

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



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

**ÇİFT YÖNLÜ AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİM
MODELLEMESİNİN AÇIK DENİZ SİSTEMLERİNE
UYGULANMASI**

İnş. Müh. Selim COŞKUN

**Danışman
Prof. Dr. Engin GÜCÜYEN**

MANİSA-2025

SELİM
COŞKUN

ÇİFT YÖNLÜ AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİM
MODELLEMESİNİN AÇIK DENİZ SİSTEMLERİNE
UYGULANMASI

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

SELİM COŞKUN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Çift Yönlü Akışkan-Yapı Etkileşim Modellemesinin Açık Deniz Sistemlerine Uygulanması

Selim COŞKUN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Engin GÜCÜYEN

Günümüz dünyasının en büyük problemi enerji teminidir. Ülkeler arası rekabet ve ekonominin en önemli belirleyicisidir. Açık deniz yapıları bu ihtiyaca cevap verebilecek niteliktedir. Gerek petrol ve doğalgaz gibi tüketilebilir kaynakların çıkarılabilmesi, gerekse rüzgar dalga gibi yenilenebilir enerjisi kaynaklarından faydalanabilmek için açık deniz yapılarına yönelim artmıştır. Arsa maliyetleri ve kara rezervlerinin azalması, enerji üretim tesislerinin inşasının karadan denize doğru kaymasını sağlamıştır. Enerji üretimi için en bilinen ve uygulanan açık deniz yapısı tipi platformlu kafes sistemlerdir. Platformlar deniz tabanı ile olan bağlantı tiplerine göre; sabit, gergi ayaklı ve yüzen tipler olarak farklı bölümlere ayrılabilir.

Bu tez çalışmasında deniz tabanına sabit, üç ayaklı ve dört ayaklı iki farklı kafes tipi platform üç farklı model olarak ABAQUS sonlu elemanlar programında tasarlandı. Katı modeller ABAQUS/Explicit çözücüsünde, akışkan modeller ise programın ABAQUS/Cae kısmında tasarlanıp rüzgar ve dalga yükleri etki ettirildi. Çalışmada tasarlanan dört ayaklı modellerin bir tanesinde taşıyıcı profillerin bir parçası çıkartılıp, diğer iki modelle benzer koşullar altında aynı etkiye maruz bırakılarak karşılaştırılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Açık deniz yapıları gemi yavaşmaları ya da ticari geçişler sırasında zaman zaman hasar görebilmektedir. Böyle bir senaryo varsayılarak platformların birinde profil kaybı sonrası hizmet vermeye devam ettiği durum da incelenmiştir. Program analizi ve elle yapılan tahkikler ile sonuçlar karşılaştırılmış, platformların zamana göre deplasman ve gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Yapıların doğal frekans değerleri ile ilgili mod şekilleri, maksimum gerilme ve deplasman değerleri incelenmiştir. Yapısal çıktıların

yanında dalga serbest yüzey hareketiyle beraber yapıya etki eden dalga kuvvetleri yarı analitik ve nümerik olarak elde edilerek nümerik analiz tahkik edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık deniz yapıları, kafes sistemler, Sonlu Elemanlar Analizi, akışkan yapı etkileşimi analizi

2025, 78 sayfa.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Application of Bidirectional Fluid-Structure Interaction Modelling to Offshore Systems

Selim COŞKUN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Engin GÜCÜYEN

The biggest problem of today's world is energy supply. It is the most important determinant of international competition and economy. Offshore structures are capable of responding to this need. In order to extract consumable resources such as oil and natural gas, and to benefit from wind energy, the orientation towards offshore structures has increased. The decrease in land costs and land reserves caused the platform cage system constructions to shift towards the sea. According to the connection types of platforms with the sea surface; It can be divided into different sections as fixed, strut and floating types.

In this thesis, two different cage-type platforms, fixed to the seabed, three different models, one three-legged and one four-legged, were designed using the ABAQUS finite elements method. Solid models were designed using the ABAQUS/Explicit solver, while fluid models were designed in the ABAQUS/Cae section of the program, and subjected to wind and wave loads. In this study, a section of supporting profiles was removed from one section of the designed four-legged model. The results were compared with the other two models under similar conditions, subjected to the same exposure, and the results were obtained. Offshore structures can occasionally be damaged during ship docking or commercial passages. Such a scenario assumes that one of platforms maintains its service performance after the profile is lost. The results were compared using program analysis and manual verification, and platforms deformation and stress values over time were compared. The mode shapes, maximum stress and displacement values related to the

natural frequency values of the structures were investigated. In addition to the structural outputs, the wave forces acting on the structure along with the wave free surface motion were obtained semi-analytically and numerically and the numerical analysis were verified.

Keywords: Offshore structures, jacket type structures, Finite Elements Analyses, fluid structure interaction analyses.

2025, 78 pages.



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada akışkan-yapı etkileşim modeline açık deniz ortamında meydana gelebilecek dış etmenler etki ettirilerek, sistem incelenmiştir. Tezde tasarlanan kafes sistem, rüzgar ve dalga etkisi gibi doğal etmenlere mağruz bırakılmış, aynı zamanda da gemi çarpması şeklinde bir senaryo üretilerek incelenmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar ve bulgular değerlendirilmiştir.

Tüm çalışma boyunca gerek kaynak gösterimi, gerek verdiği öğütler, gerekse abi-kardeş tarzı yaklaşımıyla benim tez çalışmama ve akademik hayata olan inancımı sıcak tutan ve bu tezin bitmesinde büyük emeği olan sayın **Prof. Dr. Engin GÜCÜYEN**'e yüksek lisans öğrenim ve tez yazım sırasında sabrını, sevgisini ve maddi desteklerini eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Selim COŞKUN
Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Profil kesit alanı
B	Alt taban genişliği
C_D	Sürtünme katsayısı
C_I	Atalet katsayısı
C_S	Silindirik eleman kesiti
c_o	Sesin tuzlu sudaki hızı
d	Su Derinliği
D	Profil çapı
E	Elastisite modülü
F	Kuvvet
F_A	Rüzgar kuvveti
F_D	Sürüklenme kuvveti sabiti
F_H	Yatay Kuvvet
F_I	Atalet kuvveti sabiti
H	Dalga yüksekliği
I	Atalet momenti
k	Us-Up eğrisinin eğimi olan EOS malzeme sabiti
k_T	Arazi faktörü
kg	Kilogram
L	Dalga boyu
m	Metre
M	Kütle
N	Newton
T	Dalga periyodu
t	Zaman
u	Hız
ú	İvme
U_{BAS}	Referans rüzgar hızı
X	Deplasman
z₀	Pürüzlülük uzunluğu
μ	Suyun viskozitesi

η	Su yüzeyi yüksekliği
Φ	Potansiyel fonksiyonu
Γ_0	Sonlu elemanlar modelinde kullanılan değeri sıfır olan malzeme sabiti
Ψ	Akım fonksiyonu
ν	Poisson oranı
ρ_c	Çeliğin yoğunluğu
ρ_e	Tuzlu suyun yoğunluğu
CEL	Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi (Coupled Eulerian Lagrange)
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
EMO	Elektrik mühendisleri odası
FSI	Yapı-akışkan etkileşimi (Fluid Structure Interaction)
GW	Giga watt
MW	Mega watt
NORSOK	Norveç Petrol Araştırma Enstitüsü
OWT	Deniz aşırı rüzgar türbinleri (Offshore Wind Turbines)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Gemi çarpışma hızı ve etkileri	2
Şekil 1.2. Korozyon nedeniyle hasar almış yapının modal davranışları	3
Şekil 3.1. Kafes platform tipleri	10
Şekil 3.2. Model ve çevresinde oluşturulan deniz ortamı	11
Şekil 3.3. Kafes sistem yükseklik ve açıklıkları	12
Şekil 3.4. Akışkan yapı etkileşiminin şematik gösterimi	18
Şekil 3.5. ABAQUS/Cae açılış ekranı	20
Şekil 3.6. Çift çember ile boru et kalınlığını oluşturma	28
Şekil 3.7. Tekrarlayan geometri çizimleriyle boru profilleri oluşturma	28
Şekil 3.8. Çelik malzemeyi tanımlama	29
Şekil 3.9. Malzeme ataması	30
Şekil 3.10. Geometrilere bir araya getirme	30
Şekil 3.11. Analiz adımlarının belirlenmesi	31
Şekil 3.12. Etkileşim tanımlanması	32
Şekil 3.13. Sınır şartları gösterimi	33
Şekil 3.14. Rüzgar ve platform yüklemeleri	33
Şekil 3.15. Hücre biçimlendirme (seed part)	35
Şekil 3.16. Ağ (mesh) eleman tipinin oluşturulması	36
Şekil 3.17. Akışkan geometrisinin oluşturulması	37
Şekil 3.18. Tuzlu su özellikleri atama	43
Şekil 3.19. Model II sonlu elemanlar modeli	44
Şekil 4.1. Dalga kuvvetinin dalga hızı ile değişimi	50
Şekil 4.2. Serbest yüzeyin zamana bağlı değişimi	52
Şekil 4.3. Mod şekilleri ve ilgili doğal frekans değerleri	53
Şekil 4.4. Tiplerin her bir ayağına göre gerilme ve deplasman değerleri	54
Şekil 4.5. Reaksiyon kuvvetlerinin deplasmanla değişimi	55
Şekil 4.6. Tip I zamana göre yer değiştirme grafiği	56
Şekil 4.7. Tip II zamana göre yer değiştirme grafiği	56
Şekil 4.8. Tip III zamana göre yer değiştirme grafiği	57
Şekil 4.9. Tüm modellerin deplasman dağılımları	57
Şekil 4.10. Tüm modellerin gerilme dağılımları	58
Şekil 4.11. Tip I farklı zamanlarda serbest su yüzeyi ile etkileşimi	59

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Platform tanımlamaları	12
Tablo 3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin problem türleri ile sınıflandırılması ...	17
Tablo 3.3. Kafes sistemlerin uygulama alanları.....	25
Tablo 3.4. Modal I hassaslık analizi.....	34
Tablo 3.5. Yapısal modellerde kullanılan nokta ve eleman sayıları	34
Tablo 3.6. Akışkan modelinin sınır şartları.....	37
Tablo 4.1. Dalga kuvvetleri ve dalga hızı bağlantısı.....	51
Tablo 4.2. Analizler arası veri karşılaştırması	52
Tablo 4.3. Tip I katlara göre doğal frekans ve maksimum yer değiştirme	53



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	Sayfa I
ABSTRACT	III
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLO DİZİNİ.....	IX
İÇİNDEKİLER	X
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. Amaç	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
3.1. Materyal	10
3.2. Yöntem	13
3.2.1. Sayısal Modelleme	19
3.2.2. Kafes Sistemlerin Modellenmesi	25
3.2.3. Akışkan Ortamı Modellemesi.....	36
3.2.4. Akışkan-Yapı Etkileşim Analizi.....	44
3.2.4.1. Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi.....	45
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
6. KAYNAKÇA	63

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Günümüz dünyasındaki artan enerji talebi yenilenebilir enerji kaynakları üzerine çalışmaları artırmıştır. Açık denizler yenilenebilir enerji kaynakları için sürdürülebilir bir rezerv alanıdır. Bunun yanında fosil yakıt kaynaklarının karalarda azalması, fosil yakıt kaynak araştırmalarını karalardan açık denizlere doğru kaydırmıştır. Bu nedenlerden dolayı günümüzde açık denizler birer enerji sahası haline gelmiştir. Açık denizlerde fosil yakıtların kaynağından yer yüzüne çıkarılmasında, karaya iletilmesinde, yenilenebilir kaynakların üretilmesinde ve karaya iletilmesinde açık deniz yapıları kullanılmaktadır.

Açık denizlerde petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların kaynağından çıkarılmasında ve rüzgar enerjisinden elektrik enerji elde edilmesinde açık deniz platformları kullanılmaktadır. Platform üst yapısı, su yüzeyinde bulunan platform, platformu taşıyan altyapı ve temel yapıyı oluşturmaktadır. Tek kazıklı, çoklu kazıklı, yerçekimi tabanlı ve kafes sistem platform altyapısı olarak kullanılan yapı tipleridir. Bunlar arasında kafes sistem en yaygın altyapı tipidir [1, 2].

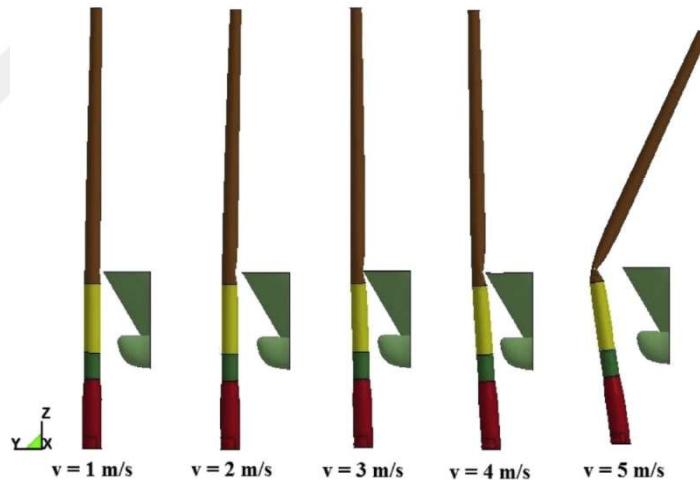
Kara yapılarına nazaran açık deniz yapılarının; inşası, montajı ve nakliyesi daha zor olduğundan tüm koşullar daha detaylı ve dikkatli bir şekilde göz önüne alınmalıdır. Ön görülebilecek olumsuz senaryolar rüzgar-dalga koşulları, korozyon, yorulma, gemi çarpması, buzul ataklar, üretim-montaj kusurları gibi faktörler olarak sıralanabilir. [3,4]. Bu olumsuz senaryolar yapılarda delik, göçük, arıza ve mukavemet azalması gibi durumlara yol açabilir [5].

Gemi çarpması ile ilgili çalışmalar iki başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki hasar öncesi çalışmalardır ve hasar tahminini de içerir, ikincisi ise hasar sonrası yapının davranışını inceleyen çalışmalardır.

Hasar tespiti için sinyal enerjisi oranını kullanabilir. Sağlam ve hasarlı yapı modellerinin üzerine sensörler yerleştirilerek, hasarlı yapılardaki göçüklere yapay ivmeler kazandırılıp gereksiz kesit inceltilmesinin önüne geçilebilir [6]. Sinyal enerjisi oranı ile hasarların lokasyonu arasındaki uyum tespit edilebilir.

Çarpışma sonrası çalışmalarda ise hasarın miktarı ve yeri; deneysel ve sayısal çalışmalar ile tespit edilebilir. Simulasyon ortamında oluşturulan senaryolarda; hasar tespiti, hasarın lokalizasyonu ve şiddeti tahmini edilebilir. Ayrıca bu yöntemler sayısal uygulama ve laboratuvar testleri aracılığıyla doğrulanabilir.

Farklı çarpışma hızları ve farklı hasar bölgeleri kaza sonrası ortaya çıkan göçük veya kırıkların miktarını değiştirebilir [7]. Aynı gemi ve objenin farklı hızlarda meydana gelen çarpışmaları farklı sonuçlar ortaya çıkarabilir [8].

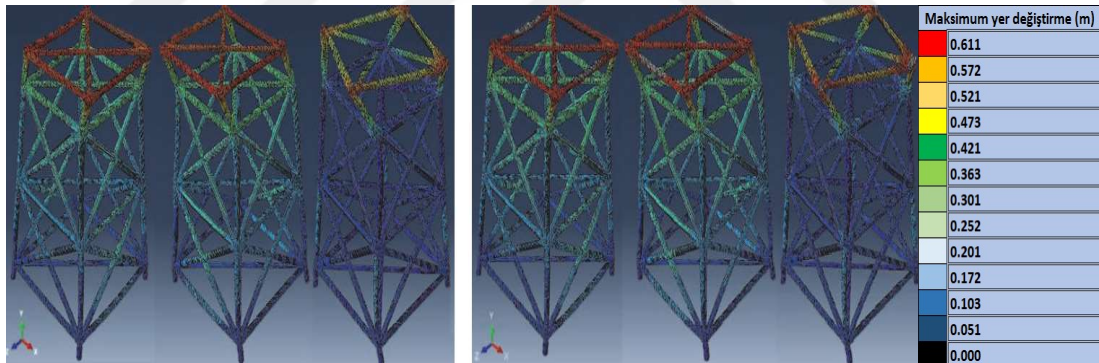


Şekil 1.1. Gemi çarpışma hızı ve etkileri [8]

Değerleme metodu, hasar tespiti ve yeri konusunda kullanılacak yöntemlerden biridir. Yapılan tespitlerden sonra hasarın ciddiyeti belirlenir. Yapının hasarını tespit etmek ve ölçmek için modal frekanslara ve mod şekillerine dayanan yinelemeli modal gerinim enerjisi yöntemi benimsenir. Yöntemlerin uygulanabilirliği ve etkinliği sayısal modellerle doğrulanır [9].

Sıcaklık gibi çevresel etkilerin hasar yeri üzerindeki etkisi modal parametreler aracılığıyla, gerinim enerjisi ayrıştırma yöntemini (MSSED) kullanarak araştırılabilir. Sıcaklık değişiminin hasar lokalizasyonu üzerindeki etkisi Monte Carlo simülasyonunu kullanılarak tespit edilebilir [10].

Korozyon hasarı eleman üzerinde yerel oyulmalar şeklinde modellenebileceği gibi [11] kesit kaybı şeklinde de modellenebilir. Eleman göçüklerinin haricinde, kesit özelliklerinin azaltılması ve birincil elemanların çıkarılması gibi hasar senaryoları da türetilebilir. Şekil 1.2.'de oyulma tipinde modellenmiş korozyon hasarının modal davranış üzerindeki etkisi görülmektedir. [12]. Korozyon etkisinde olan ve hiç korozyona uğramamış farklı modeller tasarlanarak çevresel yükler altında oluşan hasarın yapısal davranışa etkisi incelenebilir.



a. Hasarsız yapının ilk üç modal davranışı **b.** Hasarlı yapının ilk üç modal davranışı

Şekil 1.2. Korozyon nedeniyle hasar almış yapının modal davranışları

Bu çalışmada dört ayaklı kafes sistem tipi açık deniz platformunun hasar altında davranışını modellemek için elemanların çıkarılmasından yararlanılmıştır. Ayrıca dört ayaklı bir modelin bir ayağında lokal kopma nedeniyle üç ayakla çalışmaya devam etmesi durumunda hasarsız üç ayaklı modele göre yapısal davranışındaki değişim de araştırılmıştır.

Açık denizdeki yapıların çevresel yükler altındaki dinamik tepkisini tahmin etmek ve yapıların dinamik davranışını araştırmak amacıyla yaygın olarak akışkan yapı etkileşimi (Fluid Structure Interaction) yöntemi kullanılır. Akışkan yapı etkileşimi analizlerinde etkileşim durumuna göre; analizler tek yönlü ve çift yönlü olarak isimlendirilirler. Sadece akışkandan yapıya kuvvet aktarımı olduğu durum tek yönlü akışkan yapı etkileşimi analiz olarak isimlendirilirken akışkandan yapıya kuvveti yapıdan da akışkana kuvvetin neden olduğu deplasman aktarımı durumunda analiz çift yönlü akışkan yapı etkileşimi analiz olarak isimlendirilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi tek ve çift yönlü akışkan yapı etkileşim analizlerinin açık deniz yapılarına uygulanmasında sıklıkla kullanılmaktadır [13].

Sonlu elemanlar destekli FSI analizi; Eulerian tekniği [14] veya Lagrangian tekniği [15] ile oluşturulabilir. Öte yandan her iki teknik de Keyfi Lagrangian Eulerian (ALE) [16, 17] ve Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi (CEL) [18] analizlerinde kullanılabilir. Abaqus sonlu elemanlar yazılımı da etkileşim modellemesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [19].

Bu çalışmada yapıların ve çevrenin üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri (ABAQUS/CAE) çerçevesinde Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi aracılığıyla modellenmiştir. Bu teknikte yapı modeli analizin Lagrangian kısmını oluştururken, akışkan modeli ise Eulerian modelini oluşturmaktadır. Analiz süresince akışkandan yapıya kuvvet, yapıdan da akışkana deplasman aktarımı Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Akışkan ortamı Lineer Dalga Teorisine göre modellenmiştir. Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi akışkan modelinde serbest su yüzeyinin hareketine imkan sağlamaktadır. Lineer Dalga Teorisine ait serbest yüzey hareket denkleminin yarı analitik çözümü ile Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yönteminden elde edilen sayısal çözüm karşılaştırılarak analizler tahkik edilmiştir.

Çalışmanın modelleme aşamasında üç senaryo kullanılmıştır. bunlar; hasarsız dört ayaklı model, bir ayağı hasarlı dört ayaklı model ve hasarsız üç ayaklı modellerdir. İlk dördünde, hasarlı elemanların Young modülü farklı şiddet

oranlarıyla azaltılarak hasarlar elde edilir; %5, %10, %20, %50. Beşincisinde ise bacak elemanının bir kısmının çıkarılmasıyla hasar meydana gelmektedir.

Çalışmanın karşılaştırma aşamasında hasarlı yapılar, sağlam olan dört ve üç ayaklı yapılarla karşılaştırılmıştır. Hasar görmeyen üç ayaklı yapı ile bacaklarından biri kırılan veya farklı oranlarda hasar gören hasarlı dört ayaklı yapı arasında yapısal davranış üzerinden bir karşılaştırma yapılmıştır.



İKİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte açık deniz yapılarının modellemeleri ve deniz, rüzgar gibi çevresel koşulları sanal ortamda tasarlanabilmektedir. Bu tez çalışmasında Akışkan-Yapı etkileşimlerini içeren (FSI) modelleme çalışmasına yer verilmiştir. Oluşturulan senaryoda hasarlı ve hasarsız kafes sistem yapılar incelenmiştir. Konuyla ilgili literatür çalışması aşağıda verilmiştir.

Açık deniz yapılarının akışkan-yapı etkileşimini simülasyon ortamında anlatabilmemiz için dalga ve rüzgar kuvvetlerini dikkate almak gerekmektedir. Gücüyen ve ark. [20] Lineer Dalga Teorisinden faydalananak akışkan-yapı etkileşimli modelleri ABAQUS sonlu elemanlar analiz programının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve açık kod (Explicit) bölümlerinde çözümlemişlerdir. Dalga kuvvetleri çevresel etkiler arasında gemi yavaşmalarıyla beraber en etkin ve yapının doğasını en çok etkileyen dış kuvvettir. Gerekli simülasyon programlarında deniz ve yapı ortamı ayrı ayrı modellenip Euler ve Lagrange teorileri ve numerik analizlerden faydalananak düzenli düzensiz dalga etkisinde yapıya etkiyen dinamik kuvvetler [21] tarafından incelenmiştir. dalga kuvvetlerinin yapısal davranışa etkisinin incelendiği bir başka çalışmada aynı geometriye ve dalga etkisine sahip, fakat imalatında beton-köpük ve plastik gibi malzemelerden imal edilen yapıların deniz ortamındaki akışkan-yapı etkileşim farklılıkları gözlenmektedir [22].

Dalga kuvvetlerinin yanında açık deniz yapılarına etki eden en önemli çevresel etkilerden biri de rüzgar yüküdür. Rüzgar yükü maruz bıraktığı tüm kafes sistem kesitini doğrudan etkiler. Bölgesel rüzgar haritaları ve geçmiş yıllara ait rüzgar kayıtları inşaa edilecek platformun konumunu belirlemede önemli rol oynar [23]. Yapının ağırlığı, boru çapları, et kalınlıkları ve maliyet bölgedeki rüzgar yükü analizine göre optimize edilerek revize edilir. Yapı üzerindeki platform projesi ve kafes sistemdeki ayak sayısı hesaplanan rüzgar etkisine göre tasarlanır [24].

Bir kılavuz ya da ticari gemi yapıya yaklaşırken açık-deniz yapılarına çarpma ihtimali bulunmaktadır. Bu gemiler açık-deniz yapısına çarptığında; platform temelinde ve yapısında önemli değişikliklere neden olabilir. Çarpışma anında geminin kafes sisteme uyguladığı kuvvet hasar miktarı ile doğru orantılıdır bu da yapı kütlesini birinci etmen yapar [25]. Çarpışma esnasında geminin kütlesi ve hızıyla doğru orantılı olarak, geminin sahip olduğu kinetik enerji hasar alınarak sönümlenir [26]. Çarpışmanın etkisini o andaki rüzgarın hızı, açısı, deniz yüksekliği ve dalga hızı gibi çevresel faktörler belirlemektedir [27-28]. Çarpışma anındaki açı dahi kazanın şiddetini önemli ölçüde değiştirebilir bu sebeple Abazari ve ark. [29] çarpışma anındaki kuvvet-penetrasyon eğrisini incelenmiş, minimum sürtünme ve maksimum penetrasyonun 90⁰'lık çarpışma anında gerçekleştiğini gözlemlemiştir.

Kütle, hız ve malzeme kalitesindeki değişim ile NORSOK N-003 gemi çarpışmasında ortaya çıkan enerji standartlarını sırasıyla pruva ve yan bölgeden 11 ve 14 MJ'den 28 ve 50 MJ olarak güncellemiştir. Çarpma etkisine maruz kalan platform profillerinin çap ve et kalınlıkları sönümlenmesi gereken enerjiyi artırır [30]. Roy ve ark. [31] tarafından yapılan çalışmada çarpışmanın meydana geldiği bölgenin yapısal hasara etkisi incelenmiştir. Etkiyi azaltmak için enerji sönümleyebilen malzemeler tercih edilmektedir. Geminin pruvasına koyulan plastik alaşımlı malzeme deformasyon özelliğini değiştirmektedir [32]. Ayrıca geminin dışına yerleştirilecek çelik elyafli lastik içerikli malzemeler sönümlenen enerjiyi artıracaktır [33]. Mo ve ark. [34] derzli bir platform oluşturup sönümleyici malzemeyi açık-deniz yapısı üzerinde incelemişlerdir. Açık deniz yapısının profilleri üzerindeki derzli birleşimin, çarpışma etkisindeki geminin hızına bağlı olarak harç tabasındaki hasarın şiddetini incelemişlerdir.

Uzay kafes sistem platformun ömrünü etkileyen faktörlerden biri de korozyondur. Tuzlu suyun da etkisiyle kafes sistem yapının gövdesinde kimyasal emisyonlar meydana gelir. Bu emisyonlar imalat malzemesinin deforme olmasına ve kesit zayıflığına sebep olur. [35]. Korozyon tespiti için kullanılan yöntemlerden biri de Faraday elektrokimya formülüdür. Bu formül ile metal içerikli boru kazığının bölgesel korozyon oranı, boru boyunca homojen olarak dağılmış gibi hesap yapılır.

Hesaplanan korozyon değeri kesiti %10 veya üzerinde zayıflattıysa sistemin mukavemet değerlerini revize etmek gerekir [36].

Açık-deniz yapısı tasarımındaki etkenlerden biri de depremdir. Seçilen bölgeye göre tarihsel deprem geçmişi incelenerek sismik yüklemeler yapılabilir. Yapılan sismik yüklemelerde dinamik analiz ve lineer olmayan analizler yapılarak bazı cevaplara ulaşılabilir. Plastisite, döngüsel yükleme, yapı deformasyonları ya da platformun katastrofik sınırlarını inceleyecek sonuçlara erişilebilir. Sismik yüklemelerin etkileri temelde kullanılan tasarıma göre de değişebilir. Örneğin sabitlenmiş ayakları ile sönümleyici sistemler bir tutulamaz. Temel montajında kullanılan sismik sönümleyiciler çeşitli aralıktaki deprem frekanslarına karşı yapıyı koruyabilir [37-39].

Risk ve maliyet analizleri, uygulama öncesi değerlendirilen önemli bir tasarım adımıdır. Yapım öncesi literatür taramaları 20 yıllık periyottan 100 yıla çıkarılmıştır [40]. Proje ve yapım öncesi analizlerin ardından uygulamaya geçilecektir. Fiziki uygulamadaki operasyon ve bakım maliyetleri açık-deniz yapısı projelerinin %14-30'ını oluşturmaktadır [41]. Kullanılan programlar ve yazılan kodlar ile dinamik ve statik analizler yapılarak yapı ömrü hakkında öngörülebilir senaryolar ortaya çıkar. Kullanıcı tercihlili maksimum yüklemeler ile hata payı minimize edilir. Simülasyon ortamında platform yaşlandırılıp bakım ve onarım aşamaları tahmin edilerek maliyet öngörülebilir hale gelir. [42].

2.1. Amaç

Tez çalışması kapsamında, açık-deniz kafes sistemlerinin faydalı ömürleri boyunca hasar almaları durumunda davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda dört ayaklı hasar almamış model ile dört ayaklı hasar almış modelin yapısal davranışları karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte aynı kesit ve malzeme özelliklerine sahip üç ayaklı model de analiz edilerek, bir ayağı hasarlı dört ayaklı modelle yapısal özellikleri karşılaştırılmıştır.

Özellikle kafes tipi platformlarda en çok tercih edilen ve gelecekte de edilmesi muhtemel olan üç ve dört ayaklı tipleri incelenmiştir. Geçmişte yaşanan çarpışma verileri dikkate alarak, olası kaza sonrası yapının hizmet vermeye devam etmesi incelenmiştir. Ayrıca deplasman değerleri ile gerilme miktarları sorgulanmış ve yapının doğal ortamından kaynaklı rüzgar ve dalga yükleri gibi dış etmenler de dikkate alarak incelemesi tamamlanmıştır. Kafes sistemler tasarlanırken literatür taramalarında bahsedilen bağlantı noktaları ve tipleri, ara elemanlar, malzeme özellikleri gibi birçok etmen dikkate alınmıştır.

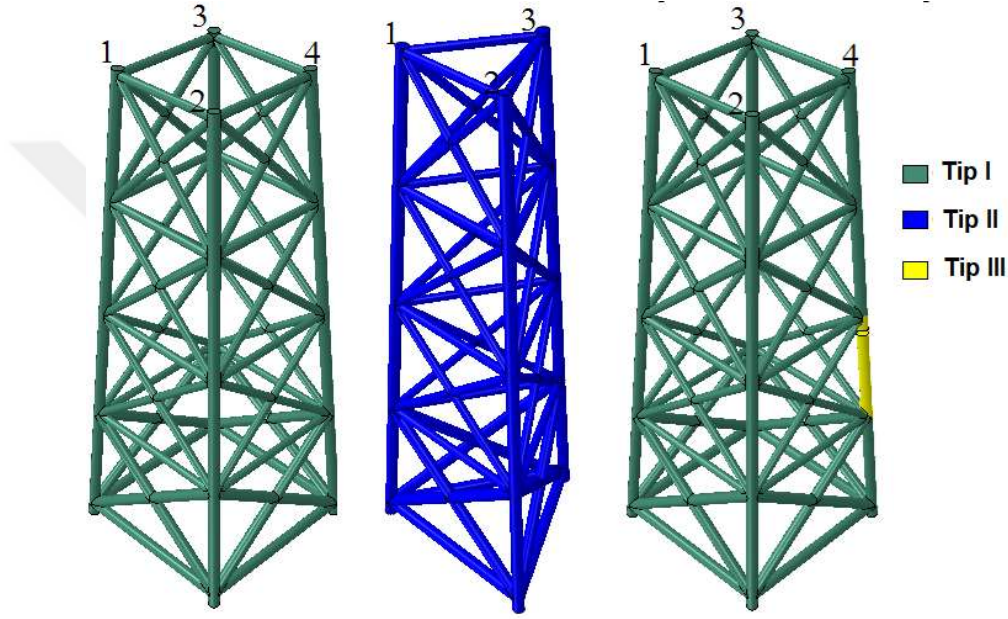
Tez çalışmasında kafes sistemlerin farklı tip tasarımları dikkate alınmış ve günümüzde çok tercih edilen tipleri olan üç ve dört ayaklı platformlar Abaqus programında tasarlanmıştır. Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi (CEL) ile çift yönlü akışkan-yapı etkileşim ortamları programın yapı modeli için ABAQUS/Explicit arayüzünde tasarlanmıştır. Üç ve dört ayaklı modeller rüzgar ve dalga kuvvetleri etkisi altında bırakılmış, dört ayaklı platformun hasar sonrası ayakta kalabilmesi gözlemlenmiştir. Hasar alan dört ayaklı yapı, üç ayaklı olarak hizmet vermeye devam etmiş ve bu yapı ile ilk hali üç ayaklı olarak tasarlanan platform karşılaştırılmıştır. Platformların deformasyonları, frekansları, gerilme dağılımları ve yapılarda oluşan deplasmanlar ABAQUS/Cae Dinamik Açık Arayüz (Dynamic/Explicit) kısmında incelenmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

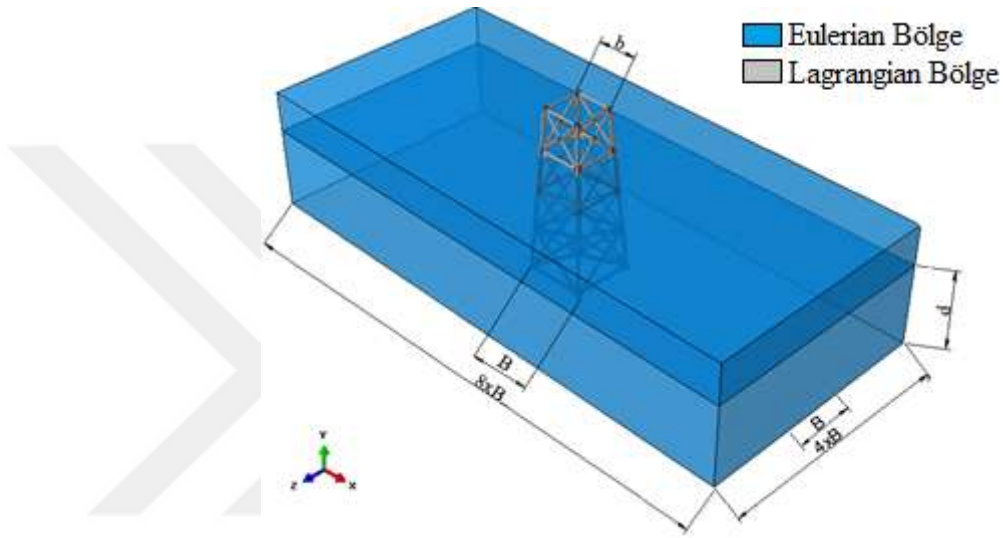
Bu çalışmada iki adet dört ayaklı ve bir adet üç ayaklı olmak üzere toplam üç farklı kafes sistem tipi açık deniz yapısı modeli analiz edilmiştir. Modeller ana taşıyıcı ayak ve tali taşıyıcı yatay ve çapraz elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Kafes platform tipleri

Çalışmada kullanılan platform tipleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. İlk iki model hasarsız, son model ise hasarlı tasarlanmıştır. Tip I hasarsız dört ayaklı, Tip II hasarsız üç ayaklı son model olan Tip III ise hasarlı dört ayaklı olarak modellenmiştir. Tip III'te hasar alan gölge sarı renk ile gösterilmiştir. Tasarlanan modele göre ayak adetleri numaralandırılmış Tip III'te ayağın biri hasarlı olduğundan sonuçlar kısmında ayaklar ayrı ayrı incelenmiştir. bu nedenle Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi her modelde ayaklara 1, 2, 3, 4 olacak şekilde ayak numaraları verilmiştir.

Lagrangian tekniği kullanılarak modellenen üç-dört ayaklı platformlar ve Eulerian tekniği kullanılarak modellenen deniz ortamı Şekil 3.2.'de görülmektedir. Bu platformlar 30 metre derinliğindeki deniz ortamına yerleştirilecektir. Platformların dalga ve rüzgar kuvvetleri etkisi altında dinamik analizleri yapılacaktır. Kullanılacak modellerden biri ve çevresini oluşturan deniz ortamı Şekil 3.2.'de görülmektedir. Yapısal model boyutları belirlendikten sonra yapı boyutlarına göre deniz ortam boyutları belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Model ve çevresinde oluşturulan deniz ortamı

Şekil 3.2.'de yapının taban açıklığı B , tavan açıklığı b , su derinliği ise d 'dir. Deniz ortamının uzunluğu yapı taban uzunluğunun sekiz katı ($8xB$), deniz ortamının genişliği ise yapı taban açıklığının dört katı olarak belirlenmiştir. Yapı geometrisine göre deniz ortamı boyutları belirlenerek akışkan yapı etkileşimi etkin bir şekilde sağlanmış olur.

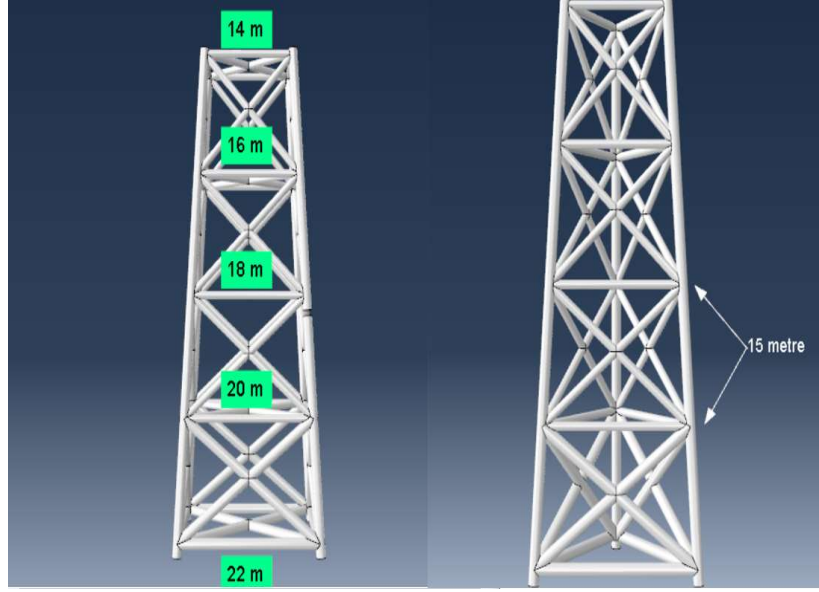
Tez çalışması kapsamında üç farklı yapı modellenerek çevresel yükler altında kıyaslamaları yapılmıştır. Çalışmada iki adet sağlam model, bir adet ise hasarlı model oluşturulmuştur. Model I'in bir ayağında süreksizlik oluşturularak hasar verilmiş ve Model III oluşturulmuştur. Model II ise üç ana taşıyıcı ayaktan oluşan

sağlam durumdaki yapıdır. Modellenen yapılara ait tanımlamalar Tablo 3.1.’de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Platform Tanımlamaları

Model	Model I	Model II	Model III
Durum	Sağlam	Sağlam	Hasarlı
Tip	Dört ayaklı	Üç ayaklı	Dört ayaklı bir ayak kesik

Çalışmada kullanılan kafes sistemlerin 30 metrelik kısmı deniz ortamı içerisinde, diğer yarısı ise rüzgar etkisini incelemek üzere suyun üzerinde yer almaktadır. Şekil 3.3.’ de görüldüğü gibi toplam yükseklik 60 metre olup, kat yükseklikleri eşit ve 15’er metredir. Zeminden başlamak üzere yanal mesafeler sırasıyla 22 m, 20 m, 18 m, 16 m ve 14 metredir. Platform katları arasındaki açıya Gücüyen ve ark., önceki yaptığı çalışmalar ışığında (85-88 arası) 86,18’’ olarak karar verilmiştir [22]. Yapılarda silindirik elemanlardan oluşan ayak, diagonal ve yatay elemanlar kullanılmıştır. Ayaklarda 1,2 m. çapında ve 0,012 m. et kalınlığında elemanlar kullanılırken diğer eleman boyutları aynı olup; çapları 1 m. ve et kalınlıkları 0,01 m.’dir. Platformların tümünde üst yapı kütlesi $1,5 \times 10^5$ kg.’dır. Dört ayaklı modellerde bu kütle son katta dört köşeye eşit dağıtılırken, üç ayaklı modelde üç noktaya eşit dağıtılmıştır.



Şekil 3.3. Kafes sistem yükseklik ve açıklıkları

3.2. Yöntem

Açık deniz yapıları bulundukları ortam nedeniyle zorlu koşullar altında hizmet vermektedirler. Bu koşullar faydalı ömürleri boyunca hasar almalarını kolaylaştırmaktadır. Yüksek maliyet ve ulaşımındaki zorluklar nedeniyle faydalı ömürleri boyunca oluşabilecek olumsuz koşullar tasarım aşamasında detaylı çalışılmalıdır. Bu amaçla sayısal, deneysel ve analitik modelleme bu tip yapılarının tasarımında kullanılmaktadır. Bu üç modelleme tipinden; günümüzde gelişen bilgisayar teknolojileriyle beraber sayısal modelleme sıklıkla kullanılmaktadır. Sonlu Elemanlar, Sonlu Farklar ve Sonlu Hacimler yöntemleri gibi yöntemler sayısal modelleme çalışmalarında uygulanmaktadır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) karmaşık mühendislik problemlerini çözmekte kullanılan en güçlü araçlardan biridir. Sonlu Elemanlar Yöntemi; bir yapının veya sistemin matematiksel modellerini kullanarak davranışını anlamaya çalışır. Özellikle mühendislik ve fizik alanlarında kullanılan bu teknik, çeşitli yükleme koşulları ve farklı malzemeler içeren yapıların nasıl tepki vereceğini analiz etmek için çokça kullanılır.

Karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi bir Sayısal Analiz tekniğidir. 1930’larda ortaya atılan bazı problemlerde yönteme ihtiyaç duyulsa dahi ilk olarak 1940’lı yılların başında mühendislik alanında karmaşık yapısal analizler yapmak amacıyla kullanılmaya başlanmıştır.

Sonlu Elemanlar Yönteminin temelleri Amerikalı mühendis ve matematikçi Rcihard Courant tarafından 1943 yılında atılmıştır. Courant, sayısal analizdeki bazı ilkeleri kullanarak, sürekli bir düzlem alanının davranışını incelemek için matematiksel bir model geliştirmiştir.

1950’li yıllara geldiğimizde ise Sonlu Elemanlar Yönteminin pratik uygulamaları üzerine kullanımı hız kazanmıştır. Bu dönemde çok sayıda mühendis ve araştırmacı, yöntem üzerine yoğunlaşarak çeşitli mühendislik problemlerini çözmek için kullanmaya başlamışlardır. Bilgisayar teklonojisinin 1960’lı yıllarda gelişmesiyle birlikte Sonlu Elemanlar Yöntemi daha yaygın bir hale gelmiştir. Bilgisayar tabanlı ilk Sonlu Elemanlar Yöntemi yazılımları bu yıllarda geliştirilmiştir.

1970 ve 1980’lerde daha standart bir mühendislik analiz aracına dönüşen bu yöntem, inşaat mühendisliği, otomotiv mühendisliği ve havacılık mühendisliği gibi alanlarda oldukça popüler hale gelmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu dönemde, daha karmaşık problemleri çözmek için geliştirilen farklı teknik ve yöntemlerle birleştirilerek daha güçlü esnek bir yöntem haline gelmiştir.

Günümüzde Sonlu Elemanlar Yöntemi, yapısal analiz, termal analiz, elektromanyetik alanlar ve akışkanlar dinamiği gibi birçok farklı alanda kullanılarak oldukça yaygın hale gelmiştir. Bu yöntem, mühendislik tasarım süreçlerini olgunlaştırıp geliştirmeye, daha güvenli ve dayanıklı yapılar tasarlamaya önemli katkılarda bulunmaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemi tarihçesi boyunca sürekli evrim geçirmiş, mühendislik alanında vazgeçilmez bir çözüm yöntemi haline gelmiştir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi çok çeşitli mühendislik problemlerinin çözüm yöntemi olarak kullanılmaktadır. Örneğin bir köprü tasarımında bu yöntem kullanıldığında, tasarlanan köprünün farklı düşey ve yatay yükler altında nasıl deforme olacağını görebilmek mümkündür. Sonlu Elemanlar Yöntemi, tasarımcıların hangi değişiklikleri yaparak köprüyü daha dayanıklı ve güvenli hale getirebileceklerine olanak sağlar. Ayrıca Sonlu Elemanlar Yöntemi, çarpışma testleri sırasında, çarpışma anında araçların nasıl davranacağını tahmin ederek otomotiv endüstrisinde kullanılır. Böylece araçlar ve tüketiciler için daha güvenli bir üretim mümkün hale gelir.

Bir başka örnek ise inşaat sektöründeki büyük projelerde Sonlu Elemanlar Yönteminin uygulama biçimidir. Gökdelen gibi yüksek yapılar; deprem, rüzgar gibi bir kısım doğa olaylarına karşı dayanıklı olmak zorundadır. Bu tür yapıların depreme ve doğaya karşı dayanıklılığını artırmak için Sonlu Elemanlar Yöntemi kritik tasarım bilgileri sunar. Bu bilgiler sayesinde, mühendisler yapılacak olan inşaatın her bir bölümünü optimize edip oluşabilecek sorunları önceden tespit edebilir.

Havacılık ve uzay mühendisliği de Sonlu Elemanlar Yönteminin yaygın olarak kullanıldığı bir başka alandır. Uzay araçlarının ve uçakların malzeme dayanıklılığını incelemek, aerodinamik performansını değerlendirmek ve yapısal bütünlüğünü sağlamak için yöntem etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Makine mühendisliğinde ise Sonlu Elemanlar Yöntemi, parçaların tasarımı ve analizlerinde kullanılır. Özellikle makine parçalarının ısı analizleri ve dayanıklılık testleri için bu yöntem sıklıkla tercih edilir.

Bunların yanı sıra, enerji sektöründeki rüzgar panellerinin ve güneş enerji santrallerindeki yapıların optimize edilmesinde ve çevre koşullarının incelemesinde önemli rol oynar. Ayrıca Sonlu Elemanlar Yöntemi, biomedikal ve biomekanik alanlarda insan vücudunu analiz ederek yapay organ ve tıbbi cihazların

geliştirilmesinde kullanılır. Yöntemin sağladığı avantajlar, güvenliği artırmak ve yapım maliyetlerini düşürmek için büyük önem taşır.

Sonuç olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi mühendislik alanında karşımıza çıkan tüm sorunlar için vazgeçilmez bir araçtır. İnşaat, otomotiv, havacılık ve uzay sektörü, enerji sektörü ve biyomedikal gibi birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu nedenle, Sonlu Elemanlar Yönteminin daha fazla kullanılması, mühendislik dünyasındaki karmaşık problemlerin çözümlerine daha fazla yardımcı olacaktır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi inşaat mühendisliğinde daha çok taşıyıcı sistem analizlerinde kullanılır. Bu analizler genellikle elastik davranış gösteren yapısal bileşenleri inceler. Sonlu Elemanlar Yöntemi, yapısal bileşenleri incelemek için bazı denklemlerden faydalanır.

Yapı sistemlerinde kullanılan genel denge denklemi; sistemin küresel rijitlik matrisi (K), bilinmeyen yer değiştirme vektörü (u), dış yük vektörü (f) aşağıda Denklem (3.1)'de gösterilmiştir.

$$Ku=f \quad (3.1)$$

Bir boyutlu Euler-Bernoulli Kiriş elemanında kullanılan Eleman Rijitlik Matrisindeki elastisite modülü (E), atalet momenti (I), eleman uzunluğu (L) Denklem (3.2) ve yer değiştirme vektöründeki düğüm noktası yer değiştirmesi (u_i), dönme açısı (θ_i) Denklem (3.3)'te gösterilmiştir.

$$K^e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$u^e = [u_1 \ \theta_1 \ u_2 \ \theta_2]^T \quad (3.3)$$

İki boyutlu çubuk elemanı rijitlik matrisinde kesit alanı (A) Denklem (3.4) gösterilmiştir.

$$K^e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

İki boyutlu düzlem gerilme-şekil değiştirme denkleminde Malzeme matrisi (D), gerilme (σ), şekil değiştirme(ϵ) ve poisson oranı (ν) şeklinde Denklem (3.5-3.6)'da gösterilmiştir.

$$\sigma = D\epsilon \quad (3.5)$$

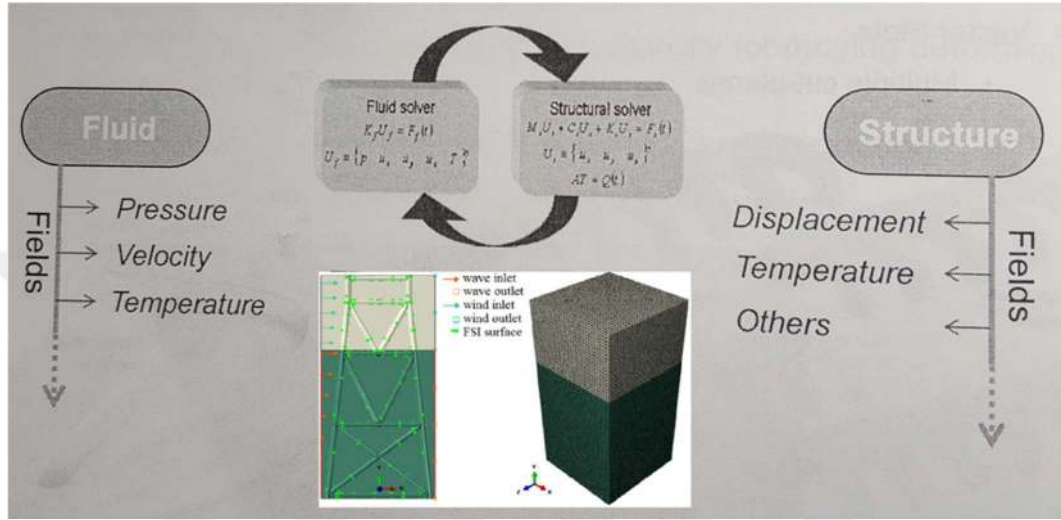
$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Yukarıda örnekleri verilen İnşaat mühendisliğinde kullanılan Sonlu Elemanlar Yönteminin denklemleri aşağıda verilen tabloyla özetlenebilir.

Tablo 3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin problem türleri ile sınıflandırılması

Problem Türü	Analiz Tipi
Kiriş ve çerçeve sistemleri	1D, 2D elastik
Çubuk kafes sistemleri	2D, 3D eksenel
Betonarme döşeme ve temel	2D elastisite
Zemin gerilme analizleri	statik ve stabilite
Dinamik analizler	Modal analiz

Bu çalışmada Sonlu Elemanlar Yöntemi destekli ABAQUS programı kullanılmıştır. Bu program akışkan yapı etkileşim modellemesine imkan sağlamaktadır. Bu sayede çalışmada kullanılacak kafes sistemler ve onları çevreleyen deniz ortamının etkileşimi gerçekleştirilecektir. Akışkan yapı etkileşim analizi sırasında programın izlediği yol Şekil 3.4.'te görülmektedir.



Şekil 3.4. Akışkan yapı etkileşiminin şematik gösterimi

Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi akışkan çözücüsü ve yapı çözücüsü analiz süresince etkileşimli çalışmaktadır. Analizlerde akışkan çözücüsünden yapıya kuvvet aktarılır. Bu kuvvet yapıda deplasmana yol açar. Oluşan deplasmanlar akış çözücüsüne aktarılır. Akışkan ve yapı çözücüsü analiz süresince çift yönlü aktarımlı çalışmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada da kullanılan bu çözüme çift yönlü akışkan yapı etkileşimi analizleri denmektedir. Sadece akışkandan yapıya kuvvet aktarımının modellendiği çözümler ise tek yönlü akışkan yapı etkileşimi olarak isimlendirilmektedir.

Dalga hareketi analiz boyunca yapı üzerinde kararsız bir etki oluşturur. Serbest su yüzeyinin analiz süresince alçalıp yükselmesi bu etkide rol oynar. Bu nedenle dalga hareketinin modellendiği çalışmalarda serbest su yüzeyi hareketinin modellenmesi yapısal davranış üzerinde etkilidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi destekli akışkan yapı etkileşimi modellemesinde serbest su yüzeyi hareketi Eşleştirilmiş Euler

Lagrangian Yöntemi (CEL) ile gerçekleştirilebilir. Abaqus Sonlu Elemanlar Analiz programında yapı modeli Lagrangian elemanlarla oluşturulurken, akışkan modeli Eulerian elemanlarla oluşturulur. Bu çalışmada deniz ortamı Eulerian elemanlarla, yapı ortamı Lagrangian elemanlarla modellenerek Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi gerçekleştirilmiştir.

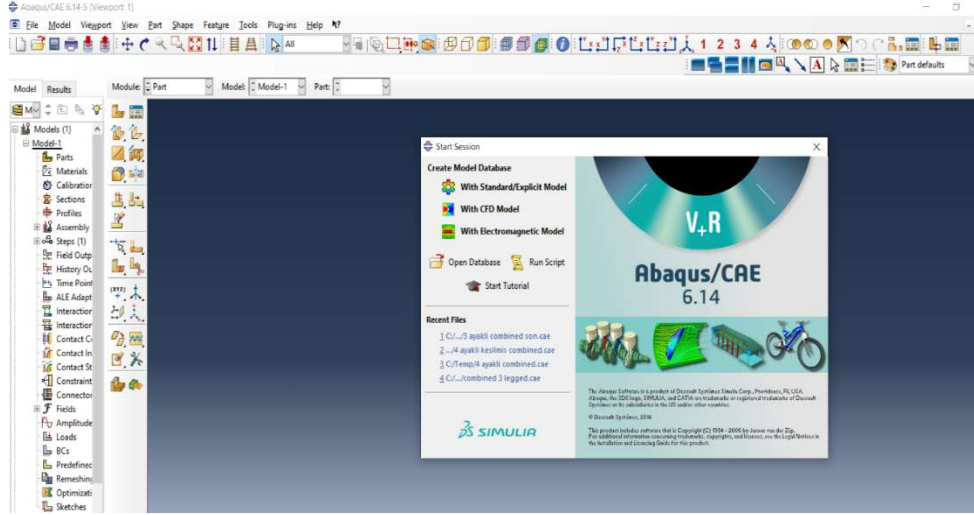
Deniz ortamının modellenmesinde Lineer Dalga Teorisine ait hız profilleri Abaqus programına aktarılmıştır. Çalışmada kullanılan modellerin hava ile temas eden kısımları rüzgar kuvveti etkisi altındadır. Bu kuvvetleri referans rüzgar hızına göre hesaplanarak düğüm noktalarından yapıya aktarılmıştır.

Sonlu elemanlar çözümlerinde kullanılan nokta ve eleman sayılarının, sonuçları ve çözüm süresini etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada öncelikle en uygun nokta ve eleman sayıları belirlenmiştir. Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi yaklaşımına uygun olan elemanlar kullanılmıştır.

Çözüme en uygun nokta ve eleman sayılarının belirlenmesi için hassaslık analizleri yapılmıştır. Hassaslık analizleri modal davranış üzerinden gerçekleştirilmiştir. Nümerik modelin tahkiki dalga su yüzü profilleri üzerinden yapılmıştır.

3.2.1. Sayısal Modelleme

Şekil 3.5.'te görüldüğü gibi ABAQUS; katı, sıvı ve elektromanyetik ortamlarda, malzemeleri tanımlamaya, geometrilerini oluşturmaya izin verir. Oluşturulan senaryolar malzemeye istediğimiz yüklemeyi katı sıvı ortamlarında etki ettirmemize izin verir. Ayrıca çarpışma testleri ve dinamik analizler yapılabilir, sonuçlar incelenir. Hayata geçecek projenin uygulama detaylarını simülasyon ortamında verdiğimiz detay çeşitliliğine göre incelememize izin verir.



Şekil 3.5. ABAQUS açılış ekranı

Tez çalışması kapsamında modellenen yapılar çevresel kuvvetler etkisi altındadırlar. Çevresel kuvvetleri rüzgar ve dalga kuvvetleri oluşturmaktadır. Yapının deniz ortamı içinde kalan kısımları dalga kuvveti etkisindeyken, yapı yüksekliğinin artmasıyla beraber hava ile temas eden kısımları rüzgar kuvveti etkisi altına girmektedir. Yapıyı çevreleyen suyun ve havanın birer akışkan olması nedeniyle modellemede akışkan-yapı etkileşimi göz önünde bulundurulmuştur. Akışkan yapı etkileşimleri tek ve çift yönlü olarak tasarlanabilmektedir. Tek yönlü analizde akışkandan yapıya kuvvet aktarılır. Yapıda oluşan deplasmanlar akış yapısını etkilemez; yapıdan akışkana geri aktarım yoktur. Çift yönlü analizde ise akışkandan yapıya kuvvet aktarılırken, yapıdan da akışkana deformasyon aktarımı sağlanır. Böylece yapıda oluşan deformasyonların akış yapısında oluşturacağı değişimler göz önünde bulundurulmuş olur. Akışkandan yapıya kuvvet, yapıdan da akışkana deformasyon aktarımı temas yüzeyleri üzerinden sağlanır. Tek yönlü akışkan-yapı etkileşim modellemesinde sadece yapı modellenirken, akışkan modellenmeyerek sadece akış kökenli kuvvetler yapıya aktarılır. Çift yönlü akışkan-yapı modellemesinde ise akışkan ve yapı modellenerek temas yüzeyleri üzerinden etkileşim sağlanır.

Bu tip problemlerde akışkanın yapı üzerinde etki oluşturduğu gibi yapının da akışkan üzerinde etkileri olmaktadır. İki farklı ortamın bir arada çözülmesi

gerekir. Bu çalışmada geçmiş sayfalarada açıklanan çift yönlü akışkan yapı etkileşim probleminde kullanılan Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi (CEL) kullanılmıştır. Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yönteminde Abaqus Sonlu Elemanlar Analiz programında tek bir ara yüzde akışkan ve yapı modeli oluşturulabilmektedir. Bu kapsamda ABAQUS/Cae, ara yüzü kullanılarak akışkan ve yapı modelleri oluşturulmuştur. akışkan modelini ‘‘hesaplamalı akışkanlar dinamiği’’ () zcsnde oluşturulurken yapı modeli ‘‘açık arayüz’’ (Explicit) zcsnde oluşturulmuştur. Akışkan ve yapısal cisim birbirleri üzerinde temas sonrası çevresel yüzeyler başta olmak üzere etkileşime girer.

Tez çalışmasında ilk olarak akışkan ve yapının geometrileri tasarlanıp modelleri oluşturulmuş, sonrasında ise yüklemeler yapıp çift yönlü akışkan-yapı etkileşimi ile ilgili analizler yapılmıştır. İkinci aşamada da sonlu elemanlar çözümlemesinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu aşamalarda tasarlanan sistem verilerle birlikte incelenmiş ve çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Amacımıza yönelik olarak Sonlu Elemanlar Metodunu uygulayan, gerçekçi analizlere imza atabilen, güvenilir, akışkan-yapı etkileşim problemlerinde çokça kullanılan ABAQUS/Cae programından yararlanılmıştır. Malzeme eşitliliği ve sınır değerlerini tanımlama özgürlükleri, yapılabilen non-lineer ve dinamik analizleri ile program bizim için tercih sebebi olmuştur. Gücüyen [43] Abaqus programını aşağıdaki şekilde anlatmıştır.

Programda kullanılan arayüz ABAQUS/Cae’dir. Programın üç ana yazılımı vardır, bunlar; Standart (ABAQUS/Standard), Açık Arayüz (ABAQUS/Explicit), ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (ABAQUS/CFD) ‘dir.

ABAQUS/Cae tüm temel tasarımcı ihtiyaçları gözetilerek programlanmıştır. Bu arayüzü kullanarak proje geometrileri tasarlandığı gibi, piyasada bulunan farklı programlardan da çağrılarak (import) dizayn etmeye müsaade eder. Bütün modelleme, koşulları belirleme, çözüm aşamaları ve sonuçları inceleme işlemleri

yapılabilmektedir. ABAQUS/Cae'de kolaylıkla çözüm sonlandırılabilir ve tartışılabilir. ABAQUS/Cae en ufak birimden bütüne ayrı ayrı veya beraber kontrol edilebilen bir sistemdir. Her birim şematik biçimde alt komutlarla birbirine bağlıdır. Sistem çözüldükten sonra genel işleyişi kavramak oldukça kolaydır.

ABAQUS/Standard statik, dinamik, akustik ve bunların birbiriyle bağlı çift-yönlü etkileşimleri içeren çözümlemeler yapmak üzere tasarlanmış genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımıdır. ABAQUS/Standard geniş malzeme yelpazesine sahip olup, temas modellemede oldukça başarılı ve güvenilir bir kapalı arayüze sahip (implicit) sonlu elemanlar programıdır.

ABAQUS'ün açık arayüzü (Explicit) ise zamana bağlı dinamik problemleri modeller ve çözümleme yapar. Çarpışma ve düşürme benzetimleri için non-lineer problemleri çözme kabiliyeti vardır. Tam ve yarı otomatik temaslı modeller tasarlanabilir. Malzeme kütüphanesi oldukça geniştir. Lastik, beton, toprak, demir, kompozit gibi birçok malzeme modeli bulunmaktadır.

ABAQUS/CFD; ABAQUS/Cae ile beraber çalışan hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsüdür. Programın ön ve son özellikleri ABAQUS/Cae tarafından desteklenmektedir. Programın açık arayüz (Explicit) kısmında olduğu gibi CFD kısmında da non-lineer problemlerin çözümü desteklenmektedir, ayrıca akışkan-yapı etkileşim problemlerini de çözümlemek mümkündür.

Programdaki diğer kısımlar ise sırasıyla; bölüm(Part), özellik (Property), birleştirme (Assembly), adım (Step), etkileşim (Interaction), yükleme (Load), ağ (Mesh), onay (Verify), iş (Job), görsel (Visualization) ve rapor (Report).

Bölüm (Part) kısmı, geometrik parçalarının oluşturulduğu bölümdür. Simetrik eksenli iki ya da üç boyutlu elemanlar tasarlanabilir. Tasarlanan geometrik parçalar deforme olabilen, ayrık rijit, analitik rijit ve Eulerian tipleri arasından seçilebilir. Katı-sıvı etkileşimli modellerin çözümü daha kısa sürede yapılması istediğinde

Eulerian model tercih edilir örneğin bir bardağa su doldurulması gibi. Sadece katı içeren kabuk, çizgisel ya da noktasal eleman part kısmında normal programlardaki gibi iki boyutlu olarak çizilir daha sonra elde edilen geometri üçüncü boyuta kaldırılır. Üç boyutlu geometride uzatma, döndürme, eğme gibi işlemler yapılabilir.

Özellik (Property) bölümü, malzeme özelliklerinin tanımlandığı bölümdür. Kesite uygulanacak malzeme özellikleri girilerek tanımlanır ve istenilen geometriye eşleştirilerek atanır. İstenirse farklı malzeme tanımları kullanılarak da kompozit içerikli modeller oluşturulabilir, bunun için ya part kısmında geometriyi parçalara ayırmalı ya da birleştir (Assembly) bölümünde birleştirilmelidir.

Birleştir (Assembly) kısmı parçaların birleştirildiği bölümdür. Parçalar birbirlerine konumlandırılır, açıları değiştirilebilir veya çoğaltılabilirler. Bu birleşimlerle tasarlaması zor geometriler daha kolay meydana getirilebilirler. Ayrıca istenirse birleşim yerleri belirgin yüzeyler olmak kaydıyla yeni malzeme atamaları yapılabilir. Bu da sonraki farklı fazdaki etkileşim modellerinin analiz sürelerini önemli ölçüde kısaltmaya yardımcı olur.

Adım (Step) bölümünde; analiz tipi, adımları ve çıktıları belirlenir. Analiz sırasında kullanılacak çözücü ve çözüm adımlarına karar verilir. Birbiriyle uyumlu ve bir önceki adımı takip eden analizler olursa birden çok analiz çözücüsü de programa girilebilir. Örneğin statik analizden sonra ısı transferi analizi tanımlanamaz. ABAQUS/Standard ile kapalı (implicit) analiz yapılamaz. Step kısmında belirlenen analizin belirli bir süresi ve iterasyon içeren periyot adımları vardır. Bunlar yeterli çözüme ulaşmazlar ise program hata verip analizi sonlandırılabilir. Çıkan sonuçtaki gereksinime göre çıktılar belirlenir. Kullanılan eleman sayısı, Adım (Step) kısmında belirlenen çözücü ve tipleri, ayrıca modellenen sistem tüm analiz sonucunu ve tipini etkilemektedir.

Farklı parçalar arasındaki temasın modellenmesi için Etkileşim (Interaction) kısmına geçilir. Yüzeyler arası sürtünme ve sönüm gibi özellikler efendi-köle

yöntemiyle belirlenip temas eden parçaların özellikleri Etkileşim (Interaction) kısmında tanımlanır. Eğer tüm geometriler temas halindeyse tek tek seçmeye gerek duymadan tüm model elemanları etkileşime dahil edilir. ABAQUS/Cae arayüzü akışkan-yapı etkileşimli bu tarz modellerin tasarımı için uygundur. Modellerin bir tanesi ABAQUS/Cae arayüzünde tanımlandıktan sonra birleştir (Assembly) kısmında aynı koordinatlara gelecek şekilde geometrilerin yerleri belirlenir aksi takdirde çözüm aşamasında program hata verir. Bir biriyle temas eden yüzeyler belirlenir ve Etkileşim kısmındaki etkileşim yöneticisi (Interaction Manager) tıklanarak, araç çubuğundan ‘Akışkan-yapı ortak simulasyon sınırı’ kısmında tanımlanan analiz tipiyle, modeller eşleştirilir. Böylelikle farklı bir sınır şartına gerek kalmadan akışkanın-yapı ile temas yüzeylerinin davranışları belirlenir.

Yükleme (Load) bölümü; yükleme miktarı-tipi, başlangıç ve sınır şartlarının tanımlandığı bölümdür. Adım (Step) bölümünde belirlediğimiz analiz adımlarında yüklemeler yapılmaktadır. Bunlar akışkan, elektrik, kütle aktarımı, mekanik ve ısı akustik yükleme tipleridir. Modele birden çok ve farklı yüklemeler yapılacaksa hepsine ayrı ayrı analiz adımları tanımlanarak tasarıya etkimesi sağlanır. Başlangıç sınır şartları da bu bölümde belirlenir.

Model geometrisi üzerine istenilen kadar noktanın (node) belirlenen aralıklarda atandığı bölüm ağ (Mesh) tir. Hücre köşeleri (Seed edges) araç çubuğunda; tasarlanan geometrinin durumuna göre bazı bölgelerdeki nokta sayısı artırılıp azaltılabilir. Noktaların birleşmesiyle kafesler (grid) meydana getirilir. Oluşturulan girdlere eleman ataması yapılmaktadır. Ataması yapılan eleman şekilleri kama (wedge), prizmatik ve kübiktir. Sonrasında program seçilen elemana ve analiz tipine göre eleman tiplerini belirler, kullanıcı ise probleme uygun olarak eleman tiplerinden birini seçer. Kullanıla nokta, eleman sayısı sonuçları değiştirebilir. Problem farklı nokta sayısı ile çözülmesi gerektiğinden, yakınsama kontrolü yapılarak modele uygun nokta sayısı belirlenir. Bir sonraki adıma geçmeden önce ağ sistemini oluşturmaya ilgili bir sorun yaşanmaması için hücrelerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Ağdaki hücreler kontrol edilerek hatalı noktalar ve hata oranları araç çubuğunda ağ onayı (Verify Mesh) ile gözlemlenebilir.

İş (Job) bölümünde çözümün yöntemi ve çözümü izleme yapılır. İş (Job) kısmındaki görüntüleme bölümü sayesinde problem çözümü adım adım izlenebilir. Programın verdiği hata ve uyarılar takip edilebilir. Çözülmesi diğer hatalara göre daha zor olan hatalar genellikle ağ (mesh) ve adım (step) hatalarıdır. Bu hatalardan kaçınmak için programın ön gördüğü kadar nokta aralıkları seçilmelidir. Adım (Step) hataları da adım aralıkları küçültülerek çözülebilir.

Görsel (Visualization) kısmında sonuçlar incelenir. Oluşan görseller farklı renk skalaları ve grafikleri ile bu çıktıları ait değerler kullanılarak incelenir. Araç çubuğu rapor (Report) kısmında ise elde edilen çıktılar istenilen formatta kaydedilir.

3.2.2. Kafes Sistemlerin Modellenmesi

Kafes sistemler inşaat mühendisliğinde taşıyıcı sistem olarak kullanılan yapısal sistemlerdir. Kafes sistemler sadece çekme ve basınç kuvvetlerini taşıyan elemanlardan oluşur. Köprüler, çatılar, platformlar, iskele sistemleri ve çelik yapılar gibi birçok uygulamada kullanılırlar.

Tablo 3.3. Kafes Sistemlerin uygulama alanları

Uygulama Alanı	Kullanım Şekli
Deniz yapıları	Rüzgar Türbinleri
Çelik çatı sistemleri	Endüstriyel yapılar, spor salonları
Köprüler	Demiryolu, karayolu
Platformlar	Konser alanları
Mobil Kuleler	Vinç, anten taşıyıcılar
İskeleler	Geçici taşıyıcı sistemler

Kafes sistemlerindeki elemanlar düğüm noktalarından birbirlerine mafsallıdır. Çubuk adı verilen her bir eleman kendi doğrultusu boyunca aksel kuvvet taşır. Hesaplamalar yapılırken burulma, eğilme ve kesme etkileri ihmal edilir. Yükler sadece düğüm noktalarına etki edecek şekilde kabul edilir.

Bir çubuk eleman yalnız başına incelediğinde iki düğüm noktasına sahiptir. Sadece eksenel çekme ve basınç kuvvetini taşır. Çubuğun taşıdığı kuvvet kesit alanına, elastisite modülüne, elemanın uzunluğuna, üzerine etkiyen kuvvete ve kuvvetin açısına göre değişkenlik gösterir.

Kafes sistem problemlerinde öncelikle düğüm noktaları belirlenerek aralarında kalan çubuklar eleman olarak tanımlanır. Her elemanın malzeme özellikleri tespit edilir. Sistemde sadece düğüm noktalarına etkiyen yükler belirlenir. Bu yükler sabit ya da rüzgar yükü gibi hareketli ve değişken olabilir. Daha sonra kafes sistemde hangi mesnetler olduğu incelenir. Bunlar her iki yönde yer değiştirmesi olmayan sabit mesnet, tek yön serbestisi olan makaralı mesnet veya yer değiştirme sabiti olmayan serbest mesnetler olabilir. Böylece sınır şartları oluşturulmuştur.

Belirlenen tüm veriler ışığında her bir çubuğun Rijitlik Matrisi oluşturulur. Rijitlik Matrisi oluşturulan tüm elemanlar birleştirilerek tüm yapı sisteminin Küresel Matrisi oluşturulur. Son olarak problem çözülerek çubuklardaki iç kuvvetler ile birlikte yer değiştirmeler de hesaplanır.

Bu tez çalışmasında iki farklı geometriye sahip üç farklı açık-deniz platformu modellenmiştir. İlk olarak zemine paralel kesiti üçgen geometriye sahip, üç ayaklı ve her katta dik hafif diyagonal bir açıyla daralarak yükselen bir platform inşa edilmiştir. Yapının her katında üç adet dikme, üç adet yatay ve altı adet diyagonal elemandan oluşmaktadır. Her katta 12 ve taraçada ilave üç elemanı ile toplam 51 silindirik parçadan oluşmaktadır. Dört ayaklı kafes sistem ise her katta 16 profil ve taraçadaki 4 adet ilavesiyle 68 silindirik profilden oluşmaktadır, aşağıdaki şekilde bir sütunu deforme olmuş, parçası eksik platform gösterilmektedir.

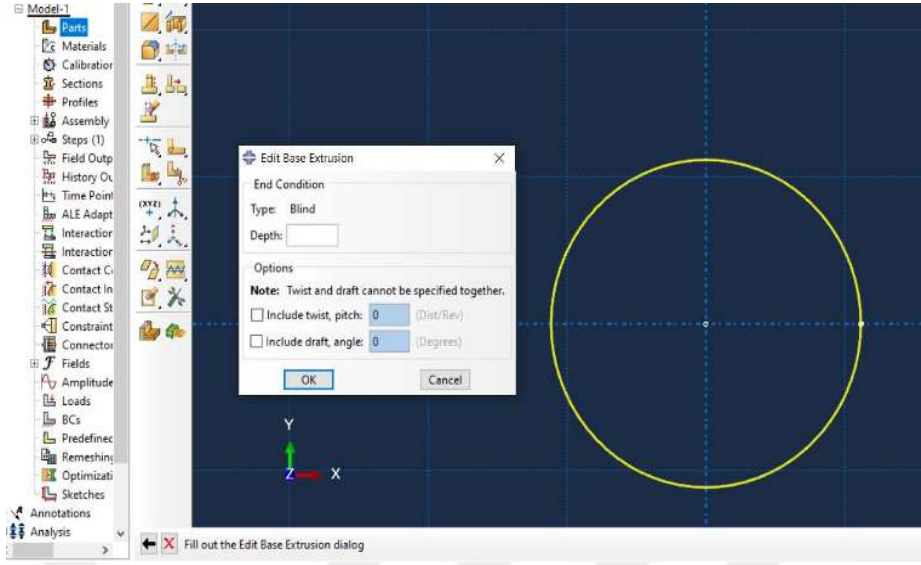
Dört ayaklı kafes sistemin su-hava kesit yüzeyinin 1 metre altından bir parça eksiltiştir ve gemi yanaşma-çarpışma sonrası deforme yapı bu şekilde tasvir edilmiştir.

Platform ana taşıyıcı ayaklar, diyagonal elemanlar ve yatay elemanlar olmak üzere üçe ayrılabilir. Ana taşıyıcı ayaklar en üst noktaya doğru önceki projelerden de örnek alınarak tasarlanan $86,18^\circ$ 'lik açıyla yükselmektedir [22]. Yatay ve diyagonal elemanlar ise uzunlukları kat yüksekliğine bağlı olarak değişse de çapları aynıdır ve her katta kendi içerisinde ölçüleri sabittir. Birleşim detaylarına gelecek olursak da; yatay elemanların kat gövde elemanlarına bağlanış biçimi T tipi olarak isimlendirilir. İki farklı ana taşıyıcı elemanın birbirine düşey elemanla bağlandığı noktalar ise Y tipi bağlantı olarak adlandırılır.

Nümerik analiz modelleme kısmında ABAQUS/Cae programının iki farklı ana çözücüsünü kullanılmıştır. Deniz ortamını simüle ederken alt ayaklar arası mesafe 22 metre olduğu için tüm ayakları kapsayacak şekilde ve iki kat yüksekliği (2h) içine alacak şekilde tabanda geçirimsiz yüzeyi olan (8Bx4B) bir hacim sistemi ABAQUS/Cae' nin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözücüsü ile modellenmiştir. kafes sistem platformun geometrisi ise Açık arayüz (ABAQUS/Explicit) çözücüsünde aşağıda anlatıldığı gibi tasarlanmıştır.

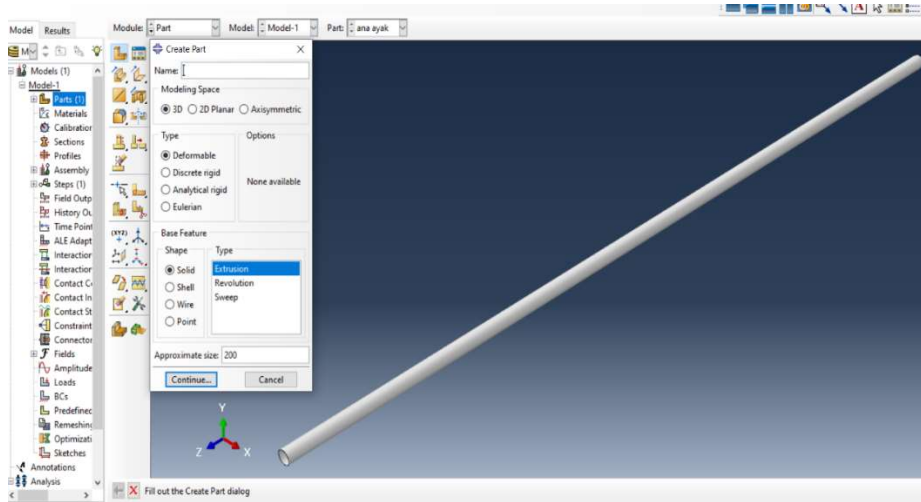
Bir önceki bölümde sonlu elemanlar metodu ile ABAQUS/Cae programının bölümleri tanıtılmış ve izlenecek adımlar tarif edilmişti. Bu kez adımların tasarımsal hayata geçirilmesi aşama aşama görülebilecektir.

İlk olarak boru profillerin geometrileri Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi oluşturulur. ABAQUS/Explicit seçildikten sonra sol üstteki menüden bölüm (Part) kısmına girilerek cisim oluşturulmadan önce tipi ve yapılış biçimine karar verilir. Katı cisim olduğu için "Solid" seçilir, dış kuvvet etkisi altına gireceği içinse deforme edilebilir (deformable) seçilidir. En kesit çizilerek derinlik verilerek geometriler elde edileceği için çıkarma (extrusion) seçilidir. Geometri belirlenirken sol üstteki menüden çember (circle) seçilip şeklin merkezi belirlenir ve çap değeri girilir. Sonrasında çıkarılacak ikinci çember aynı şekilde çizilir. Böylece boru merkezi belirlenerek et kalınlığı oluşturulur.



Şekil 3.6. Çift çember ile boru et kalınlığını oluşturma

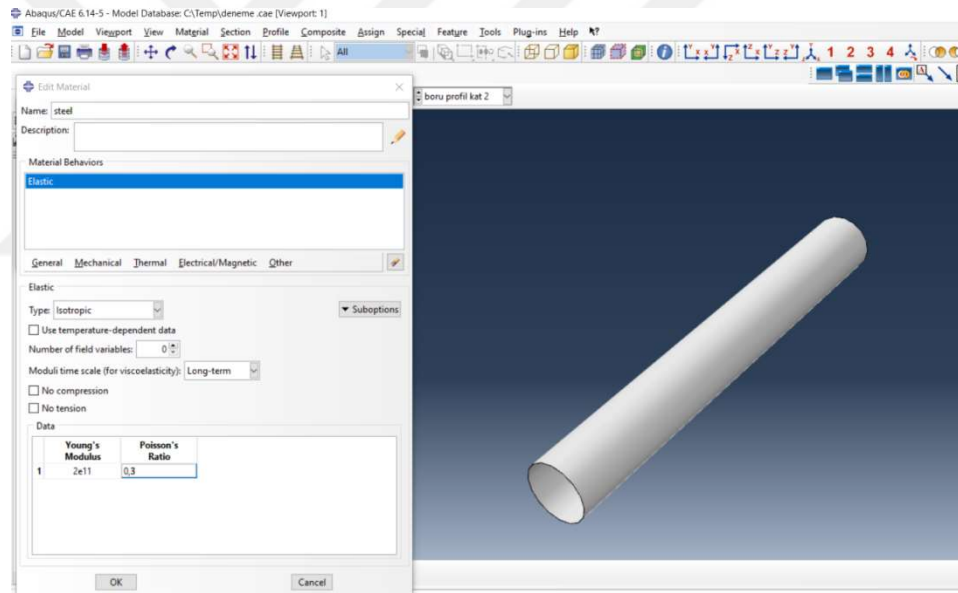
Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi oluşturulan geometride iki farklı çap olduğundan, çıkarma (extrude) yöntemiyle birbirinden çıkarma yapılarak ve de derinlik (depth) değeri girilerek borunun uzunluğu belirlenir. Bu işlemler tekrarlanarak boru parçaları teker teker çizilmiş olur.



Şekil 3.7. Tekrarlayan geometri çizimleriyle boru profilleri oluşturma

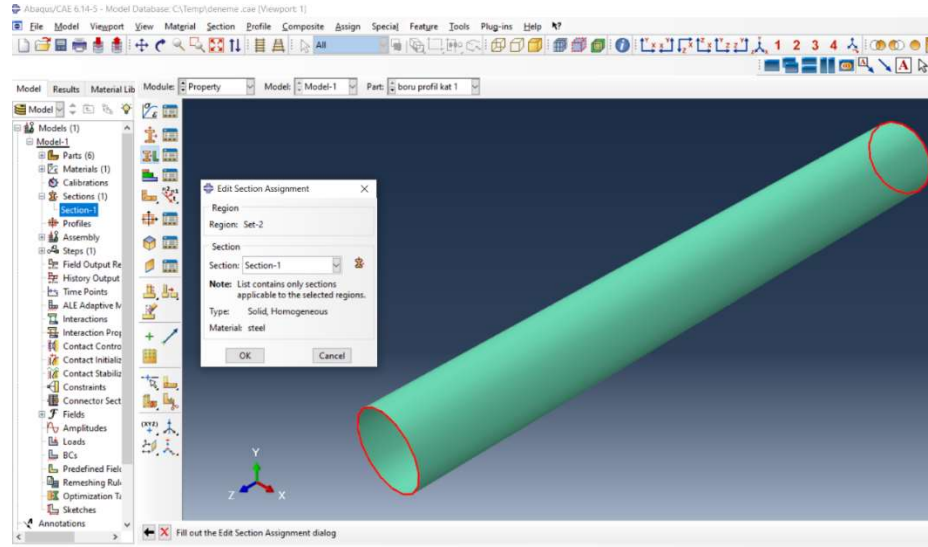
Sonraki aşamada çizilen parçalara özellik (Property) bölümünde malzeme ataması yapılacaktır. Platform boru profilleri çelik malzemeden imal edilecektir. Girilecek değerler sırasıyla elastisite modülü $E=2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, poisson oranı $\nu=0,3$ ve yoğunluğu $\rho_{\text{ç}}=7850 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Malzeme Yönetimi kısmından malzeme spesifik ismiyle oluşturulup kaydedilir. Kayıttan sonra kesit (Section) bölümünde gruplandırma yapıp atama komutu ile istenilen parçalara ataması yapılır. Ataması yapılan parçalar yeşil renge dönüşür.

İsim seçerken ingilizce karakterlere uygun olmayan kelimeler seçilmemelidir. 'Çelik' kelimesindeki 'ç' harfi zamanı geldiğinde çözücüde problem çıkarmaktadır.



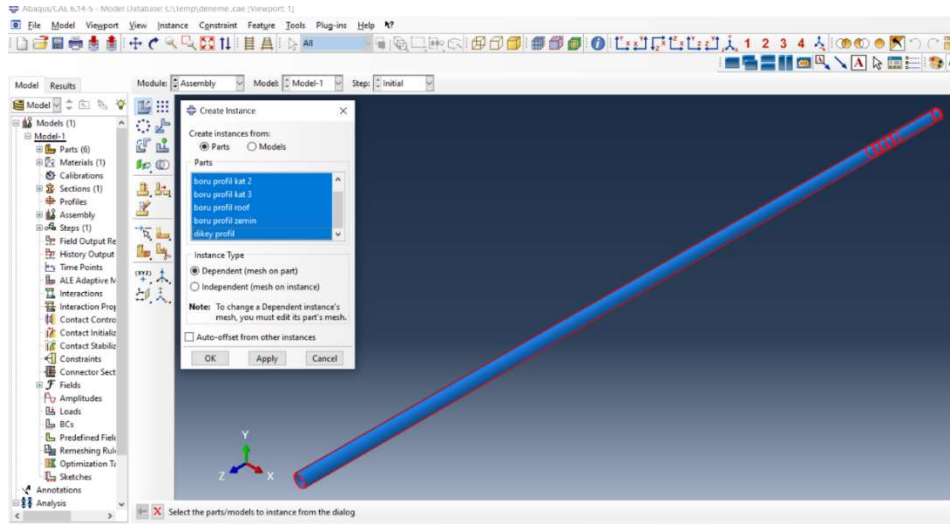
Şekil 3.8. Çelik malzemeyi tanımlama

Malzeme tanımlamaları ve atamalar Şekil 3.8. ve 3.9. görüldüğü gibi yapıldıktan sonra birleştir (Assembly) bölümünde bir araya getirilir.



Şekil 3.9. Malzeme ataması

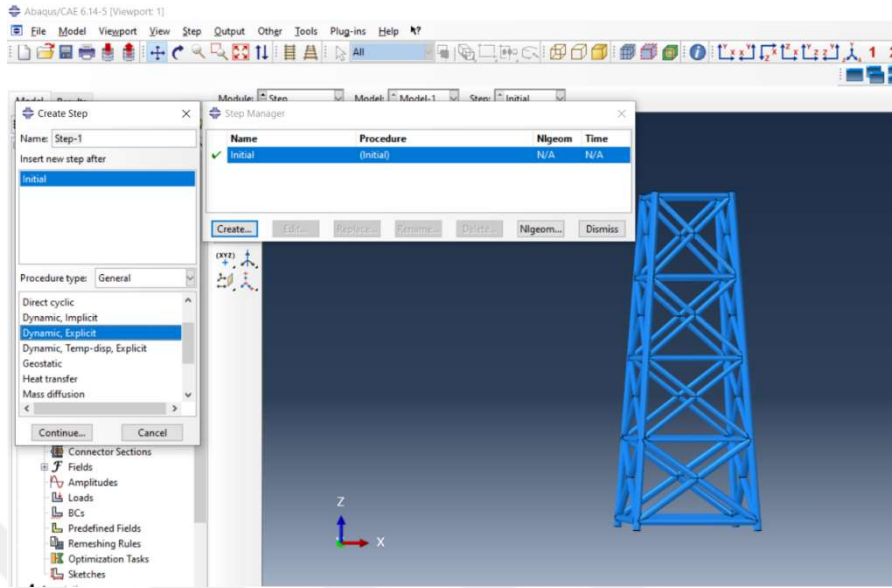
Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi birleştir (Assembly) bölümünde çağırılmak istenen parçalar tek tek tıklanarak ekrana getirilir. Gelen parçalar; açısıl döndürmeler, çoğaltmalar ve yer değiştirmeler kullanılarak istenen modelin geometrisi meydana getirilir.



Şekil 3.10. Geometrileri bir araya getirme

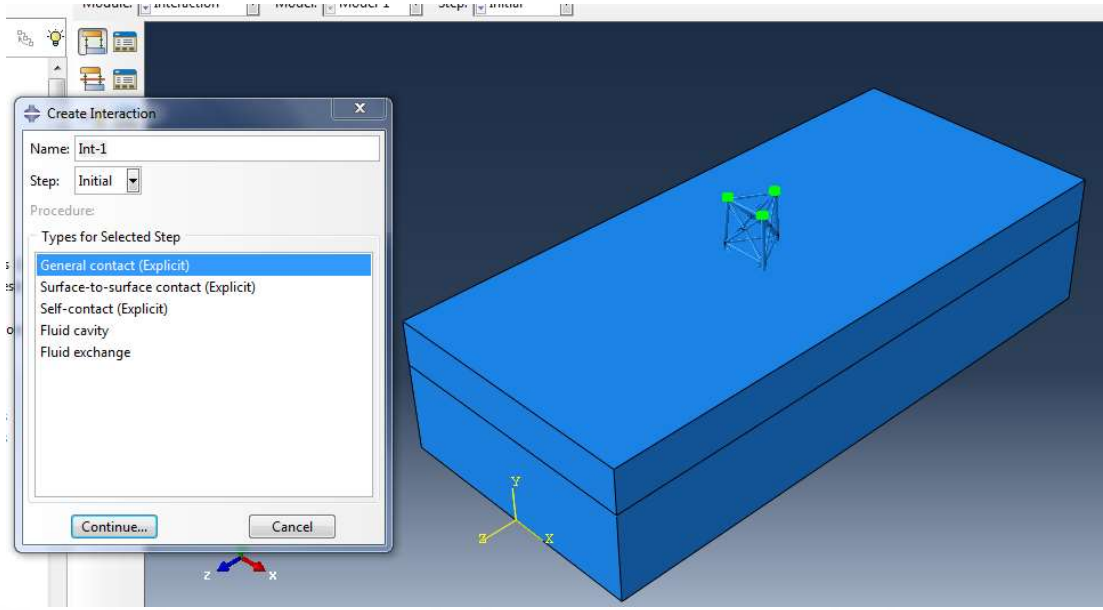
Analiz adımları ve çıktı işlemleri için gereken tanımlama Şekil 3.11.'de görüldüğü gibi adım (Step) bölümünde yapılmış, çözüm tipi de anlatılmıştır.

$T = 8$ sn boyunca akışkan hareketi devam etmiş ve yapısal çözümleme yapılmıştır. Dinamik-açık (Dynamic-explicit) analiz tipi olarak seçilmiştir.



Şekil 3.11. Analiz adımlarının belirlenmesi

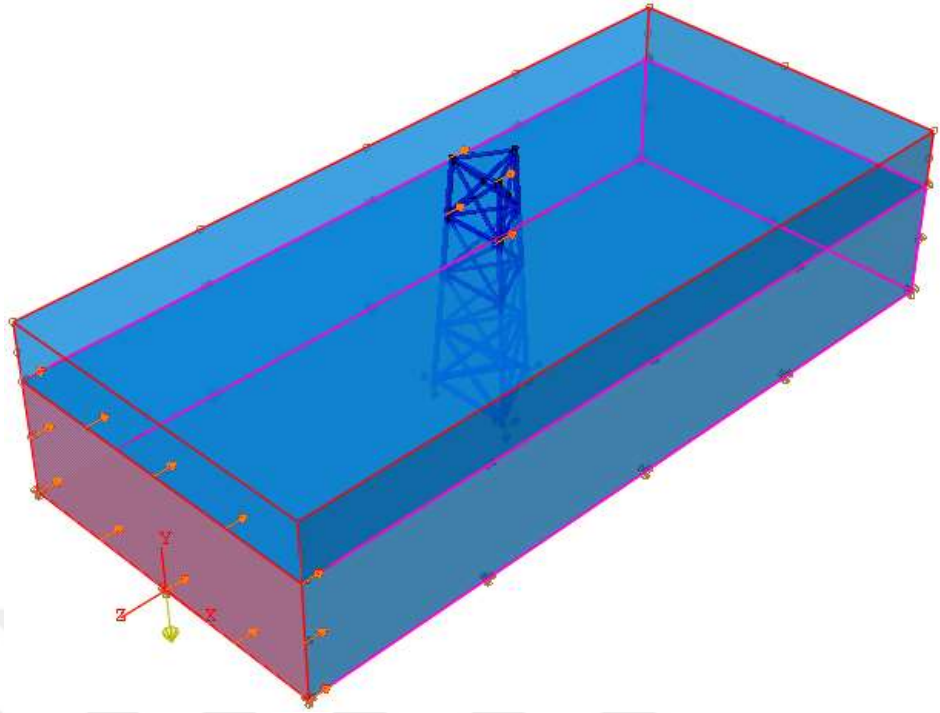
Kafes sistem ve deniz iki farklı ortamdır. Sonlu Elemanlar Analizinde kafes sistem yapı ortamını oluştururken, deniz ise akış ortamını oluşturmaktadır. Analiz süresince akışkandan yapıya kuvvet, yapıdan da akışkana deplasman aktarımı iki ortamın etkileşimi ile gerçekleşmektedir. Abaqus Sonlu Elemanlar programında bulunan etkileşim (interaction) menüsünde iki ortamın birlikte analizi gerçekleşmektedir. Bunun için Şekil 3.12’de görüldüğü gibi etkileşim tipi ve özellikleri belirlenmiştir. Tez çalışmasında platformun ilk iki katı deniz ortamı ile temas etmektedir. Son iki katı ise rüzgar kuvvetleri etkisi altındadır. Rüzgar kuvvetleri program dışında hesaplanarak yapıya etki ettirileceğinden rüzgar yapı etkileşimi tanımlanmayacaktır.



Şekil 3.12. Etkileşim tanımlanması

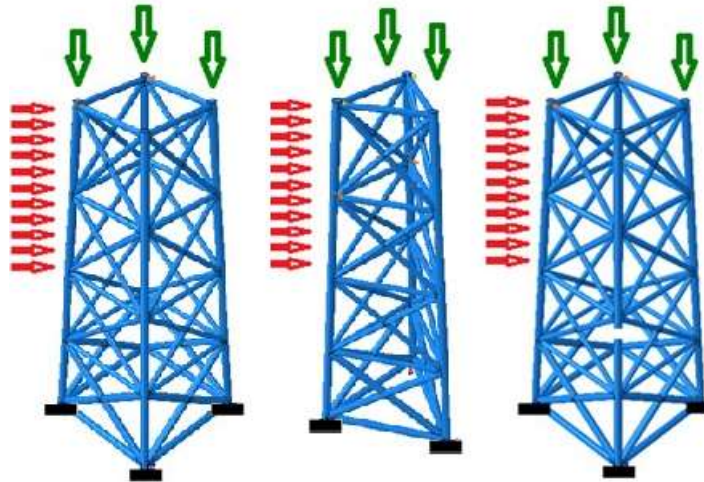
Etkileşim (Interaction) kısmında temas yüzeyleri belirlendikten sonra programın yükleme (Load) kısmında cisme yapılacak yüklemelerin belirlenmesi gerekmektedir. Dalga kuvvetleri deniz ortamıyla temas eden yapı elemanlarını etkilediğinden sadece hava ile temas eden diğer elemanlar rüzgar kuvvetlerinin etkisi altındadır. ABAQUS/Cae' nin akışkan çözücüsünden elde edilen veriler tanımlama yapılan yüzeylere aktarılır. Bu aktarımın sağlıklı yapılabilmesi için yapının küçük parçalara ayrılması, sınır ve başlangıç şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu da programın ağ (Mesh) özelliğinden yararlanarak yapılabilir.

Yükleme (Load) kısmında sınır şartları belirlenmiştir, su hacminin zemini geçirimsiz yüzey, uzun kenarları uzak alan ve kısa kenarları giriş çıkış bölgesi olarak tasarlanmıştır. Sınır şartlarına ait görsel Şekil 3.13'te sunulmuştur.



Şekil 3.13. Sınır şartları gösterimi

Ayrıca yapıya etkiyen rüzgar kuvvetleri ve platform yükleri yükleme (Load) kısmında belirlenir. Şekil 3.14.'te ankastre mesnet, yeşil oklar ile platform yükleri kırmızı oklar ile rüzgar yükleri gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Rüzgar ve platform yüklemeleri

Yapıların tabanına atanacak ankastre mesnetler için atama yapılacak bölgelerdeki noktalardan bir noktalar kümesi oluşturulur. Ardından mesnetler bu kümelerle atanır. Noktaların oluşturulması için modellerin belirli boyutlardaki küçük parçalara ayrılması gerekmektedir. Modellerin üzerinde oluşturulan noktalar belirli şekillerde birleştirilerek modeller üzerindeki sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken modeller üzerinde oluşturulacak nokta ve eleman sayılarının belirlenmesi gerekir. Bunun için yapılan ön analizler ağ hassaslık analizleri olarak bilinmektedir. Ağ hassaslık analizinde, bir analiz çıktısının (sonlu eleman analizi) sonuçlarının değişen ağ yoğunluklarıyla nasıl farklılaştığı belirlenir. Böylece sayısal çözümün doğru ve güvenilir bir sonuca yakınsamasını sağlanır. Model I için yapılan hassaslık analiz sonuçları Tablo 3.4.'de sunulmuştur. Hassaslık analizi 5 farklı nokta sayısı için doğal frekans değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.4. Model 1 hassaslık analizi

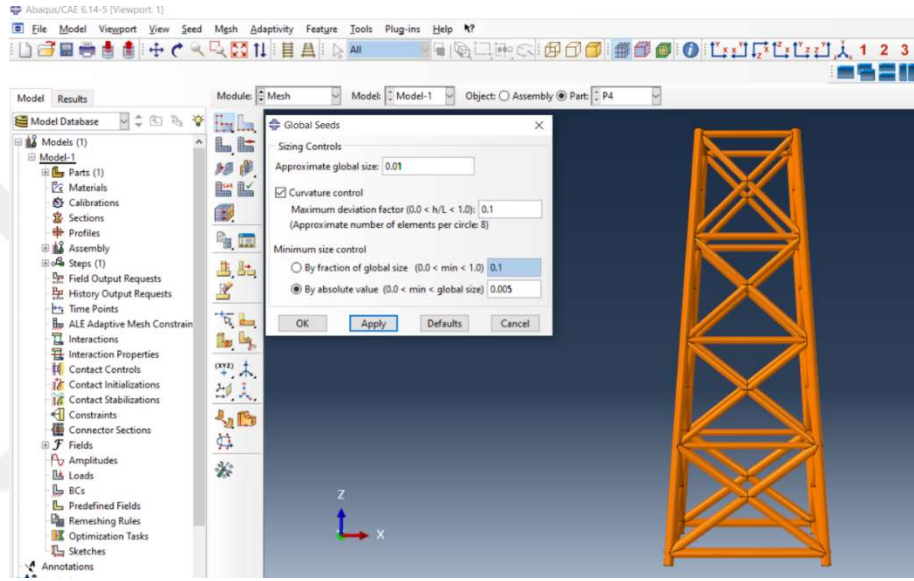
Noktalar Arası Uzaklık (m)	Nokta Sayısı	Eleman Sayısı	Doğal Frekans	Fark (%)
0,15	159739608	155856533	3,814	20,01
0,015	17553803	17914544	3,178	15,19
0,01	19723374	19905048	2,759	2,35
0,0075	24654218	24483209	2,694	1,12
0,005	29831603	29135019	2,663	

Tablo 3.4.'de görüldüğü gibi noktalar arası mesafe 0,01 m'den 0,005 m'ye azalırken doğal frekans değerlerindeki değişim %3,60 olmuştur. Bunun yanında nokta sayısı %51,25 artarken eleman sayısı ise %46,37 artmıştır. Nokta ve eleman sayısındaki artışın elde edilen sonuca yansımaları görece az olduğundan modellerde kullanılacak noktalar arası uzaklık 0,01 m olarak belirlenmiştir. Bu durumda üç yapısal modelde elde edilen nokta ve eleman sayıları Tablo 3.5.'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Yapısal modellerde kullanılan nokta ve eleman sayıları

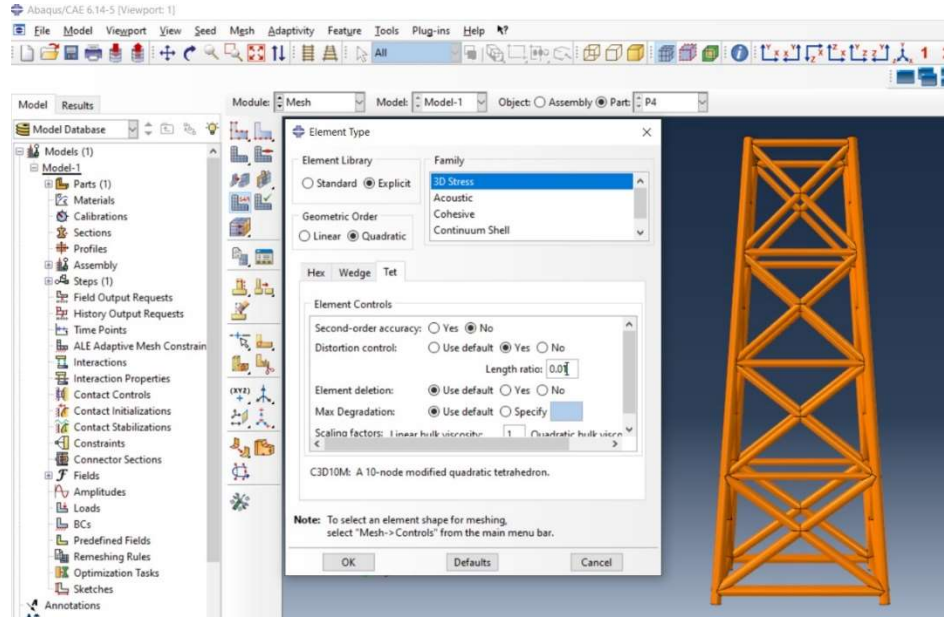
Model	I	II	III
Nokta Sayısı	19723374	19532252	16857356
Eleman Sayısı	19905048	19707492	16991833

Programın hücre biçimlendirme (seed part) bölümünden ağ özelliklerini belirlemek üzere hassaslık analizinden elde edilen 0,01 m değeri kullanılmıştır. bu değer Şekil 3.15.'te görüldüğü gibi programa aktarılmıştır.



Şekil 3.15. Hücre biçimlendirme (seed part)

Belirlenen bu noktalar yapının ve özel bir bölgeyse o bölgeye ait parçanın tipine uygun olarak birleştirilirler. Şekil 3.16.'da sonlu elemanlar analiz programında yapılan ağ oluşturma işlemi görülmektedir. Böylelikle noktası ve eleman ataması yapılmış sonlu elemanlar modeli haline gelmiş olur.



Şekil 3.16. Ağ (mesh) eleman tipinin oluşturulması

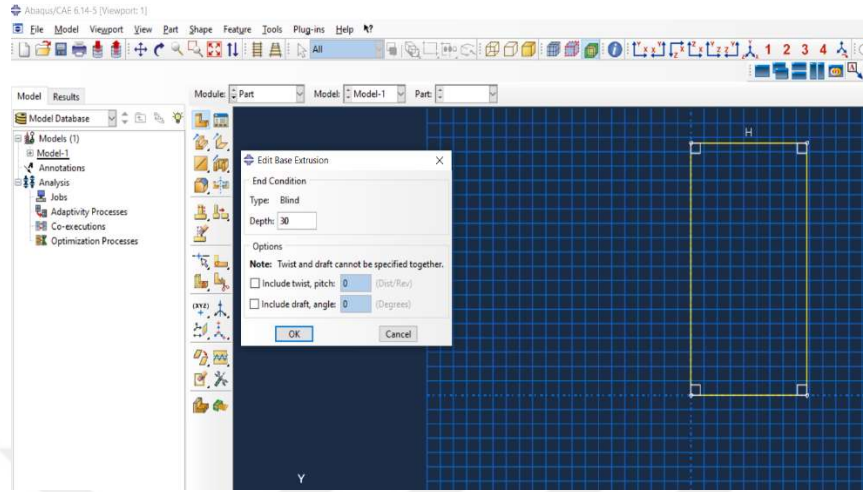
Modeller için dört düğümlü olarak tabir edilen ‘Dört yüzlü modifiye eleman’ (modified tetrahedral) tipi seçilmiştir. Böylece sırasıyla durum I, II ve III için 19723374 düğüm 19905048 öge, 19532252 düğüm 19707492 öge, 16857356 düğüm 16991833 öge oluşturulmuştur. Elemanların üç boyutlu düğüm noktaları vardır ve sürekli bir yapıya sahiptir.

Yapıya mesnet şartları atanır ve yapı tabanda, zemin ile temas ettiği bölgelerde ankastreler oluşturulur. Sonrasında bu ankastreler programda atanır.

3.2.3 Akışkan Ortamı Modellemesi

Kafes sistem platformun ilk iki katı deniz ortamı ile temas ederken, son iki katı hava ortamı ile temas etmektedir. Kat yükseklikleri her katta eşit ve 15 metredir, bu nedenler 30 metre derinliğinde bir deniz ortamı oluşturulacaktır. Deniz ortamı içindeki yapıya hidrodinamik dalga kuvveti etki edecek ve yapı üzerinde sürtünme ve kaldırma kuvvetleri oluşacaktır. Ayrıca yapının kendi kütlelerinin direnimiyle atalet kuvveti oluşturacak ve ötelemeye karşı direnecektir. Tüm bu kuvvet etkileri, hareket hız ve ivme denklemlerinin doğruluğu için çok hassas bir sıvı kütle dizaynı ve yerleşimi gerekmektedir. Şekil 3.17.’de akışkan en kesitin oluşturulması

görülmektedir. oluşturulan en kesite derinlik verilerek akış ortamına ait kontrol hacmi oluşturulacaktır.



Şekil 3.17. Akışkan geometrisinin oluşturulması

ABAQUS/Cae çözücüsünün bölüm (Part) kısmında akışkan ortamı tasarlanır. Kafes sistem platformun zemindeki ayak açıklıkları (B) 22’şer metre olduğundan yükseklik de daha önce belirttiğimiz gibi 30 metre olduğundan sıvı; yapıyı içine alacak şekilde, 8B ve 4B yatay düzlemde kenar uzunlukları olan bir hacim oluşturulmuştur.

Tablo 3.6. Akışkan modelinin sınır şartları [44]

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

Ergin [44] tasarladığı tabloda giriş, çıkış ve alt sınır tabakasındaki sınır şartları yukarıdaki şekilde göstermiştir. Tablo 3.6.’da yer alan u, v, w sembolleri x, y, z yönlerindeki hızları temsil etmektedir.

Suyun havayla temas ettiği serbest yüzey olarak tanımlanan bölge sabit kalamayacağından, belirlenen dalga teorisiyle modellere etkiyen hidrodinamik dalga kuvveti elemanları sırasıyla şöyle ifade edilebilir. Dalga tepesinin bir dalga uzunluğu

kadar mesafeyi kat etmesi için gereken zamana periyot (T), iki dalga ortasındaki çukurun dip noktasıyla dalgaların tepe noktası arasındaki mesafe dalga yüksekliği (H), dalganın yayılım yönünde birbirini izleyen dalgaların benzer noktaları arasındaki mesafe dalga boyu (L), dalga içerisindeki suyun partikül hızı (u) ve dalganın ivmesi ($\ddot{u}$) şeklinde ifade edilir [45].

En basit ve en çok kullanılan dalga teorilerinden bir tanesi Küçük Genlikli Dalga Teorisidir. Bu teori aynı zamanda airy teori 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.

Bu çalışma için belirlenen Lineer Dalga Teorisi; deniz mühendisliği, kıyı mühendisliği, okyanus bilimi ve su yapılarının tasarımı gibi dalga hareketlerinin anlaşılması gereken durumlarda kullanılan teoridir. Bu teori, dalga hareketini matematiksel olarak tanımlayabilmek için bazı kabullerden yararlanır. Bu kabuller; akış viskozitesiz ve irrotasyoneldir, akış sıkıştırılamaz, dalga yüksekliği küçüktür, sıvı yüzeyi serbesttir ve yüzey gerilimi ihmal edilir, taban sabit ve geçirimsizdir, dalga hareketi iki boyutludur ve rüzgar etkisi yoktur şeklinde sıralanabilir [46].

Bu kabullerde dalgaların periyodik ve üniform olduğunu varsayarak, dalgalar XY düzleminde iki boyutlu olarak düşünülür. Deniz tabanı örselenmiş olarak düşünülür ve derinliği (d) yataydır. Burada ifade edilen (d) derinlik, deniz tabanının durgun su yüzeyine olan mesafesidir. Dalgaların pozitif X yönünde hareket ettiği varsayılarak duran bir dalga ile hareket halindeki dalganın farkı anlaşılabilir. İlerleyen dalga kendine verilen hızda X yönünde 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 adet genliği ve periyodu aynı olan ilerleyen dalgadan oluştuğu söylenebilir. Fakat dalgalar ters yönde ve aynı hızlarda olursa yer değiştirme olmayacağından net hareket sıfırdır,

sadece düşey dalgalanma hareketleri meydana gelir. Verilen bir noktada duran dalga X ekseninde bir döngüden diğerine aynı miktarda dalgalanma yapar. Böylece bir nokta maksimum dikey dalgalanmayı yapar ve dalga'nın gövdesini oluşturur. Diğer nokta ise düşey deplasman yapmaz ve düğümü oluşturur. Duran bir dalgada birçok düğüm ve dalga gövdesi oluşur. Genelde bu tip dalgalara liman haznesi, göller, laboratuvar haznesi gibi sınırlı sularda rastlanır.

Lineer Dalga Teorisinin yaygın olarak kullanıldığı alanlara dalgakıran tasarımı, kıyı erozyon hesapları, yapılarda oluşacak dalga yükleri, akarsulardaki sediment taşınımı hesapları ve yüzer yapılar üzerine etki eden kuvvetlerin belirlenmesini örnek verebiliriz.

Bu tez çalışmasında deniz ortamı Lineer Dalga Teorisiyle tasarlanmıştır. Deniz ortamındaki akışkan derinliği $d=30\text{m}$, dalga yüksekliği $H=2\text{m}$, periyot $T=8\text{s}$ olarak tasarlanmıştır. Parametreler dikkate alınarak dalga boyu $L_w=98,71\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Tezde kullanılan sayısal analiz yönteminde Denklem (3.7) ivmeye ihtiyaç duyulmadan sadece dalga hızının kullanılması yeterlidir. Lineer Dalga Teorisine ait bu denklem Euler bölgeye giriş sınır şartı olarak atanır. Sonlu Elemanlar Analiz programında akışkandan yapıya aktarılabilecek kuvvetler bu denklemin programa atanmasıyla hesaplanır.

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(y+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'de kullanılan önceki paragrafta tanımlanan ifadeler ek olarak y , dalgalanmamış su seviyesinden olan düşey mesafe, x yatay mesafeyi ve t zamanı temsil etmektedir.

Deniz yapılarına etki eden dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılan Morison Denklemidir. Morrison denklemleri, dalga etkisi altındaki su yapılarının

hidrodinamik kuvvetlerini hesaplamak için kullanılan yarı-ampirik bir yöntemdir. Özellikle küçük çaplı silindirik yapıların dalga ortamında maruz kaldığı kuvvetlerin tahmini için yaygın olarak kullanılır. Bu makalede Morrison denklemlerinin teorik temelleri, uygulama alanları, geçerlilik sınırları ve mühendislikteki önemi detaylı olarak ele alınmıştır.

Kıyı ve deniz yapıları, açık deniz ortamında dalga, akıntı ve rüzgar etkilerine maruz kalır. Bu kuvvetlerin yapı üzerindeki etkilerini doğru hesaplayabilmek, güvenli ve ekonomik tasarım için elzemdir. Özellikle ince silindirik elemanlara (örneğin rıhtımlar, boru hatları, deniz platformu ayakları) etki eden dalga kuvvetlerini tanımlamada Morrison denklemleri, mühendislikte oldukça pratik bir çözüm sunar.

Morrison denklemleri, 1950'li yıllarda geliştirilen ampirik bir yaklaşımdır. Bu denklem, lineer dalga teorisi ile birlikte kullanılır ve yapı üzerinde oluşan kuvvetleri iki bileşene ayırır. Bu eylemlerden birincisi akışkan kütesinin ivmelenmesinden kaynaklanan Eylemsizlik Kuvveti Denklem (3.8)'de gösterilmiştir.

$$F_i = \frac{\pi}{4} \rho D^2 C_m \frac{du}{dt} \quad (3.8)$$

Bir diğeri ise yapının maruz kaldığı akışkan akımı nedeniyle oluşan Sürüklenme Kuvveti Denklem (3.9)'da gösterilmiştir.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho D^2 C_d Du|u| \quad (3.9)$$

Morrison denklemlerinin deniz platform ayakları, çelik kazıklar, yüzer sistemlerin bağlantı elemanları, dalgakıran ya da iskele ayakları ve sualtı boru hatları yapımlarında kullanımı uygundur.

Morrison denklemlerinin avantajları arasında basit ve hızlı hesaplama, önceki çözümlere dayalı güvenilir sonuçlar, zaman tanım alanı içerikli çözümleri sayılabilir. Bunun aksine dalga kırılmasının yok sayılması, karmaşık geometrilere uygulanamaması ve büyük çaplı yapılarda doğruluk oranının düşmesi dezavantajları olarak görülebilir.

Morrison denklemleri, deniz yapılarının ilk tasarım aşamasında dalga kaynaklı yüklerin tahmini için oldukça uygun ve pratik bir yöntemdir. Özellikle silindirik ve ince kesitli elemanlar için kullanımı yaygındır. Ancak, sınırları ve geçerlilik koşulları iyi tespit edilmeli; karmaşık sistemlerde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği veya fiziksel model deneyleriyle desteklenmelidir.

Toplam yatay kuvvet (F_H), dalga sürüklenme kuvveti (F_D) ve atalet kuvvetinin (F_I) toplanmasıyla oluşur. Toplam yatay kuvveti veren ifade Denklem (3.10) verilmiştir.

$$F_H = F_D + F_I = \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho_w C_D D u_{(y,t)} |u_{(y,t)}| dy + \int_{-d}^{\eta} \rho_w C_M \frac{\pi D^2}{4} \ddot{u}_{(y,t)} dy \quad (3.10)$$

Denklemden sürtünme katsayısı $C_D=0.7$ ve atalet katsayısı $C_M=2.0$ 'dır. ρ_w tuzlu su yoğunluğu, D silindirik eleman çapı, ' η ' su yüzeyi yüksekliğidir.

Serbest su yüzeyi hareketi Denklem (3.11) ile verilir.

$$\eta = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(y+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \quad (3.11)$$

Ayrıca, yapıya etki eden diğer çevresel yük olan rüzgar kuvveti, su yüzeyinden (y) herhangi bir yükseklikte Avro kod hız profiline (u_a) göre belirlenir Denklem (3.12)'te verile rüzgar kuvveti (F_a) rüzgar hızına göre hesaplanır.

$$u_a = U_{BAS} k_T \ln(y / z_0) \quad (3.12)$$

U_{BAS} referans rüzgar hızını (24 m/s), k_T arazi faktörünü (0,17) ve z_0 pürüzlülük uzunluğunu (0.01) ifade eder.

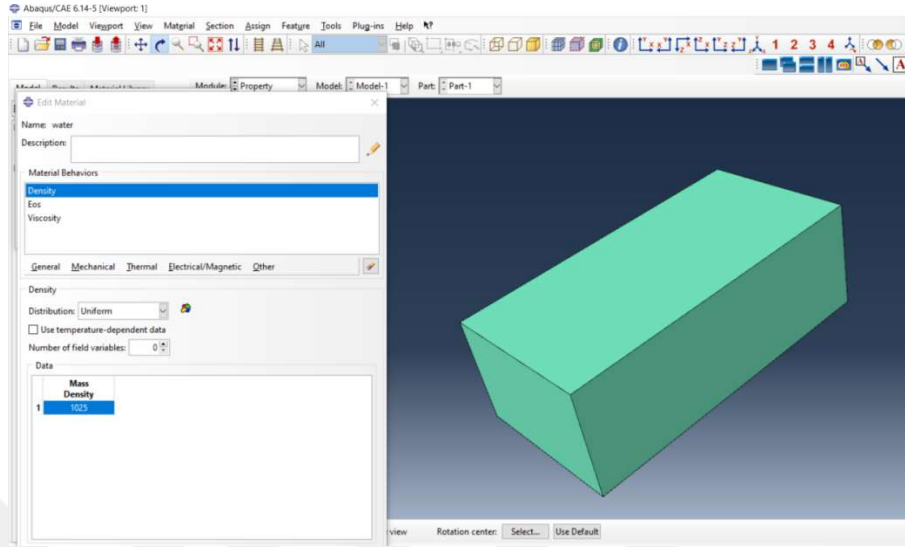
$$F_a = \int_h^{L-h} \frac{1}{2} \rho_a u_{a(y)}^2 C_s A_{(y)} dy \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'de 'A' elemanın kesit alanı, ' ρ_a ' havanın kütle yoğunluğu ve C_s ise elemanın silindirik kesitler için 0,50 olarak alınan şekil katsayısıdır [47].

Rüzgar geliş yönü aynı olduğunda 3 ve 4 ayaklı yapılara aynı rüzgar kuvveti etki edecektir. 3. ve 4. katlara etkiyen rüzgar kuvveti yukarıda belirtilen ile Denklem (3.13) formülü ile hesaplanmıştır. Bu kuvvetler sırasıyla $F_3=164800$ N and $F_4=197537$ N. Bu kuvvetler ilgili katlarda bulunan düğüm noktalarından yapıya aktarılırlar.

Geometri oluşumundan sonra sıvı malzemeye özellikleri atanacaktır. Deniz ortamı tuzlu su olduğundan EOS malzeme olarak tanımlanmıştır. Bu malzeme özelliğinde sesin akışkandaki yayılma hızı tanımlanır. Sesin sudaki yayılma hızı tuzlu suda normale göre farklıdır. C_o sesin tuzlu sudaki hızı 1560 m/s, sabitler $k=\Gamma_0=0$, özkütlesi (ρ_e) 1025 kg/m^3 , dinamik vizkozitesi $\mu=0,0015 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ olacak şekilde tüm özelliklerinin atamaları yapılmıştır. Bu atamalar önceki bölümlerde tarif

edildiği gibi özellik (Property) bölümünde yapılmıştır Şekil 3.18’de tuzlu suya ait malzeme özelliklerinin programa aktarılması görülmektedir.



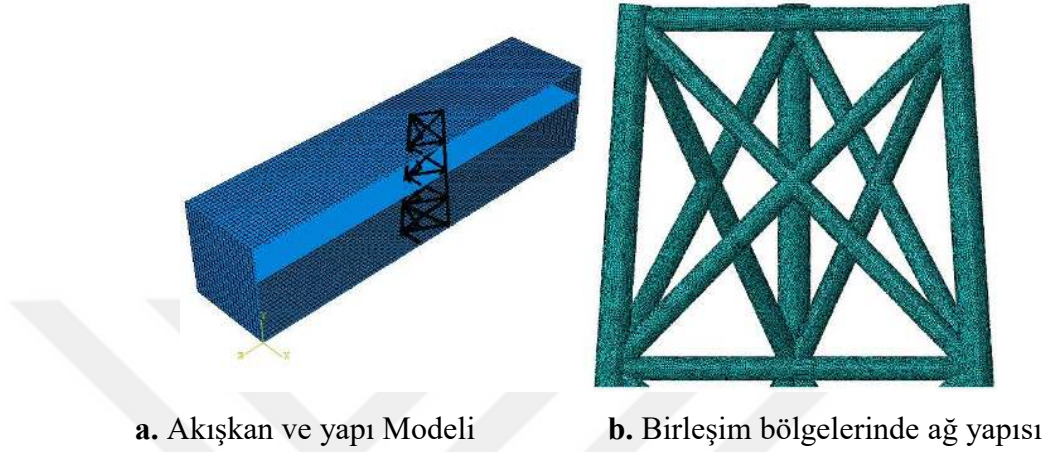
Şekil 3.18. Tuzlu su özellikleri atama

Tasarlanan sıvı geometri ve kafes sistem birleştir (Assembly) bölümünde çağrılır, rotasyon ve koordinat işlemleri ile uygun pozisyonlara yerleştirilerek etkileşime geçirilir. Birleştirilmiş modelde; d su derinliği, b çatı profilleri arası açıklık ve B taban ayak arası açıklıktır.

Daha önceki modelde tanımladığımız şekilde adım (Step) bölümünde analiz adımları tanımlanmıştır. Akışkanın hareketi 64 sn boyunca devam edecek şekilde ayarlanmıştır. Analiz akışkan ve yapı modellerini içeren tek bir çözücü içinde yapılacaktır.

Analizin yapılabilmesi için katı malzemede olduğu gibi akışkan malzemenin de çok küçük parçalara ayrılması ve bu parçaların belirli özellikteki elemanlar ile birleştirilip sonlu elemanlar modelinin oluşturulması gerekir.. Bu çalışmada Eulerian çözücüsüne uygun EC3D8R tipinde elemanlar kullanılmıştır. Bu kısaltmada E, Eulerian eleman, C sürekli, 3D üç boyutlu, 8R indirgenmiş sekiz noktalı anlamına gelmektedir. Yapısal modellerde noktalar arası mesafe 0,01 m olarak önceki

bölümlerde belirlenmiştir. Akışkan modellerinde ise 0,01 m değeri yapı ile temas eden bölgelerde kullanılırken, geri kalan kısımlarda bu değer 0,5 m olarak belirlenmiştir. Böylece akışkan modelinde 25782573 nokta ve 26013889 eleman kullanılarak Sonlu Elemanlar Modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.19. Model II Sonlu Elemanlar Modeli

Tasarlanan modellerde ölü, rüzgar ve dalga yüklerinin birleşimi etki ettiği düşünülmüştür. Kat yüksekliği (h) 15 metre olarak belirlenen mevcut yapıların iki katı su ile temas halindeyken, diğer iki kat ise hava ile temas halindedir. FSI analizlerle deniz derinliği (d) ve dalganın yapıyla olan teması, ayrıca havanın yapıyla olan teması incelenmiştir.

3.2.4. Akışkan-Yapı Etkileşim Analizi

Akışkan geometrisinin tabanı geçirimsiz yüzey olarak tasarlanmıştır, bu yüzden hız bileşenleri hepsi sıfıra eşittir. Koordinat düzlemindeki x, y ve z yönleri için hızları temsilen kullanılan U,V ve W Denklem (3.14)'te gösterilmiştir.

$$U=V=W=0 \quad (3.14)$$

ABAQUS/Cae; sonlu elemanlar metoduna bağı bir program olduğı için yukarıda belirtilen kabule de paralel olarak lineer dalga teoremindeki denklemler kullanılması uygun görülmüştür. Kafes sistem zeminde geçirimsizdir, herhangi bir dalga etkisi görmemek kaydıyla kısa kenarlardan dalga akımına maruz bırakılmış ve bunlara ilave olarak bir diğer dört ayaklı platformun hasar sonrası hizmet vermeye devam ettiğı durum incelemiştir. Gücüyen ve ark., Lineer Dalga Teorisine ait yaptığı açıklamalar aşağıda verilmiştir [46].

Dalga teorilerinin çoğı, çevresel faktörler ve farklı ortamlara uyum sağlayabilmek için geliştirilmiştir. Su derinliğı (d), dalga periyodu (T) ve dalga yüksekliğı (H) bu faktörler arasında yer alır. Kıyı yapılarının dizaynındaki dalga teorilerinde bu üç parametre önemli yer teşkil eder.

Dalga teorileri, dalgaların belirli bir periyotta ve üniform olarak hareket ettiğini kabul etmektedir. Periyot, dalga tepesinin bir dalga uzunluğı kadar mesafeyi kat etmesi için gereken zamandır. Dalga yüksekliğı ise iki dalga arası çukur ile dalga tepesi arasındaki dikey mesafedir.

3.2.4.1 Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi

Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi (CEL), katı-akışkan etkileşim problemlerinin çözümünde kullanılan gelişmiş bir sayısal analiz tekniğidir. Özellikle büyük şekil değişimi, malzeme geçişi veya serbest yüzey hareketlerinin gözlendiğı mühendislik problemlerinde klasik Lagrangian veya Euler yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda kullanılır.

Sayısal modelleme teknikleri, mühendisliğin birçok alanında karmaşık fiziksel olayların simülasyonunda kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerden olan Lagrangian ve Eulerian analiz teknikleri, belirli problem türleri için etkili olsa da bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Özellikle büyük şekil değişimi, malzeme geçişi ve akışkan-katı arayüzlerinin modellenmesi gibi problemler, bu iki yöntemin

birleşimi olan Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yönteminin (CEL) geliştirilmesini gerekli kılmıştır.

Bu yaklaşım çiftinde Lagrangian yaklaşımı katı cisimlerin analizinde sıklıkla kullanılır. Malzeme yüzeylerine noktalar atayıp ağ (mesh) sistemi oluşturur. Katı cisimde büyük deformasyona sebep olacak şekilde ağ sistemi bozulursa problem hata verir, net çözüme ulaşamaz.

Eulerian yaklaşımı ise akışkan problemleri için uygundur. Ağ sabittir, malzeme noktaları hücrelerin içinde hareket eder. Serbest yüzey veya sınır izleme problemi vardır.

Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi, karmaşık mühendislik problemlerinde kullanılır. Zemin - yapı etkileşiminde kazık çakma zemin delme çökme analizlerinde kullanılır. Hidro dinamik darbe problemlerinde dalgaların yapıya çarpmasını ve baraj taşmalarını analiz eder. Yüksek hızlı çarpışma testlerinde, proje tahribatı ve penetrasyon sonuçlarını inceler. Akışkan malzemenin kalıba dökülmesinde, döküm ve sıçrama analizlerini yapabilir. Savunma ve güvenlik önlemlerinde, mühimmat – zırh etkileşim testlerini yapabilir. Kanal taşkını ve sel hareketlerinde ise serbest yüzeyli büyük hacimli akış problemlerini çözmede kullanılabilir.

Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yönteminin olumlu yanları arasında; ağ (mesh) bozulması olmadan büyük deformasyonların güvenli şekilde modellenebilmesi, malzeme geçişi, karışımı, serbest yüzey hareketi gibi olayların tanımlanabilmesi, hem katı hem de akışkan davranışını aynı çözüm ortamında temsil edilebilmesi gösterilebilir.

Malzeme arayüzlerinde numerik yayılma oluşması, Fiziksel modelleme için ileri düzey kullanıcı bilgisi gerekmesi ve hesaplama maliyetlerinin yüksek olması

Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yönteminin dezavantajları arasında gösterilebilir. Uzun çözüm süreleri istenmiyorsa küçük zaman adımları seçilmelidir.

Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi, geleneksel sonlu eleman yöntemlerinin ötesine geçerek, yüksek deformasyonlu, çok fazlı ve çok ortamlı sistemlerin çözümünü mümkün kılar. Modern mühendislik problemlerinde özellikle dinamik yükleme, çarpışma, sıvı-katı etkileşimi gibi alanlarda kullanımı artmaktadır. Problem çözümünde fiziksel gerçekçiliği önemli ölçüde geliştirmektedir. Ancak Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi kullanılırken, hesaplama maliyeti ve modelleme karmaşıklığı dikkate alınmalıdır, çünkü uygulama uzmanlık gerektirmektedir.

ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS Autodyn, Simulia Xflow programları Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemini destekleyen bazı ileri seviye sonlu eleman yazılımlarıdır. Bu tez çalışmasında Akışkan-Yapı etkileşim incelemesi ABAQUS/Cae programı kullanılarak yapılmıştır.

ABAQUS/Cae tarafından kullanılan Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi (CEL) tekniğinin matematiksel tanımı aşağıdaki denklemlerle açıklanmıştır. Denklem (3.15-3.17) sırasıyla kütle, momentum ve enerji Lagrange korunum denklemleridir.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (3.15)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (3.16)$$

$$\frac{De}{Dt} = \sigma : D \quad (3.17)$$

Yukarıda kullanılan Denklem (3.15-3.17) malzeme hızı, yoğunluk, Cauchy gerilimi, gövde kuvveti ve birim hacim başına iç enerji sırasıyla ‘v’, ‘p’, ‘σ’, ‘b’ ve ‘e’ olarak gösterilmiştir.

$$\frac{D\varphi}{Dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + v \cdot (\nabla \varphi) \quad (3.18)$$

Lagrange eşitlikleri yukarıda Denklem (3.18)’da gösterilmiştir. Bu teknik ile Denklem (3.19)’da Eulerin genel koruma formuna ulaşılır.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = S \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)’deki keyfi çözüm değişkenidir, ‘Φ’ akı fonksiyonudur ve S kaynak terimidir. Bu eşitlik iki farklı şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = S \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = 0 \quad (3.21)$$

Denklem (3.20)’den dolayı, zaman türevinin sabit ağ üzerindeki malzemesi, zaman türevi tarafından değiştirilebilir ve bu da standart Lagrange formülü ile aynıdır. Deforme olmuş ağ, orijinal sabit ağa aktarılır. Daha sonra Denklem (3.21)’i çözmek için komşu elemanlar arasında aktarılan malzemenin hacmi hesaplanır. Bunlar momentum, kütle, gerilim ve enerji gibi Lagrange formülasyonunun değişkenleridir. Sonra da taşıma algoritmalarına göre bitişik elemanlar arasındaki malzeme akışının hesabı verecek şekilde formül düzenlenir.

Sonlu elemanlar programında dış kuvvetler (F) etkisi altında dikkate alınan yapının hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$m^{NJ} \ddot{X}^N |_t = (F^J - I^J) |_t \quad (3.22)$$

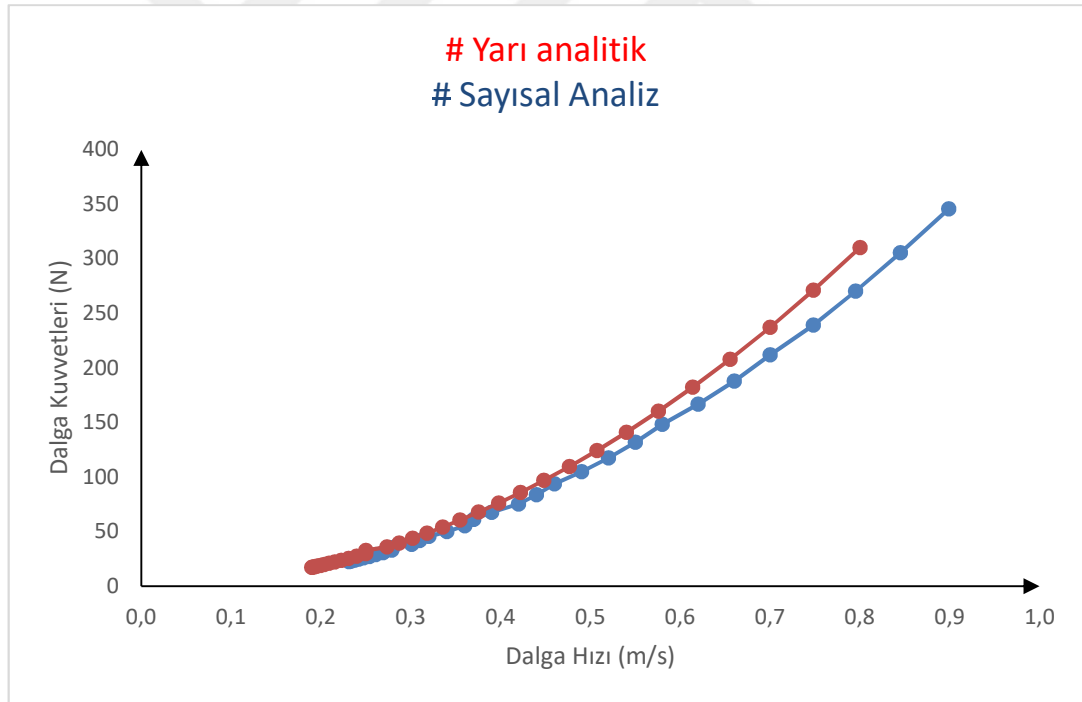
m^{NJ} kütle matrisini, F^J Euler kısmından aktarılan dış uygulanan yük vektörünü, I^J elemanların iç gerilmelerinden kaynaklanan iç kuvvet vektörünü sembolize eder ve $\ddot{X}$ ivmeyi ifade eder. I^J , küresel bir sertlik matrisinin oluşturulmasına gerek kalmayacak şekilde tekil elemanlardan belirlenir. Birleşik Euler Lagrange analizleri Dinamik, Explicit adımları ile birlikte Açık entegrasyon kuralıyla oluşturulabilir [20].

Sonlu elemanlar analizleri 0,01 sn zaman adımında ve toplam 64 yani sekiz dalga periyodu süresinde üretilmektedir. Dalga periyodu proje için $T=8$ saniye alındığından her periyotta 800 birim veri elde edilmiştir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde tasarlanan modellerin sayısal analiz çıktıları alınmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Modellerin doğal frekansları ve deplasman değerleri incelenmiştir. Akışkan ortamlarındaki incelemelerde ise sayısal yönetime ilave olarak Denklem (3.7-3.11) kullanılarak elde edilen dalga hızı, dalga kuvveti ve serbest su yüzey hareketi sayısal analizden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Belirli bir noktaya etkiyen dalga kuvvetinin dalga hızıyla oluşan değişimi gözlemlenmiş, serbest yüzeyin zamana bağlı değişimini inceleme fırsatı olmuştur. Ayrıca hasar alan yapının hizmetine devam ettiği sırada ilk hali hasarsız olan diğer üç ve dört ayaklı yapılar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1. Dalga kuvvetinin dalga hızı ile değişimi

Dalga kuvvetlerinin, dalga hızlarıyla arasında oluşan ilişki grafiği Şekil 4.1’de görülmektedir. Yüksek hızlar yüksek dalga kuvvetlerini de beraberinde getirir. Dalga periyotlarındaki dalga yükseliklerinin pik noktalarında potansiyel enerjisi artan dalganın hızı minimum hıza düştüğü ($v=0,23096951$ m/s - $0,18960059$ m/s),

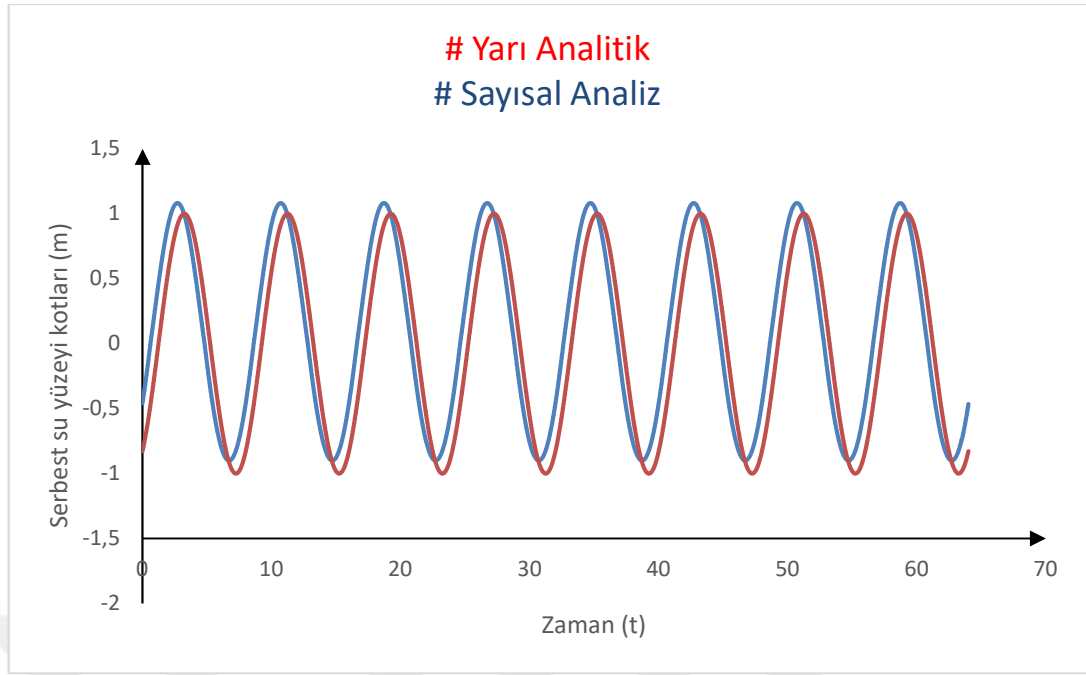
yüksekliğin su seviyesine indiği bölgelerde ise hızın maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir ($v=0,89863682$ m/s - $0,80$ m/s).

İki farklı analizde meydana gözlemlenen başlangıç hızlarındaki %21,7 lik fark maksimum hızlarda %12,2 ye kadar gerilemiştir. Bu sebeple yüksek hızlarda analizlerin birbirlerine daha yakın sonuç verdiği söylenebilir.

Tablo 4.1. Dalga kuvvetleri ve dalga hızı bağıntısı

Sayısal Analiz		Yarı Analitik Analiz	
Dalga Hızları (m/s)	Dalga Kuvvetleri (N)	Dalga Hızları (m/s)	Dalga Kuvvetleri (N)
0,230969	22,622546	0,189600	17,253392
0,301000	38,430000	0,249838	29,963751
0,420000	75,280000	0,354664	60,603341
0,490000	10,810000	0,422025	85,951380
0,550000	131,880000	0,476521	109,695840
0,620000	166,860000	0,540025	141,016880
0,700000	212,030000	0,613934	182,419320
0,795055	270,360000	0,699923	237,288413
0,898636	345,648568	0,800000	310,220000

Ayrıca serbest yüzeylerdeki dalga yüksekliklerini de iki farklı analiz yöntemi ile (Şekil 4.2.)’de görmekteyiz.



Şekil 4.2. Serbest yüzeyin zamana bağlı değişimi

Yapının normal derinliği $y=30$ metrelik konum için serbest su yüzey kotu; Sayısal analiz yöntemindeki değişimi $-0,90\text{m}$ ve $1,08\text{m}$ olarak bulunmuşken bu değer yarı-analitik analizde $-0,99$ ile $+0,99$ arası değişmektedir. Ayrıca bu noktanın maksimum yatay dalga hızı sayısal hesapta $0,80\text{ m/s}$ ve yarı-analitik hesaplara ise $0,89\text{ m/s}$ Denklem (3.1) ile olarak hesaplanmıştır. Aynı konumdaki noktaya etkiyen maksimum yatay kuvvetin sayısal analiz verisi $310,22\text{ N}$ olurken, yarı-analitik hesapta $345,65\text{ N}$ çıkmıştır Denklem (3.2). Çıkan veriler aşağıda net bir şekilde gözlemlenebilir (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. Analizler arası veri karşılaştırması

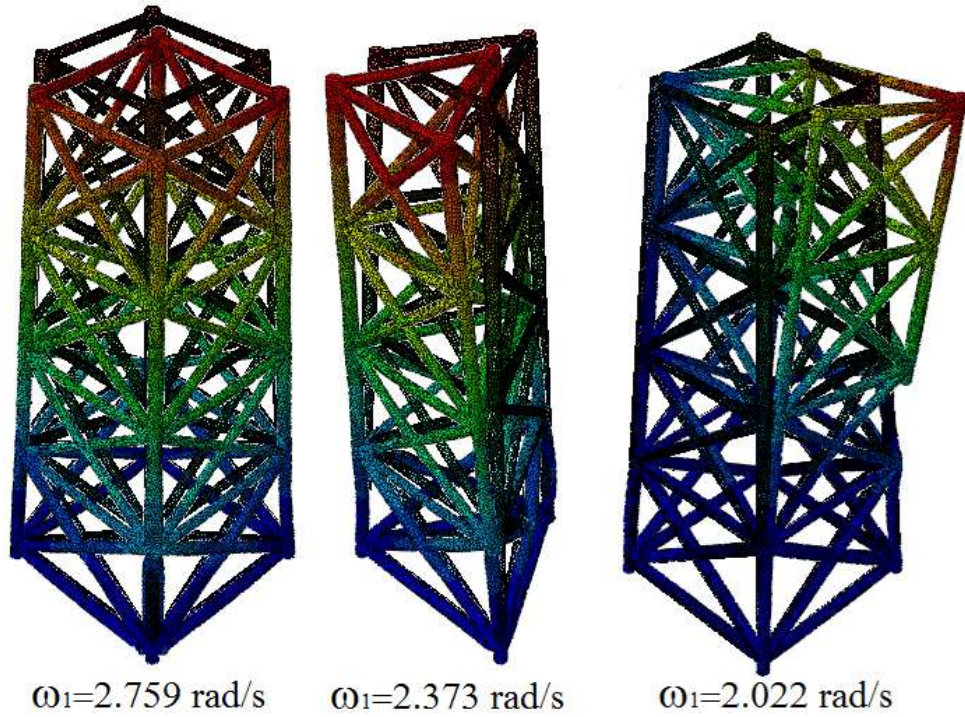
Analiz Çıktı	Sayısal Analiz	Yarı-analitik Analiz
Yatay dalga kuvveti (N)	310,22	345,65
Max. Serbest yüzey kotu (m)	1,08	0,99
Mni. Serbest yüzey kotu (m)	-0,9	-0,99
Max. Yatay dalga hızı (m/s)	0,8	0,89

Tezde yer alan dört ayaklı sağlam modelin (Tip I) dört katına ait ilk dört doğal frekans ve yer değiştirme tablosu aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Tip I katlara göre doğal frekans ve maksimum yer değiştirme

Doğal frekans (rad/s)				Maksimum yer değiştirme (m)			
ω_1	ω_1	ω_3	ω_4	X_1	X_2	X_3	X_4
2,759	2,769	2,775	6,262	0,103	0,252	0,421	0,611

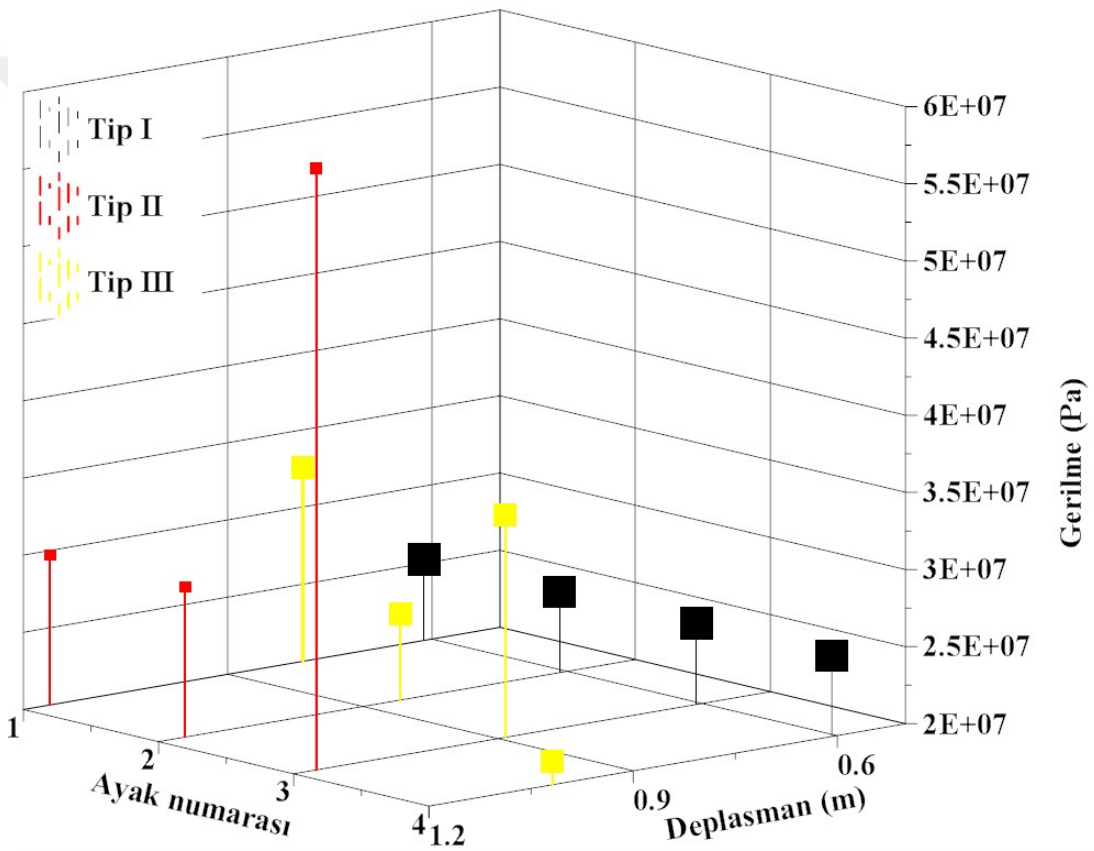
Dördüncü katın zamana bağlı yer değiştirme grafiği incelediğinde, maksimum yer değiştirme 0,611 m olurken, minimum yer değiştirme ise 0,270 m olmuştur. Elde edilen ortalama değer 0,440 metredir. Bu amaca uygun olarak tasarlanan farklı modellerin doğal frekansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.3. Mod şekilleri ve ilgili doğal frekans değerleri

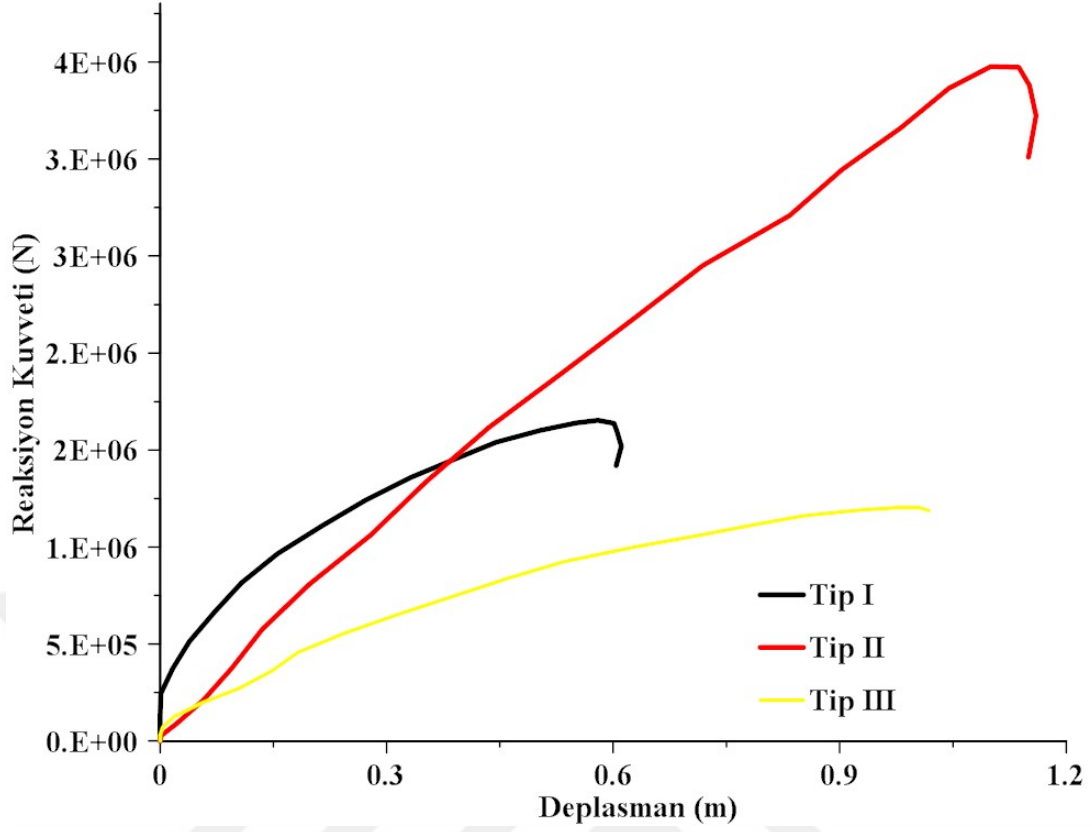
Birinci modeldeki hasarsız yapıdan maksimum doğal frekans değeri elde edilirken, üçüncü modelden ise minimum değer elde edilir. Frekanslar kendi aralarında karşılaştırıldığında birinci ve üçüncü model arasında %26,71 değişim söz konusudur. Ayrıca birinci ve üç ayaklı model karşılaştırıldığında da %13,99 bir fark göze çarpmaktadır.

İncelenen tipler için her bir ayaktaki meydana gelen maksimum yer değiştirme ve gerilmeler Şekil 4.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Tiplerin her bir ayağına göre gerilme ve deplasman değerleri

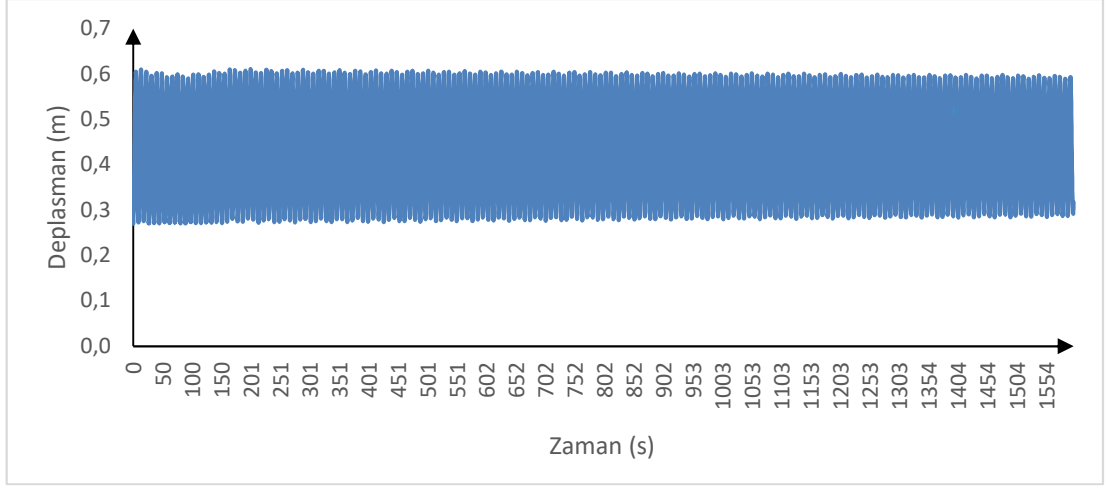
Reaksiyon kuvvetlerinin etkisiyle oluşan yer değiştirmeyi bir sonraki şekilde görebiliriz. (Şekil 4.5.)



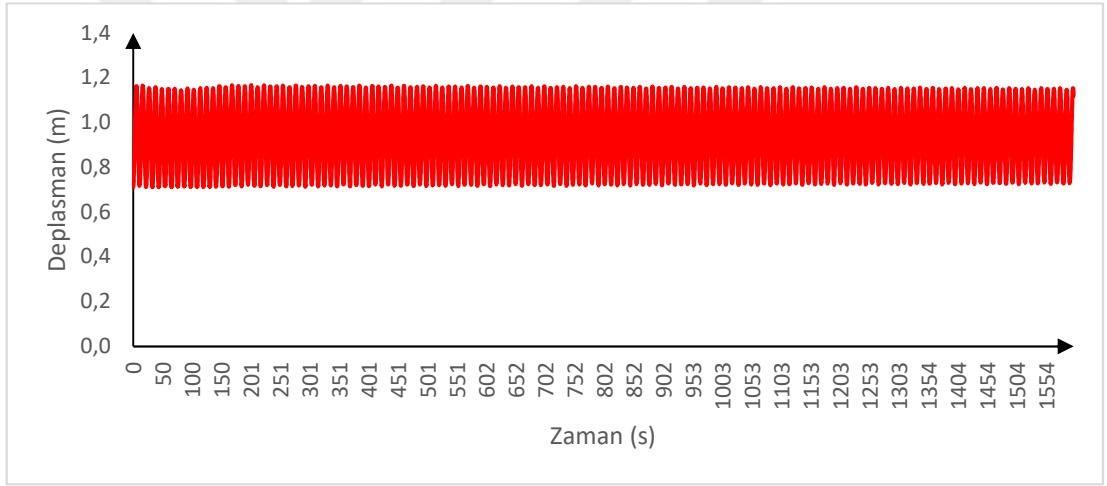
Şekil 4.5. Reaksiyon kuvvetlerinin deplasmanla değişimi

Modeller incelediğinde; üçüncü tipte maksimum yer değiştirme gözlenirken, tip birde minimum yer değiştirme gözlemlenmiştir. İki tip arasında %67,45 fark bulunmaktadır. Ancak bunun aksine, minimum ve maksimum gerilme değerleri tip üçte gözlemlenmiştir. Birinci ve üçüncü tipler, maksimum gerilme bazında karşılaştırıldıklarında, aralarında %36,45 fark olduğu görülmüştür. Ayrıca tip birdeki hasarsız ayak ile tip üçteki hasar sonrası hizmete devam eden ayaktaki gerilmeler karşılaştırıldığında %1,28 ve %17,01 ile en büyük fark yine bu tiplerde oluşmuştur.

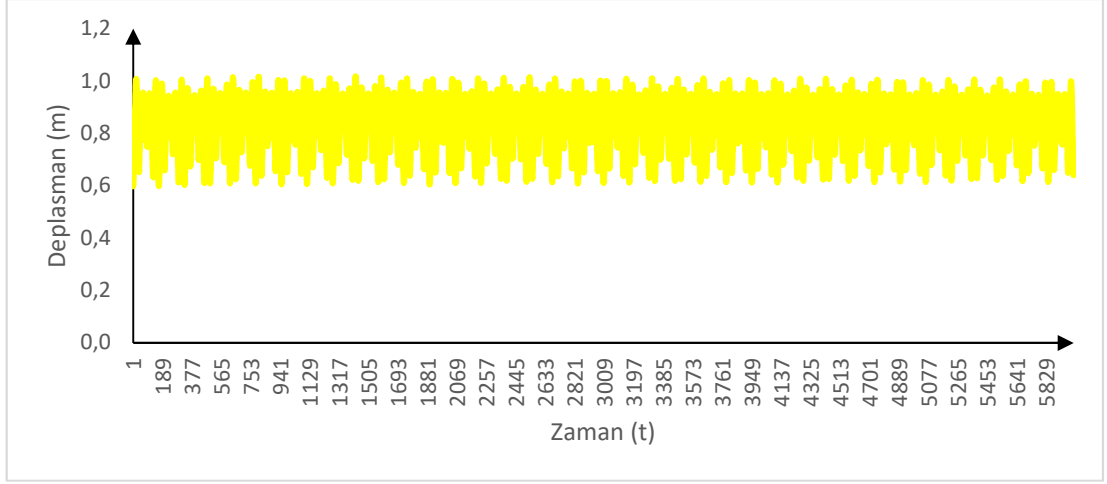
Üç model arasındaki maksimum gerilme tip ikiden elde edilir. Tahmin edileceği üzere de tip ikide maksimum reaksiyon kuvveti görülmüştür. Tüm modeller için zamana göre yer değiştirme grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.6.-4.8.).



Şekil 4.6. Tip I

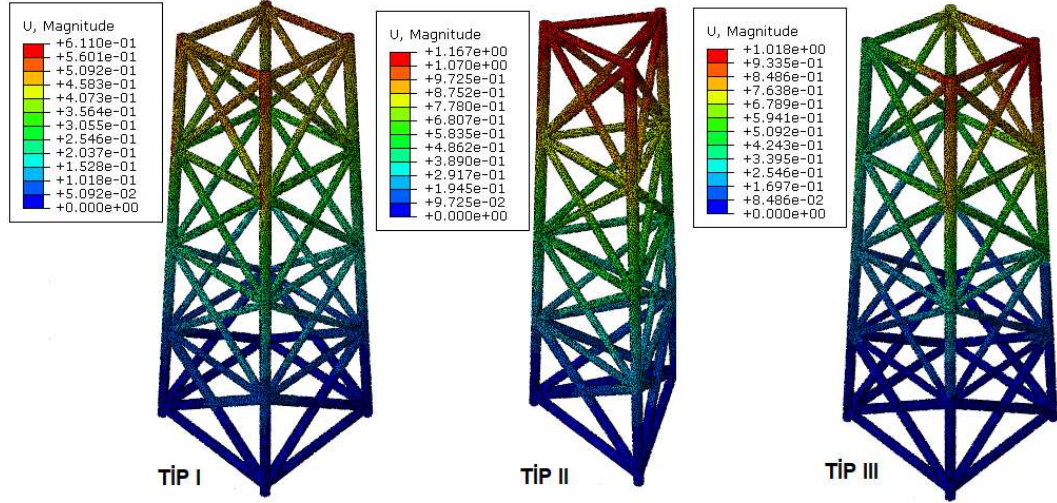


Şekil 4.7. Tip II

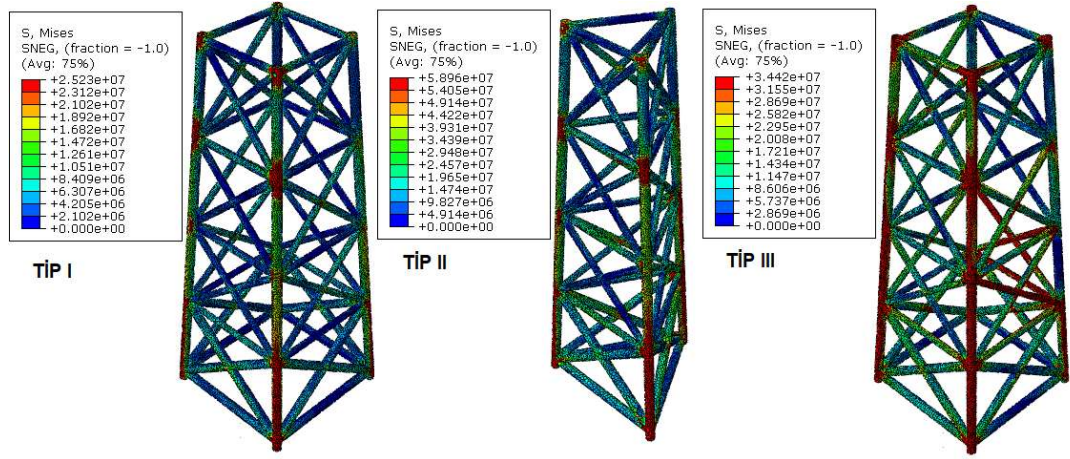


Şekil 4.8. Tip III

Şekil 4.9. ve 4.10. da modeller üzerindeki yer değiştirme ve gerilme dağılımları gösterilmiştir.

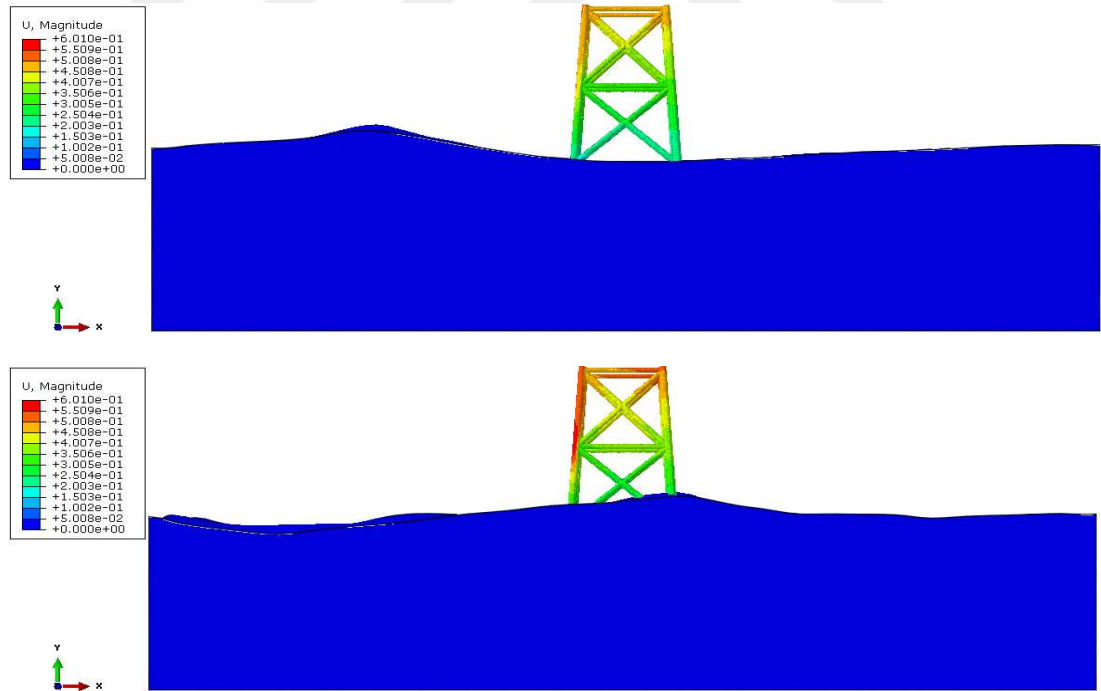


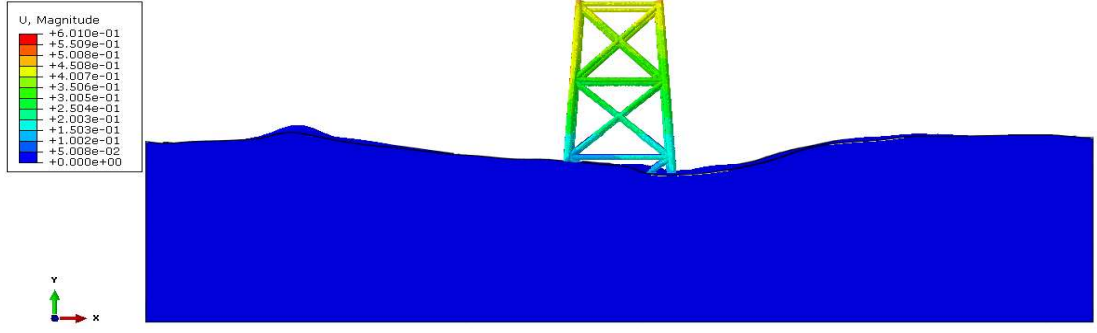
Şekil 4.9. Modellerin deplasman dağılımları



Şekil 4.10. Modellerin gerilme dağılımları

Sonuçlar bölümünün son adımında tip bir için Euler ve Lagrange etkileşim simülasyonları görülmektedir. Farklı zamanlardaki su yüzeyi hareketi ve yapının yer değiştirmesi gösterilmiştir (şekil 4.11.).





Şekil 4.11. Tip I farklı zamanlarda serbest su yüzeyi ile etkileşimi

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Açık denizlerde hizmet veren kafes sistem platformlar, karasal imalatlara göre daha maliyetli ve komplike bir yapıya sahip olduğundan, proje aşamaları daha detaylıca hazırlanmalı, öngörülse senaryolar daha çok dikkate alınmalı ve sürdürülebilirlikleri hayati önem taşımaktadır. Hata kabul etmeyen geri dönüşü olmayan imalatlardır. Yapım ve montaj aşaması başarılı geçse bile sonrasında oluşabilecek hasar senaryoları düşünülmeli, olası kazalarda yapının hizmet vermeye devam edebilmesi için gerekli stratejiler geliştirilmelidir.

Tez çalışmasında bu tarz düşünce yapısıyla hareket edilmiştir. Üç ve dört ayaklı iki farklı tip hasarsız model tasarlanmış, ayrıca dört ayaklı modelin profil kaybı sonrası hizmet vermeye devam etmek zorunda kaldığı durum araştırılmıştır. Bu çalışma sırasında akışkan-yapı etkileşimi için Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemi (CEL) kullanılmıştır.

İlk olarak teze konu olan platformlar ve akışkan hacmi sayısal ortamda modellenir. Akışkan modelini oluştururken dalga hızı-dalga hareketinin grafiği ve yüzey hareketi dikkate alınırken, katı modeller ise deplasman ve doğal frekans grafiklerine bakılarak değerlendirilir. Ayrıca platform yapılar akışkan içine yerleştirilmeden önceki dalga modeli dikkate alınmıştır. Çünkü kafes sistem platform deniz ortamına batırıldığında serbest yüzey kotları sağlıklı analiz edilememekte ve akışın yapısı bozulmaktadır.

Tablo 4.1.'de her kata uygulanan yüklemeler sonucu elde edilen frekans ve deplasman değerlerini görmekteyiz. Beklenildiği gibi maksimum yer değiştirme tepe noktasında oluşmaktadır. Ayrıca bu değerler dalganın yapı üzerindeki etkisini ve dalgadan dolayı yapının salınım hareketinin değiştiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.3.'te üç farklı modelin doğal frekansları ile karşılaştırması yapılmıştır. Tip I maksimum frekans değerine sahipken, elastisite modülünün azalmasıyla birlikte Tip III minimum değerler gözlemlenmiştir. Tip III kopuk bacak olmasından dolayı frekans değerleri azalmaya devam etmiştir. Artık üç bacakla hizmet vermesine rağmen aynı bacak sayısına sahip Tip II ile karşılaştırıldığında frekans değerlerinde %17,35'lik bir azalma söz konusudur.

Şekil 4.4. incelediğinde ise maksimum gerilmenin Tip II' de olduğu görülmüştür. Gerilme değerleri özellikle üçüncü ayakta yoğunlaşmıştır, demek ki söz konusu ayak herhangi bir darbe alırsa platform için yıkıcı etkisi olabilir. Bu bize göstermiştir ki platformun konumlandırılması ile profiller arası farklı et kalınlıkları malzeme seçimi yapmak gerekebilir. Tip III te de beklendiği gibi en yüksek gerilme kırılan ayakta meydana gelmiştir. Ayrıca Tip I gerilme dağılımı homojendir. Tüm modeller arasında gerilme şiddeti ve dağılımlarına bakılırsa en kritik durum Tip III oluşmuştur (şekil 4.10.).

Modeller yer değiştirme bağıntılarına göre incelediğinde ise gerilmedeki durumun aksine Tip II de bacaklar arası eşit bir dağılım gözlenmektedir (şekil 4.9.). Tip III deplasman değeri Tip II den az olmasına rağmen, kopmuş bir profile sahip olduğu için ayaklar arasında da deplasman farklılıkları gözlemlenmektedir.

Reaksiyon kuvvetleri grafiğine bakıldığında ise Tip III kopan bacağın minimum tepki kuvveti oluşturduğu görülür. Öte yandan; maksimum reaksiyon kuvvetine karşılık maksimum deplasman değeri Tip II de oluşmuştur.

Tip I ve Tip II zamanla yer değiştirme grafiği incelendiğinde yapıların sabit kaldığı gözlemlenmiş (şekil 4.6.-4.8.), fakat bacak kaybı olan Tip III te ise deplasman hareketinin sönümlenemediği görülmüştür.

Serbest su yüzeyi modeli ile yapı üzerindeki dalga etkisinin, dalga olmayan durumlardaki hali de dikkat alınmıştır. Farklı zamanlarda dalga hareketi ve serbest

yüzeyden kaynaklı yapısal deplasman değerleri gözlemlenmiştir (şekil 4.11.). Eşleştirilmiş Euler Lagrangian Yöntemini (CEL) kullanmıyor olsaydık dalgalanmayan su seviyesindeki hareket yok sayılırdı.

Bu tez çalışmasında tasarlanan kafes sistem platformlardaki belirli bir bölgeye kuvvet etki ettirerek meydana gelebilecek deplasman ve gerilme değerleri farklı zaman aralıklarında incelenmiştir. Beklendiği en kritik sonuçlar bacak sayısından ötürü Tip II de meydana gelmiştir. Ayrıca bir bacağı koptuğu halde hizmet vermeye devam eden dört ayaklı Tip III modeli inceleme fırsatı olmuştur. Bu çalışma göstermiştir ki; bölgedeki bilinen dalga hareketinin yönüne ve programlı gemi ring güzergahına göre açık-deniz yapıları farklı şekilde konumlandırılabilir ve olası kaza sonrası uzuv kaybı olması halinde hizmete devam edebilmesi için bölgesel olarak farklı et kalınları ya da malzeme seçimi yapılabilir. Sonraki çalışmalarda dalga teorileri, dalga geliş yönleri ve hareketli su yapıları tarafında hasar alınabilme üzerine çalışılacaktır.

ALTINCI BÖLÜM

KAYNAKLAR

- [1] Zhang, P., Li, J., Gan, Y., Zhang, J., Qi X., Le, C., Ding, H. Bearing capacity and load transfer of brace topological in offshore wind turbine jacket structure. *Ocean Engineering*. 2020, 199, 107037.
- [2] Xie, Y., Huang, J., Li, X., Tian, X., Liu, G., Leng, D. Experimental study on hydrodynamic characteristics of three truss-type legs of jack-up offshore platform. *Ocean Engineering*. 2021, 234, 109305.
- [3] Zhu, B., Sun, C., Jahangiri, V. Characterizing and mitigating ice-induced vibration of monopile offshore wind turbines. *Ocean Engineering*. 2021, 219, 108406.
- [4] Dehghania, A., Aslani, F. A review on defects in steel offshore structures and developed strengthening techniques. 2019, 20, 635–657.
- [5] Mazaheri, P., Asgarian, B., Gholami, H. Assessment of strengthening, modification, and repair techniques for aging fixed offshore steel platforms. 2021, 110:102612.
- [6] Bao, X., Fan, T., Shi C., Yang, G. One-dimensional convolutional neural network for damage detection of jacket-type offshore platforms. *Ocean Engineering*. 2021, 219, 108293.
- [7] Mujeeb-Ahmed, M.P., Ince, S T., Paik J K. Computational models for the structural crashworthiness analysis of a fixed-type offshore platform in collisions with an offshore supply vessel. *Thin-Walled Structures*. 2020, 154, 106868
- [8] Bela, A., Le Sourne, H., Buldgen, L., Rigo, P. Ship collision analysis on offshore wind turbine monopole foundations. *Marine Structures*. 2017, 51, 220-241.
- [9] Wang, S. Damage detection in offshore platform structures from limited modal data. *Applied Ocean Research*. 2013, 41, 48–56.
- [10] Wang, S., Zhang, M., Li, H. Damage localization of an offshore platform considering temperature variations. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015, 954926.
- [11] Gücüyen, E. Numerical analysis of deteriorated sub-sea pipelines under environmental loads. *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*. 2015, 28(6).
- [12] Gücüyen, E., Erdem, R.T. Corrosion effects on structural behavior of jacket type offshore structures. *Grđevinar*. 2014, 66 (11), 981-986.
- [13] Gücüyen, E., Coşkun, S., Erdem R T. Analyses of damaged effects on jacket type offshore platform. *Gradevinar*. 2023, 75(7), 653-664.
- [14] Martínez, E L., Quiroga, A G., Jardini, A L., Filho, R M. Computational fluid dynamics simulation of the water – sugar cane bagasse suspension in pipe with internal static mixer. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2009, 26, 683-688.
- [15] Gücüyen, E., Erdem, R. T., Gökkuş, Ü. FSI analysis of submarine outfall, *Brodogradnja/Shipbuilding*. 2016, 67(2), 67-80.
- [16] Korobenko, A., Yan, J., Gohari, S M I., Sarkar, S., Bazilevs, Y. FSI Simulation of two back-to-back wind turbines in atmospheric boundary layer flow. *Computers and Fluids*. 2016, 158, 167-175.
- [17] Liu, J. A second-order changing-connectivity ALE scheme and its application to FSI with large convection of fluids and near contact of structures. *Journal of Computational Physics*. 2016, 304, 380–423.
- [18] Gücüyen, E., Yiğit, M E., Erdem, R T., Gökkuş, Ü. Comparative analysis of tripod offshore structure, *Gradevinar*. 2020, 72(11), 1021-1030.

- [19] ABAQUS User's Manual, Version 6.12, SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015.
- [20] Gücüyen, E., Erdem, R. T. Açık Deniz Uzak Kafes Sistemin Çevresel Yükler Altında Akışkan-Yapı Etkileşimli Analizi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi. 2016, 7(3), 433-444.
- [21] Gücüyen, E., Dağlı, B. Y., Gökkuş, Ü. Çelik Rıhtım Kazıklarının Dalga Yükleri Altında Dinamik Davranışının Modellenmesi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 2010, 6(2), 161-170.
- [22] Gücüyen, E., Erdem, R. T. Kompozit Deniz Yapısının Dalga Kuvvetleri Altında İncelenmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi. 2019, 10(3), 1125-1136.
- [23] Tortumluoğlu, M. İ., Doğan, M. Açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçim kriterlerinin irdelenmesi ve kuzey ege kıyılarına uygulanması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi. 2021, 23, 25-42
- [24] Chen, J. Y. Analysis of Performance and Reliability of Offshore Pile Foundation Systems based on Hurricane Loading. University of Texas, Texas, America. 2011, 289. (Doktora Tezi).
- [25] Jia, H., Qin, S., Wang, R., Xue, Y., Fu, D. Ship collision impact on the structural load of an offshore wind turbine. Global Energy Interconnection. 2020, 3(1), 43-50.
- [26] Travanca, J., Hao, H. Energy dissipation in high-energy ship-offshore jacket platform collisions. Marine Structures. 2015, 40, 1-37.
- [27] Moulas, D., Shafiee, M., Mehmanparast, A. Damage analysis of ship collisions with offshore wind turbine foundations. Ocean Engineering. 2017, 143, 149-162.
- [28] Hao, E., Liu, C. Evaluation and comparison of anti-impact performance to offshore wind turbine foundations: Monopile, tripod, and jacket. Ocean Engineering. 2017, 130, 218-227.
- [29] Abazari, A. Investigation on ship collision phenomena by analytical and finite element methods. Researchgate. 2011, 5(8), 1551-1560.
- [30] Manrique, E. P. Analysis of jacket platforms under ship collisions. University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, Stavanger, Norway. 2018, 104. (Yüksek Lisans Tezi).
- [31] Roy, K., Ray-Chaudhuri, S. Fundamental mode shape and its derivatives structural damage localization. 2013, 332, 5584-5593.
- [32] O'Leary, K., Pakrashi, V., Kelliher, D. Optimization of composite material tower for offshore wind turbine structures. Renewable Energy. 2019, 140, 928-942.
- [33] Han, Z., Li, C., Deng, Y., Liu, J. The analysis of anti-collision performance of the fender with offshore wind turbine tripod impacted by ship and the coefficient of restitution. Ocean Engineering. 2019, 194, 1-16.
- [34] Mo, R., Li, M., Kang, H. Transient behaviour of grouted connections of offshore wind turbines subject to ship impact. Applied Ocean Research. 2018, 76, 159-173.
- [35] Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hörnig, M., Bainer, R., Schmid, M. J., Brockmeyer, B. Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. Marine Pollution Bulletin. 2018, 136, 257-268.
- [36] Wang, K., Li, Z., Zhao, M. Mechanism of Localized Corrosion of Steel Pipe Pile Foundation for Offshore Wind Turbines and Corrosive Action. The Open Civil Engineering Journal. 2016, 10, 685-694.
- [37] Sassi, M. A. Nonlinear dynamic analysis of wind turbine towers subject to design wind and seismic loads. Colorado University. 2016 (Doktora Tezi).

- [38] Elsayed, T., El-Shaib, M., Gbr, K. Reliability of fixed offshore jacket platform against earthquake collapse. *Ship and Offshore Structures*. 2016, 11.2, 167-181.
- [39] Sreelakshmi, M. S., Jayalekshmi, R. Seismic Response Control of Offshore Jacket Platform with Friction Damper. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2017, 8, 11.
- [40] Guede, F., Risk-based structural integrity management for offshore jacket Platforms. *Marine Structures*. 2017, 101016.
- [41] Martin, R., Lazakis, I., Barbouchi, S., Johanning, L. Sensitivity analysis of offshore wind farm operation and maintenance cost and availability. *Renewable Energy*. 2016, 85, 1226-1236.
- [42] Mojtahedi, A., Hosseinlou, F. An Iterative Method for Structural Health Monitoring in a Jacket Type Offshore Platform Based on Mode Reduction. *International Journal of Engineering and Technology*. 2016, 8, 5.
- [43] Gücüyen, E. İç ve Dış Akış Etkisinde Deniz Deşarj Sistemlerinin Tasarımı. Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye. 2013, 106. (Doktora Tezi).
- [44] Ergin, İ. Uzay Kafes Tipi Açık Deniz Yapılarının Dinamik Analizi. Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye. 2015, 64. (Yüksek Lisans Tezi).
- [45] Chakrabarti, S. K. *Handbook of Offshore Engineering*. Offshore structures analysis. Elsevier, Illinois, USA. 2005, 652.
- [46] Gücüyen, E. Düzensiz Dalgaların Etkisindeki Deniz Boru Hatlarının Dinamik Analizi. Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye. 2008, 79. (Yüksek Lisans Tezi).
- [47] Dyrbye, C., Hansen, S. O. *Wind Loads On Structures*. Wiley, Boston, USA. 1989, 243.