

**T.C.
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HİDROLİK BİLİM DALI**

**UZAY KAFES TİPİ AÇIK DENİZ YAPILARININ DİNAMİK
ANALİZİ**

İnş. Müh. İsmail ERGİN

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet Ali YURDUSEV**

**II. Danışman
Yrd. Doç. Dr. Engin GÜCÜYEN**



MANİSA-2015

**T.C.
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HİDROLİK BİLİM DALI**

**UZAY KAFES TİPİ AÇIK DENİZ YAPILARININ DİNAMİK
ANALİZİ**

İnş. Müh. İsmail ERGİN

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet Ali YURDUSEV**

**II. Danışman
Yrd. Doç. Dr. Engin GÜCÜYEN**



MANİSA-2015

TEZ ONAYI

İsmail ERGİN tarafından hazırlanan "**UZAY KAFES TİPİ AÇIK DENİZ YAPILARININ DİNAMİK ANALİZİ**"adlı tez çalışması 09/09/2015 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Mehmet Ali YURDUSEV
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



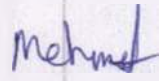
II. Danışman

Yrd. Doç. Dr. Engin GÜCÜYEN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



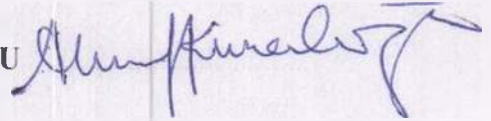
Jüri Üyesi

Doç. Dr. Mehmet SORGUN
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi



Jüri Üyesi

Yrd. Doç.Dr. A. Ali KUMANLIOĞLU
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

İsmail ERGİN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	II
ŞEKİLLER DİZİNİ	III
TABLO DİZİNİ.....	IV
TEŞEKKÜR	V
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1. Tezin Amacı	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Materyal	9
3.2. Yöntem.....	10
3.2.1. Nümerik Analiz.....	10
3.2.1.1. Yapı Modellemesi	15
3.2.1.2 Akışkan (Deniz Ortamı) Modellemesi	22
3.2.1.3. Akışkan-Yapı Etkileşiminin (FSI) Modellemesi	36
3.2.2. Yarı Analitik Analiz.....	38
4. SONUÇLAR.....	45
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	48
KAYNAKLAR.....	50
ÖZGEÇMİŞ.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	Sönüm
c₀	Sesin tuzlu sudaki hızı
E	Elastisite modülü
E_k	Kinetik enerji
E_p	Potansiyel enerji
E_{k, max}	Maksimum kinetik enerji
E_{p, max}	Maksimum potansiyel enerji
F	Kuvvet
F_D	Sürüklenme kuvveti sabiti
F_I	Atalet kuvveti sabiti
I	Atalet momenti
k	Us–Up eğrisinin eğimi olan EOS malzeme sabiti
L	Dalga boyu
m	Kütle
T	Dalga periyodu
t	Zaman
X	Deplasman
Φ	Potansiyel fonksiyonu
Γ₀	Sonlu elemanlar modelinde kullanılan değeri sıfır olan malzeme sabiti
Ψ	Akım fonksiyonu
Q	Eksenel kuvvet
ν	Poisson oranı
ρ_ç	Çeliğin yoğunluğu
ρ_e	Tuzlu suyun yoğunluğu
Γ₀	Grüneisen oranı olan EOS malzeme sabiti
ALE	Adaptiv Lagrangian-Eularian teknik
CFD	Hesaplama akışkanlar mekaniği (Computational fluid dynamics)
FSI	Yapı-akışkan etkileşimi (Fluid-structure interaction)
MDOF	Çok serbestlik dereceli sistem
SDOF	Tek serbestlik dereceli sistem

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Açık deniz platformu altyapı çeşitleri	1
Şekil 1.2. Uzak kafes tipi açık deniz yapılarının çeşitleri.....	3
Şekil 3.1. Modellenen uzak kafes tipi açık deniz yapısı	9
Şekil 3.2.a Uzak kafes elemanı.....	9
Şekil 3.2.b Uzak kafes birleşim detayları.....	15
Şekil 3.3. Silindirik profilin kesitinin oluşturulması.....	16
Şekil 3.4. Silindirik profilin oluşturulması.....	17
Şekil 3.5. Profillerin birleştirilmesi.....	17
Şekil 3.6. Uzak kafes sistem geometrisi.....	18
Şekil 3.7. Geometriye malzeme atanması	19
Şekil 3.8. Analiz şartlarının belirlenmesi	19
Şekil 3.9. Temas yüzeylerinin belirlenmesi	20
Şekil 3.10. Geometride noktalar oluşturulması	21
Şekil 3.11. C3D10M tipindeki elemanların oluşturulması.....	21
Şekil 3.12. Modelin mesh yapısı ve mesnetlenmesi	22
Şekil 3.13. Akışkan geometrisine üçüncü boyut kazandırılması.....	23
Şekil 3.14. Akışkan geometrisinin oluşturulması.....	24
Şekil 3.15. Akışkan geometrisinde temas yüzeylerinin belirlenmesi	25
Şekil 3.16. Akışkan modeli sınır şartları ve eleman tipi	26
Şekil 3.17. Açık ve kapalı sularda dalga tipleri.....	28
Şekil 3.18. Lineer Teoride Parçacık Yörüngeleri ve Kinematikleri	32
Şekil 3.19. Yapı ve akışkan çözücüsünün etkileşimi.....	36
Şekil 3.20. Genelleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Sistem	39
Şekil 3.21. Sonlu elemanlar ve tek serbestlik dereceli sistem modelleri	42
Şekil 3.22. Toplam dış kuvvetin zamanla değişimi.....	43
Şekil 4.1. Modelin görsel sonuçları	45
Şekil 4.2. Yapının tepe noktasındaki deplasman değerleri	46
Şekil 4.3. Akışkanın hız vektörleri ve renk dağılımı	47

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Akışkan modelinin sınır şartları.....	26
Tablo 3.2. Derin su, sığ su sınırları ve dalga boyları	33
Tablo 4.1. Farklı analizlerden elde edilen doğal frekans ve deplasman değerleri	45
Tablo 4.2. Katlardaki maksimum deplasman değerleri	46

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında ve lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili danışman hocam Sayın Prof. Dr. M.Ali YURDUDSEV' e, tezim konusunda bana destek olan II. Danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Engin GÜCÜYEN'e, lisans ve yüksek lisans eğitimim sırasında destek veren Sayın Yrd. Doç. R. Tuğrul ERDEM'e ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

İsmail ERGİN
Manisa, 2015

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Uzay Kafes Tipi Açık Deniz Yapılarının Dinamik Analiz

İsmail ERGİN

Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Ali YURDUSEV

II. Danışman: Yrd. Doç. Dr. Engin GÜCÜYEN

Günümüzde dünyada artan enerji ihtiyacıyla gerek yenilenebilir gerekse tükenbilir kaynakların tüketime kazandırılması acil bir ihtiyaç haline gelmiştir. Rezervin tüketime kazandırılmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarının karadaki arsa maliyetlerinin artması, tükenbilir kaynakların ise karadaki rezervinin azalması nedeniyle enerji tesislerinin inşası karadan denizlere doğru artarak kaymaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla çelik kazık, beton kazık tipi ve çelik uzay kafes tipi yapılar açık denizlerde sıklıkla kullanılmaktadır.

Yaygın kullanım alanı ve çevresel-toplumsal gereksinimleri karşılama açısından sahip olduğu önem nedeniyle açık deniz kafes sistem tipi yapıların dalga kuvvetleri etkisinde dinamik analizi yapılacaktır. Çalışmada kullanılan model silindirik elemanlardan oluşan dört ayağı yatay elemanlar ve düşey diyagonaller ile desteklenen üç katlı çelik uzay kafestir. Dalga kuvvetlerini altında dinamik analiz gerçekleştirilirken iki farklı yöntem izlenerek sonuçların doğruluğu tespit edilecektir. İlk yöntemde yapı ve çevresi yapı-akışkan etkileşimli (FSI) sonlu elemanlar metodu (FEM) ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizinde yapı ve çevresi bilgisayar destekli modellenmiştir. ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan bu çözümlemede yapı ABAQUS/Explicit, deniz ortamı ABAQUS/CFD çözücüsünde modellenerek çözücülerin etkileşimi ile yapının ilk doğal frekansı, ilgili mod şekli, deplasmanları ve gerilme dağılımı elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan ikinci yöntemde, yapı tek serbestlik dereceli sistem olarak modellenecek ve sistemin hareket denklemi 4. dereceden Runge-Kutta Metodu ile çözülecektir. Bu yöntemden yapının doğal frekansı ve deplasmanları elde edilecektir. Yapının etrafındaki ortamın modellenmesinde Lineer Dalga Teorisi kullanılacaktır. Birey düzenli dalgadan yapıya etki eden kuvvetlerin hesaplanmasında sürüklenme ve atalet kuvvetlerini kapsayan Morison Denklemi kullanılacaktır. İki farklı analizden elde edilen sonuçların uyumu tespit edilerek çalışma sonuçlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uzay kafes sistem, açık deniz yapısı, tek serbestlik dereceli sistem, sonlu elemanlar metodu

2015, 64 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Dynamic Analysis of Lattice Type Offshore Structures

İsmail ERGİN

**Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Ali YURDUSEV

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Engin GÜCÜYEN

In this day and age, it is an urgent necessity to gain both renewable and exhaustable resources into consumption due to increasing energy need in the world. Construction of energy facilities increasingly move from land to seas because of Increase in the land costs of renewable energy resources and decrease in the reserve of exhaustable resources in land. To satisfy this need, steel piles, concrete pile types and steel lattice types of structures are frequently used in seas.

Because of common usage area and importance while satisfying the environmental-social needs, offshore system types of structures will be analysed under the effects of wave forces. In this study, three storey lattice truss which is supported by four legged horizontal members formed of cylindiric ones and vertical diagonals is used. In the first method, the structure and its environment is modelled by using Fluid-structure interactive (FSI) finite elements method (FEM) is used as the second method of the study. Structure and its environment are modelled in the finite elements analysis. ABAQUS finite elements program is used in the solutions. While the structure is modelled in ABAQUS/Explicit solver, marine environment is modelled in ABAQUS/CFD one. First natural frequency of the structure, related mode shape, displacements and stress distributions are obtained by interaction of both solvers.

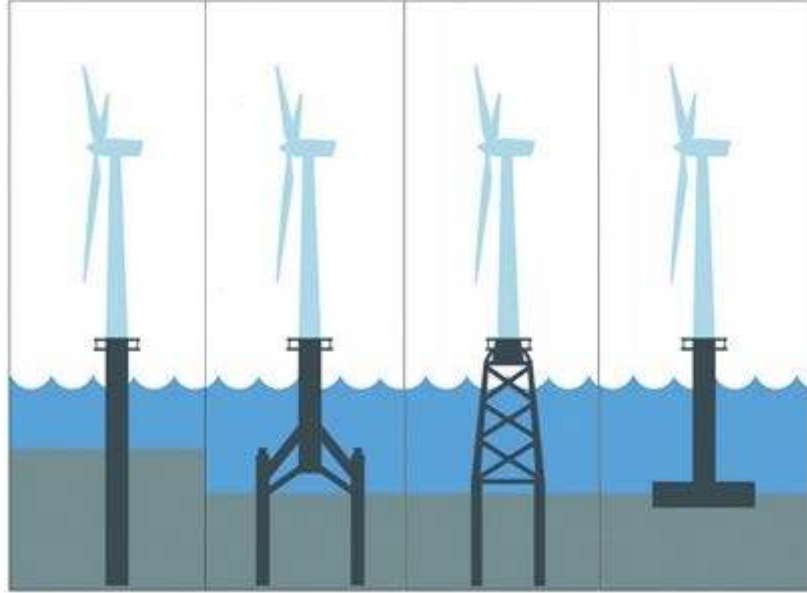
Single degree of freedom system is used as the second method of the study. The equation of motion of the system will be solved by 4th degree of Runge-Kutta Method. Natural frequency and displacements of the structure will be obtained by this method. Linear Wave Theory will be used while modelling the environment around the structure. Morison Equation including drift and inertia forces will be used to calculate the forces effecting the structure from single regular wave. The study is concluded by determining the compatibility of the results of two different analyses.

Keywords: Lattice truss system, offshore environment, single degree of freedom system, finite elements method

2015, 64 pages

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründeki gelişmeler karada olduğu gibi açık denizlerde de yapı inşasının artmasını beraberinde getirmiştir. Karadaki arsa maliyelerinin artması ve yapım için uygun alanların azalması bazı özel yapıların inşasının açık denizlere yönelmesine sebep olmuştur. Bu yapıların günümüzde en çok karşılaşılanları petrol platformları, rüzgar türbinleri ve savunma sanayi tesisleridir. Bu tesisler genellikle üst yapının yer aldığı platformlar ve platformdan gelen yükleri taşıyan platform alt yapısından oluşmaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan dört tip platform altyapısı vardır. Bunlar; çelik tekil kazık, çelik çoklu kazık, çelik uzay kafes ve beton ağırlık tipidir ve sırasıyla soldan sağa Şekil 1.1’de görülmektedir.



Şekil 1.1. Açık deniz platformu altyapı çeşitleri

Geniş ve önemli bir kullanım alanında hizmet veren açık deniz platform altyapılarının, gerek yapımı gerekse işletimi yüksek maliyetlidir. Bu nedenle tasarım aşamasında çok hassas hesaplamalar yapılarak uzun yıllar onarım gerektirmeyecek şekilde yapı tasarlanmalıdır. Platform altyapısı platformdan gelen eksenel yükleri, çevresel yanal yükleri ve gemi çarpması gibi ani yükleri taşıyarak zemine aktaracak kapasitede olmalıdırlar. Açık deniz platform altyapı tesislerinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken koşullar aşağıda sıralanmıştır.

- Yapının bulunduğu konumdaki su derinliği: Bu durum yapı tipi değiştirmektedir. Kafes sistem tipi her derinlikte uygulanabildiği gibi, kazık tipi ise genellikle derin suda uygulanmaktadır.

- Zemininin geoteknik özellikleri: Zemin tipi yapının mesnetlenme durumunu değiştirmektedir.

- Rüzgar hızı: Artan rüzgar hızı gerek dalga kuvvetlerini arttırmakta gerekse artan yükseklikle yapı üzerinde ekstra yük oluşturmaktadır.

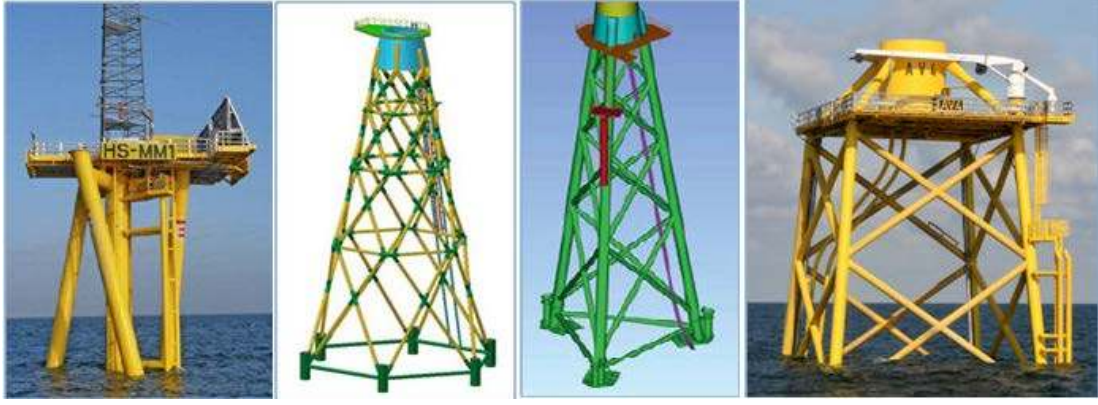
- Dalga-akıntı kuvvetleri: Zamanla değişen dalga kuvveti yapı üzerindeki hakim kuvvettir ve kaldırma, sürüklenme ve atalet kuvvetleri olarak etki ederler. Akıntı kuvveti ise sabit hızlı akıntının sebep olduğu ve dalga kuvvetinin yanında daha az etkili olan bir kuvvettir.

- Buz yükü: Yapı yüksekliğinin artmasıyla yüksek kesimlerde buz yükü yapının ağırlığını arttırmaktadır.

- Deprem yükü: Her durumda göz önünde bulundurulmaz ancak deprem bölgelerinde göz önünde bulundurulmalıdır.

Çelik tekil kazık, çelik çoklu kazık, çelik uzay kafes ve beton ağırlık tipi açık deniz platform altyapılarının arasında en geniş kullanım alanına sahip olan uzay kafes tipidir [1]. Bu özelliğinin nedeni ise açık denizde her derinlikte inşa edilebilmesi, diğer tiplere göre daha az çelik kullanılması ve dolayısıyla daha hafif olmasıdır [2, 3].

Şekil 1.2’de soldan sağa görüldüğu gibi uzay kafes açık deniz yapıları çarpık, altıgen tabanlı, üç ayaklı ve dört ayaklı olmak üzere tasarlanabilmektedir.



Şekil 1.2. Uzay kafes tipi açık deniz yapılarının çeşitleri [4]

Çarpık tipli uzay kafes sisteminde eleman sayısı diğer modellere göre daha az olduğundan daha az düğüm noktası olmasına rağmen daha büyük kesitli olduğu için diğerlerinden daha hafif değildir. Yerine montajı geometrisi nedeniyle diğerlerine göre daha zor olduğu için yaygın kullanım alanına sahip değildir. Bir diğer tip olan altıgen tabanlı model altı ayaklı olduğu için ayak sayısı kadar kazık çakma operasyonu gerektirir. Çelik maliyeti açısından 40 % avantaj sağlamasına rağmen geometrisi nedeniyle üretim maliyeti açısından bu avantajını kaybeder. Üç ayaklı modelde ise ayak sayısı az olduğu için yerine yerleştirilmesi kolaydır. Çelik açısından en az malzeme maliyetine sahiptir. Düğüm sayısı az olduğu için üretimi kolaydır. Ancak ayaklardan herhangi birinde meydana gelecek hasar yapıyı kullanılamaz hale getirebilir. Bu nedenle üç ayaklıdan daha maliyetli olmasına rağmen hasar durumu göz önünde bulundurularak Şekil 1.2'nin sağında görülen dört ayaklı model kafes tipi, açık deniz yapıları içinde en yaygın kullanılanıdır [5, 6].

Platform altyapısına gelen başlıca yükler platformun öz ağırlığı, platform üzerindeki ekipman ağırlığı ve çevresel yükler sayılabilir. Çevresel yükler ise dalga, akıntı, rüzgar ve deprem olarak söylenebilir. Çevresel yüklere yapıda doğrudan hasar etkisi yapan gemi çarpma yükü ve korozyonda eklenebilir.

Modeli ve üzerine gelen yükleri belirlenen bir açık deniz yapısının tasarımı için dinamik yükler altında davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Dinamik davranışının belirlenme nedeni ise en baskın yük olan dalga kuvvetinin yapı üzerinde dinamik etki yapmasıdır. Açık deniz yapısının dinamik davranışı incelenirken

analitik, yarı analitik yöntemlerden biri ya da birkaçı seçilebilir. Günümüzde bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeyle beraber nümerik yöntemlere daha çok başvurulmaya başlanmıştır. Nümerik olarak çözümlenen bir sistemin başka bir yöntemle de çözümlenmesinin doğruluk kontrolü açısından yararlı olacağı bilinmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında geometrisi ve boyutları belirlenen bir kafes sistem tipi açık deniz yapısının dalga kuvvetleri altında dinamik analizi yapılmıştır. Dinamik analiz kısmında yapı ve çevresi ABAQUS sonlu elemanlar programı ile modellenerek yapının deplasmanları, gerilme dağılımı, ilk doğal frekansı ile mod şekli elde edilmiştir. Sonuçların doğruluğu ise hareket denkleminin yarı analitik (tek serbestlik dereceli sistem) yöntemle çözülmesi ile tespit edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Yüksek bilgisayar kapasitesi gerektirmesi nedeniyle kafes sistem tipi açık deniz yapılarının nümerik analizi ancak son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeyle beraber hız kazanmaya başlamıştır. Buna rağmen yapı-akışkan etkileşimini (FSI) içeren çalışmalar literatürde yeteri kadar yer almamaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen yapısal çevresel modellemeye ait literatür çalışmalarına aşağıda yer verilmiştir.

Platform alt yapısı gerek platformdan gelen yüklere gerekse platformun bulunduğu ortamdan kaynaklanan yüklere karşı dayanıklı olarak tasarlanmalıdır. Tasarım aşamasında kafes sistem açık deniz yapıları, elemanların birleşim şekillerinin alfabe yer alan harflere benzerlik göstermeleri nedeniyle X, Y, K, T gibi isimlendirilmişlerdir.

Haselbacha ve ark.'nın [7] yaptığı çalışmada ara katlarda düşey diyagonallerin birleşimi X, taban ve tavan katındaki ayak-düşey diyagonal birleşimi Y, ara katlardaki ayak diyagonal birleşimi K düğüm olarak adlandırılmıştır. Vorpahl ve ark.'nın [8] yaptığı çalışmada platform altyapısı ile platformun, platform alt yapısı ile zemin altı temelin bağlantıları rüzgar ve dalga yüklemeleri altında açıklanmıştır. Dubois ve ark.'nın [9] çalışmalarında kafes tipi açık deniz yapılarında düğüm noktası tasarımının yapısal davranışına etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada ana taşıyıcı ayaklara yan taşıyıcı bağlantıları şekillerine göre YY, KK ve YT olarak isimlendirilirler. Yapılan çalışmada düğüm noktası tasarımına göre kafes sistemin yorulma ömrünün % 15 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Shi ve ark.'ları [10] çalışmalarında aynı model açık deniz rüzgar türbini platformuna üç farklı şekilde çelik altyapı tasarımı yapılmıştır. Bunlar tekil silindirik kazık, çoklu (üç) silindirik kazık ve uzay kafes modellerdir. Kütle olarak modeller karşılaştırıldığında çoktan aza doğru sıralama çoklu, kafes ve tekil olmaktadır. İlk doğal frekansa göre karşılaştırma yapılacak olduğunda ise bu üç modelde dayanıksız-rijit davranış göstermişlerdir. Ancak en dayanıksız olanı kafes en rijit olanı ise çoklu kazıktır. İncelenen çalışmaya göre dinamik yükler altında en iyi performansı kafes tipi göstermiştir. Ondan sonra çoklu kazıklı model gelmektedir.

Bağlantı ile ilgili başka bir çalışmada KT tipi düğüm noktalı açık deniz kafes sistemine güçlendirme elemanları yerleştirilerek boyutları, sıklıkları değiştirilen 118 model Ahmadi ve ark. [11] tarafından incelenmiştir. Silindirik elemanların düğüm noktalarında ana taşıyıcı ayakların içine yüzük şeklinde çelik güçlendirme elemanları yerleştirilmiştir. Güçlendirme uygulanmış ve uygulanmamış modellere eksenel kuvvet uygulanarak gerilme dağılımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın devamı niteliğindeki makalede ise Ahmadi ve ark. [12] istatistiksel analizleri modellere uygulamıştır.

Açık denizde deniz seviyesinin altında ve üstünde devam eden yapılara başlıca kuvvet olarak dalga ve rüzgar kuvvetleri etki eder. Deniz seviyesinden olan yükseklik arttıkça rüzgar kuvvetleri etkisini arttırmaya başlar. Ancak dinamik yük olarak etki etmesi nedeniyle dalga kuvvetleri genelde statik olarak etki eden rüzgar kuvvetlerine göre yapı üzerinde daha yıpratıcı etkiye sahiptirler [13]. Benzer yapıların karadaki uygulamalarında baskın yük rüzgar kuvvetiyken [14] denizdeki uygulamalarda dalga yükünden sonra gelmektedir [15]. Her ne kadar Woude ve ark. [16] bu tip yapılardaki deprem kuvvetlerini incelemiş olsalarda Bazeos ve ark. [17] diğer kuvvetlerin yanında deprem kuvvetinin ihmal edilebileceğini tespit etmiştir.

Benitz ve ark. [18] Lineer (airy) nonlinear (stokes, cnoidal, solitary) dalga teorilerine göre açık deniz yapısı hidrodinamik tasarımını tarif etmiştir. Ardından hidrodinamik tasarıma yapısal tasarım eklenerek akışkan-yapı etkileşimi modellenmesi açıklanmıştır. Sonlu hacimler yöntemi ile FSI analizi ile ilgili derleme bir çalışmadır.

Jia [19] tarafından yapılan çalışmada sadece dalga kuvvetlerine göre kafes sistem tipi açık deniz yapılarının yorulma ömürlerini belirlemiştir. Her ne kadar dalga kuvvetleri çalışmada yer alsa da nümerik modelleme aşamasında sadece yapı modellenmiştir. Zhang ve ark. [20] çalışmalarında açık deniz yapılarında çevresel yüklerin hesabına değinmiş aylık değişen rüzgar hızlarına göre dalga kuvvetleri hesaplanarak gerçek bir deniz yapısının tasarımı yapılmıştır. Dalga parametrelerinin hesabında Johnswap Spekturumu kullanılmıştır. Dinamik push-over analizi ile dalga yükleri altında yapının taban kesme kuvveti değişimi incelenmiştir. Analizlerde akışkan yapı etkileşimi göz ardı edilmiştir.

Çalışma konusu yapılarda, sadece dalga kuvveti etkisi incelenebileceği gibi daha kritik durumların oluşup oluşmadığını belirlemek açısından dalga ve rüzgar kuvvetinin kombinasyonu da incelenebilir. Yapılan literatür araştırmalarında bu kuvvetlere, yıpratıcı etkisi bilinen, korozyonunda eklendiği durum tespit edilmiştir. Dong ve ark. [21] Dalga ve rüzgar kuvvetlerinin kombinasyonu altında korozyon etkisi gerilme ve eksenel kuvvetler açısından incelenmiştir. Eleman birleşim yerlerindeki çatlak büyüme hızına göre yapının güvenilirlik analizi yapılmıştır. Korozyonlu modelin yanında korozyonsuz model de çalışılarak korozyon etkisi incelenmiştir.

Çevresel yüklerin etkisindeki yapıların dinamik davranışının incelenmesinde akışkan-yapı etkileşimi (FSI) günümüzde artarak kullanılmaktadır. Akışkan-yapı etkileşimli çözümlerler bağlantılı ilerleme gerektiren hesaplamalardır. Akışkan-yapı etkileşimi çözümleri tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere iki sınıfta incelenirler. Tek yönlü çözümlerde sadece akışkan yapıya etki ederken çift yönlü çözümlerde yapının da akışkan üzerindeki etkileri hesaplamalara dahil edilir [22]. Tek yönlü akışkan yapı etkileşimli çalışmalar Abdel Raheem [23], Gücüyen ve ark. [24], ve Gong ve ark [25] tarafından yapılmıştır. Tek yönlü etkileşimde akışkan kuvvetleri hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD) yöntemiyle hesaplanarak yapıya etki ettirilir.

Çift yönlü akışkan-yapı etkileşimli çözümlerlerde ise akış kuvvetleri nedeniyle yapıda meydana gelen deplasmanların akışkan üzerindeki etkileri de göz önünde bulundurulur. Çift yönlü akışkan-yapı etkileşimli çözümler, Fluid-Lagrangian [26, 27], Lagrangian-Eulerian (ALE) [28-30] ve Eulerian-Eulerian [31] olarak farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlardan ilki Bai ve ark. [26] ile Gücüyen ve ark [27] tarafından çalışılmıştır. Lagrangian-Eulerian tekniğine ise Namkoong ve ark, [28], Liu ve ark. [29] ve Surana ve ark.'nın [30] çalışmalarında yer almaktadır. Akışkan-yapı etkileşiminin bir diğer tekniği olan Eulerian-Eulerian ise Wang ve ark.'nın [31] çalışmalarında yer almaktadır.

Bilgisayar kapasitesinin yetmeyeceği yada akışkana ait çözümlerler ihtiyaç duyulmayan durumlarda akışkan-yapı etkileşimli çözümlerler yerine analitik yada yarı analitik yöntemlerin kullanıldığı yapılan literatür araştırmalarında belirlenmiştir.

Nümerik analize alternatif olarak kullanılacak bu yöntemlerden başlıcalarının tek serbestlik dereceli sistem yöntemi (SDOF), çok serbestlik dereceli sistem yöntemi (MDOF), kuvvet ayırıştırma yöntemi ve varyasyonel yöntemler olduğu Bai ve ark. [32] tarafından belirtilmiştir. Bu yöntemler arasında en çok kullanılanı tek serbestlik dereceli sistem yöntemidir. Çok katlı yapılarında bu yöntemle çözülebileceği Fujin [33] tarafından yapılan çalışmada yer almaktadır. Kim ve ark. [34] tarafından yapılan çalışmada ise açık deniz kafes sistem platformunun yapısal analizi dalga ve rüzgar kuvvetlerine göre hareket denkleminin tek serbestlik dereceli sistem yöntemiyle çözümlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçların doğruluğu nümerik olarak sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Ancak bu çalışmada tek yönlü akışkan-yapı etkileşimi modellenmesi yapılmıştır. Çok serbestlik dereceli sistem yöntemiyle yapılan çalışmalara örnek olarak Zhao [35], Zhao ve ark. [36] ve Goncalves ve ark. [37] verilebilir. Tek ve çok serbestlik dereceli sistem yöntemlerinin karşılaştırmalı sonuçlarına ise Blazejczyk-Okolewska ve ark.'nın [38] çalışmasında yer verilmiştir.

2.1. Tezin Amacı

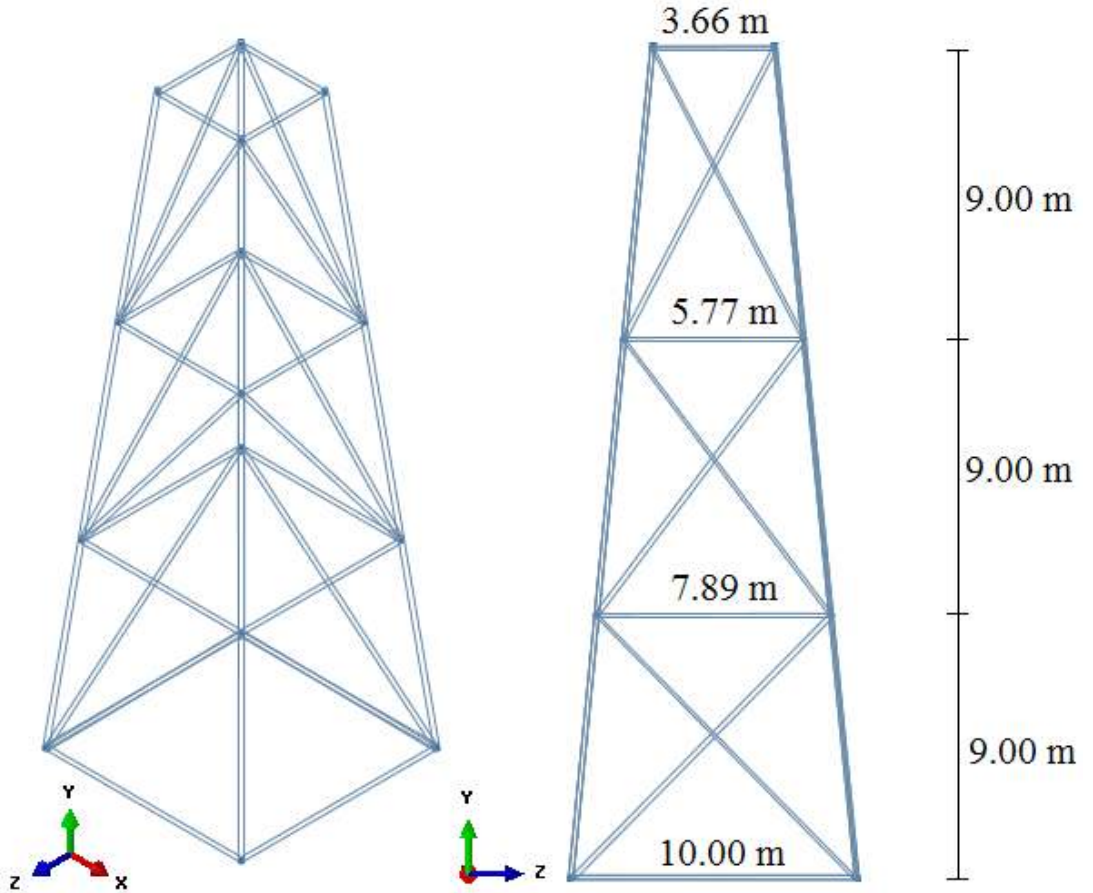
Yapılan literatür araştırmalarında kafes sistem tipi açık deniz platform altyapısının yapısal ve çevresel yükler altında modellenmesine rastlamak mümkündür. Bu çalışmalar arasında gerek analitik, gerek yarı analitik ve günümüzde genellikle de nümerik çalışmalar yer almaktadır. Nümerik çalışmalarda yapının konumu gereği akışkan-yapı etkileşimli modeller sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmalarda akışkan kuvvetleri katı modelden ayrı düşünülerek, akışkan kuvvetleri hesaplanmakta ve yapıya dışarıdan etkitilmektedir. Ancak bilinmektedir ki bu durumda yapıdan akışkana aktarılabilecek deplasmanlar ve akışkanda yol açacakları akım bozulmaları göz ardı edilmektedir.

Bu amaçla göz ardı edilen bu çift yönlü akışkan-yapı etkileşimli modelleme bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yüksek bilgisayar kapasitesi gerektiren nümerik analizlerin yanında sonuçların doğruluğu yarı analitik yöntemle karşılaştırılarak yapısal çıktılar arasındaki uyum ve akışkan çıktılarına ait parametreler elde edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışması kapsamında Şekil 3.1.'de görülen açık deniz petrol platformu altyapısı, 18 m derinliğinde deniz ortamına yerleştirilerek hidrodinamik dalga kuvvetleri altında dinamik analizi yapılacaktır. Uzay kafes sistem tipinde modellenen yapı çelik malzemeden imal edilmiştir. Yapı ABAQUS [39] Sonlu Elemanlar Analiz programında modellenmiş ve analiz edilmiştir.



Şekil 3.1. Modellenen uzay kafes tipi açık deniz yapısı

Yapısal davranışı incelenen model literatürde yer alan [40] modele benzer modeldir ve Şekil 3.1.'de görülmektedir. 27,00 m yüksekliğinde olan ve üç kattan oluşan yapının kat yükseklikleri her katta sabit ve 9,00 m'dir. Yatay taban uzunlukları birden dörde kadar sırasıyla 10,00 m, 7,89 m, 5,77 m, ve 3,66 m.'dir. Modelde kullanılan 36 adet elemanın her birinin çapı 0,178 m ve et kalınlıkları

$0,89 \times 10^{-3}$ m'dir. Toplamda $1,50 \times 10^4$ kg olan, platformda yer alan, yapısal olmayan kütleler, konsantre kütle olarak en üst kottaki her köşeye etki ettirilmiştir.

3.2. Yöntem

Bu çalışmanın ilk adımında üç boyutlu açık deniz kafes sistem tipi kule ve ortamı sonlu elemanlar analizi ile modellenerek dalga yükleri altındaki dinamik davranışı elde edilmiştir. İkinci adımda ise elde edilen sonuçların kontrolü amacıyla sistem birde SDOF olarak modellenmiş ve sonlu elemanlar analizinin doğruluğu tespit edilmiştir. Gerek numerik FSI analizinde gerekse yarı-analitik SDOF analizinde Denklem (3.1)'de matris formunda verilen sönümsüz hareket denklemi kullanılır.

$$m\ddot{X} + kX = F \quad (3.1)$$

X, F, m ve k: konum vektörü, kuvvet vektörü, kütle ve rijitlik vektörü olarak isimlendirilirler. Nokta işareti ise ifadenin zamanla değişimini göstermektedir. [41]. Bu denklemin numerik çözümü Bölüm 3.2.1'de semi analitik çözümü ise bölüm 3.2.2'de açıklanmıştır.

3.2.1. Nümerik Analiz

Hem akışkan ortamında hem de akışkanı çevreleyen katı cisim içindeki parametrelerin zamanla ve konumla değişen özelliklerinin tanımlanması amacıyla bilgisayar-destekli nümerik modelleme gereği duyulmaktadır. Akışkan-Yapı Etkileşim Problemlerinin çözümünde akışkanın yapı üzerinde etki oluşturduğu gibi yapının da akışkan üzerinde etkileri söz konusu olmaktadır. Akışkan-yapı etkileşiminin bir arada çözümlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan çift yönlü akışkan yapı etkileşim probleminde Fluid-Lagrangian tekniği kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar Analiz programında, akışkan modeli (Fluid) CFD çözücüsünde oluşturulurken yapı modeli (Lagrangian) Explicit çözücüsünde oluşturulmuştur. Akışkan kuvvetinin yapıda oluşturduğu deformasyonlar ve bu deformasyonların akışkan üzerinde oluşturduğu etkiler akışkan-yapı temas yüzeyleri üzerinden birbirlerini etkileyecektir.

Bu çalışma kapsamında; ilk aşamada, akışkan ve yapının sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve çift yönlü akışkan-yapı etkileşimi ile akışkan ve yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise nümerik olarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar çözümlemesi ile yapının yarı analitik çözümlemesinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki aşamada elde edilen sonuçlar bu çalışmada değerlendirilmiştir.

Bu amaca yönelik olarak da Sonlu Elemanlar Metoduna dayalı, yüksek performanslı, tanımlanan modellere yönelik gerçekçi akışkan-yapı çözümlemesi yapabilen, güvenilir ve hassas sonuçlar üretebilen, özellikle etkileşim problemlerinde aktif kullanılabilen ABAQUS programından yararlanılmıştır. Farklı malzeme seçenekleri içeren programla doğrusal olmayan analiz ve artımsal dinamik analiz yapılabilir. Programın sağladığı özellikler [42] tarafından aşağıdaki gibi tarif edilmiştir.

Programda ABAQUS/CAE ara yüzü ile çalışan ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit, ve ABAQUS/CFD olmak üzere üç ana çekirdek yazılımı vardır:

ABAQUS/CAE; kullanıcı ve bilgisayar ihtiyaçlarına yönelik olarak geliştirilmiş, doğrudan ve dolaylı yollardan dışarıdan geometri okutmaya ve sadeleştirilme yapmaya olanak sağlayan bir ara yüzdür. Bununla birlikte, tüm modelleme, çözümü takip etme, çözümü yönetme ve sonuçları inceleme özelliklerine sahip tüm ön ve son işlemlerini de yapabilmektedir. ABAQUS/CAE’de, çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi veya çözümün sonlandırılması kolaylığı vardır. ABAQUS’te yapılacak her tanımlama, belli bir birim altında toplanmıştır. Her birim kendi içinde mantıksal alt tanımlama komutları içerir. Kullanıcı, bir birimin işlevini tam olarak kavradığında diğer birimlerin de işlevlerini nasıl yürüttüğünü kolaylıkla kavramaktadır.

ABAQUS/Standard genel amaçlı sonlu elemanlar modülüdür. Statik, dinamik, ısı transferi, akustik ve bunların bağlaşımlı (çift-etkili) çözümlemeleri için geliştirilmiş, geniş ve gelişmiş eleman, malzeme ve temas modelleme kabiliyetine sahip güçlü ve güvenilir bir kapalı (Implicit) sonlu elemanlar çözücüsüdür.

ABAQUS/Explicit, zamana bağılı dinamik problemlerin modellenmesi ve çözümlenmesi için geliştirilmiş açık (Explicit) Sonlu Elemanlar Metoduna dayalı bir çözücüdür. Düşürme testi benzetimleri, çarpışma (kaza) ve ürün benzetimleri gibi yüksek derecede doğrusalsızlığın bulunduğu devinim problemlerinin çözümü için uygundur. Gelişmiş malzeme modelleri ve eleman kütüphanesi bulunmaktadır. Beton, toprak, kil, kaya, sünger, lastik, köpük, dökme demir, karma (kompozit) malzeme modelleri mevcuttur. Ayrıca, tam ve yarı otomatik temas modelleme kabiliyetine sahiptir.

ABAQUS/CFD; ileri seviyede hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsüdür. ABAQUS/CAE ile entegre çalışmakta olup ön/son özellikleri ABAQUS/CAE tarafından desteklenmektedir. ABAQUS/CFD ile doğrusal olmayan ısı-akış ve yapısal-akış problemleri gibi birçok uygulamanın etkin ve gerçekçi bir şekilde modellenmesi mümkündür.

Programda yer alan kısımlar; Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Verify, Job, Visualization ve Report olarak sıralanabilir.

Part kısmında, geometrik parçaların oluşturulması işlemi yapılır. Üç, iki yada axisymmetric boyutlu elemanlar oluşturulabilir. Axisymmetric geometri daha çok noktasal boyutta, örneğin kum taneciğinin modellenmesinde kullanılır. Oluşturulan geometrik parçalar, deformasyona uğrayabilen, discrete rijit, analitik rijit ya da Eulerian geometri tipleri arasından seçilir. Eulerian geometri daha çok etkileşimli modellerde kullanılarak, örneğin bardaktaki suyun modellenmesi, iki çözücünün birlikte kullanılmasına gerek kalmadan modelin çözümünün daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Katı, kabuk, çizgisel ya da noktasal eleman part kısmında oluşturulabilir. Bu kısımda modele ait iki boyutlu çizim her hangi bir çizim programındaki gibi yapılır. Daha sonra elde edilen geometriye üçüncü boyut uzatma, döndürme ve eğip-döndürme işlemleri yapılarak kazandırılır.

Property bölümünde, malzeme özellikleri tanımlanır. Tanımlanan malzeme özellikleri kesit oluşturularak bu kesite atanır. Malzeme atanan kesitle geometri eşleştirilerek kullanılacak malzeme geometriye atanır. Aynı geometri üzerinde farklı malzemeler tanımlanarak kompozit malzemeli modellerde oluşturulabilir. Bunun için

part bölümünde geometri parçalanmalı ya da assembly bölümünde birden çok geometri birleştirilmelidir.

Assembly kısmında, parçaların birbirlerine göre konumlandırılarak montajın oluşturulması işlemi gerçekleştirilir. Part kısmında oluşturulması zor olan geometriler bu bölümde birleştirilerek zor geometrik modeller oluşturulabilir. Birleştirilen elemanların istenirse birleşim bölgeleri belli olacak şekilde geometri oluşturularak tek geometriye birden çok malzeme ataması yapılabilir. Böylelikle interaction kısmında tanımlanacak temas yüzeyleri azaltılarak analiz süresi kısaltılabilir.

Analiz tipi, adımları, çıktıları, analizde kullanılacak çözücü ve çözüm tipi Step bölümünde tanımlanır. Bir modelde birden fazla analiz adımı tanımlanabilir ancak; birbirini takip eden adımlar uyumlu olmak zorundadır. Statik analiz tipinden sonra aynı model içinde ısı transferi analizi tanımlanamaz. Bu bölümde tanımlanacak analiz tipi kullanılan çözücüyle uyumlu olmak zorundadır. Örneğin; ABAQUS/Standard çözücüsüyle Explicit analiz tipi tanımlanamamaktadır. Analizin süresi ve zaman adımları bu kısımda belirlenir. Zaman adımı içerisinde yeteri kadar iterasyon yapılamayıp çözüm elde edilemezse analiz program tarafından sonlandırılmakta ve program hata vermektedir. Çözüm sonucunda hangi çıktılarına gereksinim varsa bu bölümde istenen çıktılar belirlenir. Analizde kullanılacak çözücü ve çözüm tipi sonuçları etkilemektedir. Analiz çözücü ve çözüm tipi modellenen sisteme göre değişmektedir. Kullanılan eleman sayısı ve tipi ile uyumlu çözücü ve tipi değişmektedir.

Modeldeki parçalar arası temasın modellenmesi Interaction kısmında yapılır. Temas yüzeyleri master-slave olarak belirlenir. Bu yüzeyler arasındaki sürtünme, sönüm gibi özellikler temas özellikleri kısmında tanımlanır. Modeldeki tüm geometriler temas halindeyse yüzey seçmeye gerek kalmadan tüm model seçilerek genel etkileşim tanımlanır. Akışkan ile yapı arasındaki temas bu kısımda tanımlanmaktadır. İki farklı model (akışkan-uzay kafes sistem) tek CAE ara yüzünde birleştirilir. Bunun için modellerden birinin başka bir CAE ara yüzünde oluşturulup içeri alınması gerekir. İki modelli ara yüz oluşturulduktan sonra temas oluşması için Assembly kısmında her ikisinin de aynı koordinatlarda olması gerekir, aksi durumda program çalıştırıldıktan sonra hata vermektedir. Modellerde bir biriyle temas eden

yüzeyler tanımlanarak Interaction kısmının Interaction Manager araç çubuğundaki Fluid-Structure Co-simulation boundary alt kısmında tanımlanan analiz tipiyle eşleştirilir. Böylelikle başka bir sınır şartına gerek kalmadan akışkanın yapı ile temas ettiği bölgelerdeki davranışı belirlenir.

Load bölümünde, yükleme miktarı-tipi, başlangıç ve sınır şartları tanımlanır. Mekanik, ısı akustik, akışkan, elektrik ve kütle aktarımı yükleme tipleridir. Step bölümünde tanımlanan analiz adımlarında bu yüklemeler yapılır. Modele farklı zamanlarda farklı yüklemeler yapılacaksa farklı analiz adımları tanımlanarak her bir adımda yapılacak yükleme modele atanır. Modelin başlangıç sınır şartları bu bölümde gerçekleştirilmektedir.

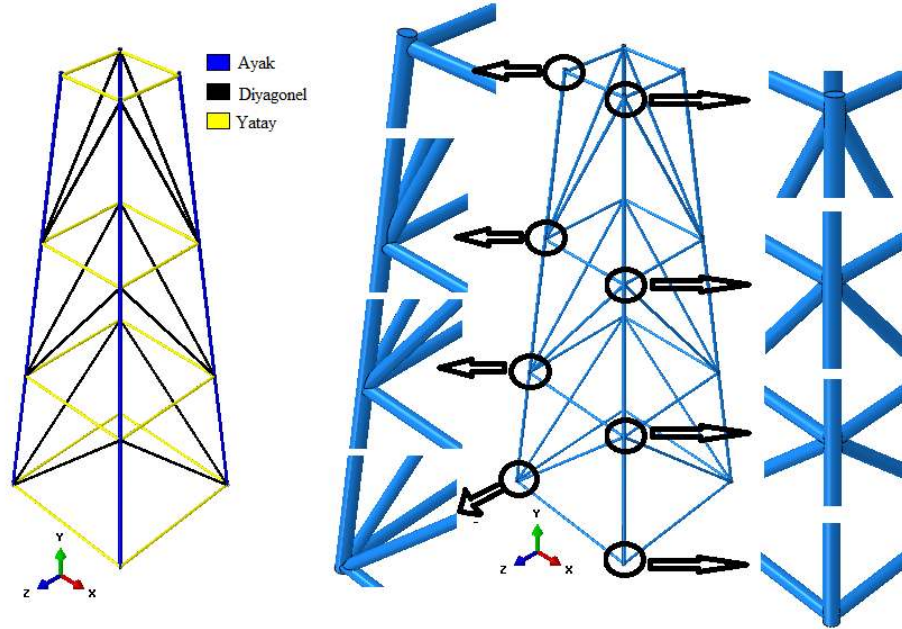
Mesh bölümünde, geometri üzerine istenen sayıda ve aralıkta nokta (node) atanır. Geometrinin yapısı nedeniyle bazı bölgelerde noktaları fazlalaştırmak ya da azaltmak gerekebilir. Bu işlem seed edges araç çubuğunda yapılır. Noktalar birleşerek gridleri meydana getirir ve bu gridlere eleman tipi ataması yapılarak modeli oluşturan elemanlar elde edilir. Kübik, prizmatik ve kama (wedge) kullanılan eleman şekilleridir. Eleman şekli seçildikten sonra bu şekillere ve analiz tipine uygun birden çok eleman tipi program tarafından belirlenir, kullanıcı bu eleman tiplerinden probleme uygun olanı seçer. Modelde kullanılan nokta ve eleman sayısı sonuçları değiştirmektedir. Bir problem farklı nokta sayıları için çözümlidir. Değişen nokta sayıları için yakınsama kontrolü yapılarak uygun nokta sayısı belirlenmelidir. Mesh kısmından Job kısmına geçmeden önce meshlerin kontrol edilmesi, problemin çözüm aşamasında meshle ilgili bir sorunla karşılaşılmasından önce gereklidir. Verify mesh araç çubuğunda meshler kontrol edilerek hatalı noktalar ve hata oranları gözlemlenebilir.

Çözüm yönetimi ve izleme işlemleri Job bölümünde gerçekleşir. Bu bölümünde, görüntüleme kısmı sayesinde adım adım çözüm takip edilerek programın verdiği uyarılar ve hatalar takip edilir. Programın hata verdiği ve çözülmesi diğer hatalara göre daha zor olan hatalar, mesh ve step hatalarıdır. Mesh hatalarından sakınmak için programın uygun gördüğü nokta aralıklarından daha büyük adımlar seçilmemelidir. Step hatalarında ise adım aralıkları büyük tutulmamalıdır.

Sonuçların incelenmesi ise Visualization kısmında gerçekleştirilir. İstenen çıktılara ait değerler grafikler ya da renk skalaları kullanılarak oluşturulan görseller yardımıyla incelenir. Report araç çubuğu kullanılarak çıktılar sayısal olarak istenilen formatta kaydedilebilir.

3.2.1.1 Yapı Modellemesi

Bu çalışma kapsamında uygulamada kullanılan bir açık deniz platformu modellenmiştir. Modellenen yapı Şekil 3.2.a-b’de görülmektedir. Yapı her katta bulunan dört adet ayak, dört adet yatay ve dört adet diyagonal elemandan oluşmaktadır. Böylece yapı 36 adet silindirik elemanın birleştirilmesiyle meydana gelmiştir.



Şekil 3.2.a. Uzunluk kafes elemanları Şekil 3.2.b. Uzunluk kafes birleşim detayları

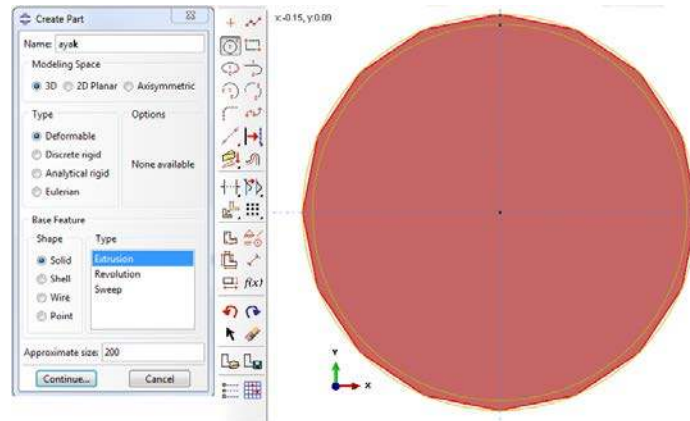
Şekil 3.2.a.’da ayak, diyagonal ve yatay elemanların yerleşimleri görülmektedir. Ana taşıyıcı elemanlar ayaklar, destek taşıyıcı elemanlar ise diyagonal ve yatay elemanlardır. Ayakların açılal yerleşiminden dolayı diyagonal ve yatay elemanların uzunlukları kat yükseldikçe azalırken çap ve et kalınlıkları sabit kalmaktadır. Şekil 3.2.b.’ de ise yapıda kullanılan birleşim detayları görülmektedir. Her bir iki ana taşıyıcı eleman birbirlerine tek bir düşey destek taşıyıcıyla bağlandıkları için bu tip birleşimler Y tipi olarak isimlendirilmektedir. Yatay destek taşıyıcı elemanların ana taşıyıcı ile birleşimi ise T tipi olarak isimlendirilmektedir.

Bir ana taşıyıcı eleman ilk katta Y-T tipi bir birleşime sahipse son katta T tipi birleşimle yapı modellenmiştir. Aynı şekilde ilk katta T tipi birleşime sahipse son katta Y-T tipi bir birleşimle modellenmiştir.

Bu bölümde; uzay kafes sistemin nümerik modellenme aşamalarına değinilecektir. Her bir kattaki elemanların öncelikle geometrileri oluşturulmuştur. Daha sonra bu elemanlar aşağıda tarif edileceği gibi birleştirilerek uzay kafes sistem modeli elde edilmiştir. Ardından, 15 m $\times$ 15 m taban alanında ve 18 m yüksekliğinde başka bir geometri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu geometri yapıyı çevreleyen deniz ortamını modellemek için kullanılacaktır. Bu geometrinin içine yerleştirilen kafes sistem, daha sonra çıkarılarak kafes sistem hacmi kadar bir hacim geometriden çıkarılmış olacaktır. Elde edilen bu geometri 18 m derinliğindeki deniz ortamının oluşturmaktadır. Bu geometri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) çözücüsü ile modellenmiştir. Uzay kafes sistem modeli ise ABAQUS/Explicit çözücüsüyle modellenmiştir.

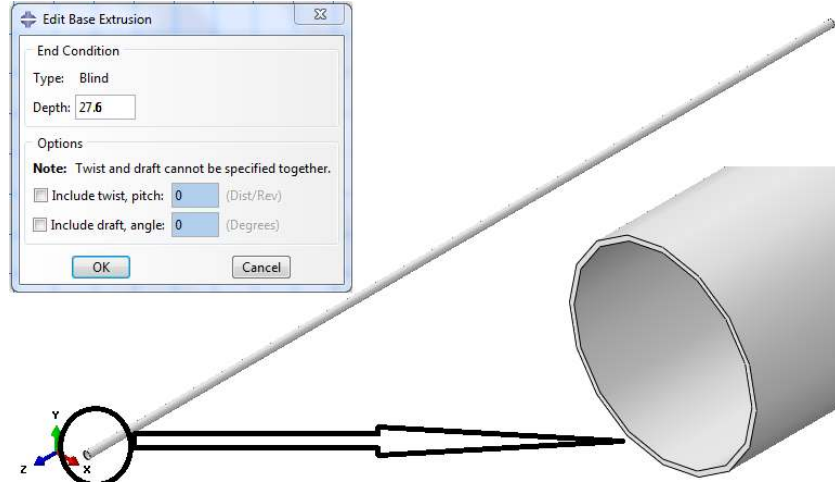
Bir önceki kısımda, Sonlu Elemanlar Metoduna dayalı bir programda model oluştururken izlenecek adımlara değinilmişti. Bu adımların çalışmada nasıl uygulandığı, hem yazılı hem de görsel olarak açıklanmıştır.

İlk adım geometrilerin oluşturulmasıdır. Bunun için Şekil 3.3’de görüldüğü gibi Part bölümünde ana taşıyıcı (ayak) borunun çizilmesi ile işleme başlanır. Ana borunun yarıçapında bir daire çizilir.



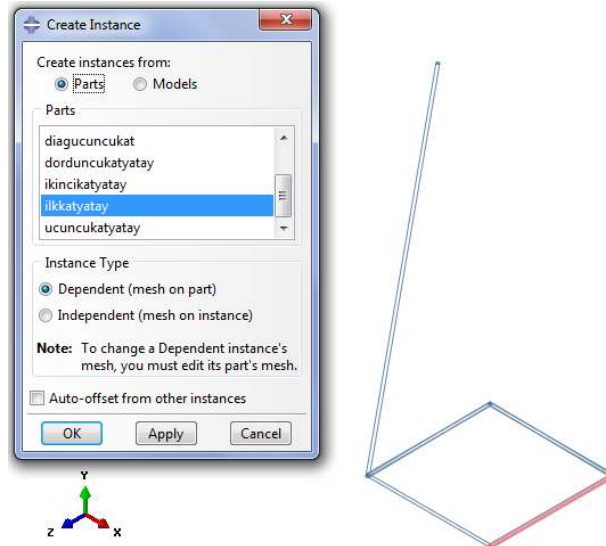
Şekil 3.3. Silindirik profil kesitinin oluşturulması

Ana borunun et kalınlığı çıkarılarak ikinci bir daire (sarı çizgili) kesiti oluşturulduktan sonra borunun çizimi tamamlanır. Böylelikle içi boş boru profil çizilmiş olur. Borunun üçüncü boyutunu oluşturmak için Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, uzatma kısmına boru boyu $L=27.6$ m olarak yazılır.



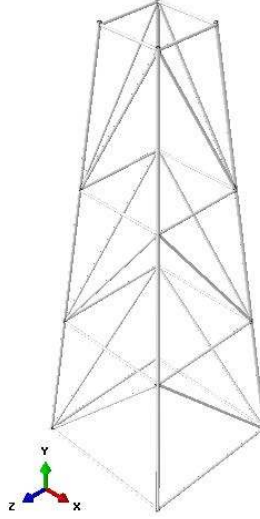
Şekil 3.4. Silindirik profillerin oluşturulması

Aynı işlem adımları diğer 35 parça için yapılarak elde edilen yatay, diyagonal ve ayak elemanları Assembly bölümünde aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi birleştirilir.



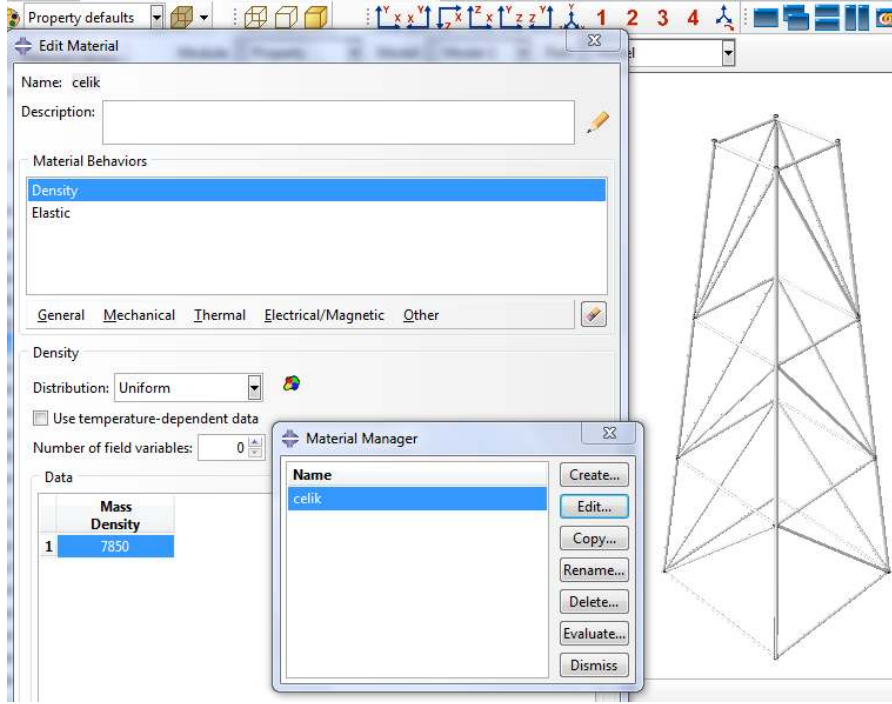
Şekil 3.5. Profillerin birleştirilmesi

Şekil 3.5.'de açılan kutucuğun içinde yazılı olan eleman adlarına tıklanarak elemanların birleştirme bölümüne gelmeleri sağlanır. Daha sonra açısız döndürme ve yer değiştirme komutları kullanılarak elemanlar ait oldukları katlarına yerleştirilirler. Tüm elemanlar yerlerine yerleştirilerek Şekil 3.6.'da görülen yapısal model geometrisi elde edilir.



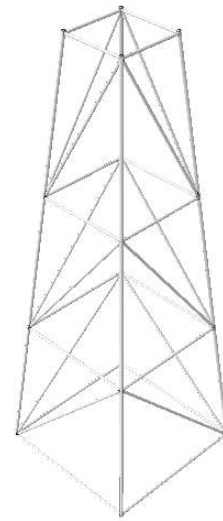
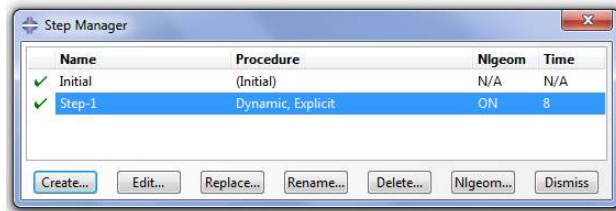
Şekil 3.6. Uzay kafes sistem geometrisi

Elde edilen geometriye Property bölümünde malzeme ataması yapılacaktır. Uzay kafes sistem çelik malzemeden imal edilmiştir. Elastisite modülü $E=2 \times 10^{11}$ N/m², poisson oranı $\nu=0,3$ ve yoğunluğu $\rho_c=7850$ kg/m³'tür (Şekil 3.7.). Malzeme özellikleri programa kaydedildikten sonra bu malzemeye ait kesit oluşturulur ve geometriye kesit ataması yapılarak malzeme özellikleri geometriye atanmış olur.



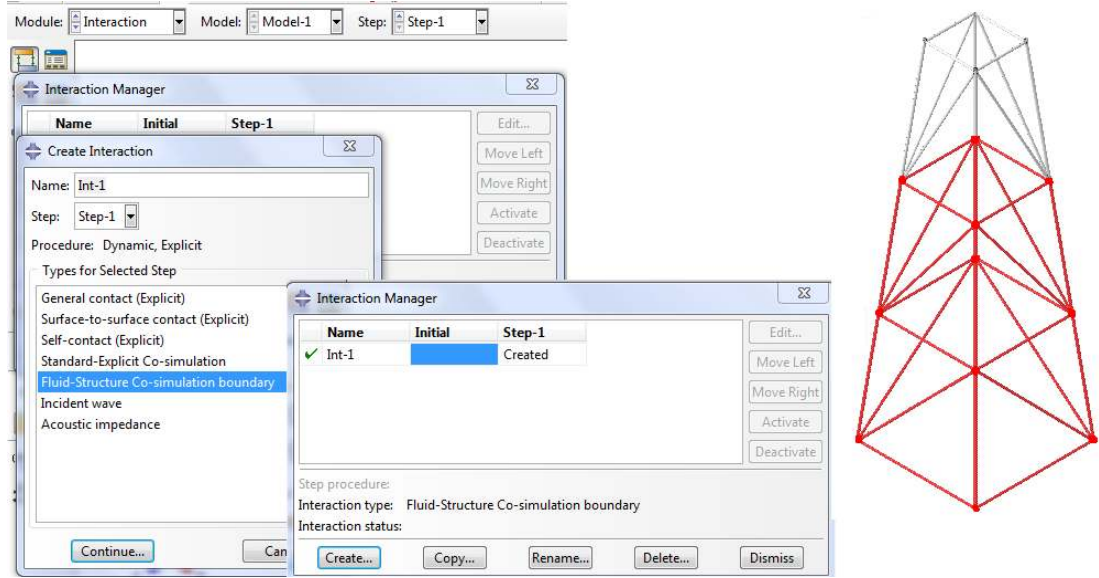
Şekil 3.7. Geometriye malzeme atanması

Analiz tipi, adımları, çıktıları, analizde kullanılacak çözücü ve çözüm tipi Step bölümünde, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Akışkan hareketinin devam ettiği süre $T=8$ s için yapısal çözümleme yapılacaktır. Analiz tipi olarak dinamik-explicit tanımlanmıştır, adım aralığı ise 0,005'tir.



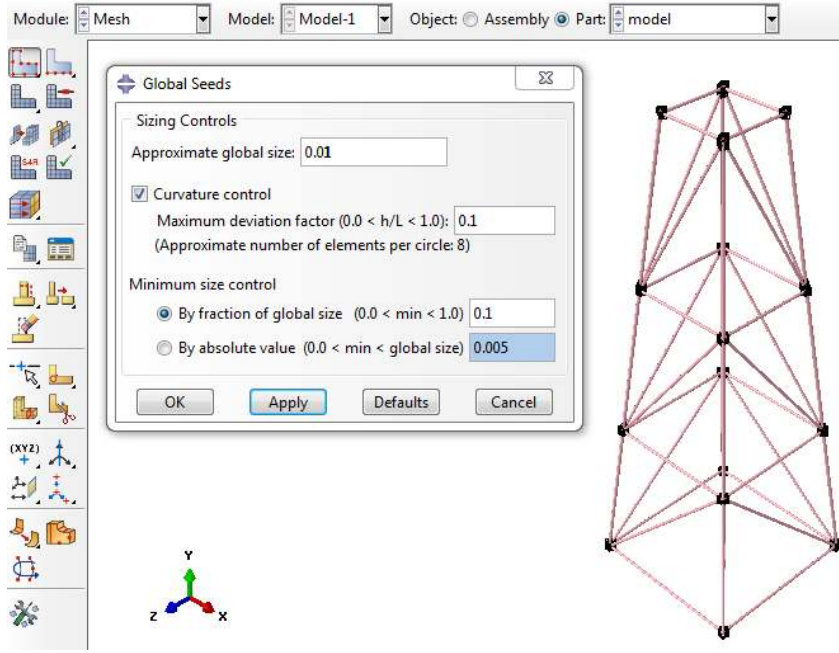
Şekil 3.8. Analiz şartlarının belirlenmesi

Akışkan-uzay kafes sistem etkileşiminin modellenmesi Interaction kısmında gerçekleştirilmektedir. Bunun için uzay kafes sistemin suyun altında kalan parçalarının yüzeyleri seçilerek yapı üzerindeki etkileşim yüzeyleri tanımlanır. Şekil 3.9.'de görülen kırmızı renkteki yüzeyler temas yüzeyleri olarak belirlenmiştir.



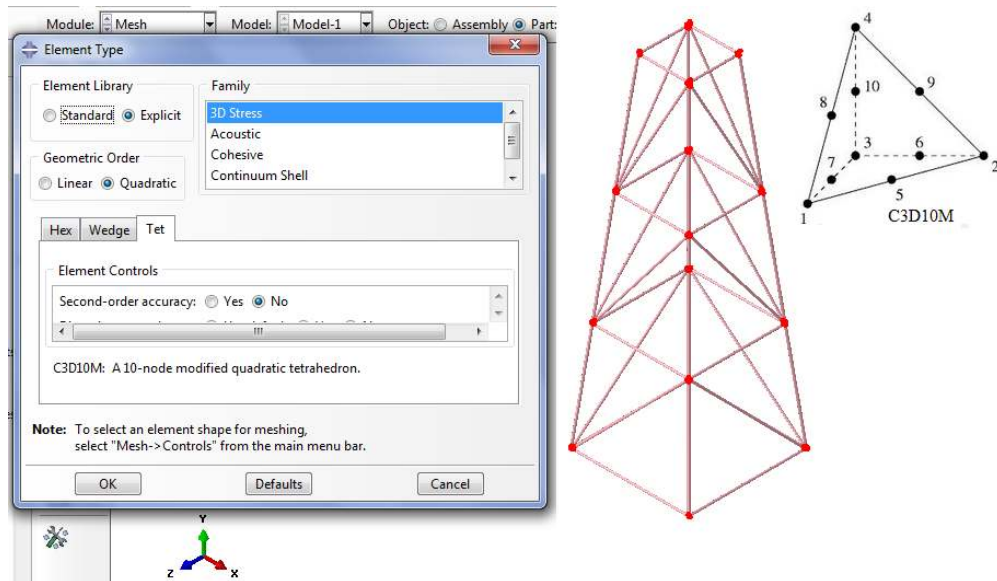
Şekil 3.9. Temas yüzeylerinin belirlenmesi

Kafes sistem ile akışkanın teması tanımlandıktan sonra uzay kafes sistemin yükleme durumunun belirlenmesi gerekmektedir. Load bölümünde, yükleme miktarı-tipi, başlangıç ve sınır şartları tanımlanır. Akışkan-kafes sistem teması tanımlandığı için ayrıca modelde dış yük tanımlaması yapılmamıştır. Program akışkan çözümünden elde ettiği kuvvetleri yapılan tanımlama ile yüzeylere aktarır. Ancak Load bölümünde uzay kafes sistemin mesnetlenme şartının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle modelin belirli boyutlardaki küçük parçalara ayrılması (meshlenmesi) gerekir.



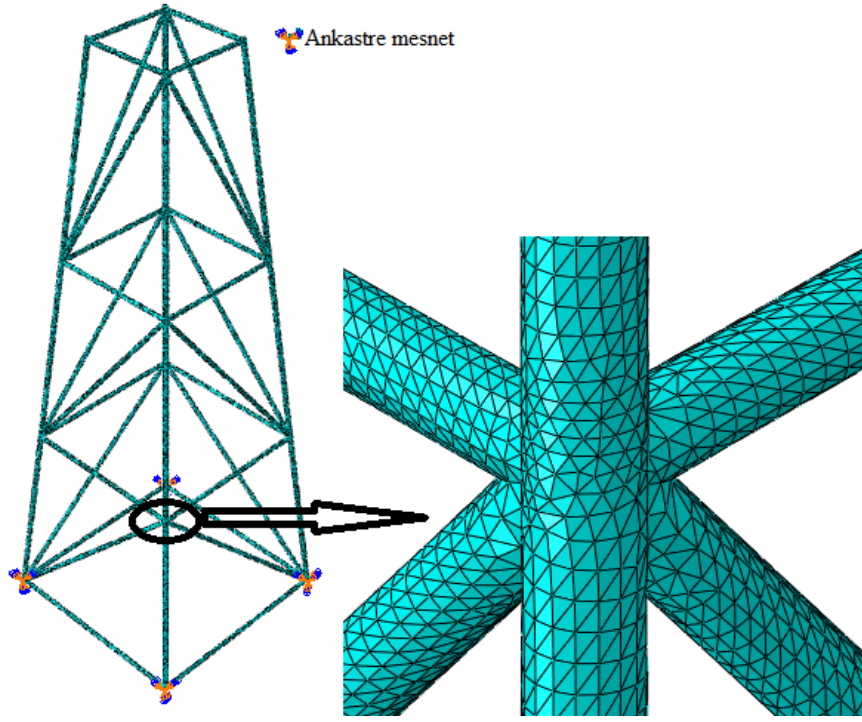
Şekil 3.10. Geometride noktalar oluşturulması

Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi, geometri üzerinde 0.01 m aralıklar noktalar oluşturulmuştur. Böylece model belirli sayıda noktaya ayrılmıştır. Bu noktalar daha sonra Şekil 3.11.'de görüldüğü gibi belirlenen eleman tipine uygun olarak birleştirilirler. Nokta ve eleman atanmasıyla model belirli sayıda nokta ve elemandan meydana gelen bir sonlu elemanlar modeli halini alır.



Şekil 3.11. C3D10M tipindeki elemanların oluşturulması

Model için etkileşime uygun tetrahedral eleman tipi seçilmiştir. Böylelikle model, Şekil 3.11’de görülen C3D10M tipinde elemanlardan oluşmaktadır. Bu elemanın isimlendirilmesi; sürekli (C, continuum-solid) üç boyutlu (3D), 10 düğüm noktalı (10), temas problemleri için geliştirilmiş (modified tetrahedron) şeklindedir. Eleman atanmasıyla 125007 noktada 245117 eleman oluşturulmuştur.



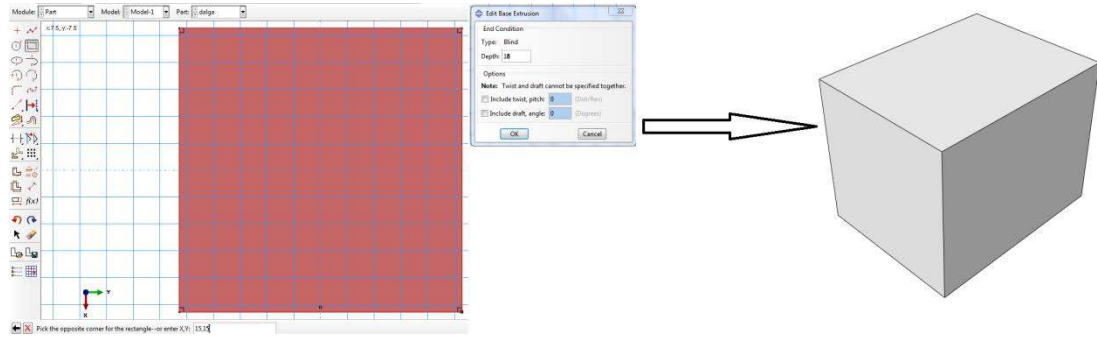
Şekil 3.12. Modelin mesh yapısı ve mesnetlenmesi

Mesh kısmında oluşturulan nokta takımına mesnet şartı atanır. Nokta takımı Şekil 3.12.’de görüldüğü gibi yapının tabanında seçilmiştir. Bu noktalar ankastre mesnet olarak programa aktarılmıştır.

3.2.1.2 Akışkan (Deniz Ortamı) Modellemesi

Kafes sistemin yapısal modeli hazırlandıktan sonra çevresini oluşturan deniz ortamı modellenecektir. 18 m derinliğindeki açık denize yerleştirilen yapı hidrodinamik dalga kuvvetleri etkisindedir. Dalga etkisiyle oluşan akımın çizgileri yapıda sürtünmeye ve sınır tabakası oluşumuna, akış hızın yüksek olmasıyla da vortekse neden olmaktadır. Sürtünme etkisiyle akış yönünde sürüklenme kuvveti, ivmeli hareket nedeniyle atalet kuvveti (eklenik kütle ile birlikte), yapının etrafındaki

basınç alanlarının akış diki yönlerindeki asimetrisinden hidrodinamik kaldırma kuvveti ve yapının mansabındaki vorteks asimetrisinden de vorteks öteleme kuvveti doğmaktadır. Bu kuvvetlerin doğru ve hassas saptanmasında, doğru dalga teorisine dayanan dalga hız ve ivme değerlerinin, bu teorileri doğrulayan deneysel çalışmalarda hidrodinamik kuvvet katsayılarının ve boru hareketlenmesinden kaynaklanan yapının hareket hız ve ivmelerin doğru ve hassas tanımlanmasının önemi ve payı büyüktür.



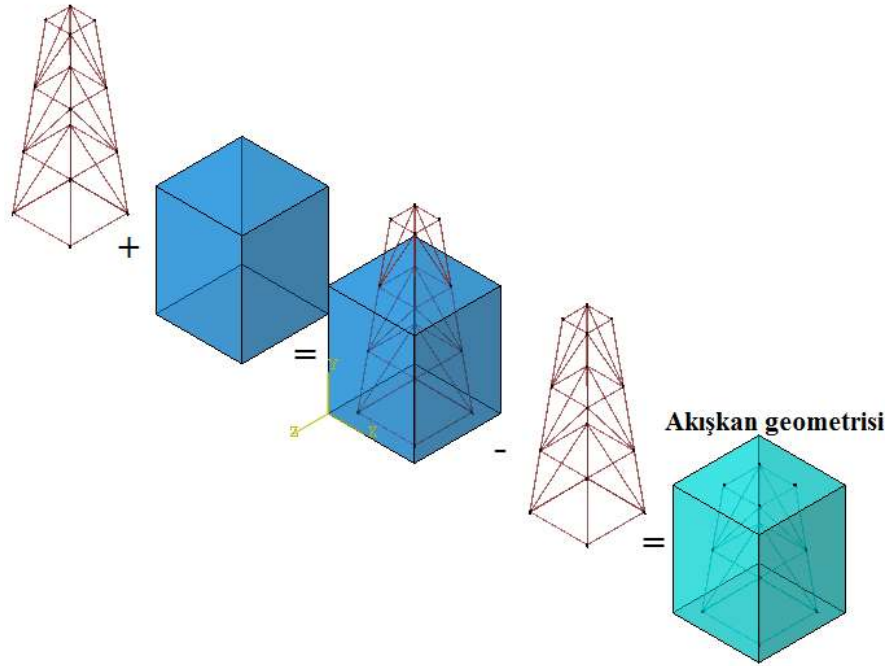
Şekil 3.13. Akışkan geometrisine üçüncü boyut kazandırılması

Şekil 3.13.'de görüldüğü gibi, kafes sistemin etrafındaki deniz ortamı 15 m genişliğinde, 15 uzunluğunda ve 18 m derinliğinde bir kontrol hacmi olarak ABAQUS ile modellenmiştir. Katı modelde olduğu gibi part kısmında geometri oluşturulmuştur. 15 m × 15 m taban alanı oluşturularak bu alana 18 m derinlik verilmiştir.

Akışkan geometrisi oluşturulduktan sonra geometriye malzeme özellikleri tanıtılmıştır. Akışkan (tuzlu su) EOS malzeme olarak modellenmiştir. EOS malzeme modellemesi sesin sudaki yayılma hızı ile ilgili bir modelleme biçimidir. c_0 sesin tuzlu sudaki hızı 1560 m/s, sabitler $k=\Gamma_0=0$ olarak belirlenmiştir. Tuzlu suyun özkütlesi (ρ_e) 1025 kg/m³, dinamik vizkozitesi, $\mu=1,005 \times 10^{-3}$ Ns/m² olarak atanmıştır. Malzeme (property) modülünde gerçekleştirilen geometriye malzeme atanması katı model için verilen Şekil 3.7.'de görüldüğü gibidir.

Şekil 3.13.'de oluşturulan geometriden kafes sistemin kapladığı hacmin çıkartılması gerekmektedir. Bunun için birleştirme (Assembly) modülünde öncelikle

geometri döndürülerek deniz tabanına dik hale getirilir ve çıkarma işlemi aşağıda tarif edildiği gibi yapılır.



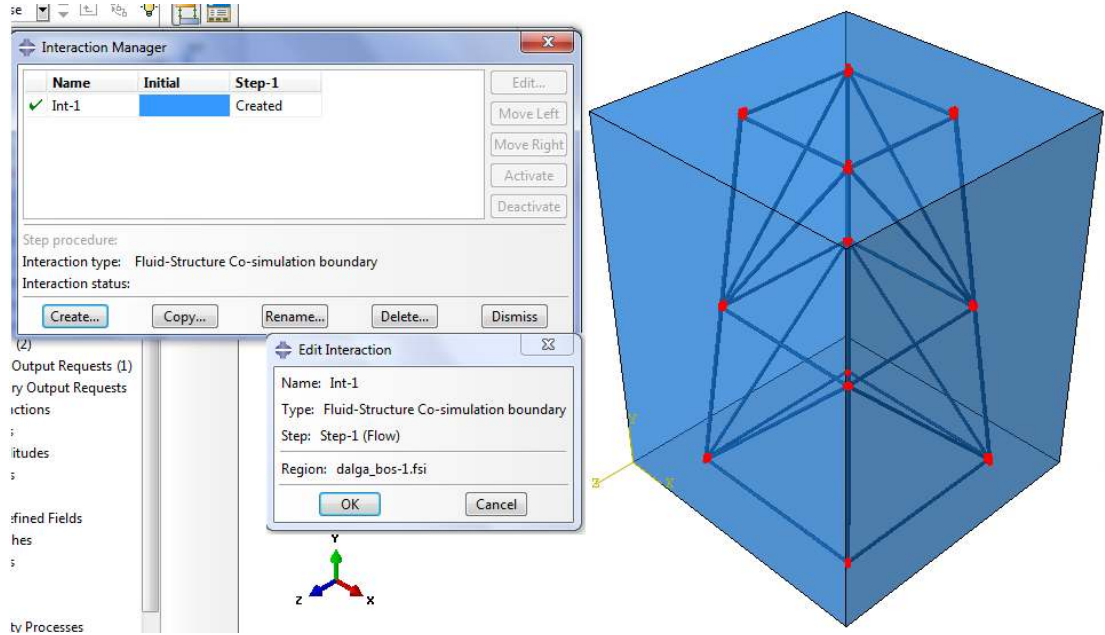
Şekil 3.14. Akışkan geometrisinin oluşturulması

Şekil 3.14.'de temsili olarak açıklanan akışkan geometrisinin oluşturulması, kafes sistemin dikdörtgen prizmasının içine (ortasına) yerleştirilip geri çıkarılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece kafes sistemin boşalttığı hacmin yüzeyleri akışkanın yapı (FSI) ile temas ettiği yüzeyler olarak tanımlanmıştır.

Analiz tipi, adımları, çıktıları, analizde kullanılacak çözücü ve çözüm tipi Step bölümünde, katı modelde olduğu gibi tanımlanmıştır. Akışkan hareketinin devam ettiği süre $T=8$ s için hesaplamalı akışkanlar mekaniği çözücüsü ile çözümleme yapılacaktır. Analiz tipi olarak CFD tanımlanmıştır, adım aralığı ise 0,005'tir.

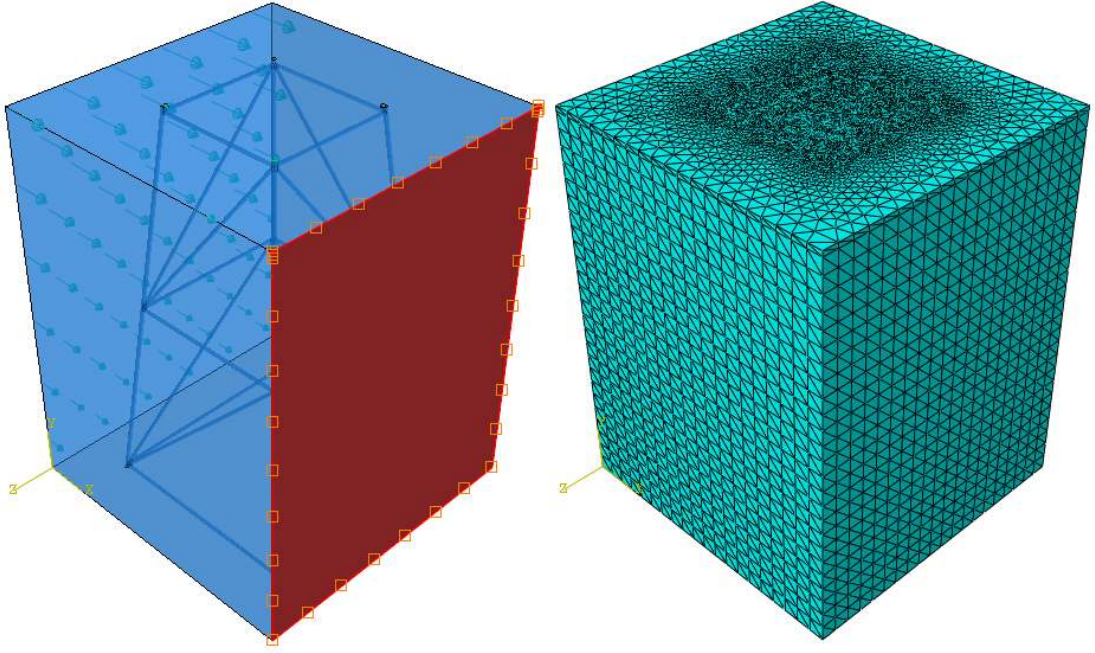
Analiz tipi belirlendikten sonra analizin gerçekleşebilmesi için akışkan-yapı temas yüzeylerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için katı modelde olduğu gibi etkileşim (interaction) modülü içindeki akışkan yapı etkileşim sınır şartının (fluid

structure cosimulation boundary) tanımlanması gerekir. Tanımlama Şekil 3.15.'de tarif edilmiştir.



Şekil 3.15. Akışkan geometrisinde temas yüzeylerinin belirlenmesi

Katı modelde olduğu gibi akışkan geometrisinin de küçük parçalara ayrılması gerekmektedir. Küçük parçalara ayırma işleminde noktalar arası genel mesafe (mesh mesafesi) 0.10 m iken yapı ile temas yüzeylerinde nokta sıklaştırması yoluna gidilerek bu mesafe 0.01 m'ye düşürülmüştür. Yapı modelinde olduğu gibi oluşturulan bu küçük parçalara eleman ataması yapılması gerekmektedir. Ancak yapı modelinde kullanılan eleman tipi C3D10M iken akışkan modelinde dört yüzlü tetrahedron FC3D4 tipi eleman kullanılmıştır. Akışkan-yapı etkileşimine uygun olan bu eleman adının açılımı; akışkan (F), sürekli (C, continuum) üç boyutlu (3D), 4 düğüm noktalı (4), şeklindedir. Bu işlemler sonucunda akışkan modeli üzerinde 391518 adet nokta ve 2285654 adet eleman oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında kullanılan akışkan modeline ait eleman tipi ve mesh yapısı Şekil 3.16.'nın sağında görülmektedir.



Şekil 3.16. Akışkan modeli sınır şartları ve eleman tipi

Şekil 3.16.'in solunda ise modele uygulanan sınır şartları görülmektedir. x yönünde etki eden dalga kuvvetleri oklar yönünde modele etki etmektedir. Dalga çıkışı ise kırmızı renkte görülen yüzeydedir. Geometrinin tabanı geçirimsiz yüzey olarak tanımlanmış böylece bu yüzeyde tüm hız bileşenleri sıfır olmaktadır. Akışkan modeline ait sınır şartları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Akışkan modelinin sınır şartları

Model	Giriş	Çıkış	Uzak yüzey	Geçirimsiz yüzey
Akışkan	u	$P=0, \partial u/\partial x + \partial v/\partial x + \partial w/\partial x = 0$	u	$U=V=W=0$

Tabloda yer alan u, v ve w harfleri sırasıyla x, y ve z yönlerindeki dalga hızlarını temsil etmektedir. Giriş hızı olarak Lineer dalga teorisine ait hız profili (u) kullanılmıştır. Böylece kafes sistem etrafından geçen dalga modellenmiştir. Sonlu Elemanlar Metoduna dayalı program ile dalga modellemesinde sadece dalga teorisine ait hız dağılımının sisteme aktarılması yeterli olmuştur. Lineer dalga teorisine ait [43] tarafından yapılan tanımlamalar aşağıda verilmiştir.

Birçok dalga teorisi, çevresel parametrelere bağlı olan değişik ortamlara uygun olarak geliştirilmiştir. Bu parametrelere, su derinliği (d), dalga yüksekliği (H)

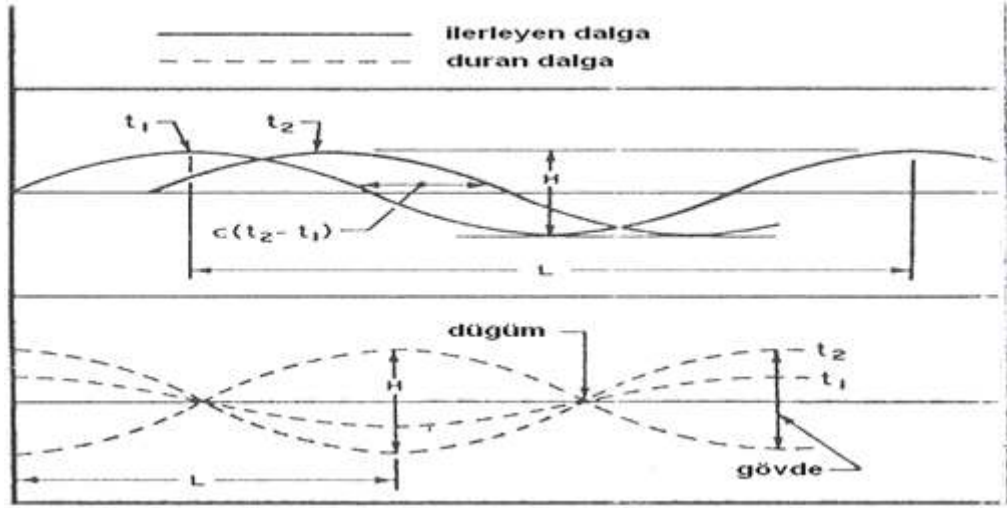
ve dalga periyodu (T) örnek gösterilebilir. Kıyı yapılarının dizaynında kullanılan dalga teorilerinin birçoğu bu üç parametreye dayanır.

Bütün dalga teorileri, dalgaların periyodik ve üniform olduğunu kabul eder. Periyot, dalga tepesinin bir dalga uzunluğu kadar mesafeyi kat etmesi için gereken zamandır. Dalga yüksekliği ise iki dalga arası çukur ile dalga tepesi arasındaki dikey mesafedir. Dalga boyu, dalganın yayılım yönünde birbirini izleyen dalgaların benzer noktaları arasında (L) ölçülen yatay mesafedir. Periyodik bir dalga için tepe noktasının ve çukur noktasının hızı yayılım hızı olarak adlandırılır. Bu hız basit şekilde;

$$c' = \frac{L}{T} \quad (3.1)$$

olarak verilebilir.

Dalgalar XY düzleminde iki boyutlu olarak düşünülür. Deniz tabanı örselenmiştir ve derinliği (d) yatay olarak kabul edilir. Dalgalar pozitif x yönünde ilerler. Bu noktada, duran bir dalga ve ilerleyen bir dalga arasındaki farkı Şekil (3.16)'dan anlamak mümkündür. İlerleyen dalga, verilen bir hızda x ekseninde hareket eder. Dalga özellikleri aynı kalır. Diğer tarafta, duran dalgada su yüzeyi ilerleme yapmadan iki sabit nokta arasından dikey olarak dalgalanma yapar. Duran bir dalganın iki tane ilerleyen dalganın (genliği ve periyodu aynı olan) birleşiminden oluştuğu söylenebilir. Ama aynı hızda ve ters yönlerde hareket etmeleri neticesinde net hareket sıfırdır, geriye sadece dikey dalgalanma kalır. Verilen bir noktada, duran dalga x ekseninde bir döngüden diğerine aynı miktarda dalgalanma yapar. Böylece bir nokta maksimum dikey dalgalanmayı yapar ve dalganın gövdesini oluşturur. Diğer nokta düşey deplasman yapmaz ve düğümü oluşturur. Duran bir dalgada birçok gövde ve düğüm oluşur. Genelde bu tip dalgalara liman haznesi, göller, laboratuvar haznesi gibi sınırlı sularda rastlanır.



Şekil 3.17. Açık ve kapalı sularda dalga tipleri [43]

Bir dalga hareketi genelde H , T , d parametreleri ile ifade edilir. Herhangi bir dalga teorisi için problem akım alanına ait hız potansiyelini bulmaktır (Φ veya aynı şekilde akım fonksiyonu Ψ). Sınır değer problemi iki boyutlu olarak özetlenirse;

$$\text{Diferansiyel (Laplace) denklemi: } \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{Taban sınır koşulu: } y=-d \text{ için } \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

Serbest yüzey kinematik koşulu: $y=\eta$ için

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (3.4)$$

Serbest yüzey dinamik koşulu: $y=\eta$ için

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad (3.5)$$

bağıntıları elde edilebilir.

Potansiyel fonksiyon, Laplace denklemini ve üç sınır koşulunu sağlamak zorundadır. Bu problemin çözümü zordur. Çünkü serbest yüzey sınır koşulları non lineerdir ve sürekli olarak değişen bir yapıya sahiptir.

Küçük genlikli dalga teorisi en basit ve en çok kullanılan dalga teorisidir. Bu teori aynı zamanda Airy teorisi veya sinüzoidal teori olarak da bilinir. Bu teoride dalga yüksekliği, dalga uzunluğuna veya su derinliğine kıyasla daha küçüktür. Bu teori, birinci mertebedeki dalga yüksekliği terimlerini düşürerek, serbest yüzey sınır koşullarını doğrusallaştırmaya imkan tanır. Aynı şekilde serbest yüzey koşullarını dalgalanan bir yüzeyden ziyade normal su seviyesinde sağlanmasına da imkan tanır. Potansiyel fonksiyonun çözümü (Φ) boyutsuz perturbasyon parametresi olan ε 'un terimlerinin seri açılımı ile elde edilir.

$$\varepsilon = \frac{kH}{2} \quad (3.6)$$

Burada k dalga sayısıdır. Bu ifade $k = 2\pi/L$ ile verilir. Böylece;

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \Phi_n \quad (3.7)$$

Burada Φ_n , Φ için n . dereceden çözümdür. Benzer şekilde (η) dalga profili;

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \eta_n \quad (3.8)$$

şeklinde tanımlanabilir. Lineer dalga teorisi 1. mertebedeki terimler ile ilgilidir. Bu nedenle Φ ve η açılımlarında lineer terimler tutulur non lineer terimler dikkate alınmaz ve serbest yüzey tabaka koşullarında yerine yazılırsa; Denklem (3.4-3.5) şu şekli alır:

$$y=0 \text{ için; } \frac{\partial \eta_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad (3.9)$$

$$y=0 \text{ için; } \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + g\eta_1 = 0 \quad (3.10)$$

denklem (3.10)'den serbest yüzey profili;

$$y=0 \text{ için; } \eta_1 = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \right) \quad (3.11)$$

şeklinde verilebilir. İki serbest yüzey sınır koşulu denklemi, bilinmeyenlerden biri ihmal edilerek tek denklemde yazılabilir.

$$y=0 \text{ için; } \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad (3.12)$$

Sınır değer problemindeki diğer denklemler Denklem (3.2-3.3) ile aynıdır. c' hızında ilerleyen bir dalga için periyodiklik $\alpha = x - c't$ şeklinde verilebilir. α 'nın bu formu zamanın x 'in negatif yönünde ilerlediğini gösterir. (dalga yayılım yönü $+x$ boyunca). Alternatif olarak zaman $-x$ eksenini boyunca dalga yayılım yönünde ilerliyorsa $\alpha = x + c't$ yazılabilir. Bu tip sınır değer problemi değişken ayırıştırma tekniği ile çözülür. Φ_1 fonksiyonunun;

$$\Phi_1 = Y(y) \Lambda(\alpha) \quad (3.13)$$

şeklinde olduğu söylenebilir. Bu denklem kısmi diferansiyel denklemde yerine konduğunda iki diferansiyel denklem meydana getirir.

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} - k^2 Y = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{d\Lambda}{d\alpha} - k^2 \Lambda = 0 \quad (3.15)$$

Burada k^2 sabittir. Genel çözüm;

$$Y = A_1 \cosh ky + A_2 \sinh ky \quad (3.16)$$

$$A_5 = A_3 \cos[k(x - ct)] + A_4 \sin[k(x - ct)] \quad (3.17)$$

şeklinde verilebilir. Deniz ortamının belli bir konumunda $x=0$ noktasında ve $t=0$ anında $\eta_1=H/2$ 'dir. Böylelikle $A_3=0$ yazılabilir. Taban sınır koşulundan $A_2 = A_1 \tanh kd$ yazılabilir.

Denklem (3.13)'e göre Φ şöyle yazılabilir.

$$\Phi = A_5 \frac{\cosh k(y + d)}{\cosh kd} \sin[k(x - ct)] \quad (3.18)$$

Burada $A_5 = A_1 A_4$ 'dir ve $\eta=H/2$ olduğuna göre;

$$A_5 = gH / 2kc \quad (3.19)$$

elde edilir. Denklem (3.18)'den $L = 2\pi/k$, $T = 2\pi/kc$, $c'=L/T$, $kc'=w$ elde edilir. Buradan sonra $s=y+d$ ve $\Theta = k(x - c't)$ yazılarak birinci mertebe hız potansiyeli ($\Phi=\varepsilon\Phi_1$)

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \sin \Theta \quad (3.20)$$

olarak yazılabilir. Denklem (3.11)'den;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta \quad (3.21)$$

yazılabilir. Φ değeri Denklem (3.12)'de yazılarak, lineer ayrılma ilişkisi olan;

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (3.22)$$

elde edilir. Denklem (3.9) ve Denklem (3.21) birleştirilerek Φ için alternatif bir form yazılabilir.

$$\Phi = \frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (3.23)$$

Benzer şekilde; $c'=w/k$ olduğu hatırlanarak ayrılma ilişkisine alternatif olarak;

$$c'^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \quad (3.24)$$

yazılabilir. Dalga boyu için de aynı şekilde;

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (3.25)$$

yazılabilir. Denklem (3.25)'de görüldüğü gibi dalga boyu T ve d 'ye bağlıdır. Dolayısıyla dalga boyu doğrudan hesaplanamaz. Dalga boyu için derin su değerleriyle başlayan bir tekrarlamaya tekniği kullanılabilir. Daha sığ sularda, tekrarlamayı sığ su yaklaşımıyla başlatmak daha verimli olur. Orta derinlikte sular için ise dalga boyu için daha basit bir formül verilebilir.

$$L = L_0 \left[\tanh(2\pi d / L_0) \right]^{1/2} \quad (3.26)$$

Burada L_0 derin sulardaki dalga boyudur. Verilen bir su derinliği ve periyotta, dalganın kırılmaya başladığı bir üst sınır vardır. Dalga kırılması için Stokes kriteri, dalga tepesindeki akışkan parçasının hızının yayılma hızına ulaşmasıdır. Yayılım hızından daha büyük hızlarda dalganın ileri doğru itilerek kırılacağı sezgisel olarak açıktır. Stokes'un kırılan dalga kriteri, dalga tepesi açısının 120° 'den fazla olmamasıdır. Derin suda dalga dikliği limiti;

$$H_b/L_0=0,142 \quad (3.27)$$

ile verilebilir. H_b kırılan dalga yüksekliğidir. Yaklaşık olarak derin sudaki dalga uzunluğunun yedide biridir. Sonlu bir su derinliği için dalga dikliği orta su parametresine benzer bir hal alır.

$$\frac{H_b}{L} = 0,142 \tanh kd \quad (3.28)$$

Burada L orta sulardaki dalga genişliğidir. Hız potansiyeli (Φ) ve hidrodinamik basınç (P) birinci mertebe yapısında yer alır.

$$P = -\rho \varepsilon \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho g \frac{H \cosh ks}{2 \cosh kd} \cos \Theta \quad (3.29)$$

Denklem (3.22-3.24-3.25)'de ifade edilen tanh fonksiyonunun asimptotik değerlerinde bazı sadeleştirmeler yapılabilir; x 'in büyük değerleri için; $\tanh x \approx 1$ 'dir. Bu ifade $x > \pi$ değerleri için % 0,4 hata payı ile doğrudur. Aynı şekilde küçük x değerleri için $\tanh x \approx x$. Bu ifadede $x < (\pi/10)$ için % 0,1 hata ile kabul edilebilir. Bu ifadelerden yararlanarak derin ve sığ sular için Tablo (3.2)'de verilen bazı sınırlar elde edilebilir.

Tablo 3.2 Derin su, sığ su sınırları ve dalga boyları

	Koşul	Dalga Boyu
Derin Su	$d/L_0 > 1/2$	$gT^2/2\pi$
Sığ Su	$d/L_0 < 1/25$	$T\sqrt{g \times d}$

Diğer ifadeler de benzer yaklaşımla sadeleştirilebilir. Derin su için;

$$\frac{\cosh ks}{\sinh kd} = \frac{\sinh ks}{\sinh kd} = e^{ky} \quad (3.30)$$

Sığ su için;

$$\frac{\cosh ks}{\sinh kd} = \frac{1}{kd}, \frac{\sinh ks}{\sinh kd} = 1 + \frac{y}{d} \quad (3.31)$$

Akışkan parçacığı yörüngeleri ve hız profilleri; sığ, orta ve derin sular için Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Sığ suda yatay hızın sabit olduğu unutulmamalıdır. Derin sularda ise parçacık yörüngeleri daireseldir ve yatay hızın düşey hıza eşit olduğu söylenebilir.

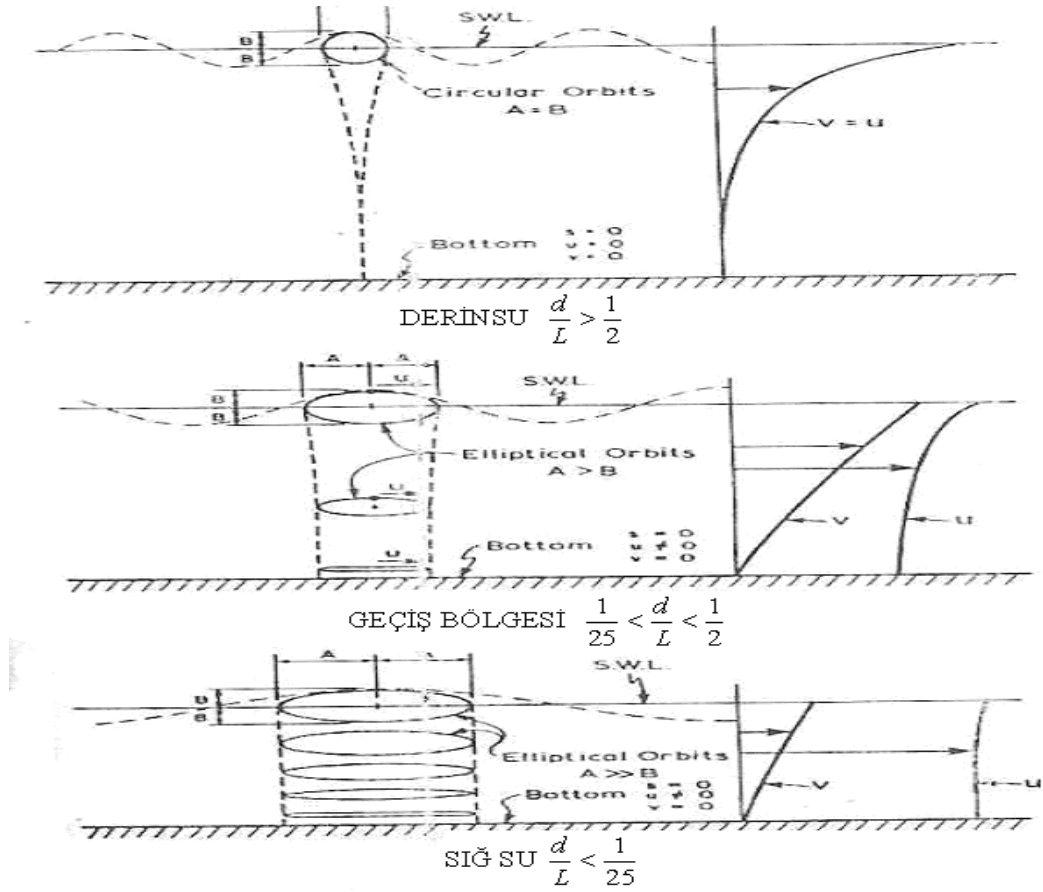
Bilinen değerler için dalga genliği;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta, \quad \eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.32)$$

Belli bir deniz ortamında $x=0$ noktası için denklem;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(-\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.33)$$

olarak yazılabilir.



Şekil 3.18. Lineer teoride parçacık yörüngeleri ve kinematikleri [43]

u yatay, v düşey hızları göstermek üzere potansiyel fonksiyonu cinsinden hızlar;

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3.34)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifade Denklem (3.35) ile verilen çevrintisizlik şartında yerine yazılırsa Denklem (3.36) ve (3.37) elde edilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (3.35)$$

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(y+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.36)$$

$$v = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh(2\pi(y+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.37)$$

bulunan hızların zamana göre türevleri alınarak yörüngesel ivmeler bulunmuştur.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh(2\pi(y+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a_y = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh(2\pi(y+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.39)$$

Denklem (3.36) sonlu elemanlar programına girilen, akışkan için giriş hız profilidir. Bu çalışmada H=3 m, T=8 s ve d=18 m için elde edilen dalga hız profili giriş hızı olarak modele atanmıştır. Sonlu elemanlar programına aşağıda Denklem (3.40-3.42) ile verilen kuvvet bağıntılarının girilmesine gerek yoktur. Bu bağıntılara çalışmanın ikinci aşamasını oluşturan yarı analitik çözümlemede ihtiyaç duyulacaktır. Deniz tabanındaki yapının birim boyuna eksene dik yönde etkiyen sürüklenme (F_D), atalet (F_M) ve kaldırma kuvvetleri (F_L), dalgaların hızlarına ve ivmelerine bağlı olarak aşağıdaki Morison Denklemleri ile hesaplanabilir.

$$F_M = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} a_x \quad (3.40)$$

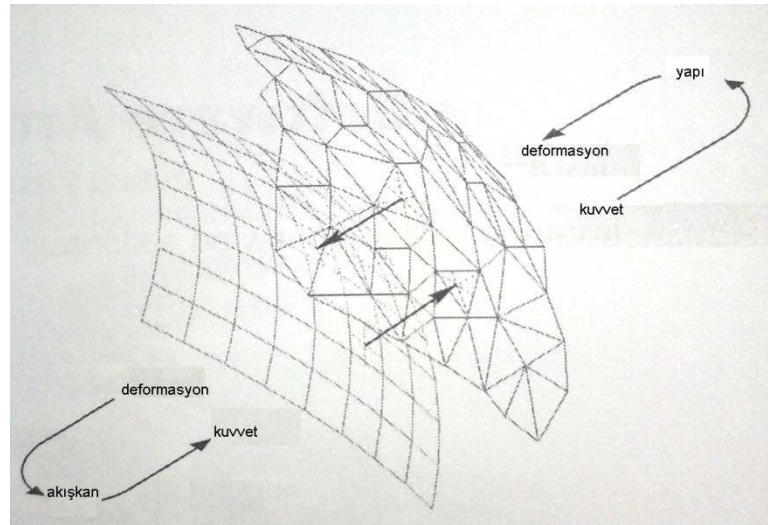
$$F_D = 1/2 (C_D \rho D u |u|) \quad (3.41)$$

$$F_L = 1/2(C_L \rho D u^2) \quad (3.42)$$

Bu ifadelerde; C_M , atalet kuvveti sabitini, C_D , sürüklenme kuvveti sabitini, C_L , kaldırma kuvveti sabitini, D , borunun dış çapını, ρ akışkanın özgül kütleini, g , yerçekimi ivmesini temsil eder. Dalgalar sebebiyle oluşan hidrodinamik kuvvetlerin lineer teoriye göre hesabında, yapının yerleştiği bölgedeki hakim rüzgar yönlerindeki maksimum atalet, sürüklenme, ve kaldırma kuvvetleri Denklem (3.40-3.42) yardımıyla her derinlik için ayrı ayrı hesaplanabilir.

3.2.1.3. Akışkan-Yapı Etkileşiminin (FSI) Modellemesi

Bu çalışmada 1-DOF analizinin yanında sonlu elemanlar analizi yapılarak yapının davranışı gerilmeler, zamanla değişen deplasmanlar, doğal frekanslar ve mod şekilleri açısından incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizinde FSI tekniği kullanılmıştır. Tuzlu su (Water domain) açık deniz ortamını (offshore fluid domain) oluştururken, kafes sistemde (offshore-solid domain) oluşturur.



Şekil 3.19. Yapı ve akışkan çözücüsünün etkileşimi [42]

Yapı modelinde çelik, su modelinde tuzlu suyun malzeme özellikleri sonlu elemanlar modellemesinde kullanılmıştır. Akışkandan yapıya aktarılabacak kuvvetler Tablo 3.1’de verilen sınır şartlarına göre CFD analiziyle hesaplanır. Akışkan kuvvetleri temas yüzeylerinden yapıya etki ederek yapıda deplasman meydana getirir, bu deplasmanlarda akışkana aktarılır, bu döngü analiz boyunca devam eder.

Şekil 3.19.'de sonlu elemanlar modellerinin etkileşimi açıklanmıştır. Gerek sonlu elemanlar programında gerekse yarı analitik çözümlemede kullanılan genel hareket denklemi aşağıda verilmiştir. Denklemden m kütle matrisini, k rijitlik matrisini, X deplasmanı, F ise kuvveti temsil eder. Her bir nokta ise zamana göre türevidir.

$$m\ddot{X} + kX = F \quad (3.43)$$

Sonlu elemanlar programı için yukarıdaki denklem tekrar düzenlenirse Denklem (3.44) elde edilir.

$$m^{NJ} \ddot{X}^N |_i = (F^J - I^J) |_i \quad (3.44)$$

Denklem (3.44)'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 sistematığı kullanılır. Böylelikle yapıdan akışkana aktarılabilecek deplasmanlar elde edilir.

$$\dot{X}^N_{(i+\frac{1}{2})} = \dot{X}^N_{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{X}^N_{(i)} \quad (3.45)$$

$$X^N_{(i+1)} = X^N_{(i)} + \Delta t_{(i+1)} \dot{X}^N_{(i+\frac{1}{2})} \quad (3.46)$$

Yukarıdaki denklemde N serbestlik derecesini, i explicit çözücüsünün zaman artım aralığının temsil etmektedir. Bir artım adımı öncesinden elde edilen $\dot{X}^N_{(i-\frac{1}{2})}$ ve $\ddot{X}^N_{(i)}$ değerleri yardımıyla deplasmanlar hesaplanır. Yapının noktasal ivme değerleri ise Denklem (3.47) ile elde edilir.

$$\ddot{X}^N_{(i)} = (m^{NJ})^{-1} (P^J_i - I^J_i) \quad (3.47)$$

Sonlu elemanlar analizi ile deplasmanlarla beraber eş zamanlı olarak yapıda meydana gelen Von-Mises gerilmeleri de elde edilir. Abaqus programının çözümlemelerde kullandığı gerilme bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2}\sigma_{ij}\sigma_{ij} - \frac{1}{2}(\sigma_{kk})^2} \quad (3.48)$$

Yapının modal davranışını incelemek amacıyla sonlu elemanlar programı ile modal analiz yapılmıştır. Böylece yapının doğal frekansları ve ilgili mod şekilleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar programı modal analizde, Denklem (3.49) ile verilen Lanczos metodunu kullanır.

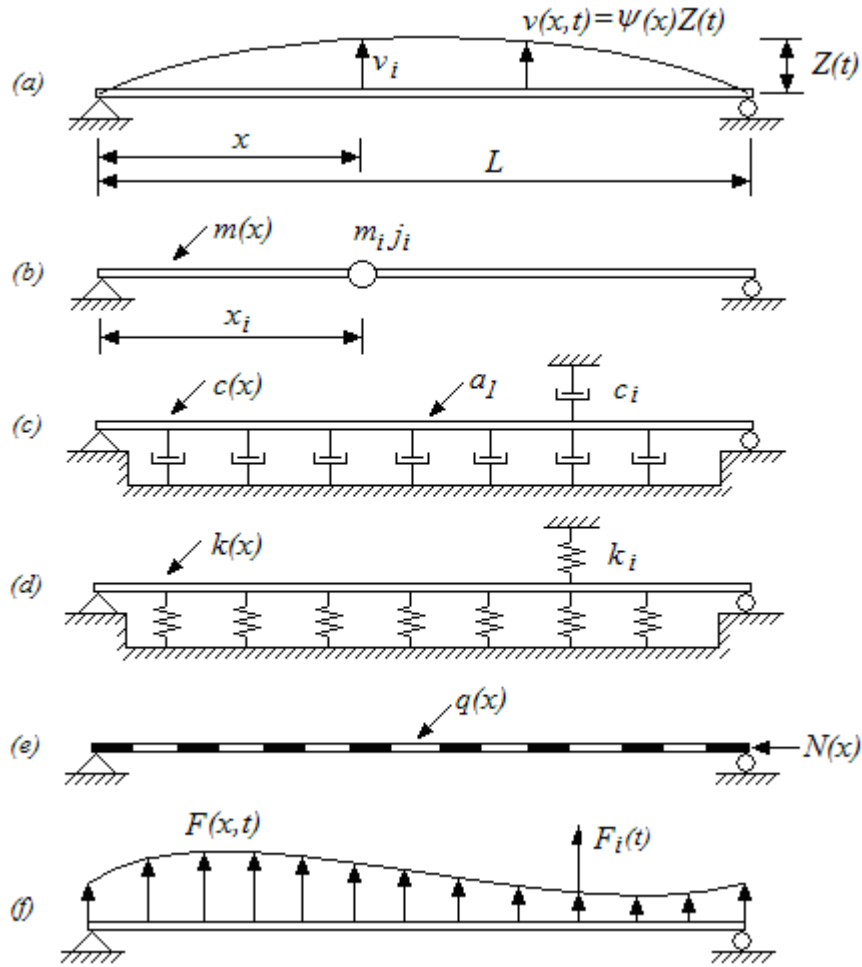
$$[k]\{X\} - \lambda[m]\{X\} = 0 \quad (3.49)$$

Burada λ , doğal frekansın kareköküdür.

3.2.2. Yarı Analitik Analiz

Yapının nümerik analizinden elde edilen sonuçların doğruluğunun belirlenmesi amacıyla yarı analitik çözümlemeye başvurulmuştur. Nümerik analizden elde edilen deplasman ve doğal frekans değerleri ile yarı analitik analizden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Bir yapının dış kuvvetler altında incelenmesi sırasındaki ilk adım, basit bir modelle temsil edilmesidir. Titreşim durumundaki konumunun belirlenmesi için gerekli olan parametre sayısı serbestlik derecesi olarak isimlendirilir. Her ne kadar yapılar sürekli sistemlerse de günümüzde yaygın olan bilgisayar çözümü için sistem ayrıklaştırılır ve çok serbestlik dereceli sistem olarak adlandırılır. Bu ayrıklaştırmada genellikle kütle belirli bir konumda toplu olarak göz önüne alınır. Çok serbestlik dereceli sistemlerin incelenmesinde de tek serbestlik dereceli sistemlerin ana kavramları kullanıldığı için tek serbestlik dereceli sistemlerin ayrıntılı incelenmesi faydalıdır. Bunun yanında çok serbestlik dereceli sistemlerin çoğu basit yaklaşımla, tek serbestlik dereceli kabul edilerek uygun yaklaşıklıkla sonuçlar elde edilebilir. Tek serbestlik dereceli sistem yaklaşımı Şekil 3.20. ile tarif edilebilir [44].



Şekil 3.20. Genelleştirilmiş tek serbestlik dereceli sistem [44]

Deplasman fonksiyonu (v), konum ve zamana bağlı terimlerle ayrıştırılırsa;

$$v_{(x,t)} = \psi_{(x)} Z_{(t)} \quad (3.46)$$

bağıntısıyla izah edilir. Denklem (3.46)'da $\psi_{(x)}$, konumla ifade edilen şekil fonksiyonu, $X_{(t)}$, ise zamanla ifade edilen deplasman fonksiyonudur. Sonlu elemanlar çözümünde olduğu gibi zamanla değişen deplasman değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bunun için Denklem (3.43) aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir [41].

$$m^* \ddot{X}(t) + \overline{k^*} X(t) = F_{Top}^*(t) \quad (3.47)$$

Dinamik dış yük teriminin varlığıyla salınım yapan hareket denkleminde genelleştirilmiş kütle (m^*) ve genelleştirilmiş rijitlik ($\bar{k}^*$) terimleri [41];

$$m^* = \int_0^L m_{(x)} \psi_{(x)}^2 dx + \sum m_i \psi_i^2 + \sum j_i \psi_i'^2 \quad (3.48)$$

$$k^* = \int_0^L k_{(x)} \psi_{(x)}^2 dx + \int_0^L EI_{(x)} \psi_{(x)}''^2 dx + \sum k_{y,i} \psi_i^2 \quad (3.49)$$

$$k_G^* = \int_0^L Q_{(x)} \psi_{(x)}'^2 dx \quad (3.50)$$

$$\bar{k}^* = k^* - k_G^* \quad (3.51)$$

ile ifade edilmektedir. I atalet momentini, Q eksenel kuvveti, E elastisite modülünü temsil etmektedir.

Sisteme etkiyen dış kuvvetler ise aşağıdaki denkleme göre genelleştirilir.

$$F_{i(t)}^* = F_{i(x,t)} \psi_{i(x)} \quad (3.52)$$

eşitliğiyle ifade edilebilir. Burada dış kuvvet deniz yapısına etki eden atalet ve sürüklenme kuvvetlerinin toplamıdır.

Rayleigh metodu ile sistemin doğal frekansı, hesaplanabilmektedir. Böylece sistemin zorlama frekansı ile karşılaştırılması yapıp rezonans durumu incelenebilmektedir [43]. Aşağıda tarif edilen ifadeler en genel haliyle değişken kesit için açıklanmıştır. Ancak bu çalışmada sabit kesitli modelleme için çözümleme için analiz yapılacaktır. Değişken rijitliğe sahip sistemin potansiyel enerjisi (E_p) aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^L EI_{(x)} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (3.53)$$

Maksimum potansiyel enerji ($E_{p,max}$) ise deplasman genliğine (X_0) bağlı olarak Denklem (3.54) ile elde edilir.

$$E_{p,max} = \frac{1}{2} X_0^2 \int_0^L EI_{(x)} \left[\psi''_{(x)} \right]^2 dx \quad (3.54)$$

Değişken kütleli sistemin kinetik enerjisi (E_k),

$$E_k = \frac{1}{2} \int_0^L m_{(x)} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 dx \quad (3.55)$$

Maksimum kinetik enerji ($E_{k,max}$) ise,

$$E_{k,max} = \frac{1}{2} X_0^2 \omega^2 \int_0^L m_{(x)} \left[\psi_{(x)} \right]^2 dx \quad (3.56)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

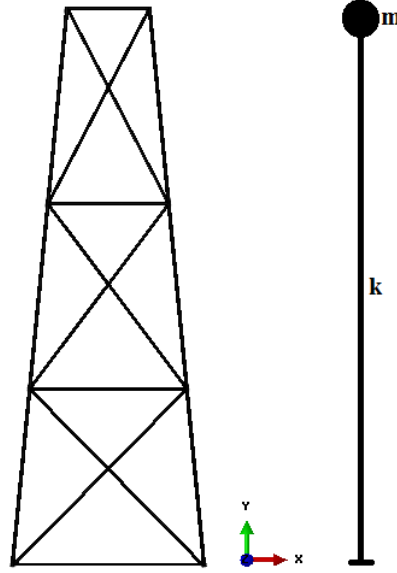
Bir sistemde potansiyel enerji, kinetik enerjiye eşittir. O halde bu iki denklem birbirine eşitlenip frekans (ω) yalnız bırakılırsa sistemin frekansı hesaplanabilir. Frekansı veren bağıntı Denklem (3.57)'dür [40].

$$\omega^2 = \frac{\int_0^L EI_{(x)} \left[\psi''_{(x)} \right]^2 dx}{\int_0^L m_{(x)} \left[\psi_{(x)} \right]^2 dx} \quad (3.57)$$

Bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar modeli ve basitleştirilmiş tek serbestlik dereceli sistem modeli Şekil 3.21.'de görülmektedir. Tek serbestlik dereceli sistem modelinde yapı tek bir dal olarak modellenmiştir. Yapıdaki tüm kütleler yapının tepe noktasına topaklanmıştır. Bu yöntemde çözümlmeye başlamadan önce yaklaşık bir şekil fonksiyonu tanımlaması yapılmalıdır. Yapının deplasmanı yükseklikle (y) değişeceği için $\psi_{(y)}$ şeklinde bir şekil fonksiyonu tanımlanır.

$$\psi(y) = 1 - \cos(\pi y / 2L) \quad (3.58)$$

Denklem (3.58) ile tanımlanan şekil fonksiyonu geometrik sınır şartını sağlamalıdır. Ankastre-açık uç için yazılan geometrik sınır şartı, $\Psi_{(0)} = \Psi'_{(0)} = 0$ ile ifade edilir [40].



Şekil 3.21. Sonlu elemanlar ve tek serbestlik dereceli sistem modelleri

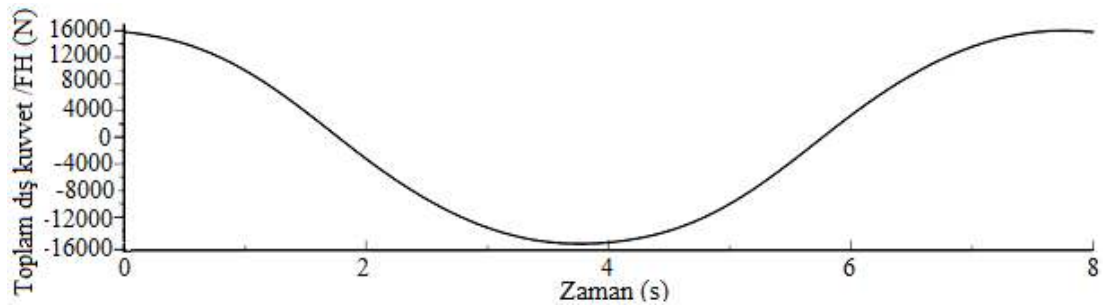
Kütle (m), rijitlik (k), şekil fonksiyonu ($\psi(y)$) ve dış kuvvet (F_{Top}) ifadelerinin Denklem (3.47)'ye yerleştirilmesi ile tez çalışmasının yarı analitik çözüm kısmını oluşturan hareket denklemi elde edilir. Burada atalet momenti $I=337545,41 \text{ m}^4$ ve kütle $m=30184,06 \text{ kg}$ olarak hesaplanmıştır.

$$\left(m \int_0^{18} (1 - \cos(\pi y / 2L))^2 dy \right) \ddot{X}_{(t)} + \left(EI \int_0^{18} (1 - \cos(\pi y / 2L))''^2 dy \right) X_{(t)} = F_H \psi_{(18)} \quad (3.59)$$

Yukarıdaki hareket denkleminin sağ tarafında dış kuvvet yer almaktadır. Yapının her bir elemanına gelen atalet ve sürüklenme kuvveti hesaplanır. Denklem (3.60) ile verilen toplam dış kuvvet yapının tepe noktasında (18 m) yer alan topaklanmış kütleye etki ettirilir.

$$F_H = F_D + F_M = \sum_{n=1}^{20} \left(\int_s^f \frac{1}{2} \rho C_D D u_{n(y,t)} |u_{n(y,t)}| dy + \int_s^f \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}_{n(y,t)} dy \right) \quad (3.60)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan 20 sayısı suyun altında kalan eleman sayısıdır. e değeri birim elemanın başlangıç noktası, f değeri ise elemanın bitiş noktasıdır. Her bir eleman için kuvvet eleman boyunca integre edilerek birim elemana gelen kuvvet hesaplanır. Elemanlara gelen kuvvetlerin toplamının zamanla değişimi Şekil 3.22.'de görülmektedir.



Şekil 3.22. Toplam dış kuvvetin zamanla değişimi

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen hareket denklemi Runge–Kutta metodu ile çözülmüştür. Denklemin çözümünde kullanılan dinamik başlangıç şartı Denklem (3.61)'de verilmiştir.

$$t = 0 \Rightarrow X_{(0)} = 0 \quad \dot{X}_{(0)} = 0 \quad (3.61)$$

Denklem (3.59)'un çözümüyle elde edilen zamanla değişen deplasman fonksiyonu Denklem (3.62)'de verilmiştir.

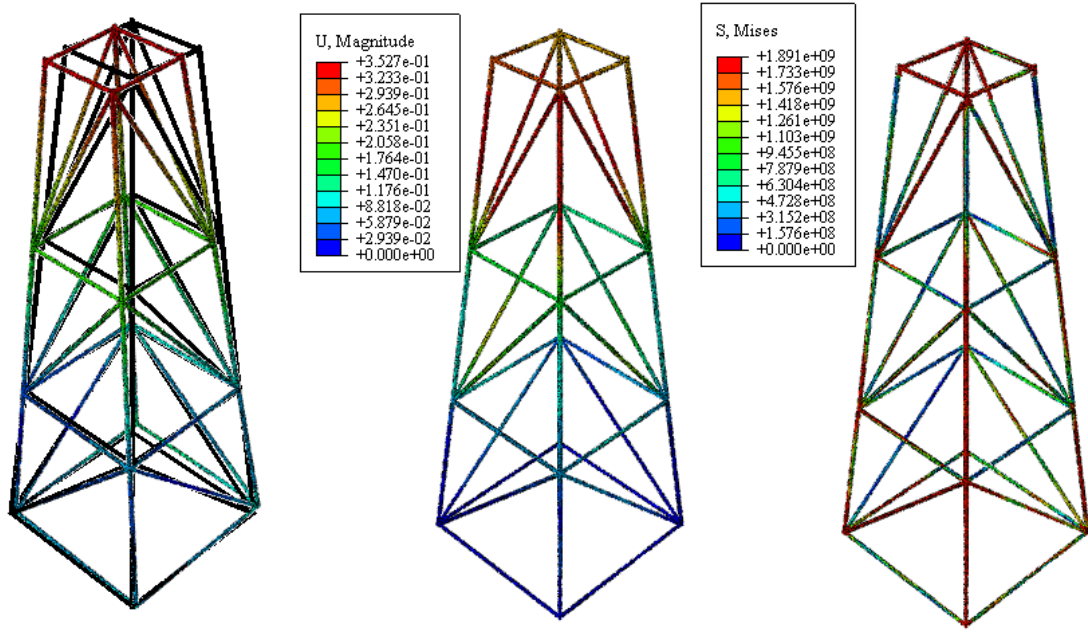
$$X_{(t)} = \sin(3,05t + 0,377) + 0,086 \sin(0,785t - 1,572) + 0,019 \sin(1,57t + 3,156) + 0,911 \sin(2,989t + 3,445) \quad (3.62)$$

Yukarıdaki ifade şekil fonksiyonu ile çarpılarak yapı üzerindeki istenen yükseklikteki deplasman değeri elde edilir.

Nümerik analizden ve tek serbestlik dereceli sistem çözümünden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sonuçlar kısmında verilmiştir. Nümerik analizden elde edilen sayısal sonuçların yanında görsel sonuçlara da yer verilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, uygulamada kullanılmakta olan kafes sistem tipi açık deniz yapısı dalga kuvvetleri altında analiz edilmiştir. Nümerik analizin yanında yarı analitik modelleme ile analiz yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Öncelikle nümerik analizden elde edilen ilk mod şekli, deplasman ve gerilme dağılımları Şekil 4.1.'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Modelin görsel sonuçları

Yukarıdaki şeklin sağında nümerik analizden elde edilen yapının ilk mod şekli görülmektedir. Yarı analitik modelin doğal frekans değeri Denklem (3.57) ile $7,36 \text{ s}^{-1}$ olarak hesaplanır. Nümerik analizden elde edilen Şekil 4.1.' in sağındaki mod şekline ait doğal frekans değeri ise $7,59 \text{ s}^{-1}$ olarak elde edilir. Diğer karşılaştırmalı sonuç olan deplasman değerlerine ise Tablo 4.1.'de yer verilmiştir. Yapı Von-Mises gerilmelerine göre analiz edildiğinde maksimum gerilme değerine yapının tabanında yer alan mesnetlerde ulaşılmıştır. Bu değer $1,890 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı analizlerden elde edilen doğal frekans ve deplasman değerleri

Analiz tipi	$\omega_0 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Deplasman (m)
FEM	7,59	0,353

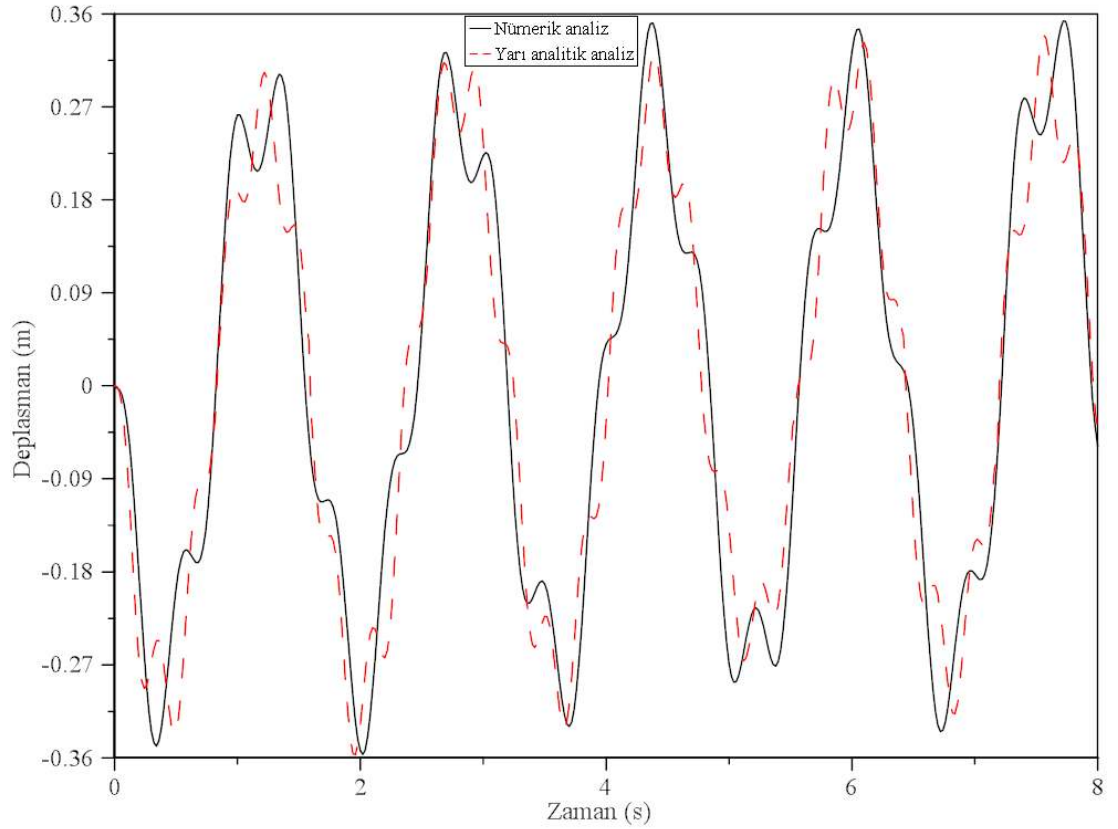
SDOF	7,36	0,340
------	------	-------

Modelin en üst noktasındaki deplasman değeri sonlu elemanlar analizinde 0.353 m iken tek serbestlik dereceli sistem modelinin yarı analitik çözümünden elde edilen deplasman değeri ise 0.340 m olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.2. Katlardaki maksimum deplasman değerleri

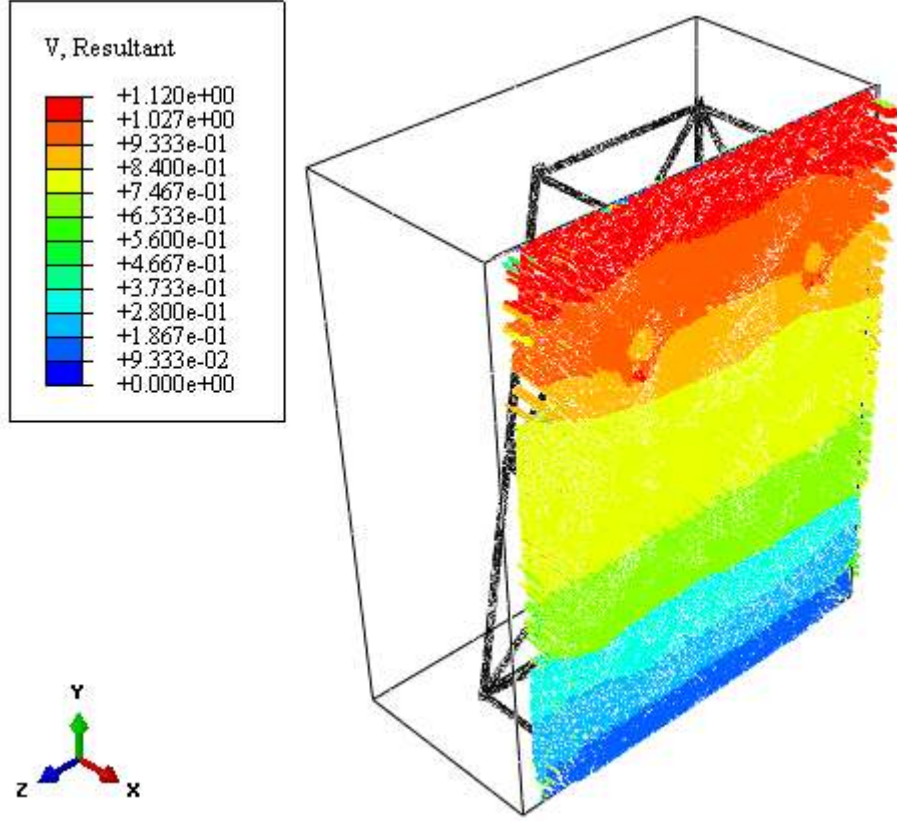
Analiz tipi	X ₁ (m)	X ₂ (m)	X ₃ (m)
FEM	0,087	0,244	0.353
SDOF	0,086	0,236	0,340

Farklı analizlerden elde edilen maksimum deplasman değerinin zamanla değişimi ise Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. Yapının tepe noktasındaki deplasman değerleri

Bu çalışmada yapısal sonuçların yanımda yapıyı çevreleyen akış ortamı ile ilgili sonuçlarda elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen dalga hızları ile akım vektörleri Şekil 4.3.'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Akışanın hız vektörleri ve renk dağılımı

Elde edilen sonuçların karşılaştırmalı yorumlanmasına bulgular ve tartışma kısmında yer verilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Açık deniz kafes sistem tipi yapıların gerek karadaki uygulamalarına göre gerekse diğer tipteki açık deniz platformlarına 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 kuvvetlerinin yapıya etki ettiği durumdur. Bu nedenle bu çalışmada kafes sistem tipi açık deniz platformuna Morison Denklemi ile hesaplanan dalga kuvvetleri etki ettirilmiştir ve analiz sonuçlarında doğal frekanslar, mod şekilleri, deplasman ve gerilme değerleri tahkik edilmiştir. Yapı sonlu elemanlar Explicit, çevresini oluşturan dalga modeli ise sonlu elemanlar/CFD çözücüsüyle modellenmiştir. Sonuçların doğruluğu ise tek serbestlik dereceli sistem (SDOF) modeli teyit edilmiştir.

İlk olarak analiz sonuçlarından doğal frekanslar incelenmiştir. İlk mod için elde edilen frekans değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tabloya göre iki farklı analiz tipinden elde edilen sonuçlar arasındaki farkın % 3,21 olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen ilk mod şeklinin beklenildiği gibi öteleme olduğu Şekil 4.1.’de görülmektedir.

Zamanla değişen son kat deplasman değerlerinin uyumu ise Şekil 4.2.’de görülmektedir. Diğer katlar için elde edilen deplasman sonuçları ise Tablo 4.2.’ sunulmuştur. Birinci kattan son kata deplasman değerleri arasındaki farklar sırasıyla %1,16, %3,38, %3.82 olarak hesaplanmıştır. İki analiz arasında deplasmanların ve doğal frekansın uyumu tespit edilerek yapının maksimum gerilme değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.1.de soldan sağa doğru sırasıyla mod şekli, deplasmanların dağılımı ve 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 $1.890 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olarak ölçülmüştür. Son katta ise gerilme değeri mesnette olduğu kadar olmasa da artış göstermiştir.

Yapı etrafındaki dalga hız vektörleri Şekil (4.3)’de görülmektedir. FEM analizinde yapısal analizin yanında CFD analizi de yapıldığı için akışkan davranışına ait değerlerde elde edilmiştir. Dalga hızı su yüzeyinde maksimum değeri olan 1.12 m/s’ ye ulaşmıştır.

Dalga modellemesinde düzenli Lineer dalga kullanılmıştır. Düzenli dalgalar bir dalga periyodu ya da dalga boyunda tekrarlandığı için bir dalga periyodu için analiz sürdürülmüştür. Dalga boyu için analiz yapılması durumunda akışkan sonlu elemanlar 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 daha çözümü daha elverişli bir model oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar programının CFD modülü ile hesaplanan çevresel kuvvetler FSI ile yapıya aktararak yapısal analiz tamamlanmıştır. Sonuç olarak SDOF analizinin sonlu elemanlar analiziyle olan uyumu tespit edilmiştir. Yapı boyutu arttıkça artan nokta ve eleman sayıları FEM çözümünü zorlaştıracığından, yapısal çıktıların yanında akışkan çıktılarına ihtiyaç duyulmayan durumlarda SDOF kullanımı önerilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kurt E. Thomsen. Offshore Wind a Comprehensive Guide to Successful Offshore Wind Farm Installation. Elsevier, Oxford, England, 2014, 305 s.
- [2] Zwick D., Muskulus M., Moe G. Iterative optimization approach for the design of full-height lattice towers for offshore wind turbines, *Energy Procedia*, 2012, 24, 297-304.
- [3] Muskulus M. The full-height lattice tower concept, *Energy Procedia*. 2012, 24, 371 -377.
- [4] Chivato, R., Kougioumtzoglou, M., Sanchez, N. Jacket Substructures For Offshore Wind Turbines and Pre-piled Grouted Connectios. Strathclyde Üniversitesi, Glasgow, Birleşik Krallık, 2014. (Üniversite içi takım projesi)
- [5] Travanca J., Hao H. Energy dissipation in high-energy ship-offshore jacket platform collisions. *Marine Structures*. 2015, 40, 1-37.
- [6] Li H., Wang J., James Hu SL. Using incomplete modal data for damage detection in offshore jacket structures. *Ocean Engineering*. 2008, 35, 1793-1799.
- [7] Haselbacha, P., Natarajana, A., Jiwinanguna, R.G., Branner, K. Comparison of coupled and uncoupled load simulations on a jacket support structure. *Energy Procedia*. 35, (2013), 244-252.
- [8] Vorpahl, F., Popko, W., Kaufer, D. Description of a basic model of the 'UpWind reference jacket' for code comparison in the OC4 project under IEA Wind Annex 30, Technical Report, Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology IWES Department of Turbine Simulation, Software Development and Aerodynamics Am Seedeich, Bremerhaven, Germany, 2013, 19s
- [9] Dubois J., Muskulus, M., Schaumann, P. Advanced representation of tubular joints in jacket models for offshore wind turbine simulation. *Energy Procedia*. 2013, 35, 234-243.
- [10] Shi, W., Han, J., Kim, C., Lee, D., Shin, H., Park, H. Feasibility study of offshore wind turbine substructures for southwest offshore wind farm project in Korea. *Renewable Energy*. 2015, 74, 406-413.
- [11] Ahmadi, H., Lotfollahi-Yaghin, M.A., Yong-Bob, S., Aminfar, M.H. Parametric study and formulation of outer-brace geometric stress concentration factors in internally ring-stiffened tubular KT-joints of offshore structures, *Applied Ocean Research*. 2012, 38, 74-91.
- [12] Ahmadi, H. Mohammadi, A.H. Yeganeh, A. Probability density functions of SCFs in internally ring-stiffened tubular KT-joints of offshore structures subjected to axial loading. *Thin-Walled Structures*. 2015, 94, 485–499.
- [13] Li, M., Zhang, H., Guan, H. Study of offshore monopile behaviour due to ocean waves. *Ocean Engineering*. 2011, 38(17–18), 1946–1956.
- [14] Liu, W., Tang, B., Jiang, Y. Status and problems of wind turbine structural health monitoring techniques in China. *Renewable Energy*. 2010, 35, 1414–1418.
- [15] Hirdaris, S.E., Bai, W., Dessi, D., Ergin, A., Gue, X., Hermundstad, O.A., Huijsmans, R., Iijima, K., Nielsen, U.D., Parunov, J., Fonseca, N., Papanikolaou, A. Argyriadis, K., Incecik, A. Loads for use in the design of ships and offshore structures. *Ocean Engineering*. 2014, 78, 131–174.
- [16] Woude, C. V., Narasimhan, S. A study on vibration isolation for wind turbine structures, *Engineering Structures*. 2014, 60, 223–234.

- [17] Bazeos, N., Hatzigeorgiou, G.D., Hondros, I.D., Karamaneas, H., Karabalis, D.L., Beskos, D.E. Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower. *Engineering Structures*. 2002, 24, 1015-1025.
- [18] Benitz, M.A., Lackner, M.A., Schmidt, D.P. Hydrodynamics of offshore structures with specific focus on wind energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 44, 692-716.
- [19] Jia, J. An efficient nonlinear dynamic approach for calculating wave induced fatigue damage of offshore structures and its industrial applications for lifetime extension. *Applied Ocean Research*. 2008, 30, 189-198.
- [20] Yi Zhang, Michael Beer, Ser Tong Quek, Long-term performance assessment and design of offshore structures *Computers and Structures* 154 (2015) 101–115.
- [21] Dong, W., Moan, T., Gao, Z. Fatigue reliability analysis of the jacket support structure for offshore wind turbine considering the effect of corrosion and inspection. *Reliability Engineering and System Safety*. 2012, 106, 11–27.
- [22] Introduction to ABAQUS/CFD, Dassault Systèmes, 2010, 80s.
- [23] Abdel Raheem, S.E. Nonlinear behaviour of steel fixed offshore platform under environmental loads. *Ships and Offshore Structures*. 2014, doi: 10.1080/17445302.2014.954301.
- [24] Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü. Irregular wave effects on dynamic behavior of piles. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2013, 38, 1047-1057.
- [25] Gong, S.F., Ni X.Y, Bao, S., Bai, Y. Asymmetric collapse of offshore pipelines under external pressure. *Ships and Offshore Structures*, 2013, 8(2), 176-188.
- [26] Bai, Y., Ruan, W., Yuan, S., He, X., Fu, J. 3D Mechanical analysis of subsea manifold installation by drill pipe in deep water. *Ships and Offshore Structures*. 2014, 9(3), 333-343.
- [27] Gucuyen, E., Erdem, R.T. Corrosion effects on structural behaviour, of jacket type offshore structures. *GRADEVINAR*. 2014, 66(11), 981-986.
- [28] Namkoong. K., Choi, H.G., Yoo, J.Y. Computation of dynamic fluid–structure interaction in two-dimensional laminar flows using combined formulation. *Journal of Fluids and Structures* 2005, 20, 51-69.
- [29] Liu, Z.G., Liu, Y., Lu, J. Numerical simulation of the fluid–structure interaction for an elastic cylinder subjected to tubular fluid flow. *Computers & Fluids*. 2012, 68, 192-202.
- [30] Surana, K.S., Blackwell, B., Powell, M., Reddy, J.N. Mathematical models for fluid-solid interaction and their numerical solutions. *Journal of Fluids and Structures*. 2014, 50, 184-216.
- [31] Wang, X., Sun, R., Ao, X., Zhou, Z., Lang, J. Eulerian–eulerian solid–liquid two-phase flow of sandstone wastewater in a hydropower station rectangular sedimentation tank. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2013, 17(8), 700-719.
- [32] Bai, X., Qin, W. Using vortex strength wake oscillator in modelling of vortex induced vibrations in two degrees of freedom. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 2014, 48, 165–173.
- [33] Fujii, K. Nonlinear static procedure for multi-story asymmetric frame buildings considering bi-directional excitation. *Journal of Earthquake Engineering*. 2011, 15, 245–273.
- [34] Kim, D.H., Lee, S.G. Reliability analysis of offshore wind turbine support structures under extreme ocean environmental loads. *Renewable Energy*. 2015, 79, 161-166.

- [35] Zhao, M. Numerical investigation of two-degree-of-freedom vortex-induced vibration of a circular cylinder in oscillatory flow. *Journal of Fluids and Structures*. 2013, 39, 41–59
- [36] Zhao, M., Cheng, L. Numerical simulation of two-degree-of-freedom vortex-induced vibration of a circular cylinder close to a plane boundary. *Journal of Fluids and Structures*. 2011, 27, 1097–1110.
- [37] Goncalves, R.T., Rosetti, G.F., Franzini, G.R., Meneghini, J.R. Fajarra, A.L.C. Two-degree-of-freedom vortex-induced vibration of circular cylinders with very low aspect ratio and small mass ratio. *Journal of Fluids and Structures*. 2013, 39, 237–257.
- [38] Blazejczyk-Okolewska, B., Czolczynski, K., Kapitaniak, T. Dynamics of a two-degree-of-freedom cantilever beam with impacts. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2009, 40, 1991–2006.
- [39] ABAQUS/CAE 6.10, 2010.
- [40] Wang, S. Damage detection in offshore platform structures from limited modal data. *Applied Ocean Research*. 2013, 41, 48–56.
- [41] Clough, R.W. ve Penzien, J. *Dynamics of Structures* (2nd edition). Singapore: Mc Graw–Hill, Inc. 1993.
- [42] Gücüyen, E. İç ve Dış Akış Etkisinde Deniz Deşarj Sistemlerinin Tasarımı. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2013, 107 s. (Doktora Tezi).
- [43] Gücüyen, E. Düzensiz Dalgalar Etkisindeki Deniz Boru Hatlarının Dinamik Analizi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2008, 107 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [44] Yiğit, M. E. Dalga Etkisindeki Deniz Deşarj Borularının Dinamik Davranışının Modellenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2010, 131 s. (Yüksek Lisans Tezi).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İsmail ERGİN

Doğum Yeri ve Yılı : İzmir/Buca, 1986

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : ismailergin@isseyapi.com

Eğitim Durumu

Lise : Konak Anadolu Lisesi, 2004

Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2009

Mesleki Deneyim

Kurum bilgisi : İsse Mühendislik Ltd. Şti. 2009-

Yayınları

Ergin, İ., Gücüyen, E., Erdem, R.T., Yurdusev, M.A. Dynamic analysis of jacket type offshore structures. International Conference on Engineering and Natural Sciences. May 15-19, 2015, Skopje.