalga hız profili kullanılmıştır. Çözüme en uygun nokta ve eleman sayılarının belirlenmesi için hassaslık analizleri yapılmıştır. Hassaslık analizleri modal davranış üzerinden gerçekleştirilmiştir. Nümerik modelin tahkiki dalga su yüzü profilleri üzerinden yapılmıştır. Zamanla değişen su yüzü profilleri iki farklı noktada analitik ve nümerik olarak elde edilmiştir. Analitik ve nümerik dalga profillerinin uyumu sayısal ve görsel olarak tespit edilmiştir. Yapısal analizde ise modal davranışlar, frekanslar ve gerilme dağılımları elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda farklı bir akışkan-yapı etkileşim tekniği kullanılması durumunda kullanılacak nokta ve eleman sayıları elde edilmiştir. Bu değerlerin çözüme etkisi süre ve bellek gereksinimi açısından tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan-yapı etkileşimi; Nümerik analiz; Eulerian-Lagrangian yaklaşımları; Yüzer yapılar

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Dünyanın artan nüfusuyla beraber enerjiye olan ihtiyaç da artmıştır. Karadaki fosil yakıt rezervlerinin azalması, arsa maliyetlerinin artması gibi nedenlerle enerji elde etme ve depolama tesislerinin inşası açık denizlerde artmaktadır. Fosil yakıtların yanında dalga ve rüzgar gibi temiz enerji üretimi için açık denizler iyi birer inşaat alanı haline gelmiştir. Enerji tesislerinin yanında deniz ve hava ulaşım tesisleri için de açık deniz yapıları kullanılmaktadır. Bu yapılar deniz tabanına sabitlenmiş ya da yüzer olarak hizmet verirler.

Yüzer yapılar, her derinlikte; sığ suda, geçiş bölgesinde ve derin suda kullanılabilirler. Nedeniyle günümüzde yaygınlaşmaktadır. Bu yapıların yüzmesini alt yapısında bulunan pontonlar sağlar. Pontonlar suya tam batık ya da yarı batık hizmet verirler. Bu iki durumda da platform altyapısı (Han vd., 2017), dalgakıran (Christensen vd., 2018, Loukogeorgaki vd., 2017), dalga enerjisi üretici (Zhang vd., 2018, Huang vd., 2019), balık çiftliği iskelesi (Hung vd., 2011), köprü (Sha vd., 2018) ve açık deniz bariyer yapısı (Aboshio ve Ye, 2016) uçak-helikopter pisti, eğlence alanı ve iskele olarak kullanılabilirler. Deniz tabanına sabitlenmiş yapılardan farklı olarak su derinliğinden ve deniz taban etkilerinden etkilenmezler ve deniz akıntısını engellemedikleri için daha çevrecidirler. Kolay yerleştirme, geniş yüzey alanı, yük taşıma kapasitesi ve başka yerde kullanılabilecek diğer olumlu özellikleridir (Chunyan vd., 2018). Olumlu yanlarının yanında karşılaşılabilecek olumsuzluklar Gao vd., 2013, Loukogeorgaki vd., 2014 tarafından açıklanmıştır. Geniş yüzeylerine karşılık kalınlıklarını az olması nedeniyle dalga kuvveti altında esneyip eğilmeye maruz kalabilirler. Şiddetli fırtına anında ani iniş kalkmalar nedeniyle kopma kırılma gibi durumlarla karşılaşılabilir.

Yüzer açık deniz yapılarına etki eden başlıca çevresel kuvvet dalga kuvvetidir. Sabit deniz yapılarında ihmal edilebilen düşey yönlü dalga

kuvveti bu tip yapıların hesabında etkin bir rol oynar. Bunun yanında deniz taban etkilerinden etkilenmedikleri için bu tip yapılarda akıntı kuvvetleri göz ardı edilebilir. Diğer deniz yapılarında olduğu gibi, yapıya etki eden dalga kuvvetinin hesaplanmasında Difraksiyon Teorisi (Chen vd., 2017) ya da Morrison Denklemi kullanılır (Maa vd., 2018, Zhao vd., 2016). Morrison Denklemi ana parametresi olan dalga hızının hesaplanmasında en genel olarak; Lineer, Stokes ve Cnoidal dalga teorileri kullanılır.

Açık deniz yapılarının, dinamik davranışının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri akışkan-yapı etkileşim analizidir. Sadece akışkandan yapıya kuvvet aktarımı olduğunda analiz tek yönlüdür. Akışkandan kuvvet, yapıdan da deplasman aktarımı olduğunda çift yönlü analiz yapılmış olur. Her iki tipte de sonlu elemanlar yöntemi en yaygın kullanılan yöntemdir. Sonlu elemanlar destekli akışkan-yapı etkileşim analizleri sadece Eulerian yaklaşımı (Martínez vd., 2009), sadece Lagrange yaklaşımı (Gücüyen ve Erdem, 2016) ya da ikisinin birlikte kullanıldığı Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) (Korobenko vd., 2017, Liu, 2016) ve Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birleşimi (Coupled Eulerian Lagrangian-CEL) (Aboshio ve Ye, 2016, Ji vd., 2017) ile gerçekleştirilir. Etkileşim modellerinde kullanılan sonlu eleman yazılımlarından biri de Abaqus'tür (Dassault Systemes, 2010). ALE ve CEL analizlerinde yapı Lagrangian akışkan ise Eulerian yaklaşımları ile modellenir. Bu iki yaklaşımda etkileşim yüzeyi tanımlanmaması ve co-simulation kullanılmaması sadece Lagrangian ya da sadece Eulerian yaklaşıma göre avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, ALE yaklaşımında meydana gelen yapısal eleman deformasyonları, analizlerde gerçek dışı sonuçlara neden olabilmektedir. (Aquelet vd., 2006). CEL yöntemi, Abaqus programında uygulanan, belirgin bir integrasyon düzeni kullanan ve salt Lagrangian, Eulerian

yöntemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldıran bir yöntemdir. CEL yöntemi, Eulerian malzemenin akış halinde olduğu ve Lagrangian kısımla etkileşim içinde olduğu cismin hacmini temsil eden Eulerian mesh yapısından oluşur. CEL yönteminde akış hareketi, Eulerian ağ yapısına uygun olarak, malzemenin sisteme doğru akışı ile tanımlanmaktadır. Bunun yanında, yüzer yapı Lagrangian hareket ifadesine uygun olarak tanımlanır ve ayrıklaştırılırsa, sayısal ağ yapısı malzeme ile birlikte hareket eder ve deforme olur (Aboshio ve Ye, 2016, Ducobu vd., 2013).

Beton, çelik, polyethylene, plexiglass, köpük ve perspex bu tip yapıların imalatında kullanılmaktadır. Bunların içinde beton ve çelik malzemelerinden ilki, dinamik yükler altında ve şiddetli deniz ortamında narinlik, ikincisi ise deniz suyunun oluşturacağı aşındırıcı etki ile başa çıkmak zorundadır. Uygulamada beton yapılar için, dalga kıran elemanlar arasında çarpma etkisinden kaçınmak için belli bir mesafe bırakılmalıdır. Çelik yapılar için ise, korozyon etkisi ciddi bir problemdir (Loukogeorgaki vd., 2017, Yanga vd., 2018).

Yapılan literatür araştırmalarında ponton tipi açık deniz yapılarının dinamik davranışının modellenmesinde analitik (Ning vd., 2017),



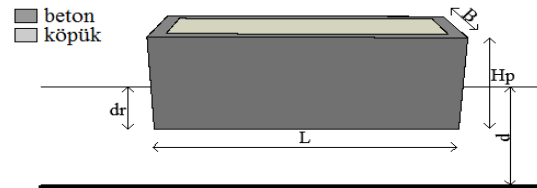
Şekil 1.a. Kullanımdaki yapı

Şekil 1.a'da onarım için kıyıya çekilmiş yapı görülmektedir. Şekil 1.b'de kompozit yapı görülmektedir. Köpüğün dış etkilerden korunması için köpük, 0.10 m kalınlığında beton ile kaplanmıştır. Şekil 1.c'de ise tek bir

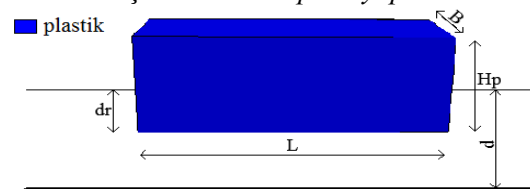
nümerik (Zhan vd., 2017, Haicheng vd., 2018) ve deneysel (Ji vd., 2017) yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, farklı malzemelerden üretilmiş ponton tipi açık deniz yapılarının dalga kuvveti etkisinde dinamik davranışı nümerik olarak incelenecektir. Nümerik analizde ise CEL yaklaşımı Abaqus ile uygulanacaktır. Yapı Lagrangian, çevresini oluşturan deniz ortamı ise Eulerian yaklaşımı ile modellenecektir. Kullanılan farklı malzemelerin yapısal davranış üzerindeki etkileri nümerik analiz üzerinden incelenecektir. Farklı noktalarda nümerik olarak elde edilen su yüzü profili ile analitik olarak elde edilen su yüzü profillerinin uyumu tahkik edilecektir.

## İncelenen yapı ve deniz ortamı

İnşaat teknolojilerinde ki gelişmelerle beraber, deniz yapıları her derinlikte inşa edilebilmektedir. Bu tanıma en uygun deniz yapısı ise ponton tipi yapılarıdır. Bu çalışmada, Şekil 1'de geometrisi görülen yapı iki farklı malzeme ile modellenerek davranışı incelenecektir. Birinci model içi köpük dışı ise beton koruma ile kaplanmış kompozit yapıdır. İkinci model ise sadece sert plastikten üretilmiştir.



Şekil 1.b. Kompozit yapı



Şekil 1.c. Tek bir malzemedan üretilmiş yapı

malzemedan üretilmiş yapı görülmektedir. Yapının geometrik özelliklerine ait sayısal değerler ve bulunduğu konuma ait çevresel değerler Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Yapıya ve dalga ortamına ait geometrik değerler

Yapısal değerler				Çevresel değerler			
Hp (m)	B (m)	L (m)	dr (m)	H (m)	T (s)	d (m)	L (m)
1	0.70	3	0.40	1	6	6	56.18

Tablo 1’de, Hp ponton yüksekliğini, B ponton genişliğini, L ponton boyunu, dr yapının suyun içindeki yüksekliğini, H dalga yüksekliğini, T dalga periyodunu, d su derinliğini ve L dalga boyunu göstermektedir.

Her iki yapı modelinde dalgalanmamış su seviyesinde eşit miktarda battıkları varsayımı yapılmıştır. Bu dengeleme ikinci modelin içine doldurulan su ile gerçekleştirilmiştir (Yanga vd., 2018). Su ağırlığı ek ağırlık olarak Model 2’ye etki ettirilmiştir.

Yüzer yapılar hidrodinamik dalga kuvvetleri etkisi altında aniden yükselme ve yalpalama hareketlerine maruz kalmaktadır. Hidrodinamik kuvvetler, dalga hızına (u) ve ivmesine ( $\dot{u}$ ) bağlı olarak hesaplanır.

$$u = \frac{H g T \cosh[2\pi(z+d)/L_w]}{2 L_w \cosh(2\pi d/L_w)} \cos\left(\frac{2\pi}{L_w}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (1)$$

Denklem (1) ile verilen hız değeri, dalga yüksekliğine (H), dalga periyoduna (T) ve yapının bulunduğu su derinliğine (d) göre seçilen dalga teorisine göre hesaplanır. Denklemde kullanılan dalga boyu ( $L_w$ ) değeri Lineer Dalga Teorisine göre 98.71 m olarak hesaplanmıştır. Dalga hızı numerik analizde giriş hızı olarak tanımlanır.

## CEL esaslı akışkan-yapı etkileşim analizi

Deniz yapılarının çevresel yükler altında davranışlarının belirlenmesinde akışkan-yapı etkileşim analizleri sıklıkla kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi bu analizler için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu çalışmada ponton tipi bir deniz yapısının akışkan-yapı etkileşim analizi sonlu elemanlar programlarından biri olan Abaqus ile gerçekleştirilecektir. Sonlu elemanlar analizinde

yapı Lagrange, akışkan Eulerian yaklaşımı ile modellenerek analiz CEL üzerinden sürdürülecektir. CEL yaklaşımının matematiksel ifadesi takip eden bölümde sunulmuştur.

## CEL formülizasyonunun matematiksel tanımı

Abaqus, aşağıda tanımlanan denklemler ile Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birleşimi (CEL) yöntemini kullanmaktadır. Denklemler (2-4) sırasıyla, kütle, momentum ve enerji korunum denklemleridir.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (3)$$

$$\frac{De}{Dt} = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} \quad (4)$$

Denklemlerde, v malzeme hızı,  $\rho$  yoğunluk,  $\boldsymbol{\sigma}$  Cauchy gerilmesi, b cisim kuvveti ve e iç enerjinin birim hacme oranıdır.

$$\frac{D\varphi}{Dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla \varphi) \quad (5)$$

Lagrangian yaklaşımı için yazılan korunum denklemleri Denklem (5) kullanılarak Eulerian yaklaşımı için genel formda aşağıdaki gibi elde edilir.  $\varphi$  ise rastgele seçilmiş çözüm değişkenidir.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = S \quad (6)$$

Denklem (6)’da  $\Phi$  akış fonksiyonu, S ise kaynak terimidir. Bu denklem iki ayrı denklem şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = S \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = 0 \quad (8)$$

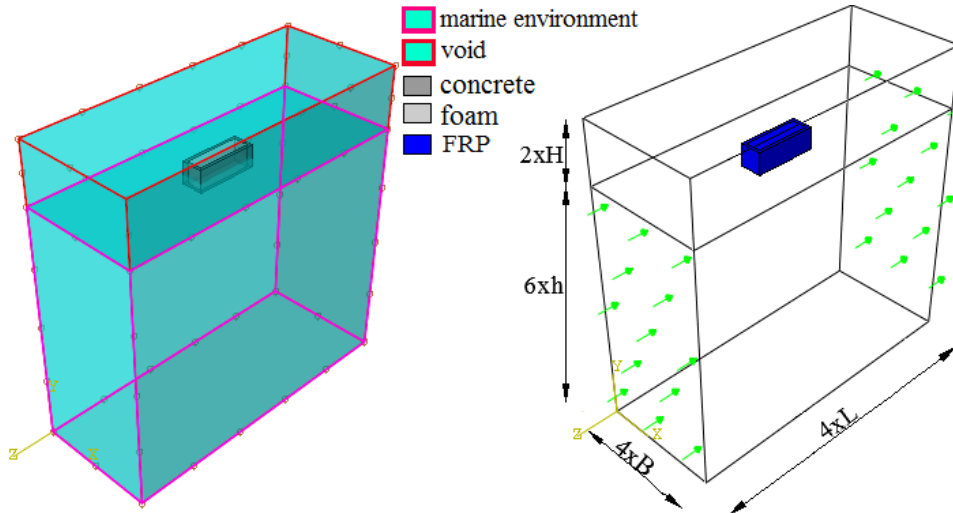
Denklem (7), konumsal zaman türevinin, malzemesel zaman türevi ile değişmesi durumunda, standart Lagrangian formülasyonu ile özdeşdir. Denklem (8)'i çözmek için deforme olmuş ağ, orijinal sabit ağ pozisyonuna taşınmakta ve komşu elemanlar arasında taşınmış malzeme hacmi hesaplanmaktadır. Kütle, enerji, momentum, gerilme gibi Lagrangian çözüm değişkenleri komşu elemanlar arasındaki malzeme akışını tanımlayan algoritmalar ile tanımlanmaktadır. Bu anlatıma ek olarak, CEL formülasyonu hakkında daha fazla bilgi (Benson ve Okazawa, 2004, Reddy, 2010) çalışmalarında bulunmaktadır.

### Model üzerinde CEL uygulaması

CEL yöntemi, büyük deformasyonları içeren akışkan-yapı etkileşim uygulamalarında

geçerlidir. CEL yöntemi, her bir zaman artışında Lagrangian ve Eulerian ifadelerini içeren ağ bozukluklarında elverişlidir. Lagrangian aşamasında, düğümlerin geçici olarak malzemeye sabitlendiği ve elemanların malzeme ile birlikte şekil değiştirdiği varsayılmaktadır. Hangi elemanların önemli oranda deforme olduğu Lagrangian aşamasının sonunda belirlenmektedir. Eulerian aşamasında ise, büyük deformasyon yapan elemanlar otomatik olarak tekrar mesh işlemine tabi tutulur. (Liu vd., 2016).

Bu çalışmada, CEL yaklaşımının ponton modeline uygulanmasında Abaqus sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Analize ait model Şekil 2'de görülmektedir. Şekilin solunda köpük ve beton ile üretilen kompozit yapı görülürken, sağında ise sert plastik ile üretilen yapı görülmektedir. İki farklı yapı aynı geometrik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte yapıların bulunduğu deniz ortamı aynı geometrik ve malzeme özelliklerine sahiptir.



Şekil 2. CEL modelin şematik gösterimi

Şekil 2'de deniz ortamı ve içinde bulunan yapının sonlu elemanlar modeli görülmektedir. Şeklin solunda Eulerian partı oluşturan deniz ortamı ve Lagrangian partı oluşturan kompozit yapı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi Eulerian part, malzeme atanmış ve malzeme atanmamış (void) kısımlardan oluşmaktadır.

CEL yöntemi, bir elemanda oluşan boşlukları da içeren çoklu malzemeleri desteklemektedir. Ağ boyunca akıcı malzeme, Eulerian elemanlar ile dolu olan malzeme sayesinde Eulerian Volume Fractions (EVF) yöntemiyle izlenmektedir. Eğer bir malzeme, elemanı tamamen dolduruyorsa EVF 1, eleman içinde malzeme yoksa EVF 0

olarak alınmaktadır. Şekil 2'nin sağında Lagrangian kısma göre belirlenen Eulerian kısmının boyutları görülmektedir.  $4L \times 4B \times 6h$  boyutları uzak alan etkilerini ortadan kaldıracak şekilde belirlenmiştir (Liang ve Tao, 2017, Ren vd., 2017).

Eulerian ve Lagrangian kısımlar oluşturulduktan sonra bu kısımlara ilgili malzemeler atanır. Yapı

modellemesinde köpük, beton ve plastik malzeme özellikleri kullanılırken, deniz ortamı modellemesinde deniz suyuna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. Deniz suyu EOS malzeme olarak tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Eulerian ve Lagrangian kısımlar için malzeme özellikleri

Lagrangian kısım			Eulerian kısım		
	Beton	Köpük	Plastik	Tuzlu su	
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2400	30	1190	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1025
Elastisite modülü (N/m <sup>2</sup> )	$32 \times 10^9$	$15 \times 10^5$	$3.0 \times 10^9$	Dinamik viskozite (Ns/m <sup>2</sup> )	$1.50 \times 10^{-3}$
Poisson oranı	0.20	0.10	0.46	Su içinde sesin hızı (m/s)	1560

Oluşturulan modele malzeme ataması yapıldıktan sonra çözümlenmede kullanılacak yükleme durumu ve sınır şartları belirlenir. Şekil 2'de Eulerian kısma ait akım yönleri görülmektedir. Denklem (1) ile verilen Lineer Dalga teorisine ait hız profili giriş yüzeyine tanımlanır. Çıkış yüzeyinde ise herhangi bir tanımlama yapılmaz ve parametreler program tarafından belirlenir. Tabanda ve yan yüzeylerde yüzeye dik hız bileşenleri sıfır alınarak sınır şartları tanımlanmıştır. Tüm modele ise  $g=9.81 \text{ m/s}^2$  yer çekimi etki ettirilmiştir. Yapının y yönünde deplasmanına, x yönünde ise dönmesine izin verilmiştir.

### Ağ tasarımı

Modellemede kullanılacak en uygun nokta ve eleman sayılarını belirlemek için artan ya da azalan nokta ve eleman sayıları ile ön analizler yapılır. Belirlenen bir sonuç parametresi için değişen nokta ve eleman sayıları ile analizler gerçekleştirilir. Sonuçların birbirine yaklaştığı nokta ve eleman sayısı model için en uygun nokta ve eleman sayısı olarak belirlenir. Yapılan

ön analizlere hassaslık analizi denilmektedir. Bu çalışmada hassaslık analizi, doğal frekans değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli, Denklem (8)'deki matrisler ile verilmiştir.

$$[k]\{X\} - \lambda [m]\{X\} = 0 \quad (8)$$

Denklemde, k ve m sırasıyla rijitlik ve kütle matrisleridir.  $\lambda$  doğal frekansın karesi, X ise yapının deplasmanıdır. Sonlu elemanlar programı Denklem (8)'in çözümünde Lanczos Yöntemini kullanmaktadır.

Artan nokta sayısına karşılık gelen doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Frekans değerlerinin değişmediği nokta sayısı, ideal nokta sayısıdır. Tablo 3'te, değişen nokta ve eleman sayılarına karşılık gelen doğal frekans değerleri verilmiştir. Modellemede CEL analizine uygun C3D8R tipinde elemanlar kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Model 1'e ait hassaslık analizi sonuçları

Noktalar arası uzaklık (m)	0.15	0.10	0.075	0.05	0.025
Düğüm sayısı	546	1344	3210	9225	68904
Eleman sayısı	360	980	2556	7840	63476
Doğal frekans (rad/s)	$7.671 \times 10^{-4}$	$1.272 \times 10^{-3}$	$1.549 \times 10^{-3}$	$1.560 \times 10^{-3}$	$1.563 \times 10^{-3}$

En uygun nokta ve eleman sayısını elde etmek için yapılan ön analiz sonuçlarına Tablo 3'te yer verilmiştir. Noktalar arası uzaklık 0.075'den

0.025'e azalırken modal analiz sonuçlarında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Elde edilen sonuçlara göre modelde kullanılan nokta

sıklığı 0.075 m olarak belirlenmiştir. Böylece kompozit yapı modelinde 3210 nokta ve 2556 eleman kullanılmıştır. Modelin Eulerian kısmını oluşturan deniz ortamında ise 80736 nokta ve EC3D8R tipinde 74727 eleman kullanılmıştır. Noktalar arası uzaklık ise 0.175 m'dir.

### Çözüm Yöntemi

CEL yöntemi, büyük deformasyonların olduğu akışkan yapı etkileşim problemlerini çözmekte kullanılmaktadır. Eulerian analizleri çok büyük deformasyonlar içeren akış problemlerinde etkilidir. Bu uygulamalarda, Lagrangian elemanları büyük oranda bozulmuş ve hassasiyetini kaybetmiş biçimdedir. Eulerian-Lagrangian teması, Eulerian malzemelerin doğrusal olmayan Lagrangian analizleri ile birleşmesine olanak sağlamaktadır.

Eulerian ve Lagrangian kısımların etkileşimi, Penalty kontak modeli ile tarif edilen genel temas algoritmaları ile sağlanır. Bu sayede, diğer akışkan-yapı etkileşim modellerinde olduğu gibi temas yüzeyi tanımlaya gerek kalmaz. Birleşik Eulerian-Lagrangian analizleri sadece dinamik Explicit yöntem ile gerçekleştirilir. Denklem (9)'un Explicit çözümü ile CEL yönteminde akışkana aktarılabilecek deplasmanlar elde edilir.

$$m^{NJ}\ddot{X}^N|_t = (F^J - I^J)|_t \quad (9)$$

Denklem (9)'da,  $m^{NJ}$  kütle matrisi,  $\ddot{X}$  ivme,  $t$  zaman,  $F^J$  akışkandan aktarılan dış yük vektörü ve  $I^J$  elemanlardaki gerilmelerden oluşan iç kuvvet vektörünü temsil etmektedir. Cisim için hareket denklemleri, Explicit kuralı için tanımlanan ve aşağıda verilen denklemlere göre oluşturulmaktadır.

$$\dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N = \dot{X}_{(i-\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{X}_i^N \quad (10)$$

$$X_{(i+1)}^N = X_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (11)$$

$$\ddot{X}_{(i)}^N = (m^{NJ})^{-1} (F_i^J - I_i^J) \quad (12)$$

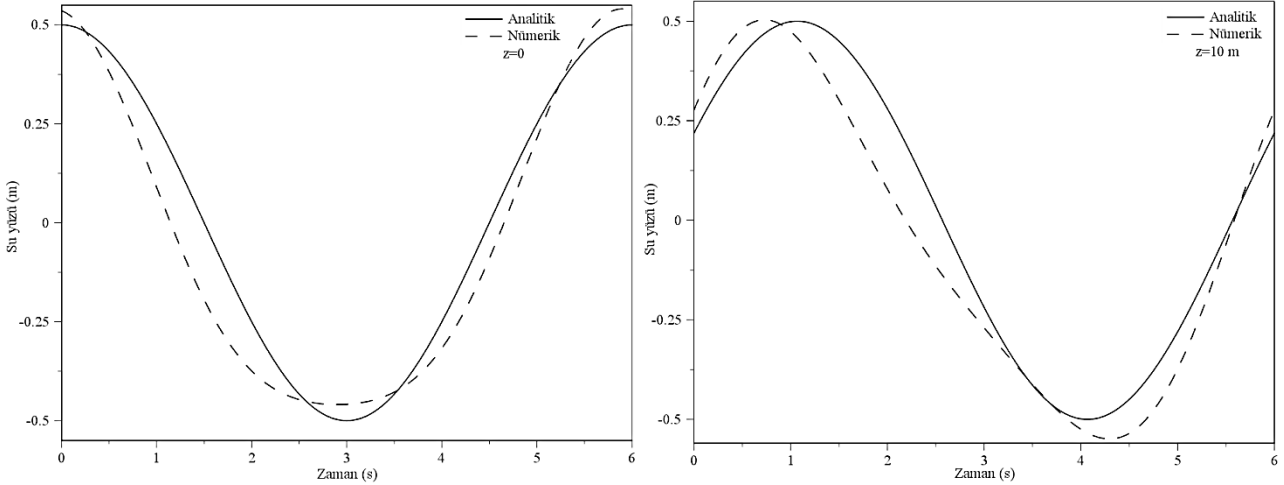
$X^N$ ,  $\dot{X}^N$  ve  $\ddot{X}$ , ( $N$ ) serbestlik derecesinde ki, sırasıyla, deplasman, hız ve ivme bileşenleridir. Hız ve deplasman değerleri, ivme değerlerinin hesaplanmasının ardından bulunur.

Bir sonraki zaman adımındaki bilinmeyen çözümü, herhangi bir iterasyon yapmadan önceki zaman adımının çözümü ile doğrudan hesaplanabilir. Explicit integrasyon işlemleri koşullu kararlıdır. Nümerik olarak kararlılık, her bir zaman adımında kritik zaman artışı tanımlanarak sağlanır. Zaman artış büyüklüğü, malzemenin her bir artış adımında birden çok elemana akışını engelleyerek otomatik olarak uyumlu hale getirmektedir.

Sonlu elemanlar analizleri bir dalga periyodu süresi olan 6 s için 0.01s zaman adımıyla ( $\Delta t$ ) gerçekleştirilmiştir. Zaman artış deformasyonunun Eulerian aşamasında engellendiği sırada, büyük deformasyona sahip elemanlar otomatik olarak tekrar meshlenir komşu elemanlar arasındaki ve ilgili malzeme akışı hesaplanır. Hangi elemanların önemli oranda deforme olduğu ise Lagrangian aşama sonundaki her bir zaman artışı ile belirlenir. Eulerian aşama sırasında bu elemanların sıfır veya küçük deformasyon yaparak pasif durumda olmasına müsaade edilmesi, çözüm performansını artırmaktadır. Genel olarak, hareketsiz elemanların Eulerian analizde görsel olarak bir etkisi yoktur. Fakat çok büyük bir ölçek katsayısı kullanılması durumunda, deformasyon toleransı içinde kalan elemanlar için, Eulerian mesh yapısında az da olsa deformasyonlar gözlenebilir.

### Analiz Bulguları

Bu bölümde malzeme özellikleri bakımından farklılık gösteren iki yapının doğal frekans, ve gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bunun yanında analitik olarak elde edilen dalga profili ile nümerik olarak elde edilen dalga profilinin uyumu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Farklı konumlarda ki su yüzü profilleri

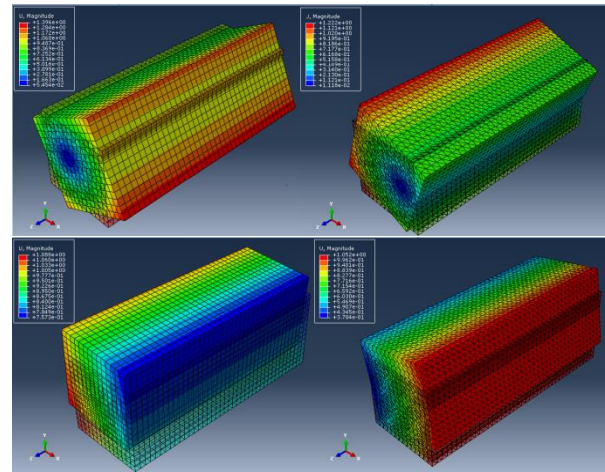
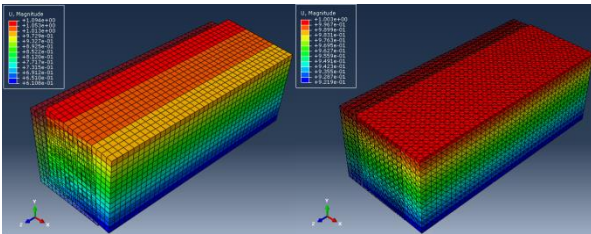
Şekil 3'te farklı konumlarda ki dalga su yüzü profilleri görülmektedir. Nümerik modelin boyutlarına göre belirlenen iki farklı konum için elde edilen değerler şekilde görülmektedir.

Tablo 4'te yapıların doğal frekans değerleri verilmiştir. Model 1 kompozit malzemeden üretilmiş, Model 2 ise sert plastik malzemeden üretilmiş yapıyı temsil etmektedir.

Tablo 4. İlk üç doğal frekans

Model	$\omega_1$ (rad/s)	$\omega_2$ (rad/s)	$\omega_3$ (rad/s)
1	$1.549 \times 10^{-3}$	$1.922 \times 10^{-3}$	$2.525 \times 10^{-3}$
2	$5.661 \times 10^{-3}$	$8.482 \times 10^{-3}$	$1.074 \times 10^{-2}$

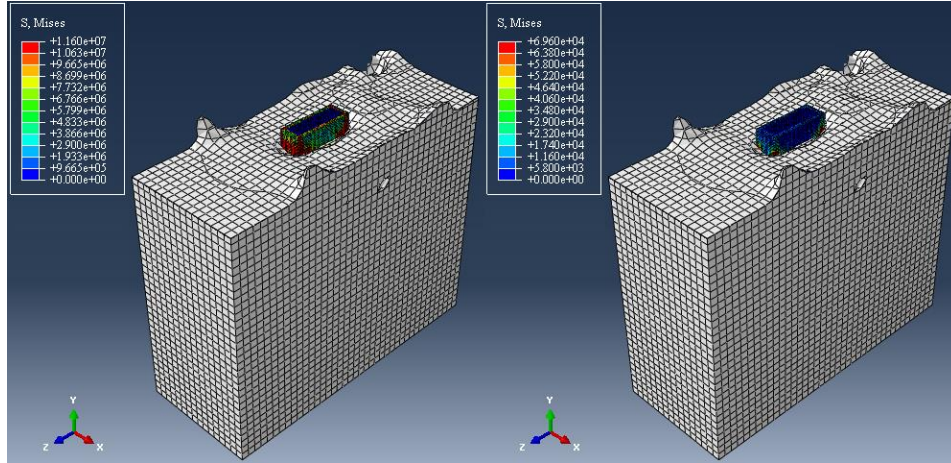
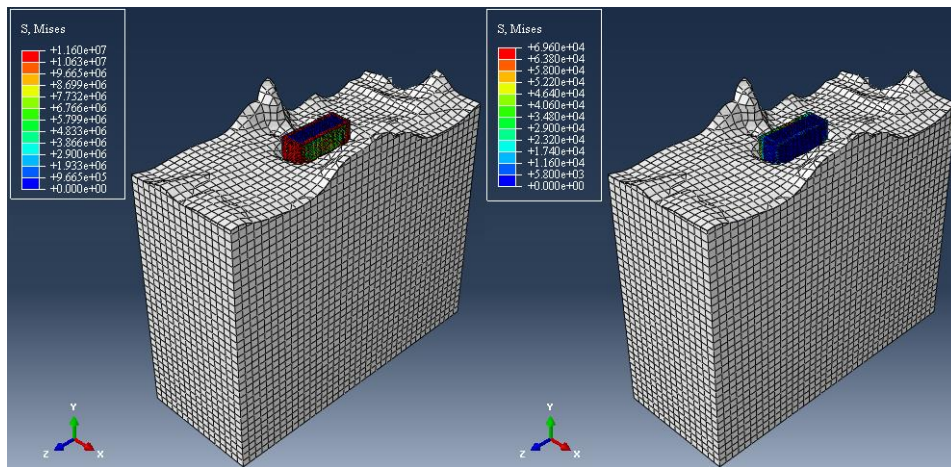
Tablo 4 ile verilen değerlerle ilgili mod şekilleri ise Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 4'ün solundaki mod şekilleri Model 1'e sağdakiler ise Model 2'ye aittir.



Şekil 4. Yapıların mod şekilleri

Şekil 5'te yapıların zamanla değişen gerilme dağılımları görülmektedir. Şekil 5'in solundaki gerilme dağılımları birinci modele, sağdaki gerilme dağılımları ise ikinci modele aittir. Şekil 5. a'da  $t=3$  s'de yapılarda oluşan gerilme dağılımları görülmektedir. Şekil 5. b'de ise  $t=5$  s'de yapılarda oluşan gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 5.a.  $t=3s$ 'deki gerilme dağılımıŞekil 5.b.  $t=5s$ 'deki gerilme dağılımı

## Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada farklı malzeme özelliklerine sahip, iki farklı yüz yapının numerik analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde akış ortamını oluşturan dalga modeli Eulerian, yapılar ise Lagrangian yaklaşımı ile modellenmiştir. İki ortamın etkileşimi CEL yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Çözümlemede Explicit çözücüsü kullanılmıştır.

İlk olarak numerik modelin tahkiki dalga su yüzü profili üzerinden gerçekleştirilmiştir. CEL yaklaşımı ile modellenen dalga serbest yüzeyinin hareketi numerik olarak elde edilmiştir. Ardından Linear dalga teorisine ait su yüzü profili denklemi kullanılarak serbest yüzey hareketi analitik olarak elde edilmiştir. Su yüzü profillerine ait sonuçlar Şekil 3'te görülmektedir.  $Z=0$  konumunda analitik olarak

elde edilen dalga profili  $+0.50$  ile  $-0.50$  aralığında salınım yapmaktadır. Aynı konumda numerik olarak elde edilen değer ise  $-0.44$  ile  $+0.54$  aralığındadır.  $Z=10$  m konumunda ise analitik sonuçlarda salınım  $+0.50$  ile  $-0.50$  aralığında iken, numerik sonuçlarda ise  $-0.53$  ile  $+0.51$  aralığındadır. Analitik sonuçlar ile numerik sonuçlar arasındaki fark maksimum % 12'dir. Su yüzü profillerinin uyumu gerek sayısal gerekse görsel olarak tahkik edilmiştir. Dalga profillerinin uyumu kontrol edilirken içine yapı yerleştirilmeden sadece dalga modeli oluşturulmuştur. Belirlenen iki noktada su yüzü profilleri elde edilmiştir. İçine yapı yerleştirilmesi durumunda akımın yapısı bozulacağı için analitik yöntemle karşılaştırma doğru sonuç vermeyecektir.

Yapıların ilk üç modu için elde edilen frekans değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Bu modlara

ait mod şekilleri ise Şekil 4'te görülmektedir. İki farklı yapının modal davranışlarının benzer olduğu görülmektedir.

Yapılar üzerinde oluşan Von-Mises gerilme dağılımları farklı zamanlar için elde edilmiştir. Model 1'in dış yüzeyini oluşturan beton kısımda gerilmeler yoğunlaşmış ve bu kısımda sınırlı kalmıştır Model 2'de ise gerilme dağılımı yapı üzerinde dağılım göstermiştir. Maksimum gerilme değeri Model 1'de  $1.160 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>, Model 2'de ise  $6.690 \times 10^4$  N/m<sup>2</sup> olmuştur.

İki farklı yapı modal davranışlara göre incelendiğinde davranışların bir birine benzediği Şekil 4'te görülmektedir. Yapılar gerilmeler açısından incelendiğinde plastik malzemedan üretilen Model 2'nin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Ancak yıpratıcı ve bakımın zor olduğu deniz ortamı göz önünde bulundurulduğunda delinme, yırtılma gibi dış etkilere daha dayanıklı olan Model 1'in daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Sonlu elemanlar çözümlerinde kullanılan nokta ve eleman sayılarının, sonuçları ve çözüm süresini etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada öncelikle en uygun nokta ve eleman sayıları belirlenmiştir. CEL yaklaşımına uygun olan elemanlar kullanılmıştır. Yapı için altı yüzlü (hexahedral), sürekli, üç boyutlu, 8 noktalı, 1 integrasyon noktalı (reduced integration) C3D8R tipinde, akışkan için ise aynı özelliklerde, EC3D8R tipinde elemanlar kullanılmıştır. Nokta ve eleman sayıları Tablo 3'te sunulmuştur. Aynı fiziksel problemin Eulerian-Lagrangian yaklaşım yerine sadece Lagrangian yaklaşımla çözülmesi durumunda kullanılacak nokta ve eleman sayıları değişecektir. Eleman tipi ise C3D10M olacaktır. Yapı modelinde noktalar arasında ki mesafe aynı kalmak şartıyla, 24740 nokta ve 16785 eleman kullanılacaktır. Artan nokta ve eleman sayılarının yanında akışkan ve yapı farklı ara yüzlerde modellenecektir. Ara yüzler arasında etkileşim tanımlanan temas yüzeyleri üzerinden sağlanacaktır.

Farklı ara yüz kullanılması, nokta ve eleman sayılarının artması bellek gereksinimlerini

arttırmaktadır. Artan bellek gereksinimleriyle birlikte çözüm süresi de artmaktadır. Bu nedenle, çalışmada kullanılan modele benzer akışkan-yapı etkileşim problemlerinde Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birlikte kullanılması çözümü kolaylaştıracaktır. Aynı zamanda, deformasyonların fazla olduğu etkileşim problemlerinde, Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birlikteliğinin daha iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir.

## Kaynaklar

- Aboshio, A., Ye, J., (2016). Numerical study of the dynamic response of inflatable offshore fender barrier structures using the Coupled Eulerian-Lagrangian discretization technique, *Ocean Engineering*, 112, 265–276.
- Aquelet, N., Souli, M., Olovsson, L., (2006). Euler-Lagrange coupling with damping effects: application to slamming problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 195, 110–132.
- Benson, D.J., Okazawa, S., (2004). Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 193, 4277-4298.
- Chen, X., Miao, Y., Tang, X., Liu, J., (2017). Numerical and experimental analysis of a moored pontoon under regular wave in water of finite depth, *Ships and Offshore Structures*. 12:3, 412-423.
- Christensen, E.D., Bingham, H.B. Friis, A.P.S., Larsen, A.K., Jensen, K.L., (2018). An experimental and numerical study of floating breakwaters, *Coastal Engineering*, 137, 43–58.
- Dassault Systemes, Abaqus, Version 6.10 documentation, 2010.
- Ducobu, F., Riviere-Lorphevre. E., Filippi, E., (2016). Application of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method to the modeling of orthogonal cutting, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 59, 58-66.
- Gao, R.P., Wang, C.M. Koh, C.G., (2013). Reducing hydroelastic response of pontoon-type very large floating structures using flexible connector and gill cells, *Engineering Structures*, 52, 372–383.
- Gücüyen, E., Erdem, R.T., (2016). Açık deniz uzay kafes sistemin çevresel yükler altında akışkan-yapı etkileşimli analizi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi mühendislik dergisi*, 7:3, 433-444.

- Loukogeorgaki, E., Lentsiou, E.N., Aksel, M., Yagci, O., (2017). Experimental investigation of the hydroelastic and the structural response of a moored pontoon-type modular floating breakwater with flexible connectors, *Coastal Engineering* 121, 240–254.
- Zhang, H., Xu, D., Zhao, H., Xia, S., Wu, Y., (2018). Energy extraction of wave energy converters embedded in a very large modularized floating platform, *Energy* 158, 317-329.
- Haicheng, Z., Daolin, X., Huai, Z., Shuyan, X., Yousheng, W., (2018). Energy extraction of wave energy converters embedded in a very large modularized floating platform, *Energy*, 158, 317-329.
- Han Y., Le C., Ding H., Cheng Z., Zhang P., (2017). Stability and dynamic response analysis of a submerged tension leg platform for offshore wind turbines, *Ocean Engineering*, 129, 68-82.
- Huang, S., Sheng, S., Gerthoffert, A., Cong, Y., Zhang, T., Wang, Z., (2019). Numerical design study of multipoint mooring systems for the floating wave energy converter in deep water with a sloping bottom, *Renewable Energy*, 136, 558-571.
- Ji, C., Cheng, Y., Yang, K., Oleg, G., (2017). Numerical and experimental investigation of hydrodynamic performance of a cylindrical dual pontoon-net floating breakwater, *Coastal Engineering*, 129, 1-16.
- Ji, C., Cheng, Y., Cui, J., Yuan, Z., Gaidai O., (2018). Hydrodynamic performance of floating breakwaters in long wave regime: An experimental study, *Ocean Engineering* 152, 154–166.
- Korobenko, A., Yan, J., Gohari, S.M.I., Sarkar, S., Bazilevs, Y., (2017). FSI Simulation of two back-to-back wind turbines in atmospheric boundary layer flow, *Computers and Fluids*, 158, 167-175.
- Liang, Y., Tao, L., (2017). Interaction of vortex shedding processes on flow over a deep-draft semi-submersible, *Ocean Engineering*, 141, 427-449.
- Liu, J., (2016). A second-order changing-connectivity ALE scheme and its application to FSI with large convection of fluids and near contact of structures, *Journal of Computational Physics*, 304, 380–423.
- Liu, H., Xu, K., Zhao, Y., (2016). Numerical investigation on the penetration of gravity installed anchors by a coupled Eulerian–Lagrangian approach. *Applied Ocean Research* 60:94–108.
- Loukogeorgaki, E., Yagci, O., Kabdasli, M.S., (2014). 3D Experimental investigation of the structural response and the effectiveness of a moored floating breakwater with flexibly connected modules, *Coastal Engineering*, 91, 164–180.
- Maa, R., Bia, K., Hao, H., (2018). Mitigation of heave response of semi-submersible platform (SSP) using tuned heave plate inerter (THPI). *Engineering Structures* 177, 357–373.
- Martínez, E.L., Quiroga, A.G., Jardini, A.L., Filho, R.M., (2009). Computational fluid dynamics simulation of the water–sugar cane bagasse suspension in pipe with internal static mixer, *Computer Aided Chemical Engineering*. 26, 683-688.
- Ning DZ, Zhao XL, Zhao M, Hann M, Kang HG. Analytical investigation of hydrodynamic performance of a dual pontoon WEC-type breakwater, *Applied Ocean Research*, 65:102-111. 2017.
- Reddy, J.N., (2010). Principles of Continuum Mechanics. Cambridge University Press, New York, USA.
- Ren, B., He, M., Li, Y., Dong, P., (2017). Application of smoothed particle hydrodynamics for modeling the wave-moored floating breakwater interaction, *Applied Ocean Research*, 67, 277-290.
- Sha, Y., Amdahl, J., Aalberg, A., Yu, Z., (2018). Numerical investigations of the dynamic response of a floating bridge under environmental loadings, *Ships and Offshore Structures*, 13:1, 113–126.
- Tang, H., Huang, C.C., Chen, W.M., (2011). Dynamics of dual pontoon floating structure for cage aquaculture in a two-dimensional numerical wave tank, *Journal of Fluids and Structures*, 27, 918–936.
- Yanga, Z., Xie, M., Gao, Z., Xu, T., Guo, W., Ji, X., Yuan, C., (2018). Experimental investigation on hydrodynamic effectiveness of a water ballast type floating breakwater, *Ocean Engineering*, 167, 77-94.
- Zhan, J.M., Chen, X.B., Gong, Y.J., Hu, W.Q., (2017). Numerical investigation of the interaction between an inverse T-type fixed/ floating breakwater and regular/irregular waves, *Ocean Engineering*. 137, 110–119.
- Zhao, Y.P., Bai X.D., Dong, G.H., Bi, C.W., (2016). Deformation and stress distribution of floating collar of net cage in steady current, *Ships and Offshore Structures*. doi: 10.1080/17445302.2016.1210321.

## Investigation of Composite Marine Structure under Wave Loads

### Extended abstract

*Floating structures have become prevalent because of being used in any depth in shallow water, transition zone and deep water. pontoons which are situated in bottom parts of these structures provide floating. pontoons perform service either fully submerged or semi submerged.*

*In this study, numerical analysis of semi submerged pontoons which are manufactured from different materials is performed under the effect of wave forces. While outer part is designed as concrete, inner part is designed as foam of the first structure (Model 1). On the other hand, second structure is designed from only rigid plastic material. Abaqus finite elements analysis program is used in the analyses. Bilateral fluid-structure interaction analyses are utilized between the structure and the marine environment where the structure exists. Combination of Eulerian-Lagrangian approaches (CEL) is used in modelling phase of bilateral interaction analysis.*

*To create a coupled Eulerian-Lagrangian model in Abaqus/CAE, simply instance both Eulerian and Lagrangian parts in the same assembly. Eulerian material can interact with Lagrangian elements by Eulerian-Lagrangian contact; simulations including this type of contact are usually attributed to as coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) analyses. This significant property of Abaqus/Explicit general contact allows fully coupled multi-physics such as fluid-structure interaction simulation.*

*While marine environment is modelled by Eulerian approach, structure is modelled as Lagrangian approach. Linear wave velocity profile is used while modelling the marine environment. Sensitivity analyses are performed to determine the most proper node and element numbers in the solutions. These analyses are carried out through modal behavior.*

*Proper elements which are compatible with CEL approach are used in the program. While 8-node, continuum, three dimensional, 8 node and reduced integration (C3D8R) type element is used*

*for the structure, EC3D8R type elements having the same properties are used for fluid.*

*Node and element numbers change in terms of solving the same physical problem by only Lagrangian approach instead of Eulerian-Lagrangian approach. In this situation, Element type will be C3D10M. Node and element numbers will increase in case of considering the same seed sizes in the structural model. In addition to increasing node and element numbers, fluid and structure will be modelled in different interfaces. Due to different interfaces and increase in node and element numbers will also increase the memory requirement and extend the solution times. So, performing both Eulerian-Lagrangian approaches together in similar fluid-structure interaction problems will make the solution easier.*

*Analysis of the numerical model is performed through wave water surface profiles. Time-varying water surface profiles are analytically and numerically obtained in two different points. The accordance between analytic and numerical wave profiles is both visually and numerically determined.*

*Modal behaviors, frequencies and stress distributions are determined in structural analysis. At the end of the study, node and element numbers are obtained in case of using different fluid-structure interaction technique. Effect of these values on the solution is discussed in terms of time and memory requirement.*

**Keywords:** *Fluid-structure interaction, numerical analysis; Eulerian-Lagrangian approaches; floating structures*