

# Açık deniz uzay kafes sistemin çevresel yükler altında akışkan-yapı etkileşimli analizi

**Engin GÜCÜYEN\*, Recep Tuğrul ERDEM**

*Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa*

Makale Gönderme Tarihi: 28.04.2016

Makale Kabul Tarihi: 01.06.2016

## Öz

*Bu çalışma kapsamında, açık deniz platformunun kafes tipi altyapısına iki yönlü akışkan-yapı etkileşim analizi yapılarak, yapının dinamik ve modal davranışı incelenmiştir. İncelenen model 62.5 m yüksekliğinde, dört katlı, silindirik elemanlardan oluşan, açılı-dört ayaklı, açık deniz kafes sistemdir. Yapı operasyonel yüklerin yanında rüzgar ve dalga kuvvetlerini içeren çevresel kuvvetlerin etkisi altındadır. Rüzgar kuvvetinin hesaplanmasında Eurocode hız profili kullanılırken, dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında Lineer dalga hız profili kullanılmıştır. Yapının, çevresel kuvvetlerin ve bunların etkileşiminin modellenmesinde ABAQUS sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Yapı ABAUS/Explicit çözücüsünde modellenirken, çevresel kuvvetleri meydana getiren rüzgar ve dalga ABAUS/CFD çözücüsünde modellenmiştir. Bu iki çözücünün etkileşimi, akışkan-yapı etkileşim modülü ile sağlanarak, yapının her katında meydana gelen maksimum deplasmanlara ve gerilmelere ulaşılmıştır. Gerilme ve deplasmanların yanında yapının ilk dört modu ve ilgili mod şekilleri elde edilmiştir. Numerik modelleme ile sayısal ve görsel sonuçlar elde edilmiştir. Nümerik sonuçlar yarı analitik modelleme yapılarak kontrol edilmiştir. Yarı analitik yöntemde, yapı çok serbestlik dereceli sistem olarak modellenirken, çevresel yükler ayrıca hesaplanarak yapıya etki ettirilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Açık deniz kafes sistem; çevresel yükler; akışkan-yapı etkileşimi; nümerik analiz;

## Giriş

Günümüzde dünyada artan enerji ihtiyacıyla gerek yenilenebilir gerekse tükenbilir kaynakların tüketime kazandırılması acil bir ihtiyaç haline gelmiştir. Rezervin tüketime kazandırılmasında kullanılan yapılar günümüzde açık denizlerde de inşa edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının karadaki arsa maliyetlerinin artması, tükenbilir kaynakların ise karadaki rezervinin azalması nedeniyle enerji tesislerinin inşası karadan denizlere doğru artarak kaymaktadır. Bu yapılar üzerinde tesisin olduğu platform, platformu taşıyan altyapı ve temelden oluşmaktadır. Tekil kazık, uçlu kazık ve kafes sistem en bilinen tiplerindedir. Bu alt yapı tiplerinin içinden en avantajlı olanı kafes sistem tipidir (Zwick vd., 2012). Bu avantajlardan bazıları, diğerlerine göre daha az çelik kullanılması ve tek seferde yapının yerine yerleştirilebilmesi olarak sıralanabilir ve daha fazlası (Erdem, 2015) tarafından verilmiştir.

Bu çalışmada çevresel yükler altında analiz yapılmıştır. Açık deniz yapılarına çevresel yük olarak konumlarından kaynaklanan dalga kuvvetlerinin yanında rüzgar kuvvetleri etki edebilir. Çalışmaya konu olan yapının tasarımı sadece dalga yüklerine göre yapılabileceği gibi (Hezarjaribi vd., 2013), yapının su seviyesi üzerindeki yüksekliğinin artmasıyla rüzgar ve dalga yüklerinin kombinasyonu ile yapılabilmektedir (Kim ve Lee, 2015). Kombinasyon durumunda dalga kuvvetlerinin kararsız ve rüzgar kuvvetine göre daha hasar verici olması nedeniyle dalga kuvvetleri dinamik analizde rüzgar kuvvetlerine göre daha belirleyici olmaktadır (Li vd., 2011).

Çevresel yüklerle maruz yapıların dinamik tepkilerinin belirlenmesinde akışkan-yapı etkileşim tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Akışkan-yapı etkileşim analizleri tek yönlü ve çift yönlü olarak sınıflandırılırlar. Tek yönlü analizde, akışkan basıncı yapıya aktarılır, fakat yapının akışkana tepkisi akışkana aktarılmaz. Tek yönlü etkileşim

(Gücüyen vd., 2013) tarafından çalışılmıştır. Tek yönlü analizde sadece akışkan yapıya etki ederken, çift yönlü analizde akışkan ve yapı beraber etkileşim halindedir. Akışkan-Lagrange (Gücüyen ve Erdem, 2014), Lagrange-Euler (ALE) (Liu vd., 2012) ve Euler-Euler (Wang vd., 2013) teknikleri çift yönlü etkileşim tiplerindedir. Akışkan-yapı etkileşim analizleri yüksek bilgisayar kapasitesi gerektirdiğinden, numerik simülasyonların yanı sıra yarı analitik modeller alternatif olarak kullanılabilir. Tek serbestlik dereceli sistem, çok serbestlik dereceli sistem, kuvvet ayırıştırma modelleri ve varyasyonel yaklaşımlar yarı analitik çözümlemelerde kullanılmaktadır (Bai ve Qin, 2014). Yarı analitik modeller arasında en çok kullanılanlarından biri tek serbestlik dereceli sistem modelidir (Kim ve Lee, 2015) ve ardından çok serbestlik dereceli sistem modeli (Zhao, 2013) gelir. Bu iki model karşılaştırmalı olarak (Park ve Kim, 2013) tarafından çalışılmıştır.

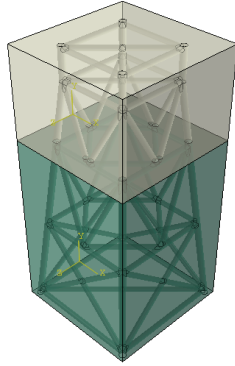
Bu çalışmanın ilk aşamasında üç boyutlu, kafes sistem tipi, çelik, açık deniz yapısı ABAQUS sonlu elemanlar programı ile akışkan-yapı etkileşimli modellenerek çevresel yükler altında yapısal davranışı incelenmiştir. Ardından yapı topaklanmış kütlelerden oluşan dört serbestlik dereceli sistem olarak modellenmiştir. Dört serbestlik dereceli yapının hareket denklemi Runge-Kutta yöntemi ile nümerik olarak çözülerek (Froehle ve Persson, 2014) doğal frekans ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Çok serbestlik dereceli sistemin sonlu elemanlar modeliyle olan farklılıkları deplasman ve doğal frekanslar açısından ortaya çıkarılmıştır.

## Modellenen Yapı ve Çevresi

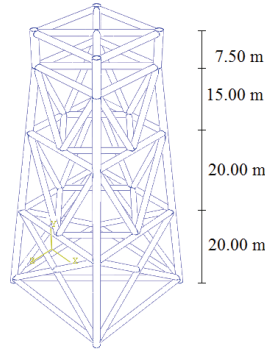
Açık deniz kafes sistem tipi yapılar altıgen tabanlı, bükülmüş, üçayaklı ve dört ayaklı olarak isimlendirilirler. Bunların içinden seçilen dört ayaklı tipi bu çalışmada modellenmiştir. Yapısal davranışı incelenen model literatürde yer alan (Karadeniz, 2001) modele benzer modeldir ve Şekil 1.b'de görülmektedir. 62.50

m yüksekliğinde olan ve dört kattan oluşan yapının, kat yükseklikleri birden dörde kadar sırasıyla 20.00 m, 20.00 m, 15.00 m, 7.50 m'dir. Katların yan uzunlukları birden dörde kadar sırasıyla 27.00 m, 23.00 m, 19.00 m ve 16.00 m'dir. Yatay elemanların tümü 1.20 m çapına ve 0.014 m et kalınlığına sahipken, düşey

elemanların tümü 1.20 m çapına, 0.016 m et kalınlığına sahiptir. Toplamda  $1.50 \times 10^5$  kg olan, platformda yer alan, yapısal olmayan kütleler, topaklanmış kütle olarak sistemin tepe noktasındaki dört köşeye eşit olarak dağıtılmıştır.



*Şekil 1.a. Akış bölgesi*



*Şekil 1.b. Yapı bölgesi*

Yapının, yüksekliği 40 m olan ilk iki katı deniz ortamı ile 22.5 m yüksekliğindeki son iki katı ise havayla temas etmektedir. Şekil 1.a.'da deniz ortamı yeşil, hava ortamı gri renkler ile temsil edilmiştir. Bu çalışmada, Şekil 1.a. ve Şekil 1.b. birlikteliği akışkan-yapı etkileşimli modeli oluşturmaktadır. Yapının deniz ortamıyla temas eden elemanlarına dalga kuvveti etki ederken, havayla temas eden elemanlarına rüzgar kuvveti etki etmektedir. Gerek nümerik akışkan-yapı etkileşim analizinde gerekse yarı analitik analizde bu kuvvetler göz önünde bulundurulmuştur.

teorisine göre, dalga boyu ( $L_w$ ) 98.71 m olarak hesaplanmıştır. Dalga hız ve ivme değerleri Denklem (1) ve (2) ile hesaplanır.

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

$$\dot{u} = \frac{g\pi H}{L_w} \frac{\cosh(2\pi(y+d)/L_w)}{\cosh(2\pi d/L_w)} \sin\left(\frac{2\pi}{L_w}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2)$$

Deniz yapılarına etki eden hidrodinamik kuvvetler, dalga hızına ( $u$ ) ve ivmesine ( $\dot{u}$ ) bağlı olarak hesaplanır. Hesaplamalarda kullanılacak hız ve ivme denklemleri ise, dalga yüksekliğine ( $H$ ), dalga periyoduna ( $T$ ) ve yapının bulunduğu su derinliğine ( $d$ ) göre seçilen dalga teorisine göre belirlenir (Chakrabarti, 2005). Bu çalışmada, dalga kuvvetleri  $d=40$  m,  $T=8$  s ve  $H=3$  m değerlerine göre hesaplanmıştır. Bu değerlere bağlı olarak deniz ortamı Lineer dalga teorisi ile modellenmiştir. Dalga parametrelerine ve

Denklem (1) nümerik analizde dalga giriş hızı denklemini olarak kullanılırken, Denklem (1) ve (2) ise yarı-analitik analizde dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılacaktır. Yapıya etkileyen dalga kuvveti, sürüklenme ( $F_D$ ) ve atalet ( $F_I$ ) kuvvetlerinin toplamı olan toplam yatay kuvvet ( $F_H$ ) şeklinde Denklem (3) ile hesaplanmıştır.

$$F_H = F_D + F_I = \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho_w C_D D u(y,t) \left| u(y,t) \right| dy + \int_{-d}^{\eta} \rho_w C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}(y,t) dy \quad (3)$$

Denklemde,  $C_D$  ve  $C_I$  sırasıyla sürüklenme ve atalet katsayılarıdır ve sayısal değerleri  $C_D=0.7$  ve  $C_I = 2.0$ 'dir. Yukarıdaki denklemde,  $\rho_w$  tuzlu

su yoğunluğunu,  $D$  çapı,  $\eta$  ise serbest su yüzeyinin dalgalanmamış su seviyesine olan uzaklığını ifade etmektedir. Yarı analitik analizde, Denklem (3) dalga kuvvetinin etki ettiği her bir elemana ayrı ayrı uygulanmıştır. Yapıya etki eden diğer çevresel yük olan rüzgar kuvveti ise Denklem (4)'de verilen Eurocode hız profiline ( $u_a$ ) göre hesaplanır (Dyrbye ve Hansen, 2004).

$$u_a = U_{BAS} k_T \ell^n (y/z_0) \quad (4)$$

Denklemde,  $U_{BAS}$  değeri 24 m/s olan rüzgar hızını,  $k_T$  değeri 0.17 olan arazi katsayısını ve  $z_0$  değeri 0.01 olan pürüzlülük mesafesini ifade eder. Rüzgar hızına ( $u_a$ ) bağlı olarak hesaplanan rüzgar kuvveti ( $F_a$ ) Denklem (5)'de verilmiştir.

$$F_a = \int_h^{L-h} \frac{1}{2} \rho_a u_a^2 C_s A_{(y)} dy \quad (5)$$

Denklem (5)'de,  $A$  elemanın kesit alanını,  $\rho_a$  havanın yoğunluğunu ve  $C_s$  ise, silindirik elemanlar için 0.50, dörtgen elemanlar için 2.0 değerinde olan şekil katsayısını temsil etmektedir (Dyrbye ve Hansen, 2004). Yarı analitik analizde kullanılacak dalga ve rüzgar kuvvetine ait sayısal değerler ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

## Analiz Adımları

Bu çalışmanın ilk adımında üç boyutlu açık deniz kafes sistem ve ortamı sonlu elemanlar analizi ile modellenerek, yapının çevresel yükler altındaki dinamik davranışı elde edilmiştir. İkinci adımda ise elde edilen sonuçların

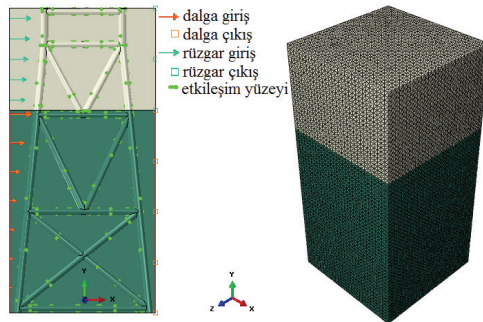
kontrolü amacıyla sistem çok serbestlik dereceli sistem olarak modellenmiş ve sonlu elemanlar analizinin doğruluğu tespit edilmiştir. Gereklik numerik akışkan-yapı etkileşimli analizde gerekse yarı analitik çok serbestlik dereceli sistem analizinde Denklem (6)'da matris formunda verilen sönümsüz hareket denklemi kullanılır.

$$m\ddot{X} + kX = F \quad (6)$$

Denklemde,  $X$  koordinat vektörünü,  $F$  kuvvet vektörünü,  $m$  kütle matrisini ve  $k$  ise rijitlik matrisini temsil etmektedir.

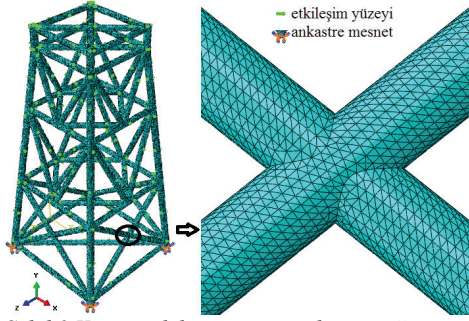
## Nümerik akışkan-yapı etkileşim analizi

Çalışmaya konu olan benzer yapıların analizinde genellikle tek yönlü akışkan-yapı etkileşimi (nümerik), yarı analitik ya da analitik yöntemler kullanılırken, yüksek bilgisayar kapasitesi gerektiren çift yönlü akışkan-yapı etkileşim analizi daha az kullanılmaktadır. Bu nedenle gerçekçi bir etkileşim sağlanamamaktadır. Bu çalışmada ise ABAQUS akışkan-yapı etkileşim simülasyon modülü kullanılarak katı model (ABAUS/Explicit) ile akışkan modelinin (ABAUS/CFD) etkileşimi sağlanmıştır. Etkileşimin sağlanabilmesi için akışkan ve katı modellerin temas yüzeylerinin tanımlanması gerekir. Bu tanımlama ile akışkandan yapıya kuvvetler, yapıdan akışkana ise kuvvetlerin yapıda meydana getirdiği deplasmanlar aktarılır. Akışkanlar ve yapı modellerinde kullanılan sınır şartları Şekil 2.'de görülmektedir.



Şekil 2. Akışkan modelinin sınır şartları ve ağ yapısı

Şekil 2'nin solunda akışkan modeline uygulanan giriş-çıkış sınır şartları ile akışkan-yapı temas yüzeyleri görülmektedir. x doğrultusunda giriş-çıkış tanımlanmıştır. Dalga giriş hızı olarak Denklem (1), rüzgar için ise Denklem (3) kullanılmıştır. Çıkışlarda basınç değeri sıfıra eşitlenmiştir. z doğrultusundaki yüzeyler ile y doğrultusunda bulunan tavan uzak yüzey olarak tanımlanarak, hızları giriş hızına eşit kabul edilmiştir. Geriye kalan taban ise geçirimsiz duvar olarak tanımlanmıştır. Şekil 3'ün solunda deniz tabanına ankastre mesnetlenen yapı ve yapının akışkanla temas yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 3. Yapı modelinin sınır şartları ve ağ yapısı

Sonlu elemanlar yapı modelinde çelik, deniz modelinde tuzlu su, rüzgar modelinde ise havanın malzeme özellikleri kullanılmıştır. Akışkan modellemesinde EOS malzeme kullanılmıştır. Rüzgarın EOS malzeme modelinde, gaz sabiti 287, ortam basıncı  $1.00 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>, dinamik vizkozite  $1.72 \times 10^{-5}$  Ns/m<sup>2</sup> ve yoğunluk  $1.17$  kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Tuzlu suyun dinamik vizkozitesi  $1.50 \times 10^{-3}$  Ns/m<sup>2</sup>, yoğunluğu  $1025$  kg/m<sup>3</sup>, sesin tuzlu sudaki hızı ( $c_0$ )  $1560$  m/s ve sabitler ( $k$ ,  $\Gamma_0$ ) sıfır olarak EOS malzeme modellemesinde kullanılmıştır. Çeliğin yoğunluğu  $7850$  kg/m<sup>3</sup>, Elastisite modülü  $2.1 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup> ve Poisson oranı  $0.30$ 'dur.

Sonlu elemanlar modellemesinin son adımını ağ geçirme işlemi oluşturur. Yapının ve çevresinin ağ yapısına sırasıyla Şekil 2 ve 3'ün sağında yer verilmiştir. ABAQUS/Explicit'de modellenen

yapıda 10 noktalı modifiye dört yüzlü elemanlar (C3D10M), ABAQUS/CFD'de modellenen dalga ve rüzgar ortamlarında ise 4 noktalı modifiye dört yüzlü elemanlar (FC3D4) kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analiz programında modeller küçük parçalara ayrılarak karmaşık yapıların analiz edilmesi sağlanır. Sonlu elemanlar analizinde noktalar arası mesafe, yapı modelinde profil et kalınlığından daha az olan  $0.01$  m'dir. Dalga ve rüzgar modellerinde ise yapı ile temas yüzeylerinde  $0.01$  m, diğer kısımlarında ise  $0.10$  m noktalar arası uzaklıktır. Böylece kafes sistem modelinde  $4735523$  nokta ve  $3181941$  eleman, dalga modelinde  $424644$  nokta ve  $2394350$  eleman ve rüzgar modelinde  $186173$  nokta ve  $1043958$  eleman oluşturmuştur. Sonlu elemanlar programının kullandığı, dış yükler (F) altındaki bir yapının, hareket denklemi aşağıda verilmiştir. Bu denklem ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modulünden elde edilen dış kuvvetler belirlenen etkileşim yüzeylerinden yapıya aktarılır.

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

Denklem (7)'de t zamanı,  $F^J$  CFD çözücüsünden elde edilen (uygulanan) dış kuvvet vektörünü,  $I^J$  yapıda meydana gelen gerilmelerin oluşturduğu iç kuvvet vektörünü temsil eder. Hareket denklemi çözülürken sonlu elemanlar programı tarafından aşağıda verilen Explicit çözücüsünün sistematigi kullanılır. Böylelikle yapıdan akışkana aktarılacak deplasmanlar elde edilir.

$$\dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N = \dot{X}_{(i-\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{X}_{(i)}^N \quad (8)$$

$$X_{(i+1)}^N = X_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (9)$$

Yukarıdaki denklemde N serbestlik derecesini, i explicit çözücüsünün zaman artım aralığının temsil etmektedir. Bir artım adımı öncesinden elde edilen  $\dot{X}_{(i-\frac{1}{2})}^N$  ve  $\dot{X}_i^N$  değerleri yardımıyla

deplasmanlar hesaplanır. Yapının noktasal ivme değerleri ise Denklem (10) ile elde edilir (ABAQUS/CAE, 2010).

$$\ddot{X}_{(i)}^N = (m^{N(i)})^{-1} (P_i^I - I_i^I) \quad (10)$$

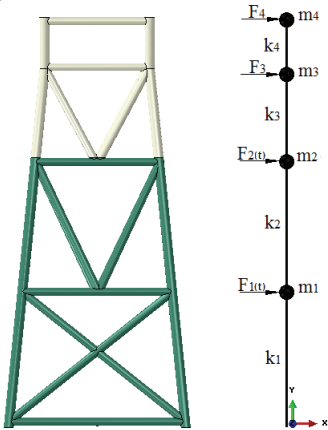
Bu çalışmada akışkan-yapı etkileşim analiziyle beraber modal analizde gerçekleştirilerek yapının doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar programının modal analizde kullandığı bağıntı Denklem (11)'de verilmiştir.

$$[k] \{X\} - \lambda [m] \{X\} = 0 \quad (11)$$

Denklem (11)'de verilen matrislerin çözümlenmesinde Lanczos Metodu kullanılmıştır (ABAQUS/CAE, 2010). Burada,  $\lambda$  doğal frekansın karesidir (Reddy, 2004).

#### Akışkan-yapı etkileşim analizinin yarı analitik analiz ile tahkiki

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen doğal frekans ve deplasman değerlerinin kontrolünde kullanılan yarı analitik model bu bölümde tarif edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde karmaşık bir yapı modellenirken, yarı analitik yöntemde yapı tek bir dal olarak modellenir ve kat kütleleri toplanmış kütle olarak bu dal üzerine yerleştirilir. Kullanılan sonlu elemanlar ve basitleştirilmiş dal modeli Şekil 4'de görülmektedir. Kafes sistem çok serbestlik dereceli sistem olarak modellenerek dinamik dalga ve statik rüzgar kuvvetleri altında analiz edilmiştir.



Şekil 4. Kafes sistem ve dört katlı çok serbestlik dereceli sistem modeli

Şekil 4'de görülen dört serbestlik dereceli modelin deplasman ve doğal frekanslarının elde edilmesinde Denklem (6) kullanılır. Denklem (6)'ya Denklem (12)'de verilen koordinat dönüşümü yapılarak Denklem (13) elde edilir. Koordinat dönüşümünde yapının modlarına göre belirlenen modal matris  $[\phi]$  kullanılır.

$$X = [\phi] \xi \quad (12)$$

$$[\phi]^T [m] [\phi] \ddot{\xi} + [\phi]^T [k] [\phi] \xi = [\phi]^T F \quad (13)$$

Yapının doğal frekansları ( $\omega$ ) ise Denklem (14) ile elde edilir.

$$[k] - \omega^2 [m] = 0 \quad (14)$$

Şekil 4'de görülen yapının kat kütleleri ve rijitlikleri Tablo 1'de verilmiştir. Birinci kattaki elemanların kütlelerinin toplamı  $m_1$ , rijitliklerinin toplamı ise  $k_1$ 'dir. Diğer katlar için de aynı durum söz konusudur.

Tablo 1. Yapı kat kütle ve rijitlik değerleri

Kat	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$
kütle (kg)	$2.89 \times 10^5$	$1.83 \times 10^5$	$1.05 \times 10^5$	$1.76 \times 10^5$
Kat	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
rijitliği (N/m)	$1.83 \times 10^7$	$2.77 \times 10^5$	$6.07 \times 10^5$	$6.71 \times 10^5$

Birinci kattaki elemanlara etki eden toplam dalga kuvveti ( $F_{1(t)}$ ) 1 numaralı noktaya etki ettirilirken, 2 kattaki toplam dalga kuvveti ( $F_{2(t)}$ ) ise 2 numaralı noktaya etki ettirilmiştir. Üçüncü ve dördüncü kattaki elemanlara gelen rüzgar kuvveti ise dalga kuvvetinde olduğu gibi ilgili noktalara konumlandırılmıştır. Tablo 1'de ki değerlere göre yapının kütle ve rijitlik matrisleri Denklem (15) ve (16) ile verilmiştir. Yapıya ait modal matris ise Denklem (17)'de görülmektedir.

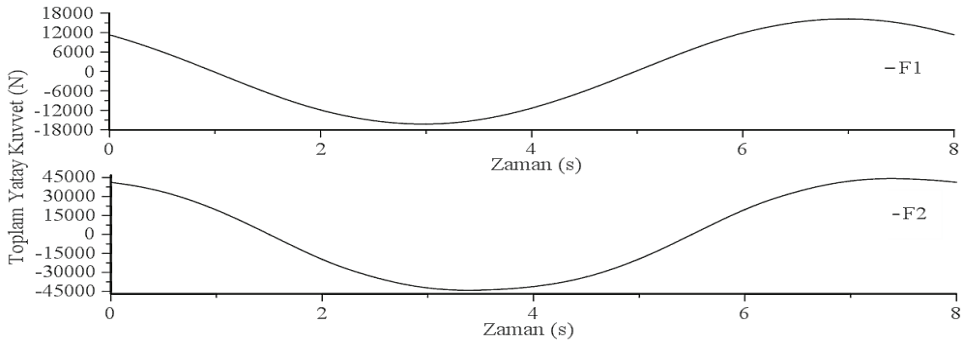
$$k = \begin{bmatrix} 1.85 \times 10^7 & -2.77 \times 10^5 & 0 & 0 \\ -2.77 \times 10^5 & 8.84 \times 10^5 & -6.07 \times 10^5 & 0 \\ 0 & -6.07 \times 10^5 & 12.78 \times 10^5 & -6.71 \times 10^5 \\ 0 & 0 & -6.71 \times 10^5 & 6.71 \times 10^5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$m = \begin{bmatrix} 2.89 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.83 \times 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.05 \times 10^5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.26 \times 10^5 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1.0299 & -1.0299 & -0.2055 & -0.4070 \\ 0.9907 & 0.9907 & 1.7890 & 0.7769 \\ 1.4911 & 1.4911 & -5.9281 & -6.7736 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Yapının ilk iki katındaki elemanlara etki eden dalga kuvvetleri ayrı ayrı Denklem (3) ile hesaplanır. Bu kuvvetler katlarda toplanarak

Şekil (5)'de verilen zamanla değişen kuvvet değerleri elde edilir.



Şekil 5. Dalga kuvvetleri

Modele etki eden rüzgar kuvvetleri ise dalga kuvvetlerinde olduğu gibi katlardaki her bir eleman için Denklem (5) ile hesaplanır. Katlardaki rüzgar kuvvetleri  $F_3=218701$  N ve  $F_4=123256$  N olarak bulunur. Rüzgar ve dalga kuvvetleri hareket denkleminin sağ tarafındaki dış kuvvetleri oluşturur. Denklem (13)'de verilen hareket denkleminde Denklem (15)-(17) yerleştirilir. Ardından, aşağıda verilen başlangıç şartlarıyla Runge-Kutta metodu ile çözümlenerek noktasal deplasmanlar elde edilir.

$$x_{1(0)} = x_{2(0)} = x_{3(0)} = x_{4(0)} = 0, \dot{x}_{1(0)} = \dot{x}_{2(0)} = \dot{x}_{3(0)} = \dot{x}_{4(0)} = 0 \quad (18)$$

Runge-Kutta metodu aşağıda verilen bağıntıyı kullanarak çözümlenmeyi gerçekleştirir (Barltrop ve Adams, 1991).

$$\ddot{X}(t) = m^{-1} (F(t) - kX(t)) \quad (19)$$

$$\dot{X}_{t+\Delta t} = \dot{X}_t + \ddot{X}_t \Delta t$$

$$X_{t+\Delta t} = X_t + \dot{X}_t \Delta t$$

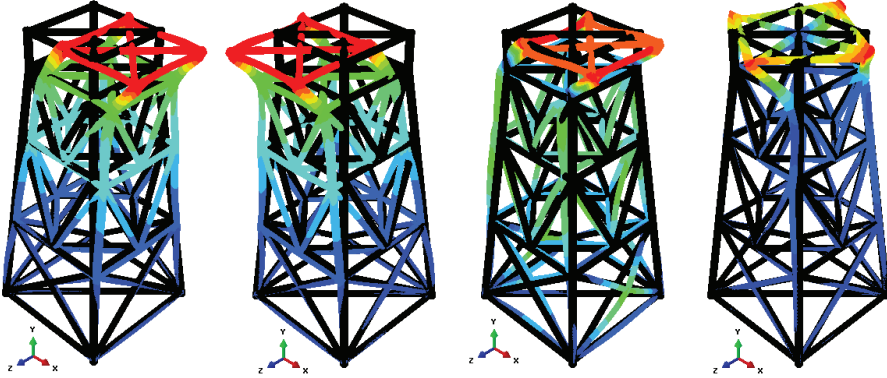
Yarı analitik ve sonlu elemanlar analizlerinin her ikisi de iki dalga periyodu süresi olan 16 s için 0.01s zaman adımıyla ( $\Delta t$ ) sürdürülmüştür.



## Bulgular

Çevresel yükler altında açık deniz kafes sistemin yapısal davranışı sonlu elemanlar programıyla modellenmiş ve elde edilen

değerler yarı analitik analiz ile kıyaslanmıştır. Şekil 6.'da görülen modal davranıştan başlayarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde ve tablolarda sunulmuştur.



Şekil 6. Modelin ilk 4 mod şekli

Beklenildiği gibi en belirgin mod şekilleri ilk iki moda meydana gelmiştir. Mod şekilleriyle ilgili olan doğal frekans değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Sonlu elemanlar çözücüsü (Tip 1) frekans değerlerini Denklem (11) ile hesaplarken, yarı analitik analizde (Tip 2) ise Denklem (14) kullanılır.

Tablo 2. Modelin ilk dört doğal frekansı

Analiz	$\omega_1$ (rad/s)	$\omega_2$ (rad/s)	$\omega_3$ (rad/s)	$\omega_4$ (rad/s)
1	2.92	2.92	5.81	8.24
2	2.81	2.83	5.58	7.92

Tablo 3'de iki farklı analizden elde edilen katlardaki maksimum deplasman değerleri

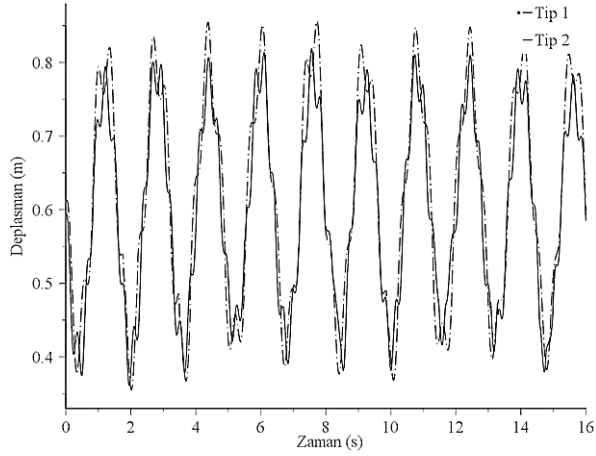
verilmiştir. Modelin en üst noktasındaki deplasman değeri sonlu elemanlar analizinde 0.856 m iken yarı analitik analizde 0.819 m olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Modelin tepe noktası deplasmanları

Analiz	X <sub>1</sub> (m)	X <sub>2</sub> (m)	X <sub>3</sub> (m)	X <sub>4</sub> (m)
1	0.183	0.510	0.737	0.856
2	0.179	0.489	0.706	0.819

Farklı analizlerden elde edilen maksimum deplasman değerinin zamanla değişimi ise Şekil 7.'de görülmektedir.

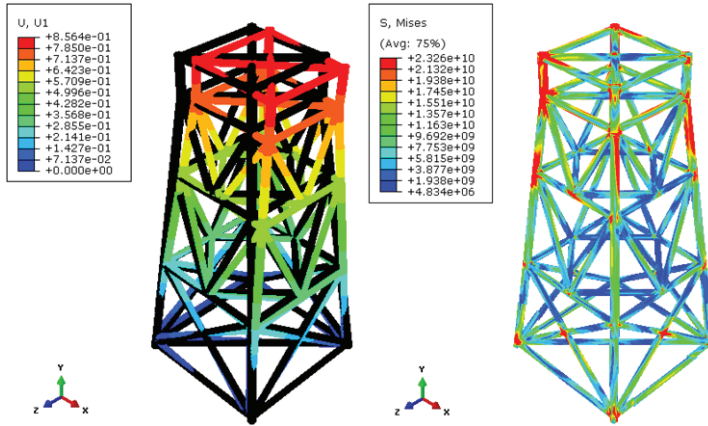




Şekil 7. Tepe noktasının zamanla değişen deplasman değerleri

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen deplasman değerlerinin dağılımı Şekil 8'in solunda görülmektedir. Aynı şeklin sağında ise

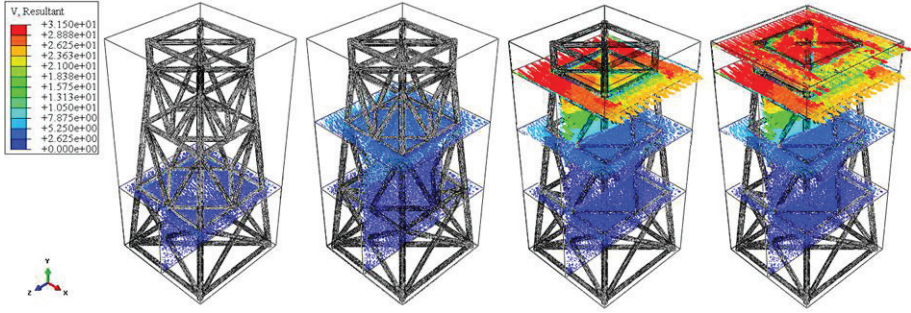
modelin üzerindeki gerilme dağılımı yer almaktadır.



Şekil 8. Modelin deplasman ve gerilme dağılımı

Bu çalışmada yapısal sonuçların yanında yapıyı çevreleyen akış ortamı ile ilgili sonuçlarda elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinden elde

edilen dalga ve rüzgar hızları ile akım vektörleri Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Akışkan hız dağılımı

## Sonuçlar ve Öneriler

Açık deniz kafes sistem tipi yapılar gerek karadaki uygulamalarına göre gerekse diğer tipteki açık deniz yapılarına göre proje, montaj ve sürdürülebilirlik açısından daha hassas ve maliyetli yapılardır. Bu nedenle tasarım aşamasında, işletmede karşılaşılabilecek olumsuz koşullar göz önünde bulundurulmalıdır. Çevresel kuvvetler açısından bu olumsuz durumlardan biride dalga ve rüzgar kuvvetlerinin aynı anda yapıya etki ettiği durumdur. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan yapıya Morrison Denklemi ile hesaplanan dalga kuvvetleri ile Eurocode hız profiline göre hesaplanan rüzgar kuvvetleri aynı anda etki ettirilmiştir ve analiz sonuçlarında doğal frekanslar, mod şekilleri, deplasman ve gerilme değerleri tahkik edilmiştir. Yapı sonlu elemanlar/Explicit, çevresini oluşturan dalga ve rüzgar modelleri ise sonlu elemanlar/CFD çözücüsüyle modellenmiştir. Sonuçların doğruluğu ise yarı analitik modellerle teyit edilmiştir.

İlk olarak analiz sonuçlarından doğal frekanslar incelenmiştir. İlk dört mod için elde edilen frekans değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu tabloya göre iki farklı analiz tipinden elde edilen sonuçlar arasındaki farkın % 3.76 ile % 3.95 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Son kat deplasman değerlerinin uyumu Şekil 7’de görülmektedir. Diğer katlar için elde edilen deplasman sonuçları ise Tablo 3’de

sunulmuştur. Birinci kattan son kata deplasman değerleri arasındaki farklar sırasıyla %2.18, %4.11, %4.20 ve %4.32 olarak hesaplanmıştır. İki analiz arasında deplasmanların ve doğal frekansın uyumu tespit edilerek, maksimum gerilme değerleri elde edilmiştir. Şekil 8’in solunda deplasmanların, sağında ise Von-Mises gerilmelerinin yapı üzerinde dağılımı görülmektedir. Beklenildiği üzere maksimum deplasman değerlerine yapının son katında ulaşılmıştır. Gerilme dağılımından görüldüğü üzere maksimum Von-Mises gerilme değeri mesnetlerde  $2.326 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir. Son katta ise gerilme değeri mesnette olduğu kadar olmasa da artış göstermiştir.

Yapı etrafındaki dalga ve rüzgar hız vektörleri Şekil 9’da görülmektedir. Sonlu elemanlar analizinde yapısal analiz yanında akışkan analizi de yapıldığı için akışkan davranışına ait değerlerde elde edilmiştir. Dalga hızı su yüzeyinde maksimum değeri olan 1.19 m/s’ye ulaşmıştır. Rüzgar hızı 55 m yükseklikte, yapının üçüncü katında 29.83 m/s iken 62.50 m’de (yapının tepe noktasında) 31.01 m/s değerine ulaşmıştır. Her ne kadar rüzgar hızı son katta fazla olsa da, üçüncü kattaki eleman sayısı ve kat yüksekliği dördüncü kata göre daha fazla olduğu için üçüncü kattaki rüzgar kuvvetleri dördüncü kata göre daha fazladır.

Dalga modellemesinde düzenli Lineer dalga kullanılmıştır. Düzenli dalgalar bir dalga periyodu ya da dalga boyunda tekrarlandığı için iki dalga periyodu için analiz sürdürülmüştür.

Dalga boyu için analiz yapılması durumunda sonlu elemanlar akışkan modelinin boyutları çok büyüyeceği için çözümü sonuçlandırmak zorlaşacaktır. Dalga periyodu için analiz yapılarak analiz süresi uzatılmış olsa da modelin boyutları daha küçük tutularak nokta ve eleman sayısı açısından çözümü daha elverişli bir model oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar programının hesaplamalı akışkanlar dinamiği modülü ile hesaplanan çevresel kuvvetler akışkan-yapı etkileşimi modülü ile yapıya aktarılarak yapısal analiz tamamlanmıştır. Kullanılan çift yönlü akışkan-yapı etkileşim analizi bilgisayar kapasitesi gerektirdiğinden literatürde daha az yer almaktadır. Bu çalışmada, akışkan-yapı etkileşim simülasyon modülü kullanılarak katı model ile akışkan modelinin çift yönlü etkileşimi sağlanmıştır. Bu tanımlama ile akışkandan yapıya kuvvetler, yapıdan akışkana ise kuvvetlerin yapıda meydana getirdiği deplasmanlar aktararak gerçeğe daha yakın bir model oluşturulmuştur.

Sonuç olarak yarı analitik analizinin sonlu elemanlar analiziyle olan uyumu tespit edilmiştir. Yapı boyutu arttıkça artan nokta ve eleman sayıları sonlu elemanlar çözümünü zorlaştıracağından, sadece yapısal çıktıları ihtiyaç duyulan durumlarda yarı analitik modelin kullanımı önerilebilir.

## Kaynaklar

ABAQUS/CAE 6.10, 2010.

Bai, X., Qin, W., (2014). Using vortex strength wake oscillator in modelling of vortex induced vibrations in two degrees of freedom, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 48, 165–173.

Bartrop, N.D.P., Adams, A.J., (1991). *Dynamics of fixed marine structures*. 3rd edition, Atkins Oil & Gas Engineering Limited. Epsom, UK.

Chakrabarti, S.K., (2005). *Handbook of offshore engineering 2*, Offshore Structure Analysis Inc., USA.

Dyrbye, C., Hansen, S.O., (2004). *Wind loads on structures*, John Wiley & Sons, Ltd. UK.

Erdem, R.T., (2015). Analysis of the guyed steel lattice tower due to environmental loads. *Gradevinar*, 67, 7, 681-689.

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*, 272, 455–470.

Gücüyen, E., Erdem, R.T., (2014). Corrosion effects on structural behaviour, of jacket type offshore structures, *Gradevinar*, 66, 11, 981-986.

Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü., (2013). Irregular wave effects on dynamic behavior of piles, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38, 1047-1057.

Hezarjaribi, M., Bahaari, M.R., Bagheri, V. Ebrahimian, H., (2013). Sensitivity analysis of jacket-type offshore platforms under extreme waves, *Journal of Constructional Steel Research*, 83, 147–155.

Karadeniz, H., (2001). Uncertainty modelling fatigue reliability calculation of offshore structures, *Reliability Engineering and System Safety*, 74, 323-335.

Kim, D. H., Lee, S. G., (2015). Reliability analysis of offshore wind turbine support structures under extreme ocean environmental loads, *Renewable Energy*, 79, 161-166.

Li, M., Zhang, H., Guan, H., (2011). Study of offshore monopile behaviour due to ocean waves. *Ocean Engineering*, 38, 17–18, 1946–1956.

Liu, Z.G., Liu, Y., Lu, J., (2012). Numerical simulation of the fluid–structure interaction for an elastic cylinder subjected to tubular fluid flow, *Computers & Fluids*, 68, 192-202.

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*, 332, 4817-4828.

Reddy, J.N., (2004). *An introduction to the finite element analysis*, Oxford University Press, USA.

Wang, X., Sun, R., Ao, X., Zhou, Z., Lang, J., (2013). Eulerian–Eulerian solid–liquid two-phase flow of sandstone wastewater in a hydropower station rectangular sedimentation tank, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17, 8, 700-719.

Zhao, M., (2013). Numerical investigation of two-degree-of-freedom vortex-induced vibration of a circular cylinder in oscillatory flow, *Journal of Fluids and Structures*, 39, 41–59.

Zwick, D., Muskulus, M., Moe, G., (2012). Iterative optimization approach for the design of full-height lattice towers for offshore wind turbines, *Energy Procedia*, 24, 297-304.

## Fluid structure interaction analyses of offshore lattice tower under environmental loads

### Extended abstract

*In the scope of this study, bidirectional fluid-structure interaction (FSI) analysis is performed to investigate dynamic and modal behaviors of lattice substructure of offshore tower. The studied model is a jacket type offshore structure with four stories having 65 m height and formed of cylindrical members with four angled legs.*

*The structure is under the effect of environmental loads as wind and wave loads as well as operational ones. While Eurocode velocity profile is used to calculate wind forces, Airy wave velocity profile is utilized to determine wave forces. Abaqus finite elements analysis program is performed to model the structure with environmental loads.*

*In the first step of this study, three dimensional offshore lattice tower with its environments are modeled in the finite elements analysis program to investigate the dynamic behavior under environmental loads. Secondly, the structure is also modeled as MDOF to determine the accuracy of the analysis results. The structure is created by Abaqus/Explicit solver. On the other hand, wind and wave forces are modeled by Abaqus/Cfd solver. The interaction of the solvers is provided by FSI module to determine the maximum displacement and stress values in each story of the structure. Co-simulation module of Abaqus analysis program is used to determine the exact interaction with solid (Abaqus/Explicit) and fluid models (Abaqus/Cfd). In Co-simulation module the boundary conditions on surfaces should be specified. The inlet velocities are parallel to the inlet flow axis without cross stream components. In the outlet boundary, zero pressure value and no streamwise variation for velocity components are set. Surfaces in z direction and top surface in y direction are set far field boundary conditions whose velocities are assumed to be equal to inlet velocity. On the other hand, base surface is defined as non-slip wall boundary condition. Fixed support conditions to sea floor are assigned on the lattice tower.*

*Meshing operation is the last step of finite elements modeling. 10-node modified tetrahedron elements (C3D10M) are used in ABAQUS/Explicit model.*

*Besides, 4-node modified tetrahedron elements (FC3D4) are utilized in wave and wind environments in ABAQUS/CFD model.*

*In finite elements program, the models are divided into nodes to perform and make complex analysis more simple analyze complex models. Distance between nodes in lattice tower is 0.01 m which is less than profile thickness. In wave and wind models, while node distance is 0.01 m between lattice tower and contact surfaces, the distance is 0.10 m in other parts.*

*While complex structure is modeled in FEM analysis, the structure is modeled as a single vertical line in MDOF method. Investigated model is quite applicable in terms of its geometry. For this reason, the structure is idealized as a lumped mass tower. Lattice type substructure is idealized a multi degrees of freedom (MDOF) system that is subjected to time varying horizontal wave force and static wind force.*

*In addition, first four modes with related mode shapes are obtained as well. Numerical results are controlled by semi-analytic modeling. The structure is modeled as multi-degree of freedom system in semi-analytic model and environmental loads are also effected to the structure.*

*First of all, natural frequency results are investigated after analyses. It is seen that the difference between two analysis types change between %3.76 and %3.95. Fourth mode appears to be torsion one when mode shapes are investigated.*

*Compatibility of peak point displacements is detected. Difference in displacement values from first to top story is calculated as %2.18, %4.11, %4.20 and %4.32 respectively.*

*Environmental forces calculated by CFD module of finite elements analysis program is transferred to the structure by FSI and structural analysis is completed. The accuracy of MDOF and finite elements analyses results are determined in the end. Because, node and element numbers make FEM analyses more difficult when structure height increases, MDOF analysis can be used as an alternative method when fluid outputs are not necessary other than structural ones.*

**Keywords:** *Offshore lattice tower, environmental loads; fluid-structure interaction; numerical analysis;*