

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇOK NOKTALI BAĞLAMA SİSTEMLERİ İLE BAĞLI YÜZER, ÜRETİM,
DEPOLAMA VE NAKİL AMAÇLI AÇIK DENİZ YAPILARININ (FPSO)
DİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisi Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

**MAYIS 2016
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇOK NOKTALI BAĞLAMA SİSTEMLERİ İLE BAĞLI YÜZER, ÜRETİM, DEPOLAMA
VE NAKİL AMAÇLI AÇIK DENİZ YAPILARININ (FPSO) DİNAMİK ANALİZİ**

Makine Mühendisi Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 04 / 2016

Tezin Savunma Tarihi : 30 / 05 / 2016

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Emre PEŞMAN

Trabzon 2016

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Selahattin Alp ERKURTULMUŞ Tarafından Hazırlanan**

**ÇOK NOKTALI BAĞLAMALI SİSTEMLER İLE BAĞLI YÜZER, ÜRETİM, DEPOLAMA
VE NAKİL AMAÇLI AÇIK DENİZ YAPILARININ (FPSO) DİNAMİK ANALİZİ**

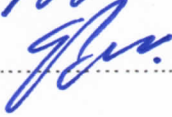

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 03 / 05 / 2016 gün ve 1651 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ercan KÖSE

Üye : Prof. Dr. Metin TAYLAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Emre PEŞMAN



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans çalışmalarım esnasında daima yanımda olan, çalışma konumu bana öneren ve çalışmalarımı sürekli olarak takip eden Sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Emre PEŞMAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Öğrenciliğimin her aşamasında verdikleri desteklerinden dolayı başta bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Ercan KÖSE olmak üzere tüm KTÜ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunmayı zevkli bir görev sayarım.

Verdikleri destekten dolayı başta Arş. Gör. Erhan AKSU, Arş. Gör. Mustafa TUTİ ve Arş. Gör. Deniz Can KOLUKISA olmak üzere KTÜ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği araştırma görevlilerine teşekkür ederim.

Değişim öğrencisi olarak bulunduğum sürece değerli zamanlarını ayırarak çalışmalarımda yardımcı olan, konuya olan ilgimin artmasında yadsınamaz katkıları bulunan, saygılarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen University of Zagreb'de Sayın Prof. Dr. Većeslav ČORIĆ'e, görüş, öneri ve tartışmaları ile de Sayın Yrd. Doç. Dr. Ivan ĆATIPOVIĆ'e ve Asistan Marko TOMIĆ'e teşekkürler sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca eğitim-öğretimim süresince bana emeği geçen tüm hocalarıma, ilgi sevgi ve desteklerini esirgemeyen hayatımda yer almış ve alan diğer tüm dostlarıma ve bugünlere gelmemde büyük emek sarf eden başta Annem olmak üzere teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çok Noktalı Bağlama Sistemleri ile Bağlı Yüzer, Üretim, Depolama ve Nakil Amaçlı Açık Deniz Yapılarının (FPSO) Dinamik Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Emre Peşman’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 30/05/2016

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Çalışması.....	2
1.3. Yüzer Platformların Dinamik Analizi	4
1.4. Yüzey Dalgalarında Sınır Değer Problemi	4
1.5. Dalga Teorisi	5
1.6. Gemi Hareketleri ve Denizcilik	10
1.7. Difraksiyon ve Radyasyon Teorisi	12
1.8. Morison Denklemi	13
1.9. Hidrodinamik Kuvvetler	14
1.9.1. Birinci Mertebeden Hidrodinamik Kuvvetler ve Momentler	14
1.9.2. İkinci Mertebeden Hidrodinamik Kuvvetler ve Momentler	17
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER.....	20
2.1. Frekansa Bağlı Çözüm.....	20
2.2. Dalga Yükleri.....	20
2.3. Yüzen Yapıların Hareketi	22
2.4. Platform Hareketlerinin Zamana Bağlı Analizi	23
2.5. Bağlama Sistemleri ve Rayzer Dinamiği.....	26
2.5.1. Bağlama Sistemleri ve Rayzerlar.....	26
2.5.2. Rod (Çubuk Eleman) Teorisi.....	27
2.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM).....	32

2.7.	Statik Problem Formülleri	37
2.8.	Dinamik Problem Formülleri.....	41
2.9.	Platform ve Bağlama Sistemlerinin Birleşik Analizi.....	45
2.9.1.	Zamana Bağlı Analiz	46
2.10.	Tanker Tabanlı FPSO Dinamik Analizi	49
2.10.1.	Kullanılan HAD Yazılımı.....	51
2.10.2.	Tanker Tabanlı FPSO ve Bağlama Sistemleri Dizayn Parametreleri.....	51
2.10.3.	Çevresel Koşullar.....	54
2.10.4.	Dalga Kuvveti	55
2.10.5.	Rüzgar Kuvveti	56
2.10.6.	Rüzgar ve Akıntı Kuvvet Katsayıları	57
2.11.	FPSO Birleşik Analizi	58
2.11.1.	Statik Ofset Testi	59
2.11.2.	Serbest Sönümlenme Testi	60
2.11.3.	Kasırga Koşulları Altında FPSO Nümerik Simülasyonu	62
2.12.	Farklı Malzeme (Çelik) Kullanılan Bağlama Sistemleri ile Simülasyon	67
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
4.	KAYNAKLAR	72
5.	EKLER	75
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

ÇOK NOKTALI BAĞLAMA SİSTEMLERİ İLE BAĞLI YÜZER, ÜRETİM,
DEPOLAMA VE NAKİL AMAÇLI AÇIK DENİZ YAPILARININ (FPSO) DİNAMİK
ANALİZİ

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Emre PEŞMAN

2016, 74 Sayfa, 14 Ek Sayfalar

Dünya üzerinde petrol ve doğal gazla olan ihtiyaç her geçen gün artmakta ve bu da yeni teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple açık deniz yapıları endüstrisi, bu günlerde en fazla gelişen endüstrilerden birisi haline gelmiştir.

Gemilerde olduğu gibi açık deniz yapılarında da yük, mürettebat ve donanım güvenliğinin istenilen düzeye getirilebilmesi için denizcilik analizleri önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada yüzer, üretim, depolama ve nakil amaçlı açık deniz yapılarının (FPSO) işletimleri sırasında karşılaşılan, çevresel koşullara bağlı olarak gerçekleşen yükleme koşullarında birleşik dinamik analizi yapılarak gösterdiği tepkiler önceki deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun için çalışmada gemi hareketlerinin analizi için kullanılan difraksiyon ve radyasyon teorisi anlatılmış ve bu teoriyi temel alan, hesaplama aşamasında Green fonksiyonlarını kullanarak üç boyutlu panel metodu ile hesaplama yapan ANSYS AQWA programı yardımıyla FPSO formu üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle FPSO formu ele alınmış, çok derin sularda belirli çevresel koşullar altında bağlama sistemleri ile bağlanarak nümerik analizi yapılmış ve daha önceden yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmış, sonrasında bağlama sistemlerinin halatlarının malzemeleri ve çevresel şartlar değiştirilerek bu değişimlerin FPSO ve bağlama sistemleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Açık deniz platformları, FPSO, çok noktalı bağlama sistemleri, rayzerler

Master Thesis

SUMMARY

DYNAMIC ANALYSIS OF FLOATING, PRODUCTION, STORAGE AND
OFFLOADING UNITS (FPSOs) WITH COUPLED MOORING LINES AND RISERS

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Naval Architecture and Naval Engineering
Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Emre PEŞMAN
2016, 74 Pages, 14 Pages Appendix

In the world, the need for oil and gas is increasing every day and this makes it necessary for the development of new technology. Therefore, offshore industry is become one of the most developing industries all over the world today.

Seakeeping analysis has a major importance for reaching the desired level in load, crew and equipment safety for offshore platforms.

In this study, floating, production, storage and offloading units (FPSOs) encountered during the operation, and response to the coupled dynamic analysis made in the loading conditions that occur due to environmental conditions were compared with previous experimental results. For this, diffraction and radiation theory to analyse the ship motions is explained and the analysis was carried out on FPSO hull forms using ANSYS AQWA program which is based on this theory and carries out calculations via panel method using green functions. Primarily the analysis results and experimental results of the past studies are compared. Thereafter, changing the materials and environmental conditions of the mooring lines, it has investigated the effects of these changes on the FPSO and mooring systems.

Key Words : Offshore platforms, FPSO, mooring lines, marine risers

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Düzenli dalga profili.....	6
Şekil 1.2.	Düzenli dalgalar	7
Şekil 1.3.	Koordinat sistemi üzerinde altı serbestlik dereceli gemi hareketleri	10
Şekil 1.4.	Karşılaşma açısı.....	12
Şekil 2.1.	Çubuk eleman koordinat sistemi	28
Şekil 2.2.	FPSO en kesitleri.....	52
Şekil 2.3.	JONSWAP dalga spektrumu	56
Şekil 2.4.	NPD rüzgar spektrumu.....	57
Şekil 2.5.	FPSO modeli	59
Şekil 2.6.	FPSO statik ofset testi	59
Şekil 2.7.	İleri öteleme hareketi serbest sönümlenme simülasyon sonucu.....	60
Şekil 2.8.	Dalıp-çıkma hareketi serbest sönümlenme simülasyon sonucu.....	60
Şekil 2.9.	Yalpa hareketi serbest sönümlenme simülasyon sonucu	61
Şekil 2.10.	Baş-kıç vurma hareketi serbest sönümlenme simülasyon sonucu	61
Şekil 2.11.	İleri öteleme hareketi zaman serisi.....	62
Şekil 2.12.	Yanal öteleme hareketi zaman serisi.....	62
Şekil 2.13.	Dalıp-çıkma hareketi zaman serisi	63
Şekil 2.14.	Yalpa hareketi zaman serisi.....	63
Şekil 2.15.	Baş-kıç vurma hareketi zaman serisi.....	63
Şekil 2.16.	Savrulma hareketi zaman serisi.....	64
Şekil 2.17.	Bağlama halatı no 1 gerilme zaman serisi.....	66
Şekil 2.18.	Bağlama halatı no 2 gerilme zaman serisi.....	66
Şekil 2.19.	Bağlama halatı no 3 gerilme zaman serisi.....	66
Şekil 2.20.	Bağlama halatı no 4 gerilme zaman serisi.....	67
Ek Şekil 1.	İleri öteleme hareketi zaman serisi (çelik halat ile bağlı).....	75
Ek Şekil 2.	Yanal öteleme hareketi zaman serisi (çelik halat ile bağlı).....	76
Ek Şekil 3.	Dalıp-çıkma hareketi zaman serisi (çelik halat ile bağlı).....	77
Ek Şekil 4.	Yalpa hareketi zaman serisi (çelik halat ile bağlı)	78

Ek Şekil 5. Baş-kıç vurma hareketi zaman serisi (çelik halat ile bağlı)	79
Ek Şekil 6. Savrulma hareketi zaman serisi (çelik halat ile bağlı).....	80
Ek Şekil 7. Bağlama halatı no 1 gerilme diyagramı (çelik halat ile bağlı)	81
Ek Şekil 8. Bağlama halatı no 2 gerilme serisi (çelik halat ile bağlı).....	82
Ek Şekil 9. Bağlama halatı no 3 gerilme serisi (çelik halat ile bağlı).....	83
Ek Şekil 10. Bağlama halatı no 4 gerilme serisi (çelik halat ile bağlı).....	84
Ek Şekil 11. Bağlama halatı no 1 gerilme diyagramı (çelik halat ile bağlı, $H_s=7$ m).....	85
Ek Şekil 12. Bağlama halatı no 2 gerilme diyagramı (çelik halat ile bağlı, $H_s=7$ m).....	86
Ek Şekil 13. Bağlama halatı no 3 gerilme diyagramı (çelik halat ile bağlı, $H_s=7$ m).....	87
Ek Şekil 14. Bağlama halatı no 4 gerilme diyagramı (çelik halat ile bağlı, $H_s=7$ m).....	88



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1.	Tanker tabanlı FPSO ana boyutları	51
Tablo 2.2.	Bağlama sistemleri ana bölümleri	53
Tablo 2.3.	Razyzer ana bilgileri.....	54
Tablo 2.4.	Çevresel koşullar	54
Tablo 2.5.	Serbest sönümlenme testi sonuçlarına göre doğal periyotlar	61
Tablo 2.6.	Serbest sönümlenme testi uygulama ile deneysel verilerin karşılaştırılması ...	61
Tablo 2.7.	Zamana bağlı simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması	64
Tablo 2.8.	Bağlama halatları gerilmeleri	65
Tablo 2.9.	Halat malzemelerine göre nümerik simülasyon sonuçları	67
Tablo 2.10.	Halat malzemelerine göre gerilmeler	68

SEMBOLLER DİZİNİ

- A_{jk} : Ek su kütlesi matrisi
 B_{jk} : Hidrodinamik sönüm kuvveti katsayısı matrisi
 C_{jk} : Hidrostatik geri getirici kuvvet katsayısı matrisi
 c : Dalga hızı
 d : Derinlik
 F_j : Uyarıcı dalga kuvveti
 g : Yerçekimi ivmesi
HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$: Kartezyen birim vektörler
 k : Dalga sayısı
 L : Gemi boyu
 \vec{N} : Tekne yüzeyi için normal vektörü
 P : Basınç
 \vec{r} : Tekne yüzeyi için konum vektörü
 S : Tekne ıslak yüzey alanı
 t : Zaman değişkeni
 T : Dalga periyodu
 u, v, w : Akışkan hız bileşenleri
 x, y, z : Hareketli koordinat sistemi eksenleri
 X, Y, Z : Referans koordinat sistemi eksenleri
 ζ_a : Dalga genliği
 θ : Karşılaşma açısı
 λ : Dalga boyu
 μ : Dinamik viskozite
 π : Pi sayısı
 ρ : Akışkan yoğunluğu
 ϕ : Hız potansiyeli fonksiyonu
 ω : Frekans

$\vec{\nabla}$: Gradyan vektörü

∇^2 : Laplace operatörü



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünya üzerinde petrol ve doğalgaza olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Günümüzde oldukça stratejik ve değerli enerji kaynağı olan petrol ve doğalgaz ülkelerin hızlı büyümesi, ekonomik ve teknolojik gelişmeleriyle paralellik gösterir. Enerji talebinin yerine getirilebilmesi için yeni bir takım teknolojilere ihtiyaç duyulur.

Son 50 yıl içerisinde yapılan çalışmalar sadece karalardan petrol rezervlerinden değil, denizlerdeki rezervlerden de yararlanabileceğimizi göstermektedir.

Son zamanlarda bu amaçla yüzer yapılar üretilmeye başlanmıştır. Bu yapılar kendi kendilerine arama, yükleme, işleme, depolama yapabildiklerinden ve ekonomik maliyetlerinden dolayı klasik tip ceket yapılı platformların yerlerini kısa sürede almışlardır. Bu yapılar; gemi formunda olan yüzer, üretim, depolama ve nakil amaçlı açık deniz yapıları (FPSO) olarak adlandırılan tankerler, yarı dalgıç platformlar, SPAR tip kolon platformlar ve gergi ayaklı platformlardır (TLP) . Bunlardan SPAR tip ve gergi ayaklı platformlar (TLP) son 30 yıl içerisinde daha çok Meksika Körfezi'nde konumlandırılmıştır. Buradaki platformlardan AUGER, MARS, URSA ve MARLIN 850m ile 1220m derinliklerdeki su seviyelerinde çalışan gergi ayaklı platformlara (TLP) örnektir. NEPTUNE (610m) , GENIS (790m) ve DIANA (1310m) ise ilgili derinliklerde çalışmakta olan 1996 ve 1998 arası yıllarda üretilmiş ve çalışmaya başlamış SPAR tip platformlara örnek gösterilebilir. Günümüzde ise daha çok kafesli SPAR tip platformlar uygun maliyetlerinden dolayı tercih edilmektedir. Bu son zamanlardaki yüzer yapıların kullanımının yaygınlaşması ve bu yapıların daha derin sularda daha verimli olarak kullanılabilmesi petrol şirketlerinin iştahını kabartmış, onların daha derin sularda petrol ve doğalgaz arama, çıkarma ve işleme çalışmaları yapmalarını sağlamıştır. Arama yapılan suların derinliğinin artması (1800m ve üzeri) daha yeni ve daha gelişmiş yüzer yapıların varlığına ihtiyaç doğurmuştur. Yüzer yapıların kurulumu da endüstriyel anlamda daha cazip hale gelir. Çünkü yüzer yapıların çevre şartlarına elverişliliği sabit platformlarınkine oranla çok daha iyidir.

Yüzer yapılar, çevresel koşullardan oluşan tepkileri minimum seviye indirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu da yüzer platformların diğer tip yapılara göre daha çok avantajlı olduğunu gösterir. Örneğin SPAR tip yapılara bakıldığında diğer yüzer tip yapılara kıyasla daha küçük

su yüzey alanlarına sahip oldukları görülür. Bunun sonucu olarak dikey dalga yüklerinden ve doğal dalıp-çıkma frekansı ile doğal baskın dalga frekansı arasındaki farktan dolayı oluşan dalıp-çıkma tepkisinde azalmalar görülür. Bu su yüzey alanları ne kadar azaltılırsa sonuçlarda da o kadar iyileşme gözlemlenir. Yüzeydeki üretim ekipmanları ve rijit rayzer kablolar tasarımı yapılırken yukarıdaki konu dikkate alınır. Su altı üretim ekipmanları ağacı ve serbest rayzerlerin maliyeti ise daha fazladır. Gergi ayaklı platformlar (TLP) için ise yüksek dayanımlı çelik gergi halatları kullanılır. Böylece petrol ve gaz çıkarımı sırasında platform çalışırken dengeli bir şekilde kalarak rezonans durumundan kaçınılır ve yüzey üretim ekipmanlarının rahatça kullanımına olanak sağlanır. Derin sulardaki yüzer yapılar için yapılan çalışmalarda birçok araştırmacı birleşik dinamik analizlerden elde edilen tepkilerin geleneksel bağlanmamış olarak yapılan analizlerden elde edilenlere göre daha gerçekçi ve kabul edilebilir olduğunu kanıtlamışlardır [1]. Gemi formunda tasarlanan yüzer, üretim, depolama ve nakil amaçlı açık deniz yapıları (FPSO) üretildiğinden itibaren ise büyük güverte boşlukları, maliyet tasarruf sorunları, daha az yağ sızdırmazlığı gibi sorunların çözümünde sağladığı avantajlardan dolayı Meksika Körfezi gibi ultra derin sularda kullanımı yaygınlaşmıştır. Okyanus Enerji Yönetimi, Yönetmelik ve Uygulama Bürosu'nda (BOEMRE) [2] FPSO'ların çift gövdeli tanker formunda olacak şekilde kullanılmasını uygun görmüştür. Büyük depolama kapasitesinin olması da bu yüzer, üretim, depolama ve nakil amaçlı açık deniz yapıları (FPSO) için deniz ile kara arasında herhangi bir aktarım maksatlı boru iletim hatlarına gerek duyulmamasından dolayı büyük bir avantajdır. LNG ve yardımcı tankerleri gibi tankerlerin petrol ve gaz aktarımları için bu tür boru hatlarına ihtiyaç vardır. Derin sulardaki yüzer, üretim, depolama ve nakil amaçlı açık deniz yapılarının (FPSO) ve bu tür yardımcı tankerlerle birlikte etkileşimli olarak hareket ederken gerçekleşen etkileşim sorunlarının çözülebilmesi için dinamik analiz kodları geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir.

1.2. Literatür Çalışması

Taret-bağlı FPSO dinamik hareket analizi için viskoz sönümlenme hakkındaki çalışmalar kapsamlı bir şekilde Wichers [4] tarafından yürütülmüştür. Rüzgar, akım ve yüksek genlikli düzensiz dalgalara maruz kalan tek noktadan bağlı FPSO hareketi için denklemler geliştirilmiş, birleşik olmayan analiz kullanılarak yapı ve bağlama sistemlerinin hareketlerinin çözümleri ayrı şekilde gerçekleştirilmiştir. Viskoz reaksiyon kuvvetlerinin

düşük frekans bileşeninin birleştirme etkisi Wichers ve Chunqun Ji tarafından çalışılmıştır. Wichers ve Chungun Ji bir dizi deneysel çalışmalar yürütmüş, sakin suda hareketin birleşik modlarına bağlı birleştirme etkileri açısından incelemiş ve bu çalışmalarda yapı dinamiğinde normal yöndeki viskoz etkilerin önemli katkıları olduğunu ve ihmal edilemeyeceklerini göstermişlerdir [5]. Buna ek olarak, rijit durumda olan yüzer yapı hareketi ile bağlama halatları ve rayzer sistemlerinin hareketlerinin kavrama etkisi Wichers ve Develin tarafından incelenmiştir [6].

Meksika Körfezi'nde taret-bağlı FPSO gemisi için oluşan tepkiler Baar vd. [7] tarafından çalışılmıştır. FPSO dinamik kuvvetleri, lineer ve nonlinear rüzgar, dalga ve 100 yıllık kasırga koşulları altında incelenmiş, taret-bağlı FPSO tepkilerinin doğrusal olmayan çevresel koşullara karşı çok daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. OTRC (Offshore Technology of Research Center in Texas A&M University) tarafından yürütülen doğrusal ve doğrusal olmayan çevre koşullarındaki taret-bağlı FPSO için deneysel çalışmaları Ward vd. [8] tarafından sunulmuştur. Yüzer yapı/ bağlama / rayzer sistemleri birleşik analizi Arcandra vd. tarafından [9] yüzer yapılar için geliştirilen dinamik analiz programları kullanılarak çalışılmış, 1829 m derinlik ve 100- yıllık fırtına koşulları altında çalışan FPSO zaman simülasyonu için polyester ve şamandıra tipi olmak üzere iki çeşit bağlama sistemi geliştirilmiştir.

Mavna ve mini bir TLP' den (Tension Leg Platform) oluşan çoklu yapı sistemi, hidrodinamik karakteristikleri yönünden Teigen [10] tarafından çalışılmıştır. Tek ve çok yapıli sistemlerin hidrodinamik katsayıları karşılaştırılmış ve aynı zamanda çok yapıli sistemlerin ağ yapısı boyutlarına göre yakınsama testlerini yapmış, aynı zamanda iki yapıli sistemlerin hareket tepkileri için hidrodinamik etkileşimin önemi vurgulanarak birleşik akış etkisi ihmalinin hatalı ve yakınsamayan bir tahmine neden olacağı belirlenmiştir. Inoue vd. [11] tarafından sıfır ilerleme hızlı dalgalar ile FPSO – LNG taşıyıcı sistemi için sürüklenme kuvveti çözülmüş, potansiyel sönümlenmeye viskoz sönümlenmeler de eklenerek sürüklenme kuvveti etkileri, düzenli ve düzensiz dalgalarda yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yan yana bağlanan FPSO ve LNG tankerleri yapı sistemi için doğrusal potansiyel bir çözücü Huijsmans [12] tarafından geliştirilmiş, ortalama ve düşük frekanslı dalga sürüklenme kuvvetleri bu çözücü kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı model için, Buchner vd. [13] tarafından FPSO ile bağlı LNG tanker için hidrodinamik tepkileri tahmin eden sayısal simülasyon gerçekleştirilmiştir. Çok yapıli yüzer sistemlerin hareket ve kuvvetleri ile hidrodinamik etkileşimleri WAMIT programı kullanılarak Clauss vd. [14] tarafından,

yüksek mertebeden sınır eleman yöntemi kullanılarak ise Chai vd. [15] tarafından incelenmiştir.

1.3. Yüzer Platformların Dinamik Analizi

Bu kısımda dinamik dalga yükleri ve yüzer yapıların dinamik tepkileri anlatılmıştır. Öncelikle ikinci dereceden doğrusal dalga teorileri serbest su yüzeyi sınır değer problemleri göz önüne alınarak incelenmiş ve Morison denklemleri ve dalga sürüklenme sönümlenmeleri dikkate alınarak serbest su yüzeyi sınır değer problemi için çözüm yollarından biri olarak karşımıza çıkmıştır.

1.4. Yüzey Dalgalarında Sınır Değer Problemi

Serbest yüzey sınırını çevreleyen bölgedeki akış, sınır değer problemi olarak tanımlanır. Yüzey dalga teorisi ise serbest yüzey ile sınır değer probleminin türetilmesinden elde edilmiştir. Burada akış çevrimsiz ve sıkıştırılmaz kabul edilerek hız potansiyeli Laplace denklemi kullanılarak (1.1) ve (1.2) şeklinde ifade edilebilir.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1.1)$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.2)$$

Burada u akışkan hızının x -, y - ve z - eksenlerindeki bileşenlerini temsil eder ve (1.3) denklemi ile ifade edilir.

$$u = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.3)$$

Bu ifadede ϕ hız potansiyeli olarak tanımlanır. (1.2) denklemini çözmek için belirli sınır koşullarına ihtiyaç vardır. Deniz tabanı bir sınır koşuludur. Buna ek olarak dinamik ve kinematik olmak üzere iki tane de serbest yüzey koşulu vardır. Deniz tabanı sınır koşulu şöyle ifade edilir:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = -d \quad (1.4)$$

Burada d deniz derinliğini temsil eder. Kinematik koşullar serbest yüzeydeki akış partiküllerinin serbest yüzeyin herhangi bir yerinde pozisyonunu koruma isteğidir. Kinematik serbest yüzey koşulu (1.4) denklemi ile gösterilir:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial z} = 0, \quad z = -\eta \quad (1.5)$$

Burada ise $\eta(x, y, t)$ serbest yüzey düzleminde zamana bağlı yer değişimini ifade eder. Dinamik serbest yüzey koşulu ise serbest yüzey üzerindeki basıncın sabit, atmosfer basıncına eşit ve normal atmosfer basıncının sıfır kabul edildiği durumdur. g yer çekimi ivmesi olmak üzere denklem (1.6) ile gösterilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \phi \cdot \nabla \phi) + gz = 0, \quad z = -\eta \quad (1.6)$$

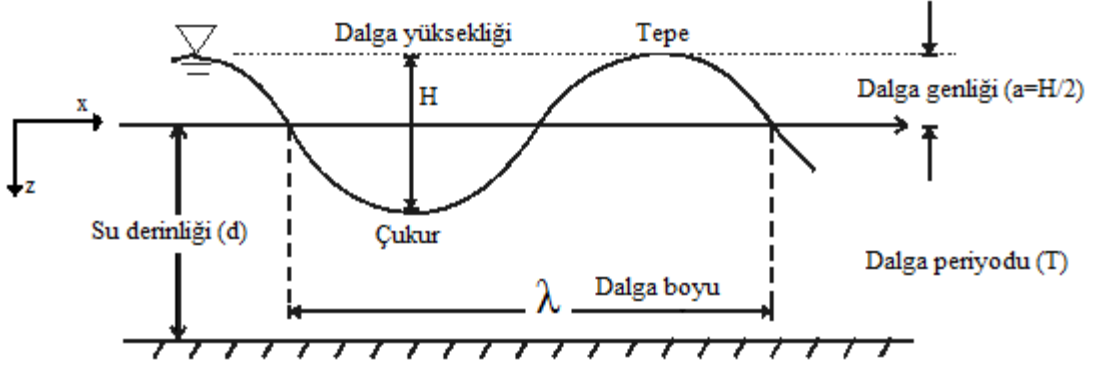
Belirli yaklaşımlar altında (1.6) denklemini çözebilmek için en uygun yöntem *pertürbasyon* yöntemidir. Burada dalga genliği serbest yüzey sınır koşullarını sağlamak için çok küçük kabul edilir. Yöntemde, dalga yüksekliği (dalga parçacık deplasmanı) ve hız potansiyeli kuvvet serileri çok küçük boyutsuz pertürbasyon parametresi oluşturacak şekilde alınmalıdır. Doğrusal, ikinci dereceden veya daha yüksek mertebelerden dalgaların eldesi için ise; dalga yüksekliği ve hız potansiyeli pertürbasyon parametrelerini göstermek üzere, dalga denkleminin pertürbasyon formülü ile çözümü yapılabilir [3].

1.5. Dalga Teorisi

Serbest yüzey üzerindeki dalga etkilerinin önemliliği, akışkanlar mekaniğinin diğer dallarıyla kıyaslandığında, gemi hidromekaniğinin eşsiz bir yönüdür. Gemi hidromekaniğinde yüzen veya sabitlenmiş yapılar üzerindeki dalga etkileri incelenir.

Düzenli dalgalar sonsuz sayıda dalga tepesi ve dalga çukurundan oluşan sinüzoidal profillere sahiptir. Dalga tepesi ve dalga çukurları dalga ilerleme yönüne dik olarak

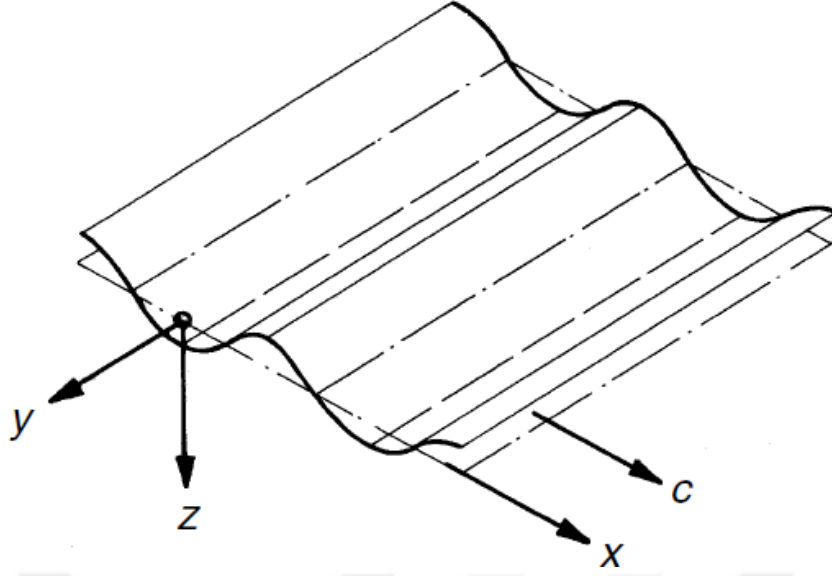
sıralanmışlardır. Düzenli dalgalar lineer denizcilik problemlerinin çözümünde bir yapıtaşı niteliğindedirler.



Şekil 1.1. Düzenli dalga profili [15].

Düzenli dalgalar genel olarak bir uzunluk değeri (dalga boyu, λ ya da dalga sayısı, k) ve bir zaman parametresi (dalga periyodu, T ya da dalga frekansı, ω) ile ifade edilebilir. Şekil 1.1 ile gösterilen bir düzenli dalga profili için H dalga yüksekliğidir ve genliğin iki katıdır. İki dalga tepesi ya da dalga çukuru arasındaki mesafe dalga boyudur ve λ ile gösterilir. Dalganın bir dalga boyu kadar yol alması için geçen süreye ise dalga periyodu (T) denir. Dalga sayısı k ve dalga frekansı ω ise sırasıyla şöyle tanımlanır:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1.7)$$



Şekil 1.2. Düzenli dalgalar [16].

Dalga hızı c , bir dalga tepesinin ya da dalga çukurunun yer değiştirme hızıdır ve (1.8) denklemi ile bulunur.

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (1.8)$$

Düzenli dalgalarda dalga sayısı k ile ilgili şu bağıntılar da yazılabilir:

$$k = \frac{\omega^2}{g} \text{ derin suda,} \quad k \tanh(kd) = \frac{\omega^2}{g} \text{ sığ suda} \quad (1.9)$$

Burada g yerçekimi ivmesi, d ise su derinliğini ifade eder. Bu eşitliklerden yola çıkarak da derin su için dalga hızını aşağıdaki bağıntılar ile de ifade edilebilir:

$$c = \sqrt{\frac{g}{K}} = \frac{g}{\omega} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi} \quad (1.10)$$

Gemi hareketleri analizinde, ilgilenen dalgalarda yerçekimi etkisi ve yüzey gerilimi etkileri önem taşımaktadır. Suyun sıkıştırılabilirliği derin sulardaki hareketleri için viskozite

ihmal edilerek ideal akışkan varsayımı ile hesaplama yapılabilir. Bu nedenle dalgaların tanımında potansiyel teori kullanılabilir [16].

Sınır değer problemlerinde ise, birinci ve ikinci mertebeden parametrelili pertürbasyon formüllerini kullanılarak, birinci dereceden ve ikinci dereceden çözümler elde edilir. Birinci dereceden çözüm lineer dalga teorisini, ikinci dereceden çözüm ise ikinci dereceden dalga teorisini oluşturur. Burada hız potansiyeli tüm pertürbasyon terimlerin toplamı ile, dalga yüksekliği ise tüm pertürbatif dalga yüksekliklerinin toplamından oluşan bir dalga yüksekliği ile ifade edilir. Sonuç olarak, toplam hız potansiyeli ve dalga yüksekliği (1.10) ve (1.11) denklemlerindeki gibi ifade edilir.

$$\phi = \sum \varepsilon^{(n)} \phi^{(n)} \quad (1.11)$$

$$\eta = \sum \varepsilon^{(n)} \eta^{(n)} \quad (1.12)$$

Buradan lineer dalga denklemleri pertürbasyon formülünün hız potansiyeli ve dalga yüksekliği formundaki çözümlerine bağlı olarak elde edilir. Buna göre; Birinci dereceden hız potansiyeli:

$$\phi^{(1)} = \text{Re} \left[\frac{-igA \cosh(k(z+d))}{\omega \cosh(kd)} e^{i(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t)} \right] \quad (1.13)$$

Birinci dereceden dalga yüksekliği ise;

$$\eta^{(1)} = A \cos(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t) \quad (1.14)$$

dir. Burada k dalga sayısını, λ dalga uzunluğunu, ω dalga frekansını, A dalga genliğini, θ ise dalga karşılaşma açısını ifade eder. Aynı şekilde de ikinci dereceden potansiyel ve ikinci dereceden dalga yüksekliği de pertürbasyon formüllerinin potansiyel ve dalga yüksekliği formunda çözümüne bağlı olarak elde edilir.

İkinci dereceden potansiyel:

$$\phi^{(2)} = \text{Re} \left[\frac{3}{8} \omega A^2 \frac{\cosh 2k(z+d)}{\sin^4 kd} e^{i(2kx \cos \theta + 2ky \sin \theta - 2\omega t)} \right] \quad (1.15)$$

İkinci dereceden dalga yüksekliği ise;

$$\eta^{(2)} = A^2 k \frac{\cosh(kd)}{\sin^3 h(kd)} (2 + \cosh(2kd)) \cos(2kx \cos\theta + 2ky \sin\theta - 2\omega k) \quad (1.16)$$

olur.

Gerçek denizde ise, dalga düzensiz fazda ve karışıktır. Tam gelişmiş dalga, enerji spektrumları ile rastgele ve karışık fazlı, düzensiz dalga topluluklarıyla birlikte modellenir. Burada Pierson-Moskowitz ve JONSWAP spektrumları en yaygın bilinen ve kullanışlı olan enerji spektrumları olarak gösterilebilir.

Verilen herhangi bir genlikte $\zeta(\omega)$ için zaman serileri büyük sayılarda ve rastgele karışık fazlı lineer dalgaların bileşenleri ile elde edilir.

$$\begin{aligned} \eta(x, y, t) &= \sum_{i=1}^N A_i \cos(k_i x \cos\theta + k_i y \sin\theta - \omega t + \varepsilon_i) \\ &= \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^N A_i e^{i(k_i x \cos\theta + k_i y \sin\theta - \omega t + \varepsilon_i)} \right] \end{aligned} \quad (1.17)$$

Burada $A_i = \sqrt{2\zeta(\omega_i)\Delta\omega}$ olmak üzere i -inci dalganın genliğidir. $\Delta\omega$ frekans aralığı, ε_i ise faz açısıdır. Dalga bileşenlerinin artışını engellemek için ve uzun süreli zaman simülasyonların hesaplama verimliliğini artırmak için değiştirilmiş (1.17) formülü kullanılır.

$$\eta(x, y, t) = \operatorname{Re} \left[\sum_{j=1}^N A_j e^{i(k_j x \cos\theta + k_j y \sin\theta - (\omega'_j t + \varepsilon_j))} \right]$$

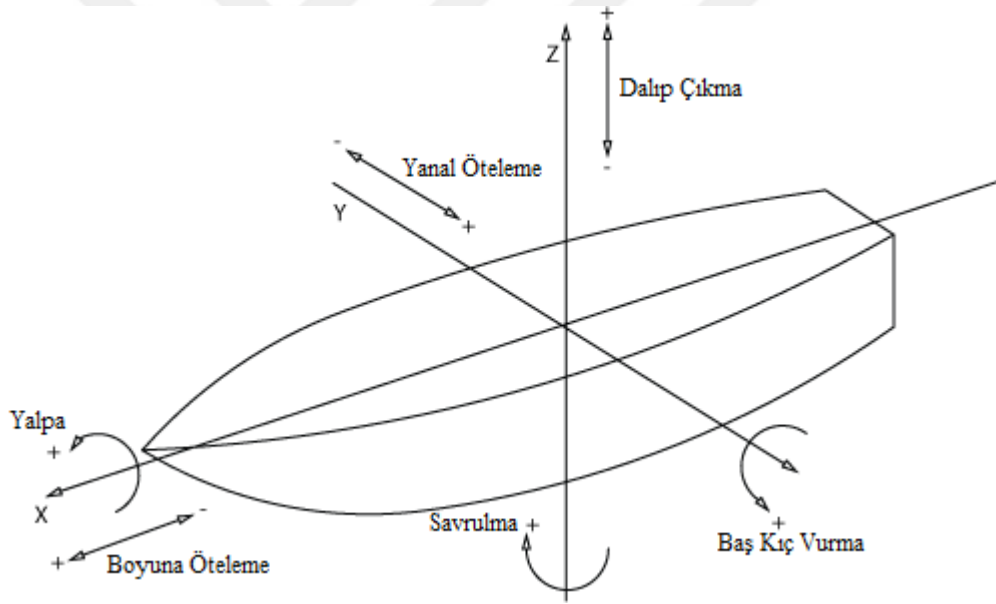
Burada $\omega'_j = \omega_j + \delta\omega_j$ ve $\delta\omega_j$ rastgele pertürbasyon sayıları olmak üzere $-\frac{\Delta\omega}{2}$ ve $\frac{\Delta\omega}{2}$ arasında seçilir. Toplam potansiyel ve dalga yüksekliği her mertebeden denklemlerin difraksiyon ve radyasyonu da içerecek şekilde çözümlerinin toplanmalarıyla elde edilir.

1.6. Gemi Hareketleri ve Denizcilik

Dalgalar içindeki bir gemi Şekil 1.3' te görüldüğü gibi üçü öteleme, üçü dönme hareketleri olmak üzere altı serbestlik dereceli salınım hareketi yapar. Bu hareketler;

- Boyuna öteleme
- Yanal öteleme
- Dalıp çıkma
- Yalpa
- Baş - kış vurma
- Savrulma

hareketleri olarak adlandırılmıştır.



Şekil 1.3. Koordinat sistemi üzerinde altı serbestlik dereceli gemi hareketleri [17].

Dalıp çıkma, baş kış vurma ve yalpa hareketleri hidrostatik geri getirme kuvvetine sahip oldukları için rezonans salınım periyodu mevcuttur. Bu nedenle bu hareketler diğerlerine göre daha önemlidir. Dalıp çıkma hareketi konvansiyonel gemi tipleri için genellikle sorun yaratmamaktadır ancak yüzey etkili gemiler gibi hava yastığına sahip gemi tiplerinde tekne ve dalgalar arasındaki karşılaşma frekansının yüksekliğine bağlı olarak dalıp çıkma hareketi rezonansa girmekte ve sorun oluşturmaktadır. Diğer taraftan sondaj yapan

gemilerde ve platformlarda dalıp çıkma hareketi sondaj işlemini güçleştirmekte veya olanaksız hale getirebilmektedir [18].

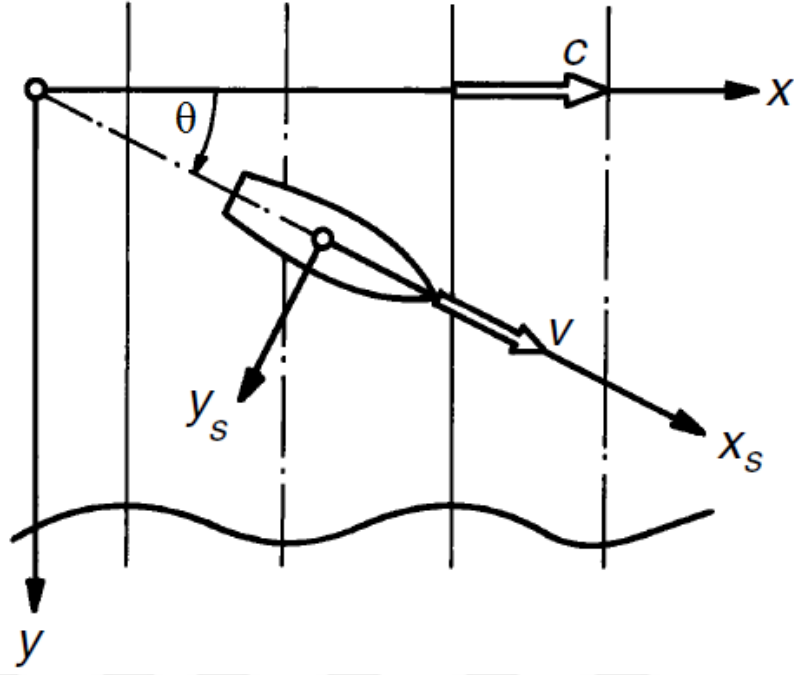
Baş-kıç vurma hareketi konvansiyonel gemiler için dalıp çıkma hareketine göre daha fazla rahatsızlık ve tehlike unsurudur. Özellikle baştan ve baş omuzluktan gelen dalgalarda baş kıç vurma genliğinin artması gemideki yüke, ekipmana veya mürettebat ve yolcuya zarar verebilir. Bu nedenle genellikle gemi kaptanı bu etkileri azaltmak için hız kesmek veya rota değiştirmek zorunda kalacaktır.

Yalpa hareketi konvansiyonel gemi tipleri için en çok sorun yaratan hareketlerin başında gelir. Gemi üzerindeki ekipman ve tesisata zarar verebilen yalpa hareketi özellikle yolcu ve mürettebat üzerinde çok etkilidir. Düşey ve yatay ivmelenme ile birlikte deniz tutmasının temel nedenlerinden biri olan yalpa hareketi yolcu konforunu olumsuz etkilerken savaş gemileri ve balıkçı gemileri gibi mürettebatını etkin bir şekilde çalıştırmak zorunda olan gemilerde ciddi sorunlar oluşturur. Bordadan gelen dalgalarda özellikle rüzgarın da katkısı ile tehlikeli derecede yana yatmalar ve hatta alabora olma riski ortaya çıkabilir.

Geminin dalgalar içindeki hareketleri nedeniyle ortaya çıkan önemli bir etki geminin ileri hareketine engel olan ek dirençtir. Bu direncin kaynağı gemi hareketleri nedeniyle oluşan dalgalara aktarılan enerji ve gemiye gelen dalgaları yansıtmak ve kırmak için yapılan işlerdir.

Dalgalar içindeki bir tekne üzerindeki basınç sürekli değişir ve bu değişimler üç türlü dalga yükünün ortaya çıkmasına neden olur:

- Yerel hidrodinamik basınç yükleri
- Basınç farklılıklarının integrallerinden kaynaklanan boyuna kesme kuvvetleri, burulma ve eğilme momentleri
- Güverte su basması ve dövünme esnasında yerel olarak gemi üzerinde oluşacak ani basınç değişimlerinin teknede yaratacağı titreşimden kaynaklanan eğilme ve burulma momentleri [19].



Şekil 1.4. Karşılaşma açısı [16].

Gemilerin dalgalar arasındaki hareketleri incelenirken karşılaşma açısı ve karşılaşma frekansı adına iki kavram kullanılır. Karşılaşma açısı θ dalgaların ilerleme yönünün vektörü ile geminin merkez hattı doğrultusundaki pozitif ileri hız vektörü arasındaki açıdır (Şekil 1.4.). Karşılaşma frekansı ise (1.27) denklemi ile belirtilmiştir [16].

$$\omega_e = |\omega - KV \cos \theta| = \left| \omega - \frac{\omega^2 V}{g} \cos \theta \right| \quad (1.27)$$

1.7. Difraksiyon ve Radyasyon Teorisi

Gelen dalgaların tekne ve platformlar üzerinde oluşturduğu kuvvetler uyarıcı dalga kuvvetleri olarak tanımlanır. Uyarıcı kuvvetler genellikle Froude-Krylov kuvvetleri ve difraksiyon kuvvetleri olmak üzere iki bileşene ayrılır. Froude-Krylov kuvvetleri gelen dalgaların yüzer yapının üzerinde oluşturduğu hidrodinamik basınç alanından kaynaklanan kuvvetlerdir.

Difraksiyon (kırınım) dalgaları, serbest yüzmekte olan veya sabitlenmiş yapılar yüzeyine gelerek kırınımına uğrayan dalgalardır. Difraksiyon dalgalarının yüzen cisimler

üzerinde oluşturduğu hidrodinamik basınç alanından kaynaklanan kuvvetler de difraksiyon kuvvetleridir.

Radyasyon (saçılım, yayılım) dalgaları ise serbest yüzmekte olan yapılarında dalgalar arasındaki hareketinden kaynaklanan ya da yapının sakin suda zorlanmış salınım hareketinden dolayı oluşturduğu dalgalardır. Sabitlenmiş yapılar için radyasyon dalgalarından söz edilemez. Radyasyon dalgalarının bu yüzer yapılar üzerinde oluşturduğu hidrodinamik basınç alanından kaynaklanan kuvvetler de radyasyon kuvvetleridir ve bu kuvvetler ek su kütlesi ve sönüm katsayısı terimleri cinsinden ifade edilebilir [18].

1.8. Morison Denklemi

İnce silindirik yüzer yapıların atalet etkisi, ek su kütlesi etkisi ve sürüklenme kuvvetinin sönümleme etkilerinin hesaplanması için Morison vd. tarafından (1.18) denklemi geliştirilmiştir [3]:

$$F_M = C_M \rho V \ddot{u}_n - C_a \rho V \ddot{\zeta}_n + \frac{1}{2} \rho C_D D_s (u_n - \dot{\zeta}_n) |u_n - \dot{\zeta}_n| \quad (1.18)$$

Burada F_M Morison kuvvetini, V ise birim uzunluk başına düşen hacmi temsil eder ve D ince silindirik yapının çapını temsil etmek üzere $V = \frac{\pi D^2}{4}$ formülü ile hesaplanır.

$C_M = 1 + C_a$ olmak üzere atalet, C_a ek su kütlesi, C_D sürüklenme katsayılarını gösterirler. D_s ince silindirik yapının genişlik veya çapını, \dot{u}_n ve u_n sırasıyla ince silindirik yapı üzerindeki normal akışın ivmesini ve hızını, $\ddot{\zeta}_n$ ile $\dot{\zeta}_n$ de sırasıyla ince silindirik yapının teğetsel ivmesini ve hızını gösterir. Burada yüzer yapı üzerindeki sürüklenme kuvveti ihmal edilememektedir. Çünkü yapının narinliği (genişlik ya da çapının uzunluğa oranı) dalga boyu ile karşılaştırıldığında çok küçük kalmaktadır. Bundan dolayı da yine viskoz etkiler de ihmal edilebilir değildir. Son olarak (1.18) denkleminde bulunan kuvvet dalga kuvvetlerine eklenmek suretiyle yapı üzerindeki toplam kuvvetler bulunur.

1.9. Hidrodinamik Kuvvetler

Bu kısımda hidrodinamik kuvvetler anlatılmıştır.

1.9.1. Birinci Mertebeden Hidrodinamik Kuvvetler ve Momentler

Bütün potansiyellerin bulunmasından sonra birinci mertebeden hidrodinamik kuvvet ve momentlerin hesaplanmasına geçilebilir. Bunun için Yapının yüzeylerindeki basınç dağılımlarının integralinden faydalanılır.

Yüzeydeki ($d\Omega_B$) basınç potansiyeli (1.19) denklemleri ile bulunmaktadır:

$$p^{(1)} = -\rho \left(\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial t} + gz \right) \quad (1.19)$$

burada ρ yoğunluktur. Kuvvet momentlerin altı bileşenleri de aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_j^{(1)}(t) = -\rho g \iint_{d\Omega_B} z n_j dS - \rho \operatorname{Re} [i\omega \zeta_j e^{-i\omega t} \iint_{d\Omega_B} \phi_j n_j dS - \quad j = 1, 2, \dots, 6$$

$$-\rho \operatorname{Re} [i\omega A e^{-i\omega t}] \iint_{d\Omega_B} (\phi_I + \phi_D) n_j dS \quad (1.20)$$

Burada $n = \begin{cases} (n_1, n_2, n_3) & , \quad j = 1, 2, 3 \\ (n_4, n_5, n_6) = r \times n & , \quad j = 4, 5, 6 \end{cases} \quad (1.21)$

olur.

Yukarıda (1.20) denkleminde üç terim yapı kuvvetleri ve momentlerine olan farklı katkıları temsil ederler. İlk terim ($F_S^{(1)}$) hidrostatik geri getirme kuvvetini, ikinci terim ($F_R^{(1)}$) radyasyonel potansiyele bağlı kuvvetlerini, son terim ise ($F_E^{(1)}$) gelen dalgaların ve difraksiyon dalgalarının potansiyelleri tarafından oluşan kuvvetleri gösterir. Hidrostatik geri getirme kuvvetleri, hidrostatik geri getirici kuvvet katsayılar matrisi ile hareket tepkilerinin çarpılmasıyla elde edilir.

$$F_S^{(1)} = -[K]\{\zeta^{(1)}\} \quad (1.22)$$

Burada [K] hidrostatik geri getirici kuvvet katsayılar matrisi olmak üzere bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$K_{33} = \rho g \iint_{d\Omega_B} n_3 dS = \rho g A_{wp}$$

$$K_{35} = -\rho g \iint_{d\Omega_B} x n_3 dS = \rho g A_{wp} x_f$$

$$K_{44} = \rho g \iint_{d\Omega_B} y^2 n_3 dS + \rho g \nabla z_b - m g z_{cg}$$

$$K_{45} = -\rho g \iint_{d\Omega_B} x y n_3 dS$$

$$K_{46} = -\rho g \nabla x_b + m g x_{cg}$$

$$K_{55} = \rho g \iint_{d\Omega_B} x^2 n_3 dS + \rho g \nabla z_b - m g z_{cg}$$

$$K_{66} = -\rho g \nabla y_b + m g y_{cg} \quad (1.23)$$

Burada $K_{mn} = K_{nm}$ bütün m ve n değerleri için geçerlidir. A_{wp} su hattı yüzey alanı, x_f ve y_f su hattı yüze alanından ağırlık merkezine kadar olan uzaklığın x ve y bileşenleri, ∇ yapının hacmini, (x_{cg}, y_{cg}, z_{cg}) ağırlık merkezinin konumunu, (x_b, y_b, z_b) ise hacim merkezinin konumunu gösterir.

Hidrostatik geri getirici kuvvet katsayılar matrisi yüzen yapının hareketinin analizlerinde kullanılır. Radyasyonel potansiyel kuvvet ve momentleri (1.20) denkleminin ikinci terimine karşılık gelen kısmı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} F_R^{(1)} &= -\rho \operatorname{Re}[\zeta_j e^{-i\omega t} \iint_{d\Omega_B} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \phi_j dS] = \operatorname{Re}(M^a \ddot{\zeta}^{(1)} + C \dot{\zeta}^{(1)}) \\ &= \operatorname{Re}[(-\omega^2 M^a - i\omega L) \zeta g e^{-i\omega t}] \end{aligned} \quad (1.24)$$

M^a ek su kütlesi katsayılarını, C radyasyon sönümlenme katsayısını ve $\zeta = \zeta e^{-i\omega t}$ de altı serbestlik dereceli hareketi göstermektedir. Denklem (1.25) ve (1.26)' da M^a ve C belirtilmiştir.

$$M^a = \rho \operatorname{Re} \left[\iint_{d\Omega_B} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \phi_j dS \right] \quad (1.25)$$

$$C = \rho \operatorname{Im} \left[\iint_{d\Omega_B} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \phi_j dS \right] \quad (1.26)$$

Bunlar simetriktir ve yapı hareketinin frekansına bağlı olarak değişmektedir. (1.20) denkleminin son terimi düzgün dalga kuvvetine karşılık gelir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$F_E^{(1)} = -\rho \operatorname{Re} \left[A e^{-i\omega t} \iint_{d\Omega_B} (\phi_I + \phi_D) \frac{\partial \phi_j}{\partial n} dS \right] \quad (1.27)$$

Bu şekilde hareketin denklemi (1.28) formunda olur:

$$M \ddot{\zeta}^{(1)} = F_S^{(1)} + F_R^{(1)} + F_E^{(1)} = -K\zeta - (M^a \ddot{\zeta} + C \dot{\zeta}) + F_E^{(1)} \quad (1.28)$$

Burada M kütle matrisi olmak üzere şu şekilde tanımlanır:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_{cg} & -my_{cg} \\ 0 & m & 0 & -mz_{cg} & 0 & mx_{cg} \\ 0 & 0 & m & my_{cg} & -mx_{cg} & 0 \\ 0 & -mz_{cg} & my_{cg} & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mz_{cg} & 0 & -mx_{cg} & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ -my_{cg} & mx_{cg} & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

V , yapının hacmini göstermek üzere (1.30) denklemi ile m kütlesi hesaplanır. (1.30) denklemi ile de kütle atalet momenti (I) hesaplanır.

$$m = \iiint_V \rho_B dV \quad (1.30)$$

$$I = \iiint_V \rho_B (x_i x_j \delta_{mn} - x_m x_n) dV \quad (1.31)$$

Burada ρ_B yapı malzemesi yoğunluğu, δ_{mn} ise *Kronecker Delta* fonksiyonudur.

1.9.2. İkinci Mertebeden Hidrodinamik Kuvvetler ve Momentler

Gövde üzerindeki ikinci mertebeden hidrodinamik kuvvetler ve momentler, yapı ıslak yüzey üzerine etki eden hidrostatik basıncın integrali alınarak anlık zaman adımımda doğrudan bulunabilir.

İkinci mertebeden hidrodinamik basınç aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P^{(2)} = -\rho \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi^{(1)})^2 \quad (1.32)$$

Bikrometik dalga etkisi göz önüne alındığında (1.32) hidrodinamik basınç denklemi tekrardan elde edilerek denklem (1.33) şeklini alır [3].

$$P^{(2)} = \text{Re} \left[\sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 A_m A_n p_{mn}^+ e^{-i\omega t} + A_m A_n^* p_{mn}^- e^{-i\omega t} \right] \quad (1.33)$$

p^+ ve p^- ikinci mertebeden basınç için ikinci dereceden transfer fonksiyonlarının toplamını ve farkını ifade eder. İkinci dereceden kuvvetler ve momentler şu şekilde tanımlanır:

$$F^{(2)} = F_S^{(2)} + F_R^{(2)} + F_E^{(2)} \quad (1.34)$$

Burada $F_S^{(2)}$ ikinci mertebeden hidrostatik kuvveti, $F_R^{(2)}$ ikinci dereceden radyasyon potansiyel kuvvetini ve $F_E^{(2)} = F_P^{(2)} + F_Q^{(2)}$ olmak üzere ikinci mertebeden etkiyen dalga kuvvetini gösterir. $F_E^{(2)}$ kuvvetinin bileşenlerinden $F_P^{(2)} = F_I^{(2)} + F_D^{(2)}$ *gelen dalga* ve *difraksiyon dalga* potansiyel kuvvetlerinin toplamını, $F_Q^{(2)}$ ise birinci mertebeden kuvvetlerin ikinci dereceden gözlemlenen etkilerini ifade etmektedir. Bileşen kuvvetler aşağıdaki gibi potansiyel kuvvetlerin integralinden elde edilmiştir:

$$F_S^{(2)} = \rho g A_{wp} (\xi_z^{(2)} + y_f \alpha_x^{(2)} - x_f \alpha_y^{(2)}) k \quad (1.35)$$

$$F_R^{(2)} = \rho \iint_{d\Omega_B} \frac{\partial \Phi_R^{(2)}}{\partial t} n dS \quad (1.36)$$

$$F_{I,D}^{(2)} = \rho \iint_{d\Omega_B} \frac{\partial \Phi_{I,D}^{(2)}}{\partial t} n dS \quad (1.37)$$

$$F_E^{(2)} = \text{Re} \left[\sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 A_m A_n f_{mn}^+ e^{-i\omega t} + A_m A_n^* f_{mn}^- e^{-i\omega t} \right] \quad (1.38)$$

Burada f^+ ve f^- , gelen frekans kuvvetlerinin toplamı ve farkını gösteren ikinci dereceden transfer fonksiyonlarıdır.

İkinci dereceden transfer fonksiyonları h_{mn}^+ , h_{mn}^- ve g_{mn}^+ , g_{mn}^- bileşenlerinin toplamından oluşur. Burada h_{mn}^+ ve h_{mn}^- birinci mertebeden ikinci dereceden transfer fonksiyonunun katkısı, g_{mn}^+ ve g_{mn}^- terimleri ise gelen dalga potansiyeli ve difraksiyon potansiyeline bağlı olarak gelen dalga frekanslarının toplam ve farkının ikinci dereceden transfer fonksiyonları toplamını ifade eder. İkinci dereceden transfer fonksiyonunun her bir bileşeni olan bu terimler, aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanır:

$$f_{mn}^+ = h_{mn}^+ + g_{mn}^+ \quad (1.39)$$

$$h_{mn}^+ = \left[-\frac{\rho}{4} \iint_{d\Omega_B} (\nabla \phi_m^{(1)} \cdot \nabla \phi_n^{(1)}) n dS - \frac{\rho \omega_m \omega_n}{4g} \iint_{d\Omega_B} \phi_m^{(1)} \phi_n^{(1)} N dL \right] / A_m A_n \quad (1.40)$$

$$h_{mn}^- = \left[-\frac{\rho}{4} \iint_{d\Omega_B} (\nabla \phi_m^{(1)} \cdot \nabla \phi_n^{(1)*}) n dS - \frac{\rho \omega_m \omega_n}{4g} \iint_{d\Omega_B} \phi_m^{(1)} \phi_n^{(1)*} N dL \right] / A_m A_n^* \quad (1.41)$$

$$g_{mn}^+ = \left[\rho i \omega \iint_{d\Omega_B} (\phi_l^+ \phi_l^+) n dS \right] / A_m A_n^* \quad (1.42)$$

Burada $N = n / \sqrt{(1 - n_z^2)}$ ve k ise z- yönündeki birim vektördür.

2. YAPILAN ÇALIŞALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER

2.1. Frekansa Bağlı Çözüm

Yüzer yapı sistemlerinin hareketlerinin belirlenmesinde doğrusal olmayan sistemler (bağlama sistemleri) ve hareket kontrol mekanizmaları gibi kontrol mekanizmalarının çevresel kuvvetlere karşı (rüzgar, dalga, akım gibi) tepkilerini incelemek oldukça karışıktır. Sistematik bir parametrik çalışma için, çok sayıda verilen çevre koşullarının olası kombinasyonlarını bir zaman aralığında analiz yapmak, zaman tasarrufu sağlar. Bununla beraber, sistem tepkisinin bir frekans alanında değerlendirilmesi bu şartı yerine getirmek için hızlı ve basit bir yoldur [20].

2.2. Dalga Yükleri

Doğrusal dalga yükleri frekansa bağlı olarak hesaplanır ve ikinci dereceden toplam-fark frekans dalga yükleri bikromatik dalga etkileşimlerine göre hesaplanır.

Gerçek deniz yapısı karışık dalgalardan oluşur. Bu nedenle gerçekte yüzer yapıya etkileyen dış dalga yükleri de bu karışık dalgaların oluşturduğu dalga yükleridir. İkinci mertebeden lineer hidrodinamik kuvvetler iki terimli Volterra serisi kullanılarak zaman alanında yazılırsa:

$$F^{(1)}(t) + F^{(2)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)\eta(t - \tau) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2)\eta(t - \tau_1)\eta(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (2.1)$$

denklemini elde edilir. Burada $h_1(\tau)$ doğrusal impuls fonksiyonu, $h_2(\tau_1, \tau_2)$ ikinci dereceden impuls tepki fonksiyonu, $\eta(t)$ referans noktasındaki dalga serbest yüzey dalga yüksekliğidir. $\eta(t)$, $h_1(\tau)$ ve $h_2(\tau_1, \tau_2)$ frekans fonksiyonları olarak ifade edilir, Yapıya gelen tek yönlü dalga kuvvetleri gelen dalga potansiyeli ve kırınım dalga potansiyeli ile indüklenerek denklem (2.1)'deki halini alır ve frekans bileşenleri toplamı halinde yeniden yazılırsa:

$$F_I^{(1)}(t) = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^N A_j q_L(\omega_j) e^{i\omega t} \right] \quad (2.2)$$

$$F_I^{(2)} = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 A_j A_k^* q_D(\omega_j, -\omega_k) e^{i\omega^- t} + \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 A_j A_k q_S(\omega_j, \omega_k) e^{i\omega^+ t} \right] \quad (2.3)$$

Burada $q_L(\omega_j)$ doğrusal kuvvet transfer fonksiyonu, $q_D(\omega_j, -\omega_k)$ ve $q_S(\omega_j, \omega_k)$ toplam ve fark ikinci dereceden frekans ikinci dereceden transfer fonksiyonudur. *Fourier* dönüşüm serisi kullanarak (2.2) ve (2.3) denklemleri *Enerji Spektrumuna* dönüştürülür [3]:

$$S_F^{(l)}(\omega) = S_\eta(\omega) |q_L(\omega)|^2 \quad (2.4)$$

$$S_F^{(-)}(\omega) = 8 \int_0^\infty |q_D(\mu, \omega - \mu)|^2 S_\eta(\mu) S_\eta(\omega - \mu) dS_\eta(\mu) \quad (2.5)$$

$$S_F^{(+)}(\omega) = 8 \int_0^{\omega/2} |q_S\left(\frac{\omega}{2} + \mu, \frac{\omega}{2} - \mu\right)|^2 S_\eta\left(\frac{\omega}{2} + \mu\right) S_\eta\left(\frac{\omega}{2} - \mu\right) dS_\eta(\mu) \quad (2.6)$$

$S_\eta(\omega)$ dalga spektrumunu, $S_F^{(l)}(\omega)$ doğrusal dalga kuvvet i spektrumunu, $S_F^{(-)}(\omega)$ ve $S_F^{(+)}(\omega)$ ise ikinci dereceden toplam ve fark frekans dalga kuvveti spektrumunu gösterir.

Birinci ve ikinci mertebeden radyasyon potansiyel kuvvetleri ise şöyle hesaplanır:

$$F_R(t) = \left(M^a(\omega) - \int_0^\infty R(t) \cos \omega t dt \right) \ddot{\zeta}(t) - \int_{-\infty}^t R(t - \tau) \dot{\zeta}(\tau) d\tau \quad (2.7)$$

Burada $M^a(\omega)$ denklem (1.24) ile tanımlanan ek su kütlesi katsayısıdır. $R(t)$ gecikme fonksiyonu ise (2.8) denklemi ile tanımlanır:

$$R(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} C(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega \quad (2.8)$$

$C(\omega)$ denklem (1.26) ile tanımlanmış olan radyasyon sönümlenme katsayısıdır. Böylece toplam dalga kuvvetleri ve momentleri (2.2), (2.3) ve (2.7) denklemleri de kullanılarak (1.28) ve (1.34) denklemlerinin formunda hesaplanır.

$$F_T = F_I + F_C + \tilde{F}_R \quad (2.9)$$

Burada $F_T = F^{(1)} + F^{(2)}$ olmak üzere toplam gelen dalga kuvvetini, $F_I = F_I^{(1)} + F_I^{(2)}$ denklem (2.2) ve (2.3)' ün toplamını, F_C ise (2.7) denkleminin sağ taraftaki son terimi, \tilde{F}_R ise aynı denklemdeki ilk terimi ifade eder.

2.3. Yüzen Yapıların Hareketi

Newton' un İkinci Yasası momentum korunumu kanunu kullanılarak yüzen yapılar için denge denklemleri yazılacak olursa:

$$M \frac{d^2 x_{cg}}{dt^2} = f \quad (2.10)$$

$$I \frac{d\varphi}{dt} + \varphi \times (I_\varphi) = m \quad (2.11)$$

denklemleri ile elde edilir. Burada M yüzer cismin kütlesi, x_{cg} yüzer yapının yerçekimi merkezinin yatay konumu, I atalet momenti, φ açıl hız, f ve m ise dış kuvvet ve momentleri. (1.18) denkleminin girdiler kısmındaki ikinci terim ile yapının dalga hareketine göre relatif açısal hareketi doğrusal olmayan özellik gösterir. Eğer burada dönme çok küçük kabul edilirse (2.10) denklemleri doğrusal hale dönüşür:

$$M\ddot{\zeta} = F(t) \quad (2.12)$$

$\ddot{\zeta}$ burada yapının normal ivmesidir. M ise 6 x 6 boyutlu matris olup (1.28) denkleminde tanımlanmıştır. $F(t)$ de dış kuvvetler vektörüdür. Yukarıdaki denklemi zaman aralığında genişleterek yeniden yazılarak:

$$[M + M^a(\infty)] \ddot{\zeta} + K \zeta = F_I(t) + F_C(\dot{\zeta}, t) + F_M(\dot{\zeta}, t) \quad (2.13)$$

denklemi elde edilir. Burada da $M^a(\infty)$ sabit olmak şartıyla sonsuz zaman frekansında yapının ek kütlesi şeklinde tanımlanır ve (2.14) denklemi ile bulunur:

$$M^a(\infty) = M^a(\omega) - \int_0^{\infty} R(t) \cos \omega t dt \quad (2.14)$$

$M^a(\omega)$ (1.25) denkleminde ifade edildiği gibi hesaplanır. F_C ise (2.9) denkleminde ikinci terim ile aynıdır ve (2.15) bağıntısı ile bulunur:

$$F_C(\dot{\zeta}, t) = - \int_{-\infty}^t R(t - \tau) \dot{\zeta}(\tau) d\tau \quad (2.15)$$

F_I (2.2) ve (2.3) denklemlerinde gösterildiği gibi bulunur. F_M ise (1.18) ile gösterilen Morison Denkleminde elde edilen kuvvet vektörüdür, $\dot{\zeta}$ de yapının normal hızını gösterir.

2.4. Platform Hareketlerinin Zamana Bağlı Analizi

Zaman tanım alanında analiz, yapıların zamana bağlı dinamik yükler altındaki davranışlarını belirlemek için kullanılan bir hesap yöntemidir. Bu analiz yöntemiyle yapılan yapının doğrusal davranış gösterdiği, bir başka deyişle yapının kalıcı şekil değiştirmeler yapmadığı ve malzemenin elastik kaldığı kabulü yapılır [21].

Sistem doğrusal olmayan olaylar içerdiği sürece zaman alanı tanımlı analizlerde yaygın olarak yineleme prosedürü sayısal şeması kullanılır. Zaman tanım alanındaki tek yapılı sistem ya da iki yapılı sistemler için hareket denklemleri (2.13), (2.14) ve (2.15) denklemleriyle gösterilmiştir. Burada sayısal integral işlemi yapabilmek için Newton-Beta yöntemi, Runge-Kutta yöntemi, Adams-Moulton yöntemi (orta nokta yöntemi) gibi yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan sonuncusu ikinci dereceden doğruluğu göstermek için

kullanılır. Diğer bir sebep de, bu yöntem platform ve bağlantı sistemleri hareketlerini her bir zaman adımında çözmek için en uygun yöntem olmasıdır. Ayrıca Adam-Bashforth yöntemi de doğrusal olmayan kuvvetlerin zaman tanımlı alanda integrali için kullanılabilir.

İlk olarak denklem (2.13) birinci dereceden diferansiyel denkleme indirgenir:

$$\tilde{M}\dot{\eta} = F_I(t) + F_C(t, \zeta) + F_M(t, \zeta) - K\zeta \quad (2.16)$$

$$\eta = \dot{\zeta} \quad (2.17)$$

Burada $\tilde{M} = M + M^a(\infty)$ olmak üzere asal kütle matrisini gösterir. Eğer $t^{(n)}$ 'den $t^{(n+1)}$ 'e kadar integral alınırsa:

$$\tilde{M} \eta^{(n+1)} = \tilde{M} \eta^{(n)} + \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_I + F_C + F_M dt - \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} K \zeta dt \quad (2.18)$$

$$\zeta^{(n+1)} = \zeta^{(n)} + \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} \zeta dt \quad (2.19)$$

denklemleri elde edilir. Eğer (2.18) ve (2.19) denklemlerine Adam-Moulton yöntemi uygulanıp yeniden düzenlenirse:

$$\begin{aligned} \tilde{M} \eta^{(n+1)} &= \tilde{M} \eta^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} \left(F_I^{(n+1)} + F_C^{(n+1)} + F_M^{(n+1)} + F_I^{(n)} + F_C^{(n)} + F_M^{(n)} \right) - \\ &- \frac{\Delta t}{2} K (\zeta^{(n+1)} + \zeta^{(n)}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\eta^{(n+1)} = \frac{2}{\Delta t} (\zeta^{(n+1)} - \zeta^{(n)}) - \eta^{(n)} \quad (2.21)$$

denklemleri elde edilir.

Böylece bilinmeyenleri $\eta^{(n+1)}$ ve $\zeta^{(n+1)}$ olmak üzere iki bilinmeyenli iki doğrusal denklem sistemi elde edilmiş olur. Bu denklemleri çözmek için ilk terimler keyfi olarak seçilir ve zaman integrali bu kabule bağlı olarak hata verebilir.

Bu sorunu çözmek için zamana bağlı değişen bilinmeyenlerin ilk terimlerinin değerlendirilmesi gerekir ve bunun için Adam-Bashforth şeması kullanılır. Böylece doğrusal olmayan sönümleme kuvvetinin zaman integrali gösterildiği gibi elde edilir:

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_C dt = \frac{\Delta t}{2} (3F_C^{(n)} + F_C^{(n-1)}) \quad (2.22)$$

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_C dt = \Delta t F_C^{(0)} \quad , \quad n = 0 \quad (2.23)$$

Benzer şekilde aynı şema Morison denkleminde sürüklenme kuvvetinin doğrusal olmayan terimlerinin zamana bağlı integral için de kullanılabilir:

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_M dt = \frac{\Delta t}{2} (3F_M^{(n)} + F_M^{(n-1)}) \quad (2.24)$$

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_M dt = \Delta t F_M^{(0)} \quad , \quad n = 0 \quad (2.25)$$

şeklinde yazılır. Sonuç olarak (2.16) ve (2.17) denklemleri türetilerek:

$$\begin{aligned} \left[\frac{4}{\Delta t^2} \tilde{M} + K \right] \Delta \zeta &= \frac{4}{\Delta t} \tilde{M} \eta^{(n)} + (F_I^{(n+1)} + F_I^{(n)}) + (3F_C^{(n)} - F_C^{(n-1)}) + \\ &+ (3F_M^{(n)} - F_M^{(n-1)}) - 2K\zeta^{(n)} + 2F_0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\Delta \zeta = \zeta^{(n+1)} - \zeta^{(n)} \quad (2.27)$$

denklemleri elde edilir. F_0 balans sistemleri için net hacim kuvvetlerini gösterir. Burada ilk olarak (2.26) denkleminin çözümü yapılarak $\Delta \zeta$ bilinmeyeni bulunur. Sonra, $\eta^{(n+1)}$ ve $\zeta^{(n+1)}$

(2.21) ve (2.27) denklemlerini kullanılarak bulunur. Çözümün dengesi ve doğruluğu için, bağlama sistemlerinin platform hareketinden daha fazla doğrusal olmayan davranış sergilediği sürece, Δt zaman aralığı bağlama sistemleri dinamiğini çözebilecek şekilde yeteri kadar küçük seçilmelidir [3].

2.5. Bağlama Sistemleri ve Rayzer Dinamiği

Bu kısımda çok noktalı bağlama sistemleri ile marin rayzerlar üzerinde durulmuştur.

2.5.1. Bağlama Sistemleri ve Rayzerlar

Bu bölümde, bağlama sistemlerinin ve rayzerlerin sayısal ve teorik olarak çözümleri anlatılacaktır.

Burada platform, bağlama sistemleri etkisi altında davranış gösteren yüzer bir nokta olarak düşünülür. Bağlama sistemleri ve halatları, platform tiplerine ve hareketlerine göre, çeşitlilik gösterir. Çelik kablolu ve demirli bağlantı halatları derin sularda *Safralı* (SPAR) tip platformlar için kullanılmaktadır. Gergin dik çelik kablolardan oluşan bağlama sistemleri *Gergi Ayaklı Platform* (TLP) tipine göre dizayn edilmiştir. Daha verimli sonuçlar için polyester malzemeden üretilen sentetik bağlama halatları da geliştirilmiştir. Bunlar özellikle çok derin sularda (6000 ft) çalışan *Yüzer Üretim Depolama Nakil Amaçlı Açık Deniz Yapıları* (FPSO)'nın bağlanmaları için daha uygundur.

FPSO gemileri bağlama sistemleri, halatlar, rayzerler, akış transfer kabloları (FTLS) gibi elemanlara ihtiyaç duyarlar. Bu elemanlar yardımcı-taşıyıcı tankerlere bağlanma, kaynaktan yağ-gaz çıkışını sağlama, üretilen ve depolanan ürünlerin transferini sağlama gibi işlemlerde kullanılır. Bu işlemler nedeniyle çok yapıli sistemlerin etkileşimleri problemi ortaya çıkar. Yüzer platformlar arasındaki etkileşim problemlerinin çözümü, FPSO gemilerinin derin sularda kurulum ve yükleme planlamasından önce yapılması gereken bir konudur.

Yağ, su, gaz, ham petrol gibi maddelerin girişi, çıkışı ve üretimi için rayzerler kullanılmaktadır. Rayzerlerin ana görevi yüzen cismi üretim yaptığı noktada sabitlemek değildir. Ancak bunda az da olsa etkileri vardır. Çelik katenari tarzı rayzerler maliyet olarak uygun oldukları için daha çok kullanım eğilimindedirler. Bağlama sistemleri ve halatları ile

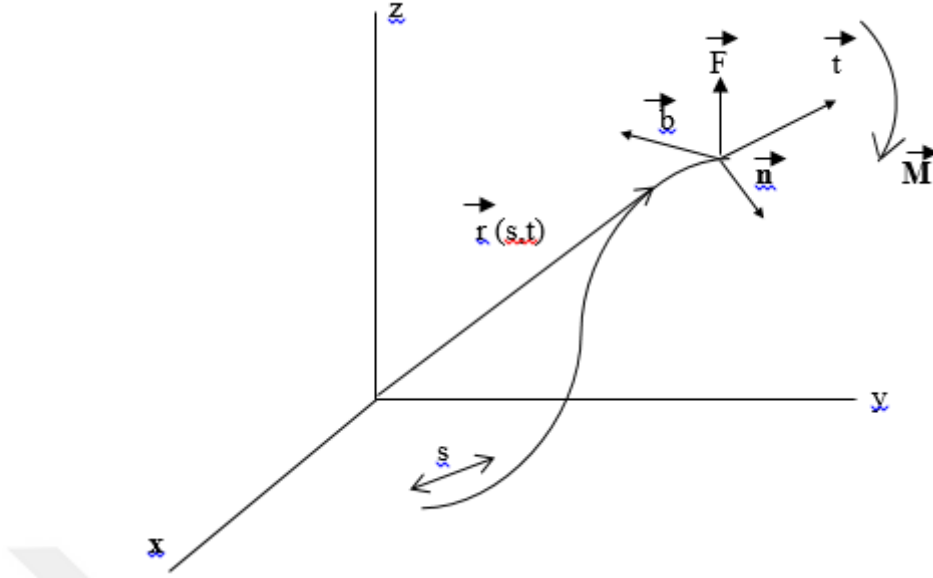
rayzerler kurulum açısından aynıdırlar. Her ikisi de eğilme direncine sahip değildir ve ince yapılardır. Her iki yapıda da geri getirici kuvvet yer çekimi kuvvetlerinden, geometriden ve kablo gerilmelerinden oluşur. Fakat TLP tarz platformlardaki tendonların ve rayzerler eğilme direncinin geri getirici etkisi vardır. Bağlama sistemleri ve halatları ile rayzerlerde doğrusal olmayan geometriden kaynaklanan etkilerin, kablo davranışları üzerindeki etkisi oldukça baskındır.

Kabloların dinamik analizi, ince yapıların davranışları üzerinden gidilerek geliştirilmiştir. Statik pozisyon ve kablo gerginlikleri katenari denklemleri kullanılarak elde edilir. Katenari denklemlerinde, kablolar üzerinde herhangi bir hidrodinamik kuvvetin etkilediği kabul edilmiştir. Bu hidrodinamik kuvvetlerin gerilmiş string teorisine göre uygulandığı düşünülür. Ancak bu teoride de yapısal şekil değiştirme ve gerilme katkıları ihmal edilmiştir. Doğrusal olmayan geometrik etkiye sahip yapısal şekil değiştirme ve gerilmeler, geliştirilmiş *Lagrangian* yaklaşımı kullanılarak kiriş teorisi ile çözülebilir. Bu nedenle string teorisi iyi ve güvenilir bir analiz için kiriş elemanlar gibi benimsenen yay modeli kullanılır. Buna elastik rod teorisi denir. Nordgen [22] ve Garret [23] tarafından formülleri geliştirilmiştir. Garret tarafından geliştirilen kablo dinamiği FEM analizi ile daha doğru sonuçlar elde edilmiştir [3].

Bu çalışmada, gerilme ve eğilme davranışları gösteren 3 boyutlu elastik rod teorisi kullanıldığı kabul edilmiştir. Rod teorisinin avantajı olarak özellikli sonlu elemanlar denklemleri gösterilebilir. Bu denklem doğrusal olmayan geometrik özelliktedir ve koordinat sisteminde herhangi bir dönüşüm olmadan global koordinat sisteminde işlenir. Bu bölümde yapının ve kabloların denge hali ve dinamik problemleri Galerkin metodu uygulanarak sonlu elemanlar yöntemine göre çözülmüştür.

2.5.2. Rod (Çubuk Eleman) Teorisi

İnce çubuk eleman davranışı, çubuk merkezi konumunun varyasyonlarına göre ifade edilir. Yay eğrisi ve zaman fonksiyonları sırasıyla s ve t olmak üzere, konum vektörü $r(s,t)$ ' dir. Uzay eğrisi de konum vektörü r' ye göre tanımlanır. Uzay eğrisinin birim teğet vektörü r' ile, normal vektör r'' ve binormal vektör de bu ikisinin çarpımı olarak $r' \times r''$ şeklinde gösterilir. Burada “üst virgül” yay uzunluğu s ' e göre alınan türevi gösterir. Aşağıda Şekil 2.1' de rod koordinat sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Çubuk Eleman Koordinat Sistemi

$$\vec{F}' + \vec{q} = \rho \vec{\ddot{r}} \quad (2.28)$$

$$\vec{M}' + \vec{r}' \times \vec{F} + \vec{m} = \vec{0} \quad (2.29)$$

burada;

→ F merkez hattı boyunca etkiyen net bileşke kuvvet,

→ M merkez hattı boyunca etkiyen bileşke moment,

→ q birim uzunluktaki uygulanan kuvvet,

→ m birim uzunluktaki uygulanan momenttir.

Ayrıca “üst nokta” zamana göre türevi gösterir. Moment dengesi için bükülme momentinin eğrilik ile ilişkisi (2.30) denklemindeki gibi ifade edilir:

$$\vec{M} = \vec{r}' \times EI \vec{r}'' + H \vec{r}' \quad (2.30)$$

EI bükülme sertliğini, H ise torku temsil eder. (2.29) ve (2.30) denklemleri birlikte uygulanırsa;

$$\vec{r}' \times \left[(EI\vec{r}''')' + \vec{F} \right] + H'\vec{r}' + H\vec{r}'' + \vec{M} = \vec{0} \quad (2.31)$$

denklemini elde edilir. Denklem (2.31)'ün verimliliği için r' ile skaler çarpım yapılırsa;

$$H' + \vec{m} \cdot \vec{r}' = \vec{0} \quad (2.32)$$

olur. $\vec{m} \cdot \vec{r}'$ dağılık burulma momentidir. Burulma momentinin olmaması $\vec{m} \cdot \vec{r}' = 0$ ve $H' = 0$, yani torkun yay uzunluğu s' den bağımsız olduğu anlamına gelir. Ayrıca buradaki tork ihmal edilebilecek derecede küçüktür. H torku ve \vec{m} uygulanan momenti sıfır kabul edilir. Böylece (2.31) denklemini yeniden yazarsak;

$$\vec{r}' \times \left[(EI\vec{r}''')' + \vec{F} \right] = \vec{0} \quad (2.33)$$

olur. Eğer *Lagrange çarpanı* olarak adlandırılan $\lambda(s,t)$ skaler fonksiyonu (2.33) denkleminde tanımlanır ve \vec{r}' ile çarpılırsa;

$$\vec{F} = - (EI\vec{r}''')' + \lambda\vec{r}' \quad (2.34)$$

fonksiyonu bulunur. Burada da \vec{r}' 'in esnemezlik koşulunu sağlaması gerekir. Bu durumda;

$$\vec{r}' \cdot \vec{r}' = 1 \quad (2.35)$$

olur. (2.34) denklemini \vec{r}' ile çarpılır ve (2.35) denkleminde uygulanırsa aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$\lambda = \vec{F} \cdot \vec{r}' + (EI\vec{r}''')' \cdot \vec{r}' \quad (2.36)$$

veya,

$$\lambda = T - EI\kappa^2 \quad (2.37)$$

olur. Eğer (2.34) denklemini, (2.28) denkleminde yerine yazılırsa, hareket denklemi şöyle olur:

$$-(EI\vec{r}''') + \lambda(\vec{r}') + \vec{q} = \rho\vec{\ddot{r}} \quad (2.38)$$

Çubuk eleman gerilmesi doğrusal ve küçük kabul edilirse esnemezlik koşulu (2.35) yaklaşık olarak;

$$\frac{1}{2}(\vec{r}' \cdot \vec{r}' - 1) = \frac{T}{AE} \approx \frac{\lambda}{AE} \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilir.

Yüzer platformlarda çubuk eleman üzerinde uygulanan kuvvet, çubuk eleman üzerindeki akış ve yerçekimi kuvvetleri tarafından meydana gelen çevresel olaylar kaynaklı hidrostatik ve hidrodinamik kuvvetlerdir. Birim uzunluk başına düşen ağırlık \vec{w} , \vec{F}^s ve \vec{F}^d de sırasıyla çubuk eleman üzerinde birim uzunluk başına düşen hidrostatik ve hidrodinamik kuvvetler olmak üzere: çubuk üzerine uygulanan kuvvet \vec{q} şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$\vec{q} = \vec{w} + \vec{F}^s + \vec{F}^d \quad (2.40)$$

Buradaki hidrostatik kuvvetler ise şu şekilde tanımlanır:

$$\vec{F}^s = \vec{B} - (P\vec{r}')' \quad (2.41)$$

B rod üzerinde birim uzunluk başına düşen hacim kuvvetini, P hidrostatik basıncı, r ise çubuk eleman üzerindeki herhangi bir noktayı temsil eder.

Hidrodinamik kuvvetler ise Morison denklemleri kullanılarak türetilmektedir:

$$\begin{aligned}
\vec{F}^d &= -C_A \vec{\ddot{r}}^n + C_M \vec{\dot{V}}^n + C_D \left| \vec{V}^n - \vec{\dot{r}}^n \right| \left(\vec{V}^n - \vec{\dot{r}}^n \right) \\
&= -C_A \vec{\ddot{r}}^n + \vec{F}^d
\end{aligned} \tag{2.42}$$

C_A ek kütle katsayısı (birim uzunluk ek kütlesi), C_M atalet katsayısı (çubuk eleman birim uzunluğuna etki eden birim normal ivmeye bağlı atalet kuvveti), C_D sürüklenme katsayısı (birim uzunluktaki çubuk elemana etkiyen birim normal hıza düşen sürüklenme kuvveti), \vec{V}^n çubuk eleman merkez hattındaki normal hızı, $\vec{\dot{V}}^n$ bu hıza bağlı normal ivmeyi, sırasıyla $\vec{\dot{r}}^n$ ve $\vec{\ddot{r}}^n$ ise çubuk eleman merkez hattı boyunca çubuk eleman hızının ve ivmesinin normal bileşenleridir. Burada çubuk eleman hızı ve ivmesi; akışkan hız vektörü, teğet vektörü ve bunların türevlerinden bulunabilir:

$$\vec{V}^n = (\vec{V} - \vec{\dot{r}}) - [(\vec{V} - \vec{\dot{r}}) \cdot \vec{\dot{r}}'] \vec{r}' \tag{2.43}$$

$$\vec{\dot{V}}^n = \vec{\dot{V}} - (\vec{V} \cdot \vec{\dot{r}}') \vec{r}' \tag{2.44}$$

$$\vec{\dot{r}}^n = \vec{\dot{r}} - (\vec{\dot{r}} \cdot \vec{\dot{r}}') \vec{r}' \tag{2.45}$$

$$\vec{\ddot{r}}^n = \vec{\ddot{r}} - (\vec{\ddot{r}} \cdot \vec{\dot{r}}') \vec{r}' \tag{2.46}$$

(2.40), (2.41) ve (2.42) denklemleri kullanılarak (2.38) denklemi yeniden yazılırsa:

$$\rho \vec{\ddot{r}} + C_a \rho_w \vec{\ddot{r}}^n + (EI \vec{r}^n)^n - (\tilde{\lambda} \vec{r}')' = \vec{\tilde{w}} + \vec{\tilde{F}}^d \tag{2.47}$$

denklemini elde edilir. Burada $\tilde{\lambda}$, $\vec{\tilde{w}}$ ve $\vec{\tilde{T}}$;

$$\tilde{\lambda} = T + P - EI \kappa^2 = \vec{\tilde{T}} - EI \kappa^2 \tag{2.48}$$

$$\vec{\tilde{w}} = \vec{w} + \vec{B} \quad (2.49)$$

$$\vec{\tilde{T}} = T + P \quad (2.50)$$

denklemleri ile bulunur. $\vec{\tilde{T}}$ burada çubuk eleman efektif gerilmesini, $\vec{\tilde{w}}$ ise çubuk eleman efektif ağırlığı ya da ıslak ağırlığını temsil eder. (2.47) denklemi ile (2.39) denklemi elastik çubuk eleman hareketi ve davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi (FEM) uygulamalarında temel denklemleri oluşturur.

2.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Doğrusal olmayan (3.20) korunum denklemi, özel durumlar hariç çözülebilmektedir. Nordgren [21] sonlu farklar yöntemini; korunum denklemi çözümü ve esnetilmezliği için uygulamıştır. Yaptığı analiz sonuçları deniz tabanındaki boruların dinamik davranışlarını güzel bir şekilde ifade eder. Bu çalışmada FEM yöntemi çeşitli yararları nedeniyle ele alınacaktır.

Yöntemin uygulanmasına tensör denklem tanımı yapılarak başlanır:

$$-\rho \ddot{r}_i - C_A \ddot{r}_i'' - (E I r_i'')'' + (\tilde{\lambda} r_i')' + \tilde{w}_i + \tilde{F}_i^d = 0 \quad (2.51)$$

ve

$$\frac{1}{2} (r_r' r_r' - 1) - \frac{\lambda}{AE} = 0 \quad (2.52)$$

Burada bilinmeyen değişkenler r_i ve λ yaklaşık olarak şu şekilde bulunur:

$$r_i(s, t) = A_l(s) U_{il}(t) \quad (2.53)$$

$$\lambda(s, t) = P_m(s) \lambda_m(t) \quad (2.54)$$

$0 \leq s \leq L$ ve A_l ile P_m şekil (interpolasyon) fonksiyonları, U_{il} ile λ_m ise bilinmeyen katsayılardır. Çözüm için şekil fonksiyonları tanımlanır, zayıf fonksiyon olan tensör denklem, ağırlık fonksiyonu δr_i ile çarpılarak sonlu elemanlar yöntemi uygulanır:

$$\int_0^L \delta r_i [-\rho \ddot{r}_i - C_A \ddot{r}_i^n - (EI r_i'')'' + (\tilde{\lambda} r_i')' + \tilde{w}_i + \tilde{F}_i^d] ds = 0 \quad (2.55)$$

$$\int_0^L \delta \lambda \left[\frac{1}{2} (r_r' r_r' - 1) - \frac{\lambda}{AE} \right] ds = 0 \quad (2.56)$$

Aynı şekilde, A_l kübik ve P_m ikinci dereceden şekil fonksiyonları olmak üzere, (2.53) ve (2.54) denklemleri de $\delta r_i = A_l \delta U_{il}(t)$ ve $\delta \lambda = P_m \delta \lambda_m(t)$ şeklinde uygulanırsa;

$$A_1 = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3$$

$$A_2 = L(\xi - 2\xi^2 + \xi^3)$$

$$A_3 = 3\xi^2 - 2\xi$$

$$A_4 = L(-\xi^2 + \xi^3) \quad (2.57)$$

$$P_1 = 1 - 3\xi + 2\xi^2$$

$$P_2 = 4\xi(1 - \xi)$$

$$P_3 = \xi(2\xi - 1) \quad (2.58)$$

burada $\xi = \frac{s}{L}$ dir ve

$$U_{i1} = r_i(0, t)$$

$$U_{i2} = r_i'(0, t)$$

$$U_{i3} = r_i(L, t)$$

$$U_{i4} = r_i'(L, t) \quad (2.59)$$

$$\lambda_1 = \lambda(0, t)$$

$$\lambda_2 = \lambda\left(\frac{L}{2}, t\right)$$

$$\lambda_3 = \lambda(L, t) \quad (2.60)$$

denklemleri elde edilir. (2.57) ve (2.58) denklemleri genişletilirse;

$$\int_0^L \delta r_i (\rho \ddot{r}_i + C_A \ddot{r}_i^n) ds = \int_0^L (\rho \ddot{r}_i + C_A \ddot{r}_i^n) A_l \delta U_{i1} ds \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \int_0^L \delta r_i (EI r_i'') ds &= \int_0^L (EI r_i'') A_l \delta U_{i1} ds = \\ &= \left[(EI r_i'')' A_l \Big|_0^L - EI r_i'' A_l' \Big|_0^L + \int_0^L EI A_l'' r_i'' ds \right] \delta U_{i1} \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\int_0^L \delta r_i (\tilde{\lambda} r_i')' ds = \int_0^L (\tilde{\lambda} r_i')' A_l \delta U_{i1} ds = \left[(\tilde{\lambda} r_i' A_l) \Big|_0^L - \int_0^L \tilde{\lambda} r_i' A_l' ds \right] \delta U_{i1} \quad (2.63)$$

$$\int_0^L \delta r_i [\tilde{w}_i + \tilde{F}_i^d] ds = \left(\int_0^L (\tilde{w}_i + \tilde{F}_i^d) A_l ds \right) \delta U_{i1} \quad (2.64)$$

$$\int_0^L \delta\lambda \left[\frac{1}{2} (r_r' r_r' - 1) - \frac{\lambda}{AE} \right] ds = \int_0^L P_m \left[\frac{1}{2} (r_r' r_r' - 1) - \frac{\lambda}{AE} \right] ds \delta\lambda_m \quad (2.65)$$

Denklemleri elde edilir. Eğer (2.61) denklemi (2.64) denklemine yerine koyulur ve yukarıdaki denklemlerde δU_{il} her iki tarafta da yok edilirse aşağıdaki denklemler bulunur:

$$\begin{aligned} & \int_0^L \left\{ A_l (\rho \ddot{r}_i + C_A \ddot{r}_i^n) + E I A_l'' r_i'' + \tilde{\lambda} A_l' r_i' - A_l (\tilde{w}_i + \tilde{F}_i^d) \right\} ds = \\ & = E I r_i'' A_l' |_0^L + \left[\tilde{\lambda} r_i' + (E I r_i'')' \right] A_l |_0^L \end{aligned} \quad (2.66)$$

Eğer aynı işlem (2.65) denkleminde yapılırsa ve her iki taraftan da $\delta\lambda_m$ yok edilirse; (2.65) denklemi aşağıdaki hale dönüşür:

$$\int_0^L P_m \left\{ \frac{1}{2} (r_r' r_r' - 1) - \frac{\lambda}{AE} \right\} ds = 0 \quad (2.67)$$

(2.66) ve (2.67) denklemleri için ilk kez kısmi integral alınır ve sınır şartları uygulanırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\int_0^L \rho A_l \ddot{r}_i ds = \int_0^L \rho A_l A_k \delta_{ij} ds \ddot{U}_{jk} \quad (2.68)$$

$$\int_0^L A_l (C_A \ddot{r}_i^n) ds = C_A \left[\int_0^L A_l A_k \delta_{ij} ds - \int_0^L (A_l A_k A_s' A_t') U_{it} U_{js} \delta_{ij} ds \right] \ddot{U}_{jk} \quad (2.69)$$

$$\int_0^L E I A_l'' r_i'' ds = \int_0^L E I A_l'' A_k'' \delta_{ij} ds U_{jk} \quad (2.70)$$

$$\int_0^L \tilde{\lambda} A_l' r' ds = \lambda_n \int_0^L P_n A_l' A_k' \delta_{ij} ds \quad (2.71)$$

$$\int_0^L P_m \frac{1}{2} r_r' r_r' ds = \frac{1}{2} \int_0^L P_m A_l' A_k' ds U_{jl} U_{jk} \quad (2.72)$$

$$\int_0^L P_m \frac{\lambda}{AE} ds = \frac{1}{AE} \int_0^L \lambda_n P_m P_n ds \quad (2.73)$$

(2.68) denklemini (2.71) denkleminde, (2.66) denklemini de (2.67) denkleminde kullanılıp yeniden düzenlenerek matris formunda yazılırsa:

$$(M_{ijkl} + M_{ijkl}^a) \ddot{U}_{jk} + (K_{ijkl}^1 + \lambda_n K_{nijlk}^2) U_{jk} - F_{il} = 0 \quad (2.74)$$

$$G_m = A_{mil} U_{kl} U_{ki} - B_m - C_m \lambda_n = 0 \quad (2.75)$$

olur. Burada:

$$M_{ijkl} = \int \rho A_l A_k \delta_{ij} ds \quad (2.76)$$

$$M_{ijkl}^a = C_A \left[\int_0^L A_l A_k \delta_{ij} ds - \left(\int_0^L A_l A_k A_s' A_t' \right) U_{it} U_{js} \delta_{ij} \right] \quad (2.77)$$

$$K_{ijkl}^1 = \int_0^L E I A_l'' A_k'' \delta_{ij} ds \quad (2.78)$$

$$K_{nijlk}^2 = \int_0^L P_n A_l' A_k' \delta_{ij} ds \quad (2.79)$$

$$F_{il} = \int_0^L (\tilde{w}_i + \tilde{F}_i^d) A_l ds \quad (2.80)$$

ve

$$A_{mil} = \frac{1}{2} \int_0^L P_m A'_i A'_l ds \quad (2.81)$$

$$B_m = \frac{1}{2} \int_0^L P_m ds \quad (2.82)$$

$$C_m = \frac{1}{AE} \int_0^L P_m P_n ds \quad (2.83)$$

ile bulunur. δ_{ij} *Kronecker Delta* fonksiyonu olarak adlandırılır. (2.74) ve (2.75) denklemleri çubuk (rod) eleman dinamiği çözümlerinde kullanılır. Sistem parametreleri ve şekil fonksiyonlarının integrallerini kullanarak (2.76)' dan (2.83)' e kadar olan denklemlerin çözümü için program kullanılabilir. F_{il} kuvvet vektörünün non-lineer terimler içermesi nedeniyle toplamda denklemler de nonlineerdir. Yukarıdaki yaklaşımlara ek olarak zaman alanında doğrusal olmayan zaman alanı problemlerinin çözümü için sayısal yaklaşımlara da ihtiyaç vardır.

2.7. Statik Problem Formülleri

(2.74) ve (2.75) denklemleri sonlu elemanlar yönteminde (FEM) *sistem enerjisi denge denklemi* ve *esnetilebilir şartlar denklemi* olarak adlandırılır. Sistem enerjisi denge denklemi ve genişletilemez denklemlerden kalanlar 'sıfır' olmalıdır. Toplam kuvvet ve gerilme kuvveti sırasıyla R_{il} ve G_m olarak şu şekilde tanımlanmıştır:

$$R_{il} = 0 \quad (2.84)$$

$$G_m = 0 \quad (2.85)$$

Statik problemlerde (3.36) denklemindeki dinamik terimler atılır ve denklem tekrardan yazılırsa:

$$R_{il} = (K_{ijlk}^1 + \lambda_n K_{nijlk}^2) U_{jk} - F_{il} \quad (2.86)$$

şeklini alır. Burada F_{il} yerçekimi kuvveti, sürtünme kuvveti, düzgün akım ve diğer statik kuvvetler tarafından uygulanan kuvvetler toplamını gösterir. Doğrusal olmayan kuvvet vektörüdür. Denklemi çözümü için iteratif olarak Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Taylor serisi açılımı yüksek mertebeden terimler ihmal edilerek (2.84) ve (2.85) denklemlerine uygulanarak yeniden yazıldığında;

$$R_{il}^{(n+1)} = R_{il}^{(n)} + \frac{\partial R_{il}}{\partial U_{jk}} (\Delta U_{jk}) + \frac{\partial R_{il}}{\partial \lambda_n} (\Delta \lambda_n) = 0 \quad (2.87)$$

$$G_m^{(n+1)} = G_m^{(n)} + \frac{\partial G_m}{\partial U_{jk}} (\Delta U_{jk}) + \frac{\partial G_m}{\partial \lambda_n} (\Delta \lambda_n) = 0 \quad (2.88)$$

$$\frac{\partial R_{il}}{\partial U_{jk}} = K_{ijlk}^1 + \lambda_n K_{nijlk}^2 \quad (2.89)$$

$$\frac{\partial R_{il}}{\partial \lambda_n} = K_{nijlk}^2 U_{jk} \quad (2.90)$$

$$\frac{\partial G_m}{\partial U_{jk}} = 2A_{mkl} U_{jk} \quad (2.91)$$

$$\frac{\partial G_m}{\partial \lambda_n} = -C_{mn} \quad (2.92)$$

denklemleri elde edilir. (2.87) ve (2.88) denklemleri (2.89) ve (2.92) denklemlerinde yerlerine yazılır ve yeniden düzenlenirse aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$(K_{ijkl}^1 + \lambda_n K_{nijlk}^2)(\Delta U_{jk}) + (K_{nijlk}^2 U_{jk})(\Delta \lambda_n) = -R_{il}^{(n)} \quad (2.93)$$

$$(2A_{mkl} U_{jk})(\Delta U_{jk}) - C_{mn}(\Delta \lambda_n) = -G_m^{(n)} \quad (2.94)$$

Bu denklemler matris formunda yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} K_{ijkl}^{t0(n)} & K_{iln}^{t1(n)} \\ D_{mjk}^{t0(n)} & D_{mn}^{t1(n)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta U_{jk} \\ \Delta \lambda_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -R_{il}^{(n)} \\ -G_m^{(n)} \end{Bmatrix} \quad (2.95)$$

Burada;

$$K_{ijkl}^{t0(n)} = K_{ijkl}^1 + \lambda_n^{(n)} K_{nijlk}^2 \quad (2.96)$$

$$K_{iln}^{t1(n)} = K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n)} = \left(\int_0^L P_n A_l' A_k' ds \right) U_{jk}^{(n)} \quad (2.97)$$

$$D_{mjk}^{t0(n)} = A_{mkp} U_{jp}^{(n)} = \left(\int_0^L P_m A_k' A_p' ds \right) U_{jp}^{(n)} \quad (2.98)$$

$$D_{mn}^{t1(n)} = -C_{mn} = -\frac{1}{AE} \int_0^L P_m P_n ds \quad (2.99)$$

$$R_{il}^{(n)} = (K_{ijkl}^1 + \lambda_n K_{nijlk}^2) U_{jk}^{(n)} - F_{il} \quad (2.100)$$

$$G_m^{(n)} = A_{mil} U_{ki}^{(n)} U_{kl}^{(n)} - B_m - C_{mn} \lambda_n^{(n)} = 0 \quad (2.101)$$

olur. Yeniden numaralandırma işleminden sonra toplam denklem matris formunda olacak şekilde gösterildiği gibi yazılır:

$$K^{(n)}(\Delta y) = F^{(n)} \quad (2.102)$$

Burada;

$$F^r = \begin{bmatrix} -[\lambda r'_1 + (Br_1'')'] A_l|_{s=0} \\ [EIr_1''] A_l|_{s=0} \\ -[\lambda r'_2 + (Br_2'')'] A_l|_{s=0} \\ [EIr_2''] A_l|_{s=0} \\ -[\lambda r'_3 + (Br_3'')'] A_l|_{s=0} \\ [EIr_3''] A_l|_{s=0} \\ 0 \\ 0 \\ [\lambda r'_1 + (Br_1'')'] A_l|_{s=0} \\ -[EIr_1''] A_l|_{s=0} \\ [\lambda r'_2 + (Br_2'')'] A_l|_{s=0} \\ -[EIr_2''] A_l|_{s=0} \\ [\lambda r'_3 + (Br_3'')'] A_l|_{s=0} \\ -[EIr_3''] A_l|_{s=0} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -N_1^{[1]} \\ -L_1^{[1]} \\ -N_2^{[1]} \\ -L_2^{[1]} \\ -N_3^{[1]} \\ -L_3^{[1]} \\ 0 \\ 0 \\ N_1^{[2]} \\ L_1^{[2]} \\ N_2^{[2]} \\ L_2^{[2]} \\ N_3^{[2]} \\ L_3^{[2]} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.103)$$

$$y^T = [U_{11} \ U_{12} \ U_{21} \ U_{22} \ U_{31} \ U_{32} \ \lambda_1 \ \lambda_2 \ U_{13} \ U_{14} \ U_{23} \ U_{24} \ U_{33} \ U_{34} \ \lambda_3] \quad (2.104)$$

$$F^T = [-R_{11} -R_{12} -R_{21} -R_{22} -R_{31} -R_{32} -G_1 -G_2 -G_3 -R_{13} -R_{14} -R_{23} -R_{24} -R_{33} -R_{34} -G_3] \quad (2.105)$$

$$y^{(n+1)} = y^{(n)} + \Delta y \quad (2.106)$$

olur. (1) elemanın birinci ucunu, (2) ise ikinci ucunu gösterir. $N = \{N_1 N_2 N_3\}^T$ nodal (düğüm noktası) bileşke kuvvettir. $L = \{L_1 L_2 L_3\}^T$ olmak üzere nodal bileşke momente etkiyen kuvvet, ve $M = L \times r'$ ise nodal bileşke momenttir.

Her zaman adımında, Δy çözümü için rijitlik matrisi K ve kuvvet vektörü F tekrar hesaplanır. Toplam rijitlik matrisi satır sayısı 15 ve N ise her bir satırdaki eleman sayısı olmak üzere toplam denklem sayısı $(N + 1) \times 8 - 1$ olur. Ayrıca rijitlik matrisi Gauss Eleminasyon yöntemi; simetrik ve bileşik matris özellik gösteren (2.102) denkleminin çözümü için uygundur. Bununla beraber iteratif yöntemler, Δy bir önceki hesaplanan değerinden küçük oluncaya kadar kullanılır. Toplam bileşke kuvvet, kuvvet vektörü F^r ' den elde edilebilir.

$$F^r = -F^{(n+1)} \quad (2.107)$$

2.8. Dinamik Problem Formülleri

Denklem (2.74) ile gerilme koşulu (2.75) yeniden yazılırsa;

$$\hat{M}_{ijkl} \ddot{U}_{jk} = -(K_{ijkl}^1 + \lambda_n K_{nijlk}^2) U_{jk} + F_{il} \quad (2.108)$$

$$G_m A_{mil} U_{kl} U_{ki} - B_m - C_{mn} \lambda_n = 0 \quad (2.109)$$

olur. Burada;

$$\hat{M}_{ijkl} = M_{ijkl} + M_{ijkl}^a \quad (2.110)$$

$$\hat{F}_{il} = -F_{il}^1 - F_{il}^2 + F_{il} \quad (2.111)$$

$$F_{il}^1 = K_{ijlk}^1 U_{jk} \quad (2.112)$$

$$F_{il}^2 = \lambda_n K_{nijlk}^2 U_{jk} \quad (2.113)$$

(2.108) denklemi ikinci mertebeden diferansiyel denklem, (2.109) denklemi ise cebirsel denklemdir. (2.108) denkleminin mertebesi, çubuk eleman yer değiştirmesi türevi kullanılarak indirgenir Böylece iki tane birinci mertebeden diferansiyel denklem elde edilir:

$$\hat{M}_{ijkl} \dot{V}_{jk} = \hat{F}_{il} \quad (2.114)$$

$$\dot{U}_{jk} = V_{jk} \quad (2.115)$$

Eğer bu iki denklemin integrali alınırsa;

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} \hat{M}_{ijkl} \dot{V}_{jk} dt = \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} \hat{F}_{jl} dt \quad (2.116)$$

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} \dot{U}_{jk} dt = \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} V_{jk} dt \quad (2.117)$$

olur. (2.116) denkleminde, ek kütle terimleri içerdiği sürece \hat{M}_{ijkl} , zamana bağlı bir sabit değer değildir. Diğer taraftan yeni bir kütle tanımlandığı anda zaman integrasyonu mümkündür. $\hat{M}_{ijkl}^{(n+\frac{1}{2})}$; $t^{(n+\frac{1}{2})} = t^{(n)} + \frac{\Delta t}{2}$ zamanında olmak üzere sabit bir kütlelerdir. Zaman adımı $(n+1)$ olduğunda, $\hat{M}_{ijkl}^{(n+\frac{1}{2})}$ (2.116) denkleminde integral işlemi için kullanılabilir ve bu integral ikinci dereceden doğrulukla olmak üzere elde edilir:

$$\hat{M}_{ijkl}^{(n+\frac{1}{2})} V_{jk}^{(n+1)} - \hat{M}_{ijkl}^{(n+\frac{1}{2})} V_{jk}^{(n)} = \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} \hat{F}_{jl} dt \quad (2.118)$$

(2.117) denklemindeki $V_{jk}^{(n+1)}$ aşağıdaki ardışık denklemlerden elde edilir:

$$U_{jk}^{(n+1)} = U_{jk}^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} (V_{jk}^{(n+1)} + V_{jk}^{(n)}) \quad (2.119)$$

$$\Delta U_{jk} = U_{jk}^{(n+1)} - U_{jk}^{(n)} = \frac{\Delta t}{2} (V_{jk}^{(n+1)} + V_{jk}^{(n)}) \quad (2.120)$$

$$V_{jk}^{(n+1)} = \frac{2}{\Delta t} (\Delta U_{jk}) - V_{jk}^{(n)} \quad (2.121)$$

(2.118) denkleminde eşitliğin her iki tarafı $\frac{2}{\Delta t}$ ile çarpılır ve yeniden yazılırsa; (2.122) denklemi elde edilir:

$$\frac{4}{\Delta t^2} \hat{M}_{ijkl}^{(n+\frac{1}{2})} (\Delta U_{jk}) = \frac{4}{\Delta t} \hat{M}_{ijkl}^{(n+\frac{1}{2})} V_{jk}^{(n)} + \frac{2}{\Delta t} \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} \hat{F}_{jl} dt \quad (2.122)$$

(2.122) denkleminde eşitliğin ağ tarafı 3 parça integral içerir:

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} \hat{F}_{jl} dt = - \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_{il}^1 dt - \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_{il}^2 dt + \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_{jl} dt \quad (2.123)$$

Eğer (2.123) denkleminde her bir terime trapez integral kuralı uygulanırsa;

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_{il}^1 dt = \frac{\Delta t}{2} (F_{il}^{1(n+1)} + F_{il}^{1(n)}) = \frac{\Delta t}{2} [K_{ijlk}^1 (\Delta U_{jk}) + 2K_{ijlk}^1 U_{jk}^{(n)}] \quad (2.124)$$

$$\begin{aligned} \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_{il}^2 dt &= \frac{\Delta t}{2} (F_{il}^{2(n+1)} + F_{il}^{2(n)}) = \frac{\Delta t}{2} [\lambda_n^{(n+1)} K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n+1)} + \lambda_n^{(n)} K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n)}] \approx \\ &\approx \frac{\Delta t}{2} \left[\lambda_n^{(n+\frac{1}{2})} K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n)} + 2K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n)} (\Delta \lambda_n) + \lambda_n^{(n-\frac{1}{2})} K_{nijlk}^2 (\Delta U_{jk}) \right] \end{aligned} \quad (2.125)$$

olur. Burada $\Delta \lambda_n = \lambda_n^{(n+\frac{1}{2})} - \lambda_n^{(n-\frac{1}{2})}$, dir. (2.123) denkleminde eşitliğin sağ tarafındaki üçüncü terim yer çekimi ve hidrodinamik kuvvetleri gösterir. Yer çekimi kuvveti zamana bağlı olarak değişmez. Hidrodinamik kuvvetler ise Morison formülü ve Adam-Bashforth integrali kullanılarak hesaplanabilir [3].

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_{il} dt = \begin{cases} \Delta t F_{il}^{(0)} \text{ adım 1 için,} \\ \frac{\Delta t}{2} (3F_{il}^{(n)} - F_{il}^{(n-1)}) \text{ diğer adımlar için kullanılır.} \end{cases} \quad (2.126)$$

Kuvvet integrali (2.124) denkleminde (2.126) denkleminde kadar olan denklemlerin (2.123) denkleminde yerine yazılması ile elde edilir. (2.122) denkleminin zamana bağlı integral şu şekilde gösterilir:

$$\left[\frac{4}{\Delta t^2} \hat{M}_{ijlk}^{(n+\frac{1}{2})} + K_{ijlk}^1 + \lambda_n^{(n-\frac{1}{2})} K_{nijlk}^2 \right] (\Delta U_{jk}) + 2K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n)} (\Delta \lambda_n) =$$

$$= \frac{4}{\Delta t} \hat{M}_{ijkl}^{(n+\frac{1}{2})} V_{jk}^{(n)} \left(3F_{il}^{(n)} - F_{il}^{(n-1)} \right) - 2K_{ijkl}^1 U_{jk}^{(n)} - 2\lambda_n^{(n-\frac{1}{2})} K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n)} \quad (2.127)$$

$t^{(n+\frac{1}{2})} = t^{(n)} + \frac{\Delta t}{2}$ zamanında kütle Adam-Boshforth methodu kullanılarak yaklaşık olarak aşağıdaki gibi bulunur [3]:

$$\hat{M}_{ijkl}^{(n+\frac{1}{2})} = \frac{1}{2} \left(3\hat{M}_{ijkl}^{(n)} - \hat{M}_{ijkl}^{(n-1)} \right) \quad (2.128)$$

Taylor açılımı (2.109) denklemi gerilme koşullarına uygulanırsa;

$$\begin{aligned} 0 &= 2G_m^{(n+1)} \approx 2G_m^{(n)} + 2 \frac{\partial G_m^{(n)}}{\partial (U_{jk})} (\Delta \lambda_n) = 2G_m^{(n)} + 2K_{mijlk}^2 U_{il}^{(n)} (\Delta U_{jk}) - \\ &- 2C_{mn} (\Delta \lambda_n) = 2G_m^{(n)} + \hat{D}_{mijk}^{t0(n)} (\Delta U_{jk}) + 2\hat{D}_{mn}^{t1(n)} (\Delta \lambda_n) \end{aligned} \quad (2.129)$$

(2.127) ve (2.129) denklemleri kullanılarak hareket denklemleri ve gerilme koşulları denklemleri yeniden yazılırsa;

$$\hat{K}_{ijlk}^{t0(n)} (\Delta U_{jk}) + \hat{K}_{lin}^{t1(n)} (\Delta \lambda_n) = -\hat{R}_{il}^{(n)} \quad (2.130)$$

$$\hat{D}_{mijk}^{t0(n)} (\Delta U_{jk}) + \hat{D}_{mn}^{t1(n)} (\Delta \lambda_n) = -\hat{G}_m^{(n)} \quad (2.131)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler matris formülünde yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} \hat{K}_{ijlk}^{t0(n)} & \hat{K}_{lin}^{t1(n)} \\ \hat{D}_{mijk}^{t0(n)} & \hat{D}_{mn}^{t1(n)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta U_{jk} \\ \Delta \lambda_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\hat{R}_{il}^{(n)} \\ -\hat{G}_m^{(n)} \end{Bmatrix} \quad (2.132)$$

olur. Burada;

$$\hat{K}_{ijlk}^{t0(n)} = \frac{2}{\Delta t^2} \left(3\hat{M}_{ijlk}^{(n)} - \hat{M}_{ijlk}^{(n-1)} \right) + K_{ijlk}^1 + \lambda_n^{(n-\frac{1}{2})} K_{ijlk}^2 \quad (2.133)$$

$$\hat{K}_{lin}^{t1(n)} = 2K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n)} \quad (2.134)$$

$$\hat{D}_{mjk}^{t0(n)} = 2K_{nijlk}^2 U_{il}^{(n)} = 2D_{mjk}^{t0(n)} \quad (2.135)$$

$$\hat{D}_{mn}^{t1(n)} = 2C_{mn} = 2D_{mn}^{t1(n)} \quad (2.136)$$

$$\begin{aligned} \hat{R}_{il}^{(n)} = & \frac{2}{\Delta t} \left(3\hat{M}_{ijlk}^{(n)} - \hat{M}_{ijlk}^{(n-1)} \right) V_{jk}^{(n)} + \left(3F_{il}^{(n)} - F_{il}^{(n-1)} \right) - 2K_{ijlk}^1 U_{jk}^{(n)} - \\ & - 2\lambda_n^{(n-\frac{1}{2})} K_{nijlk}^2 U_{jk}^{(n)} \end{aligned} \quad (2.137)$$

$$\hat{G}_m^{(n)} = 2G_m^{(n)} \quad (2.138)$$

dir. Toplam denklemler matris formunda yazılırsa;

$$\hat{K}(\Delta y) = \hat{F} \quad \text{n zaman adımında} \quad (2.139)$$

$$F^r = -\hat{F}^{(n+1)} \quad (2.140)$$

olur.

2.9. Platform ve Bağlama Sistemlerinin Birleşik Analizi

Bağlama sistemleri ve rayzerlerin statik ve dinamik çözümü verilen bilgiler ve sınır koşulları ile yapılır. Her iki sistemin de uçlarındaki sınır şartları farklıdır. Üst uçlar veya alt-üst uçlar, eğer halatlar araçtan bir diğer araca bağlanmak için kurulmuşsa (çoklu yapı etkileşimi problemleri) halatlar platforma güçlü yay elemanlarla bağlanmışlardır. Böylece uç nodlar yüzer platform ile aynı yer değiştirmeye sahip olurlar. Halatların diğer uçları deniz

tabanına demir çapa ile bağlanır ve altı serbestlik dereceli koşullar için tamamen sabit hale getirilir, sınırlandırılır. Platform global koordinat sisteminde merkezde tek bir nokta olarak belirlenir ve rijit yapı gibi davranış gösterdiği kabul edilir. Ayrıca altı serbestlik dereceli harekete sahiptir. Yapının davranışı bağlama halatları ve rayzerlerin hareketlerinden de büyük ölçüde etkilenir.

Yarı-statik analizde bağlama sistemleri ve rayzerler ayrı ayrı yapının hareketine etki ettirilir. Önce yapının hareketi çözülür. İşlem sonrası bağlama halatları ve rayzer dinamiği, yapı hareketiyle aynı ölçüde hareket eden uç nodların hareketi ile birlikte analiz edilir. Yapı ve halatların birleşik etkisi değerlendirilir. Sistem matrisleri birlikte yapılır ve çözülür. Fakat önceden elde edilen yapının hareketi düzgün bir şekilde kablolardaki atalet etkilerini ve hidrodinamik yükleri değerlendiremez. Çünkü yapı hareketleri kablo dinamiğinden bağımsız olarak dikkate alınır.

Aksine, birleşik analizde yapının ve kabloların analizi aynı anda yapılır. Yapının ve kabloların bütün dinamik etkileri toplam sistem matrisinde bulunur ve birlikte çözülür. Su derinliği arttıkça atalet etkileri de büyür. Böylece etkileşim etkisi büyük ölçüde yapı ve kablo hareketlerini etkiler. Ultra derin sularda (>8000ft) yüzer platformların hareketi ve kablo dinamiği çözümü için birleşik analiz gereklidir. Birleştirme etkisi Ran [24] tarafından çalışılmıştır. Ran [24] birleşik sistemlerin çözümü için matematiksel formüller geliştirmiş ve bunları uygulamıştır. Ayrıca çalışmasında statik analiz için Newton-Raphson nümerik yöntemini, zaman alanı analizi için Adam-Bashforth yöntemini kullanmıştır [3].

2.9.1. Zamana Bağlı Analiz

Kablolarda uç nodlar üzerindeki bağlayıcı kuvvetler ve momentler $t^{(n)}$ zamanından $t^{(n+1)}$ zamanına kadar integrali alınır ve Newton yöntemi uygulanırsa;

r_i için:

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} N_i^S dt = \frac{\Delta t}{2} (N_i^{S^{(n+1)}} + N_i^{S^{(n)}}) =$$

$$= \frac{\Delta t}{2} (-K_{ij}^{rr} \Delta r_j - K_{ij}^{rx} \Delta X_j - K_{ij}^{r\theta} \Delta \theta_j + 2N_i^{S^{(n)}}) \quad (2.141)$$

r'_i için:

$$\begin{aligned} \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} L_i^S dt &= \frac{\Delta t}{2} (L_i^{S(n+1)} + L_i^{S(n)}) = \\ &= \frac{\Delta t}{2} (-K_{ij}^{r'r'} \Delta r'_j - K_{ij}^{r'\theta} \Delta \theta_j + 2L_i^{S(n)}) \end{aligned} \quad (2.142)$$

olur. Rijit yapı üzerinde bağlayıcı kuvvetler ve momentlerin $t^{(n)}$ zamanından $t^{(n+1)}$ zamanına kadar integrali ise şu şekilde hesaplanır:

X_i için:

$$\begin{aligned} \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_i dt &= \frac{\Delta t}{2} (F_i^{(n+1)} + F_i^{(n)}) = \\ &= \frac{\Delta t}{2} (-K_{ij}^{Xr} \Delta r_j - K_{ij}^{XX} \Delta X_j - K_{ij}^{X\theta} \Delta \theta_j + 2F_i^{(n)}) \end{aligned} \quad (2.143)$$

θ_i için:

$$\begin{aligned} \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} M_i dt &= \frac{\Delta t}{2} (F_i^{(n+1)} + F_i^{(n)}) = \\ &= \frac{\Delta t}{2} (-K_{ij}^{\theta r} \Delta r_j - K_{ij}^{\theta r'} \Delta r'_j - K_{ij}^{\theta\theta} \Delta \theta_j + 2M_i^{(n)}) \end{aligned} \quad (2.144)$$

olur. Burada K matrisi aşağıdaki şekildedir:

$$K_{ij}^{rr} = -\frac{\partial N_i^S}{\partial r_j} = K_i^L \delta_{ij} \quad (2.145)$$

$$K_{ij}^{rX} = -\frac{\partial N_i^S}{\partial X_j} = -K_i^L \delta_{ij} \quad (2.146)$$

$$K_{ij}^{r\theta} = -\frac{\partial N_i^S}{d\theta_j} = -K_i^L C_{ij} \quad (2.147)$$

$$K_{ij}^{r'r'} = -\frac{\partial L_i^S}{dr_j'} = K_i^\theta \left[\frac{\delta_{ij}}{(r_m' r_m')^{1/2}} - \frac{r_i' r_j'}{(r_n' r_n')^{3/2}} \right] \quad (2.148)$$

$$K_{ij}^{\theta\theta} = -\frac{\partial L_i^S}{d\theta_j} = -K_i^\theta D \quad (2.149)$$

$$K_{ij}^{Xr} = -\frac{\partial F_i}{dr_j} = K_i^L \delta_{ij} \quad (2.150)$$

$$K_{ij}^{XX} = -\frac{\partial F_i}{dX_j} = -K_i^L \delta_{ij} \quad (2.151)$$

$$K_{ij}^{X\theta} = -\frac{\partial F_i}{d\theta_j} = -K_i^L C_{ij} \quad (2.152)$$

$$K_{ij}^{\theta r} = -\frac{\partial M_i}{dr_j} = K_j^\theta C_{ji} \quad (2.153)$$

$$K_{ij}^{\theta r'} = -\frac{\partial M_i}{dr_j'} = K_j^\theta \left[\frac{\delta_{ij}}{(r_m' r_m')^{1/2}} - \frac{r_i' r_j'}{(r_n' r_n')^{3/2}} \right] D_{ji} \quad (2.154)$$

$$K_{ij}^{\theta\theta} = -\frac{\partial M_i}{d\theta_j} = -[K_j^L C_{ki} C_{kj} + K_j^\theta D_{ki} D_{kj}] \quad (2.155)$$

K_{ij}^{rr} ve $K_{ij}^{r'r'}$ sertlik katsayıları eleman ek sertlik matrisidir. K_{ij}^{XX} , $K_{ij}^{X\theta}$ ve $K_{ij}^{\theta\theta}$ platform sertlik matrisidir. Diğer terimler K_{ij}^{rX} , $K_{ij}^{r\theta}$, $K_{ij}^{r'\theta}$, $K_{ij}^{\theta r}$ ve $K_{ij}^{\theta r'}$ ise sistem matrisinde birleştirme koşullarıdır ve simetrik özellik gösterirler [3].

$N_i^S = [N_1^S N_2^S N_3^S]^T$ ve $L_i^S = [L_1^S L_2^S L_3^S]$ olmak üzere kablo üzerinde uç noktadaki nodal bileşke kuvvet ve nodal bileşke momenttir.

$K_i^L = [K_1^L K_2^L K_3^L]$ ve $K_i^\theta = [K_1^\theta K_2^\theta K_3^\theta]$ ise x -, y -, z - yönünde ötelenme ve θ_x , θ_y , θ_z yönünde dönme yay sabitidir.

X_j ve θ_j yapının ötelenme ve dönme hareketini, p_i yapının yay elemana bağlandığı noktadaki nodun konum vektörünü, r_i kablunun yay eleman tarafından yapıya bağlandığı uç nokta ya da başlangıç nodunun konum vektörünü, r_i' r_i vektörünün türevini, e_i dönen yay eleman referans yönündeki birim vektörü gösterir [3].

Kablo ucundaki r_i vektörü şu şekilde bulunur:

Bağlantı noktası kablunun başlangıç noktası ise;

$$r_1 = U_{11} \quad r_2 = U_{21} \quad r_3 = U_{31} \quad (2.156)$$

$$r_1' = U_{12} \quad r_2' = U_{22} \quad r_3' = U_{32} \quad (2.157)$$

Eğer bağlantı noktası bitiş ucundaysa;

$$r_1 = U_{13} \quad r_2 = U_{23} \quad r_3 = U_{33} \quad (2.158)$$

$$r_1' = U_{14} \quad r_2' = U_{24} \quad r_3' = U_{34} \quad (2.159)$$

C_{ji} ve D_{ji} ise p_i konum vektörü ve e_i birim vektörlerinin vektörel çarpımının nümerik manipülasyonunu kolaylaştırmak için aşağıdaki gibi tanımlanmışlardır [3]:

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & -p_3 & p_2 \\ -p_3 & 0 & -p_1 \\ p_2 & -p_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.160)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ -e_3 & 0 & -e_1 \\ e_2 & -e_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.161)$$

2.10. Tanker Tabanlı FPSO Dinamik Analizi

Bu bölümde, önceki bölümlerde bahsedilen bağlama halatları/rayzerler ile bağlanarak çok yapıli sistem oluşturan tanker tabanlı FPSO gemisinin dinamik analizi HAD programı

kullanılarak yapılacak ve deneysel verilerle karşılaştırılacaktır. Analizi yapılacak tanker tabanlı FPSO gemisi Meksika Körfezi'nde 1829m (6000ft) derinlikte, belirlenen çevre koşullarında çalışacak şekilde kurulumu gerçekleştirilmiştir.

FPSO, operasyon sırasında büyük dönme hareketine sahiptir. Genel olarak, bu büyük savrulma hareketine neden olan akım ve rüzgar kuvveti katsayıları; *Petrol Şirketleri ve Uluslararası Denizcilik Forumu (OCIMF)* tarafından, uzun yıllar boyunca toplanan çok sayıdaki büyük ham petrol tankerleri (VLCC) deneysel dataları kullanılarak belirlenir [25].

Analiz için seçilen taret bağlı FPSO, 1829m derinlikte, 100- yıllık Meksika Körfezi kasırga koşulları kullanılarak modellenmiştir. Bağlama sistemleri katenari tipi olarak seçilmiş ve MARIN tarafından aynı modelin yarı gergin çelik kablolu sistem kullanılarak oluşturulan deneysel model sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.10.1. Kullanılan HAD yazılımı

ANSYS-AQWA programının AQWA-LINE modülü düzenli dalgalar arasında cisim veya lineer tepkilerini hesaplar. Programı temel prensibi difraksiyon ve radyasyon teorisidir ve analiz tekniği Green fonksiyonları yöntemidir [26]. Nümerik hesaplama aşaması, sınır elemanları yöntemi (yaygın adıyla panel metodu) kullanılarak yapılmaktadır.

AQWA-DRIFT modülü ise, AQWA-LINE modülü tarafından hesaplanan ikinci dereceden kuvvetler ile diğer hidrodinamik ve hidrostatik bilgileri kullanarak, büyük yüzer yapıların hareketlerini zaman alanında simüle eden bir programdır. Bu program ile mafsallanmış ya da bağlanmış yüzer yapıların rüzgar, dalga ve akım kuvvetleri altındaki hareketlerini belirli bir zaman alanı içerisinde incelemek mümkündür [27]. Program şu iki çalışma modu vardır:

- Yavaşlatılmış sürüklenme hareketi modu, burada yüzer yapı sadece ikinci dereceden dalga kuvvetleri, sabit kararlı bir rüzgar ve akım kuvvetlerine maruz kalır.
- Dalga frekansı modu, bu modda ise hem yavaşlatılmış sürüklenme hareketi hem dalga frekansı kuvvetleri aynı anda rüzgar ve akım ile birlikte dahil edilir [27].

2.10.2. Tanker Tabanlı FPSO ve Bağlama Sistemleri Dizayn Parametreleri

Bu bölümde dizayn parametreleri verilmiştir. Çalışma için seçilen tanker tabanlı FPSO 1829 m (6000ft) derinlikte kurulmuştur. Depolama kapasitesi 1440000 bbls, üretim kapasitesi 120000 bpd' dir Yüksüz ağırlığı 200 kDWT' dir. Kaimeler arası uzunluk (LBP) 317m, genişliği 47,17m, 22,02m derinliğe sahiptir. Tam yüklü draftı 18.121m olmakla beraber çalışma için %80 yüklü durumdaki draftı (15.121m) kullanılmıştır. Taret baş kaimenin 46,33m gerisinde konumlandırılmıştır. Dizayn parametreleri Tablo 2.1' de, Şekil 2.1' de ise FPSO en kesitleri ile izotropik görünümü verilmiştir.

Tanker tabanlı FPSO gemisin pozisyonlanması 12 tane bağlama halatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu halatlar zincir-polyester kablo-zincir şeklinde oluşmaktadır. Ayrıca üretimi gerçekleştiren 13 rayzer kablo bulunmaktadır ve bunlar çelik kablolardan oluşmaktadır. Bağlama halatları ve rayzerler taret sistemine bağlanmıştır. Tablo 2.2' de bağlama halatlarının ana özellikleri, Tablo 2.3' de ise bağlama halatlarının hidrodinamik katsayıları verilmiştir. Bağlama halatlarının şematik gösterimi Şekil 2.2' de olduğu gibidir. 12 bağlama halatı 4 gruba ayrılmış ve her bir grup kendi aralarında 5 derece yapacak şekilde 3 tane bağlama halatından oluşmaktadır. 1. grup doğu, 2. grup ise kuzey yönü gösterecek şekildedir.

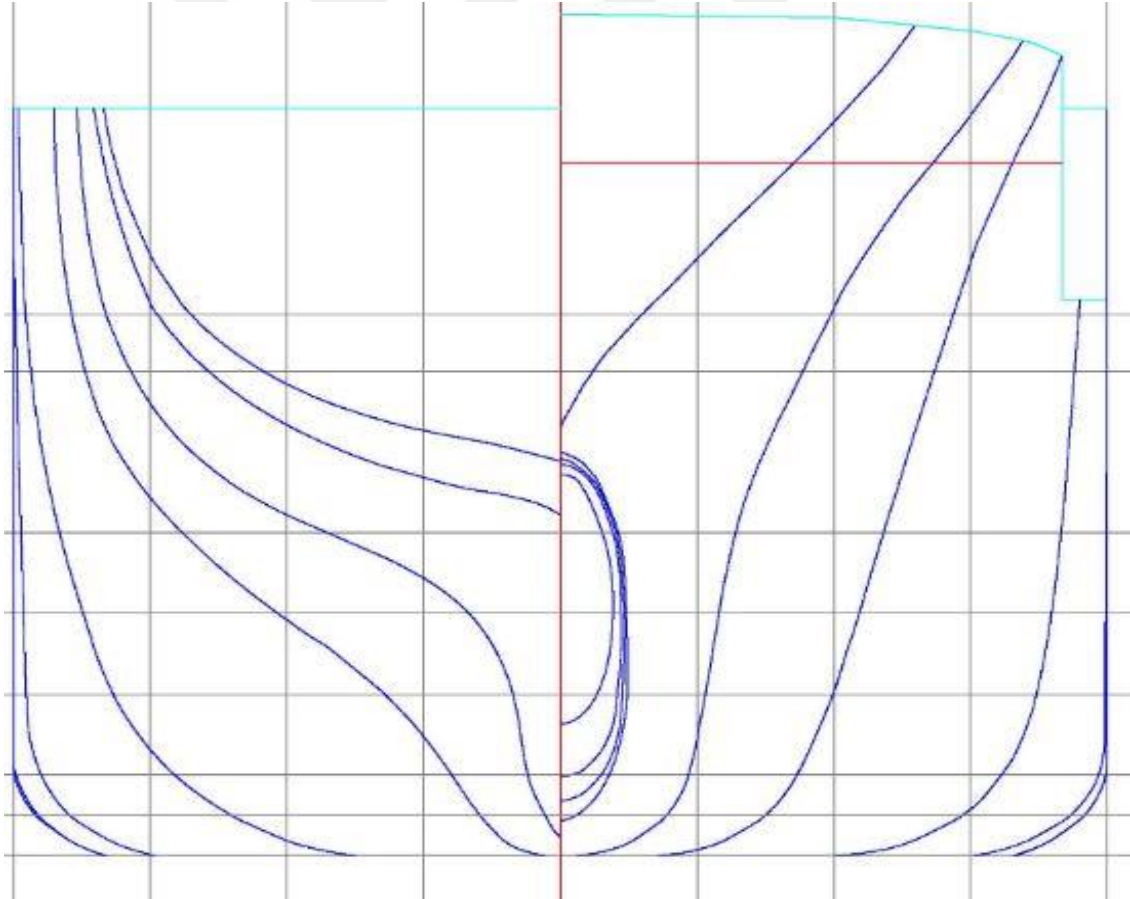
Prototip FPSO gemisinde 13 tane rayzer bulunmasına rağmen, çalışmada deneysel test sonuçlarıyla karşılaştırılmak için bu 13 rayzer, 1 elemana indirgenerek simülasyon yapılmıştır.

Tablo 2.1. Tanker Tabanlı FPSO Ana Boyutları

Genel Bilgiler	Sembol	Birim	Değer
Üretim kapasitesi		bpd	120000
Depolama kapasitesi		bbls	1440000
Gemi büyüklüğü		kDWT	200.0
Kaimeler arası uzaklık	LBP	m	317
Genişlik	B	m	47.17
Derinlik	D	m	22.02
Su çekimi (%80 yüklü durumda)	T	m	15.121
Deplasman tonajı (%80 yüklü durumda)	Δ	MT	188829
Uzunluk/genişlik oranı	L/B		6.7

Tablo 2.1.'in devamı

Genişlik/draft oranı	B/T		3.12
Blok katsayısı	C_b		0.85
Hacim merkezi konumu (taretten)	x_b	m	-107.24
	z_b	m	-7.1
Ağırlık merkezi konumu (taretten)	x_g	m	-109.67
	z_g	m	-1.8
Yalpalama Girasyon yarı çapı	K_{xx}	m	14.036
Baş-kıç vurma Girasyon yarı çapı	K_{yy}	m	77.47
Savrulma Girasyon yarı çapı	K_{zz}	m	79.30
Taret konumu (baş kaimeden)	X_{tur}	m	-46.33
Taret çapı		m	15.85



Şekil 2.2. FPSO en kesitleri

Tablo 2.2 Bağlama sistemleri ana bölümleri

Kısımlar	Birim	Değer
Su derinliği	m	1829
Ön gerilme	kN	1424
Halat sayısı		4x3
Her 3 halat arasındaki açı	der.	5°
Bağlama halatı toplam uzunluğu	m	2652
<i>Kısım 1 (deniz tabanı kısmı): zincir</i>		
Demirleme noktasındaki uzunluk	m	121.9
Çap	cm	9.52
Birim uzunluk başına kuru ağırlık	N/m	1856
Birim uzunluk başına ıslak ağırlık	N/m	1615
Sertlik, AE	kN	820900
Ortalama kırılma yükü (MBL)	kN	7553
<i>Kısım 2: polyester kablo</i>		
Uzunluk	m	2438
Çap	cm	16.0
Birim uzunluk başına kuru ağırlık	N/m	168.7
Birim uzunluk başına ıslak ağırlık	N/m	44.1
Sertlik, AE	kN	168120
Ortalama kırılma yükü (MBL)	kN	7429
<i>Kısım 3 (üst kısım): zincir</i>		
Demirleme noktasında uzunluk	m	91.4
Çap	cm	9.53
Birim uzunluk başına kuru ağırlık	kN	1856
Birim uzunluk başına ıslak ağırlık	kN	1615
Sertlik, AE	kN	820900
Ortalama kırılma yükü, (MBL)	kN	7553

Tablo 2.3 Rayzer ana bilgileri [3].

TÜR	SAYI	ÜST GERİLME	DIŞ ÇAP	SERTLİK, AE	BİRİM KÜTLE	BİRİM AĞIRLIK (KURU/ISLAK)	Cdn
		kN	mm	kN	kg/m	N/m	
Sıvı üretim	4	1112.5	444.3	1.83E+07	196.4	1927/1037	1
Gaz üretim	4	609.7	386.1	1.08E+07	174.1	1708/526	1
Su enjekte	2	2020	530.9	1.86E+07	285.7	2803/1898	1.41
Gaz enjekte	2	1353.8	287.9	3.14E+07	184.5	1810/1168	1.41
Gaz çıkarıcı	1	453.9	342.9	8.60E+06	138.4	1358/423	1

2.10.3. Çevresel Koşullar

Analizi yapılacak olan tanker tabanlı FPSO gemisi kurulum bölgesi olarak Meksika Körfezi seçilmiş ve bu bölgeye ait 100 yıllık kasırga koşulları uygulanmıştır. Belirgin dalga yüksekliği 12 metre, pik periyodu 14 saniyedir. Ani yükselme noktası 2.5, rüzgar spektrumu olarak ise NPD kullanılmıştır. 10 metre referans yükseklikte ortalama rüzgar hızı ise 41.12 m/s' dir. Çevresel koşullar tablo 2.4 ile gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Çevresel koşullar

TANIM	Birim	Değer
Dalga		
Karakteristik dalga yüksekliği, H_s	m	12.19
Dalga pik periyodu, T_p	s	14
Dalga spektrumu	JONSWAP ($\gamma=2.5$)	
Dalga yönü	der	180°
Rüzgar		
10 m referans yükseklikte rüzgar hızı	m/s	41.12
Rüzgar spektrumu	NPD	
Rüzgar yönü	derece	150°

Tablo 2.4'ün devamı

Akım		
Akım profili		
serbest yüzeyde	m/s	0.9144
60.96 metrede	m/s	0.9144
91.44 metrede	m/s	0.0914
deniz tabanında	m/s	0.0914
Akım yönü	derece	210°

2.10.4. Dalga Kuvveti

JONSWAP dalga spektrumu Hasselman vd. [28] tarafından ortak yürütülen Kuzey Denizi Dalga Projesi, Pierson-Moskowitz dalga spektrumundan yola çıkılarak türetilmiş ve geliştirilmiştir. Formülü aşağıdaki gibidir:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^4 \gamma \exp \left[\frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right] \right] \quad (2.162)$$

Burada α rüzgar hızına (U_w) bağlı bir parametredir. g yerçekimi ivmesi, γ tepe noktası sivrilik parametresi, τ şekil parametresidir. X feç uzunluğunu göstermek üzere α , γ ve ω şu şekilde bulunur:

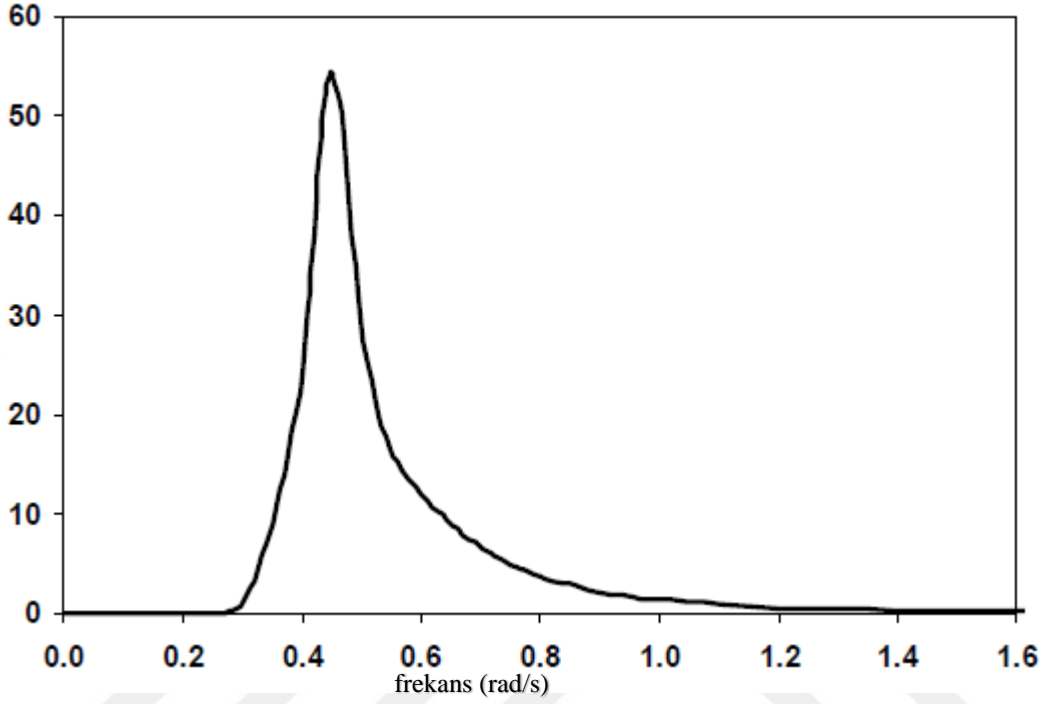
$$\alpha = 0.076(X_0)^{-0.22} \quad (2.163)$$

$$\tau = 0.07 \quad \omega \leq \omega_0$$

$$\tau = 0.09 \quad \omega > \omega_0 \quad (2.164)$$

$$\omega_0 = 2\tau \left(\frac{g}{U_w} \right) (X_0)^{-0.33} \quad (2.165)$$

Burada $X_0 = g \frac{X}{U_w^2}$ ile bulunur. X bilinmediği zaman $\alpha=0.0081$ olarak alınır. Şekil 2.2 ile JONSWAP dalga spektrumu gösterilmiştir.



Şekil 2.3. JONSWAP dalga spektrumu [1].

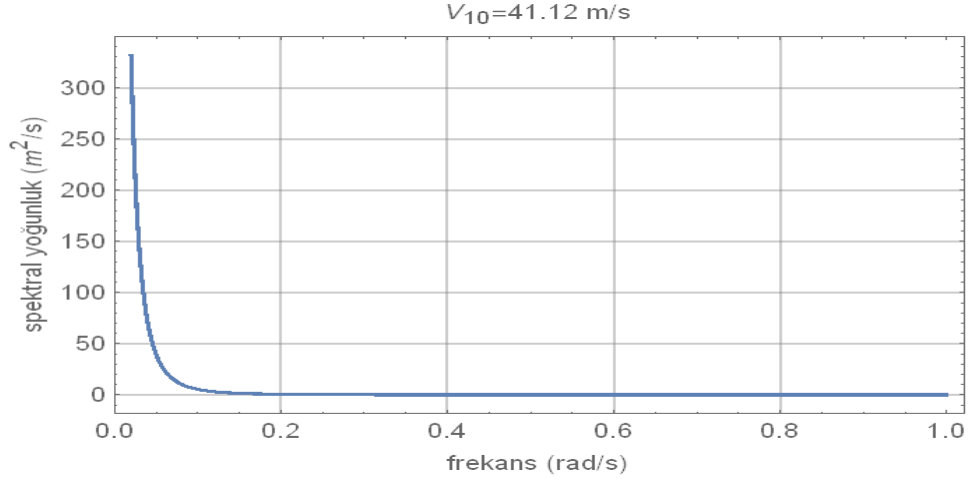
2.10.5. Rüzgar Kuvveti

Çalışmada rüzgar spektrumu olarak NPD rüzgar spektrumu kullanılmıştır. Bu spektrum Norwegian Petroleum Directorate kılavuzuna göre şu şekilde formüle edilir [29]:

$$S_{uu}(f) = \frac{320 \left(\frac{\bar{U}}{10} \right)^2}{\left(1 + \bar{f}^n \right)^{\frac{5}{3n}}} \quad (2.166)$$

Burada;

$$\bar{f} = 172f \left(\frac{\bar{U}}{10} \right)^{-0.75} \text{ ve } n=0.468 \text{ 'dir. } \bar{U} \text{ saatte ortalama rüzgar hızıdır.}$$



Şekil 2.4. NPD rüzgar spektrumu

2.10.6. Rüzgar ve Akıntı Kuvvet Katsayıları

FPSO, tanker tabanlı bir çeşit taşıyıcıdır. OCIMF (Oil Companies International Marine Forum) büyük ham petrol taşıyıcı tankerleri (VLCC) üzerindeki dalga ve rüzgar etkilerini araştıran bir uluslararası komitedir [15]. Komite tarafından 1988 yılında yayınlanan kitapçığa göre; rüzgar ve akıntı kuvveti katsayıları şu şekilde formüle edilmiştir:

$$F_{xw} = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_w^2 A_T \quad (2.167)$$

$$F_{yw} = \frac{1}{2} C_{yw} \rho_w V_w^2 A_L \quad (2.168)$$

$$M_{xyw} = \frac{1}{2} C_{xyw} \rho_w V_w^2 A_L L_{bp} \quad (2.169)$$

$$F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c V_c^2 L_{bp} T \quad (2.170)$$

$$F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_c V_c^2 L_{bp} T \quad (2.171)$$

$$M_{xyc} = \frac{1}{2} C_{xyw} \rho_c V_c^2 L_{bp}^2 T \quad (2.172)$$

Burada F_{xw} ve F_{yw} sırasıyla yanal ve boyuna öteleme rüzgar kuvvetini, M_{xyw} ise rüzgar savrulma momentini gösterir. Aynı şekilde de F_{xc} ve F_{yc} sırasıyla yanal ve boyuna öteleme akıntı kuvvetini ve M_{xyc} de akıntı savrulma momentini gösterir. C_{xw} , C_{yw} , C_{xyw} rüzgar kuvveti katsayılarını, C_{xc} , C_{yc} , C_{xyc} akıntı kuvveti katsayılarını ifade eder. A_L , A_T , T ve L_{bp} sırasıyla gemi boyuna ve yanal alanı, draftı ve kaimeler arası boydur.

2.11. FPSO Birleşik Analizi

Burada taret bağlı FPSO analiz durumu açıklanmıştır. Deniz derinliği 1829 metre (6000 feet) alınmıştır. Hidrodinamik katsayılar AQWA-LINE ile hesaplanmış ve bu katsayılar doğrudan AQWA-DRIFT programında girdi olarak program tarafından kullanılmıştır. Sonuçlar MARIN deney sonuçları ve referans tez ile karşılaştırılmıştır [3]. Bağlama halatları ve rayzerler de AQWA-DRIFT için modellenerek girdi olarak kullanılmıştır.

Bağlama halatları 3 kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım deniz tabanındaki demirleme noktasındaki zincir kısım, ikinci olarak polyester kablo ve son olarak ise FPSO'ya bağlanan noktaya kadar olan zincir kısımdır. Taret bu çalışma için sabit bir nod olarak alınmıştır.

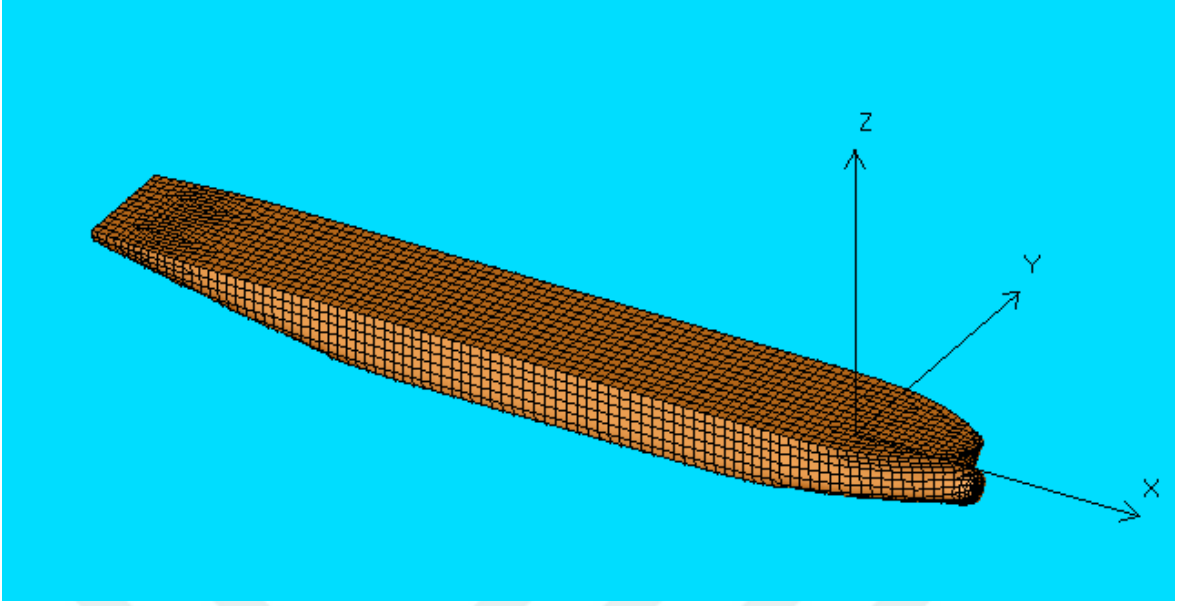
Rayzer kablolar olarak çelik katenari tip rayzerler (SCR) kullanılmıştır. Rayzerler 12 eşit parçaya bölünmüştür ve bağlama halatları ile aynı sınır şartlarına sahiptir. Rüzgar, dalga yükü ve akıntı kuvvetleri için Tablo 2.4 ile verilen çevresel koşullar kullanılmıştır.

Birleşik dinamik analizden önce, statik ve dinamik denge testleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda, modelin sistem parametreleri, sertlik, doğal frekans ve sönümlenme faktörleri incelenmiş ve gerçek sisteme eşdeğer olup olmadığı kontrol edilmiştir.

İlk olarak ileri öteleme hareketi için statik sapma testi yapılmıştır. Bu testte FPSO için karşılaşma açısı 0 derece alınmıştır. Burada bağlama halatları ve rayzer gerilmelerinin statik ağırlık dengesi, gemi ağırlığı ve kaldırma kuvveti kontrol edilmiştir.

İkinci olarak ise serbest sönüm testi yapılmıştır. Burada ise sakin suda geminin ileri öteleme, yanal öteleme, dalıp-çıkma, yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma hareketleri için rayzerlerin sönümlenme etkisine bakılmıştır. Başlangıç şartı olarak, x- yönünde $2E+07$ N' lik bir kuvvet uygulanmış, zaman adımı olarak simülasyon zamanı olarak 200 s seçilmiştir.

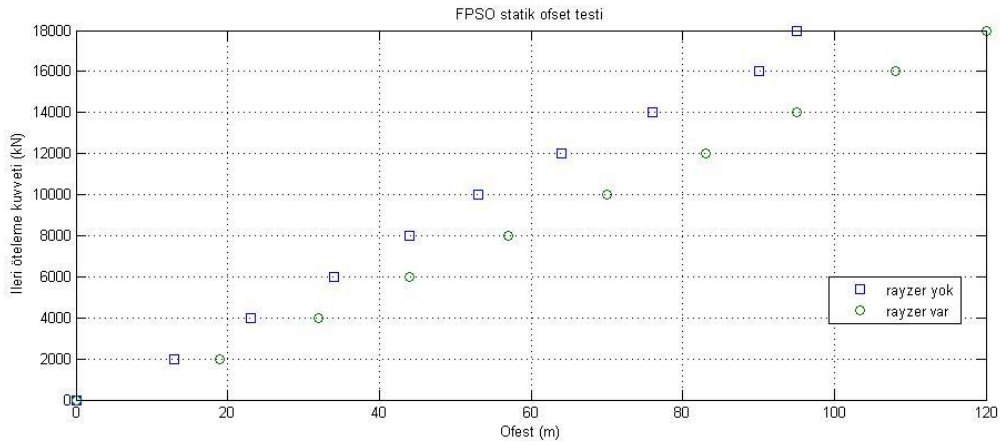
Son olarak zaman alanında düzensiz dalgalar içerisinde birleşik analiz yapılmıştır. Frekans aralığı olarak 0.015 rad/s ile 1.2 rad/s seçilmiştir. Simülasyon zaman adımı 1 s simülasyon toplam zamanı 3 saattir.



Şekil 2.5. FPSO modeli

2.11.1. Statik Ofset Testi

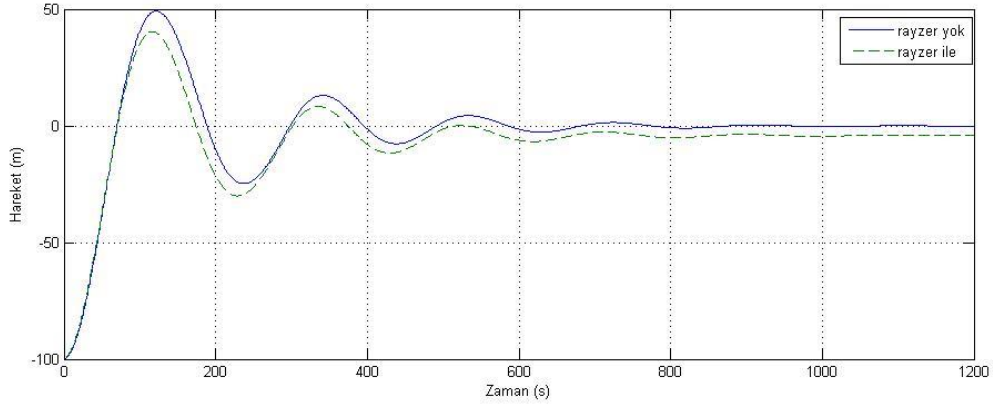
Bu kısımda ileri öteleme hareketinde ağırlık merkezinin düşey konumunun yatay ekseninde yer değiştirmesi gözlemlenmiştir. Test sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Test sonucuna göre; rayzer kablolar kullanılan modelin ofset değerlerinin rayzer kablolar kullanılmayan modelin ofset değerlerine göre fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni rayzerlerin gerginlikleridir. Diğer taraftan da bağlama halatları gerilmeleri üzerindeki rayzerler etkileri daha az kayda değer bulunmaktadır. Sonuçlar OTRC deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



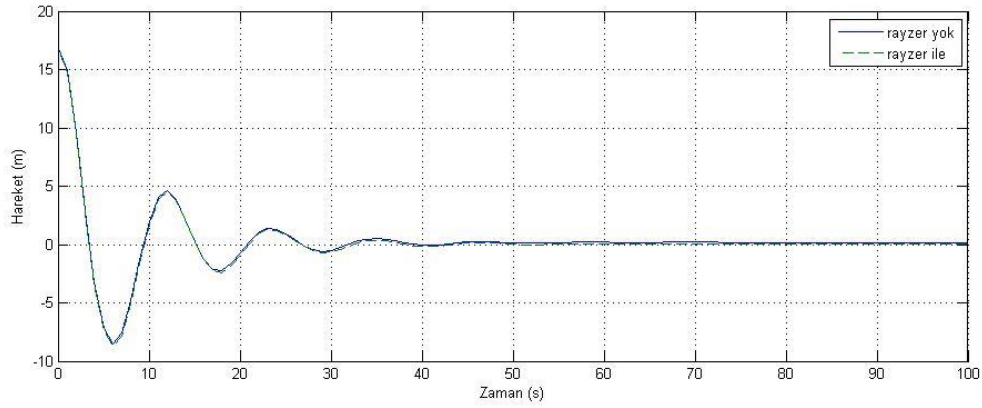
Şekil 2.6. FPSO statik ofset testi

2.11.2. Serbest Sönümlenme Testi

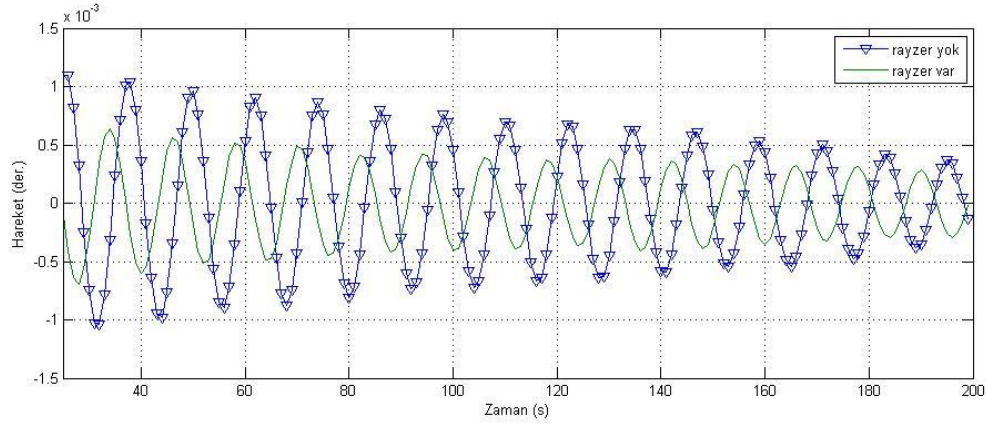
Bu test ile rayzerlerin sönümlenme üzerindeki etkileri gösterilmiş, sonuçlar OTRC deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır.



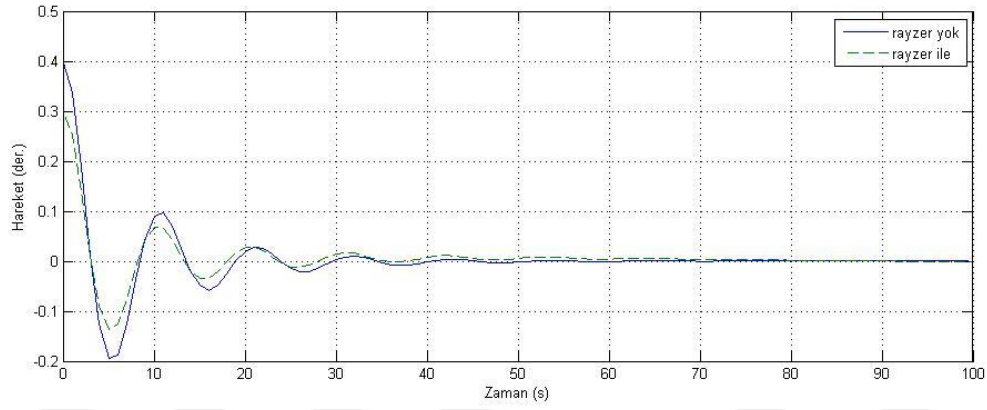
Şekil 2.7. İleri öteleme hareketi serbest sönümlenme simülasyon sonucu



Şekil 2.8. Dalıp-çıkma hareketi serbest sönümlenme simülasyon sonucu



Şekil 2.9. Yalpa hareketi serbest sönümlenme simülasyonu sonucu



Şekil 2.10. Baş-kıç vurma hareketi serbest sönümlenme simülasyonu sonucu

Tablo 2.5. Serbest sönümlenme testi sonuçlarına göre doğal periyotlar

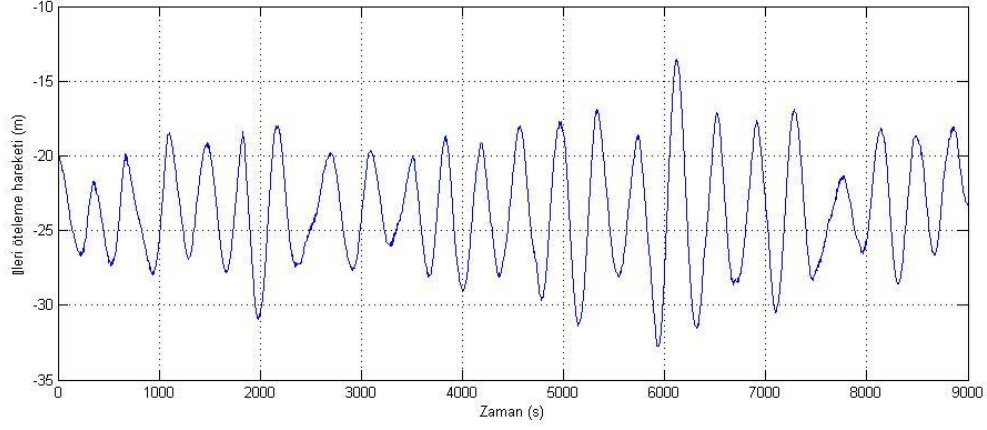
Durum	İleri öteleme	Dalıp-Çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma
%80 yüklü (rayzer yok)	221.2 s	11.8 s	14 s	10.6 s
%80 yüklü (rayzer var)	215.4 s	11.7 s	13.18 s	10.6 s

Tablo 2.6. Serbest sönümlenme testi uygulama ile deneysel verilerin karşılaştırılması

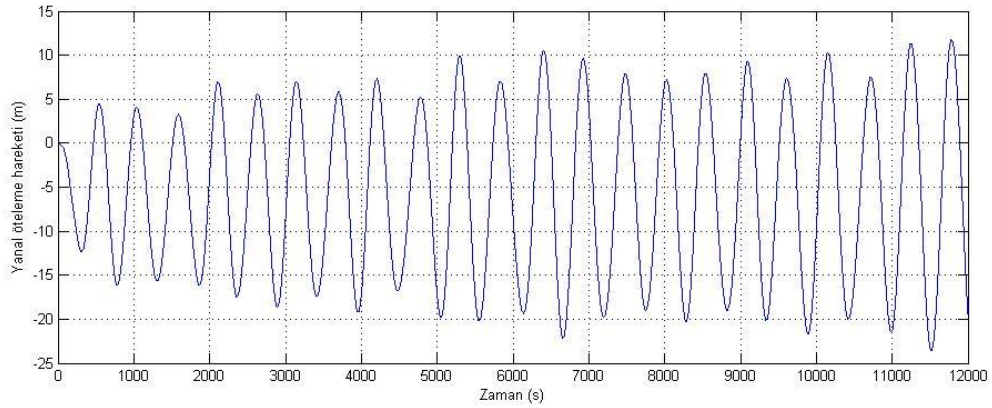
Durum	İleri öteleme	Dalıp-Çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma
OTRC deneysel	206.8 s	10.7 s	12.7 s	10.5 s
Uygulama	215.4 s	11.7 s	13.18 s	10.6 s

2.11.3. Kasırğa Koşulları Altında FPSO Zaman Alanı Simülasyonu

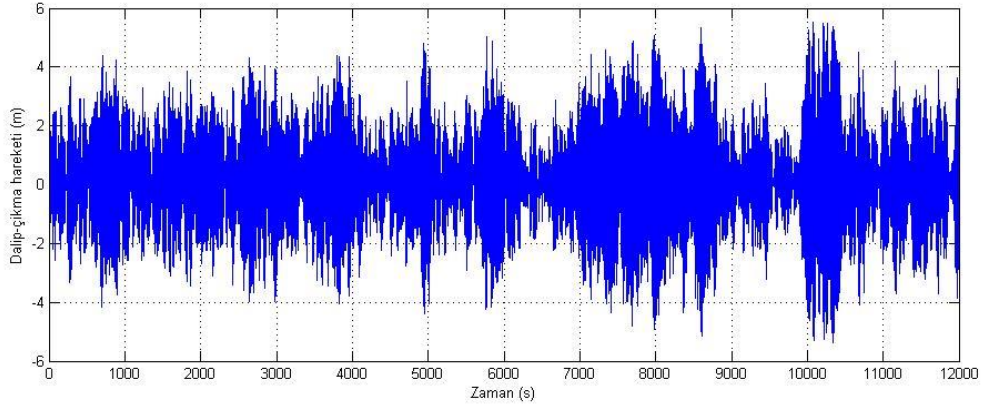
Statik testlerin ardından zamana bağlı çözümlere geçilmiştir. Simülasyon için Meksika Körfezi 100 yıllık kasırğa koşulları ele alınmıştır. Akım sürekli, düzensiz dalgaların ise tek yönlü olduğu ve baştan geldiği (180°) kabul edilmiştir. Dalga spektrumu olarak JONSWAP spektrumu seçilmiştir. Karakteristik dalga yüksekliği, $H_s=12.19$ m, dalga pik periyodu, $T_p=14$ s, aşım parametresi $\gamma=2.5$ alınmıştır. Rüzgar hızı 10 m referans yükseklikte 41.12 m/s, spektrum olarak ise *NPD* spektrumu kullanılmıştır. Tablo 2.7 ile zaman alanı simülasyon sonuçları gösterilmiş ve OTRC deneysel sonuçları [30], Kim vd. analiz sonuçları [31] ve Ivan vd. [32] analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



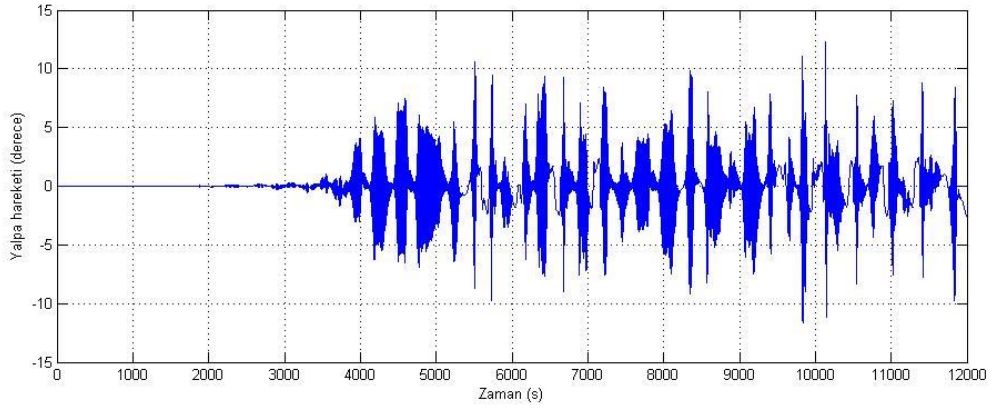
Şekil 2.11. İleri öteleme hareketi zaman serisi



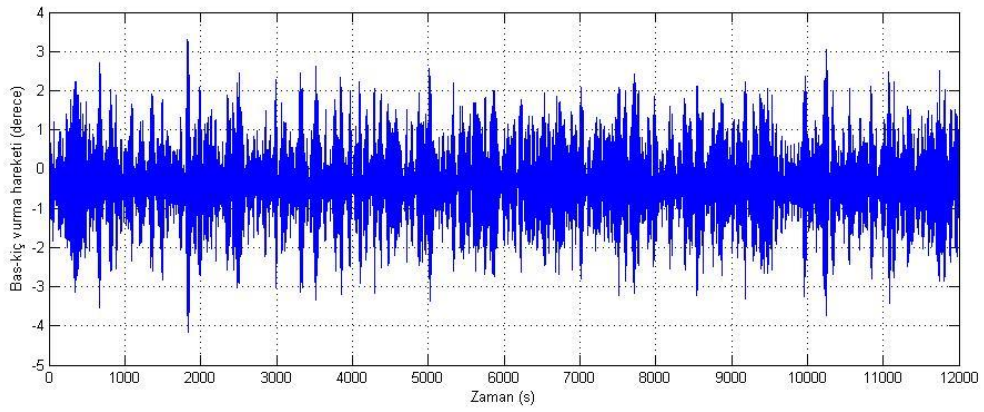
Şekil 2.12. Yanal öteleme hareketi zaman serisi



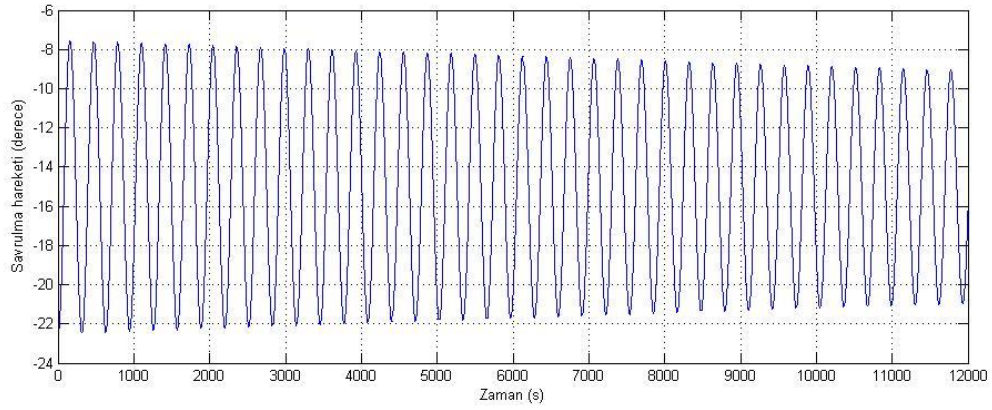
Şekil 2.13. Dalıp-çıkma hareketi zaman serisi



Şekil 2.14. Yalpa hareketi zaman serisi



Şekil 2.15. Baş-kıç vurma hareketi zaman serisi



Şekil 2.16. Savrulma hareketi zaman serisi

Tablo 2.7. Zamana bağlı simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmaları

		OTRC	WINPOST-FPSO	HYDROSTAR	Çalışma
		Deneyssel	Kim vd.	Ivan vd.	
İleri öteleme (m)	Ortalama	-22.9	-21.10	-23.77	-23.70
	Min.	-61.30	-54.10	/	-32.77
	Maks.	2.29	6.30	/	6.48
	Std.	9.72	8.78	9.08	3.63
Yanal öteleme (m)	Ortalama	-0.09	-0.64	-4.65	-5.68
	Min.	-21.40	-13.60	/	-23.58
	Maks.	13.10	10.90	/	11.74
	Std.	4.57	4.05	4.17	9.46
Dalıp-çıkma (m)	Ortalama	0.14	-0.06	-0.12	0.12
	Min.	-11.30	-9.52	/	-5.37
	Maks.	10.90	9.11	/	5.53
	Std.	3.08	2.81	0.86	1.76
Yalpa (der.)	Ortalama	-0.10	-0.08	0.03	-0.01
	Min.	-3.60	-8.77	/	-11.62
	Maks.	3.50	9.57	/	12.30
	Std.	0.90	2.18	4.42	2.04
Baş-kıç vurma (der.)	Ortalama	0.01	0.03	0.09	-0.37
	Min.	-4.99	-4.07	/	-4.16
	Maks.	4.45	4.20	/	3.25
	Std.	1.31	1.26	1.01	0.99
Savrulma (der.)	Ortalama	-16.00	-16.80	-15.34	-15.04
	Min.	-24.60	-23.30	/	-22.50
	Maks.	-3.40	-8.69	/	-7.55
	Std.	3.80	2.46	3.33	4.73

Bu sonuçlar ile, dalga frekansı tepkisinin düşey eksen hareketlerinde daha önemli durumda olmasına rağmen, yatay düzlem hareketlerinin (ileri öteleme, yanal öteleme,

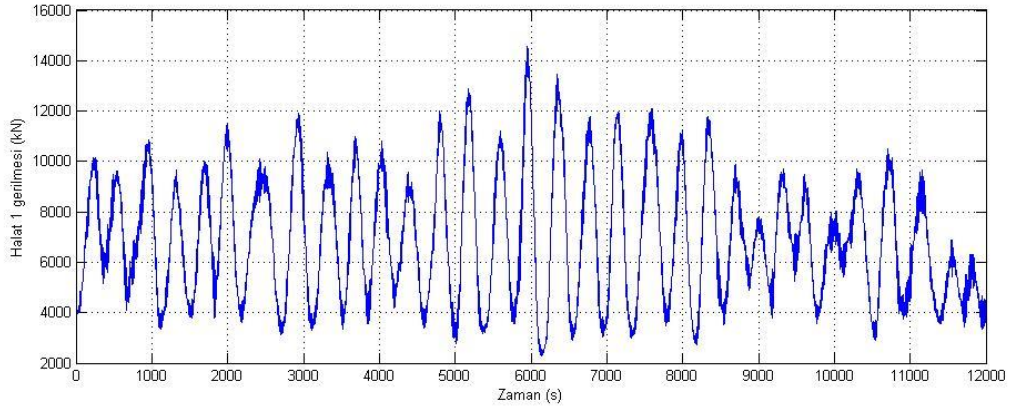
savrulma) daha baskın olduğu, ayrıca rayzer kullanımının bu hareketlerin değişimine olan etkisi de görülmüştür.

Deneysel veriler, yapılan diğer çalışmalar ve bu çalışma sonuçları arasındaki bu farkların bir çok nedeni olarak., fiziksel model ile nümerik model arasındaki bir takım uyumsuzluklar, bağlama sistemleri için kullanılan malzeme özelliklerinin farklılıkları gibi nedenleri gösterebiliriz. Ama bu belirsizliklere rağmen yapılan çalışmanın sonuçlarının kabul edilebilir kolerasyona sahip olduğu görülebilmektedir.

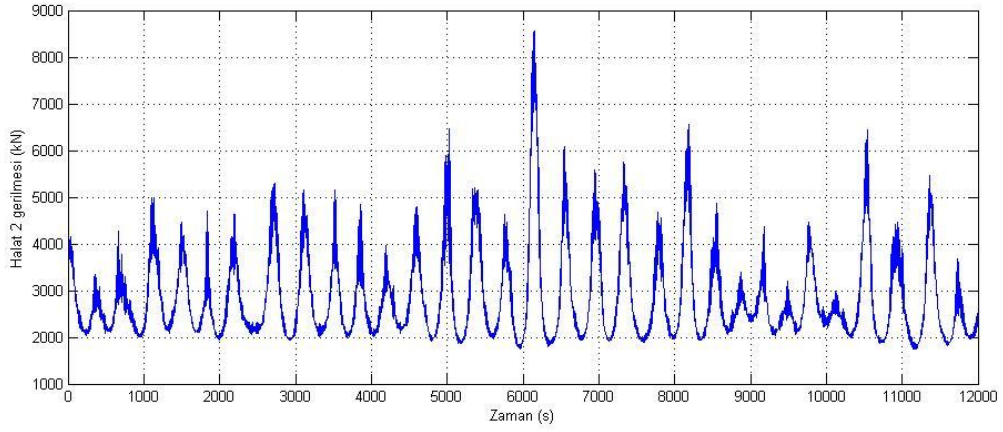
Tablo 2.8 Bağlama halatları gerilmeleri (3 halat için tek halat gösterilmekte)

		OTRC	WINPOST-FPSO	HYDROSTAR	AQWA
		Deneysel	Kim vd.	Ivan vd.	Uygulama
Halat no. 1 (kN)	Ortalama	5910	6470	7051	6917
	Min.	3680	3100	/	2281
	Maks.	10400	10700	/	14581
	Std.	827	1080	1273	823
Halat no. 2 (kN)	Ortalama	3800	2760	2782	2838
	Min.	1900	733	/	1738
	Maks.	6360	5340	/	8564
	Std.	640	711	563	314
Halat no. 3 (kN)	Ortalama	3430	2660	2434	2909
	Min.	1410	529	/	1755
	Maks.	5560	5750	/	8546
	Std.	587	722	716	350
Halat no. 4 (kN)	Ortalama	5600	6320	6156	7273
	Min.	2930	3450	/	2278
	Maks.	8130	9710	/	14610
	Std.	801	997	763	883

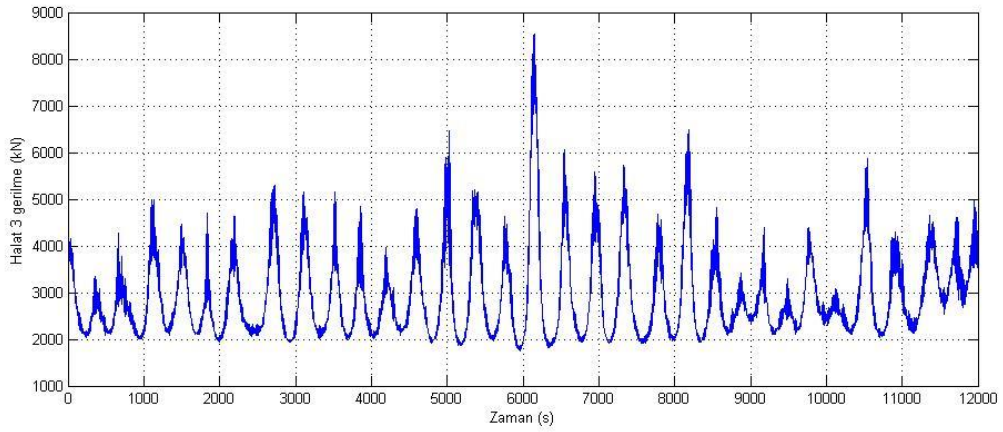
Bağlama sistemlerindeki halatların gerilmeleri karşılaştırıldığında; deney modeli için ortalama halat gerginliklerinin, gergin halatlarda (1 ve 4) nümerik simülasyon sonuçlarına göre %10-17 oranında az olduğu gözlemlenirken, gevşek halatlarda (2 ve 3) bu oranın %25-40 kadar fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak deneyin yapıldığı OTRC deney havuzunun kısıtlı olan derinliği ve bu derinliğe bağlı olarak değişen yüklemeler gösterilebilir. Deneysel model ile nümerik model arasındaki benzerlik ne kadar iyileştirilmiş olsa da, sonuçların birebir olarak tutmadığı ancak; diğer çalışmalar ile de kıyaslandığında kabul edilebilir düzeyde olduğu gözlenmiştir.



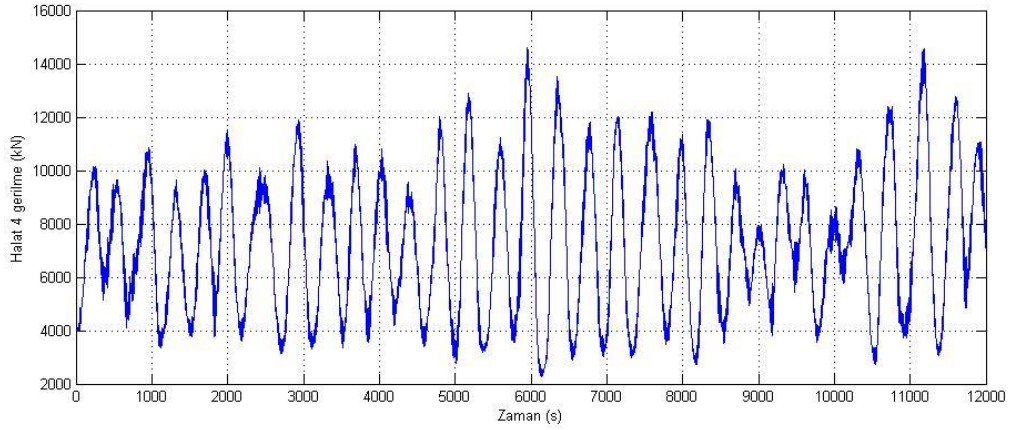
Şekil 2.17. Bağlama halatı no 1 gerilme zaman serisi



Şekil 2.18. Bağlama halatı no 2 gerilme zaman serisi



Şekil 2.19. Bağlama halatı no 3 gerilme zaman serisi



Şekil 2.20. Bağlama halatı no 4 gerilme zaman serisi

Bağlama halatları dinamik gerilmeleri karşılaştırıldığında OTRC deneysel sonuçlarının nümerik simülasyon sonuçlarına göre %20 kadar daha küçük olduğu gözlenmiştir.

Genel gemi hareketleri bakımından karşılaştırılma yapıldığında da analiz sonuçlarının deneysel veriler gibi makul olduğu görülmektedir.

2.12. Farklı Malzeme (Çelik) Kullanılan Bağlama Sistemleri ile Simülasyon

Bu bölümde, yapılan çalışmada kullanılan bağlama sistemlerinin değişmesinin, aynı çevresel ve yükleme koşulları altındaki analize olan etkileri incelenmiştir. Çalışmada yukarıda bağlama sistemleri halatları olarak kompozit malzeme (polyester) kullanılmıştı. Bu kısımda ise çelik malzeme kullanılmış ve tekrar analiz yapılarak sonuçlar karşılaştırılmış ve Ekler' de verilmiştir.

Tablo 2.9. Halat malzemelerine göre nümerik simülasyon sonuçları

		Çelik kablo	Polyester kablo
İleri öteleme (m)	Ortalama	4.19	-23.70
	Min.	-9.40	-32.77
	Maks.	20.92	6.48
	Std.	5.97	3.63

Tablo 2.9. 'un devamı

Yanal öteleme (m)	Ortalama	16.89	-5.68
	Min.	-35.54	-23.58
	Maks.	65.02	11.74
	Std.	27.64	9.46
Dalıp-çıkma (m)	Ortalama	-0.09	0.12
	Min.	-2.55	-5.37
	Maks.	2.27	5.53
	Std.	0.67	1.76
Yalpa (der.)	Ortalama	9.37E-05	-0.01
	Min.	-2.29	-11.62
	Maks.	2.34	12.30
	Std.	0.57	2.04
Baş-kıç vurma (der.)	Ortalama	-0.17	-0.37
	Min.	-3.39	-4.16
	Maks.	3.06	3.25
	Std.	0.82	0.99
Savrulma (der.)	Ortalama	-8.95	-15.04
	Min.	-32.65	-22.50
	Maks.	19.62	-7.55
	Std.	14.64	4.73

Tablo 2.10. Halat malzemelerine göre gerilmeler (3 halat için tek halat gösterilmekte)

		Çelik halat	Polyester halat
Halat no. 1 (kN)	Ortalama	39073	6917
	Min.	0	2281
	Maks.	112800	14581
	Std.	19455	823
Halat no. 2 (kN)	Ortalama	34269	2838
	Min.	0	1738
	Maks.	117000	8564
	Std.	22106	314
Halat no. 3 (kN)	Ortalama	34742	2909
	Min.	0	1755
	Maks.	105900	8546
	Std.	20269	350

Tablo 2.10.'un devamı

Halat no. 4 (kN)	Ortalama	39911	7273
	Min.	0	2278
	Maks.	107700	14610
	Std	21203	883



3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, çok derin sularda kurulan ve yüklemesi yapılan taret bağlı tanker tabanlı FPSO gemisinin hareketleri ve bağlantı halatlarının dinamik analizi 100 yıllık kasırga koşulları için simülasyonu yapılarak incelenmiş ve sonuçlar Texas A&M University model havuzunda OTRC tarafından 1/60 oranında model ile yapılan deney sonuçları ile ve referans alınan diğer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Statik ofset ve serbest sönümlenme testi sonuçları OTRC tarafından yapılan deney sonuçları ile tutarlılık göstermektedir. Sonuçlara göre; FPSO işlemi sırasında kullanılan rayzerlerden ötürü; rayzer yüklemesi yapılmadığı duruma göre özellikle ileri öteleme hareketinde daha çabuk sönümlenme yapıldığı görülmektedir. Bu sönümlenme etkisi kullanılan rayzerin özelliklerine ve şekillerine göre farklılık göstermesi beklenmektedir.

Kasırga koşullarında gemi hareketleri incelendiğinde deneysel veriler ve yapılan diğer çalışmalar ile bir miktar fark olmasına rağmen bu fark olduğu görülmüştür. Farkın nedenleri arasında deney düzeneğinin sınırlı derinliği, bağlama kesik olarak modellenmesi, viskoz etkiler, rüzgar, akıntı ve dalga oluşma şekilleri, kullanılan programların çalışma prensipleri gibi sebepler gösterilebilir. Ayrıca taret sisteminin bulunduğu konum ve modellenme şekli de önemlidir. İleriki çalışmalarda taret modellenmesinin ve taret konumunun üzerinde durulmasının faydalı olabileceği düşünülmektedir.

Deney düzeneğinde, yapılan diğer çalışmalarda ve bu çalışmada da çok noktalı bağlama sistemindeki halatlar her 3 halatı bir halat temsil edecek şekilde 4 halat grubu halinde modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Halat gerilmeleri karşılaştırıldığında deney verilerinin ortalama halat gerginlik değerleri, gergin durumdaki halatlarda (1 ve 4 numaralı halatlar) nümerik simülasyon sonuçlarına göre %17 daha az iken; gevşek olan halatlarda (2 ve 3 numaralı halat) %25 daha fazla olduğu görülmüştür. Bu farkın sebebi OTRC deney havuzunun kısıtlı derinliği ve bu derinliğe bağlı olarak değişen yüklemeler gösterilebilir.

Polyester malzemelerin esnekliğinin ve buna bağlı olarak dayanımının diğer malzemelere göre daha iyi olduğu görülmüştür. Polyester kablo yerine çelik halat kullanılarak aynı yükler ve çevresel koşullar altında nümerik simülasyonu yapılarak sonuçlar bulunmuş ve polyester kablo kullanılarak gerçekleştirilen nümerik simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre gemi hareketlerinin daha küçük olduğu görülmektedir. Fakat kısıtlı olan hareket bağlama kablolarındaki gerilmeleri arttırmaktadır.

EK Şekil 7., Ek Şekil 8., Ek Şekil 9. ve Ek Şekil 10.'da verilen grafikler çelik halat kullanılarak oluşturulan bağlama sistemlerinin kabloları üzerindeki gerilmeleri göstermektedir. Grafiklerde gerilmelerin sıfır (0) olduğu noktalar göze çarpmaktadır. Bu noktalar, kabloların maruz kaldığı gerilemelere dayanamayarak koptuğunu göstermektedir. Buradan çıkan sonuç; bu çalışma koşulları ($H_s=12.14$ m) için çelik halat kabloları kullanılmasının uygun olmadığıdır.

EK Şekil 11., Ek Şekil 12., Ek Şekil 13. ve Ek Şekil 14. daha düşük karakteristik dalga yüksekliği ($H_s=7$ m) kullanılarak yapılan nümerik simülasyon sonuçlarına göre halatlardaki gerginlikleri zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir (her bir halat gerilmesi 3 tane halat gerilmesini temsil eder) . Bu sonuçlara göre bu koşullarda çelik halat kullanımı uygundur ancak; yüksekliği 7 m'den büyük dalgalar için uygun değildir. Ayrıca polyester kablo kullanımı gerek hafiflik gerek maliyeti açısından kullanıma daha elverişlidir.

İleriki çalışmalarda gelişen yeni teknolojiler ile bağlama halatları malzemeleri değiştirerek (ipek malzeme) çalışma esnasında FPSO gemi hareketlerinin iyileştirilmesi çalışılabilir

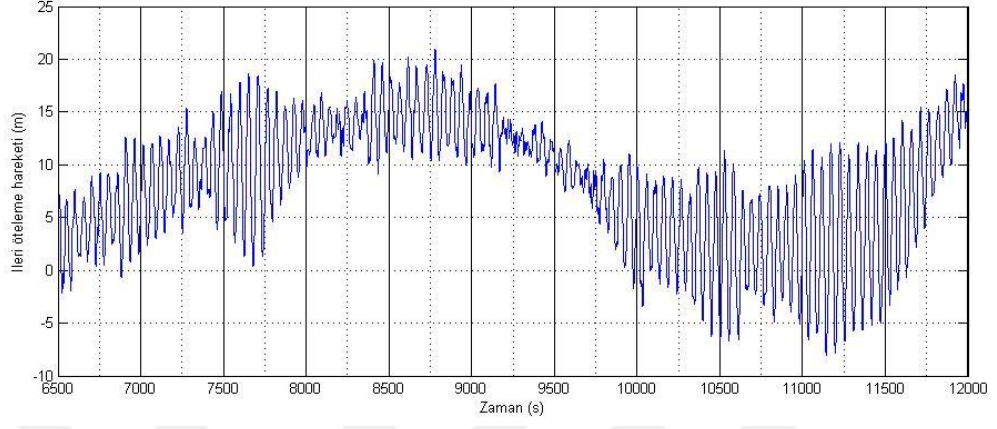
4. KAYNAKLAR

1. Arcandra, B. S. Hull/Mooring/Riser Coupled Dynamic Analysis of a Deepwater Floating Platform with Polyester Lines, Doktora Tezi, Texas A&M University, Bandung Institute of Technology, Texas, 2001.
2. BOEMRE 30CFR250.286-295, Production Safety System Pmit and Supplemental Deepwater Operating Plan (DWOP), BOEMRE, Washington, 2009.
3. Kim, Y. B., Dynamic Analysis of Multiple Body Floating Platforms Coupled with Mooring Lines and Risers, Doktora Tezi, Texas A&M University, Civil Engineering Department, College Station, Texas, 2003.
4. Wichers, J.E.W. A Simulation Model for a Single Point Moored Tanker, Doktora Tezi, Delft University of Technology, Delft, 1988.
5. Wichers, J.E.W., Ji, C., On the Coupling Term in the Low-Frequency Viscous Reaction Forces of Moored Tankers in Deep Water. Proc. Offshore Technology Conference, 2000, Houston, Texas, OTC 12086 [CD-ROM].
6. Wichers, J.E.W., Develin, P.V., Effect of Coupling of Mooring Lines and Risers on the Design Values for a Turret Moored FPSO in Deep Water of the Gulf of Mexico,, Proc. 11th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, June, 2011, Maui, Hawaii, USA, ISOPE, 3, 480-487.
7. Baar, J.J.M, Heyl, C.N. ve Rodenbusch, G., Extreme Responses of Turret Moored Tankers, Proc. Offshore Technology Conference, June, 2000, Houston, Texas, USA .OTC 12147 [CD-ROM].
8. Ward, E.G., Irani, M.B. ve Johnson, R.P., The Behavior of a Tanker-Based FPSO in Hurricane Waves, Winds, and Currents, Proc. 11th Int. Offshore and Polar Eng. Conference,2001, ISOPE, 4, 650-653.
9. Arcandra, T., Nurtjahyo, P. ve Kim, M.H. 2002 Hull/Mooring/Riser Coupled Analysis of a Turret-Moored FPSO 6000 ft: Comparison Between Polyester and Buoys-Steel Mooring Lines. Proc. 11th Offshore Symposium The Texas Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers,2002, SNAME, 1-8.
10. Teigen, P., Trulsen, K., Numerical Investigation of Nonlinear Wave Effects Around Multiple Cylinders, Proc. 11th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, June, 2001, Stavanger, Norway, ISOPE, 3, 369-378.
11. Inoue, Y., Islam, M.R., Effect of Viscous Roll Damping on Drift Forces of Multi Body Floating System in Waves. Proc. 11th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, June, 2001, Stavanger, Norway, ISOPE, 1, 279-285.

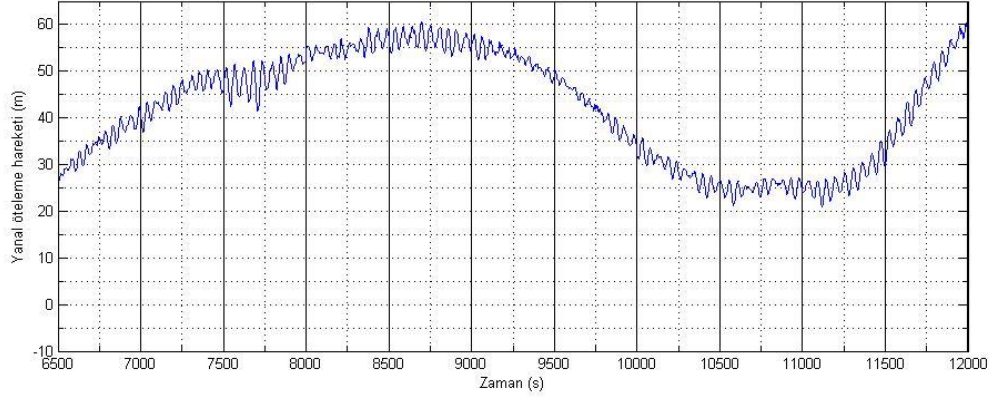
12. Huijsmans, R.H.M., Pinkster, J.A. ve de Wilde, J.J., Diffraction and Radiation of Waves Around Side-by-Side Moored Vessels. Proc. 11th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, June, 2001, Stavanger, Norway, ISOPE, 1, 406-412.
13. Buchner, B, van Dijk, A., ve de Wilde, J.J., Numerical Multiple-Body Simulations of Side-by-Side Moored to an FPSO. Proc. 11th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, June, 2001, Stavanger, Norway, ISOPE, 1, 343-353
14. Choi, Y.R., Hong, S.Y., An Analysis of Hydrodynamic Interaction of Floating Multi Body Using Higher-Order Boundary Element Method. Proc. 12th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, May, 2002, Kitakyushu, Japan, ISOPE, 3, 303-3083
15. http://web.mit.edu/13.021/13021_2003/lecturenotes21.pdf Massachusetts Institute of Technology. 17 Aralık 2015.
16. Bertnom, V., Practical Ship Hydrodynamics, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
17. www.shipmotion.se/imu-00.html Ship Motion Control. 17 Aralık 2015.
18. Kolukısa, D. C., Baştan Gelen Dalgalarda Kanatçıkların Dalıp Çıkma ve Baş Kıç Vurma Hareketleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
19. Sarıöz, K., Kökner, A. ve Alkan, A. D., Gemi Mühendisliği El Kitabı, Gemi Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul, 2011.
20. ANSYS, Inc., AQWA™-LINE Manual, 2010
21. Alemdar, Z. F., Yapılarda Deprem Analizi Yapmak İçin Kullanılan Değişik Hesap Metodları, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 2004
22. Nordgen, R. P., On Computation of the Motions of Elastic Rods. ASME Journal of Applied Mechanics, 777-780, 1974.
23. Garret, D. L., Dynamic Analysis of Slender Rods. I. of Energy Ressources Technology, Trans. of ASME, 104,302-307, 1982.
24. Ran, Z., Coupled Dynamic Analysis of Floating Structures in Waves and Currents, Doktora Tezi, Texas A&M University, 2000.
25. OCIMF Prediction of Wind and Current Loads on VLCC. 2nd Edition, Witherby&Co. Ltd, London, England, 1994.
26. Garrison, C., J., Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures : Three-Dimensional Source Distribution Methods, Numerical Methods in Offshore Engineering, John Wiley, 87-140, 1978.
27. ANSYS, Inc., AQWA™-DRIFT Manual, 2010.

28. Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E. Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W. ve Walden, H., Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, 1973.
29. Guidelines Concerning Loads and Load effects to regulations concerning loadbearing structures in the petroleum activities. The Norwegian Petroleum Directorate, 7 Şubat 1992.
30. Ward, E.G., Kim, M.H., Hansen, V.L. ve Wang, L., DeepStar Theme Structure Studies, Proc. Offshore Technology Conference, 2004, Houston, TX, OTC 16586 [CD-ROM].
31. Kim, M. H., Koo, B. J., Mercier, R. M. ve Ward E. G., Vessel/Mooring/Riser Coupled Dynamic Analysis of a Turret-Moored FPSO compared with OTRC, Ocean Engineering, 32 (2005) 1780–1802.
32. Ćatipović, I., Ćorić, V. ve Vukčević, V., Dynamics of FPSO with Polyester Mooring Lines, Proc. 22th International Society of Offshore and Polar Engineers, June, 2012, Rhodes, Greece, ISOPE, 996-1001.

5. EKLER

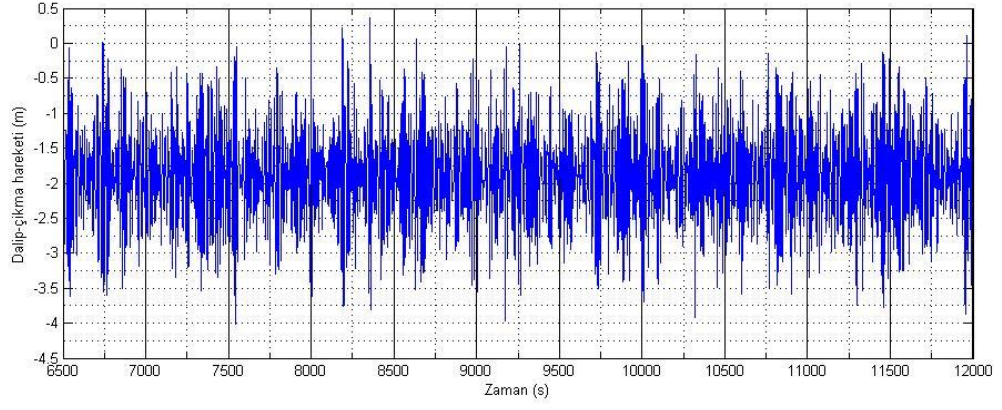


Ek Şekil 1. İleri öteleme hareketi (çelik halat ile bağlı)



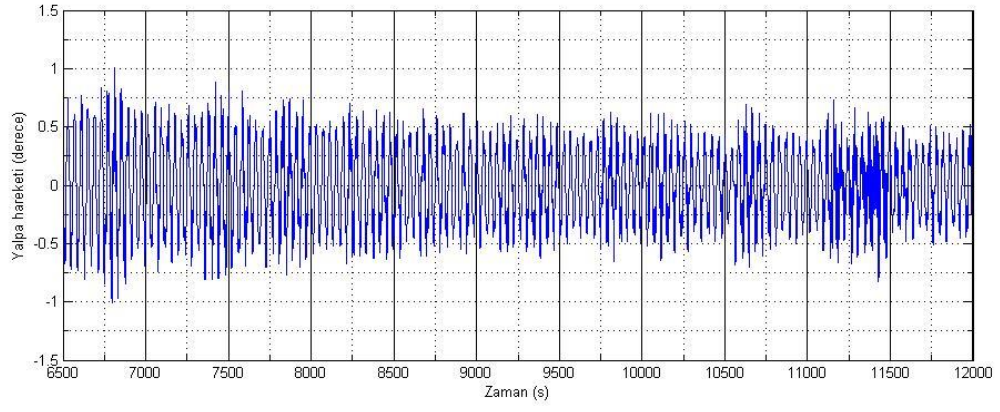
Ek Şekil 2. Yanal öteleme hareketi (çelik halat ile bağlı)





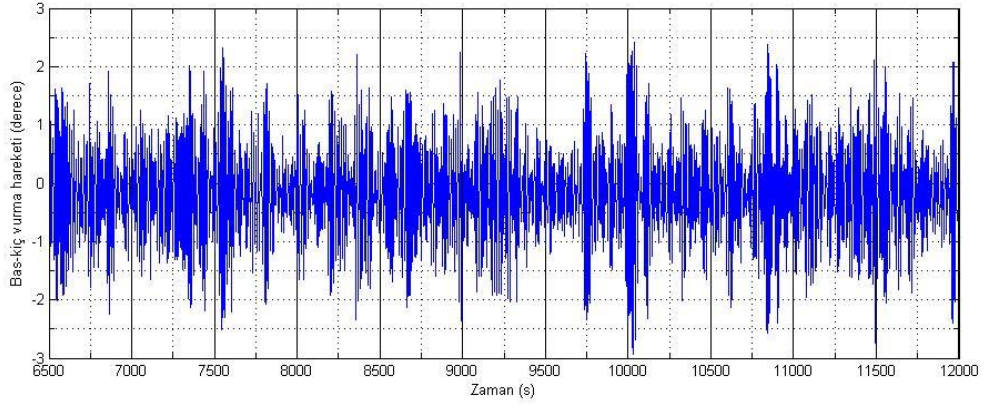
Ek Şekil 3. Dalıp-çıkma hareketi (çelik halat ile bağlı)





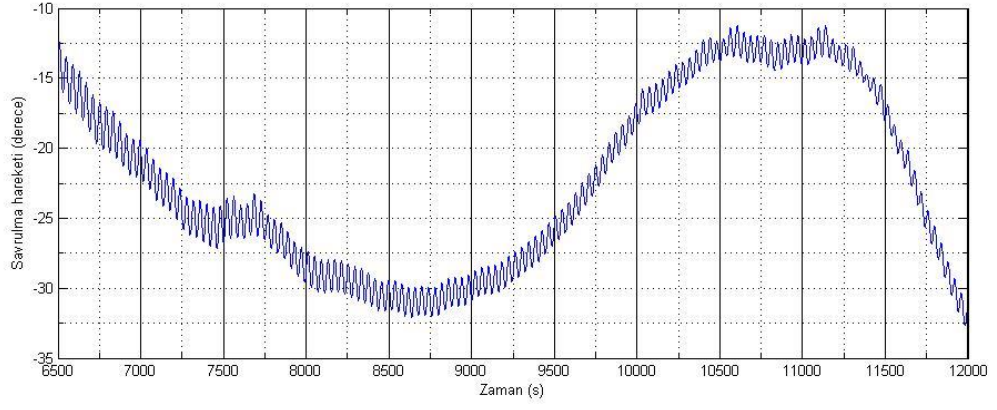
Ek Şekil 4. Yalpa hareketi (çelik halat ile bağlı)





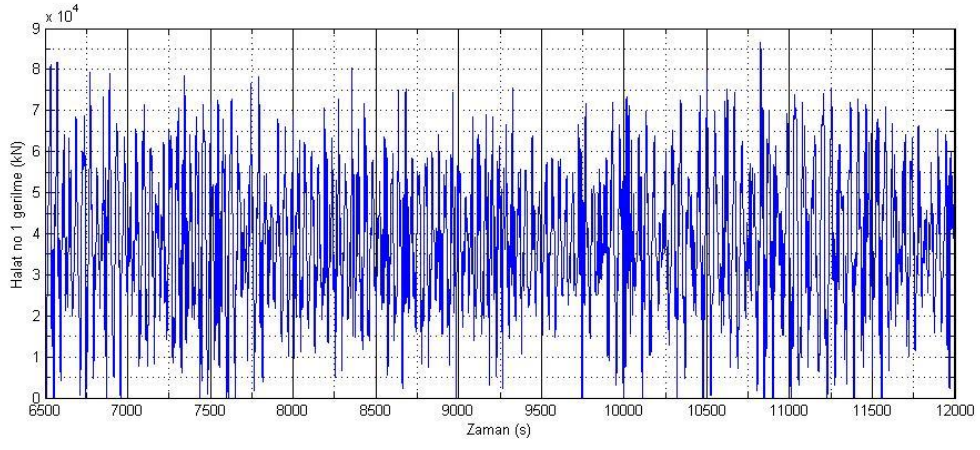
Ek Şekil 5. Baş-kıç vurma hareketi (çelik halat ile bağlı)





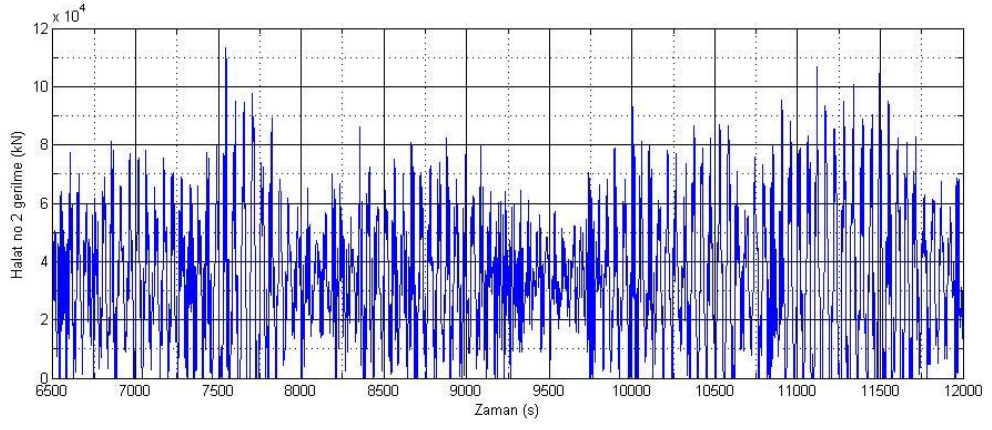
Ek Şekil 6. Savrulma hareketi (çelik halat ile bağlı)





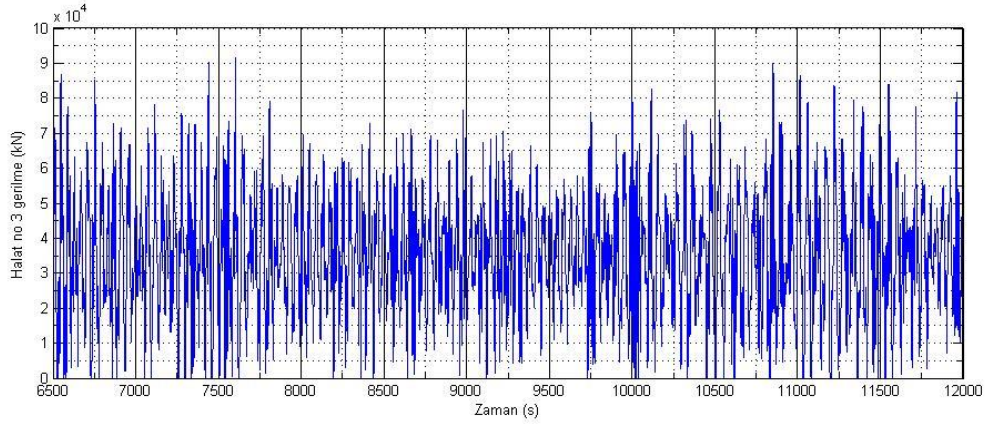
Ek Şekil 7. Bağlama halatı no 1 gerilme zaman serisi (çelik halat ile bağlı)





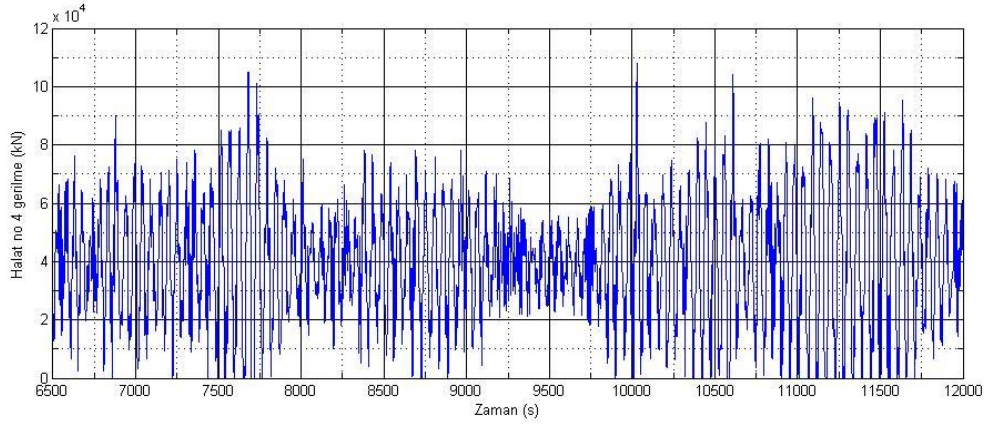
Ek Şekil 8. Bağlama halatı no 2 gerilme zaman serisi (çelik halat ile bağlı)





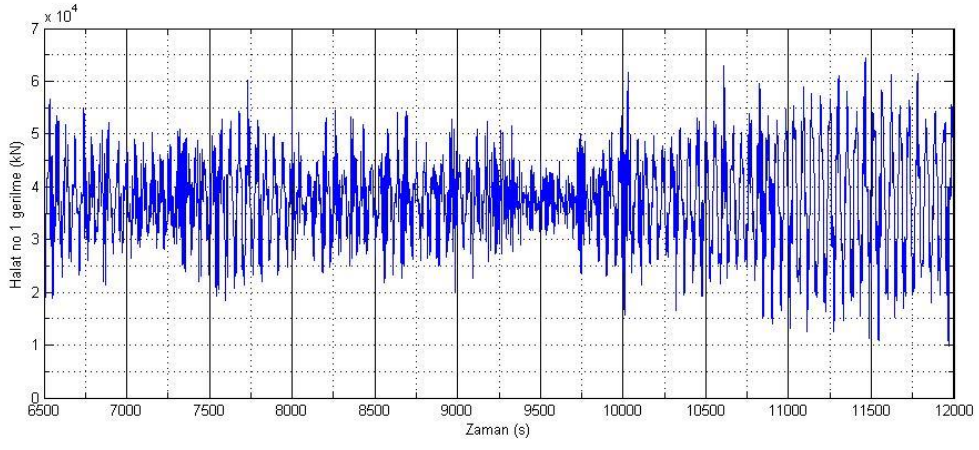
Ek Şekil 9. Bağlama halatı no 3 gerilme zaman serisi (çelik halat ile bağlı)





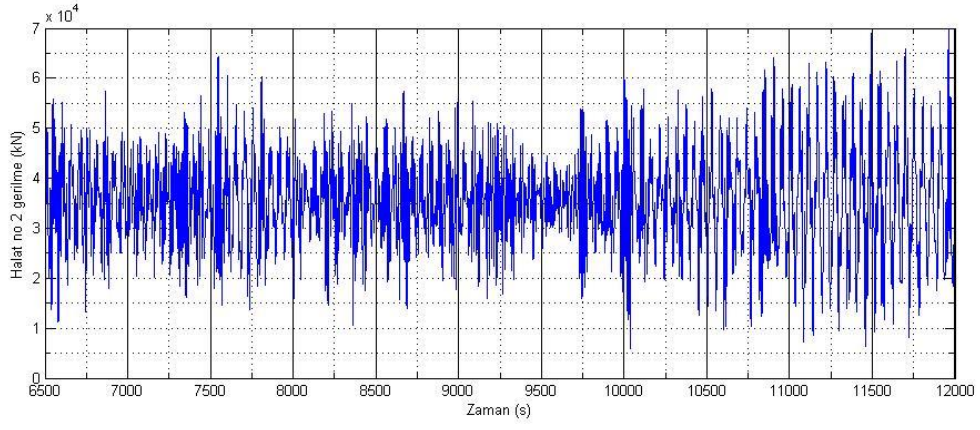
Ek Şekil 10. Bağlama halatı no 4 gerilme zaman serisi (çelik halat ile bağlı)





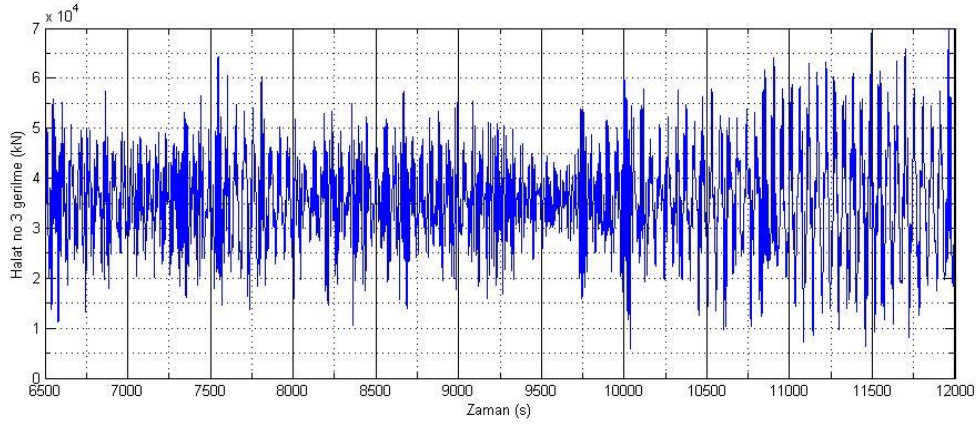
Ek Şekil 11. Bağlama halatı no 1 gerilme serisi (çelik halat ile bağlı, $H_s=7$ m)





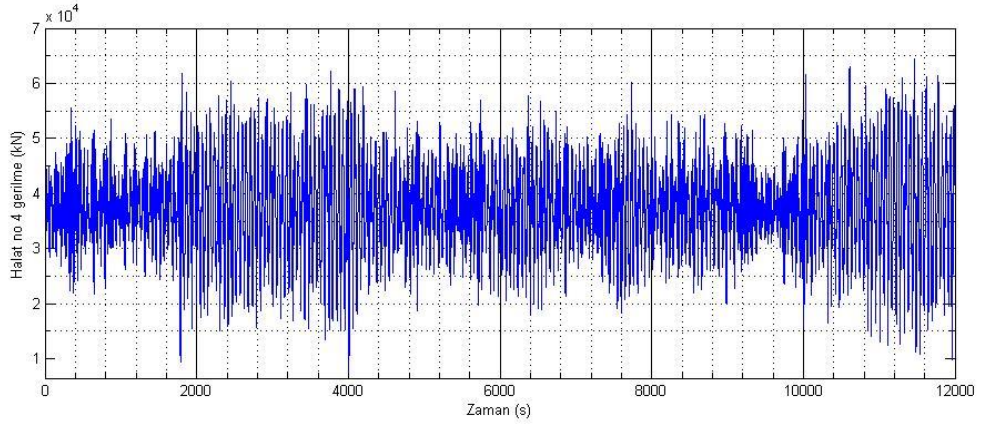
Ek Şekil 12. Bağlama halatı no 2 gerilme serisi (çelik halat ile bağlı, $H_s=7$ m)





Ek Şekil 13. Bağlama halatı no 3 gerilme serisi (çelik halat ile bağlı, $H_s=7\text{m}$)





Ek Şekil. 14 Bağlama halatı 4 gerilme serisi (çelik halat ile bağlı, $H_s=7$ m)



ÖZGEÇMİŞ

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ 1990 yılında İzmit'te doğdu. Lise öğrenimini Bursa Osmangazi Turhan Tayan Anadolu Lisesinde tamamladı. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2012 Haziran ayında Makine Mühendisi olarak dereceyle mezun oldu. 2012-2013 Eğitim ve Öğretim Güz yarıyılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2014-2015 eğitim öğretim yılı güz ve bahar yarıyıllarında Erasmus+ değişim programı kapsamında Hırvatistan'da University of Zagreb'de öğrenim gördü. 2014 Şubat ayından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümünde Araştırma görevlisi olarak görev yapmaya başladı. İyi seviyede İngilizce bilmektedir.