

**BİR AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNİ İÇİN YÜZER PLATFORM SİSTEMİ
TASARIMI VE DEMİRLEME SİSTEMİNİN HİDRODİNAMİK ANALİZİ**

**2013
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

SABRİ ALKAN

**BİR AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNİ İÇİN YÜZER PLATFORM SİSTEMİ
TASARIMI VE DEMİRLEME SİSTEMİNİN HİDRODİNAMİK ANALİZİ**

Sabri ALKAN

**Bartın Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**BARTIN
ŞUBAT, 2013**

KABUL:

Sabri ALKAN tarafından hazırlanan "**Bir Açık Deniz Rüzgar Türbini İçin Yüzer Platform Sistemi Tasarımı ve Demirleme Sisteminin Hidrodinamik Analizi**" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek,..Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle (veya oyçokluğuyla) kabul edilmiştir. 28/01/2013

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Alaattin Metin KAYA BÜ

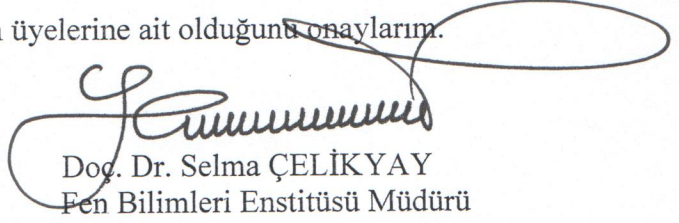
Üye : Yrd. Doç. Dr. Ermedin TOTİÇ BÜ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Serkan ATEŞ BÜ

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

28./01/2013


Doç. Dr. Selma ÇELİK YAY
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Sabri ALKAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİR AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNİ İÇİN YÜZER PLATFORM SİSTEMİ TASARIMI VE DEMİRLEME SİSTEMİNİN HİDRODİNAMİK ANALİZİ

Sabri ALKAN

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Alaattin Metin KAYA

ŞUBAT 2013, 85 sayfa

Açık deniz rüzgar enerjisi güçlü bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Dünyadaki kurulu rüzgar gücü kapasitesini artırmak ve açık denizlerdeki yüksek rüzgar enerjisi potansiyelinden faydalanmak için yüzer platform sistemleri geliştirilmektedir. Bu çalışma, açık deniz alanlarında konumlandırılabilen 5 MW'lık referans bir rüzgar türbini için yüzer platform sistemi tasarımı ve demirleme sisteminin hidrodinamik analizi üzerine odaklanmıştır.

Yüzer platform sisteminin tasarımı, tasarım şartları ve gereklilikleri göz önünde bulundurularak şekillendirilmiştir. Hidrodinamik analiz için matematiksel formülasyon belirlenmiş ve model oluşturulmuştur. Farklı dalga yükseklikleri için yüzer platform ve bağlama sistemi davranışları, değişik bağlama (katener, gergi ayak) sistemlerine göre bilgisayar programında analiz edilmiştir.

ÖZET (Devam ediyor)

Anahtar Sözcükler: Yenilenebilir enerji, rüzgar türbinleri, açık deniz platformları, demirleme sistemi, hidrodinamik

Bilim Kodu: 625.04.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

FLOATING PLATFORM SYSTEM DESIGN AND HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF MOORING SYSTEM FOR AN OFFSHORE WIND TURBINE

Sabri ALKAN

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Asst. Prof. Alaattin Metin KAYA

February 2013, 85 pages

Offshore wind energy is a powerful renewable energy source. The floating platform systems are being developed to increase the capacity of installed wind power, and take advantage of the high wind energy potential on the global high seas. This study is focused on the design of an offshore floating platform system and on hydrodynamic analysis of the platform mooring system for 5 MW a reference wind turbine.

Floating platform system design is shaped taking into account design conditions and requirements. The hydrodynamic model has been developed and mathematical formulation determined for the hydrodynamic analysis. Behaviours of the floating platform and the mooring system for different wave heights is analyzed in the computer program under different mooring (catenary, tension leg) systems.

ABSTRACT (Continued)

Key Words: Renewable energy, wind turbines, offshore platforms, mooring system, hydrodynamic

Science Code: 625.04.01

TEŞEKKÜR

Öncelikle Yüksek lisans tezimde danışmanlığımı üstlenen ve her konuda yardımını esirgemeyen Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Alaattin Metin KAYA'ya (B.Ü) teşekkür ederim.

Tezimdeki analiz çalışmalarım sırasında her türlü yardımına başvurduğum ve analiz programıyla ilgili bana sabırla yardımcı olan Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Ayhan MENTEŞ'e (İ.T.Ü) en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Lisans ve lisansüstü öğrenim hayatım boyunca bilgi, deneyim ve yardımlarını benden esirgemeyen Sayın Hocalarım Doç. Dr. İsmail Hakkı HELVACIOĞLU (İ.T.Ü) ve Yrd. Doç. Dr. Şebnem HELVACIOĞLU'na (İ.T.Ü) teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimdeki analiz çalışmalarım sırasında kullandığım Orcina Orcaflex® yazılımının kullanımından dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun iş ve eğitim sürecinde benden desteğini esirgemeyen ve beni anlayışla karşılayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
RÜZGAR ENERJİSİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER	5
2.1 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimi ve Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	5
2.1.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	7
2.1.2 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri	8
2.1.3 Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri	9
2.2 Açık Deniz Rüzgar Türbinleri	9
2.2.1 Deniz Tabanına Temellendirilmiş Açık Deniz Rüzgar Türbinleri	10
2.2.2 Yüzer Platform Sistemli Açık Deniz Rüzgar Türbinleri ve Uygulamaları	18
2.3 Rüzgar Enerjisinin Durumu ve Gelecek Öngörüler	26
2.3.1 Dünyada Rüzgar Enerjisi	26
2.3.2 Avrupa’da Rüzgar Enerjisi	29
2.3.3 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	30
BÖLÜM 3	33
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	33
3.1 Gergi Ayaklı Yüzer Açık Deniz Rüzgar Türbini	33
3.2 Safralı (Balast) Tipi Yüzer Açık Deniz Rüzgar Türbini	36
3.3 Duba Tipi Yüzer Açık Deniz Rüzgar Türbini	37
3.4 Yarı Batık Yüzer Açık Deniz Rüzgar Türbini	38
3.5 Değerlendirmeler	40

İÇİNDEKİLER (Devam ediyor)

BÖLÜM 4	43
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ.....	43
4.1 Yüzer Platform Sistemli Açık Deniz Rüzgar Türbini Tasarımı.....	43
4.1.1 Su Üstü Tasarım (Rüzgar Türbini).....	45
4.1.2 Su Altı Tasarım (Yüzer Platform Sistemi)	47
4.2 Hidrodinamik Analiz için Matematiksel Model ve Formülasyon.....	54
4.2.1 Hareket Denklemi	55
4.2.2 Genelleştirilmiş Atalet Kuvvetleri	55
4.2.3 Genelleştirilmiş Aktif Kuvvetler.....	56
4.2.4 Platform Hidrodinamiği.....	56
4.2.5 Demirleme Sistemi Hidrodinamiği	56
4.3 Analizler için Kullanılan Bilgisayar Programı	57
BÖLÜM 5	59
ARAŞTIRMA BULGULARI	59
5.1 Gevşek Katener ve Gergi Ayaklı Demirleme Sisteminin Karşılaştırmalı Platform Hareketleri Analizi (Dalga Yüksekliği: 6m)	59
5.2 Gevşek Katener ve Gergi Ayaklı Demirleme Sisteminin Zamana Dayalı Karşılaştırmalı Efektif Gerilme Analizi (Dalga Yüksekliği: 6m).....	62
5.3 Gergi Ayaklı Yüzer Platform Sistemi Hidrodinamik Analiz Sonuçları.....	66
5.3.1 Tüm Sisteme Etki Eden Rüzgar Gücü (Wind Force) ve Rüzgar Momentinin (Wind Moment) Zamana (Time) Dayalı Analizi (Yükseklik: 90m).....	66
5.3.2 Tüm Sisteme Etki Eden Akıntı Gücü (Current Force) ve Akıntı Momentinin (Current Moment) Zamana Dayalı (Time) Analizi (Yükseklik: 0,5m).....	67
5.3.3 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Boyuna Öteleme (Surge) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi	68
5.3.4 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Yanal Öteleme (Sway) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi	69
5.3.5 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Dalıp-Çıkma (Heave) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi	70
5.3.6 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Yalpa (Roll) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi	71
5.3.7 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Baş-Kıç Vurma (Pitch) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi	72

İÇİNDEKİLER (Devam ediyor)

5.3.8	4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Yunuslama (Yaw) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi	73
5.3.9	4m Dalga Yüksekliğinde Halatlardaki Efektif Gerilmelerin (Effective Tension) Zamana (Time) Dayalı Analizi	74
5.3.10	6m Dalga Yüksekliğinde Halatlardaki Efektif Gerilmelerin (Effective Tension) Zamana (Time) Dayalı Analizi	76
5.3.11	10m Dalga Yüksekliğinde Halatlardaki Efektif Gerilmelerin (Effective Tension) Zamana (Time) Dayalı Analizi	78
BÖLÜM 6		81
SONUÇ VE ÖNERİLER		81
KAYNAKLAR		83
ÖZGEÇMİŞ		87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: 2000-2011 arasında Avrupa’da elektrik üretim yöntemlerindeki net değişim (GW cinsinden).....	6
Şekil 2.2: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Yapısı	8
Şekil 2.3: Açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımları.	10
Şekil 2.4: Deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımları...11	
Şekil 2.5: Deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbini kurulum aşamaları	11
Şekil 2.6: Kurulumu tamamlanmış bir açık deniz rüzgar enerji santrali.	12
Şekil 2.7: Tek kazık sistemi.....	12
Şekil 2.8: Tek kazık sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları	13
Şekil 2.9: Gravite temel sistemi.	14
Şekil 2.10: Gravite temel sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları.....	15
Şekil 2.11: Üç ayaklı sistem.....	15
Şekil 2.12: Üç ayak sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları.	16
Şekil 2.13: Kaldıraç tipi sistem.....	17
Şekil 2.14: Kaldıraç sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları	18
Şekil 2.15: Petrol endüstrisinde kullanılan açık deniz yapıları.....	18
Şekil 2.16: Yüzer açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımları	19
Şekil 2.17: Duba tipi yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini.....	20
Şekil 2.18: Yarı batık yüzer platform sistemli açık deniz türbini	20
Şekil 2.19: WindFloat a. Montaj alanına transfer, b. Balast sistemi, c. Üretim mantığı.....	21
Şekil 2.20: Gergi ayak yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini.....	22

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam ediyor)

Şekil 2.21: Pelastar	22
Şekil 2.22: Safralı yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini.....	23
Şekil 2.23: Hywind	23
Şekil 2.24: 1996-2011 yılları arası küresel kümülatif kurulu rüzgar gücü kapasitesi.....	26
Şekil 2.25: Bölgesel temelde yıllık rüzgar gücü kurulumları 1996-2011.....	27
Şekil 2.26: Bölgesel temelde kümülatif rüzgar gücü piyasası tahminleri 2012-2016.....	27
Şekil 2.27: Türkiye’de 2012 yılı içinde faaliyete alınması planlanan rüzgar enerji santralleri	31
Şekil 2.28: Türkiye’nin kurulu rüzgar gücü potansiyelinin kümülatif toplamı 2001-2011	32
Şekil 2.29: Türkiye’nin 50 m yükseklikteki rüzgar sınıfları.....	32
Şekil 3.1: WindFloat.....	39
Şekil 3.2: OC3-Hywind balast platform ve ITI Energy duba platform sistemlerinin MIT gergi ayaklı platform sistemine göre (TLP) altı serbestlik derecesinde hareket oranları.....	41
Şekil 4.1: Bir yüzer açık deniz rüzgar türbini için sualtı ve su üstü şartlar	44
Şekil 4.2: Bir yüzer açık deniz rüzgar türbini için tasarım ve analiz şartları.....	45
Şekil 4.3: Demirleme sistemleri	50
Şekil 4.4: Kavram tasarımının farklı açılardan görüşleri.....	52
Şekil 4.5: Gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımı perspektif görüşü	53
Şekil 4.6: Katener halat sistemli yüzer açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımı perspektif görüşü.....	53
Şekil 4.7 Bir açık deniz rüzgar türbini üzerinde serbestlik derecelerinin gösterimi	54
Şekil 4.8: Orcaflex® yazılımı ara yüzü	57
Şekil 5.1: Gevşek katener (zincir) demirleme sistemi kullanılan platformun hareket miktarları.	60
Şekil 5.2: Gergi ayaklı demirleme sistemi kullanılan platformun hareket miktarları.	61

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam ediyor)

Şekil 5.3: Gevşek katener demirleme sistemi kullanılan platformun x eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler.....	62
Şekil 5.4: Gevşek katener demirleme sistemi kullanılan platformun y eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler.....	63
Şekil 5.5: Gergi ayaklı demirleme sistemi kullanılan platformun x eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler.....	64
Şekil 5.6: Gergi ayaklı demirleme sistemi kullanılan platformun y eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler.....	65
Şekil 5.7: Tüm sisteme etkiyen rüzgar kuvveti.....	66
Şekil 5.8: Tüm sisteme etkiyen rüzgar momenti.....	66
Şekil 5.9: Tüm sisteme etkiyen akıntı kuvveti.....	67
Şekil 5.10: Tüm sisteme etkiyen akıntı momenti.....	67
Şekil 5.11: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun boyuna öteleme hareketi ..	68
Şekil 5.12: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun yanal öteleme hareketi	69
Şekil 5.13: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun dalıp-çıkma hareketi	70
Şekil 5.14: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun yalpa hareketi	71
Şekil 5.15: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun baş-kıç vurma hareketi.....	72
Şekil 5.16: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun yunuslama hareketi.....	73
Şekil 5.17: 4m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun x eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler	74
Şekil 5.18: 4m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun y eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler	75
Şekil 5.19: 6m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun x eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler	76
Şekil 5.20: 6m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun y eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler	77
Şekil 5.21: 10m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun x eksenini boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam ediyor)

Şekil 5.22: 10m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun y eksenine boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler	79
--	----

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2-1: Dünya genelinde yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini çalışmaları.	24
Tablo 2-2: Ülkesel temelde kümülatif kurulu rüzgar gücü kapasitesi yüksek ilk on ülke	28
Tablo 2-3: Ülkesel temelde 2011 yılı içinde kurulan açık deniz kurulu rüzgar gücü potansiyeli ve kümülatif toplamı.....	29
Tablo 2-4: Türkiye'nin denizel alanları için 50 m yükseklikteki rüzgar enerjisi potansiyeli...	32
Tablo 3-1: MIT/NREL 5 MW gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri	34
Tablo 3-2: UMaine 5 MW gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri	35
Tablo 3-3: OC3 HyWind safralı 5 MW yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri...	36
Tablo 3-4: ITI 5 MW duba tipi yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri	37
Tablo 3-5: UMaine 5 MW yarı batık yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri...	38
Tablo 4-1: NREL 5MW referans rüzgar türbini özellikleri.....	46
Tablo 4-2: Sualtı tasarım için sabit kabul edilen ortam şartları	47
Tablo 4-3: Yüzer platform tiplerinin tasarım faktörleri açısından değerlendirilmesi	48
Tablo 4-4: Yüzer platforma ait özellikler	51
Tablo 4-5: Bağlama sisteminde kullanılan halat nitelikleri	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MW	: Mega Watt
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
TLP	: Tension Leg Platform (Gergi Ayaklı Platform)
MIT	: Massachusetts Institute of Technology
GWEC	: Global Wind Energy Council
EWEA	: Avrupa Rüzgar Enerjisi Ajansı
UMAINE	: University of Maine

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Rüzgar enerjisi dünya çapında hızla büyüyen bir yenilenebilir enerji alanı olmuştur. Bir yandan karada rüzgar enerji santralleri kurulurken diğer yandan yakın sahil bandındaki sığ sulara –özellikle 0-50m arası derinliklere- açık deniz rüzgar enerji santralleri kurulmaktadır. Ancak deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbinlerinin 50m üzeri derinliklere konumlandırılması mümkün olmamaktadır. Bu kısıt nedeniyle ve teknolojik gelişmelerle birlikte çalışmalar yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbinlerine doğru kaymaktadır. Şu anda dünya genelinde bu konuda birçok çalışma yürütülmekte olup, yüzer platform sistemli rüzgar türbinleriyle ilgili tasarım, üretim, ölçekli ve tam ölçekli test çalışmaları sürdürülmektedir. Yüzer platform sistemleri dört ana sınıfa ayrılmıştır. Bunlar, gergi ayaklı (tension leg - TLP) platformlar, safralı (spar) platformlar, duba (barge) platformlar ve yarı batık (semi-submersible) platformlardır. Bu platformların üzerine eklenen rüzgar türbinleri ile yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini kavram tasarımları oluşturulmaktadır.

Musial vd. (2004) yüzer platform sistemlerinin rüzgar türbinlerine uygulanabilirliğini sorgulamış ve çalışmalarında farklı demirleme sistemlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesini yapmışlardır.

Butterfield vd. (2005) tarafından yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbinlerinin mühendislik açıdan zorlukları değerlendirilmiştir. Bu çalışmada özellikle kararlı stabilitenin sağlanması için farklı platform sistemlerinin birbirlerine göre bağlı avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Cermelli vd. (2010) tarafından yarı batık platform sistemli WindFloat yüzer açık deniz rüzgar türbinine ait model deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada yapı aerodinamik ve hidrodinamik yükler altında test edilmiştir. Ayrıca zaman esaslı analizlerde tüm yapı akuple halde değerlendirilmiştir.

Matha vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada gergi ayaklı platform modeli geliştirilmesi ve tasarım yükleri altında hayati yüklerin ve yorulma yüklerinin değerlendirmesi yapılmıştır. Aynı çalışmada diğer yüzer platform sistemleri ile gergi ayaklı platform sistemi karşılaştırmalı analizlere tabi tutulmuştur. Analizler sonucunda gergi ayaklı platform sisteminin diğerlerine göre daha kararlı denge durumunda kalabildiği belirlenmiştir.

Jonkman (2009) tarafından yüzer platform sistemli rüzgar türbinlerinin dinamikleri konusunda oldukça kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada farklı yüzer platform tipleri farklı demirleme sistemleri ile kombine edilip aero-hidro-servo-elastik açıdan optimize edilmiştir. Bu çalışmada deniz şartlarında rüzgar türbinine ait kule, nasel, dişli kutusu gibi türbin elemanlarına gelen yükler de incelenmiştir.

Yapılan çoğu çalışma gergi ayaklı platform sisteminin kara tabanlı rüzgar türbinlerine en yakın çalışma şartlarını sağlaması nedeniyle uygun platform tipi olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Gergi ayaklı yüzer platformlar düşey halat sistemleri sayesinde çevresel yüklere karşı kısıtlanmış dinamik tepkiler vermektedirler. Bu özellikleri sayesinde çalışma şartları açısından karadaki rüzgar türbini uygulamalarına en yakın sonuçları vermektedirler. Bundan dolayı gergi ayaklı platform sistemleri yüzer rüzgar türbini tasarımlarında ideal bir seçim olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte gergi ayaklı platform sistemi ile derin sularda rüzgar enerjisinden elektrik üretimi bazı zorluklar içermektedir. Tasarım aşamasından başlayıp üretim, montaj ve işletme aşamasında farklı zorluklar karşımıza çıkmaktadır. Tasarım aşamasında yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbinini sualtı ve su üstü tasarımı olarak iki ana sınıfa ayırmak tasarım şartlarını anlamayı kolaylaştırmaktadır. Su üstü yapının tasarımında rüzgar kuvvetinin ve momentinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Türbine etkiyen rüzgar kuvveti tüm yapıyı etkilemektedir. Sualtı yapının tasarımında ise akıntı, dalga yükleri ve bunların oluşturduğu momentler etkili olmaktadır. Su altı yapı için diğer önemli nokta ise seçilen rüzgar türbinini taşıyabilecek gerekli sephiyeye sahip olma zorunluluğudur.

Gergi ayaklı platformların kararlı denge durumunda kalabilmesinin demirleme sistemine bağlı olması tasarım konusunda değerlendirilmesi gereken ve başlı başına ayrı zorluklar içeren bir konudur. Özellikle gergi ayaklı yüzer platform sistemlerinde halatlarda belirli bir ön gerilmenin gerekliliği dikkat edilmesi gereken noktalardan biridir. Göz önünde

bulundurulması gereken diğer zorluklar ise standartlardaki eksiklikler, kurallar, rehber dokümanlar, deneysel çalışmaların sınırlı sayıda olması ve tam ölçekli testlerin sürüyor olması şeklinde sıralanabilir. Tüm bu nedenlerden dolayı yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini tasarımı ve demirleme sisteminin hidrodinamik analizi, üzerinde çalışılması gereken bir konudur.

Bu çalışmada teknik açıdan yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbinlerinin tasarım, analiz, test çalışmaları incelenmiş ve sistemin tasarımı konusunda dikkat edilmesi gereken hususlar belirlenmiştir. Çalışma bu bölümle birlikte altı ana bölümden oluşmuştur. Çalışmanın birinci bölümü olan giriş bölümünde genel özet bilgiler ve çalışmanın gerekliliği açıklanmıştır. İkinci bölümde rüzgar enerjisi ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve açık deniz rüzgar türbinleri tanıtılmıştır. Üçüncü bölüm çalışma konusuyla ilgili literatür araştırması ve literatürün değerlendirilmesini kapsamaktadır. Dördüncü bölüm çalışma konusunda izlenecek yöntemler, teoremler, tasarımı etkileyebilecek çevre şartları, yüzer platform ve demirleme sistemlerinin belirlenmesi gibi tasarıma yön verecek çalışmaları içermektedir. Beşinci bölümde çalışma konusuyla ilgili gerçekleştirilen karşılaştırmalı analiz sonuçları verilmiş ve farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayak yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini ve demirleme sisteminin hidrodinamik analizi yapılmıştır. Araştırma bulguları bu bölümde sunulmuştur. Son bölüm olan altıncı bölümde ise araştırma bulguları değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2

RÜZGAR ENERJİSİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Rüzgar, güneş radyasyonunun yer yüzeyini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yer yüzeyinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına, bu farklı basınç da havanın hareketine neden olur. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık % 2'lik kısmı rüzgar enerjisine çevrilir. Rüzgar oluşumuna yeryüzündeki farklı sıcaklık dağılımı neden olur. Enlem, kara-deniz, yükseklik ve mevsimler sıcaklık dağılımını etkiler. Okyanus ve deniz kıyısına sahip kara parçalarında sıcaklık farkı yüksek olduğu için rüzgar potansiyeli de yüksektir.

Rüzgar enerjisi, ilkçağdan beri türbinin şaft gücünden yararlanılarak su pompalama, çeşitli ürünleri kesme, biçme, öğütme, sıkıştırma, yağ çıkarma gibi mekanik enerjiye gerek duyulan yerlerde kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin en etkin kullanım biçimleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- a. Mekanik uygulamalar (su pompalama sistemi)
- b. Elektriksel uygulamalar (şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız sistemler)
- c. Isıl enerji uygulamaları (URL-1, 2013).

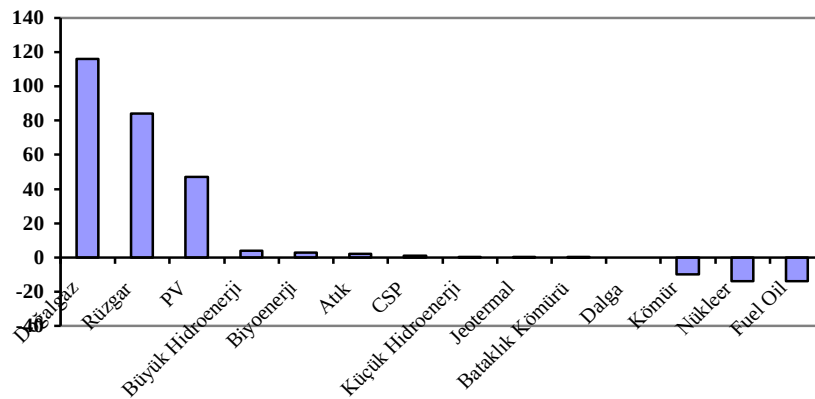
2.1 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimi ve Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Enerji günümüzde birçok kaynaktan elde edilebilmektedir. Bu kaynakların başında da fosil yakıtlar gelmektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte günümüze kadar fosil yakıtların aşırı kullanımı insanoğlunu enerji eldesi konusunda tedirginliğe sevk etmektedir. 1973 yılındaki Petrol Krizi ilk kez enerji kaynakları konusunda bir güvensizlik ortamı yaratmış ve bütün dünyada yeni ve yenilenebilir kaynaklara karşı yoğun bir ilgiye neden olmuştur. 1980'lerin ortalarında petrol fiyatları düşmüş, ancak petrol krizi sonucu gündeme gelen “enerji

güvenliği” kavramı kalıcı olmuş ve “enerjinin çeşitlendirilmesi” enerji politikalarının vazgeçilmez unsurlarından biri haline gelmiştir. Enerji güvenliği ve kaynak çeşitliliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının da enerji yelpazesinde yer almasını sağlamıştır (URL-1, 2013). Bugün birçok ülke gelecekte enerji darboğazına girmemek adına şimdiden alternatif enerji kaynaklarının kullanımı ve araştırma-geliştirme faaliyetlerinin sürdürülmesi adına çalışmalar yürütmektedir. Küresel temiz enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar 2011 yılı içinde 260 milyar dolarlık bir hacme ulaşmıştır. 2009 yılında tüm dünyanın içine girdiği durgunluğa kadar (2004-2008 yılları arasında) yenilenebilir enerji sektörünün ortalama büyüme oranı %37 olmuştur (GWEC 2011). Bu oran yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların ne denli hızla artış gösterdiğini anlamak açısından önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının dünyadaki enerji talebini tam anlamıyla karşılamayacağı ortadadır, ancak bu kaynakların kullanımı fosil yakıtların tüketimini büyük ölçüde azaltacaktır. Rüzgar, güneş, akarsu, dalga, jeotermal ve çeşitli biyolojik süreçler sonucunda elde edilecek enerjinin dünya enerji ihtiyacına ve ekosistemine yapacağı olumlu katkılar göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir.

2000-2011 yılları arasında enerji eğilimleri ciddi şekilde değişmiştir. Bu değişimde yenilenebilir enerji kaynaklarının nükleer, kömür ve fuel oile karşı değişimleri dikkate değerdir. 2007-2010 yılları arasında kalkınma bankalarının dünya genelinde temiz enerji yatırımlarına ayırdığı bütçe 13,5 milyar dolar olmuş ve bunun 7,2 milyar dolarlık kısmı sadece rüzgar enerjisi projelerine ayrılmıştır (GWEC 2011).

Şekil 2.1 Avrupa’daki bu değişimi göstermektedir.



Şekil 2.1: 2000-2011 arasında Avrupa’da elektrik üretim yöntemlerindeki net değişim (GW cinsinden) (EWEA 2011)

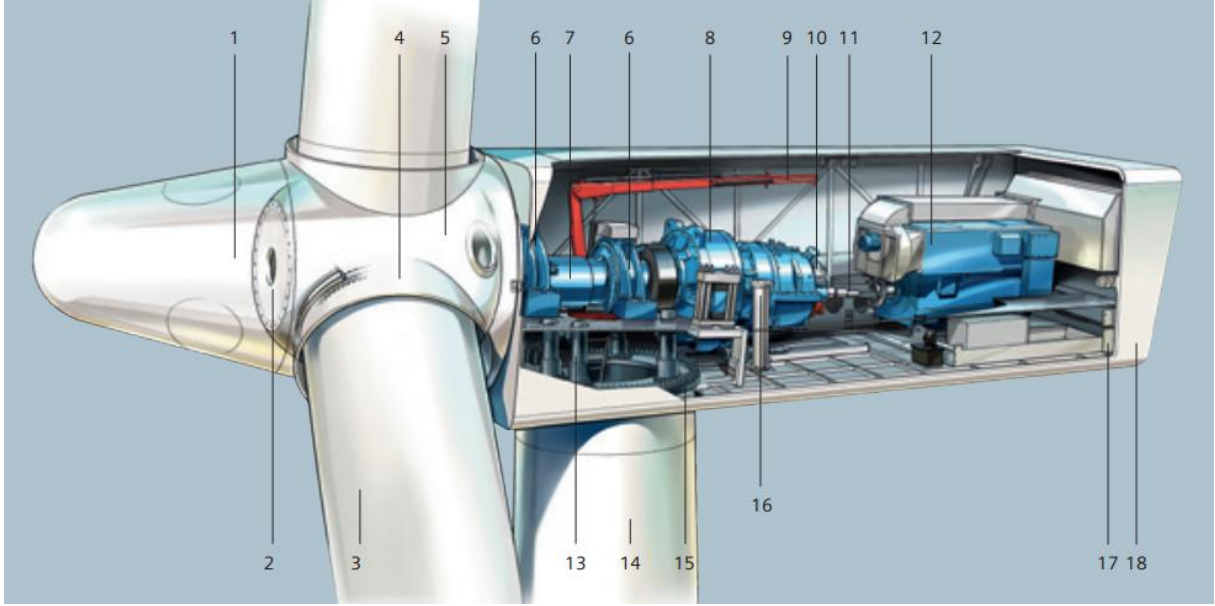
Bugüne kadar yapılan çalışmalarda yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji eldesinde ciddi ilerlemeler kaydedilmiştir. Güneş panellerinin verimleri artmış, hidroelektrik santrallerindeki uygulamalar gelişmeler kaydetmiştir. Buna benzer olarak rüzgar enerjisinde de türbinlerin boyutları, tipleri, kanat sayıları, montaj yöntemleri, verimliliklerini artıracak şekilde gelişmeler göstermiştir. Günümüzde rüzgar enerjisinden elektrik üretimi ticari anlamda kazançlı bir hal almıştır. Karada ve karaya yakın sahil bandında konumlandırılan rüzgar türbinleri aracılığıyla bugün birçok ülke enerjisi ihtiyacının bir kısmını rüzgar enerjisinden karşılamaktadır. Ülkemizde de kara uygulamalarının yaygınlaşması ile uzun vadede fosil yakıtlara olan ihtiyacın kısmen azaltılması mümkün olacaktır. Bunun yanında açık deniz alanlarından elde edilecek rüzgar enerjisi veriminin fazla olması nedeniyle bu konuda yürütülecek çalışmalar ülkemiz enerji ihtiyacına azami katkıyı yapacaktır.

Rüzgâr türbinleri, rüzgârın döndürme kuvvetini kanatları yardımıyla elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Havanın özgül kütlesi oldukça az olduğundan rüzgârdan elde edilecek enerji esas olarak rüzgar hızına bağlıdır. Rüzgar hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile doğru orantılı olarak artar. Rüzgar santrali kurulması planlanan bir bölgenin en az bir yıllık rüzgar ölçümlerinin yapılması tavsiye edilmektedir. Ortalama rüzgar hızı topografik özelliklere göre yıldan yıla değişiklik gösterebilir. Rüzgar hızındaki değişikliklerden dolayı, rüzgârdan elde edilecek olan enerji potansiyeli de değişiklik gösterir. Bu yüzden belli bir bölgede, rüzgârdan üretilecek elektrik enerjisinin planlanan üretim miktarı belirlenirken, yıllık ortalama rüzgâr hızı, “Weibull dağılımı” ile hesaplanmış rüzgâr hızı dağılımının kullanılması uygundur (Daradeli 2001).

2.1.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yer konumuna göre rotoru yatay eksenle çalışan türbinlerdir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin maksimum enerji üretebilmeleri için rotorları sürekli rüzgar akış yönünde olmalıdır. Bu da rotorun kule üzerinde dönmesi ile sağlanır. Rüzgarın yönüne dönme hareketi iki ayrı yapıyla sağlanır. Bunlar “öne-rüzgar” ve “arkaya-rüzgar” olarak adlandırılır. Eğer kanat, rüzgârı ön yüzünden alıyorsa rotorun arkasına bir kılavuz kanat takılır. Diğer durumda ise kanat rüzgarı arka kısımdan alır veya kanatlar biraz konik yapılır. Böylece sistem rüzgarı takip ederek maksimum fayda sağlanır. Teknolojik ve ticari olarak en yaygın kullanılan türbinler yatay eksenli rüzgar türbinleridir. Modern rüzgar türbinleri 2 veya 3 kanatlı ve kanat çapları yaklaşık 60 m civarındadır. Yatay eksenli türbinlerde rotor, dişli çark, jeneratör ve fren

bir kulenin üzerinde yatay şafta bağlanmışlardır. Ticari amaçlı kullanılan türbinlerin hemen hepsi bu guruba girmektedir (Özaktürk 2007). Şekil 2.2’de yatay eksenli bir rüzgar türbininin bileşenleri gösterilmiştir.



- | | | | |
|--------------------|--------------------------|------------------|------------------|
| 1. Rotor Başlığı | 2. Rotor başlığı desteği | 3. Kanat | 4. Kanat rulmanı |
| 5. Rotor göbeği | 6. Ana şaft yatağı | 7. Ana şaft | 8. Dişli kutusu |
| 9. Servis vinci | 10. Fren diski | 11. Bağlantı | 12. Jeneratör |
| 13. Rota dişlisi | 14. Kule | 15. Rota halkası | 16. Yağ filtresi |
| 17. Jeneratör fanı | 18. Kanopi | | |

Şekil 2.2: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Yapısı (Siemens 20..).

2.1.2 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne dik ve kanatları düşeydir. Bunların başlıcaları Darrieus ve Savonius tipinde olanlardır. Rüzgar doğrultusundan etkilenmemelerinden dolayı yönlendiriciye ihtiyaç duymamaktadırlar. Ayrıca yatay eksenli türbinler gibi bir kuleye ihtiyaç duymadıklarından ve bütün elektromekanik aksam yerde olduğu için yatırım ve bakım masrafları daha azdır. Bununla birlikte türbin kanatları tasarımı nedeniyle verimleri daha düşüktür. Kanatların yere yakınlığı rüzgar hızı veriminden faydalanamamalarına neden olmaktadır. Bu verim düşüklüğü ve diğer dezavantajlarından dolayı dikey eksenli rüzgar türbinleri fazla uygulama alanı bulamamışlardır (Özaktürk 2007).

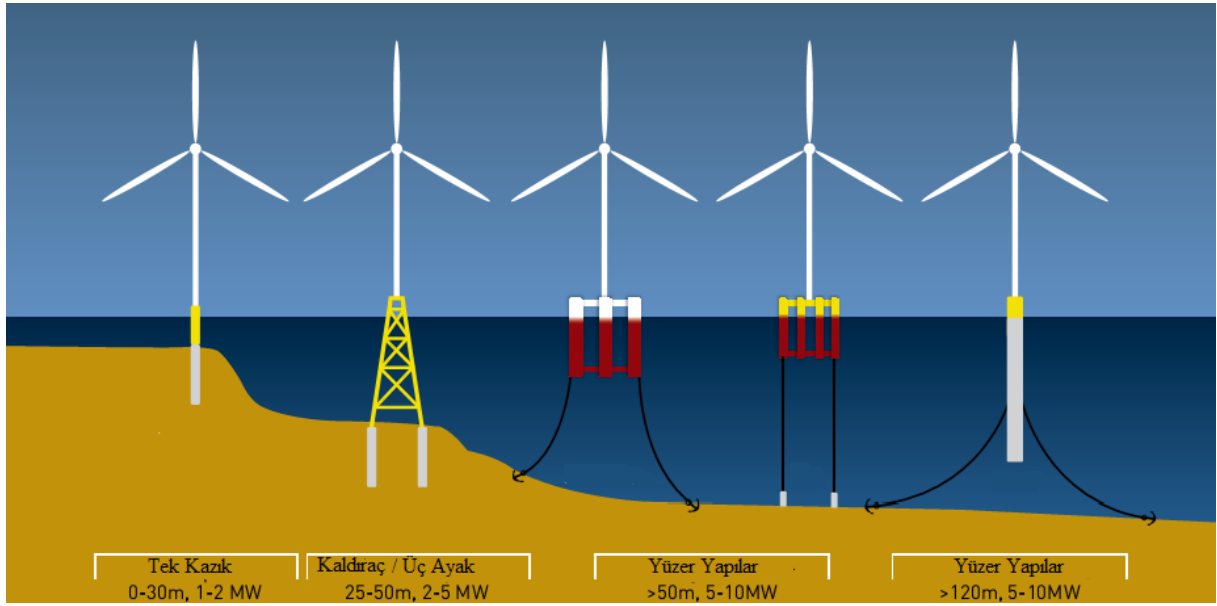
2.1.3 Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenleri düşey eksen ile rüzgâr yönünde bir açı oluşturan türbin tipidir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenini arasında belirli bir açı bulunmaktadır. Eğik eksenli rüzgar türbinleri kendilerine geniş bir uygulama alanı bulamamışlardır. Bununla birlikte ticari açıdan da tercih edilmemektedirler.

2.2 Açık Deniz Rüzgar Türbinleri

Açık denizlerdeki rüzgar enerjisinin verimliliğinden faydalanmak rüzgar enerjisi piyasası için oldukça önemlidir. Bugüne kadar yapılan çalışmaların özellikle yakın sahil bandına konumlandırılan deniz tabanına monte edilmiş rüzgar türbinlerinden oluştuğu bilinmektedir. Ancak bu rüzgar çiftliklerinin gürültü, görüntü kirliliği, gemi trafiğini, radarları etkileme gibi problemlere yol açtığı değerlendirilmektedir. Yakın zamanda yürütülen çalışmaların rüzgar türbinlerini özellikle karadan daha uzak noktalara ve derinliklere taşıma konusunda yüzer platform sistemli rüzgar türbinleri üzerine yoğunlaştığı görülmektedir.

Açık denizlerdeki rüzgarlar karaya göre daha az bir türbülansa sahiptir ve bu da karaya göre çok daha yüksek hız değerlerine ulaşmalarını sağlamaktadır. Yüksek hız değerleri de daha fazla elektrik üretimini mümkün kılmaktadır. Üretilen gücün rüzgar hızının küpüyle orantılı olarak arttığını düşünürsek karadan birkaç kilometre bile denizel alanlara doğru gitmek elektrik üretiminde ciddi bir artış imkanı sağlamaktadır. Örnek vermek gerekirse aynı rüzgar türbini ile ortalama rüzgar hızının 28 km/h olduğu bir yerden ortalama rüzgar hızının 22 km/h olan bir yere göre %60 daha fazla elektrik üretimi mümkündür. Bu rüzgar gücünden elektrik üretiminde hız faktörünün ne derece önemli olduğunu göstermektedir (Kurian ve Ganapathy 2010). Şekil 2.3’de açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımları gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımları (Rodier ve Weinstein 2010).

Günümüzde açık deniz rüzgar türbini tasarımları deniz şartlarını da göz önünde bulunduracak şekilde mevcut kara tabanlı türbinlerde bazı kayda değer değişiklikler yapılarak şekillendirilmektedir. Bu modifikasyonlar, dalga yüklerini karşılayacak şekilde kule yapılarının güçlendirilmesi, dişli sistemi ve elektriksel bileşenlerin korozyif etkilerden korunması, personelin bakım-tutum faaliyetleri için platforma kolayca ulaşımın sağlanması, acil durum şalteri eklenmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlara ek olarak deniz suyuna maruz kalacak en dış yüzeylerin korozyif etkilerden korunması için özel deniz tipi boyalarla boyanması gerekmektedir. Karadaki türbinlerde olduğu gibi hava araçlarına karşı bazı ikaz lambalarının konulması, özel parlak renklerin kullanılması ve ek olarak deniz araçlarının sisli havalarda türbinleri fark etmelerini sağlayacak ek tedbirlerin alınması gerekmektedir. Açık deniz rüzgar türbinleri 2 MW-5 MW değerleri arasında değişen güç kapasiteleri ile karadaki standart uygulamalardan fazla bir standart güç kapasitesine sahiptirler (Musial W ve Ram B 2010).

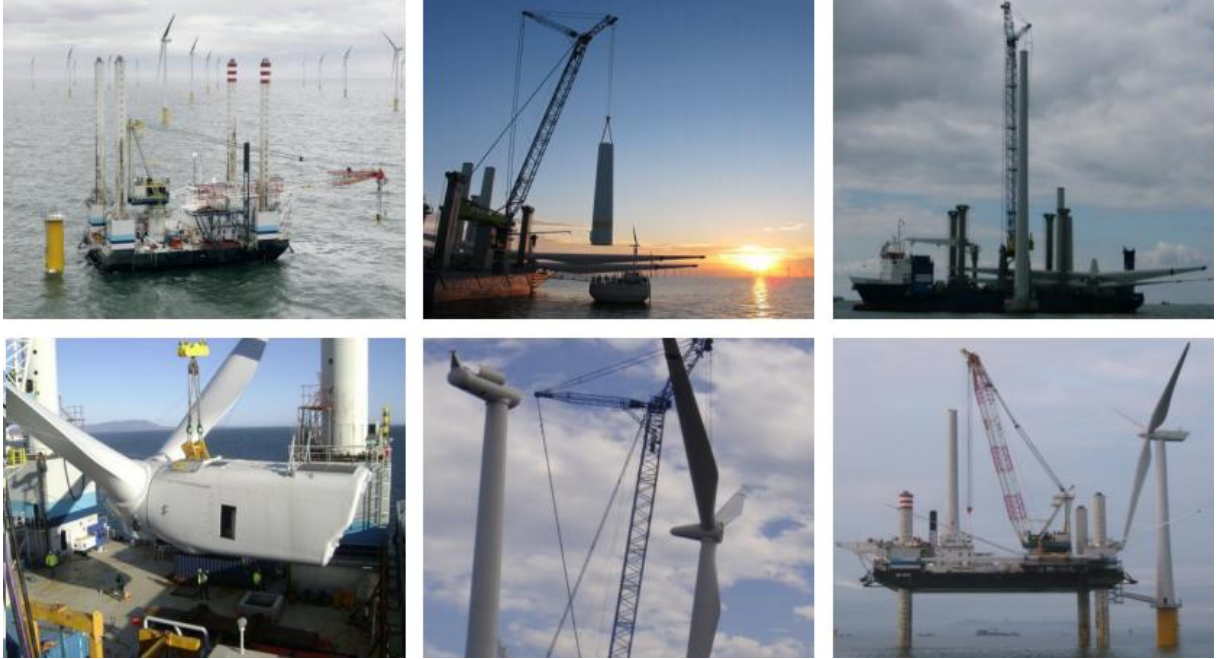
2.2.1 Deniz Tabanına Temellendirilmiş Açık Deniz Rüzgar Türbinleri

Deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbinlerinin montajı karadaki uygulamalardan farklı olarak deniz suyu ortamında gerçekleşmektedir. Bununla birlikte su altı zemin yapısının da karadaki zemin yapısından farklılık arz ettiği açıkça ortadadır. Dolayısıyla deniz tabanında gerçekleştirilecek her işlem ne yazık ki ilave bir maliyet unsuru

oluşturmaktadır. Şekil 2.4’de Deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımları, Şekil 2.5’de kurulum aşamaları, Şekil 2.6’da ise kurulumu tamamlanmış bir açık deniz rüzgar enerji santrali görülmektedir.



Şekil 2.4: Deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımları (Robinson ve Musial 2006)

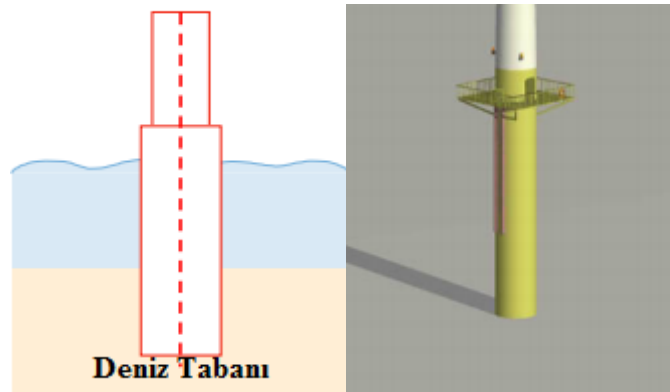


Şekil 2.5: Deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbini kurulum aşamaları (E.ON 2011)



Şekil 2.6: Kurulumu tamamlanmış bir açık deniz rüzgar enerji santrali (E.ON 2011).

2.2.1.1 Tek Kazık Temel Üzerinde Olanlar



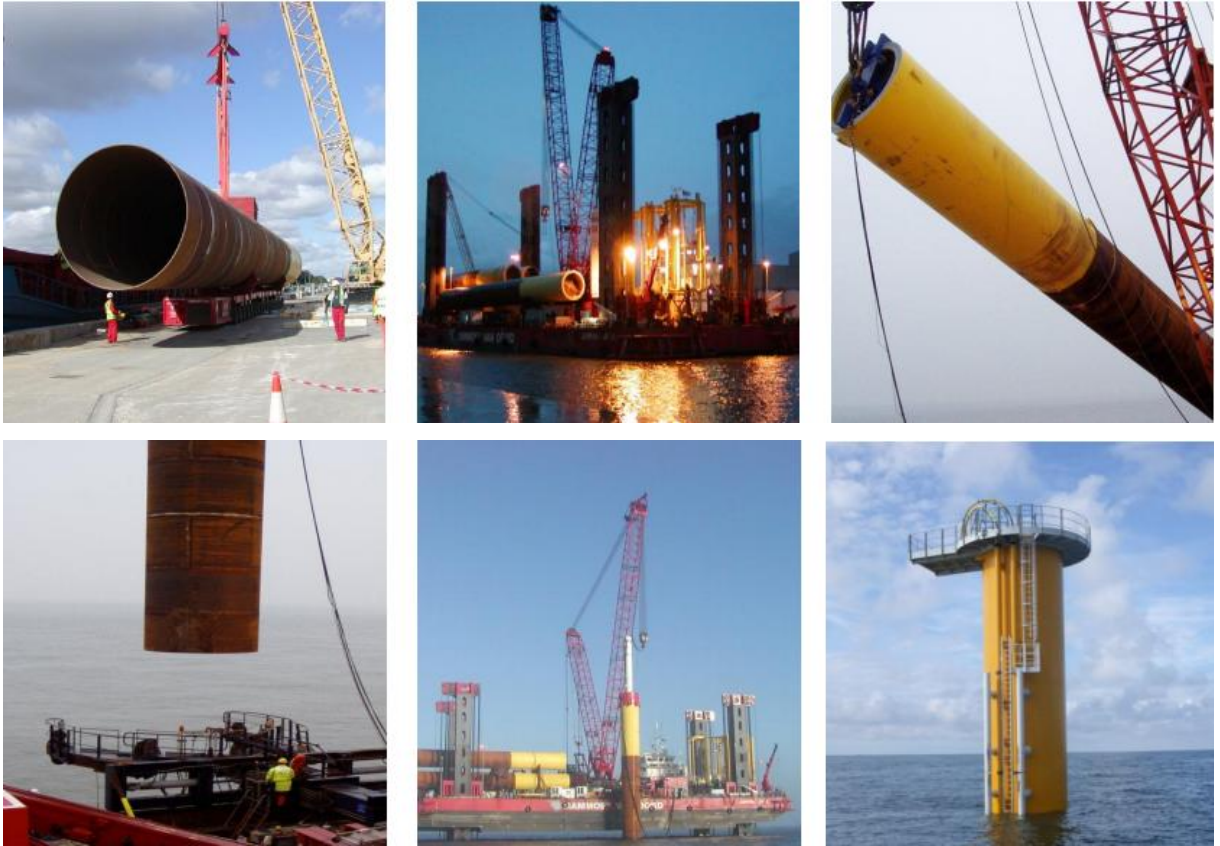
Şekil 2.7: Tek kazık sistemi (E.ON 2011).

Deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbinlerinin altyapı (temel) kısımlarında bugüne kadar en çok tek kazık tipi sistem kullanılmıştır. Tek kazık temel sisteminde et kalınlığı 60mm'ye ve çapı 6m'ye kadar değişen geniş çelik silindirik tüpler kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de görülen bu sistem rüzgar türbinlerini 5 ile 30 metre derinlik değerleri arasında rahatça konumlandırma imkanı sağlamaktadır. Deniz tabanının gevşek bir yapıda olması bazen bu kazıkların deniz tabanından 25-35 m kadar aşağıya, çamur seviyesini geçip monte

edilmesini gerektirmekte, bu da ek bir maliyet oluşturmaktadır. Deniz tabanına kazığın montajı için özel montaj gemileri ve araçları gerekmektedir. Bu vinçli özel gemiler vasıtasıyla kazığın büyük bir çekiç (tokmak) ile çakılması, türbinin kaldırılıp montajının yapılması ve kulenin yerine montajı sağlanmaktadır (Musial W ve Ram B 2010). Şekil 2.8’de Tek kazık sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları gösterilmektedir.

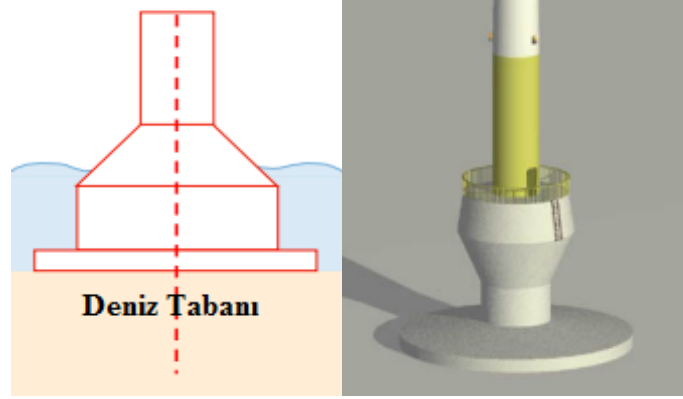
Özellikleri

- Çelikten inşa edilmekte,
- Uygulanabilen maksimum su derinliği 25 m,
- Kapasitesi 3.6 MW’ta kadar olan türbinler için uygun,
- Şu ana kadar en çok kullanılan temel şekli.



Şekil 2.8: Tek kazık sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları (E.ON 2011).

2.2.1.2 Gravite Temel Üzerinde Olanlar



Şekil 2.9: Gravite temel sistemi (E.ON 2011).

Bugüne kadar kurulumu gerçekleşen deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbinlerinin altyapılarında yaklaşık %20 oranında gravite tipte temel kullanılmıştır. Gravite tipteki temellerin en büyük avantajı kazık çakılması gibi bir gerekliliğin olmayışdır. Ancak gravite tipteki temeller için deniz tabanının montaj öncesi hazırlanması gibi ek çalışmalar gerekmektedir. Bu da işlemlerin daha maliyetli ve zor şartlarda gerçekleşmesine neden olmaktadır (Musial W ve Ram B 2010).

Özellikleri

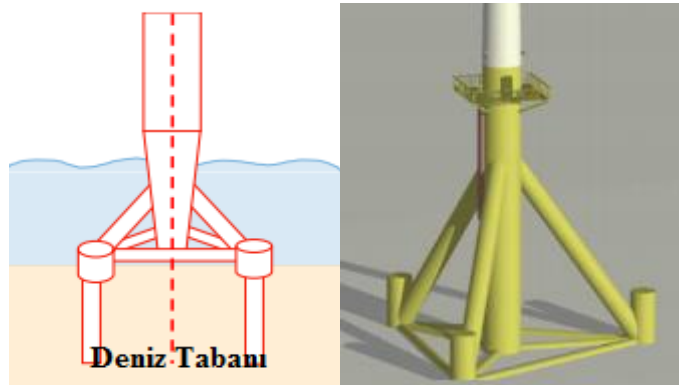
- Betonla güçlendirilmiş temel,
- Uygulanabilen maksimum su derinliği 30 m,
- Kapasitesi 5 MW'ta kadar olan türbinler için uygun,
- Test ve tecrübe edinilmiş, halihazırda kullanımdadır.

Şekil 2.9'da gravite temelli açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımı ve Şekil 2.10'da ise gravite temel sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Gravite temel sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları (E.ON 2011).

2.2.1.3 Üç Ayaklı Temel Üzerinde Olanlar



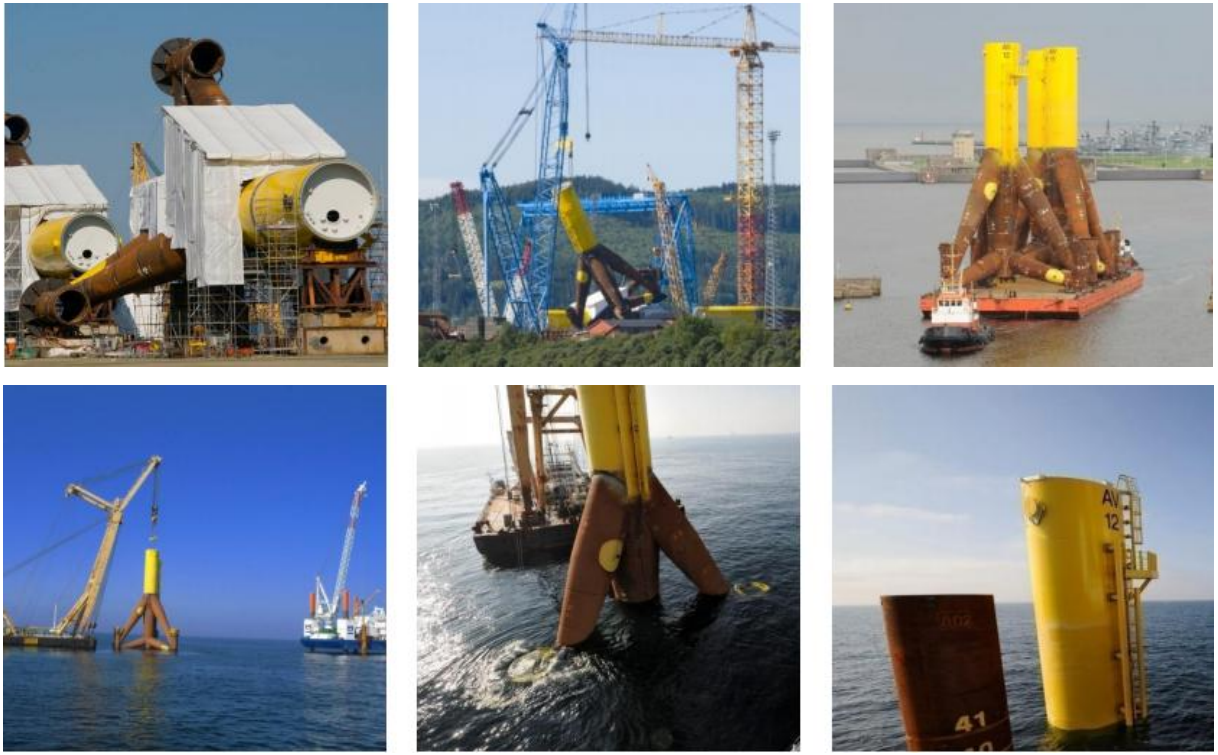
Şekil 2.11: Üç ayaklı sistem (E.ON 2011).

Çoklu kazık sistemi (tripod) temel yapıları ise bazı projelerde kullanılmış olup özellikle tek kazık temellerin montajının mümkün olmadığı geçiş derinliklerinde tercih edilmektedirler.

Özellikleri

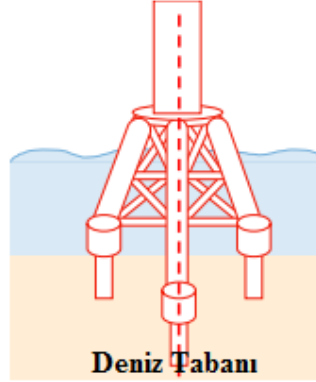
- Ağır çelik yapıya sahiptirler,
- Uygulanabilen maksimum su derinliği 35 m,
- Kapasitesi 5MW'ta kadar olan türbinler için uygun,
- Şu ana kadar az tecrübe edinilmiştir.

Şekil 2.11'de deniz tabanına temellendirilmiş üç ayaklı sistem ve Şekil 2.12'de ise üç ayak sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.12: Üç ayak sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları (E.ON 2011).

2.2.1.4 Kaldıraç (Jack-up) Tipi Temel Üzerinde Olanlar



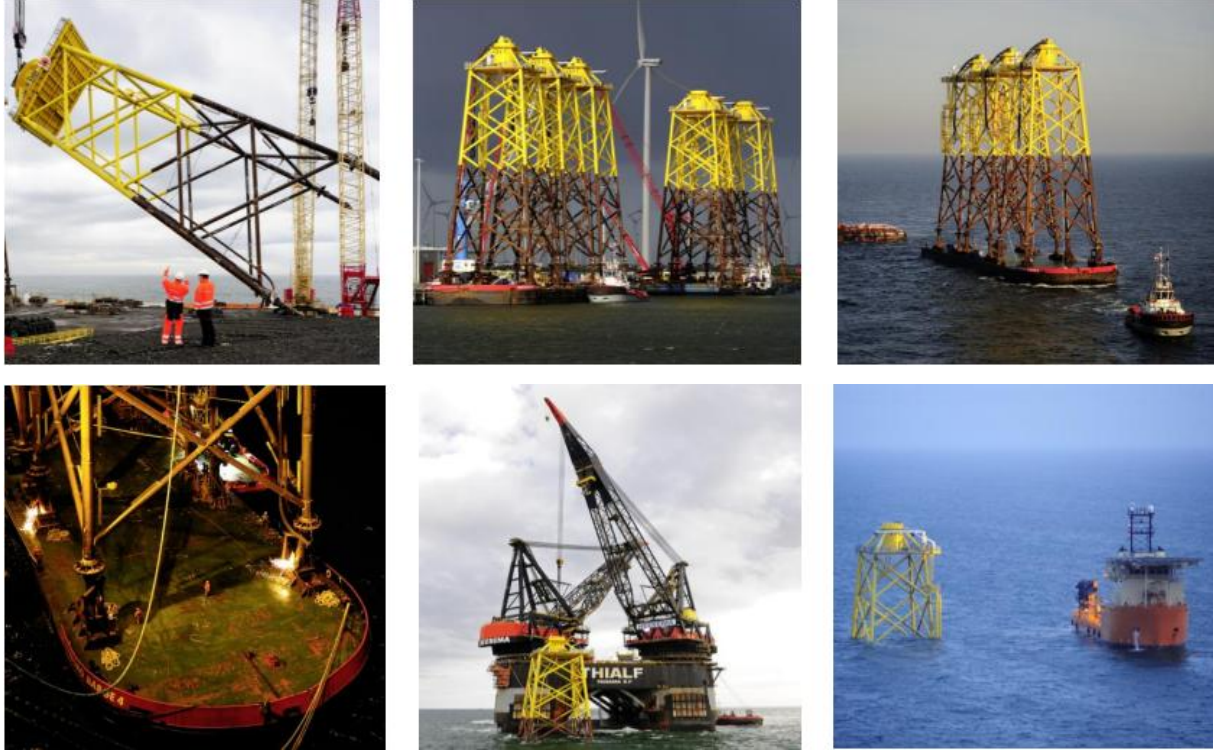
Şekil 2.13: Kaldıraç tipi sistem (E.ON 2011).

Kaldıraç tipi sistem (jack-up) özellikle petrol endüstrisinde çokça tecrübe edilmiş bir sistemdir. Kapasite olarak 5 MW'a kadar olan türbinler için uygulama alanı bulmuştur. Rüzgar enerjisi alanında petrol endüstrisinde olduğu kadar geniş bir kullanımı henüz yoktur.

Özellikleri

- Örgü çelik yapıya sahiptirler,
- Uygulanabilen maksimum su derinliği 45 m,
- Kapasitesi 5MW'ta kadar olan türbinler için uygun,
- Şu ana kadar az tecrübe edinilmiştir.

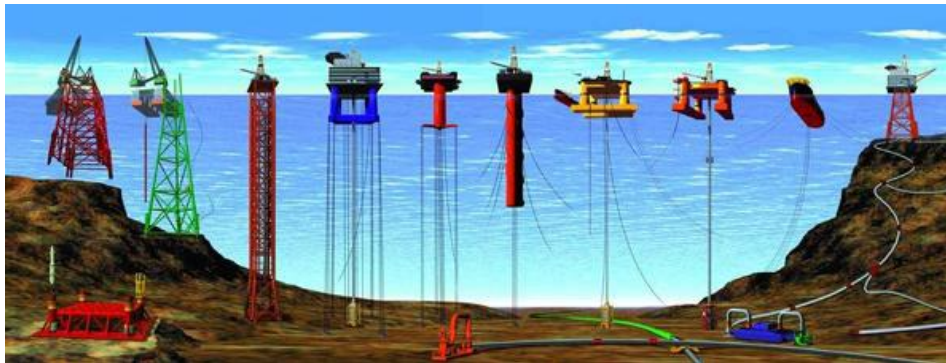
Şekil 2.13'de kaldıraç tipi deniz tabanına temellendirilmiş açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımı, Şekil 2.14'de ise kaldıraç sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.14: Kaldıraç sistemli açık deniz rüzgar türbininin üretimi, montaj alanına transferi ve kurulum aşamaları (E.ON 2011).

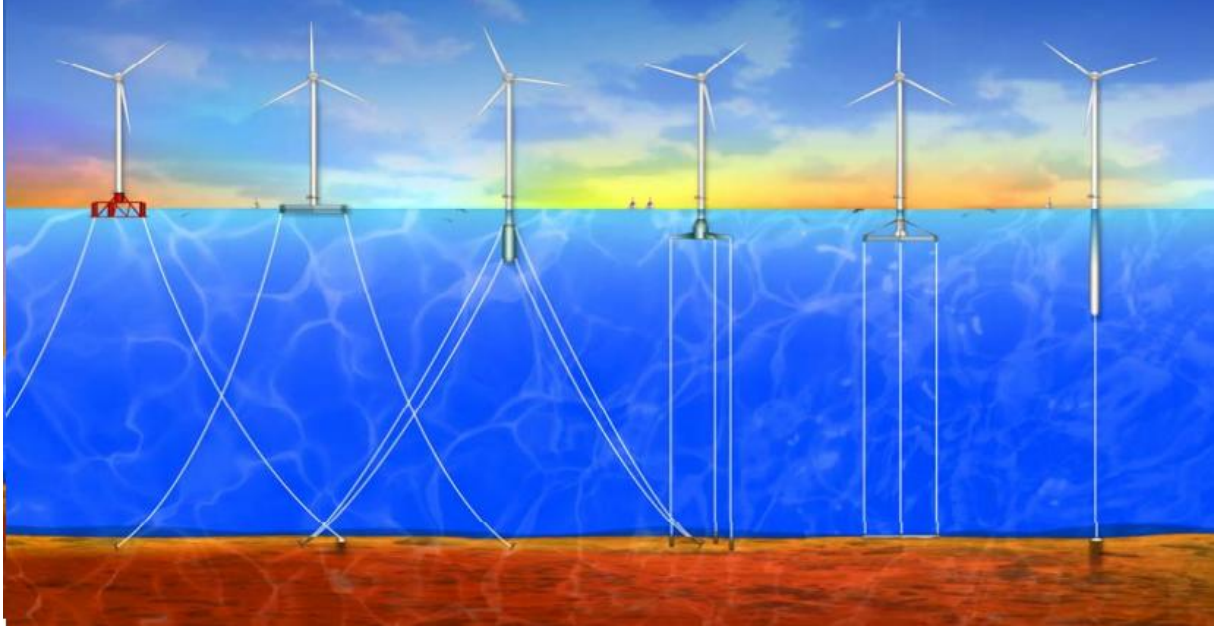
2.2.2 Yüzer Platform Sistemli Açık Deniz Rüzgar Türbinleri ve Uygulamaları

Yüzer platform sistemleri 20.yüzyılın başlarından itibaren petrol endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Önceleri 30 metre gibi düşük derinliklere konumlandırılan yüzer petrol platformları günümüz teknolojisi ile 2000 m derinliklerde dahi konumlandırılabilirler. Şekil 2.15 bugüne kadar farklı amaçlar için kullanılmış değişik tipteki açık deniz yapılarını göstermektedir.



Şekil 2.15: Petrol endüstrisinde kullanılan açık deniz yapıları (URL-2, 2013)

Benzer mantıkla Şekil 2.16'da gösterildiği gibi rüzgar türbinleri için de çok farklı tipte yüzer platform sistemleri tasarlamak mümkündür.



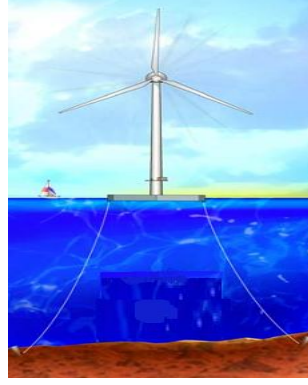
Şekil 2.16: Yüzer açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımları (Robinson ve Musial 2006)

Daha önce de bahsedildiği gibi yüzer platform sistemleri oldukça fazla çeşitliliğe sahiptir. Optimum tasarımın belirlenebilmesi için mevcut seçeneklerden stabilite açısından en verimli olanının seçilmesi rüzgar türbininin çalışma verimi açısından oldukça önemlidir. Stabilite kriterleri son tasarımı şekillendirecek ana parametreleri belirlemesi nedeniyle azami öneme sahiptir. Bununla birlikte ortaya konacak yapının maliyetler açısından da gerçekleştirilebilir olması önemlidir.

Yüzer platform sistemlerinin dört ana grupta sınıflandırılması söz konusudur. Bunlar;

1. Duba Tipi (Barç Tipi) Yüzer Platform Sistemleri
2. Yarı Batık Yüzer Platform Sistemleri
3. Gergi Ayaklı Yüzer Platform Sistemleri
4. Safralı Tipte (Balast Tipi) Yüzer Platform Sistemleri' dir.

2.2.2.1 Duba Tipi Yüzer Platform Sistemi Üzerinde Olanlar



Şekil 2.17: Duba tipi yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini (Jonkman J M 2009).

Duba tipi yüzer platform sistemleri stabilitelerini geniş bir alana yayılmış hacimleri ile sağlamaktadırlar. Bu tipteki platform sistemleri geniş bir alana yayılan su hatları ve uzun bir doğrultucu moment koluna sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Şekil 2.17’de gösterildiği gibi rüzgar türbini bir duba (barç) üzerinde konumlandırılmaktadır.

Duba tipi yüzer açık deniz rüzgar türbinleri kolay inşa edilebilir olmalarına rağmen çok yer kaplamaları ve kütle ataletlerinin büyük olması nedeniyle henüz tam ölçekli olarak uygulanmamıştır.

2.2.2.2 Yarı Batık Yüzer Platform Sistemi Üzerinde Olanlar



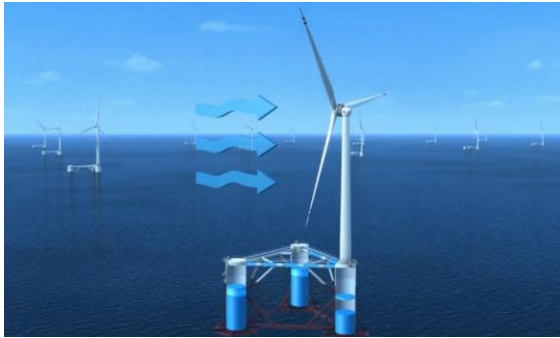
Şekil 2.18: Yarı batık yüzer platform sistemli açık deniz türbini (Robertson A N ve Jonkman J M 2011).

Yarı batık yüzer platform sistemleri stabiliteelerini su altı ve su üstüne yayılan hacimleri vasıtasıyla sağlamaktadırlar. Bu tipteki platform sistemlerinin su altı hacimleri sütun silindirik ayaklar aracılığıyla sağlanmaktadır. Silindirik kesitli duba tipi ayaklar yapının stabilite açısından daha az dalga yüküne maruz kalmasını sağlamaktadır. Şekil 2.18 bir yarı batık yüzer platform sistemli rüzgar türbinini göstermektedir.

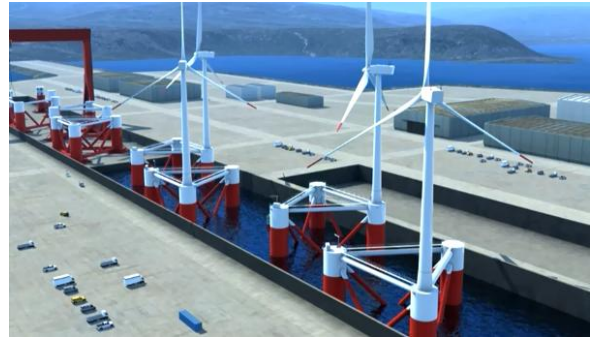
Yarı batık tipi yüzer açık deniz rüzgar türbinleri tam ölçekli olarak denenmeye başlanmıştır. Principle Power firması tarafından geliştirilen WindFloat adındaki yarı batık yüzer açık deniz rüzgar türbini Portekiz'in Agucadoura kıyısından 5 km açığa yerleştirilmiştir. Platform 5 MW'lık rüzgar türbinlerini taşıma kapasitesine sahiptir. Platform yapısı üç ana taşıyıcı panton ayaktan oluşmuştur. Pantonlar arası balast transfer sistemi yapının denge durumunu rüzgar yönüne göre kolayca ayarlayabilmektedir. WindFloat sisteminde Şekil 2.19'da gösterildiği gibi platform ve türbin karada monte edilip yüzdürülerek çalışma alanına taşınabilmektedir.



a



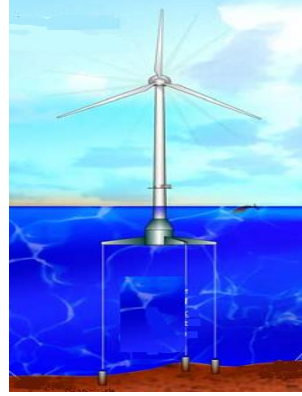
b



c

Şekil 2.19: WindFloat a. Montaj alanına transfer, b. Balast sistemi, c. Üretim mantığı (URL-3, 2013)

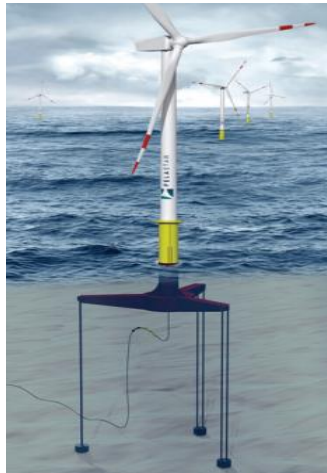
2.2.2.3 Gergi Ayaklı Yüzer Platform Sistemi Üzerinde Olanlar



Şekil 2.20: Gergi ayak yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini (Jonkman J M 2009).

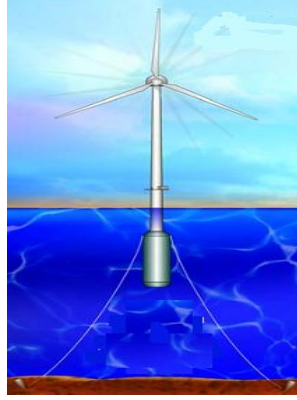
Gergi ayaklı yüzer platform sistemleri stabiliteyi demirleme sistemleri sayesinde sağlamaktadırlar. Bu tipteki platform sistemleri gerdirilmiş halat sistemleri ile düşey konumlandırılarak sabit hale getirilmektedirler. Şekil 2.20’de gösterildiği gibi rüzgar türbini ve yüzer platform bir demirleme sistemi ile deniz tabanına 90 derecelik bir açı ile bağlanmış ve dinamik hareketlerin bir kısmı engellenmiştir.

Yarı batık tipi yüzer açık deniz rüzgar türbinlerinin tam ölçekli olarak denenmesi için ön hazırlıklar sürmektedir. Glosten firması tarafından geliştirilen Şekil 2.21’de görülen Pelastar gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbininin 2013 yılında ölçekli olarak test edilmeye başlanması planlanmaktadır.



Şekil 2.21: Pelastar

2.2.2.4 Safralı (Balast) Tipi Yüzer Platform Sistemi Üzerinde Olanlar



Şekil 2.22: Safralı yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini (Jonkman J M 2009).

Safralı (Balast) tipi yüzer platform sistemleri stabilitelerini merkeze konumlandırılmış sephiye tankları ve içerisine doldurulmuş ağırlıklar ile sağlamaktadırlar. Bu ağırlıklar tüm yapının ağırlık merkezini deniz tabanına doğru çekerek yapının bazı dinamik hareketlerinde kısıtlamalar sağlamaktadır. Böylece safralı yüzer açık deniz rüzgar türbinleri su içerisinde daha kararlı bir dengede çalışabilmektedirler. Şekil 2.22’de gösterildiği gibi rüzgar türbini bir merkez sephiye tankı üzerine monte edilmiş kuleye bağlanmaktadır.

Balast tipi yüzer açık deniz rüzgar türbinlerinin tam ölçekli olarak testleri 2009 yılından beri sürdürülmektedir. State Oil firması tarafından geliştirilen HyWind balast tipi yüzer açık deniz rüzgar türbininin yeni nesil tasarımı üzerinde çalışılmaktadır. 2015-2016 yılları içinde yeni nesil tasarımın inşası planlanmaktadır. Şekil 2.23’de tam ölçekli HyWind platformu ve grafiksel gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.23: Hywind (URL-4, 2013)

2.2.2.5 Dünya Genelindeki Uygulamalar ve Durumları

Dünya genelinde farklı tipte yüzer açık deniz rüzgar türbini sistemleri için çalışmalar yürütülmektedir. Dünya genelindeki çalışmalar ve faaliyet durumları Tablo 2-1’de verilmiştir.

Tablo 2-1: Dünya genelinde yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini çalışmaları (Main(e) International Consuting LLC 2012).

Proje Adı	Ülke	Platform Tipi	Faaliyet Durumu
HyWind	Norveç	Balast	Tam ölçekli olarak 2009 yılından beri test edilmekte, yeni nesil tasarımın inşası 2015-2016 yılları arasında gerçekleşecek.
WindFloat	ABD	Yarı Batık	Tam ölçekli olarak 2011 yılından beri test edilmektedir.
Kabashima Hybrid Spar	Japonya	Spar	½ ölçekli, 100 kW türbinle testleri 2012 yılında başlamıştır. 2MW türbinle tam ölçekli testleri 2013 yılında yapılacaktır.
Mitsui Semi Sub	Japonya	Yarı Batık	Dizayn aşaması tamamlanmış olup 2013 yılında tam ölçekli testlerinin yapılması planlanmaktadır.
GICON TLP	Almanya	Gergi Ayak	1/25 model testleri tamamlanmıştır. 2013 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
HiPR Wind	İspanya Almanya	Yarı Batık	Dizayn aşamasında olup 2013 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
Hitachi Semi Sub	Japonya	Küçük Duba	2013 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
IHI Spar	Japonya	Spar	1/50 model testleri tamamlanmış olup 2013 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
Vertiwind	Fransa	Küçük Duba	½ ölçekli modeli test edilmiş olup 2013 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
Winflo	Fransa	Küçük Duba	2013 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
BlueH	Hollanda	Gergi Ayak	2008 yılında ölçekli testleri, 2012 yılında tam ölçekli testler için inşası tamamlanmıştır. 2014 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.

Tablo 2-1 (Devam ediyor)

Proje Adı	Ülke	Platform Tipi	Faaliyet Durumu
Poseidon Floating Power	Danimarka	Küçük Duba	Ölçekli testlere başlanmış olup 2014/2015 yıllarında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
Pelagic Power	Norveç	Küçük Duba	Tam ölçekli testlere 2014 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
Nautica AFT	ABD	Balast	Simulasyonları devam etmekte olup 2014 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
Mitsubishi Floater	Japonya	Küçük Duba	2014 yılında tam ölçekli testlere başlanması planlanmaktadır.
IDEOL	Hollanda	Küçük Duba	Prototip üretimin 2013 yılında tam ölçekli testleri ise 2014 yılında yapılması planlanmaktadır.
Wind Lens	Japonya	Yarı Batık	Ölçekli testlerine 2011 yılında başlanmıştır.
Pelastar	ABD	Gergi Ayak	Tasarım, maliyet hesapları ve tank testleri tamamlanmış olup ölçekli testlerinin 2013 yılı içinde yapılması planlanmaktadır.
SWAY	Norveç	Balast	Tam ölçekli testleri sürmektedir.
Shimizu	Japonya	Yarı Batık	Simulasyon çalışmaları tamamlanmıştır.
Mitsui TLP	Japonya	Gergi Ayak	Tasarım aşamasındadır.
WindSea	Norveç	Küçük Duba	Simulasyonu ve tank testleri tamamlanmıştır.
TriFloater	Hollanda	Yarı Batık	Tank testleri tamamlanmıştır.
DIWET	Fransa	Yarı Batık	Tasarım aşamasındadır.
Hexicon	İsveç	Küçük Duba	Tasarım aşamasındadır.
SeaTwirl	İsveç	Balast	Ölçekli testleri tamamlanmıştır.

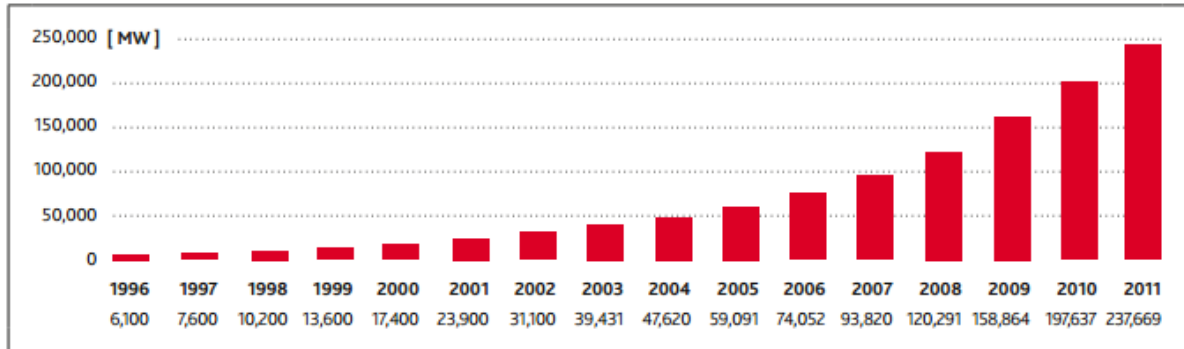
Tablo 2-1 (Devam ediyor)

Proje Adı	Ülke	Platform Tipi	Faaliyet Durumu
Sea Breeze	İngiltere	Gergi Ayak	Tasarım aşamasındadır.

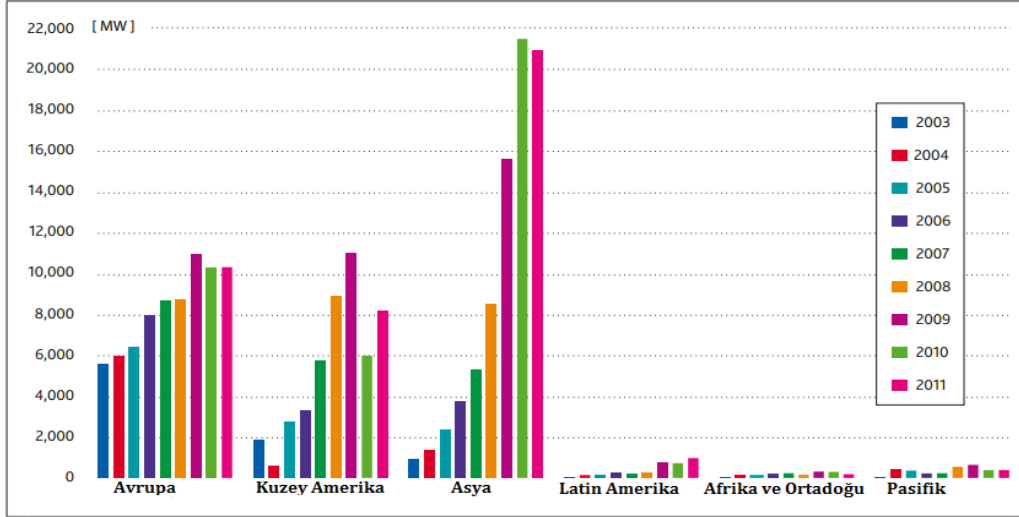
2.3 Rüzgar Enerjisinin Durumu ve Gelecek Öngörülleri

2.3.1 Dünyada Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi dünya genelinde ciddi bir potansiyele sahiptir. Her geçen gün gelişen teknoloji ve enerji pazarı şartları rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesinin artmasına ve pazarın gelişmesine katkı sağlamaktadır. Dünyadaki kurulu kümülatif rüzgar enerjisi gücü 2011 yılı sonu itibariyle 238 GW değerine ulaşmıştır (GWEC 2011). Şekil 2.24 yıllar itibariyle gerçekleşen bu değişimi göstermektedir.

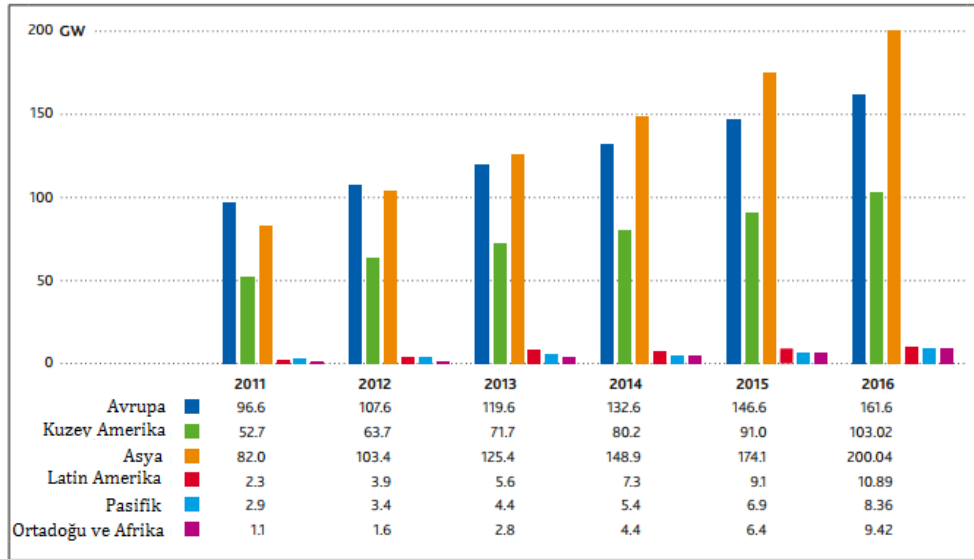


Şekil 2.24: 1996-2011 yılları arası küresel kümülatif kurulu rüzgar gücü kapasitesi (GWEC 2011).



Şekil 2.25: Bölgesel temelde yıllık rüzgar gücü kurulumları 1996-2011 (GWEC 2011).

Rüzgar enerjisi piyasasını takip eden çoğu uzmana göre 2030 yılına kadar Brezilya, Çin, Hindistan, Meksika, Fas, Güney Afrika ve Türkiye'nin içinde bulunduğu ülkeler grubu dünya rüzgar enerjisi kapasitesinin yarısı kadar kurulu güç kapasitesine ulaşacaklardır (GWEC 2011). Asya ülkelerinin hızlı büyüyen rüzgar enerjisi kurulu gücü Şekil 2.25'de açıkça görülmektedir. Şekil 2.26'da ise 2016 yılına kadar gelişen piyasaların özellikle Asya ve Avrupa'da yoğunlaştığı görülmektedir. Tablo 2-2'de rüzgar enerjisinde ülkesel bazda Çin'in ezici üstünlüğünü göstermektedir.



Şekil 2.26: Bölgesel temelde kümülatif rüzgar gücü piyasası tahminleri 2012-2016 (GWEC, 2011)

Tablo 2-2: Ülkesel temelde kümülatif kurulu rüzgar gücü kapasitesi yüksek ilk on ülke-2011
(GWEC, 2011)

Ülke	Kurulu Güç (MW)	Yüzdesi
Çin	62,364	26.2
ABD	46,919	19.7
Almanya	20,060	12.2
İspanya	21,674	9.1
Hindistan	16,084	6.8
Fransa	6,800	2.9
İtalya	6,737	2.8
Birleşik Krallık	6,540	2.7
Kanada	5,265	2.2
Portekiz	4,083	1.7
Diğer	32,143	13.5

Rüzgar enerjisi piyasasının bir parçası olan açık deniz rüzgar enerjisi bugün dünyadaki kurulu güç kapasitesinin %2'sine denk gelmektedir. 2011 yılında gerçekleştirilen rüzgar enerji santralleri kurulumlarının yaklaşık %2.5'lik kısmını açık deniz rüzgar enerji santralleri teşkil etmiştir. İyimser tahminler 2020'ye kadar açık denizlere kurulacak türbinlerin küresel pazardaki payının %10'nu geçmeyeceği yönündedir (GWEC 2011). İlk bakışta düşük gelen bu oran aslında yanıltıcı olabilmektedir. Bunun nedeni ise açık denizlerden elde edilecek rüzgar enerjisi üretiminin göreceli olarak yeni bir alan olmasıdır. Oysaki teknolojik yenilikler maliyetlerin azaltılması hususunda ciddi fırsatlar sunmaktadır. Bunun yanı sıra açık denizlerdeki rüzgar veriminin karadan ciddi şekilde fazla olması onu yatırım yapılabilir bir seçenek olarak karşımıza çıkarmaktadır. Özellikle nüfus yoğunluğu fazla olan kıyı şeridi yerleşim alanları için uygun iletim ve şebeke bağlantı seçenekleriyle karasal üretimle yarışabileceği günler çok uzakta değildir.

Kurulu açık deniz rüzgar gücünün %90'ını Kuzey Avrupa'da bulunmaktadır. Geri kalan kısmının büyük bölümünü de Çin'de bulunan iki adet araştırma projesi oluşturmaktadır. Çin 2020 yılına kadar kurulu açık deniz rüzgar gücünü 30 GW hedefine ulaştırmayı

amaçlamaktadır. (GWEC 2011) Ülkesel temelde 2011 yılı içinde kurulan açık deniz kurulu rüzgar gücü potansiyeli ve kümülatif toplamı Tablo 2-3’de gösterilmiştir.

Tablo 2-3: Ülkesel temelde 2011 yılı içinde kurulan açık deniz kurulu rüzgar gücü potansiyeli ve kümülatif toplamı (GWEC 2011).

Ülke	2011 (MW)	Toplam (MW)
Birleşik Krallık	752.4	2093.7
Almanya	108.3	200.3
Çin	99.3	258.4
Danimarka	3.6	857.28
Portekiz	2.0	2.0
Belçika	0	195.0
Finlandiya	0	26.3
İrlanda	0	25.2
Hollanda	0	246.8
Norveç	0	2.3
İsveç	0	163.7
Japonya	0	25.0

İleriye bakıldığında rüzgar enerjisi piyasasında karışık bir tablo karşımıza çıkmaktadır ve piyasayı bugünden analiz etmek bir parça güç olmaktadır. Rüzgar enerjisi konusunda Amerika’daki federal yardımların büyük belirsizlikler içermesi, Çin’deki şebeke bağlantı sorunları, Hindistan’daki vergilendirme yasalarının değişmesi, Avrupa’da açık deniz rüzgar türbinlerindeki teknolojik gelişmeler ve Ortadoğu’daki siyasi belirsizlik gelecek öngörülerini konusunda uzmanların analiz yapmalarını güçleştirmektedir (GWEC 2011).

2.3.2 Avrupa’da Rüzgar Enerjisi

Avrupa Birliği ülkeleri 2011 yılında 9616 MW rüzgar gücü kurarken toplamda tüm Avrupa’da 10281 MW kurulu rüzgar gücü elde edilmiştir. Avrupa’nın toplam kurulu rüzgar gücü 2011 yılı sonu itibarıyla 96.6 GW olurken bunun 93.95 GW’tı Avrupa Birliğine üye 27 ülkeye aittir. Avrupa’daki kurulu rüzgar gücünde 2011 yılı sonu itibarıyla Almanya başı

çekmektedir. Avrupa'daki açık deniz rüzgar türbinleri yıllık temelde 2011 yılında hafif bir azalma eğilimi göstererek 866 MW'a düşerek bir önceki yılın değerine göre 17 MW'lık bir azalma göstermiştir.

Açık deniz kurulu rüzgar gücü kapasitesi toplamda 3813 MW'a çıkmış ve Avrupa'daki kurulu rüzgar gücünün %9'unu oluşturmuştur. Birleşik Krallık'ın 2011 yılı sonuna kadar açık denizlerdeki kurulu gücü 2000 MW'ı geçmiştir. Birleşik Krallık bu konudaki liderliğini yıllık ve kümülatif temelde Avrupa'da ve Dünya'da devam ettirmektedir. Bu alanda 857 MW'la Danimarka ikinci sırada gelmektedir. Gelişen ekonomilerin başında gelen Çin bu alanda da söz sahibi olmak adına Birleşik Krallık ve Danimarka'dan sonra açık denizdeki toplam kurulu güç bakımından 258.4 MW'la dünyada üçüncü sırada yer almaktadır. 2011 yılı sonu itibariyle Avrupa'da 6 GW'lık açık deniz rüzgar gücü kapasitesi inşa halindedir. Önümüzdeki on yıl içinde Avrupa'daki kurulu açık deniz rüzgar gücünün on kat artması beklenmektedir. Avrupa Rüzgar Enerjisi Ajansı'na (EWEA) göre 2020'ye kadar 40 GW'lık bir açık deniz rüzgar gücü kurulumu gerçekleşecektir. Bu değer yıllık 148 TWh elektrik üretilmesini sağlaması ve bunun da Avrupa Birliği ülkelerinin enerji tüketiminin %4'ünü karşılaması beklenmektedir (GWEC 2011).

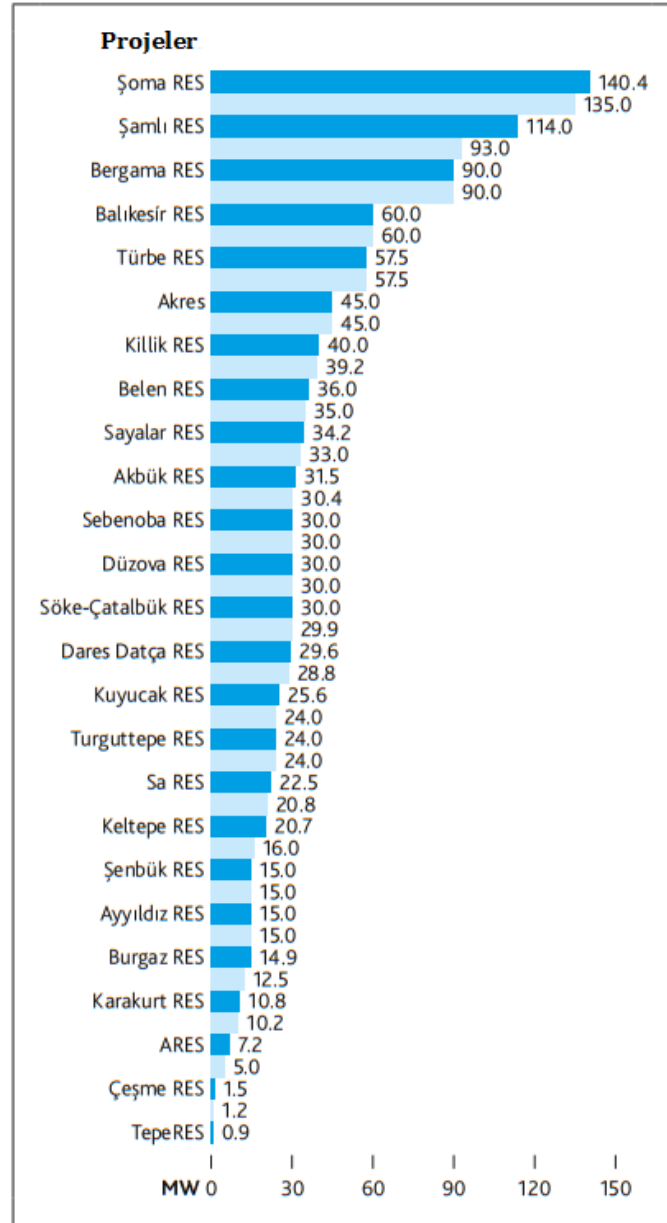
Tüm bunlarla birlikte açık deniz rüzgar gücü kurulumlarında yan sanayi ve araştırma geliştirme faaliyetleri de ciddi bir alan oluşturmaktadır. Dünyanın önde gelen birçok elektrik, makina ve denizcilik firması bu alanda önemli çalışmalar yürütmektedir.

2.3.3 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

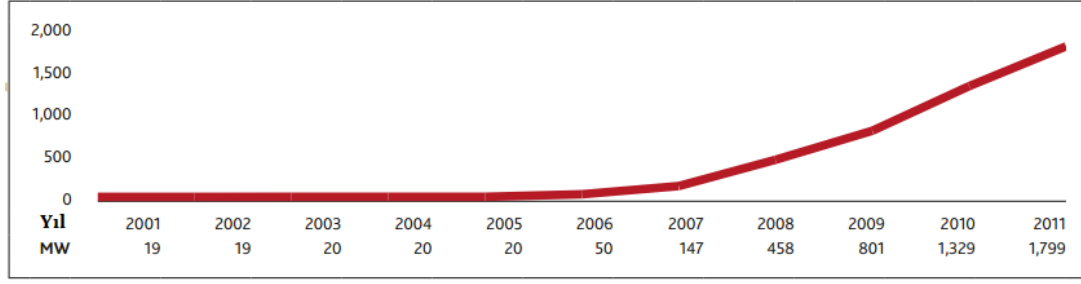
Ülkemiz hızlı büyüyen ekonomisi, artan nüfusu ve buna paralel olarak büyüyen enerji ihtiyacından dolayı son yirmi yıl içinde rüzgar enerjisinde hızlı büyüyen piyasalardan biridir. Ülkemizin kısıtlı olan fosil yakıt kaynakları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmemiz kaçınılmaz olmuştur.

Ülkemiz 2007 yılı sonunda 30 MW olan kurulu rüzgar gücü kapasitesini 2011 yılı sonunda 1800 MW'ta çıkararak hızlı bir gelişim süreci geçirmiştir. Çanakkale, İzmir, Balıkesir, Hatay illerimiz başta olmak üzere kayda değer bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olan ülkemizin toplam rüzgar gücü potansiyeli tahmini olarak 47 GW olarak belirlenmiştir.

Ülkemiz 2011 yılında 470 MW'lık rüzgar gücü kurulumu gerçekleştirmiştir ki; bu da yıllık %35 gibi ciddi bir büyüme oranına denk gelmektedir. Türkiye'nin 2023 yılına kadar rüzgar enerjisinden elde etmeyi planladığı güç değeri 20 GW olarak belirlenmiştir. Bu değer tüm elektrik üretiminin %30'una denk gelmesi beklenmektedir (GWEC 2011). Şekil 2.27'de 2012 yılı içinde faaliyete alınması planlanan rüzgar enerji santralleri, Şekil 2.28'de Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü potansiyelinin kümülatif toplamı ve Şekil 2.29'da ise Türkiye'nin 50 m yükseklikteki rüzgar sınıfları gösterilmektedir. Tablo 2-4 Türkiye'nin denizel alanları için 50 m yükseklikteki rüzgar enerjisi potansiyelini göstermektedir.



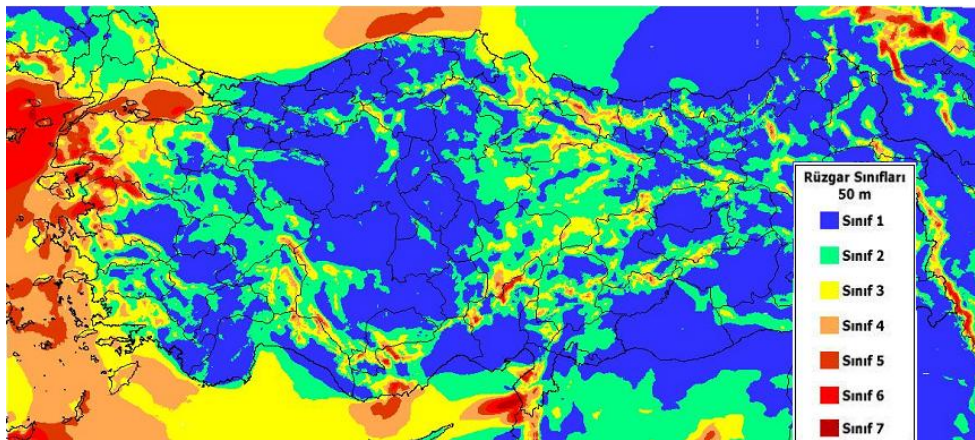
Şekil 2.27: Türkiye’de 2012 yılı içinde faaliyete alınması planlanan rüzgar enerji santralleri (GWEC, 2011)



Şekil 2.28: Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü potansiyelinin kümülatif toplamı 2001-2011 (GWEC 2011)

Tablo 2-4: Türkiye'nin denizel alanları için 50 m yükseklikteki rüzgar enerjisi potansiyeli (Malkoç Y 2007)

Rüzgar Kaynak Derecesi	Rüzgar Sınıfı	50m'de Rüzgar Gücü (W/m ²)	50m'de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km ²)	Rüzgarlı Arazi Yüzdesi	Toplam Kurulu Güç (MW)
Orta	3	300-400	6.5-7	1,385.98	9.26	6929.92
İyi	4	400-500	7.0-7.5	1,026.64	6.86	5133.20
Harika	5	500-600	7.5-8.0	688.96	4.60	3444.80
Mükemmel	6	600-800	8.0-9.0	348.51	2.33	1742.56
Sıradışı	7	>800	>9.0	28.54	0.19	142.72
Toplam					23.25	17393.20



Şekil 2.29: Türkiye'nin 50 m yükseklikteki rüzgar sınıfları (Malkoç Y 2007)

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde değişik otoritelerin yapmış oldukları çalışmalar incelenerek yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini tasarımı için göz önünde bulundurulması gereken hususlar belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde üzerinde sıkça çalışma yapılan MIT (Massachusetts Institute of Technology), NREL (National Renewable Energy Laboratory) ve UMAINE (University of Maine) Gergi Ayaklı Platform Sistemi, ITI Enerji Dubası, OC3 (Offshore Code Comparison Collaboration) Hywind Safralı Platform Sistemi ve WindFloat Yarı Batık Platform Sistemleri incelenmiştir. Böylece 5 MW'lık referans bir açık deniz rüzgar türbini için farklı platform ve demirleme sistemlerine ait literatür özeti oluşturulmuştur.

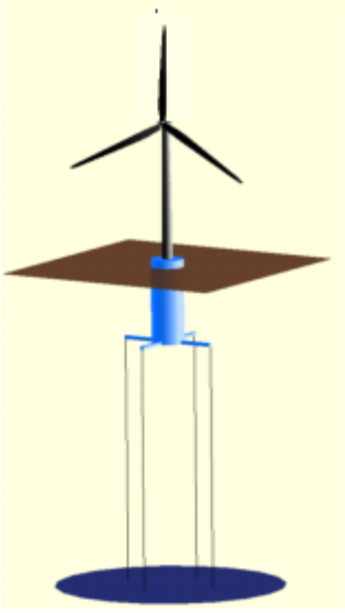
3.1 Gergi Ayaklı Yüzer Açık Deniz Rüzgar Türbini

MIT tarafından geliştirilen ve NREL tarafından optimize edilen 5 MW'lık açık deniz rüzgar türbinini destekleyen tasarıma ait bazı temel özellikler Tablo 3-1'de verilmiştir. Tablo 3-2'de ise UMAINE 5 MW gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri verilmiştir. Tasarımın oluşturulmasında Tracy (2007) tarafından çeşitli yüzer platform sistemlerinin parametrik olarak optimizasyon yürütülmüştür. Daha sonra Matha (2009) tarafından MIT'nin tasarımı farklı açılardan optimize edilmiştir. Tracy'nin (2007) çalışmasında en küçük kareler yöntemiyle deplasman ve toplam halat gerilmeleri dahil olmak üzere bazı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada gergi ayaklı bağlama şeklinin düşük ivmelenme ve ihmal edilebilir dalıp-çıkma, baş-kıç vurma değerlerinden dolayı cazip bir seçenek olduğu ortaya konmuştur.

Matha'ya (2009) göre gergi ayaklı platformların her türlü doğa şartında halatlar üzerinde bir başlangıç gerilmesinin olması zorunludur. Gergi ayaklı platformların stabilitelerini 90 derecelik bir açıyla deniz dibine inen halat sistemiyle sağlaması ön gerilmeyi zorunlu

kılmaktadır. Eğer platform içinde ağırlık merkezini aşağıya çekecek bir ek ağırlık konulmuş ise başlangıç dengesini sağlamak için bir ön gerilmeye gerek kalmayabilmektedir.

Tablo 3-1: MIT/NREL 5 MW gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri (Robertson A N ve Jonkman J M 2011).

	Nitelik	Birim	Değer
	Operasyon derinliği	m	200
	Çap veya uzunlukxgenişlik	m	18
	Su çekimi (draft)	m	47.89
	Deplasman hacmi	m ³	12,180
	Toplam ağırlık (balastlı)	t	8,600
	Sualtı kütle merkezi	m	40.61
	Yalpa ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	571,600
	Baş-kıç vurma ataleti (kütle merkezine)	t.m ²	571,600
	Yunuslama ataleti (kütle merkezine)	t.m ²	361,400
	Halat sayısı	adet	8 (4 çift)
	Gerdirmemiş halat boyu	m	151.7
	Halat çapı	m	0.127
	Birim halat yoğunluğu	kg/m	116
	Halat genişleme direngenliği	kN	1,500,000

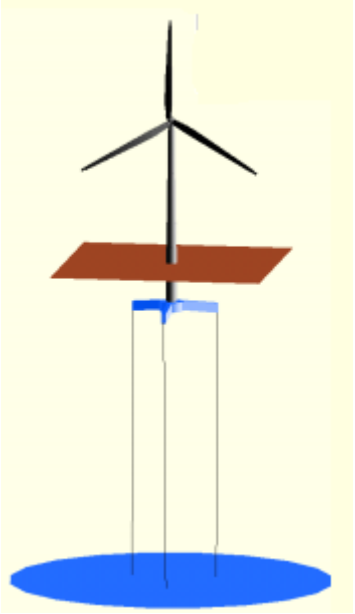
Sclavounos vd. (2007) göre gergi ayaklı platform sistemlerinde statik ve dinamik halat gerilme yüklerinin halat kopma gerilmesi değerini (güvenlik faktörünün normal gerilmenin iki katı alınması) geçmemelidir. Bununla birlikte halatların gevşek konuma gelmesinin aşırı yüklerde kopmalarına neden olabileceğini belirtmişlerdir.

Robertson ve Jonkman'a (2011) göre MIT/NREL gergi ayaklı platform sistemi, ITI Enerji dubasıyla karşılaştırıldığında altı serbestlik derecesinde gerçekleşen tüm platform hareketlerinde daha iyi sonuçlar vermiştir.

Wayman (2006) tarafından yapılan çalışmada gergi ayaklı platform tipinin çalışma performansı açısından ciddi avantajlarının olduğu ancak montaj ve işletim maliyetlerinin ağır

deniz şartlarında diğerlerinden fazla olacağı ortaya konmuştur. Yine Wayman (2006) göre, gergi ayaklı MIT/NREL platformunun montajı ve taşınması esnasında baş-kıç vurma (pitch) açısının 10 derece limiti içinde olması gerektiğini belirtmektedir. Böylece geri çağırıcı kuvvetler ve atalet momentleri denge durumunu sağlayabilmektedir.

Tablo 3-2: UMAINE 5 MW gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri (Robertson A N ve Jonkman J M 2011).

	Nitelik	Birim	Değer
	Operasyon derinliği	m	200
	Çap veya uzunlukxgenişlik	m	6.5 (kolonlar) 15 (tank)
	Su çekimi (draft)	m	24
	Deplasman hacmi	m ³	2,767
	Toplam ağırlık (balastlı)	t	775
	Sualtı kütle merkezi	m	19.72
	Yalpa ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	150,780
	Baş-kıç vurma ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	150,780
	Yunuslama ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	98,850
	Halat sayısı	adet	3
	Gerdirmemiş halat boyu	m	171.4
	Halat çapı	m	0.222
	Birim halat yoğunluğu	kg/m	302.89
	Halat genişleme direngenliği	kN	7,720,000

Farklı boyutlardaki iki gergi ayaklı platform tipi Wayman vd. (2006) tarafından rüzgar hızı, derinlik, dalga yüksekliği, akıntı hızı gibi değişkenler kullanılarak karşılaştırmalı analiz edilmiştir. Analiz sonucunda platform hareketleri farklı dalga yükseklikleri için belirlenmiştir. Sabit rüzgar hızında boyuna ötelemenin en fazla, yanal ötelemenin boyuna ötelemeye göre görece az ve dalıp çıkma hareketinin ise oldukça kısıtlı olduğu gözlenmiştir.

Matha vd. (2009) gergi ayaklı yüzer platform sistemli rüzgar türbinleri için model geliştirilmesi ve tüm sisteme gelen yüklerin analizi üzerine çalışmışlardır. Böylece sisteme

gelen hayati yüklere (sıra dışı dalga, sıra dışı rüzgar gibi) karşı platform, rotor, şaft, nasele gibi elemanların davranışlarını belirlemiştir.

3.2 Safralı (Balast) Tipi Yüzer Açık Deniz Rüzgar Türbini

İlk olarak State Oil firmasının geliştirdiği HyWind safralı tip yüzer açık deniz rüzgar türbini tasarımı NREL tarafından revize edilmiştir. Jonkman'nın (2010) çalışmasında State Oil'in HyWind tasarımı yeniden şekillendirilmiştir. Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) çalışması ekinde Jonkman (2010) tarafından OC3 Hywind olarak yeniden adlandırılmıştır. Revize edilmiş tasarıma ait bazı temel özellikler Tablo 3-3'de verilmiştir.

Tablo 3-3: OC3 HyWind safralı 5 MW yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri (Robertson A N ve Jonkman J M 2011).

	Nitelik	Birim	Değer
	Operasyon derinliği	m	320
	Çap veya uzunlukxgenişlik	m	6.5 to 9.4
	Su çekimi (draft)	m	120
	Deplasman hacmi	m ³	8,029.21
	Toplam ağırlık (balastlı)	t	120
	Sualtı kütle merkezi	m	8,029
	Yalpa ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	7,466
	Baş-kıç vurma ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	89.92
	Yunuslama ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	4,229,000
	Halat sayısı	adet	4,229,000
	Gerdirmemiş halat boyu	m	70
	Halat çapı	m	320
	Birim halat yoğunluğu	kg/m	5.2
	Halat genişleme direngenliği	kN	853.9

Safralı tipteki yüzer platform sistemlerinin silindirik yapıları platform üzerine gelen hidrodinamik yüklerin (Morison Denklemi ile) kolayca bulunmasını sağlamaktadır. Jonkman'a (2010) göre safralı yüzer platforma gelen hidrodinamik yükler ile deniz tabanına

temellendirilmiş silindirik bir yapının üzerine gelen hidrodinamik yükler birbirlerine benzer yükler olarak kabul edilebilir. Bu nedenle kırınım, sönümlene değeri ihmal edilebilmektedir. Hidrodinamik dalıp-çıkma kuvveti bu çalışmada ihmal edilmiştir ve silindirik cisimler için hidrodinamik yunuslama momenti sıfır olarak kabul edilmiştir.

3.3 Duba Tipi Yüzer Açık Deniz Rüzgar Türbini

Duba tipi yüzer platformlar içinde en çok karşımıza çıkan çalışma ITI Enerji dubasıdır. ITI Enerji dubasının tasarımı Glasgow ve Strathclyde üniversitelerinin ITI Enerji firmasıyla yaptıkları anlaşma sonrasında şekillenmiştir. Daha sonra NREL'den Jonkman (2007) tarafından yapılan çalışma neticesinde Tablo 3-4'deki optimize edilmiş değerler elde edilmiştir.

Tablo 3-4: ITI 5 MW duba tipi yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri (Robertson A N ve Jonkman J M 2011).

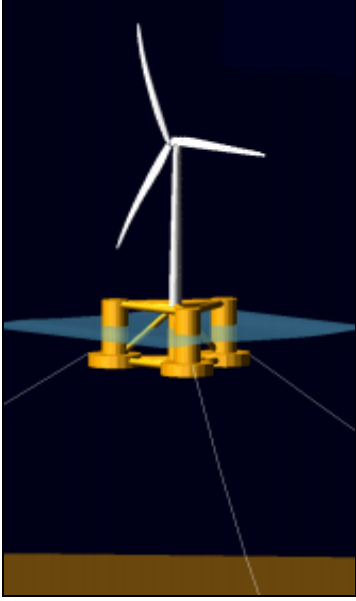
	Nitelik	Birim	Değer
	Operasyon derinliği	m	150
	Çap veya uzunlukxgenişlik	m	40 × 40
	Su çekimi (draft)	m	4
	Deplasman hacmi	m ³	6,000
	Toplam ağırlık (balastlı)	t	5,452
	Sualtı kütle merkezi	m	0.2818
	Yalpa ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	726,900
	Baş-kıç vurma ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	726,900
	Yunuslama ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	1,454,000
	Halat sayısı	adet	8
	Gerdirmemiş halat boyu	m	473.3
	Halat çapı	m	0.0809
	Birim halat yoğunluğu	kg/m	130.4
	Halat genişleme direngenliği	kN	589,000

Duba tipi platformların dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa hareketlerinde stabilitelerini sağlamaları geniş su hatlarından ve doğrultucu (geri getirici-restoring) momentleriyle sağlanmaktadır. Özellikle sığ sularda düşük su çekimi değerleri nedeniyle tercih edilmesi mümkündür. İçerisine eklenebilecek tanklar ile istenilen su çekimi değerine kolayca ulaşılabilir. Bununla birlikte merkeze yakın noktalara yerleştirilebilecek bir kanal aracılığıyla dalga enerjisinden de faydalanmak mümkün olabilir (Matha 2009). Duba tipi yapıların inşaa kolaylığı maliyetler açısından bir avantaj olarak görülebilir.

3.4 Yarı Batık Yüzer Açık Deniz Rüzgar Türbini

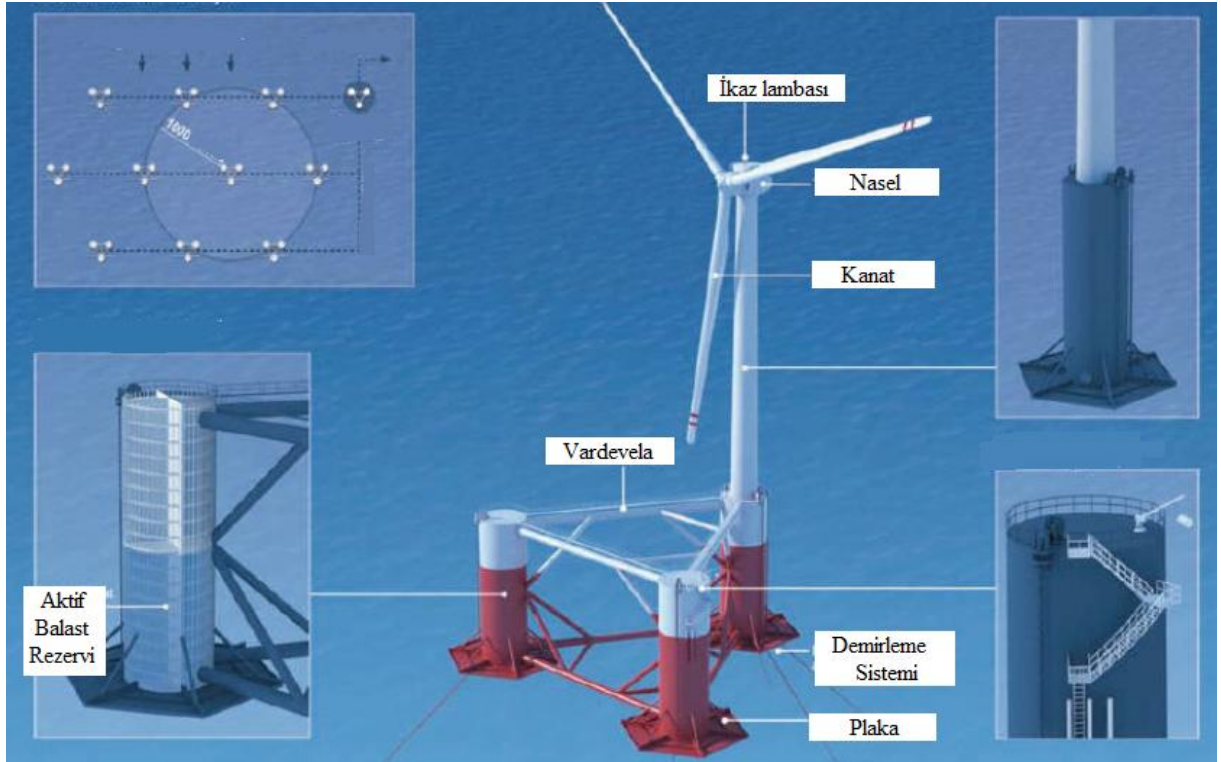
Yarı batık sistemler diğer sistemlerden uyarlanmış hibrit sistemler olarak düşünülebilir. Literatürde karşımıza çıkan UMaine 5 MW yarı batık yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbini tasarımı Maine üniversitesi için NREL tarafından DeepCwind projesi kapsamında geliştirilmiştir. Tablo 3-5 Umaine 5 MW yarı batık platform sistemine ait özellikleri göstermektedir.

Tablo 3-5: UMAINE 5 MW yarı batık yüzer açık deniz rüzgar türbini platform özellikleri (Robertson A N ve Jonkman J M 2011).

	Nitelik	Birim	Değer
	Operasyon derinliği	m	200
	Çap veya uzunlukxgenişlik	m	50 (kolonlar arası) 6.5 (ana kolon çapı)
	Su çekimi (draft)	m	20
	Deplasman hacmi	m ³	13,990
	Toplam ağırlık (balastlı)	t	13,547
	Sualtı kütle merkezi	m	13.74
	Yalpa ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	9,139,000
	Baş-kıç vurma ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	9,139,000
	Yunuslama ataleti (kütle merkezine göre)	t.m ²	16,170,000
	Halat sayısı	adet	3
	Gerdirilmemiş halat boyu	m	835.4
	Halat çapı	m	0.0766
	Birim halat yoğunluğu	kg/m	113.4
	Halat genişleme direngenliği	kN	753,600

Üç ana kolondan oluşan tasarımda her kolona bir katener (zincir) halat bağlanmıştır. UMaine 5 MW yarı batık platform sistemi ağırlığı ve boyutları açısından neredeyse duba tipi sistemle eşittir. Bu da yapının stabilitesini duba tipi platform sistemiyle benzer şekilde geniş su hattı alanıyla sağladığını göstermektedir. Ancak yarı batık platform sistemi tasarımı su çekimi konusunda duba tipi platform sistemiyle ciddi şekilde ayrılmıştır. Yarı batık platform sistemlerinin derin su çekimi (draft) değeri ve balast kabiliyetinin daha iyi olması duba tipi platforma göre daha iyi stabilite değerleri sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda yarı batık platform sisteminin altı serbestlik derecesindeki hareketlerinin safralı (balast) tipi yüzer platformlara çok benzediği ortaya konmuştur. Bu hareketlerden dalıp-çıkma hareketi safralı tipteki yüzer platformlara göre daha fazla ve baş-kıç vurma hareketi ise daha az bulunmuştur (Robertson ve Jonkman 2011).

Literatürde sıkça karşımıza çıkan diğer bir çalışma ise tam ölçekli testleri yapılmakta olan WindFloat yarı batık açık deniz rüzgar türbini sistemidir. WindFloat sisteminde diğer yarı batık platform sistemlerine göre bazı yenilikler bulunmaktadır. Özellikle hidrodinamik ve stabilite karakterlerinin iyileştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.1: WindFloat (URL-5, 2013)

Şekil 3.1’de gösterilen WindFloat yarı batık yüzer açık deniz rüzgar türbini sisteminde önerilen tasarım ve yöntemler,

- Üç ana kolon üzerinde yayılmış su hattı ile türbin destek alanı ve kararlı stabilitenin sağlanması,
- Her bir kolona yerleştirilmiş yatay plakalar sayesinde 1) artırılmış ek su kütlesi, 2) baş-kıç vurma, dalıp-çıkma ve yalpa hareketlerinde artırılmış viskoz sönümleme,
- Yatay plakaların yapının hareketi sırasında ek hidrodinamik atalet sağlaması,
- Sütunlar (kolonlar) arasındaki balast transfer sistemi sayesinde rüzgar türbinine farklı yön ve hızlarda gelen yüklerin dengelenmesi ve yapının stabilitesinin kolayca sağlanması

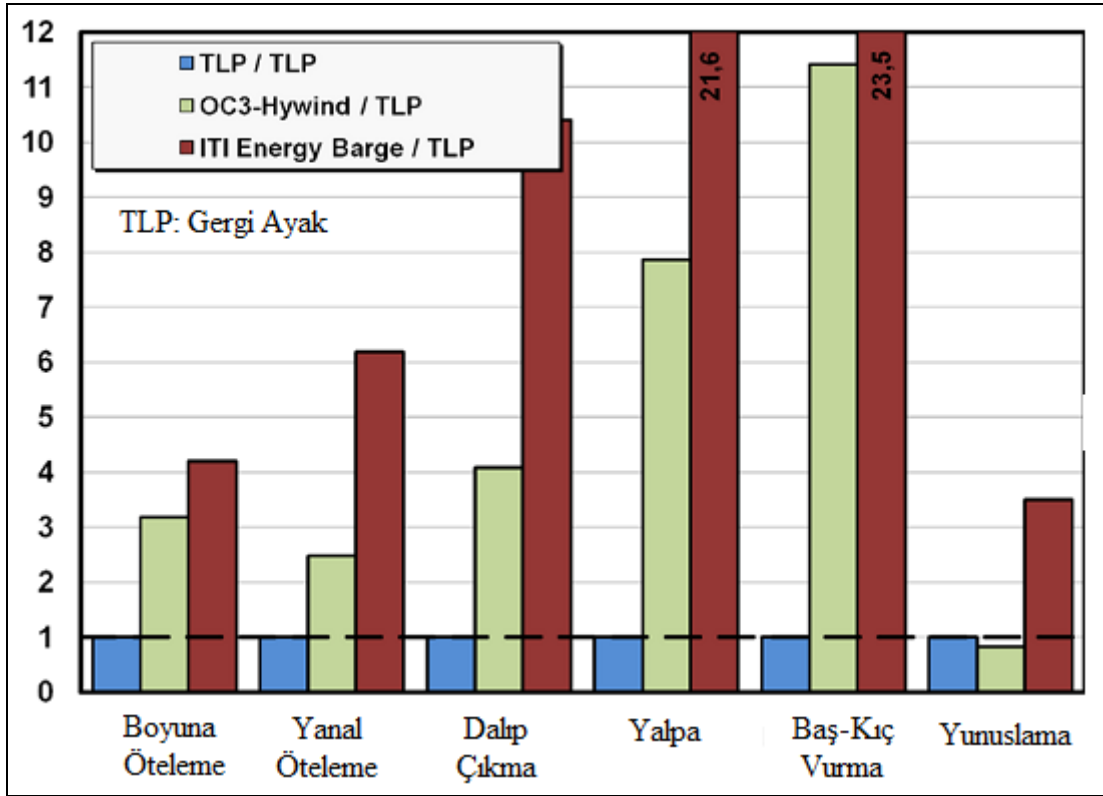
şeklinde sıralanabilir (Roddier vd. 2010).

3.5 Değerlendirmeler

Literatür taramasında yüzer açık deniz rüzgar türbini platformu tasarımında dört ana tasarım şekline rastlanmıştır. Bunlar: 1) gergi ayaklı platform, 2) safralı platform, 3) duba(barç) tipi platform ve 4) yarı batık platform şekilleridir.

- Gergi ayaklı platform tipinin tüm stabilite ve hidrostatik kriterler göz önüne alındığında diğer tiplerden avantajlı olduğu açıkça ortaya konuştur.
- Yüzer platform sistemli rüzgar türbini konseptleri içinde rüzgar türbinine gelen yükler açısından yapılan değerlendirmelerde kara tabanlı rüzgar türbinlerine en yakın sonuçlar gergi ayaklı platform tipinde elde edilmiştir (Matha 2009). Bu nedenle türbininin dengede çalışması ve yorulma yükleri açısından en avantajlı sistem olarak gergi ayaklı sistem görülmektedir.

Şekil 3.2 gergi ayaklı platform referans alındığında, bu sisteminin balast tipi ve duba tipi platformlara göre 6 serbestlik derecesindeki hareketlerdeki üstünlüğü göstermektedir (Matha 2009). Bununla birlikte gergi ayaklı platform sistemin halatlarındaki başlangıç gerilmesi ve oluşacak dinamik gerilmelerin diğer tiplere göre fazla olacağı değerlendirilmektedir.



Şekil 3.2: OC3-Hywind balast platform ve ITI Energy duba platform sistemlerinin MIT gergi ayaklı platform sistemine göre (TLP) altı serbestlik derecesinde hareket oranları (Matha 2009)

- Literatürdeki ITI Enerji duba, WindFloat yarı batık, OC3 Hywind balast ve MIT/NREL gergi ayaklı platform tiplerinin kararlı stabilitelemlerini sağlamaları konusunda farklı yöntemlerden faydalandıkları belirlenmiştir. ITI Enerji dubası ve WindFloat sistemlerinde geniş su hattı alanlarının, OC3 Hywind’de sisteminde ağırlık merkezini aşağıya çeken balastın ve gergi ayaklı sistemde ise demirleme (halat ve demir) sistemlerinin etkili olduğu değerlendirilmektedir.
- Duba tipi platformların derinliğin az olduğu kesimlerde konumlandırılabilmesi ancak yapının büyük yer kaplamasından dolayı çevreci olmadığı, görüntü ve ses kirliliğine yol açabileceği değerlendirilmektedir. Bunlara ek olarak büyük hacim nedeniyle maruz kalacağı dalga, rüzgar ve akıntı gibi dış etkenler nedeniyle platform hareketlerinin fazla olacağı düşünülmektedir. Geniş su hattı alanın rüzgar türbinine gelen kuvvetleri absorbe edebileceği ve baş-kıç vurma hareketini kısıtlayabileceği değerlendirilmektedir.

- İnşa kolaylığı açısından duba tipi ve silindirik basit yapıların avantaj sağladığı görülmektedir. Demirleme sistemlerinde ise katener (zincir) sistemin diğer tiplere (özel kablolar, fiber vb.) uygun maliyetli olduğu belirlenmiştir.
- Balast tipi platformların diğer platform tiplerine göre daha büyük su çekimi ve derinliğe ihtiyaç duymaları montaj ve bakım-tutum açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Gergi ayaklı platformların halat sistemindeki özel kablolar yerine diğer platformların ucuz ve kolay monte edilebilir katener demirleme sistemini kullanmaları bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Balast tipi platformların silindirik yapıda olmaları, düşük kesit alanına sahip olmalarını sağlamakta, bu da sürüklenme kuvvetine daha az maruz kalmalarını sağlamaktadır. Matha'ya (2009) göre balast tipi platformlar duba tipi sisteme göre daha az, gergi ayaklı sisteme göre ise daha fazla baş-kıç vurma ve yalpa hareketi gerçekleştirmektedir.

Tüm bu değerlendirmeler neticesinde gergi ayaklı platform sisteminin birçok açıdan diğer platform tiplerine göre avantajlar içerdiği ancak sadece maliyetler açısından dezavantajlı olduğu anlaşılmıştır. Maliyet faktörü göz önüne alındığında ise yarı batık platform sistemleri tam ölçekli modeller için göz önünde bulundurulabilecek bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada maliyet faktörü göz önünde bulundurulmamış olup sadece bilgi amaçlı değerlendirmelere yer verilmiştir.

BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

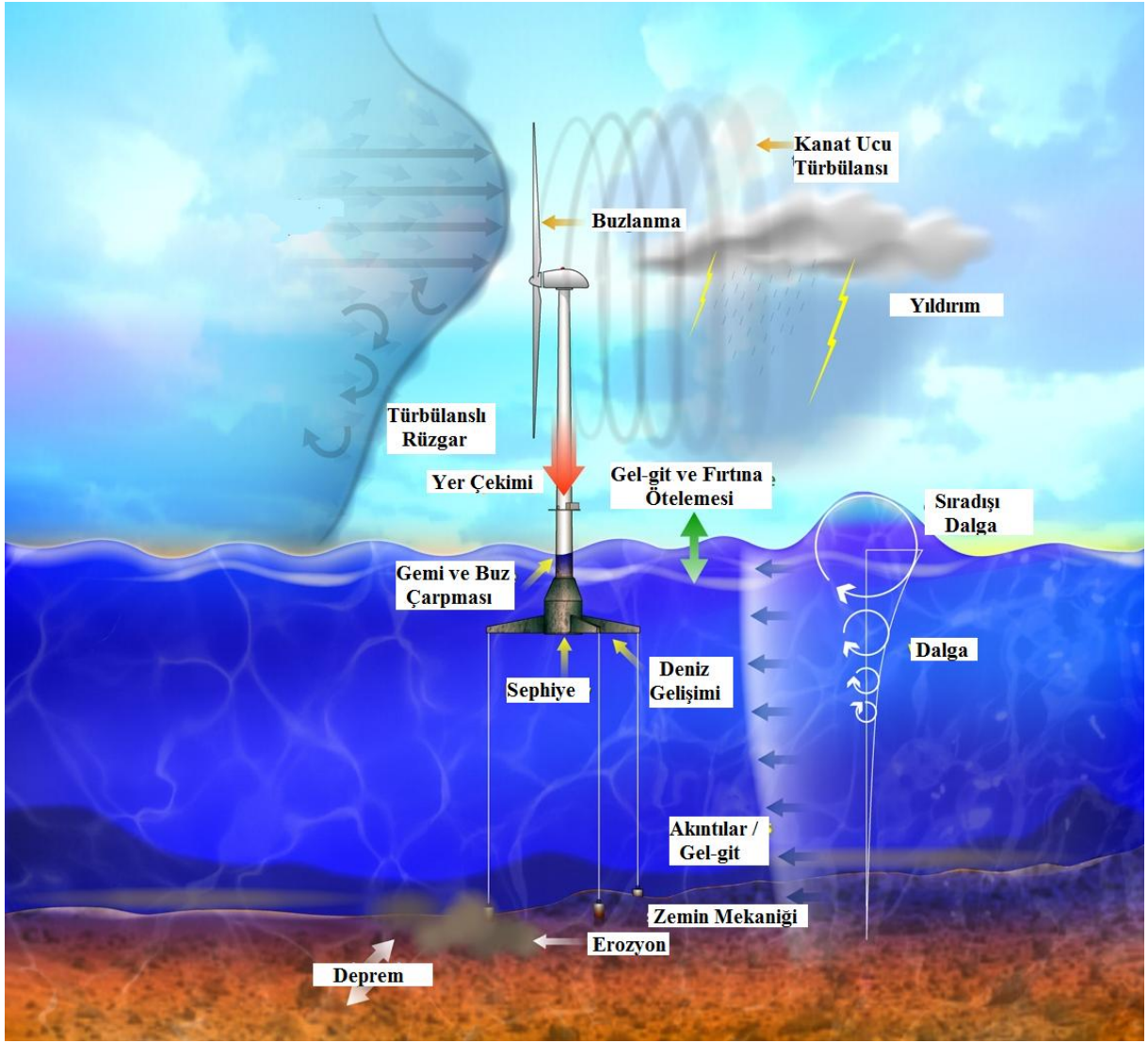
Açık deniz yapıları bugüne kadar kendilerine daha çok petrol endüstrisinde uygulama alanı bulmuşlardır. Kıyıdan başlayıp günümüz teknolojiyle 2000 m derinliklere kadar ulaşabilen petrol sondaj platformları işlevlerini başarı ile sürdürmektedirler. Bununla birlikte yeni uygulamalar için de fikir vermektedirler. Bu yeni uygulama alanlarından biri de açık deniz rüzgar türbinleridir. Açık denizler birçok konuda insanoğluna cömert olmalarının yanında bazı zorlukları da beraberinde getirmektedirler. Açık denizlerin sert hava şartları verimli rüzgarları oluştururken beraberinde de şiddetli dalgaları oluşturmaktadır. Bu sert doğa şartları içinde açık denizlerde inşa edilecek her türden yapıya azami önem gösterilmesini gerektirmektedir.

4.1 Yüzer Platform Sistemli Açık Deniz Rüzgar Türbini Tasarımı

Yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbinlerinin tasarımı birçok açıdan ele alınması gereken karmaşık bir yapıdır. Bu karmaşık yapı en temel ve basit yöntemle

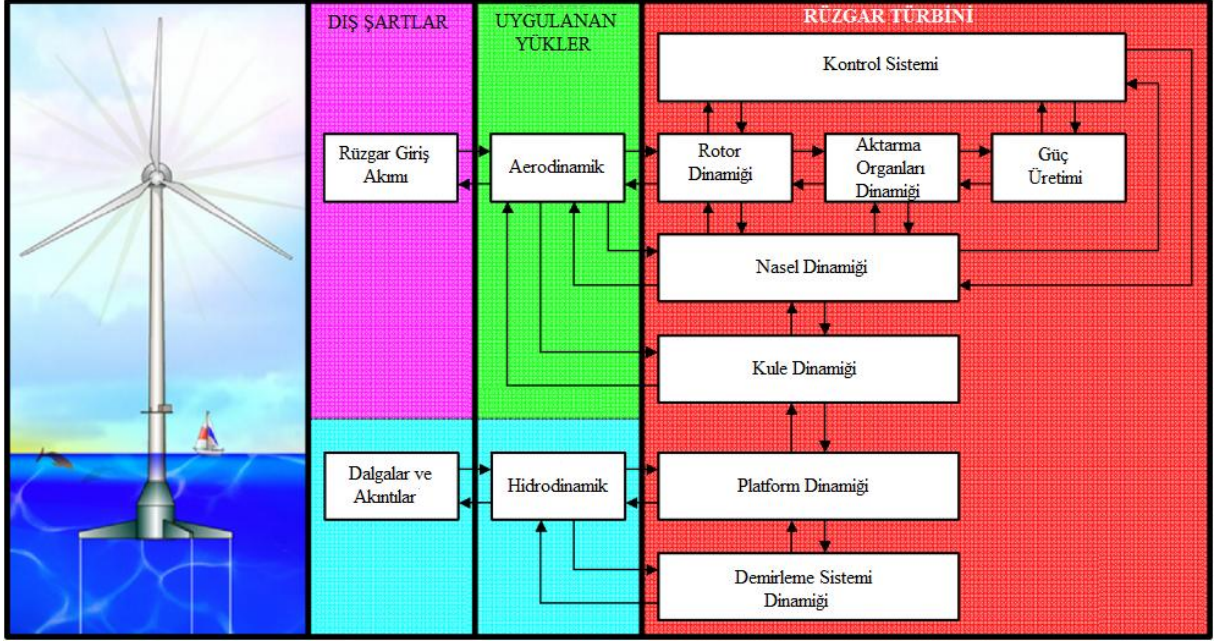
1. Su altı tasarımı
2. Su üstü tasarımı

olmak üzere ikiye ayrılabilir.



Şekil 4.1: Bir yüzer açık deniz rüzgar türbini için sualtı ve su üstü şartlar (Jonkman 2009).

Bir yüzer açık deniz rüzgar türbinini bütünüyle tasarlayabilmek için su ve hava gibi iki farklı akışkanın özelliklerini ve davranışlarını iyi bilmek gerekmektedir. Şekil 4.1’de gösterildiği üzere bir yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbininin sualtı ve su üstü yapısı çok farklı dış etkilere maruz kalmaktadır. Şekil 4.2 ise tüm sistem için incelenmesi gerekli yükleri şematize etmektedir.



Şekil 4.2: Bir yüzer açık deniz rüzgar türbini için tasarım ve analiz şartları (Jonkman 2007).

4.1.1 Su Üstü Tasarım (Rüzgar Türbini)

Açık deniz alanlarında kullanılan rüzgar türbinlerinin kapasiteleri gün geçtikçe artmaktadır. Denizel alanlardan elde edilen rüzgar gücünün karadakine oranla oldukça fazla olması ve özellikle büyük kapasitedeki açık deniz rüzgar türbinlerin kurulumlarının karadakilere göre göreceli olarak bazı kolaylıklar sağlaması, bu türbinlerin kapasitelerinin 5-6 MW'lar seviyesinde olmalarını sağlamaktadır. Bundan dolayı bugüne kadar yapılan çalışmalar özellikle 5 MW'lık açık deniz rüzgar türbini modellerinin gelişmesini sağlamıştır. Bu çalışmada yeni bir rüzgar türbini tasarımı yapılmamış olup NREL'in tasarladığı ve birçok akademik çalışmada referans türbin olarak kullanılan 5 MW'lık bir açık deniz rüzgar türbini kullanılmıştır. Bu türbine ait karakteristik değerler Tablo 4-1'de verilmiştir.

Tablo 4-1: NREL 5MW referans rüzgar türbini özellikleri (Fulton vd. 2007; Jonkman vd. 2009)

Nitelik	Birim	Değer
Maksimum elektrik gücü	kW	5000
Kanat çapı	m	126
Kanat oryantasyonu	-	Rüzgara karşı
Kanat sayısı	-	3
Dişli göbeği çapı	m	3
Dişli göbeği yüksekliği (su seviyesinden)	m	90
Kule yüksekliği	m	87.6
Maksimum güçteki rotor hızı	rpm	12.1
Tepe noktasında kule boyutları	mm	Çelik tüp Ø3870x25
Deniz seviyesinde kule boyutları	mm	Çelik tüp Ø6000x35
Kontrol sistemi	-	Kollektif hatve kontrolü, değişken hız
Bir kanadın ağırlığı	kg	17,728
Dişli göbeği ağırlığı	kg	56,780
Nasel ve dişli kutusu ağırlığı	kg	240,000
Kule ağırlığı	kg	347,460
Rotor ağırlığı	kg	110,000
Toplam türbin ağırlığı	kg	697,460
Devreye girdiği rüzgar hızı	m/s	3
Nominal çalışma rüzgar hızı	m/s	11.4
Devreden çıktığı rüzgar hızı	m/s	25
Maksimum kanat ucu hızı	m/s	80
Şaft eğimi	°	5

4.1.2 Su Altı Tasarım (Yüzer Platform Sistemi)

4.1.2.1 Dizayn Şartları ve Gereklilikleri

Bir tasarım için tasarım şartları tasarımı şekillendiren temel olgulardan biridir. Tasarımda bazı dış etkileri şekillendirmemiz söz konusu olamamaktadır. Örneğin, rüzgar hızı, dalga yüksekliği gibi değişkenler tasarımcının değiştirebileceği unsurlar değildir. Buradan hareketle tasarım şartlarını belirlemek en uygun tasarıma ulaşma konusunda yol gösterici olacaktır. 5 MW'lık referans rüzgar türbini ile akuple çalışacak yüzer platform sistemi için tasarım şartları; dalgalar, akıntılar, su seviyesi, gel-git, buzullar, deniz gelişimi, sephiye, su altı erozyonu, deniz tabanı zemin durumu ve deprem gibi etkilerdir. Bunlardan bazıları için uzun süreli toplanan istatistiki veriler tasarımı şekillendirmektedir. Sualtı tasarım için belirlenen ve sabit kabul edilen ortam şartları Tablo 4-2 'deki gibi belirlenmiştir.

Tablo 4-2: Sualtı tasarım için sabit kabul edilen ortam şartları

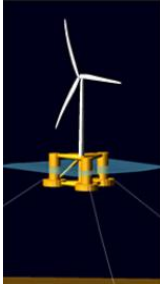
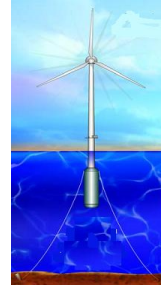
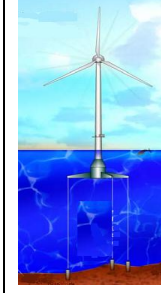
Nitelik	Birim	Değer
Akıntı Hızı	m/s	1
Rüzgar Hızı (90 m'de)	m/s	11
Sıcaklık	°C	10
Deniz Suyu Yoğunluğu	t/m ³	1,025
Hava Yoğunluğu	t/m ³	0,0013
Derinlik	m	100
Dalga ve akıntı yönü	+x yönünden -x yönüne doğru	

Açık deniz rüzgar türbinleri karadaki uygulamalar ile karşılaştırıldıklarında çevresel etkilerden dolayı birçok farklılığa sahiptirler. Her ne kadar kara ve deniz rüzgar türbinleri görünüş olarak birbirlerine benzeseler de bulundukları ortama teknik açıdan uyum sağlayabilmeleri için bazı modifikasyonlara uğramaktadırlar. Açık deniz rüzgar türbinleri için naselin deniz şartlarından korunması, navigasyon açısından gövdenin daha parlak renkte boyanması, servis kreyinleri konulması, korozyon etkilerine karşı önlem alınması gibi bazı ek gereksinimler ortaya çıkmaktadır (Kurian ve Ganapathy 2010).

4.1.2.2 Yüzer Platform Tipinin Belirlenmesi

Yüzer platform tipinin belirlenmesinde kullanılabilecek farklı kıstaslar Tablo 4-3’de değerlendirilmiştir.

Tablo 4-3: Yüzer platform tiplerinin tasarım faktörleri açısından değerlendirilmesi (Buuterfield vd. 2007)

Yüzer Platformların Sistemlerinin Değerlendirilmesi Gereken Teknik Zorlukları	Yüzer Platform Sistemlerinin Sınıflandırılması			
	Duba (Barç) Tipi	Yarı Batık Tipi	Safralı (Balast) Tipi	Gergi Ayak Tipi
   				
+ (artı): Bağıl avantaj				
- (eksi): Bağıl dezavantaj				
Tasarım araçları ve yöntemleri	-	-	-	+
Sepiye tankı maliyeti ve karmaşıklığı	-	-	-	+
Halat maliyeti ve karmaşıklığı	+	+	+	-
Demir maliyeti ve karmaşıklığı	+	+	+	-
Montaj kolaylığı ve maliyeti	+	+	-	-
Karadaki inşa kolaylığı	+	+	+	-
Devreden çıkarma ve bakım	+	+	+	-
Korozyona karşı direnç	-	-	+	+
Derinlikten bağımsızlık	+	-	-	-
Zemin şartlarına bağlılık/hassasiyet	+	+	+	-
Minimum kapladığı alan	-	-	-	+
Dalgalara karşı hassasiyet	-	+	+	+
Türbinin toplam ağırlığını taşıma	+	+	-	-
Kule zirvesindeki hareket	-	-	-	+
Rüzgar türbininin stabilite kontrolü	-	-	-	+
Maksimum meyil açısı	-	-	-	+

Uygun modelleme araçları ve yöntemleri kullanmak türbin ve yüzer platform yapılarının akuple olarak analiz çalışmalarını kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla seçilecek tasarım araç ve yöntemlerinin bu analizleri gerçekleştirebilecek kapasitede olması gerekmektedir. Diğer bir deyişle yüzer platform tipi belirlenirken tasarım araç ve yöntemlerinin bu platform tipini ne kadar başarılı bir şekilde tasarlayıp analiz edebileceği tartışılmalıdır.

Açık deniz rüzgar türbinlerinin analizinde öteleme ve rotasyonel hareketlerin yanı sıra demirleme sistemlerinin dinamik davranışları seçilecek platform tipinin dinamik hareketleri kısıtlanmış bir tipte olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda gergi ayaklı platformların (TLP) hareketlerinin kısıtlanmış olması ve dinamik yüklerinin kontrol altında tutulabilmesi açısından bağıl avantajı olduğu gözükmemektedir. Gergi ayaklı platformlarda sephiye tankları nispeten küçük ve maliyetleri diğer platform tiplerine göre daha uygun olabilmektedir. Gergi ayaklı platformlardaki sephiye tankları demirleme sistemlerinden gelebilecek yükleri karşılayabilmek için karmaşık bir inşa yapısına sahip olabilmektedirler.

Tüm platform tipleri yüzebilmeleri için sephiyeye ihtiyaç duymaktadırlar. Duba tipli bir yüzer platform sistemi basit üretim teknikleri ve imalat aşamalarından dolayı diğer tiplerden üstün durumdadır. Üretimdeki kolaylık haliyle düşük üretim maliyetini de sağlamaktadır.

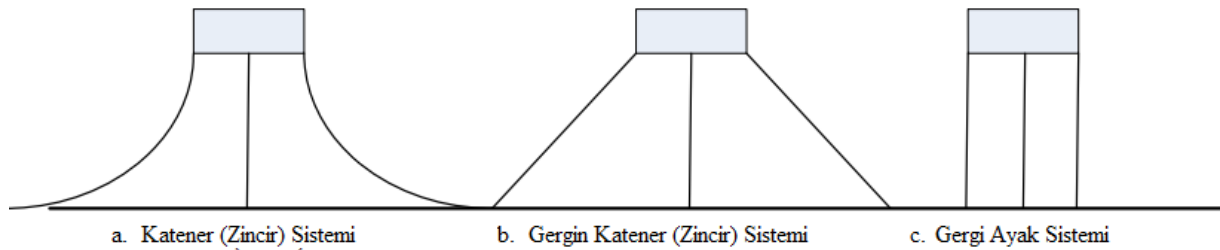
Halat sistemlerinin maliyetleri su derinliği ve uzunlukları ile doğrudan ilintilidir. Bu nedenle zincirli sistemler kullanılan yüzer platform yapılarının demirleme maliyetleri bazen fazla olabilmektedir. Birim maliyetler açısından değerlendirildiğinde ise katener (zincir) sistemleri diğer sistemlere göre uygun maliyetlidir. Gergi ayaklı sistemde ise çelik veya özel yapım kablolar ile doğrudan düşey olarak deniz tabanına veya deniz tabanındaki kazıklara bağlanmaktadır. Deniz tabanına olan mesafenin azalması maliyetleri az da olsa düşürmektedir. Ancak bunun yanında gergi ayaklı platform sistemlerinde sephiye tankları ile demirleme sistemi arasında sürekli gergin olması gereken kabloların kullanılması sistemi bazen karmaşık ve maliyetli kılmaktadır. Gergi ayaklı platform sistemlerinde halatların deniz tabanında kapladığı alanın minimum seviyede olması ve aynı alanın diğer platform tiplerine göre daha etkin kullanılması gergi ayaklı platformlardan oluşan bir enerji santrali fikrini desteklemektedir.

Literatür araştırmasında ve bu bölümde bahsi geçen tüm nedenlerden dolayı yüzer platform sisteminin silindirik yapıda ve gergi ayaklı olmasına karar verilmiştir.

4.1.2.3 Demirleme Sisteminin Belirlenmesi

Bir açık deniz yapısı için demirleme sistemi rüzgar, dalga ve akıntı etkileri altında yapının sabit kalabilmesi açısından oldukça önemlidir. Yüzer sistemli açık deniz yapılarında bağlama ve demirleme sistemi deniz suyuna ve gerilmelere dayanıklı özel halatlar (kablolar) ve demirden (çıpa) meydana gelir. Demir deniz tabanına tutunarak yapının hareketini engeller. Doğa şartlarında platformun sabit kalabilmesi için halatlar üzerine binen yük ve halatların elastisiteleri oldukça önemlidir. Şekil 4.3’de demirleme sistemleri gösterilmektedir.

Yüzer platform sisteminin gergi ayaklı platform sistemi seçilmesi durumunda demirleme sistemi de gergi ayak olarak belirlenmiş olmaktadır. Yüzer yapıya da genel adını veren gergi ayak demirleme sistemi stabilite kriterleri açısından karadaki türbinlere en yakın çalışma verimini sağlayan sistemdir. Bu çalışmada literatürdeki bu veriyi doğrulamak için aynı yüzer yapı kullanılarak gevşek katener (zincir) sistemi -gergi ayaklı yüzer platform sistemi dışındaki sistemlerde kullanılan sistem- ile gergi ayak sisteminin altı serbestlik derecesindeki hareketleri karşılaştırmalı olarak incelenmek istenmiştir.



Şekil 4.3: Demirleme sistemleri (Fulton vd. 2007)

Sonuç olarak son kavram tasarımıda kullanılacak demirleme sistemi gergi ayak olarak belirlenmiştir.

4.1.2.4 Kavram Dizaynının Oluşturulması

Literatür araştırması, tasarım şartları ve gereklilikleri göz önünde bulundurularak Tablo 4-4 ve Tablo 4-5 verilen özelliklerde bir yüzer platform ve demirleme sistemi oluşturulmuştur. Yüzer platform sistemi dalga yüklerinden fazla etkilenmemesi için silindirik yapıda

tasarlanmıştır. Literatürdeki araştırmalar neticesinde yapının boyutları çok büyük seçilmemiş ancak daha verimli stabilite değerleri ve halatlara daha az yük bindirmek için yapının zemininden itibaren 8.65 m'ye kadar betonla doldurulmuştur. Böylece safralı (balast) tipi platformlarda olduğu gibi yapının ağırlık merkezi aşağıya çekilmiştir.

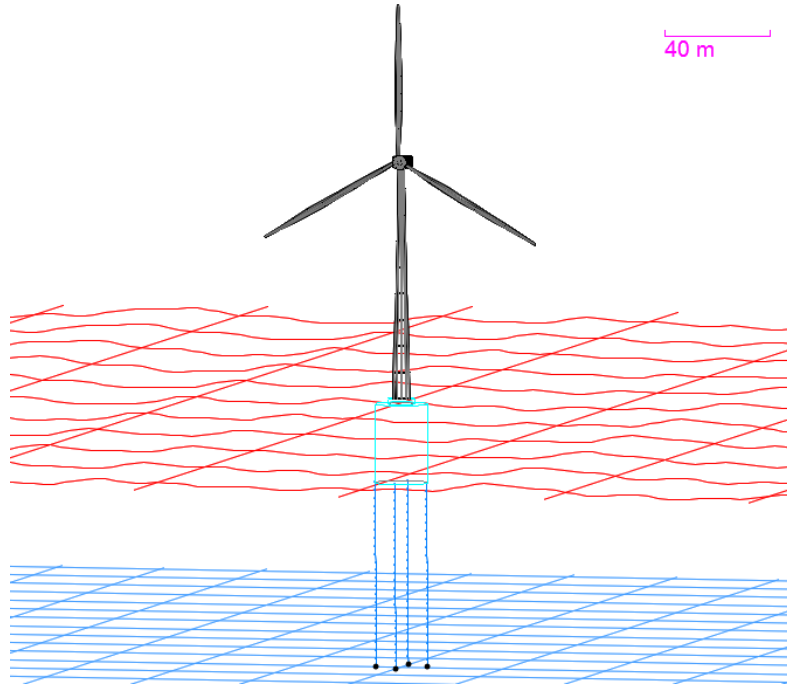
Tablo 4-4: Yüzer platforma ait özellikler

Nitelik	Birim	Değer
Platform çapı	m	20
Platform su çekimi (draftı)	m	30
Su derinliği	m	100
Platformun çelik ağırlığı	t	805
Beton kütlesi	t	7700
Beton yüksekliği	m	8.65
Toplam deplasman	t	9424
Platformun ağırlık merkezi	m	(0,0,-25)

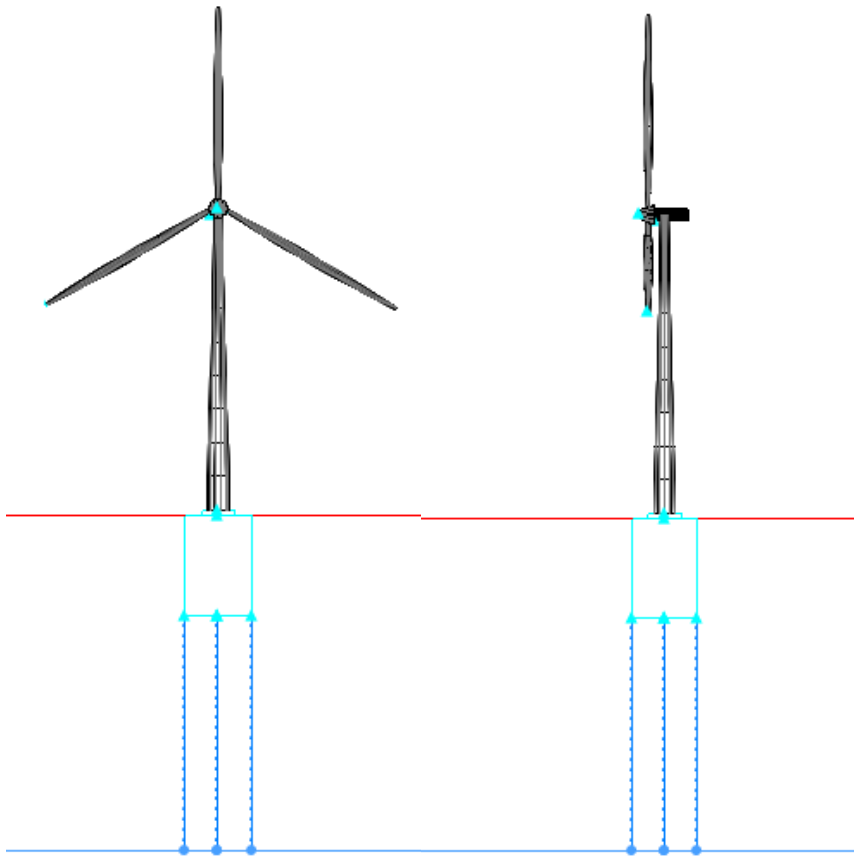
Tablo 4-5: Bağlama sisteminde kullanılan halat nitelikleri

Nitelik	Birim	Değer
Halat dışı çapı	m	0.350
Halat iç çapı	m	0.250
Birim halat ağırlığı	t/m	0.180
Eğilme esnekliği	kN.m ²	120.0
Halat sayısı	adet	4

Şekil 4.4 oluşturulan kavram tasarımının farklı açılardan görüşlerini içermektedir. Gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımı perspektif görünüşü Şekil 4.5’de, katener halat sistemli yüzer açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımı perspektif görünüşü Şekil 4.6’da verilmiştir.



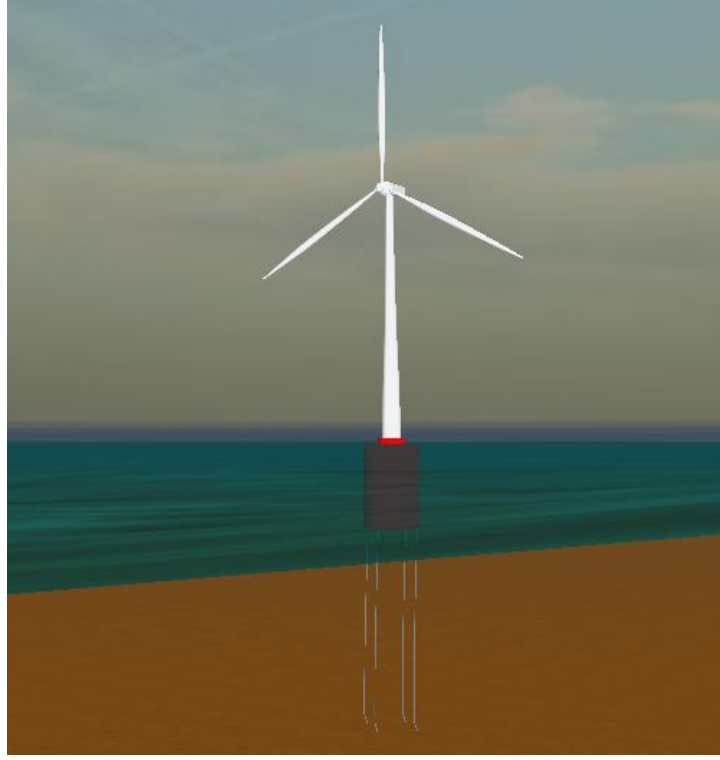
a. Perspektif görünüş



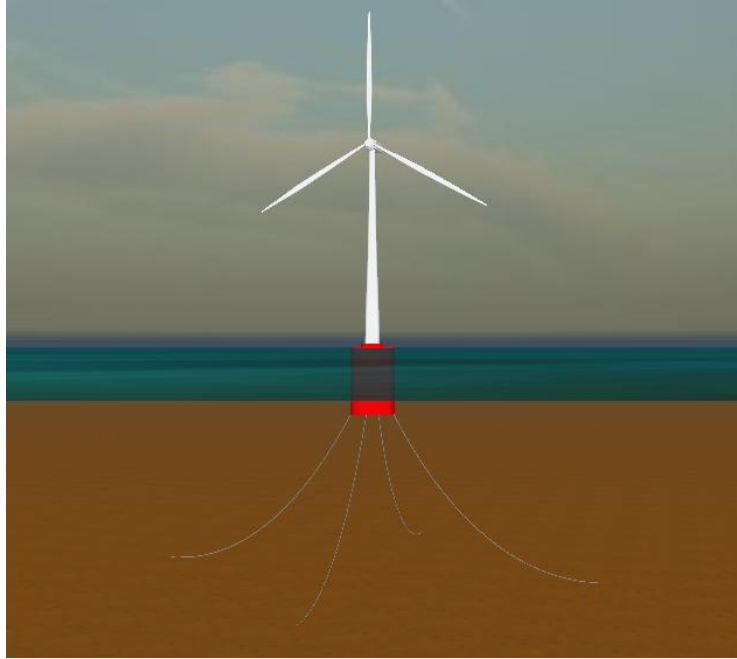
b. Önden görünüş

c. Profil görünüş

Şekil 4.4: Kavram tasarımın farklı açılardan görünüşleri



Şekil 4.5: Gergi ayaklı yüzer açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımı perspektif görünüşü



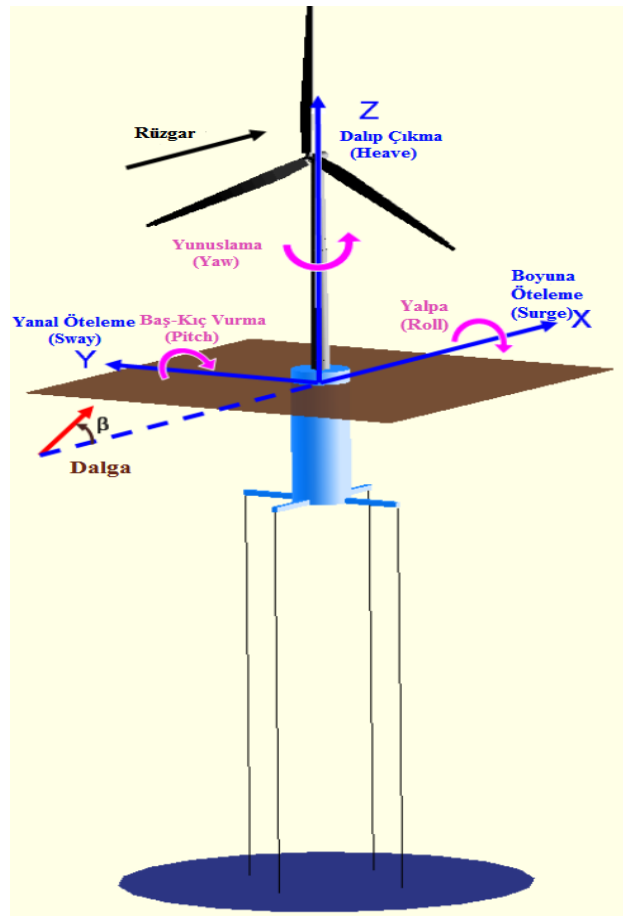
Şekil 4.6: Katener halat sistemli yüzer açık deniz rüzgar türbini kavramsal tasarımı perspektif görünüşü

4.2 Hidrodinamik Analiz için Matematiksel Model ve Formülasyon

Deniz üzerinde yüzen bir cisim 6 serbestlik derecesi içinde hareket eder. Bu hareketler;

1. Boyuna Öteleme (Surge)
2. Yanal Öteleme (Sway)
3. Dalıp-Çıkma (Heave)
4. Yalpa (Roll)
5. Baş-Kıç Vurma (Pitch)
6. Yunuslama (Yaw)

Benzer şekilde yüzer platform sistemli bir açık deniz yapısı da Şekil 4.7’de gösterildiği gibi bu hareketleri gerçekleştirme yeteneğine sahiptir. Bu da yapılan analizlerin ne kadar karmaşık bir hal alabileceğinin bir göstergesidir.



Şekil 4.7 Bir açık deniz rüzgar türbini üzerinde serbestlik derecelerinin gösterimi (Matha 2010)

Bu bölümde rüzgar ve dalga etkisi altında yüzer açık deniz rüzgar türbinlerinin matematiksel model ve formülasyonu verilmiştir. Yüzer rüzgar türbinlerinde genelleştirilmiş atalet kuvvetleri kule, nasel, platform ve kanatlar üzerinde etkili olmaktadır. Genelleştirilmiş aktif kuvvetler ise aerodinamik, hidrodinamik, yerçekimi, dişli kutusuna etkiyen kuvvetler ve elastik kuvvetler olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.2.1 Hareket Denklemi

Yüzer platform sistemli rüzgar türbinleri için lineer olmayan hareket denklemi

$$M_{ij}(q,u,t)\ddot{q}_j = f_i(q,\dot{q},u,t) \quad (4.1)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem 4.1’de M_{ij} kütle atalet matrisini, q serbestlik derecesini, $\dot{q}$ serbestlik derecesinin zamana bağlı birinci türevini, u kontrol veri setini, t zamanı ve $\ddot{q}$ ise serbestlik derecesinin zamana bağlı ikinci türevini göstermektedir. Kütle atalet matrisi

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_{B,g} & -my_{B,g} \\ 0 & m & 0 & -mz_{B,g} & 0 & mx_{B,g} \\ 0 & 0 & m & my_{B,g} & -mx_{B,g} & 0 \\ 0 & -mz_{B,g} & my_{B,g} & (I_{xx}^B) & -I_{yx}^B & -I_{zx}^B \\ mz_{B,g} & 0 & -mx_{B,g} & -I_{xy}^B & (I_{zz}^B) & -I_{yz}^B \\ -my_{B,g} & mx_{B,g} & 0 & -I_{xz}^B & -I_{yz}^B & (I_{zz}^B) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir (Bağbancı 2011).

4.2.2 Genelleştirilmiş Atalet Kuvvetleri

Genelleştirilmiş atalet kuvvetleri

$$F_r^* = F_r^*|_{Göbek} + F_r^*|_{Nasel} + F_r^*|_{Kule} + F_r^*|_{Platform} + F_r^*|_{Kanatlar} \quad (4.3)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 4.3’de F_r^* genelleştirilmiş atalet kuvvetlerini göstermektedir (Bağbancı 2011).

4.2.3 Genelleştirilmiş Aktif Kuvvetler

Genelleştirilmiş aktif kuvvetler

$$F_r = F_r \Big|_{Aero} + F_r \Big|_{Hidro} + F_r \Big|_{Yerçekimi} + F_r \Big|_{Elastik} + F_r \Big|_{Dişışlıkutu} + F_r \Big|_{Demirleme} \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 4.4’de F_r genelleştirilmiş aktif kuvvetleri göstermektedir (Bağbancı 2011).

4.2.4 Platform Hidrodinamiği

Deniz ortamında bulunan cisimlere etkiyen hidrodinamik yükler değerlendirirken ek su kütlesi göz önünde bulundurulması gereken önemli bir yüküdür. Bu nedenle platform gövdesine gelen hidrodinamik yükler

$$F_r^{Platform} = A_{ij} \ddot{q}_{ij} + F_r^{Hidro} + F_r^{Demirleme} \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 4.5’de A_{ij} ek su kütlesi matrisinin (i, j) bileşenlerini, $F_r^{Platform}$ platforma gelen toplam hidrodinamik yük miktarını, F_r^{Hidro} platforma gelen hidrodinamik yükleri, $F_r^{Demirleme}$ ise demirleme sistemindeki tüm halatlara gelen yükleri temsil etmektedir (Bağbancı 2011).

4.2.5 Demirleme Sistemi Hidrodinamiği

Bir yüzer platform sistemi için en önemli nokta platformu kararlı denge durumunda tutabilmektir. Bu nedenle yüzer platformlar için demirleme sistemleri hayati öneme sahiptirler. Değişik türleri bulunan demirleme sistemlerindeki halatlar katener (zincir), çelik, fiber veya özel kablolar (halatlar) şeklinde olabilmektedirler. Platforma demirleme sistemindeki halatlardan dolayı binen toplam yük miktarı

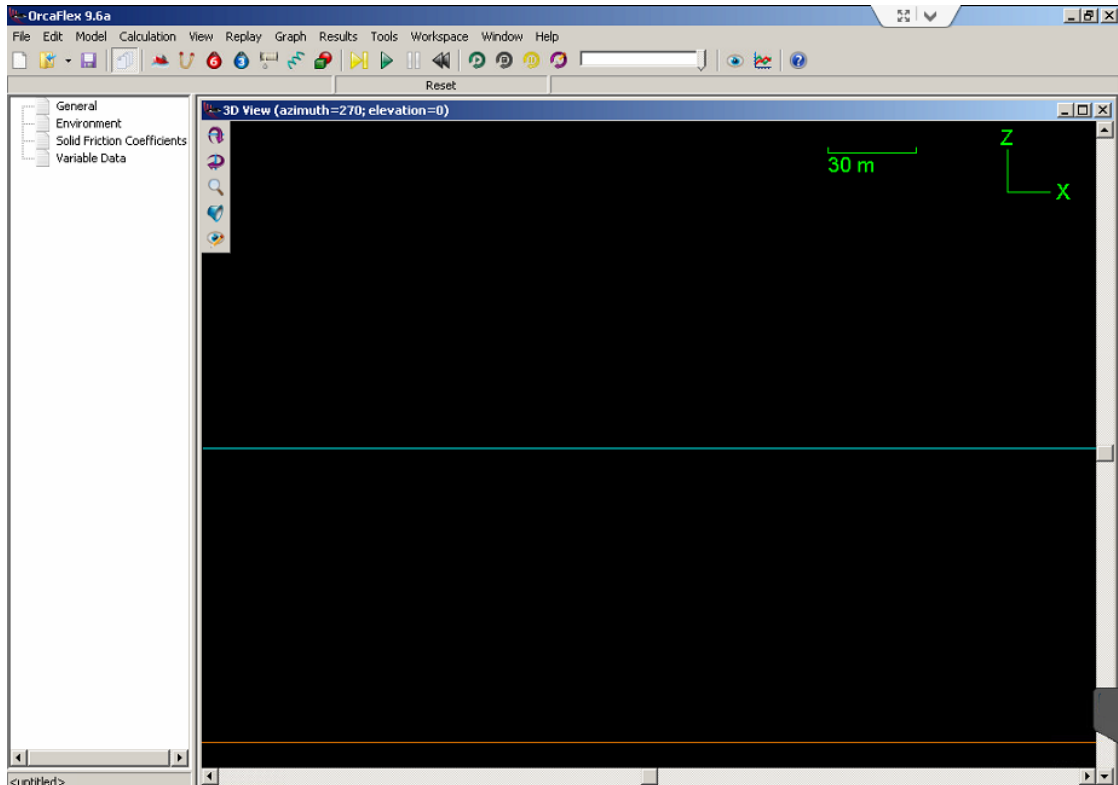
$$F_r^{Halatlar} = F_r^{Halatlar,0} + c_{ij}^{Halatlar} q_j \quad (4.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem 4.6’da $F_r^{Halatlar}$ platformu deniz dibine sabitleyen tüm halatlardan gelen yükü, $F_r^{Halatlar,0}$ halatların ağırlıklarından dolayı oluşturdukları ön gerilmeyi, $c_{ij}^{Halatlar}$ halatlardaki elastik esnekliği, q_j ise j ’inci serbestlik derecesini ifade etmektedir (Bağbancı 2011).

4.3 Analizler için Kullanılan Bilgisayar Programı

Bu çalışmada gerçekleştirilen yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbinine ait demirleme sisteminin hidrodinamik analizi için Orcina™ firmasına ait Orcaflex® (9.6a sürümü) yazılımı kullanılmıştır. Orcaflex® programına platform ve rüzgar türbinine ait hidrostatik veriler tanımlandıktan sonra farklı dalga yüksekliklerine ait veri girişleri yapıp simülasyonlar zaman esası olarak tamamlanmıştır. Orcaflex® programı ara yüzü Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

Şekil 4.8: Orcaflex® yazılımı ara yüzü



BÖLÜM 5

ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmanın bütününde amaçlanan açık deniz rüzgar türbinleri için yüzer platform sistemi tasarımı ve demirleme sisteminin sabit rüzgar ve akıntı hızında, farklı dalga yüksekliklerinde hidrodinamik analizini gerçekleştirmektir. Bu kapsamda Bölüm 4’de yüzer platform ve demirleme sistemi belirlenmiş ve tasarlanmıştır. Bu bölümde ise tasarlanan yapının bütünü -yüzer platform, demirleme sistemi ve rüzgar türbini akuple halde- Orcaflex® programında hidrodinamik açıdan incelenmiştir.

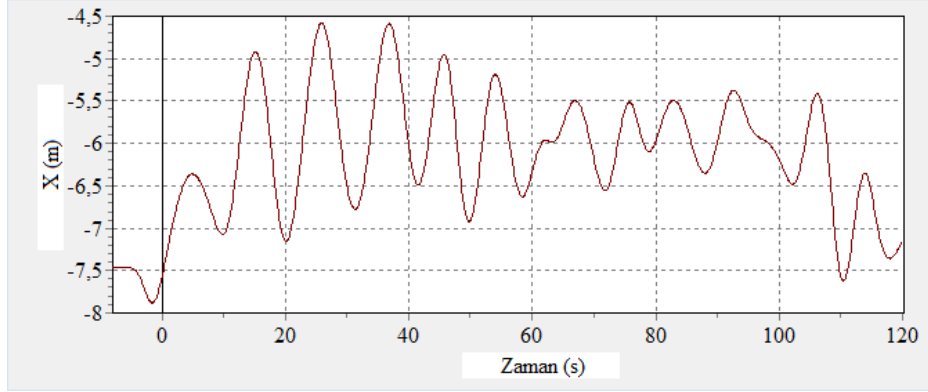
İlk olarak aynı dalga yüksekliğinde (6m) gevşek katener sistem ile gergi ayaklı demirleme sistemi zaman esaslı olarak analiz edilmiştir. Daha sonra kavram tasarımı belirlendiği şekilde gergi ayaklı platformun analizleri zaman esaslı olarak yapılmıştır. Analizlerdeki ana değişken parametre olarak dalga yüksekliği belirlenmiştir. Farklı (4m, 6m ve 10m) dalga yüksekliklerinde sabit rüzgar ve akıntı hızında gergi ayaklı yüzer platform sistemine gelen yükler ve hareket miktarları incelenmiştir. Analizler Tablo 4-2’de verilen ve sabit kabul edilen çevre şartlarına göre gerçekleştirilmiştir.

5.1 Gevşek Katener ve Gergi Ayaklı Demirleme Sisteminin Karşılaştırmalı Platform Hareketleri Analizi (Dalga Yüksekliği: 6m)

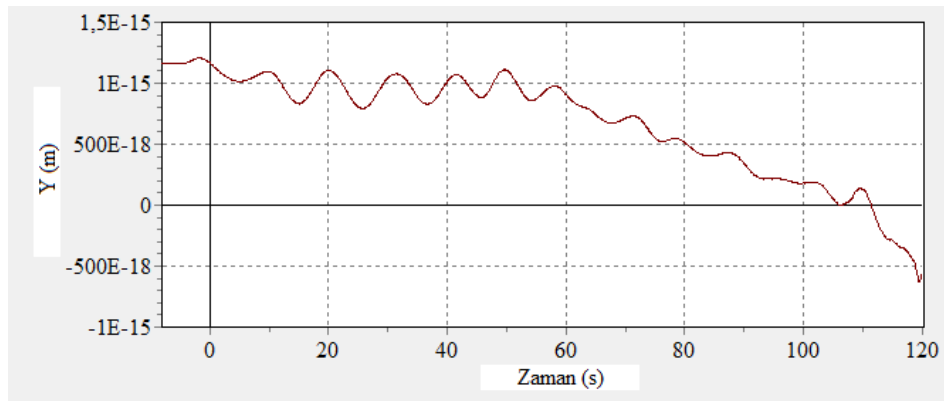
Gevşek katener (zincir) sistem ile gergi ayaklı demirleme sistemi aynı model üzerinde kullanılmıştır. İki sistemde de dört adet halat kullanılmıştır. Katener sisteme özgü olan halatların açıları analiz programında uygun şekilde verilmiştir. Halatların platforma bağlı oldukları noktalar aynı seçilmiştir. Böylece iki demirleme sisteminin davranışları demirleme sistemi farklılığı dışında aynı şartlarda karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de iki sisteme ait global eksenlerdeki x, y ve z yönlerindeki hareket miktarları gösterilmiştir. Burada en dikkat çekici nokta gergi ayaklı sistemde z eksenindeki

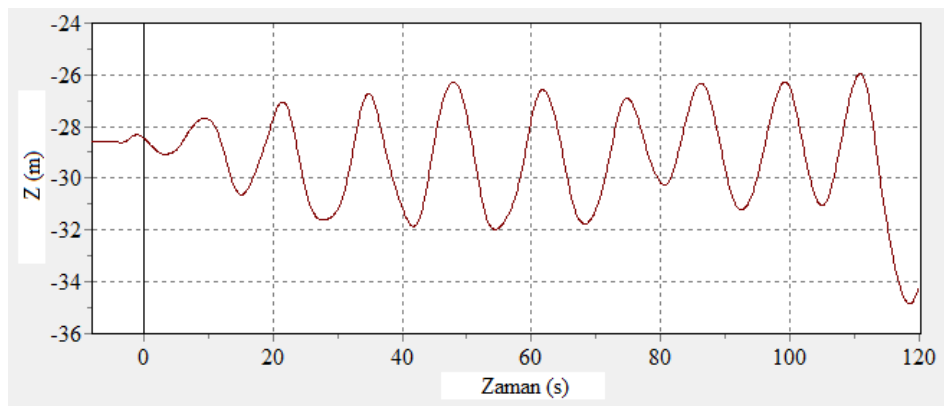
hareketlerin gevşek katener sisteme göre oldukça az olmasıdır. Akıntı, rüzgar ve dalga yönünün x eksenine doğrultusunda olması hareketlerin bu ekseninde daha fazla gerçekleşmesine neden olmaktadır.



a. x eksenindeki hareket

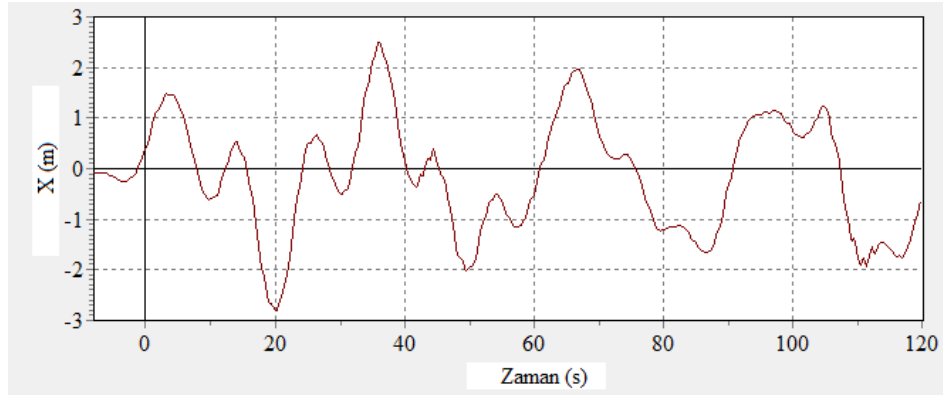


b. y eksenindeki hareket

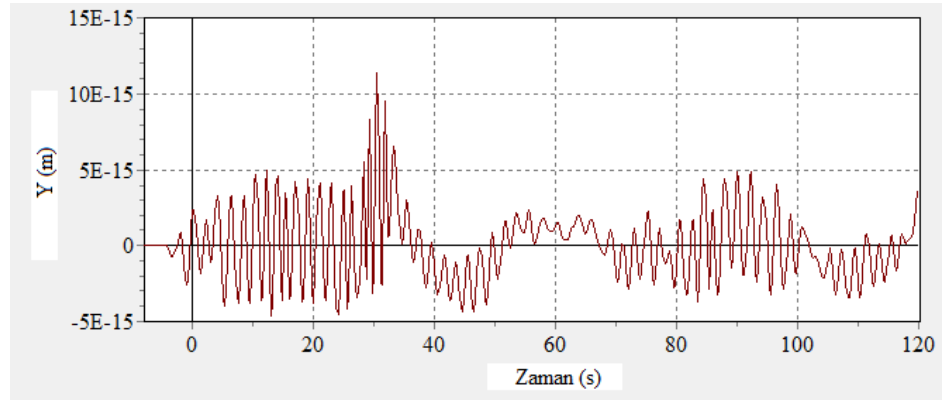


c. z eksenindeki hareket

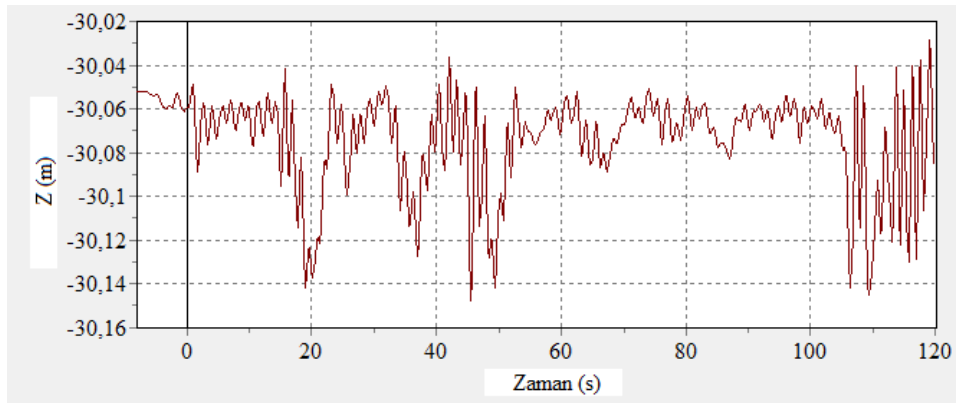
Şekil 5.1: Gevşek katener (zincir) demirleme sistemi kullanılan platformun hareket miktarları.



a. x eksenindeki hareket



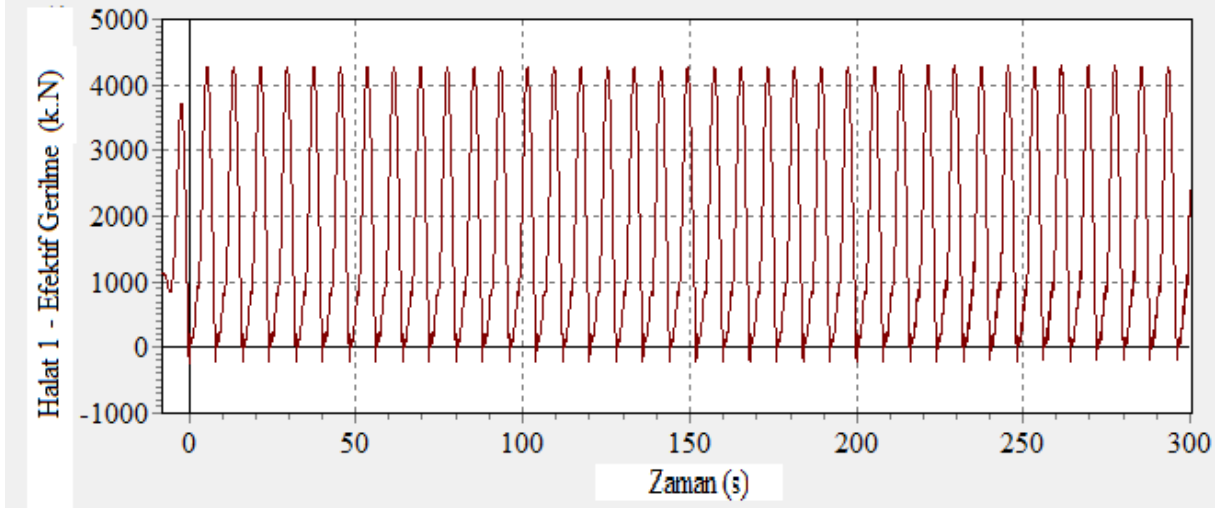
b. y eksenindeki hareket



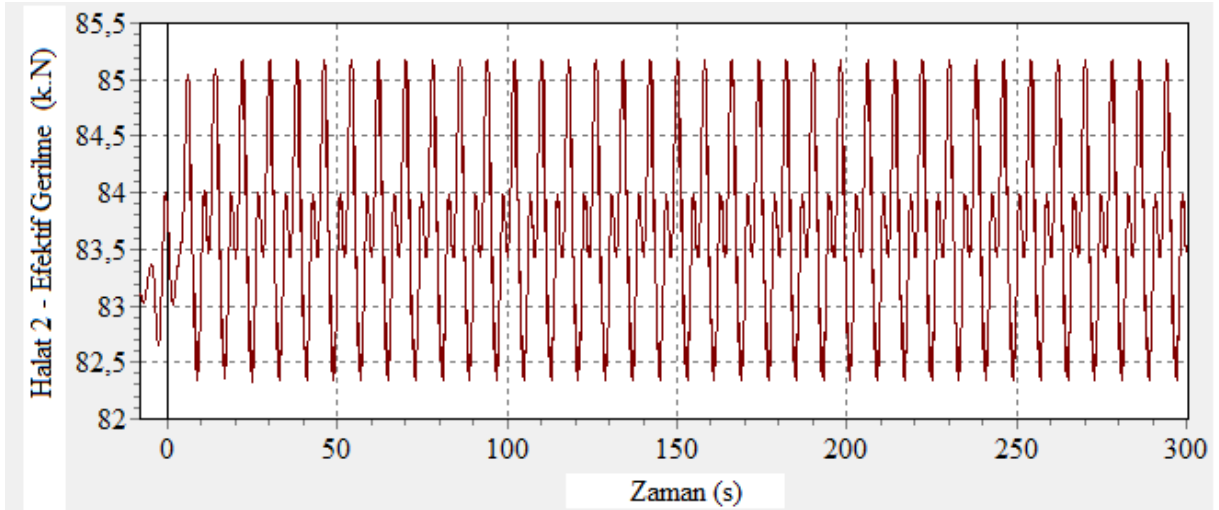
c. z eksenindeki hareket

Şekil 5.2: Gergi ayaklı demirleme sistemi kullanılan platformun hareket miktarları.

5.2 Gevşek Katener ve Gergi Ayaklı Demirleme Sisteminin Zamana Dayalı Karşılaştırmalı Efektif Gerilme Analizi (Dalga Yüksekliği: 6m)

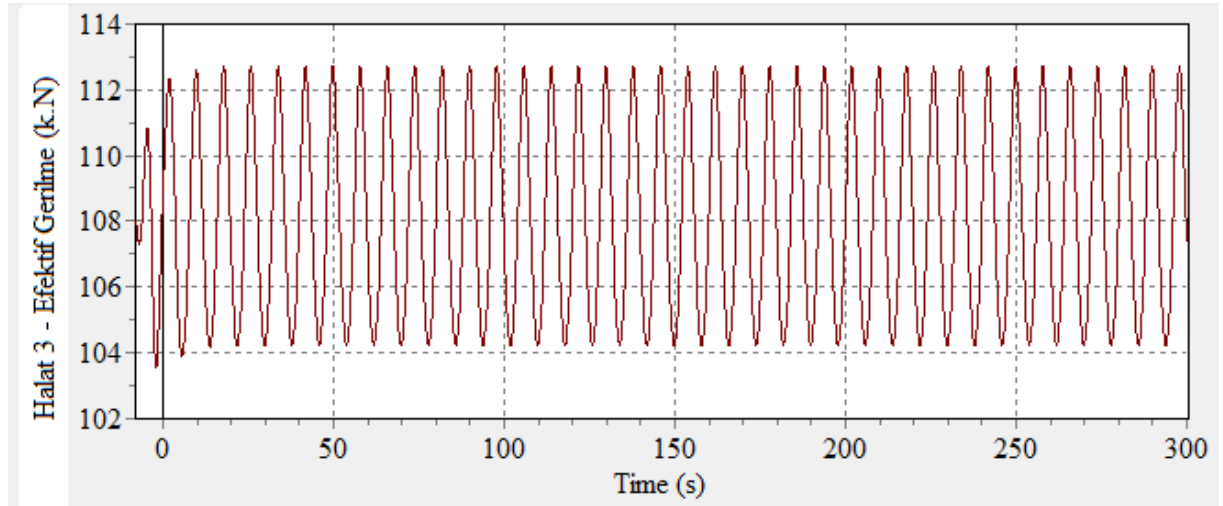


a. Halat 1 (+x yönü)

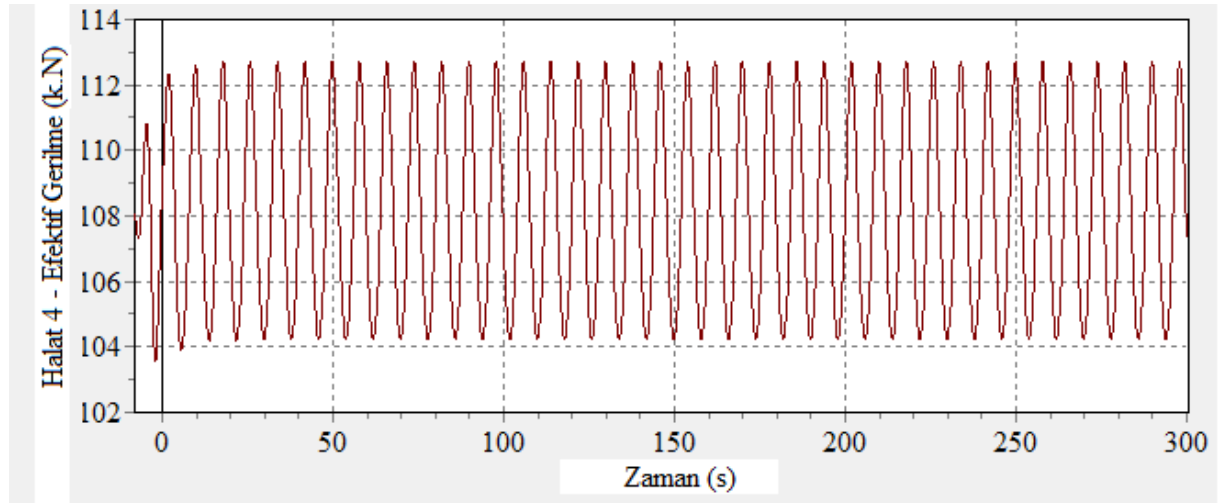


b. Halat 2 (-x yönü)

Şekil 5.3: Gevşek katener demirleme sistemi kullanılan platformun x eksenı boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler

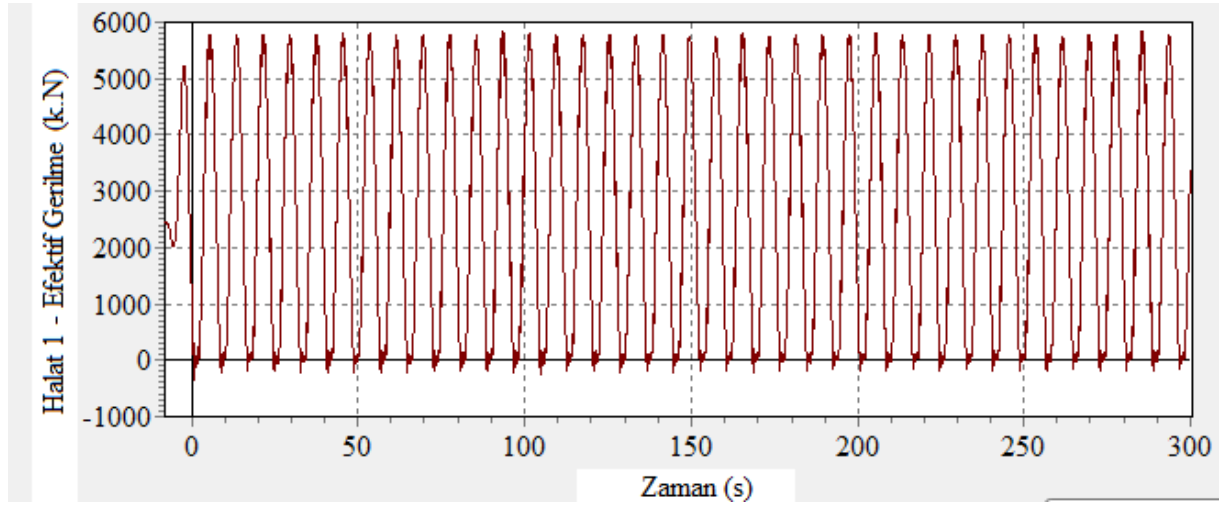


a. Halat 3 (+ y yönü)

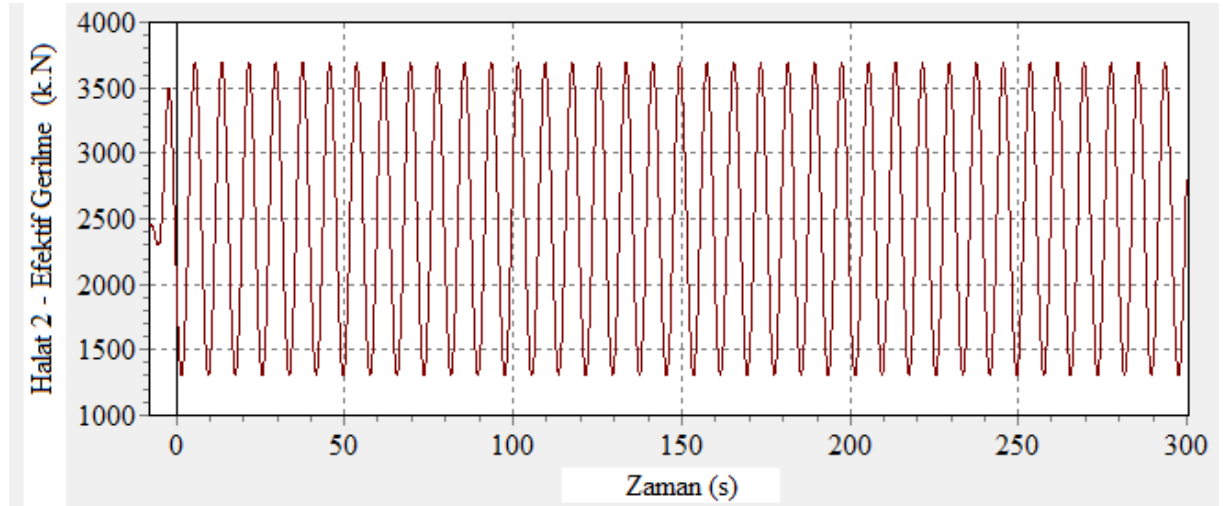


a. Halat 4 (- y yönü)

Şekil 5.4: Gevşek katener demirleme sistemi kullanılan platformun y ekseni boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler

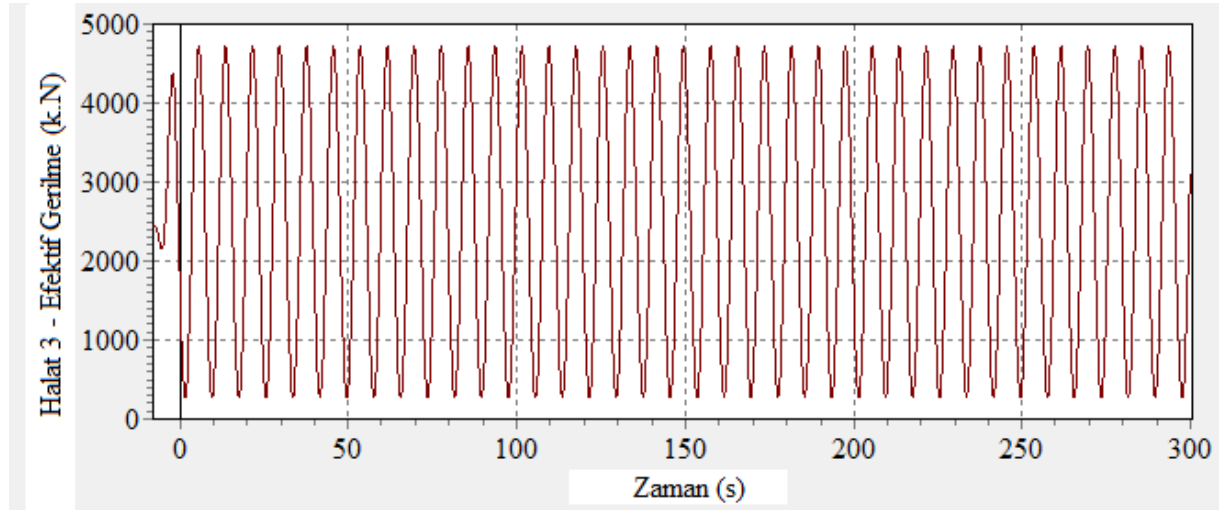


a. Halat 1 (+x yönü)

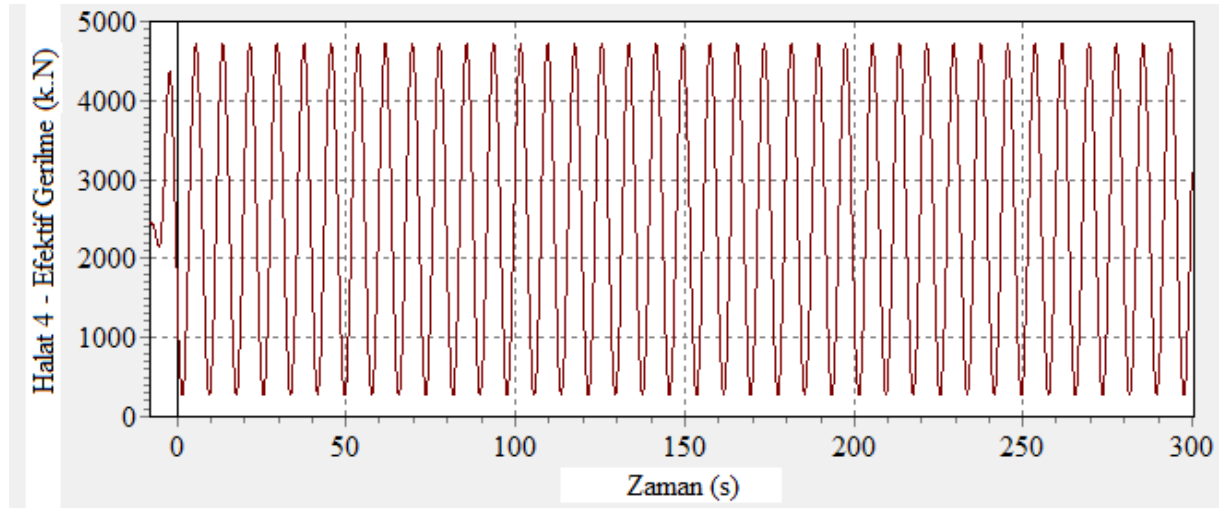


b. Halat 2 (-x yönü)

Şekil 5.5: Gergi ayaklı demirleme sistemi kullanılan platformun x eksenı boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler



a. Halat 3 (+ y yönü)

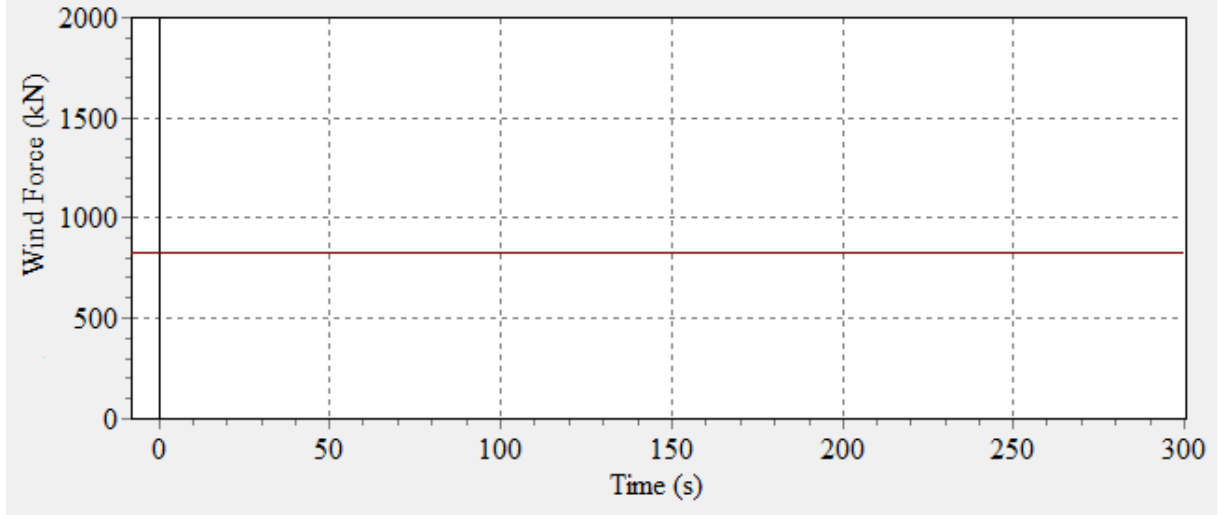


a. Halat 4 (- y yönü)

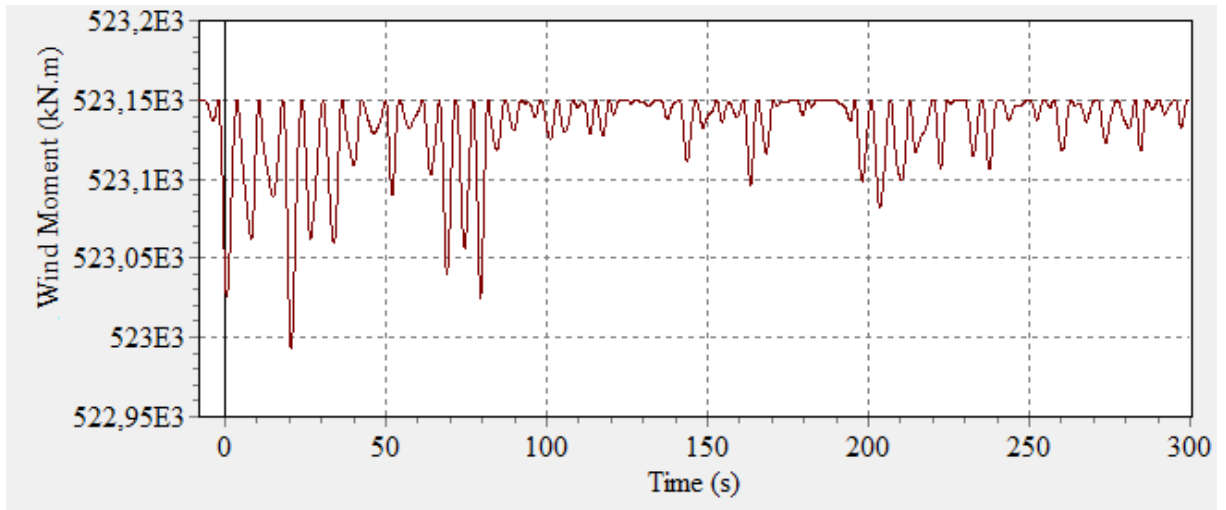
Şekil 5.6: Gergi ayaklı demirleme sistemi kullanılan platformun y eksenı boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler

5.3 Gergi Ayaklı Yüzer Platform Sistemi Hidrodinamik Analiz Sonuçları

5.3.1 Tüm Sisteme Etki Eden Rüzgar Gücü (Wind Force) ve Rüzgar Momentinin (Wind Moment) Zamana (Time) Dayalı Analizi (Yükseklik: 90m)

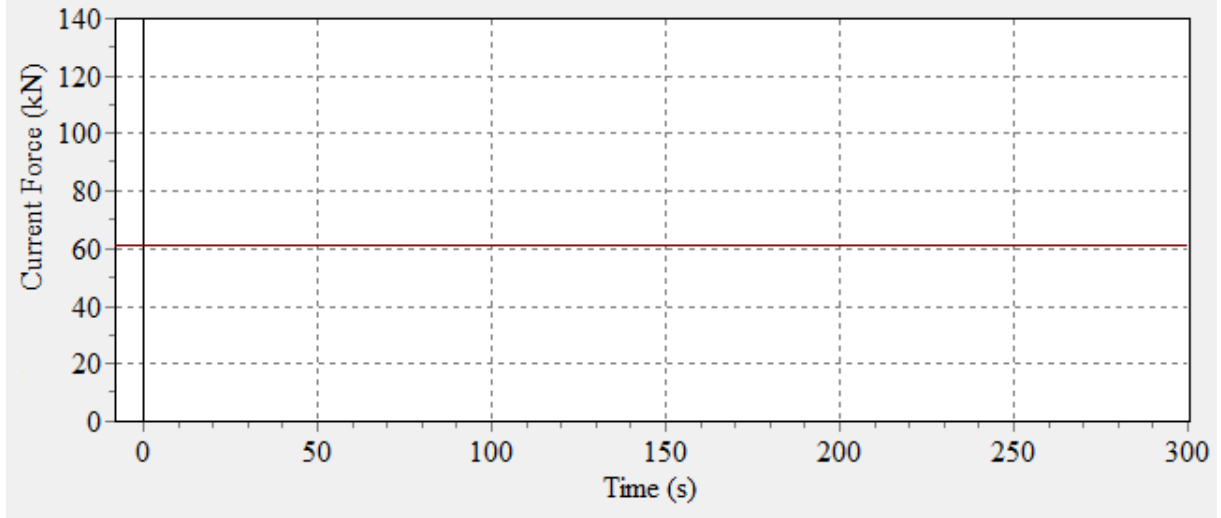


Şekil 5.7: Tüm sisteme etkiyen rüzgar kuvveti

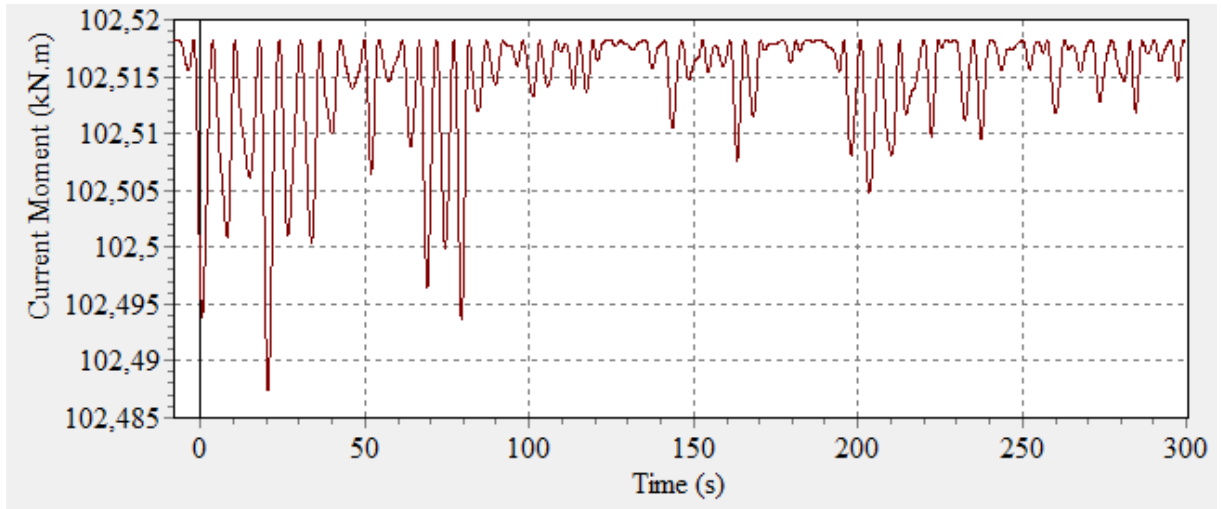


Şekil 5.8: Tüm sisteme etkiyen rüzgar momentini

5.3.2 Tüm Sisteme Etki Eden Akıntı Gücü (Current Force) ve Akıntı Momentinin (Current Moment) Zamana Dayalı (Time) Analizi (Yükseklik: 0,5m)

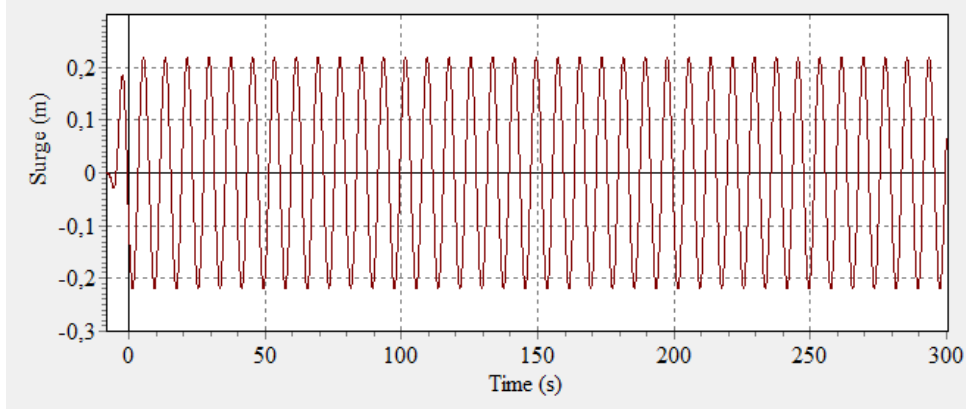


Şekil 5.9: Tüm sisteme etkiyen akıntı kuvveti

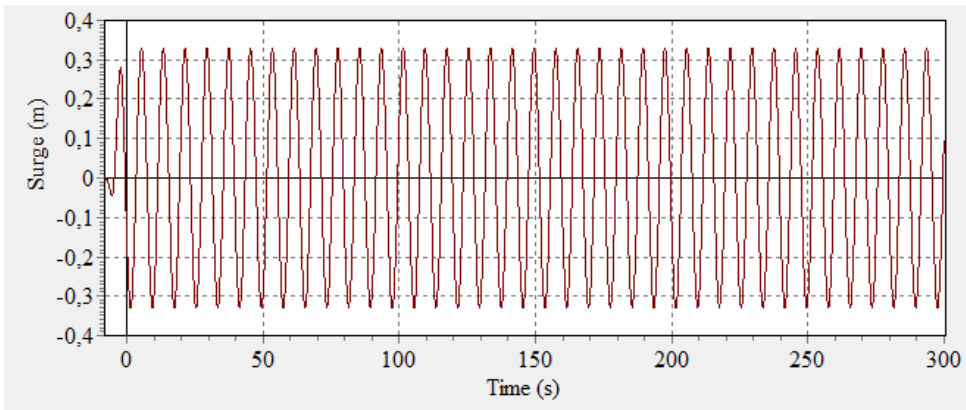


Şekil 5.10: Tüm sisteme etkiyen akıntı momentini

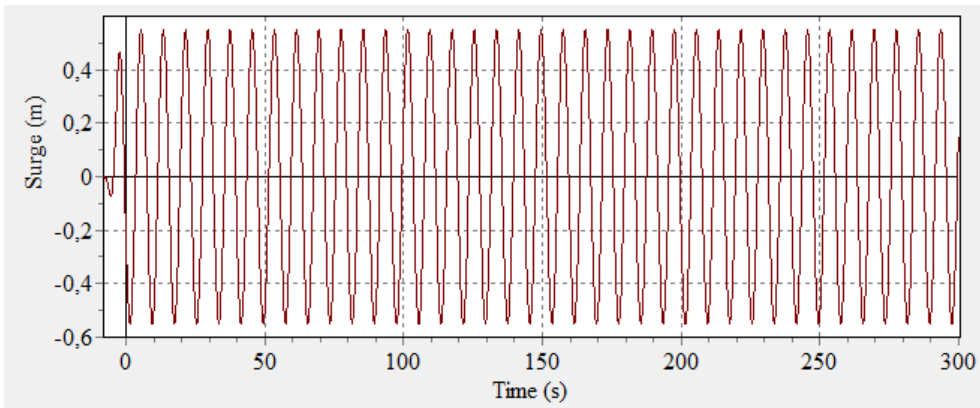
5.3.3 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Boyuna Öteleme (Surge) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi



a. 4m dalga yüksekliği



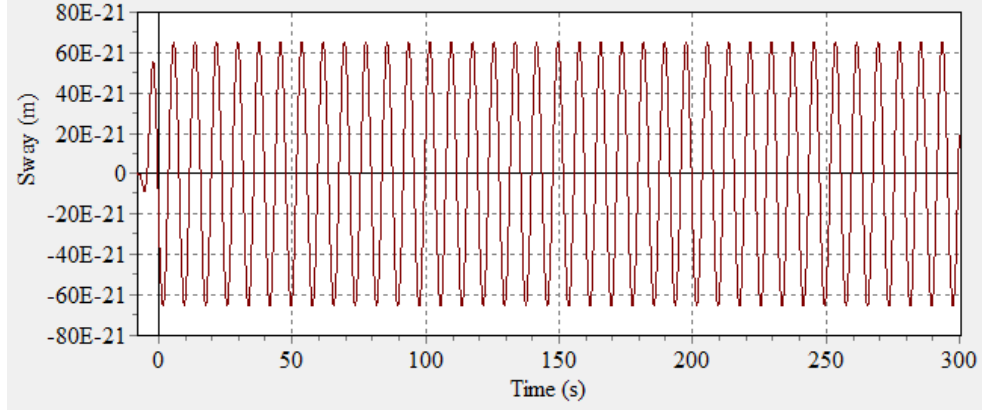
b. 6m dalga yüksekliği



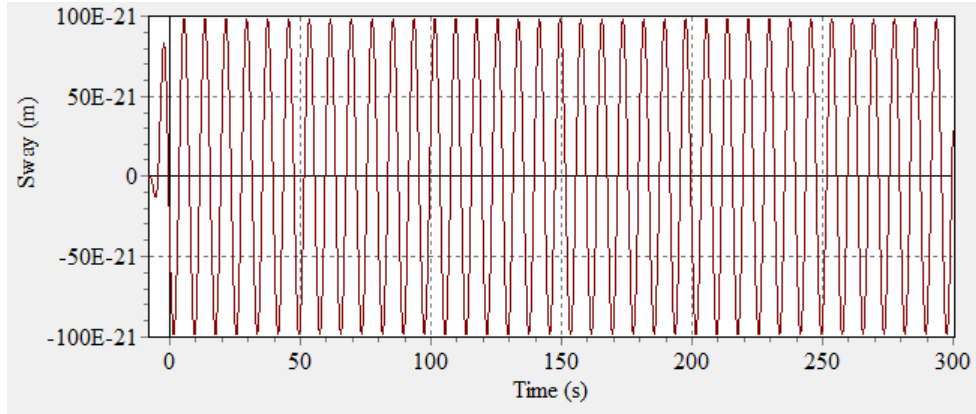
c. 10m dalga yüksekliği

Şekil 5.11: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun boyuna öteleme hareketi

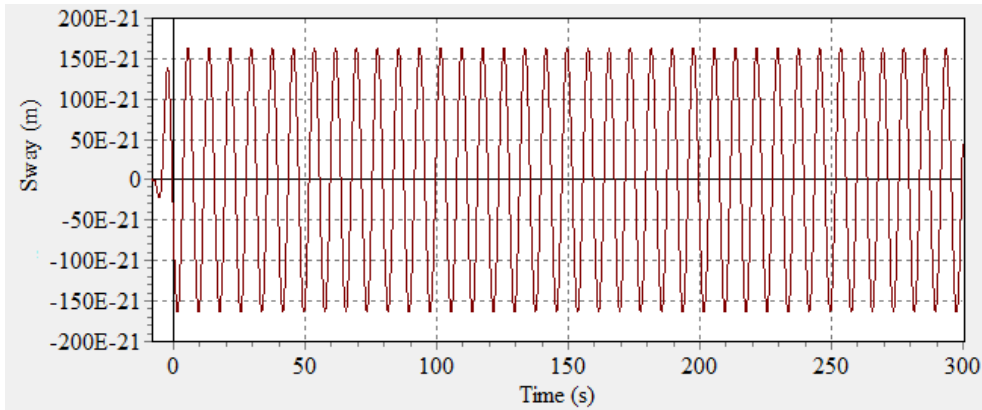
5.3.4 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Yanal Öteleme (Sway) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi



a. 4m dalga yüksekliği



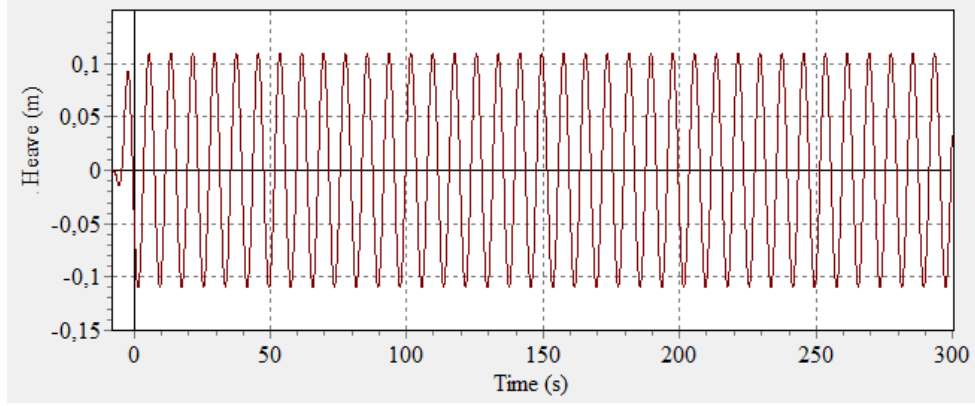
b. 6m dalga yüksekliği



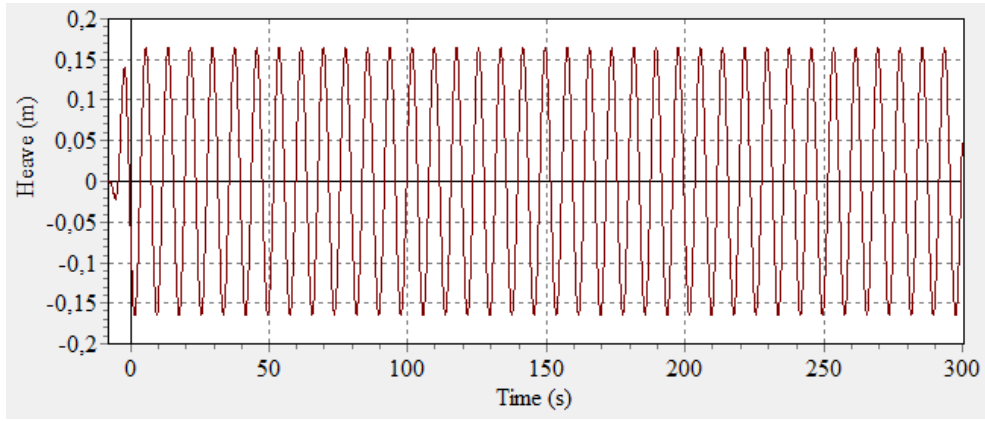
c. 10 m dalga yüksekliği

Şekil 5.12: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun yanal öteleme hareketi

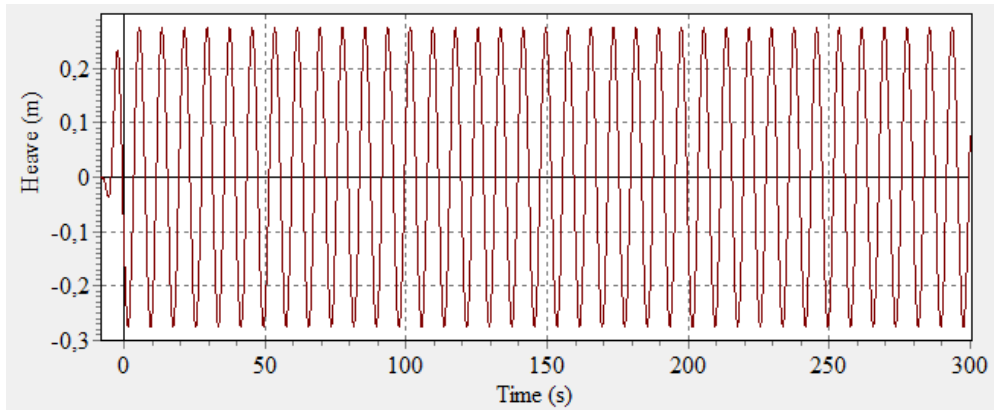
5.3.5 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Dalıp-Çıkma (Heave) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi



a. 4m dalga yüksekliği



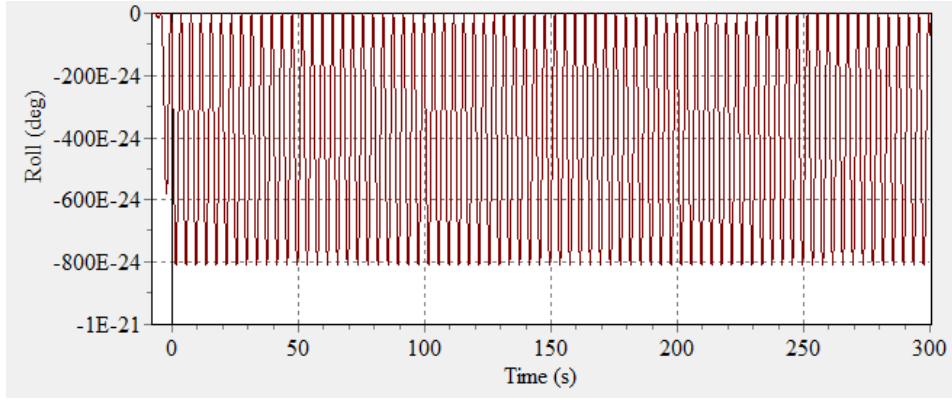
b. 6m dalga yüksekliği



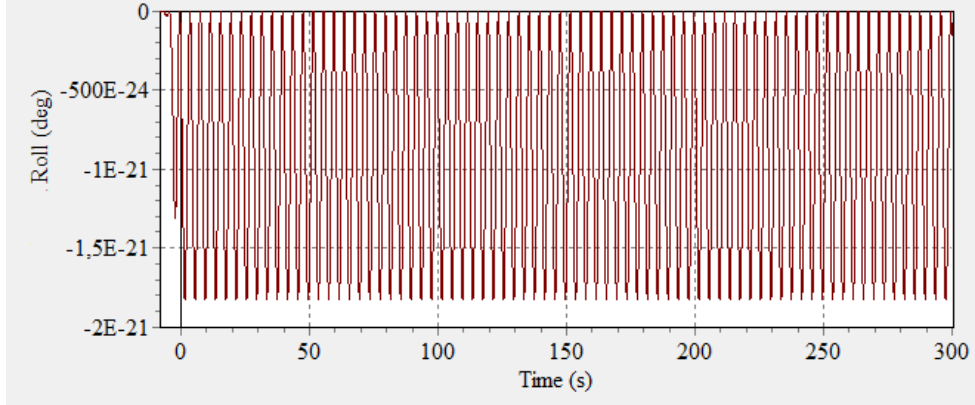
c. 10m dalga yüksekliği

Şekil 5.13: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun dalıp-çıkma hareketi

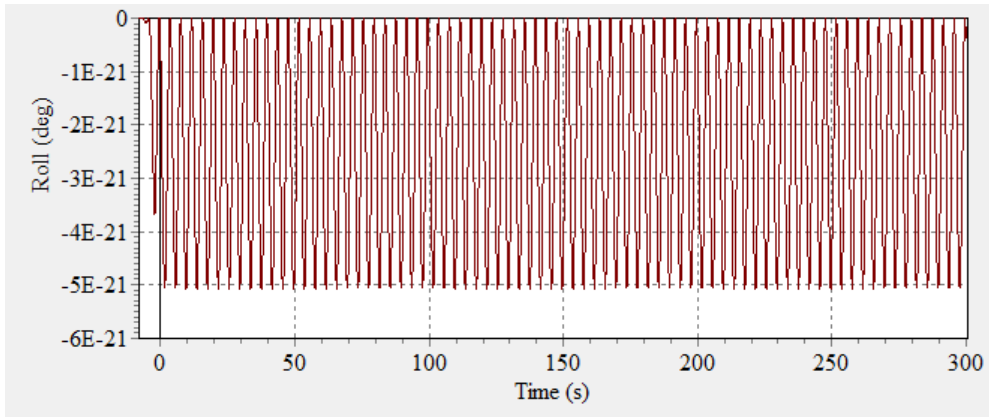
5.3.6 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Yalpa (Roll) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi



a. 4m dalga yüksekliği



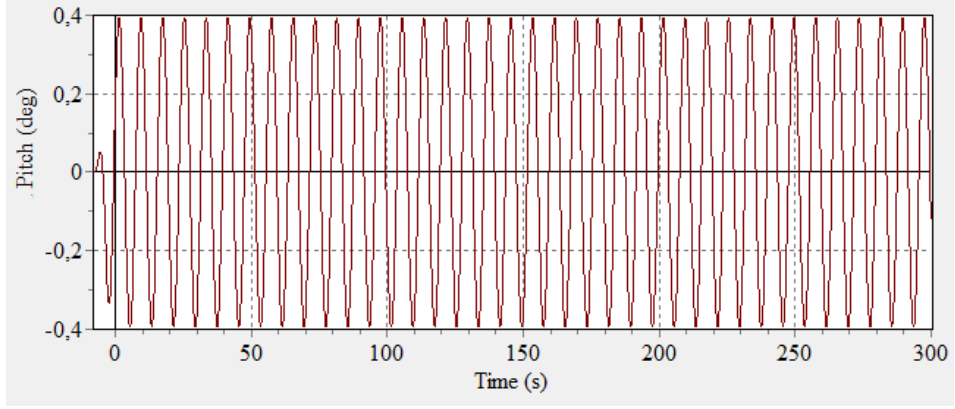
b. 6m dalga yüksekliği



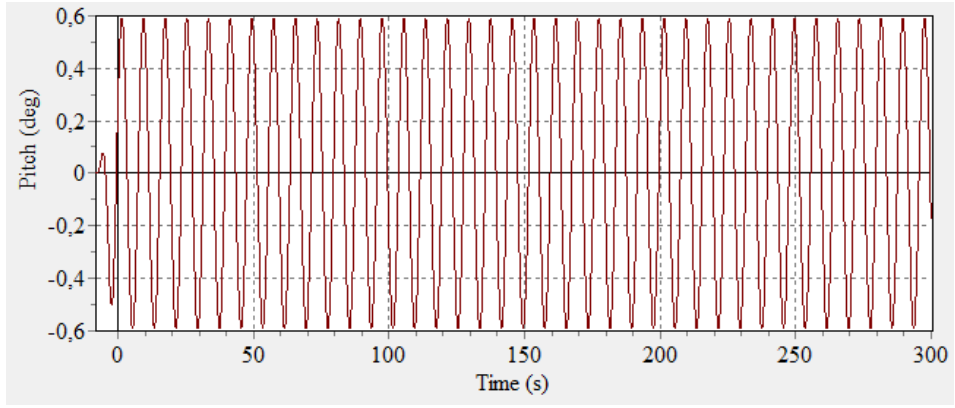
c. 10m dalga yüksekliği

Şekil 5.14: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun yalpa hareketi

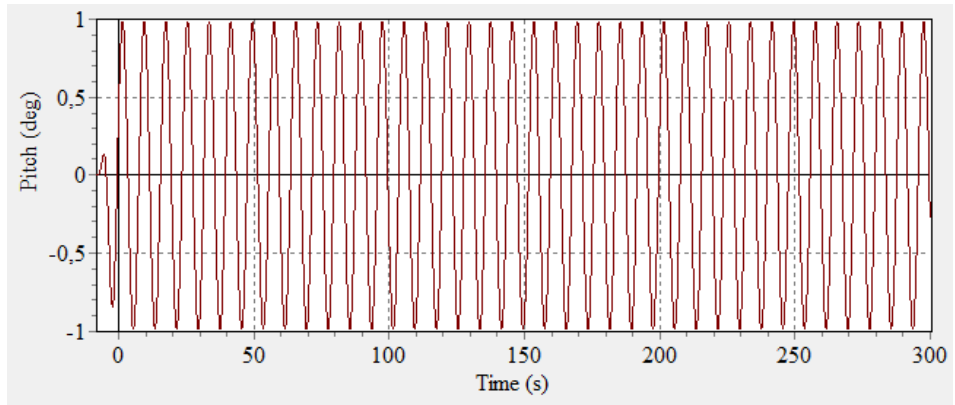
5.3.7 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Baş-Kıç Vurma (Pitch) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi



a. 4m dalga yüksekliği



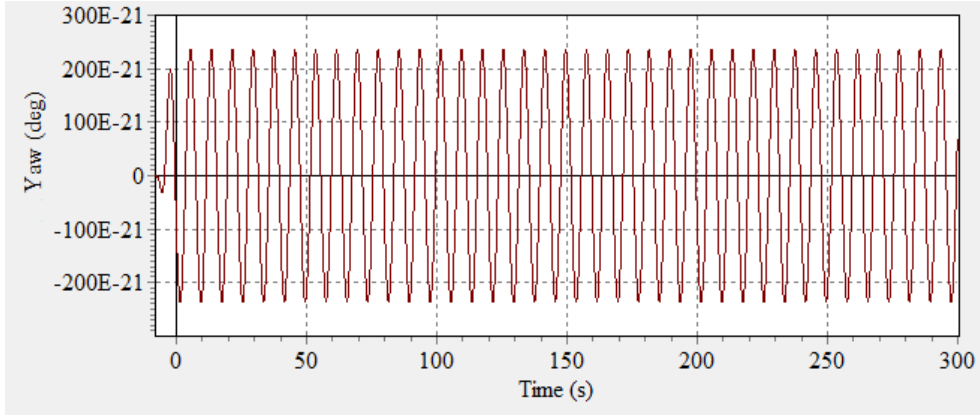
b. 6m dalga yüksekliği



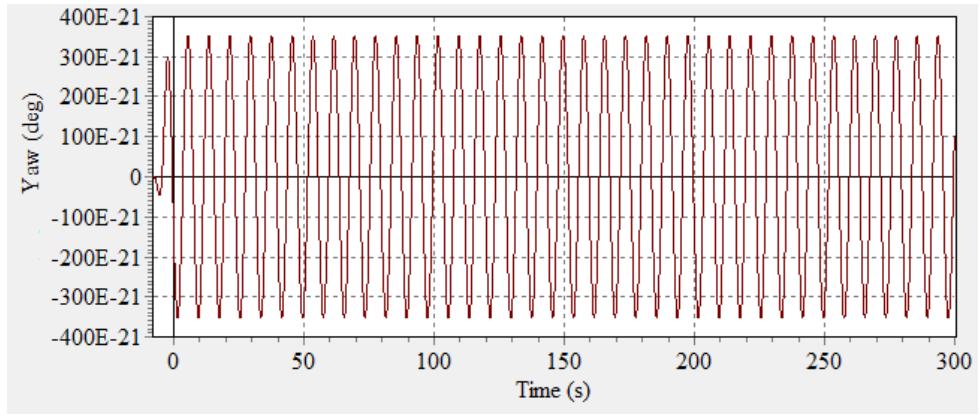
c. 10m dalga yüksekliği

Şekil 5.15: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun baş-kıç vurma hareketi

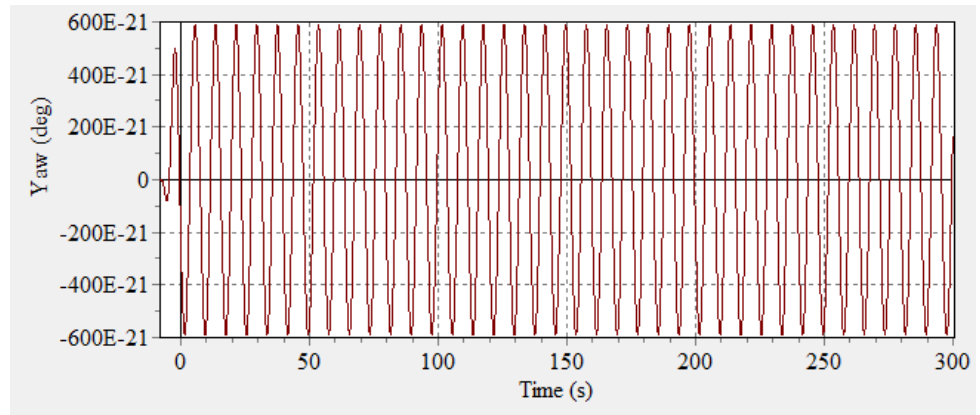
5.3.8 4m, 6m ve 10m Dalga Yüksekliklerinde Platform Yunuslama (Yaw) Hareketinin Zamana (Time) Dayalı Karşılaştırmalı Analizi



a. 4m dalga yüksekliği



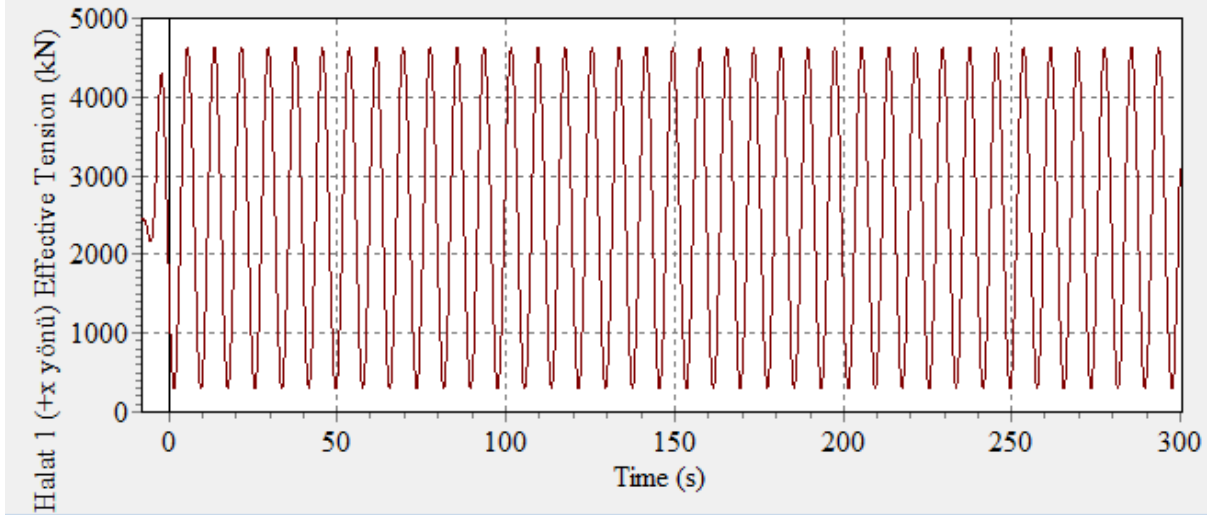
b. 6m dalga yüksekliği



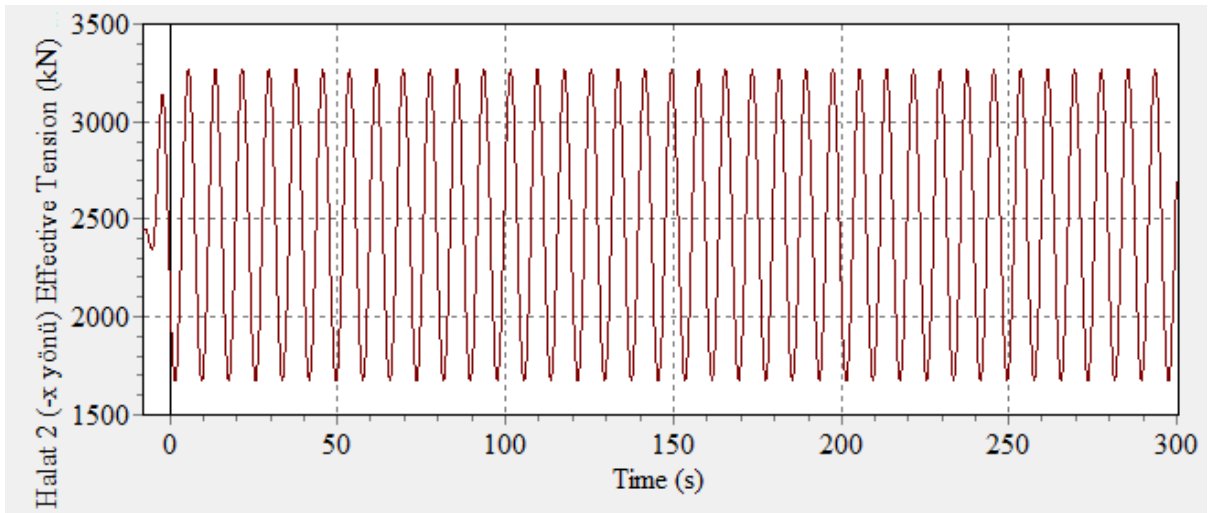
c. 10m dalga yüksekliği

Şekil 5.16: Farklı dalga yüksekliklerinde gergi ayaklı platformun yunuslama hareketi

5.3.9 4m Dalga Yüksekliğinde Halatlardaki Efektif Gerilmelerin (Effective Tension) Zamana (Time) Dayalı Analizi

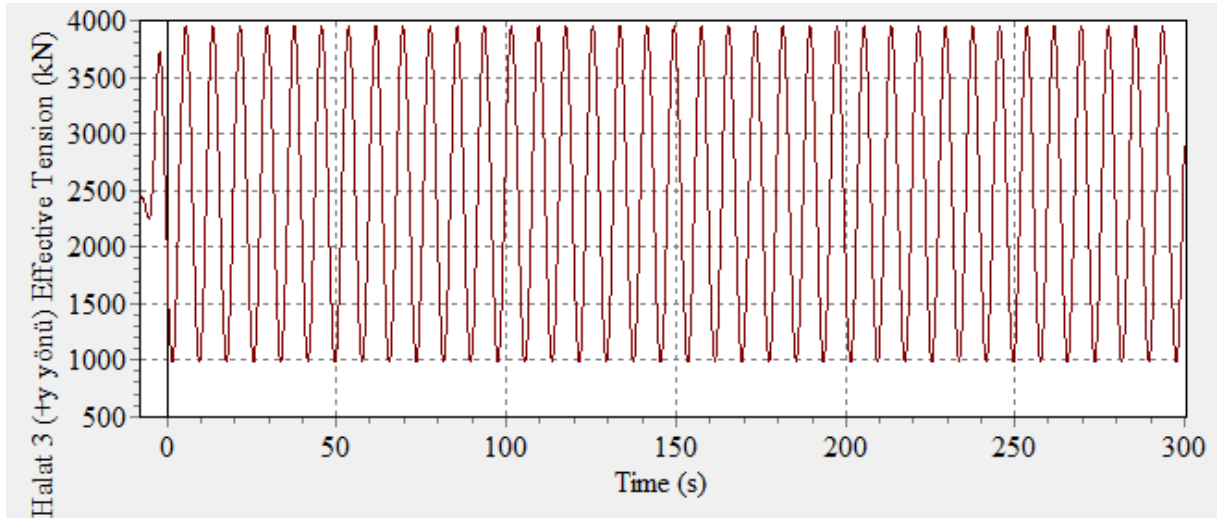


a. Halat 1 (+x yönü)

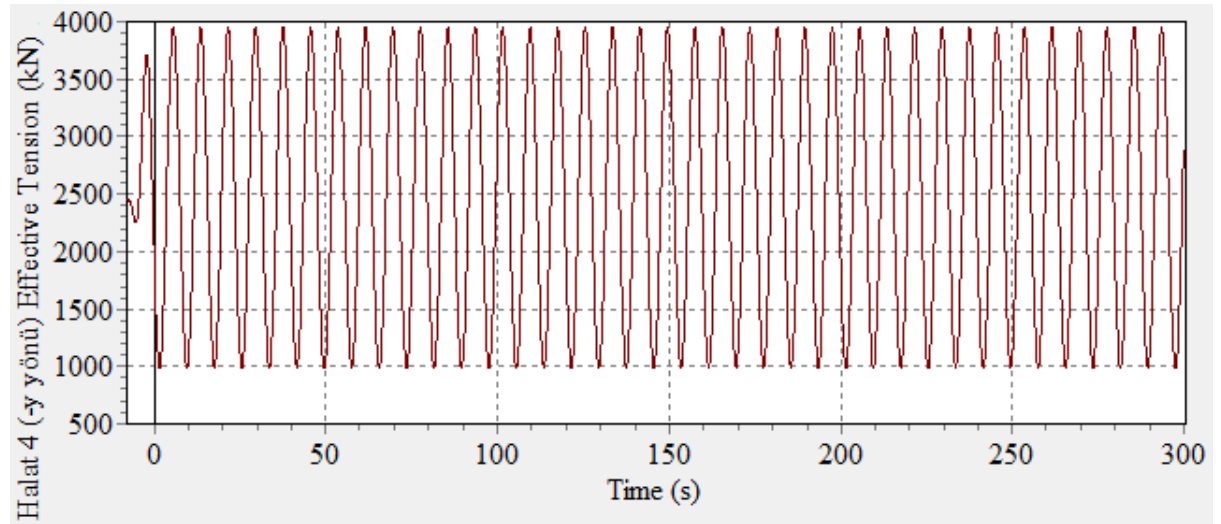


b. Halat 2 (-x yönü)

Şekil 5.17: 4m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun x eksenine boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler



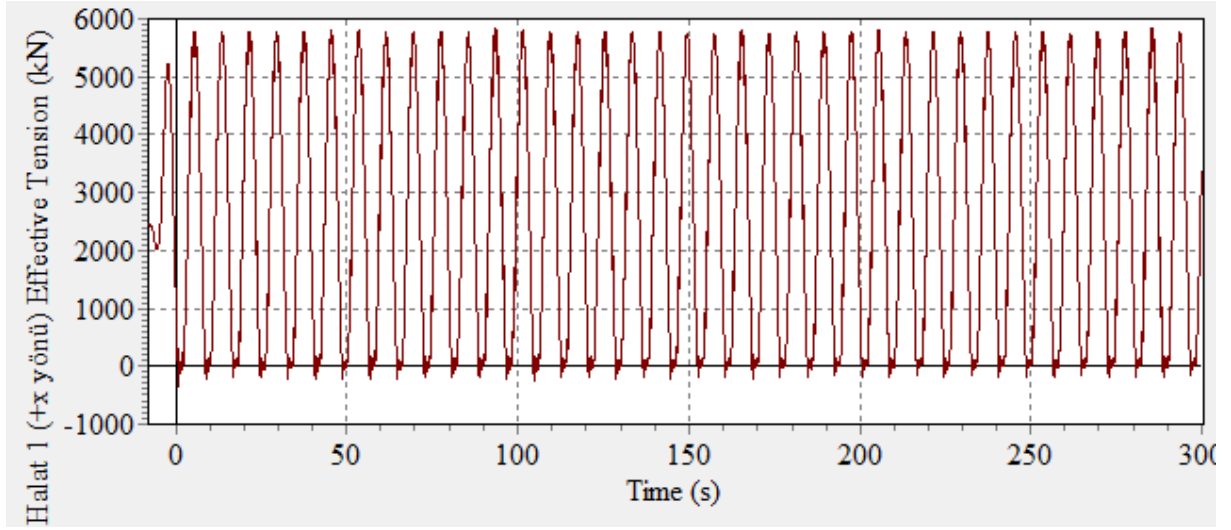
a. Halat 3 (+ y yönü)



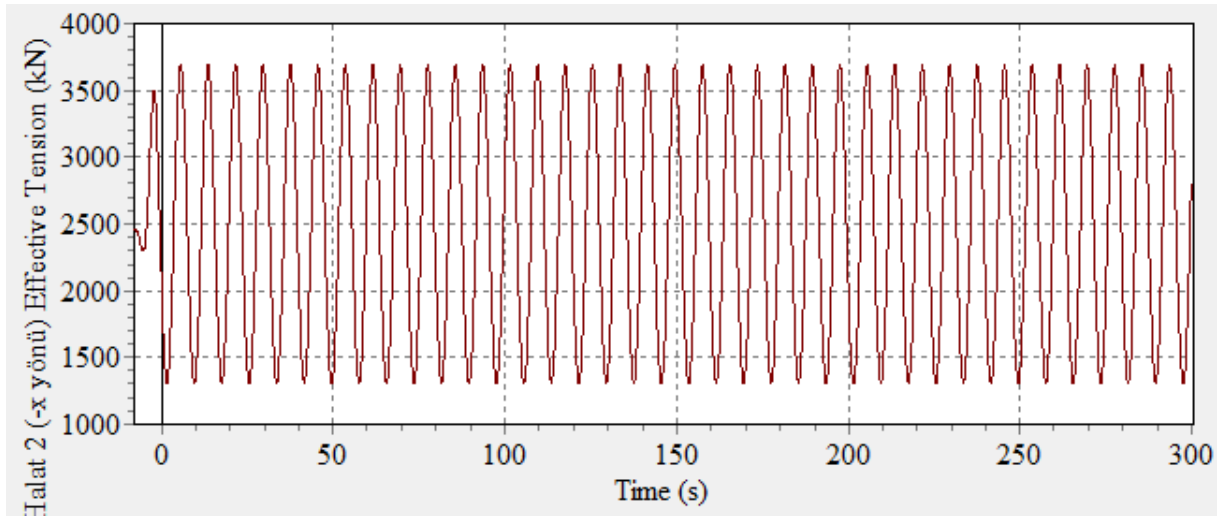
a. Halat 4 (- y yönü)

Şekil 5.18: 4m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun y eksenı boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler

5.3.10 6m Dalga Yüksekliğinde Halatlardaki Efektif Gerilmelerin (Effective Tension) Zamana (Time) Dayalı Analizi

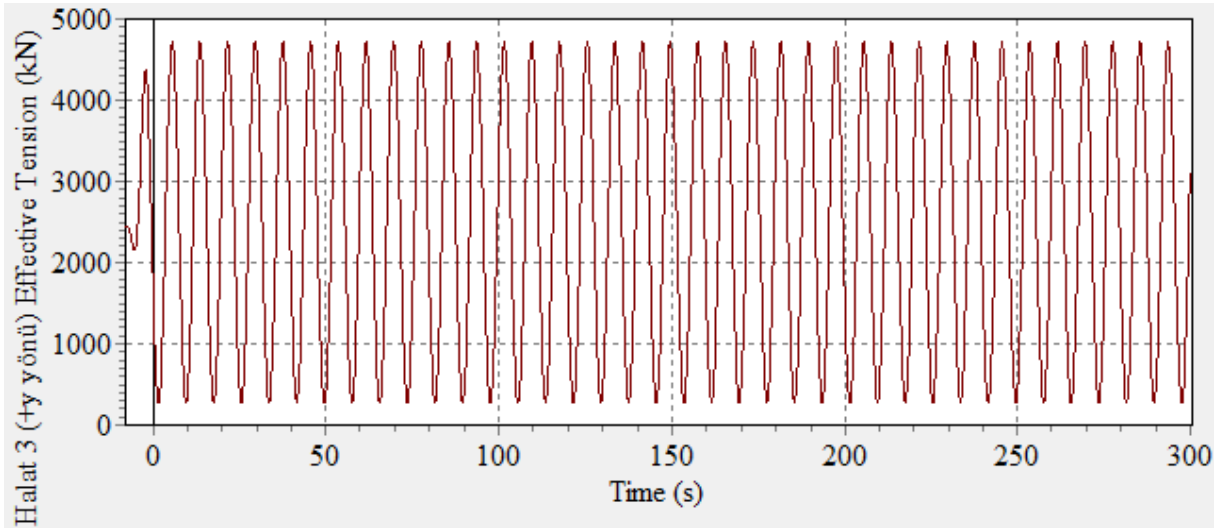


a. Halat 1 (+x yönü)

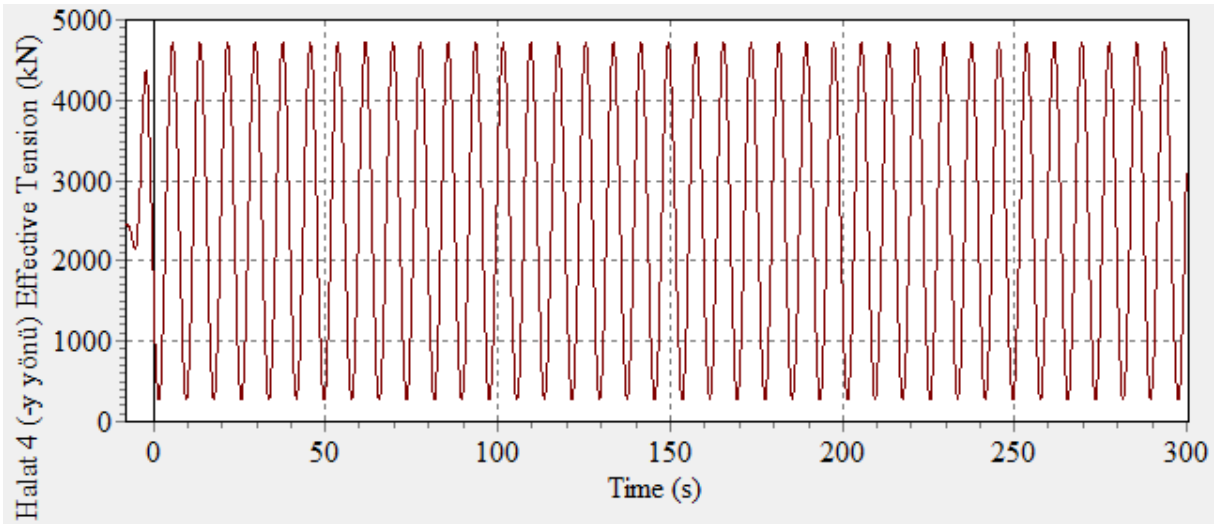


b. Halat 2 (-x yönü)

Şekil 5.19: 6m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun x eksenı boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler



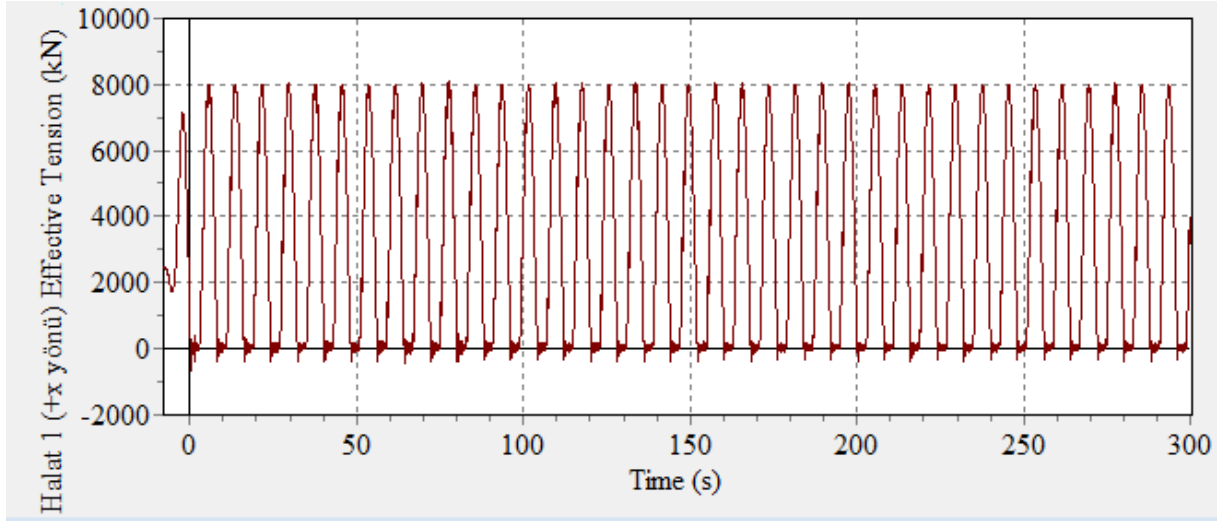
a. Halat 3 (+ y yönü)



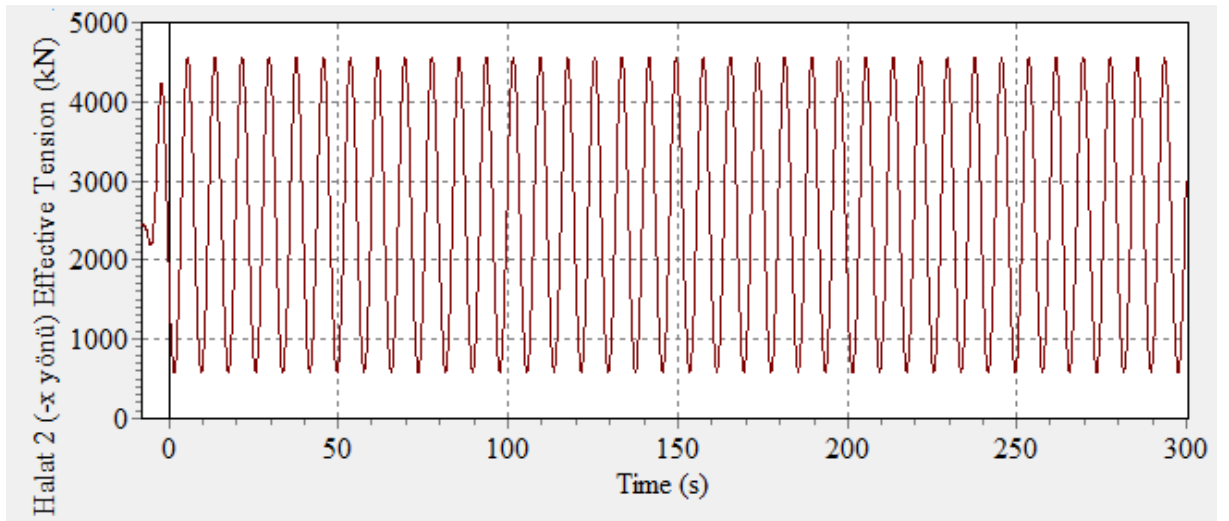
b. Halat 4 (- y yönü)

Şekil 5.20: 6m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun y eksenı boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler

5.3.11 10m Dalga Yüksekliğinde Halatlardaki Efektif Gerilmelerin (Effective Tension) Zamana (Time) Dayalı Analizi

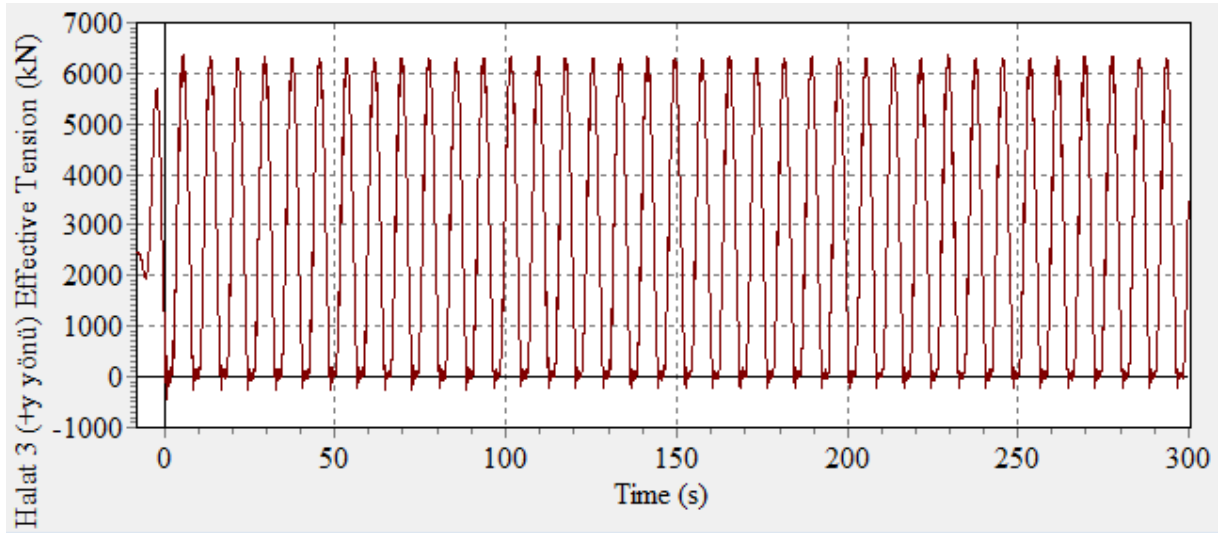


a. Halat 1 (+x yönü)

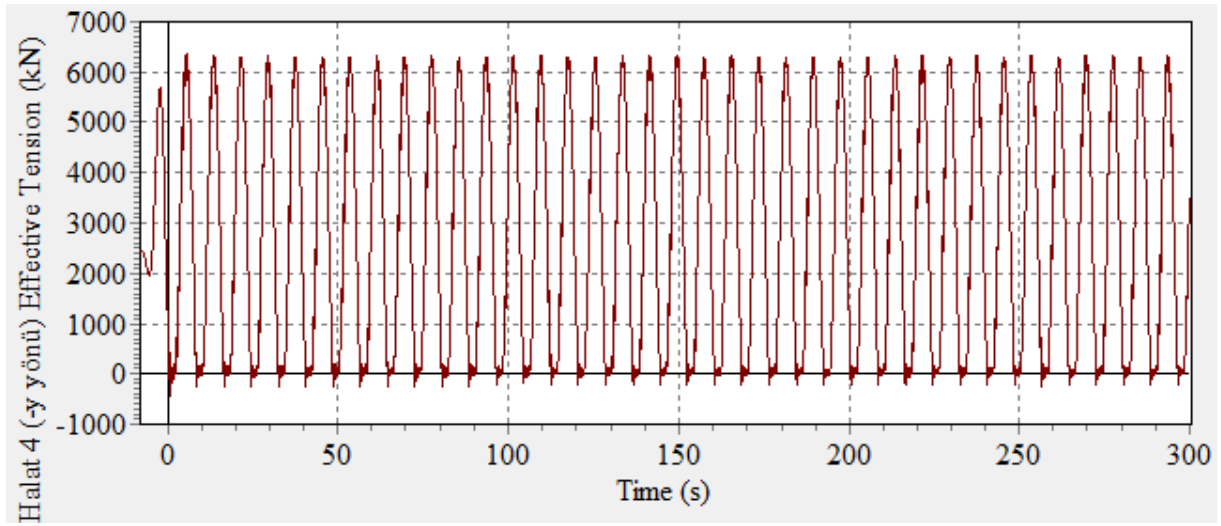


b. Halat 2 (-x yönü)

Şekil 5.21: 10m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun x eksenı boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler



a. Halat 3 (+ y yönü)



b. Halat 4 (- y yönü)

Şekil 5.22: 10m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun y eksenı boyunca yerleştirilmiş halatlarında oluşan efektif gerilmeler

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada gevşek katener (zincirli) demirleme sistemi ile gergi ayak demirleme sistemleri karşılaştırılmıştır. Farklı demirleme sistemlerinde yüzer açık deniz rüzgar türbini platformunun hareket miktarları ve halat gerilmeleri zamana dayalı olarak karşılaştırılmıştır. Literatürdeki verilere benzer şekilde 6m dalga yüksekliğinde gergi ayaklı platformun global x , y , z eksenlerindeki hareketlerinin gevşek katener demirleme sistemli platforma göre az olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte halatlarda oluşan gerilmelerin gergi ayaklı sistemde fazla olduğu gözlenmiştir. Her iki sistemde de $+x$ eksen yönünden gelen dalga, akıntı ve rüzgarın tüm yapıyı $-x$ eksen doğrultusunda sürüklemeye çalıştığı ve bundan dolayı 1 numaralı halata diğer halatlara nazaran fazla yük bindiği tespit edilmiştir.

Gergi ayaklı platform sistemiyle oluşturulan son kavramsal tasarımın farklı dalga yüksekliklerinde platform hareketleri zamana dayalı olarak incelenmiştir. Yüzer platform sistemli açık deniz rüzgar türbinin demirleme sisteminin bağlama elemanı olan halatlara gelen efektif gerilmeler farklı dalga yüksekliklerinde zamana dayalı olarak karşılaştırılmıştır. Analizler 4m, 6m ve 10m dalga yüksekliklerinde gerçekleştirilmiştir.

4m, 6m ve 10m dalga yüksekliklerinde platform hareket miktarları ve halat gerilmelerinde artış gözlenmiştir.

Aynı dalga yüksekliğinde 4 halattaki efektif gerilme değerlerinin gergi ayaklı platform tipinde birbirine yakın, gevşek katener sistemde ise 1 numaralı halatta diğerlerine göre aşırı yüksek değerdedir. Benzer şekilde gergi ayaklı demirleme sisteminde de 1 numaralı halattaki efektif gerilme dalga, akıntı ve rüzgar kuvvetleri nedeniyle tüm yapıyı $+x$ ekseninden $-x$ eksen doğrultusunda sürüklemekte ve bu halata aşırı bir yük bindirmektedir.

Gergi ayaklı platform tipinin açık deniz rüzgar türbini için uygun bir platform tipi olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte x ekseninden gelen ve 1 numaralı halata binen yüklerin azaltılabilmesi için WindFloat sistemi gibi tanklar arası balast transfer sisteminin bu sisteme adapte edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Bagbanci H** (2011). Dynamic Analysis of Offshore Floating Wind Turbines, Master of Science Thesis.
- Bhattacharyya S K, Sreekumar S ve Idichandy V G** (2003). Coupled Dynamics Of Seastar Mini Tension Leg Platform. *Ocean Engineering*, 30(6), 709–737.
- Butterfield S, Musial W ve Jonkman J** (2007). Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines.
- Cermelli C, Aubault A, Innovation, M ve Roddier D** (2010). OTC-20674-PP Qualification of a Semi-Submersible Floating Foundation for Multi- Megawatt Wind Turbines.
- Daradeli S** (2001). Rüzgar Enerjisi. Ankara: Temiz Enerji Vakfı.
- E.ON Climate & Renewables GmbH** (2011). Offshore Wind Energy Fact Book, (December).
- EWEA** (2012). Wind in Power. European Statistics, (February).
- Fulton G R, Malcolm D J, Elwany H, Stewart W, Moroz E, & Dempster H** (2007). Semi-Submersible Platform and Anchor Foundation Systems for Wind Turbine Support
- GWEC** (2011). Global Wind Energy Report Annual market update.
- Jonkman J M** (2007). Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, (November).
- Jonkman J M** (2009). Dynamics of Offshore Floating Wind Turbines - Model Development and Verification, (June), 459–492. doi:10.1002/we.
- Jonkman J** (2010). Definition of the Floating System for Phase IV of OC3 Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, (May).
- Jonkman J, Butterfield S, Musial W ve Scott G** (2009). Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, (February).
- Kurian V J ve Ganapathy C** (2010). Monopile Foundations for Offshore Wind Turbines.
- Main(e) International Consulting LLC** (2012). Floating Offshore Wind Foundations: Industry Consortia and Projects in the United States, Europe and Japan, (September).

- Malkoç Y** (2007). Türkiye Elektrik Enerjisi İhtiyacının Karşılmasında Rüzgar Enerjisinin Yeri, Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi.
- Matha D** (2010). Model Development and Loads Analysis of an Offshore Wind Turbine on a Tension Leg Platform, with a Comparison to Other Floating Turbine Concepts, (February).
- Matha D, Fischer T, Kuhn M ve Jonkman J** (2010). Model Development and Loads Analysis of a Wind Turbine on a Floating Offshore Tension Leg Platform, (February).
- Musial W, Butterfield S ve Boone A** (2004). Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines Preprint, (November 2003).
- Musial W ve Ram B** (2010). Large-Scale Offshore Wind Power in the United States
- Özaktürk M** (2007). Rüzgar Enerjisinin Güç Kalitesi Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Robertson A** (2011). Offshore Wind Power in the United States.
- Robertson A N ve Jonkman J M** (2011). Loads Analysis of Several Offshore Floating Wind Turbine Concepts, (October).
- Robinson M, Musial W, Wind N ve Renewable, N** (2006). Offshore Wind Technology Overview, (October).
- Roddier B D, Cermelli C, Aubault A ve Weinstein A** (2010). WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2(3), 033104. doi:10.1063/1.3435339
- Roddier B D ve Weinstein J** (2009). Mechanical Engineering Tecncal Magazine Paper.
- Sclavounos B P, Tracy C ve Lee S** (2007). Floating Offshore Wind Turbines : Responses in a Seastate Pareto Optimal Designs and Economic Assessment 1 Introduction and Background 2 Parametric Design Process, 1–20.
- Sclavounos P D** (n.d.). Deep Water Floater Concepts for Offshore Wind Turbines. Design, Modeling and Testing.
- Siemens** (20..). Ilımlı Rüzgar Koşulları İçin Yeni Bir Standart Kataloğu.
- URL-1** (2013). Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü: http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html adresinden alınmıştır.
- URL-2** (2013). http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_platform html adresinden alınmıştır.
- URL-3** (2013). <http://elchapuzasinformatico.com/2011/12/windfloat-la-primera-turbina-eolica-en-el-mar-del-mundo/> html adresinden alınmıştır.

URL-4 (2013). www.stateoil.com web sayfasından alınmıştır.

URL-5 (2013). <http://www.principlepowerinc.com/images/PrinciplePowerWindFloatBrochure.pdf>

Wayman E (2006). Coupled Dynamics and Economic Analysis of Floating Wind Turbine Systems.

Wayman E N ve Slavounos P D (2006). Coupled Dynamic Modeling of Floating Wind Turbine Systems Preprint.

ÖZGEÇMİŞ

Sabri ALKAN 1983 yılında Artvin/Yusufeli'nde doğdu; ilköğrenimini aynı şehirde tamamladı; ortaöğretimini Trabzon'da tamamladıktan sonra 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü'ne girdi. Buradan mezun olduktan sonra farklı tersanelerde Gemi Mühendisi olarak çalıştı; halen Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını sürdürmekte ve Bartın Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Gemi İnşaatı Programı'nda öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Bartın Üniversitesi
Meslek Yükseokulu
74200 BARTIN

Tel : (378) 2279939
Faks : (378) 2278875
E-posta : sabrialkan@gmail.com

