

BETON KAZIKLI AÇIK DENİZ YAPISININ ANALİZİ

¹Engin GÜCÜYEN, ²Recep Tuğrul ERDEM

^{1,2}Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

¹engin.gucuyen@cbu.edu.tr, ²tugrul.erdem@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 15.02.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.05.2018)

ÖZ: Bu çalışma kapsamında, alt yapısı kazıklar ile modellenen açık deniz platformunun yapısal davranışı farklı akışkan-yapı etkileşim analiz yöntemlerine göre belirlenmiştir. Yapılan analizlerde, öncelikle çift yönlü akışkan-yapı etkileşimi gerçekleştirilmiştir. Yapı çevresindeki akım, nonlinear dalga teorilerinden Stokes 5 dalga teorisi ile modellenmiştir. Çift yönlü akışkan yapı etkileşiminde Stokes 5 dalga teorisine ait hız profili Abaqus/CFD çözücüsü kullanılarak modellenmiştir. Akışkanı oluşturan deniz ortamı, Abaqus/CFD çözücüsünde modellenirken, platform Abaqus/Explicit çözücüsünde modellenmiştir. Akışkan-yapı etkileşim (FSI) modülü ile iki çözücünün etkileşimi sağlanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kullanılacak eleman sayısını belirleyen hassaslık analizi modal analiz üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile yapının modal davranışının yanında, deplasman ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Çift yönlü etkileşim analizi ile akışkana ait çıktılar sayısal ve görsel olarak elde edilmiş ve yapı etrafındaki akış yapısı gözlemlenmiştir. Çalışmada ikincil olarak, tek yönlü akışkan yapı etkileşim analizi yapılmıştır. Bu analizde yapı, yarı analitik çok serbestlik dereceli (MDOF) sistem olarak modellenmiştir. Dalga hızları, ilk yöntemde olduğu gibi Stokes 5 dalga teorisi ile hesaplanmıştır. Dalga kuvvetleri Morrison denklemi üzerinden sayısal olarak elde edilmiştir. Bu kuvvetler hareket denkleminde dış kuvveti oluşturmuştur. Hareket denklemi ile yapının deplasman ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Her iki analizden elde edilen sonuçların uyumu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık deniz yapısı, Sonlu elemanlar analizi, Stokes 5, Yarı analitik analiz

Analysis of Offshore Structure with Concrete Piles

ABSTRACT: In the scope of this study, structural behavior of the offshore platform whose substructure is modeled by piles is determined according to different fluid-structure interaction analysis methods. Bilateral fluid-structure interaction is primarily performed in the analyses. Flow around the structure is modeled by Stokes 5 wave theory which is an example of nonlinear wave theories. Velocity profile of Stokes 5 wave theory is modeled by using Abaqus/CFD solver in the bilateral fluid-structure interaction. While the marine environment of the fluid is modeled by Abaqus/CFD solver, the platform is modeled by Abaqus/Explicit solver. Fluid-structure interaction (FSI) is provided by the interaction of two solvers. Sensitivity analysis that determines number of nodes and elements in the finite elements model is performed through modal analysis. Displacement and stress values are obtained as well as the modal behavior of the structure by finite elements analysis. Wave velocity profiles are determined by both numerically and visually by bilateral interaction analysis and flow structure around the structure is observed. Secondly, unidirectional fluid-structure interaction analysis is performed in the study. In this analysis, the structure is modeled as semi analytical multi degree of freedom (MDOF) system. Wave velocities are calculated by Stokes 5 wave theory same as in the case of the first method. Wave forces are numerically determined by Morrison equation. These forces constitute the external force in the equation of motion. Displacement and natural frequency

values of the structure are determined by the equation of motion. The compatibility between the results of both analyses is observed.

Key Words: *Offshore structure, Finite element analysis, Stokes 5, Semi analytical analysis*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen inşaat teknolojileriyle beraber, özel yapıların inşası hız kazanmıştır. Bu özel yapı tiplerinden biri de açık deniz yapılarıdır. Boru hatları ve platformlar, açık denizlerde en yaygın kullanılan yapılarıdır. Açık deniz platformları; petrol arama-çıkarma, rüzgar ve güneş enerjisi tesisleri, gemi yanaşma yapısı, uçak ve helikopter pisti gibi geniş ve yaygın kullanım alanına sahiptir (Lamas-Pardo ve diğ., 2015; Yan ve diğ., 2018). Üstyapıyı taşıyan platform, platformu taşıyan altyapı ve temelden oluşan yapıların altyapıları, tekil kazık, çoklu kazık ya da kafes sistem şeklinde tasarlanabilmektedir (Farrugia ve diğ., 2014; Shi ve diğ., 2015). Kafes sistem tipi yapılar çelik, diğer iki tip ise çelik ya da beton olabilmektedir. Beton ve çelik kadar yaygın olmamakla beraber, ahşap ve alüminyum açık deniz yapılarında kullanılmaktadır. Platform altyapısı gerek platformdan gelen, gerekse kendisine etki eden yükleri güvenli bir şekilde temele aktaracak şekilde tasarlanmaktadır. Yapının toplam maliyetinin 30-40 % arasını oluşturması maliyet bakımından, kuvvetleri temele aktarması ise yapısal bakımdan altyapıyı önemli hale getirmektedir (Halder ve diğ., 2018).

Açık deniz yapılarının kullanılmasına başlandığı ilk yıllarda çeliğin üretiminin az olması nedeniyle, beton kullanımı çeliğe göre daha yaygındır. Çelik endüstrisinde meydana gelen gelişmelerle beraber artan üretim, açık deniz yapılarında çelik kullanımını arttırırken, beton kullanımını azaltmıştır. Ancak, son yıllarda yüksek dayanımlı ve ön gerilmeli beton teknolojilerindeki gelişmelerle beraber, açık deniz yapılarında betona yönelim tekrar başlamıştır. Yorulma ömrünün uzun olması, buzlanma, korozyon gibi dış etkilere karşı daha dayanıklı olması ve gövde bakım maliyetinin çelik ile kıyaslandığında daha az olması, betonun avantajları olarak sayılabilir. Bununla birlikte, çelik gövde ile karşılaştırıldığında beton gövdedeki hareket kabiliyeti kaybı, betonun sağladığı avantajlar ile dengelenebilir (Yee, 2007; Fernandez ve Pardo, 2013).

Deniz yapıları, faydalı ömürleri boyunca dalga, rüzgâr, akıntı, deprem gibi çeşitli çevresel yüklerin etkisi altında kalırlar. Bu yüklerin yanında yıkıcı etkiye sahip gemi çarpması, korozyon, buzlanma ve şiddetli fırtına gibi olumsuz çevresel şartlara da maruz kalabilirler (Li ve diğ., 2017; Zhang ve diğ., 2017a). Sayılan yükler arasında tasarımda en etkili olanı, dalga kuvvetleridir. Bunun nedeni, dalga kuvvetlerinin yapı üzerinde dinamik, uzun süreli ve kararsız etki yapmasıdır (Li ve diğ., 2011). Denizle temas etmeyen kısım yüksekliğinin artmasıyla beraber, dalga kuvvetlerinin yanında rüzgâr kuvveti de yapı üzerinde etkili olmaya başlar. (Hall ve diğ., 2014). Yapı bulunduğu bölgeye göre, deprem kuvvetlerinin etkisi altında kalabilir. Depremin kazık tipi deniz yapısı üzerinde yaptığı etkinin yanında, zemin sıvılaşmasına neden olmasıyla birlikte oluşturduğu hasar daha yıkıcıdır (Wang ve diğ., 2017).

Dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında, yapının konumuna göre belirlenen dalga teorileri kullanılır. Bu teoriler en genel olarak; Lineer, Stokes ve Cnoidal dalga teorileridir. Cnoidal dalga teorisi sığ suda, Stokes dalga teorisi derin suda, Lineer dalga teorisi ise her bölgede geçerlidir. Belirlenen teoriye ait hız profilleri kullanılarak, dalga kuvvetleri hesaplanır. Hesaplamalarda Morrison ya da Difraksiyon teorisi denklemleriyle, analizlerde kullanılacak dalga kuvvetleri elde edilir.

Bu çalışmada, dalga kuvvetlerinin etkisi altındaki bir açık deniz platformunun dinamik analizi yapılmıştır. Yarı analitik analiz yöntemleri ve nümerik analiz yöntemleri açık deniz yapılarının dinamik analizinde sıklıkla uygulanmaktadır. Akışkan yapı etkileşimine ait görsel sonuçlara ve yapı etrafındaki akış yapısının belirlenmesine ihtiyaç olmayan durumlarda, yarı analitik çözümler kullanılmaktadır. Bu çözümler içinde en sık kullanılan tek serbestlik dereceli sistem ve çok serbestlik dereceli sistem yöntemleridir (Park ve Kim, 2013). Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojileriyle beraber, yarı analitik

yöntemlerin yanında, yüksek bilgisayar kapasitesi gerektiren nümerik analiz yöntemleri de kullanılmaya başlanmıştır. Bu yapılar buldukları konum nedeniyle, akışkan ile etkileşim halindedir. Bu nedenle, yarı analitik ya da nümerik yöntemlerde akışkan yapı etkileşim analizleri kullanılır. Akışkan-yapı etkileşim analizleri, tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere iki tiptedir. Yarı analitik analiz yöntemleri tek yönlü, nümerik analiz yöntemleri ise tek ya da çift yönlü olabilmektedir. (Gücüyen ve Erdem, 2014; Gücüyen ve Erdem, 2016) tarafından belirtildiği gibi tek yönlü analizde, akışkandan yapıya kuvvet aktarılır, yapıdan akışkana tepki aktarılmaz. Çift yönlü analizde ise akışkandan yapıya kuvvet, yapıdan da akışkana kuvvetlerin oluşturduğu deplasmanlar aktarılır.

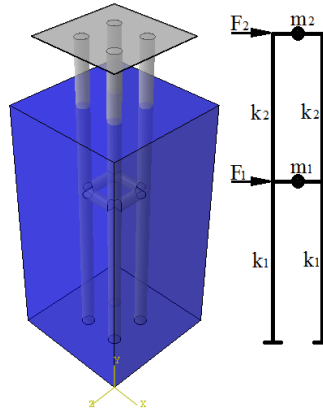
Beton kazıklar ile modellenmiş bir açık deniz platformunun akışkan-yapı etkileşim analizi, bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, tek yönlü ve çift yönlü etkileşim kullanılmıştır. Tek yönlü etkileşimde yapı (Hartnett ve Mitchell, 2000) tarafından modellendiği gibi çerçeve sistem olarak modellenmiştir. Bu çerçeve sistem, iki serbestlik dereceli sisteme indirgenmiştir. Dalga kuvvetlerinin eklendiği çerçeve sistemin hareket denkleminin, nümerik çözümü yapılmıştır. (Froehle ve Persson, 2014). Denklemin bilinmeyen olan, deplasman değerleri elde edilmiştir. Ayrıca kütle ve rijitlik ifadeleri yardımıyla, doğal frekanslar bulunmuştur. Çift yönlü analizde, Abaqus (Abaqus, 2010) sonlu elemanlar programı kullanılarak, yapının deplasman ve doğal frekans değerleri ile yapı etrafındaki hız profilleri elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda iki farklı etkileşim tipi arasındaki benzerlikler ya da farklılıklar analiz sonuçları üzerinden belirlenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, farklı akışkan-yapı etkileşim analizleri kullanılarak, çoklu kazıklarla modellenmiş açık deniz platformunun yapısal davranışı incelenmiştir. Analizlerde, tek yönlü ve çift yönlü etkileşim yöntemleri kullanılarak, akışkan-yapı etkileşiminin yapısal davranış üzerindeki etkileri ortaya çıkarılmıştır. Tek yönlü etkileşimde Runge-Kutta yöntemiyle, iki serbestlik dereceli sisteminin hareketi elde edilmiştir. Dalga kuvvetleri sayısal olarak Morrison denklemleri ile elde edilmiştir. Bu değerler, hareket denklemleri üzerinden yapıya aktarılmıştır. Çift yönlü etkileşim analizinde, Abaqus sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Çift yönlü etkileşim analizi, Abaqus/CFD-Abaqus/Explicit çözücülerinin eş zamanlı etkileşimi ile gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, deplasman ve doğal frekans değerlerini içeren yapısal davranış belirlenmiştir.

Yapı Modeli (Structural Model)

Çalışmada, (Zhang ve diğ., 2017b) tarafından analiz edilen modele benzer bir model kullanılmıştır.



Şekil 1. Çift yönlü ve tek yönlü analiz modelleri

Figure 1. Bilateral and unidirectional analysis models

Modellenen yapı ve çevresi Şekil 1'in solunda görülmektedir. Modelde 60 m boyunda dört adet beton kazık kullanılmıştır. Kazık çapı 2.00 m'dir. Kazıklar arası yatay uzaklık 6.00 m'dir. Kazıklar 30 m'de yatay elemanlar ile birbirlerine bağlanmışlardır. Beton bağlantı elemanlarının çapı 2.00 m'dir. Kazıklar, toplam kütlesi 2.25×10^4 kg olan üst yapıyı taşımaktadır. Modellemede kullanılan betonun birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 , Elastisite modülü $3.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ve Poisson oranı 0.20'dir.

Deniz Ortamı Modeli (Wave Environmental Model)

Şekil 1'de görülen ve mavi renk ile verilen, yüksekliği 50 m olan bölge deniz ortamıdır. Yapının bu bölgesine hidrodinamik dalga kuvvetleri etki etmektedir. Zamanla değişen dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında etkin parametreler, dalga hızı (u) ve ivmesidir (\dot{u}). Bu parametreler, yapının bulunduğu su derinliği (d), dalga yüksekliği (H) ve dalga periyodu (T) ile tespit edilen dalga teorileri ile belirlenir. Bu çalışmada, $d=50$ m, $H=9$ m ve $T=9$ s verilerine bağlı olarak, deniz ortamı Stokes 5 dalga teorisi ile modellenmiştir. Dalga verilerine ve teorisine göre, dalga boyu (L_w) 130.5623 m'dir. Dalga boyunun elde edilmesinin ardından, Denklem (1)-(2) ile hız ve ivme değerleri elde edilir (Barltrop vd., 1991). Denklem (1), sonlu elemanlar programında giriş hızı sınır şartıdır. Denklem (1)-(2) iki serbestlik dereceli sistemde dış kuvvetlerin hesabında kullanılır.

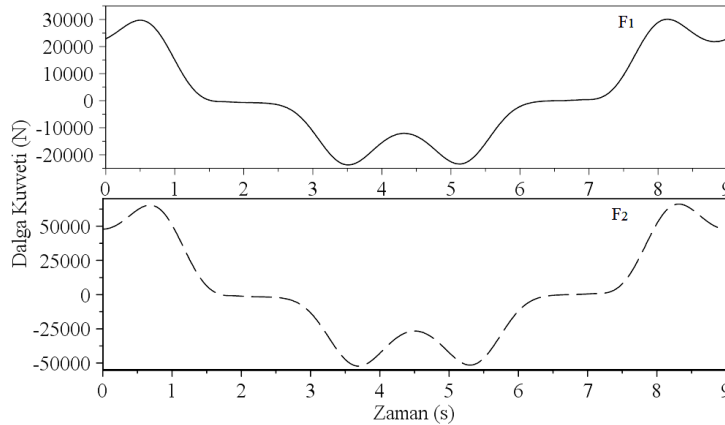
$$u = c \left(\sum_{n=1}^5 n \phi'_n \cosh \left(n \frac{2\pi}{L} (d+y) \right) \cos \left(n \left(\frac{2\pi}{L} y - \frac{2\pi}{T} t \right) \right) \right) \quad (1)$$

$$\dot{u} = \frac{2\pi}{T} c \left(\sum_{n=1}^5 n^2 \phi'_n \cosh \left(n \frac{2\pi}{L} (d+y) \right) \sin \left(n \left(\frac{2\pi}{L} y - \frac{2\pi}{T} t \right) \right) \right) \quad (2)$$

Denklemlerde kullanılan c dalga yayılma hızı, ϕ'_n dalga potansiyel katsayısı olarak (Dean ve Dalrymple, 1991) tarafından açıklanmıştır. Yapıya etki eden dalga kuvveti, Denklem (3) ile verilen sürüklenme ve atalet terimlerini içeren, Morrison denklemleri ile hesaplanır.

$$F = \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho C_D D u_{(y,t)} |u_{(y,t)}| dy + \int_{-d}^{\eta} \rho C_I \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}_{(y,t)} dy \quad (3)$$

Denklemden, η serbest su yüzeyi yüksekliği, ρ tuzlu su yoğunluğu, C_D sürüklenme katsayısı, D çap, C_I atalet katsayısı olarak açıklanır. $C_D=0.7$ ve $C_I=2.0$ değerleri için, Denklem (3) ile hesaplanan dalga kuvvetleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Dalga kuvvetleri

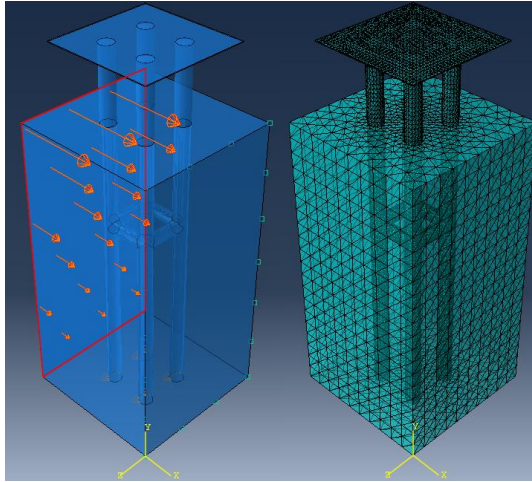
Figure 2. Wave forces

Yapı iki katlı olduğundan F₁ birinci kata, F₂ ikinci kata gelen toplam dalga kuvvetleridir ve etki noktaları Şekil 1’de görülmektedir. Böylece tek yönlü etkileşim analizinde kullanılacak zamanla değişen dalga kuvvetleri elde edilmiştir.

Akışkan-Yapı Etkileşim Analizleri (Fluid-Structure Interaction Analyses)

Çift yönlü akışkan-yapı etkileşim analizi (Bilateral fluid-structure interaction analysis)

Akışkan yapı etkileşiminin çift yönlü olabilmesi için akışkandan yapıya kuvvet, yapıdan da akışkana kuvvetlerin oluşturduğu deplasmanların aktarılması gerekmektedir. Yapıda meydana gelen deplasmanlar ve deformasyonlar, yapı etrafındaki akım çizgilerinde farklılaşmaya sebep olmaktadır. Akışkanda meydana gelen davranış değişimleri, yapıdaki davranışı da etkilemektedir. Karşılıklı etkileşimin ve değişimin göz önünde bulundurulduğu etkileşime, çift yönlü akışkan yapı etkileşimi denmektedir. Bu etkileşim, analiz boyunca karşılıklı veri alışverişi şeklinde devam etmektedir. Çalışmanın bu bölümünde, altyapısı kazıklar ile modellenmiş açık deniz yapısının, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çift yönlü akışkan yapı etkileşimi gerçekleştirilmiştir. Abaqus programı ile yapı ve akışkan modellenerek etkileşimler gerçekleştirilmiştir. Yapı Abaqus/Explicit çözücüsünde, temas ettiği akışkan ise Abaqus/CFD çözücüsünde analiz edilmiştir. İki farklı çözücünün kullanıldığı analizde etkileşim modülü kullanılarak, temas yüzeyleri üzerinden veri alışverişi analiz süresince sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan yapı ve çevresinin sonlu elemanlar modeli, önceki bölümde yer alan Şekil 1’de verilmiştir. Bu modele ait sınır şartları ve ağ yapısı ise, Şekil 3’te görülmektedir.



Şekil 3. Sonlu elemanlar modeline ait sınır şartları ve ağ yapısı

Figure 3. Boundary conditions and mesh structure of the finite elements model

Sonlu elemanlar analiz programı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) çözücüsünü kullanarak akışkandan yapıya aktarılacak kuvvetleri hesaplar. Program, hesaplamalarda sıkıştırılmayan akışkanlar için yazılan, Denklem (4)-(6) ile verilen Navier-Stokes denklemlerini kullanır.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Denklemlerde; u, v ve w x, y, z doğrultularındaki hız bileşenleri, gx, gy ve gz ise aynı doğrultulardaki yer çekimi bileşenleridir. ρ, P ve μ sırasıyla yoğunluk, basınç ve dinamik viskozitedir. Çözücü, denklemlerde yer alan basınç değerlerini hesaplayarak yapıya aktarır. Böylece, akışkandan yapıya veri aktarımı sağlanır. Akışkan modelinde tuzlu su, EOS malzeme olarak modellenmiştir. Akışkan modelinde kullanılan sınır şartları ve malzeme özellikleri Çizelge 1’de görülmektedir.

Çizelge 1. Akışkan sınır şartları ve malzeme özellikleri

Table 1. Boundary conditions and material properties of fluid

Sınır şartları		Malzeme özellikleri	
Giriş	u	Yoğunluk (kg/m ³)	1025
Çıkış	P=0	Dinamik viskozite (Ns/m ²)	1.5×10 ⁻³
Uzak yüzey	u	Sesin tuzlu sudaki hızı (m/s)	1560
Geçirimsiz taban	u=v=w=0	Sabitler	K=Γ ₀ =0

Tablo 1’de verilen giriş sınır şartı, Şekil 3’te oklar ile temsil edilmiştir. Girişin karşı yüzeyi, çıkış olarak tanımlanmıştır. Tabana oturan yüzey, geçirimsiz tanımlanmıştır. Diğer yüzeyler ise uzak yüzeylerdir. Yapının akışkanla temas yüzeylerinden, yapıya dış kuvvetler (P) aktarılır. Yapı modelinin analizinde kullanılan Explicit çözücüsünün kullandığı hareket denklemi, aşağıda verilmiştir.

$$m^{NJ} \ddot{X}^N |_t = (P^J - I^J) |_t \quad (7)$$

Denklem (7)’de; m^{NJ} kütleyi, \ddot{X}^N ivmeyi, t zamanı, P^J CFD çözücüsünden gelen dış kuvveti, I^J yapıda meydana gelen gerilmelerin oluşturduğu iç kuvveti temsil eder. Sonlu elemanlar programı, hareket denkleminin çözümlenmesinde Explicit çözücüsünün sistematiğini kullanarak, yapıdan akışkana aktarılan deplasmanları elde eder. Bu çalışmada, elde edilecek diğer yapısal çıktı doğal frekans değeridir. Sonlu elemanlar programı doğal frekansları hesaplarken Denklem (8)’i kullanır. Akışkan-yapı etkileşim analiziyle beraber modal analiz gerçekleştirilerek, yapının doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar programı, Lanczos Metodu’nu Denklem (8)’e uygulayarak doğal frekans (ω) değerlerini hesaplar. (Reddy, 2004). Denklemden k ve m matrisleri sırasıyla rijitlik ve kütle matrisleridir.

$$[k] \{X\} - \omega^2 [m] \{X\} = 0 \quad (8)$$

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan nokta ve eleman sayılarının, sonuçları etkilediği bilinmektedir. Bunun için, farklı nokta ve eleman sayıları için çözümlenmeler gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılır. Bu yapılan işleme hassaslık analizi denir. Bu çalışmada hassaslık analizi, doğal frekans değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Artan nokta sayısına karşılık gelen doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Frekans değerlerinin değişmediği nokta sayısı, ideal nokta sayısıdır. Çizelge 2’de, değişen nokta ve eleman sayılarına karşılık gelen doğal frekans değerleri verilmiştir.

Çizelge 2. Hassaslık analizi ile elde edilen sonuçlar

Table 2. Obtained results by sensitivity analysis

Noktalar arası uzaklık (m)	Nokta sayısı	Eleman sayısı	Doğal frekans (rad/s)
0.25	405997	387873	2.1823
0.20	670988	440146	3.3634
0.15	1405673	942543	4.3442
0.10	2450504	1387979	4.3919

Tablo 2’de verilen sonuçlara göre, noktalar arası uzaklık 0.15’ten, 0.10’a azalırken nokta ve eleman sayılarında belirgin bir artış olmuştur. Ancak, çıktı olarak elde edilen doğal frekans değerinde belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu çalışmada noktalar arası uzaklık 0.15 m seçilerek, çift yönlü analiz gerçekleştirilmiştir. Belirlenen eleman boyutları için, yapı modelinde 1405673 nokta ve 942543 eleman kullanılmıştır. Akışkan modeli için ise, temas noktalarında yapı ile aynı nokta uzaklığı 0.15 m, diğer kısımlarında ise uzaklık 0.75 m olarak belirlenmiştir. Akışkan modeli bu boyutlardaki, 714998 nokta ve 379935 elemandan oluşmuştur. Yapı modelinde C3D10M tipinde, akışkan modelinde ise FC3D4 tipinde etkileşime uygun elemanlar kullanılmıştır. Belirlenen nokta, eleman sayısı ve tipine ait analiz çıktılarına, sonuçlar bölümünde yer verilmiştir.

Tek yönlü akışkan-yapı etkileşim analizi (Unidirectional fluid structure interaction analysis)

Çalışmada çift yönlü analiz ile tek yönlü analiz eş zamanlı olarak sürdürülmüştür. Çift yönlü analizde yapı ve akışkan için üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri kullanılırken, tek yönlü analizde yapı iki katlı, iki serbestlik dereceli çerçeve sisteme indirgenmiştir. Bu analizde akışkan modeline yer verilmeden, sadece yapıya uyguladığı kuvvetler çerçeve sisteme etki ettirilir. Kullanılan model ve kuvvetlerin etki noktaları Şekil 1’de görülmektedir. Katlardaki toplam kütleler, buldukları katlara toplanmış kütle olarak yerleştirilmiştir. İki serbestlik dereceli, çerçeve sistemin dalga kuvvetleri etkisi altındaki analizinde, Denklem (9)’ da verilen bağıntı kullanılır.

$$m\ddot{X} + kX = F \tag{9}$$

Bu denkleme, koordinat dönüşümü yapılarak Denklem (11) elde edilir. Bu denklem, tek yönlü analizin çözümlemesinde kullanılacak hareket denklemidir ve çözümleme ile deplasmanlar elde edilir. Denklem (10) ile verilen koordinat dönüşümü, modal matris $[\phi]$ kullanılarak yapılır.

$$\{X\} = [\phi]\{\xi\} \tag{10}$$

$$[\phi]^T [m][\phi]\{\ddot{\xi}\} + [\phi]^T [k][\phi]\{\xi\} = [\phi]^T \{F\} \tag{11}$$

Hareket denkleminde başlangıç şartı olarak, Denklem (12) kullanılır (Barltrop ve Adams, 1991).

$$\xi_{10} = \xi_{z0} = \dot{\xi}_{10} = \dot{\xi}_{z0} = 0 \tag{12}$$

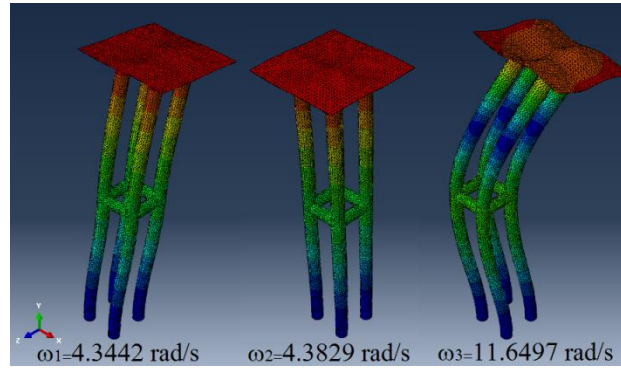
Deplasmanların hesaplanmasının ardından doğal frekanslar (ω) Denklem (13) ile hesaplanır.

$$[k] - \omega^2 [m] = 0 \tag{13}$$

Kütle ve rijitlik matrislerinin oluşturulmasında kullanılan birinci kat kütlesi $m_1=1.04 \times 10^6$ kg, rijitliği $k_1=4.76 \times 10^5$ N/m, ikinci kat kütlesi ve rijitliği ise sırasıyla, $m_2=9.00 \times 10^5$ kg, $k_2=2.83 \times 10^5$ N/m olarak hesaplanmıştır. Ardından, hareket denklemi başlangıç şartları ile çözümlenerek noktasal deplasmanlar elde edilir. Tek yönlü ve çift yönlü akışkan-yapı etkileşim analizlerinden elde edilen deplasman ve doğal frekans çıktıları, bir sonraki bölümde yer almaktadır.

ANALİZ SONUÇLARI (ANALYSIS RESULTS)

Çift yönlü ve tek yönlü analizler, bir dalga periyodu süresi için (9 s), $\Delta t=0.01$ s zaman adımıyla tamamlanmıştır. Sonlu elemanlar modelinin ağ yapısını oluşturmak için gerçekleştirilen hassaslık analizi, modal davranış üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ilk üç mod şekli ve ilgili doğal frekans değerleri Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Yapının mod şekilleri ve ilgili doğal frekansları
Figure 4. Mode shapes and corresponding natural frequencies of the structure

Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen doğal frekans değerleri, eş zamanlı olarak Denklem (13) kullanılarak bulunur. İki serbestlik dereceli sistemin birinci doğal frekansı 3.8753 rad/s, ikinci doğal frekansı ise 3.8937 rad/s olarak hesaplanmıştır. Mod şekillerine ait doğal frekans değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

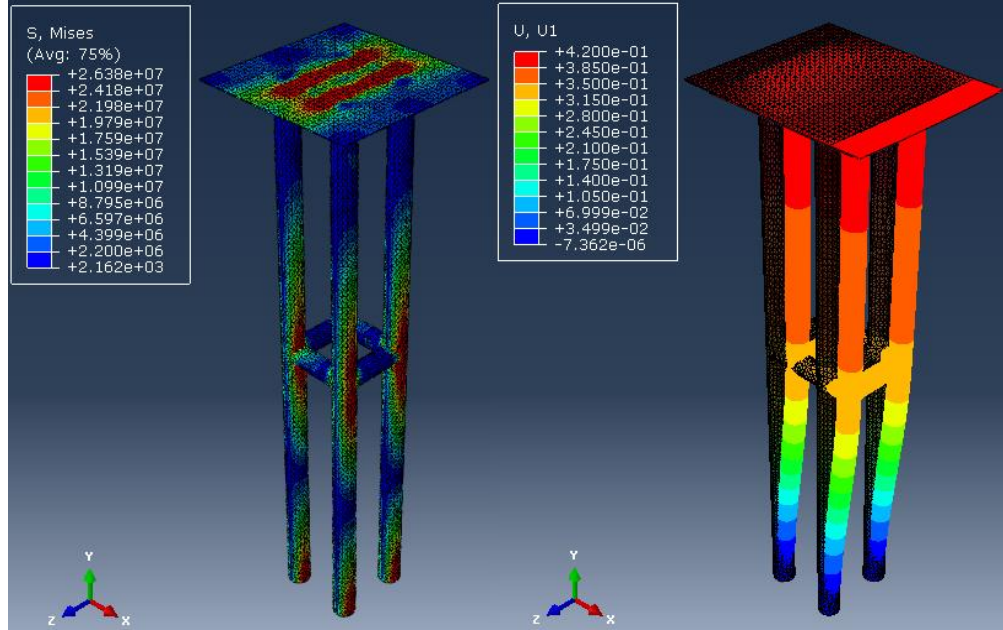
Çizelge 3. Doğal frekans ve deplasman değerleri

Table 3. Natural frequency and displacement values

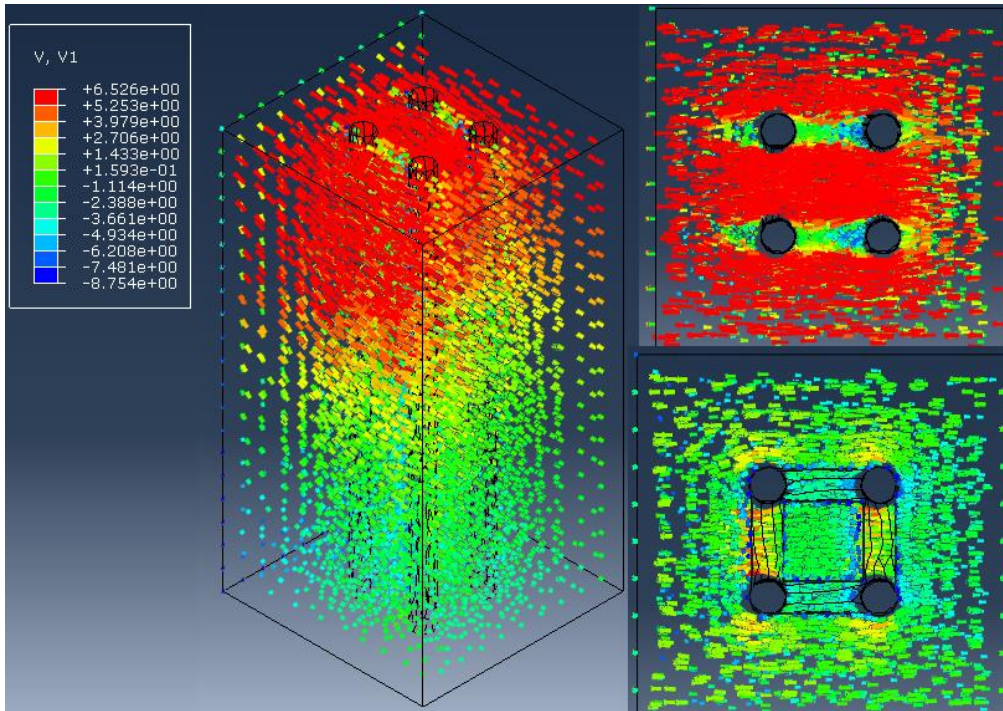
Analizler	Doğal frekans (rad/s)		Maksimum deplasman (m)	
	ω_1	ω_2	X_1	X_2
Nümerik	4.3442	4.3829	0.2849	0.4292
Yarı analitik	3.8753	3.8937	0.2619	0.3878

İki katlı çerçeve sistem olarak modellenen yapının, Denklem (11) ile verilen hareket denkleminin Runge-Kutta metodu ile yarı analitik çözümüyle bulunan maksimum deplasmanlar, yukarıda sunulmuştur. İlk kattaki maksimum deplasman değeri $X_1=0.2619$ m, ikinci kattaki maksimum deplasman değeri ise $X_2=0.3878$ m olarak elde edilmiştir. Tabloda çift yönlü (nümerik) analize ait deplasman değerleri de verilmiştir. Sonlu elemanlar modeli üzerindeki deplasman ve gerilme dağılımı Şekil 5'te sunulmuştur.

Yapı çevresindeki akım hız vektörleri Şekil 6'da görülmektedir. Yapı çevresindeki bu akım, Stokes 5 dalga teorisine ait hız profilinin, sonlu elemanlar analiz programına tanıtılması ile elde edilmiştir. Şekil 6'nın solunda üç boyutlu akım modeli görülmektedir. Şeklin sağ üstünde dalga su yüzündeki akım vektörleri, sağ altında ise kat birleşimindeki akım vektörleri görülmektedir.



Şekil 5. Modelin gerilme ve deplasman dağılımı
 Figure 5. Stress and displacement distribution of the model



Şekil 6. Yapı çevresindeki akım vektörleri
 Figure 6. Velocity vectors around the structure

TARTIŞMA VE ÖNERİLER (DISCUSSION AND SUGGESTIONS)

Akışkan-yapı etkileşimi modellemesinde en sık kullanılan yöntem, tek yönlü akışkan-yapı etkileşim modelidir. Bu yöntemin yanında, çift yönlü etkileşim modeli de kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bu iki yöntem bir açık deniz yapısına uygulanarak, yapının davranışı incelenmiştir. Tek yönlü etkileşim modelinde, yapı modeli ya da hareket denklemi oluşturularak analiz gerçekleştirilir. Akışkan modeli oluşturulmadan, sadece yapıya etki eden akışkan kuvvetleri hesaplanır. Bu kuvvetler, yapı modeline ya da hareket denkleminde dış kuvvet olarak aktarılır. Sadece akışkandan yapıya kuvvet aktarımı sağlanır. Ancak bilinmektedir ki, hareket sırasında yapıda oluşan deplasmanlar, akış yapısında değişimlere yol açar. Tek yönlü analizde bu durum göz ardı edilir.

Alt yapısı dört adet kazıktan oluşan açık deniz yapısı modellenmiştir. Analizlerde ilk olarak çift yönlü akışkan-yapı etkileşimi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, Abaqus sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Çift yönlü akışkan yapı etkileşiminde Stokes 5 dalga teorisine ait hız profili sonlu elemanlar programına aktarılmıştır. Deniz ortamı Abaqus/CFD çözücüsünde modellenirken, platform Abaqus/Explicit çözücüsünde modellenmiştir. Akışkan-yapı temas yüzeyleri ile iki çözücünün etkileşimi sağlanmıştır. Analiz sonuçlarında doğal frekans, deplasman ve gerilme değerleri ile mod şekilleri elde edilmiştir. Doğal frekans ve deplasman değerleri, tek yönlü etkileşim analizi ile de elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çift yönlü etkileşim analizinde, uygun ağ yapısının belirlenmesi gerekir. Bu nedenle hassaslık analizleri yapılır. Değişen nokta ve eleman sayıları için belirlenen bir çıktının sonuçları değerlendirilir. Artan nokta ve eleman sayılarına karşı sonuçlardaki yakınsama, analiz için gerekli uygun nokta ve eleman sayısını verir. Bu çalışmada, hassaslık analizi modal davranış üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de sunulan, farklı nokta ve eleman sayısına karşılık gelen doğal frekans değerleri yardımıyla, uygun nokta ve eleman sayısı elde edilmiştir. Noktalar arası uzaklığın 0.15 m’den aşağı düştüğü durumda doğal frekans değerinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu nedenle noktalar arası uzaklık 0.15 m seçilerek analizler sürdürülmüştür.

Modelin ağ yapısı belirlendikten sonra, ilk modun yanında, ikinci ve üçüncü modlar ile ilgili doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Yapının modal davranışı Şekil 4’te görülmektedir. İlgili mod şekillerine ait doğal frekans değerleri, her iki analiz için elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 3’te sunulmuştur. İki analiz tipi için elde edilen doğal frekans değerlerinin 11.76 % ile 12.56 % arasında farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 3’te doğal frekans değerlerinin yanında, dalga kuvvetleri etkisindeki yapının deplasman değerleri de verilmiştir. Birinci katta analizlerden elde edilen deplasman değerleri arasındaki fark 8.78 % iken, ikinci katta bu fark 10.67 %’ye yükselmiştir. Şekil 5’in sağında, yapıda meydana gelen deplasman dağılımı yer almaktadır. Maksimum deplasman değerine, yapının son katında ulaşılmıştır. Analizler arasında doğal frekansın ve deplasmanların uyumu gözlemlendikten sonra Şekil 5’te görülen, yapı üzerindeki gerilme dağılımı elde edilmiştir. Bu gerilme değerleri Von-Mises kriterine göre elde edilmiştir. Gerilme dağılımından görüldüğü gibi, bu değerler mesnetlerde maksimum değeri olan 2.638×10^7 N/m²’ye ulaşmıştır. Ayrıca, kat birleşimlerinde ve platform kazık birleşimlerinde gerilme değerleri artış göstermiştir.

Çift yönlü analiz ile yapı etrafındaki dalga hız vektörleri elde edilmiştir. Hız vektörleri Şekil 6’da görülmektedir. Çift yönlü analiz, yapısal çıktılarının yanında, akışkan çıktılarının da elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Yapısal davranış üzerinde en belirgin etkiye sahip akışkan çıktısı olan hız değerleri elde edilmiştir. Dalga hızı, su yüzeyinde maksimum değeri olan 6.526 m/s’ ye ulaşmıştır. Deniz ortamı modellemesinde Stokes 5 dalga teorisi kullanılmıştır. Yapının konumlandığı bölgeye en uygun olan dalga teorisi seçilerek, hassas bir analiz gerçekleştirilmiştir. Belirlenen teori yerine, Lineer dalga teorisinin kullanılmasıyla doğrusal olmayan davranış ihmal edilmiş olacaktır. Aynı şekilde, Cnoidal dalga teorisinin kullanılmasıyla da çözümü zorlaştıracak eliptik integralli ifadeler kullanılmış olacaktır. Bu durumların önüne geçilerek, yapı için en uygun dalga teorisine göre hesaplamalar yapılmıştır.

Çalışmanın sonucunda, tek yönlü analiz ile çift yönlü analiz arasındaki ilişki elde edilmiştir. Uygun sonlu eleman boyutu ve doğru tespit edilen dış kuvvetler altında, iki farklı analiz tipinin uyumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

SEMBOLLER

C_D	Sürüklenme Katsayısı
C_M	Atalet Katsayısı
c_0	Sesin sudaki hızı
D	Çap
d	Su derinliği
E	Elastisite Modülü
F	Kuvvet
g	Yerçekimi
H	Dalga Yüksekliği
I	İç Kuvvet
k	Rijitlik
L_w	Dalga Boyu
m	Kütle
p	Basınç
T	Dalga Periyodu
t	Zaman
u	x yönündeki akım hız bileşeni
v	y yönündeki akım hız bileşeni
w	z yönündeki akım hız bileşeni
X	Yapı deplasmanı
\dot{X}	Yapı hızı
\ddot{X}	Yapı ivmesi
Γ_0	Grüneisen oranı
κ	U_s-U_p eğrisinin eğimi
ν	Poisson oranı
ω	Doğal frekans
ρ	Akışkan yoğunluğu

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abaqus User's Manual, Version 6.10, SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2010.
- Barltrop, N.D.P., Adams, A.J., 1991, *Dynamics of Fixed Marine Structures*, Butterworth-Heinemann, England.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1991, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Publishing Company, England.
- Farrugia, R., Sant, T., Micallef, D., 2014, "Investigating the Aerodynamic Performance of a Model Offshore Floating Wind Turbine", *Renewable Energy*, Vol. 70, pp. 24-30.
- Fernandez, R.P., Pardo, M.L., 2013, "Offshore Concrete Structures", *Ocean Engineering*, Vol. 58, pp. 304-316.
- Froehle, B., Persson P.O., 2014, "A High-Order Discontinuous Galerkin Method for fluid-Structure Interaction with Efficient Implicit-Explicit Time Stepping", *Journal of Computational Physics*, Vol. 272, pp. 455-470.

- Gücüyen, E., Erdem, R.T., 2014, "Corrosion Effects on Structural Behaviour, of Jacket Type Offshore Structures", *Gradevinar*, Vol. 66, No. 11, pp. 981-986.
- Gücüyen, E., Erdem, R.T., 2016, "Açık Deniz Uzay Kafes Sistemin Çevresel Yükler Altında Akışkan-Yapı Etkileşimli Analizi", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, Cilt 7, Sayı 3, pp. 433-444.
- Haldar, S., Sharma, J., Basu, D., 2018, "Probabilistic Analysis of Monopile-Supported Offshore Wind Turbine in Clay", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 105, pp. 171-183.
- Hall, M., Buckham, B., Crawford, C., 2014, "Hydrodynamics-Based Floating Wind Turbine Support Platform Optimization: A Basis Function Approach", *Renewable Energy*, Vol. 66, pp. 559-569.
- Hartnett, M., Mitchell, P., 2000, "An Analysis of the Effects of the Leg-Spacing on Spectral Response of Offshore Structures", *Advances in Engineering Software*, Vol. 31, pp. 991-998.
- Lamas-Pardo, M., Iglesias, G., Carral, L., 2015, "A Review of Very Large Floating Structures (VLFS) for Coastal and Offshore Uses", *Ocean Engineering*, Vol. 109, pp. 677-690.
- Li, M., Zhang, H., Guan, H., 2011, "Study of Offshore Monopile Behaviour due to Ocean Waves" *Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 17-18, pp. 1946-1956.
- Li, W., Huang, Y., Tian, Y., 2017, "Experimental Study of the Ice Loads on Multi-Piled Oil Piers in Bohai Sea", *Marine Structures*, Vol. 56, pp. 1-23.
- Park, Y., Kim, K., 2013, "Semi-Active Vibration Control of Space Truss Structures By Friction Damper For Maximization of Modal Damping Ratio", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, pp. 4817-4828.
- Reddy, J.N., 2004, *An Introduction to the Finite Element Analysis*, Oxford University Press, USA.
- Shi, W., Han, J., Kim, C., Lee, D., Shin, H., Park, H., 2015, "Feasibility Study of Offshore Wind Turbine Substructures for Southwest Offshore Wind Farm Project in Korea", *Renewable Energy*, Vol. 74, pp. 406-413.
- Wang, X., Yang, X., Zeng, X., 2017, "Seismic Centrifuge Modelling of Suction Bucket Foundation for Offshore Wind Turbine", *Renewable Energy*, Vol. 114, pp. 1013-1022.
- Yan, H.K., Wang, N., Wu, N., Lin, W., 2018, "Maritime Construction Site Selection from the Perspective of Ecological Protection: the Relationship Between the Dalian Offshore Airport and Spotted Seals (*Phoca largha*) in China Based on the Noise Pollution", *Ocean and Coastal Management*, Vol. pp. 152, 145-153.
- Yee, A.A., 2007, *Precast and Prestressed Concrete*, McGraw-Hill, New York.
- Zhang, Q., Zhou, X.L., Wang, J.H., 2017a, "Numerical Investigation of Local Scour Around Three Adjacent Piles with Different Arrangements under Current", *Ocean Engineering*, Vol. 142, pp. 625-638.
- Zhang, Q., Zhou X.L., Wang, J.H., Guo, J.J., 2017b, "Wave-Induced Seabed Response around an Offshore Pile Foundation Platform", *Ocean Engineering*, Vol. 130, pp. 567-582.