

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜZER AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNLERİ HAREKET ANALİZİ VE PERFORMANS
ÜZERİNDE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

**EKİM 2022
TRABZON**

Bu belge güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Doğrulama Kod: 187F7855-DAC7-4A3C-8F78-E7917B632F4C

Doğrulama Adres: <https://www.turkiye.gov.tr/karadeniz-teknik-universitesi-ebys>





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜZER AÇIK DENİZ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ HAREKET ANALİZİ VE PERFORMANS
ÜZERİNDE ETKİSİ**

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

ORCID : - - -

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 / 09 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 03 / 10 / 2022

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Emre PEŞMAN
ORCID : - - -

Trabzon 2022



ÖNSÖZ

Rüzgâr enerjisi, elektrik üretimi için yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak dünya çapında sıkça tercih edilmektedir. Her geçen gün artan enerji ihtiyaçları da farklı kaynak arayışına sebep olmaktadır. İklim etkileri ve denizlerdeki rüzgâr potansiyelinin karalara göre daha fazla ve verimli olması nedeniyle açık deniz rüzgâr santrallerinin sayısı ve ölçeği giderek artmaktadır. Ülkemizin üç tarafının denizlerle çevrili olması ve çağın gereklilikleri gerçekleştirilen çalışmaya ilham kaynağı olmuştur.

Doktora çalışmalarım süresince daima yanımda olan, her zaman beni destekleyen, hiçbir zaman yardımını esirgemeyen Sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Emre PEŞMAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yine öğrenciliğimin her aşamasında verdikleri desteklerden dolayı başta Sayın Prof. Dr. Ercan KÖSE olmak üzere tüm KTÜ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği bölümü öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunmayı zevkli bir görev sayarım.

Çalışmamın önemli bir bölümü olan analizlerimi gerçekleştirmek üzere misafir araştırmacı olarak Centre for Marine Technology and Ocean Engineering (CENTEC), Instituto Superior Tecnico, University of Lisbon' da yanlarında bulunmamı sağlayan başta Prof. Carlos Guedes SOARES olmak üzere, bulunduğum süre boyunca değerli zamanlarını ayırarak çalışmalarımda yardımcı olan, konuya olan ilgimin artmasında yadsınamaz katkıları bulunan, saygılarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen araştırmacı Dr. Cihan Emre UZUNOĞLU'na ve görüş, öneri ve tartışmaları ile yardımlarını eksik etmeyen araştırmacı Mohamad HMEDİ' ye teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Lisans üstü eğitimime başladığım günden bu yana her zaman iyi niyetini esirgmeden çözüm odaklı çalışan Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sekreteri sayın Ayşe BAYRAKTAR' a emekleri için teşekkür ederim.

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

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

Trabzon, 2022



TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri Hareket Analizi ve Performans Üzerinde Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Emre PEŞMAN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 03/10/2022

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	X
SUMMARY.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XXV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XXIX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Açık Deniz Rüzgâr Türbini Platform Konseptleri.....	4
1.2.1. Su Hattı Alanlı Stabilize Platformlar.....	4
1.2.2. Bağlama Stabilize Platformlar.....	7
1.2.3. Derin Balast Stabilize Platformlar.....	9
1.2.4. Hibrit Platformlar ve Çoklu-Türbin Konfigürasyonları.....	10
1.3. Platform Konseptleri Uygulamaları.....	11
1.3.1. DeepC-Wind Konsorsiyumu.....	12
1.3.2. Japonya'daki Çalışmalar.....	15
1.4. Platform hareketlerinin Sayısal Analizi.....	16
1.5. Yüzer Rüzgâr Türbini Projeleri.....	17
1.6. Açık Deniz Platformları Tasarımı.....	18
1.6.1. Tasarım Standartları.....	18
1.6.2. Tasarım ve Optimizasyon Çalışmaları.....	19
1.7. Diğer Literatür Çalışmaları.....	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME.....	26
2.1. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri.....	27
2.1.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP).....	28
2.1.1.1.1. Faktörlerin Yüzde Önem Dağılımlarının Belirlenmesi.....	28
2.1.1.1.2. Faktör Kıyaslamalarının Tutarlılık Ölçümü.....	31
2.1.2. Bulanık Mantık.....	33



2.1.3.	Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (F-AHP).....	35
2.1.3.1.	Kareli Ortalama Yöntemi.....	36
2.1.3.2.	Kwong Bai Yöntemi	36
2.1.3.3.	Abdel-Kader ve Dugdale Yöntemi	37
2.1.3.4.	Bulanık Ortalama Kareler (Logaritmik En Küçük Kareler) Yöntemi	38
2.1.3.5.	Alpha-Cut (α - Kesme) Yöntemi.....	38
2.2.	Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS).....	40
2.3.	Türkiye'nin Rüzgâr Enerjisi Politikası ve Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Uygulama Adımları	43
2.3.1.	Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) Kapsamında Rüzgâr Enerjisi Politikaları.....	43
2.3.2.	Türkiye Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Kurulum İçin Alternatif Bölgeler	46
2.3.3.	Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Türbini Kurulum Yeri Alternatif Bölge Seçim Kararları.....	47
2.4.	Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Türbini Kurulum Yeri Alternatif Bölge Seçimi Uygulaması.....	50
2.4.1.	Dışlanmış Bölgelerin Coğrafi Bilgi Sistemi ile Belirlenmesi	50
2.4.2.	Uygun Bölgelerin Değerlendirmesi.....	51
2.4.2.1.	Batimetri (Deniz Derinliği).....	52
2.4.2.2.	Ortalama Rüzgâr Hızı	53
2.4.2.3.	Gemi Rotalarına Olan Uzaklık.....	55
2.4.2.4.	Korunmuş Alanlar.....	56
2.4.2.5.	Mevcut En Yakın Trafo Merkezine Uzaklık.....	57
2.4.2.6.	Fay Hatlarına Uzaklık	57
2.4.3.	Sayısallaştırılmış Bölgeler.....	58
2.4.3.1.	Sayısallaştırılmış Batimetri (Deniz Derinliği)	59
2.4.3.2.	Sayısallaştırılmış Ortalama Rüzgâr Hızı	61
2.4.3.3.	Sayısallaştırılmış Gemi Rotalarına Uzaklık.....	62
2.4.3.4.	Sayısallaştırılmış Mevcut En Yakın Trafo Merkezleri	63
2.4.3.5.	Sayısallaştırılmış Fay Hatları Haritası	65
2.4.4.	Sayısallaştırılmış Katmanların Birleştirilmesi ve En Uygun Yer Seçimi	66
2.4.4.1.	Senaryo 1: Eşit Ağırlıklı Katmanların Birleştirilmesi ile En Uygun Yer Seçimi.....	67
2.4.4.2.	Senaryo 2: Öncelik Ağırlık Değerlerinin Bulanık Analitik Hiyerarşi (B-AHP) ile Belirlenerek Oluşturulan Katmanlar ile En Uygun Yer Seçimi	68



2.5.	Yüzer Platformların Dinamik Analizi	73
2.5.1.	Yüzey Dalgalarında Sınır Değer Problemleri	73
2.5.2.	Dalga Teorisi	75
2.5.3.	Zaman ve Frekans Tanımlı Alanlarda Deniz Durumları	79
2.5.4.	Hidrostatik ve Düşey Stabilite	81
2.5.5.	Yapı Üzerindeki Dalga Yükleri	85
2.5.5.1.	Difraksiyon ve Radyasyon Teorisi	86
2.5.5.2.	Morison Denklemi	87
2.5.6.	Hidrodinamik Olarak Kompakt Yapılar	88
2.6.	Rüzgâr Yükleri	91
2.6.1.	Rüzgâr Kaynakları	91
2.6.2.	Rotor ve Kule Üzerindeki Rüzgâr Yükleri	93
2.7.	Bağlama Sistemleri Dinamiği	94
2.8.	Yüzer Rüzgâr Türbini Platformları Birleşik Hareket Dinamikleri	96
2.9.	Zaman Tanımlı Alan Çözümleri ve Karşılaştırılmaları	98
2.9.1.	FAST Programına Genel Bakış	99
2.9.2.	NREL 5 MW Referans Türbini Özellikleri	101
2.9.2.1.	Kanatların Yapısal Özellikleri	105
2.9.2.2.	Kanatların Aerodinamik Özellikleri	105
2.9.2.3.	Göbek ve Nasil Özellikleri	107
2.9.2.4.	Sürücü Özellikleri	108
2.9.2.5.	Kule Özellikleri	109
2.9.2.6.	Temel Kontrol Sistemi Özellikleri	110
2.9.3.	DTU 10 MW Referans Rüzgâr Türbin Özellikleri	111
2.9.3.1.	Kanat Profili Seçimi	112
2.9.4.	Platformların Validasyonları	113
2.9.4.1.	OC-3 Hywind Konsepti	114
2.9.4.1.1.	OC-3 Hywind Kule Özellikleri	114
2.9.4.1.2.	OC-3 Hywind Platform ve Bağlama Sistemleri Tasarım Parametreleri	115
2.9.4.1.3.	OC-3 Hywind Statik Ofset Testi	119
2.9.4.1.4.	OC-3 Hywind Serbest Sönümlleme Testi	123
2.9.4.1.5.	Sabit Rüzgâr Altında OC-3 Hywind Konsepti Tepkileri	129
2.9.4.1.6.	Düzenli Dalga Altında OC-3 Hywind Konsepti Tepkileri	144
2.9.4.2.	OC-4 DeepC Konsepti	146



2.9.4.2.1.	OC-4 DeepCwind Kule Özellikleri.....	147
2.9.4.2.2.	OC-4 DeepCwind Platform ve Bağlama Sistemleri Tasarım Parametreleri.....	149
2.9.4.2.3.	OC-4 DeepCwind Statik Ofset Testi.....	155
2.9.4.2.4.	OC-4 DeepCwind Serbest Sönümlleme Testi.....	160
2.9.4.2.5.	Sabit Rüzgâr Altında OC-4 DeepCwind Konsepti Tepkileri.....	166
2.9.4.2.6.	Düzenli Dalga Altında OC-4 DeepCwind Konsepti Tepkileri	182
2.9.4.3.	NAUTILUS-DTU Konsepti.....	183
2.9.4.3.1.	NAUTILUS-DTU Kule Özellikleri	184
2.9.4.3.2.	NAUTILUS-DTU Platform ve Bağlama Sistemleri Tasarım Parametreleri.....	185
2.9.4.3.3.	NAUTILUS-DTU Statik Ofset Testi	188
2.9.4.3.4.	NAUTILUS-DTU Serbest Sönümlleme Testi	194
2.9.4.3.5.	Basamak Rüzgâr Altında NAUTILUS-DTU Konsepti Tepkileri.....	198
2.9.4.3.6.	Düzenli Dalga Altında NAUTILUS-DTU Konsepti Tepkileri.....	209
2.9.4.4.	LIFES50+ OO-STAR Konsepti.....	210
2.9.4.4.1.	LIFES50+ OO-STAR Kule Özellikleri	211
2.9.4.4.2.	LIFES50+ OO-STAR Platform ve Bağlama Sistemleri Tasarım Parametreleri.....	212
2.9.4.4.3.	LIFES50+ OO-STAR Statik Ofset Testi	216
2.9.4.4.4.	LIFES50+ OO-STAR Serbest Sönümlleme Testi	220
2.9.4.4.5.	Basamak Rüzgâr Altında LIFES50+ OO-STAR Konsepti Tepkileri.....	225
2.9.4.4.6.	Düzenli Dalga Altında LIFES50+ OO-STAR Konsepti Tepkileri.....	235
2.10.	Alternatif Bölge İçin Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Türbini Uygulaması.....	236
2.10.1.	Derinliğin Platform Hareketlerine ve Performansa Etkisi.....	245
2.11.	Maliyet Analiz	244
2.11.1.	Yıllık Sermaye Masrafları	247
2.11.2.	Tesis Yıllık İşletme ve Bakım Masrafları (O&M)	252
2.11.3.	Birim Enerji Maliyeti	254
2.11.4.	Yerli İmalat Teşviki ve Karbon Emisyonu Geliri	254
2.11.5.	Birim Enerji Geliri ve Net Kazanç	256
2.11.6.	Tesis Geri Ödeme Süresi	257
2.11.7.	Eskalasyon, Faiz ve Kurulu Gücün Ekonomik Analize Etkisi.....	258
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	261



4.	KAYNAKLAR.....	264
5.	EKLER.....	282
ÖZGEÇMİŞ		



Doktora Tezi

ÖZET

YÜZER AÇIK DENİZ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ HAREKET ANALİZİ VE PERFORMANS
ÜZERİNDE ETKİSİ

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emre PEŞMAN
2022, 281 Sayfa, 8 Sayfa Ek

Gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkan gereksinimlerin artmasından dolayı her geçen gün artan elektrik enerjisi tüketimi, üreticileri ve kullanıcıları yeni ve çevreye uyumlu enerji kaynakları aramaya zorlamaktadır. Sonsuz enerji potansiyeli ve sürekliliği sebebiyle rüzgâr enerjisi, elektrik üretimi için yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak dünya çapında sıkça tercih edilmektedir. Denizlerdeki basınç farklarının ve dolayısıyla rüzgâr kuvvetinin karalara oranla daha fazla olması ve iklim etkileri nedeniyle açık deniz rüzgâr santralleri sayısı ve ölçeği artmaktadır. Ülkemizde henüz kurulu bir yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi platformu ve santrali bulunmaması nedeniyle gerçekleştirilen çalışmanın literatürde bu açığı kapatacağı beklenmektedir. Bu çalışmada, yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbininin belirli bir deniz derinliğinde, belirli çevresel ve dinamik yükler altında hareket analizleri gerçekleştirilmiş ve bu hareketlerin performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk olarak Coğrafi Bilgi Sistemleri ve bulanık AHP kullanılarak yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbini için alternatif çalışma bölgesi olarak Çanakkale Gelibolu yarımadası ile Gökçeada arasında kalan bölge belirlenmiştir. Sonra, bölgenin rüzgâr verileri ile türbin seçimi gerçekleştirilmiştir. Platform seçimi için açık kodlu türbin-platform konseptlerinin aerodinamik ve hidrodinamik yükler altında karşılaştırması yapılmıştır ve 10MW'lık DTU rüzgâr türbini ile LIFES50+ OOSTar yarı-batık platformu seçilmiştir. Seçilen platform ve türbinin alternatif uygulama bölgesinde analizleri FAST paket programı yardımıyla nümerik olarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra farklı çalışma koşulları altında seçilen türbin platform konseptinin davranışları incelenmiş, sonuçları sunulmuştur. Son olarak ise belirlenen bölgeye kurulabilecek bir rüzgâr santralinin LCOE yöntemi ile maliyet analizi gerçekleştirilmiş ve yatırımın uygunluğu tartışılmıştır. Böylece kurulumu gündemde olan açık deniz rüzgâr enerjisi platformları için bir ön fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık deniz rüzgâr enerjisi, Bulanık AHP, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Çanakkale, FAST, Gökçeada, LCOE

X



PhD. Thesis

SUMMARY

FLOATING OFFSHORE WIND TURBINES MOTION ANALYSIS AND ITS EFFECT ON PERFORMANCE

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Naval Architecture and Marine Engineering
Supervisor: Assist. Prof. Emre PEŞMAN
2022, 281 Pages, 8 Pages Appendix

The ever-increasing electrical energy consumption due to the increasing requirements arising in parallel with the developing technology forces manufacturers and users to seek new and environmentally compatible energy sources. Due to its endless energy potential and continuity, wind energy is frequently preferred worldwide as a renewable energy source for electricity generation. The number and scale of offshore wind farms are increasing due to the fact that the pressure differences in the seas and thus the wind force are higher than the land and due to the climate effects. Since there is neither floating nor fixed offshore wind energy platform and power plant installed in our country yet, it is expected that the study will close this gap in the literature. In this study, floating offshore wind turbine's motion analyzes were carried out at a certain sea depth, under certain environmental and dynamic loads, and the effects of movements on performance were investigated. First, the region between Çanakkale-Gelibolu and Gökçeada was determined as an alternative study area for the floating offshore wind turbine using Geographic Information Systems and Fuzzy-Analitical Hierarchy Process. Then, turbine selection was carried out with the wind data of the region. For the platform selection, open-sources platform types and turbines were compared under aerodynamic and hydrodynamic conditions, and LIFES50+ OO Star type semi-submersible platform and 10MW DTU wind turbine are chosen. The platform and turbine coupled dynamic analysis are performed numerically in the alternative work site with FAST package program. Then, the dynamic behavior of platform motion under different operating conditions was examined and results are discussed. Finally, the cost analysis of wind farm that can be installed in the determined region was carried out with the LCOE method and the suitability of the investment was discussed. Thus, a pre-feasibility study was performed for offshore wind energy platforms which are on the agenda.

Key Words: Offshore wind energy, Fuzzy-Analitical Hierarchy Process, Geographic Information Systems, Çanakkale, FAST, Gökçeada, LCOE



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	2016 yılı gelişme durumuna göre sabit yapıların ortalama su derinlikleri.....	2
Şekil 2.	Stabilite üçgeni ve stabilizasyon yöntemlerine göre platform tipleri	5
Şekil 3.	Yarı-batık platform örnekleri.....	6
Şekil 4.	Sea-Star TLP	8
Şekil 5.	SPAR platform	10
Şekil 6.	Hexicon çoklu-türbin konsepti	11
Şekil 7.	DeepCwind konsorsiyumu platform modelleri	13
Şekil 8.	DeepCwind platformları doğal periyodları.....	14
Şekil 9.	Japonya’da geliştirilen platform tipleri	16
Şekil 10.	Üçgen yarı-batık platform	23
Şekil 11.	Üçgensel bulanık sayılar	35
Şekil 12.	2021 yılı Türkiye’nin kurulu toplam elektrik gücü ve payları	43
Şekil 13.	Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum (MW).....	44
Şekil 14.	Rüzgâr enerjisinden elde edilen gücün toplam güce oranı.....	45
Şekil 15.	Bölge seçimi akış şeması	51
Şekil 16.	Yüzer açık deniz rüzgâr türbini kurulum alanı seçimi hiyerarşik yapısı	52
Şekil 17.	Derinliklere göre çeşitli platform türleri.....	53
Şekil 18.	Türkiye batimetri (derinlik) haritası	53
Şekil 19.	Türkiye rüzgâr atlası	54
Şekil 20.	Türkiye kapasite faktörü dağılımı	55
Şekil 21.	Türkiye deniz trafik yoğunluğu	56
Şekil 22.	Deniz koruma alanları	56
Şekil 23.	Rüzgâr türbininin şebekeye bağlanması	57
Şekil 24.	Türkiye fay hatları haritası	58
Şekil 25.	Sayısallaştırma yapılan çalışma bölgesinin topografya haritası üzerinde gösterilmesi	59
Şekil 26.	Çanakkale batimetri haritası-1	60
Şekil 27.	Çanakkale batimetri haritası-2	60
Şekil 28.	Marine Traffic online haritası rüzgâr hızları	61
Şekil 29.	Sayısallaştırılmış rüzgâr dağılım haritası	62



Şekil 30.	Gemi rotaları haritası	63
Şekil 31.	Çanakkale REPA trafo merkezleri ve enerji nakil hatları	64
Şekil 32.	Çanakkale trafo merkezleri haritası.....	64
Şekil 33.	Kandilli Rasathanesi Çanakkale fay hatları haritası	65
Şekil 34.	Sayısallaştırılmış Çanakkale fay hatları haritası.....	66
Şekil 35.	Eşit ağırlıklı kriterler ile belirtilmiş en uygun alternatif bölgeler haritası	67
Şekil 36.	Kriter ağırlık önceliklerine göre belirlenmiş en uygun yer seçimi	72
Şekil 37.	Düzenli dalga profili	75
Şekil 38.	Düzenli dalgalar.....	76
Şekil 39.	Feç mesafesi.....	80
Şekil 40.	Platform hareketleri	85
Şekil 41.	Panellere ayrılmış örnek platform	91
Şekil 42.	Rüzgâr üstü ve rüzgâr altı türbinler	94
Şekil 43.	FAST program şeması	100
Şekil 44.	FAST program bileşenleri	100
Şekil 45.	NREL 5 MW referans türbin geometrisi	103
Şekil 46.	NREL 5 MW referans türbini ön görünüşü	104
Şekil 47.	Ön büküm optimizasyonu tanımı	113
Şekil 48.	NREL 5 MW OC-3 Hywind SPAR.....	117
Şekil 49.	OC-3 Hywind platform ileri öteleme hareketi statik ofset testi.....	119
Şekil 50.	OC-3 Hywind platform yanal öteleme hareketi statik ofset testi	119
Şekil 51.	OC-3 Hywind platform dalıp-çıkma hareketi statik ofset testi.....	120
Şekil 52.	OC-3 Hywind platform yalpa hareketi statik ofset testi	120
Şekil 53.	OC-3 Hywind platform baş-kıç vurma hareketi statik ofset testi.....	120
Şekil 54.	OC-3 Hywind platform savrulma hareketi statik ofset testi	121
Şekil 55.	OC-3 Hywind 1- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	121
Şekil 56.	OC-3 Hywind 2- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	121
Şekil 57.	OC-3 Hywind 3- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	122
Şekil 58.	OC-3 Hywind 1- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda).....	122
Şekil 59.	OC-3 Hywind 2- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda).....	122
Şekil 60.	OC-3 Hywind 3- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda).....	123
Şekil 61.	OC-3 Hywind platform ileri öteleme hareketi serbest sönümleme testi.....	124
Şekil 62.	OC-3 Hywind platform yanal öteleme hareketi serbest sönümleme testi	124



Şekil 63.	OC-3 Hywind platform dalıp-çıkma hareketi serbest sönümlleme testi.....	124
Şekil 64.	OC-3 Hywind platform yalpa hareketi serbest sönümlleme testi	125
Şekil 65.	OC-3 Hywind platform baş-kıç vurma hareketi serbest sönümlleme testi.....	125
Şekil 66.	OC-3 Hywind platform savrulma hareketi serbest sönümlleme testi	125
Şekil 67.	OC-3 Hywind kule baş-kıç yer değıştirme hareketi serbest sönümlleme testi	126
Şekil 68.	OC-3 Hywind kule-platform baş-kıç yer değıştirme hareketi serbest sönümlleme testi	126
Şekil 69.	OC-3 Hywind kule bordadan-bordaya yer değıştirme hareketi serbest sönümlleme testi	127
Şekil 70.	OC-3 Hywind kule-platform bordadan- bordaya yer değıştirme hareketi serbest sönümlleme testi	127
Şekil 71.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ileri öteleme hareketi (türbin park durumunda).....	129
Şekil 72.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform yanal öteleme hareketi (türbin park durumunda).....	130
Şekil 73.	Sabit rüzgâr hızı altında OC-3 Hywind platform dalıp-çıkma hareketi (türbin park durumunda).....	130
Şekil 74.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform yalpa hareketi (türbin park durumunda).....	130
Şekil 75.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform baş-kıç vurma hareketi (türbin park durumunda).....	131
Şekil 76.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform savrulma hareketi (türbin park durumunda).....	131
Şekil 77.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	131
Şekil 78.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	132
Şekil 79.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	132
Şekil 80.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	132
Şekil 81.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	133
Şekil 82.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform tepki değeri (türbin park konumunda)	134



Şekil 83.	..Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)	135
Şekil 84.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)	135
Şekil 85.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)	135
Şekil 86.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ileri öteleme hareketi (türbin aktif).....	136
Şekil 87.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform yanıl öteleme hareketi (türbin aktif).....	136
Şekil 88.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform dalıp-çıkma hareketi (türbin aktif).....	137
Şekil 89.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform yalpa hareketi (türbin aktif).....	137
Şekil 90.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform baş-kıç vurma hareketi (türbin aktif).....	137
Şekil 91.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform savrulma hareketi (türbin aktif).....	138
Şekil 92.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	138
Şekil 93.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	138
Şekil 94.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	139
Şekil 95.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	139
Şekil 96.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	139
Şekil 97.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	140
Şekil 98.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform tepki değeri (türbin aktif durumda).....	141
Şekil 99.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif).....	142



Şekil 100.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif).....	142
Şekil 101.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif).....	142
Şekil 102.	Sabit rüzgâr hızı altında OC-3 Hywind rotor itkisi	143
Şekil 103.	Sabit rüzgâr hızlarına göre OC-3 Hywind rotor itkisi	143
Şekil 104.	Düzenli dalgalar altında (sinüs dalgası) OC-3 Hywind platform ve kule tepki genlik operatörleri (RAO).....	145
Şekil 105.	NREL 5 MW OC-4 DeepCwind yarı-batık (semi-sub).....	147
Şekil 106.	OC-4 DeepCwind yarı-batık platformu 1:50 test ölçeği modeli.	149
Şekil 107.	OC-4 DeepCwind platform kenarlarının yan görünümü.....	150
Şekil 108.	OC-4 DeepCwind deniz tabanı demirleme düzeni	154
Şekil 109.	OC-4 DeepCwind platform ileri öteleme hareketi statik ofset testi	155
Şekil 110.	OC-4 DeepCwind platform yanal öteleme hareketi statik ofset testi	155
Şekil 111.	OC-4 DeepCwind platform dalıp-çıkma hareketi statik ofset testi	156
Şekil 112.	OC-4 DeepCwind platform yalpa hareketi statik ofset testi.....	156
Şekil 113.	OC-4 DeepCwind platform baş-kıç vurma hareketi statik ofset testi.....	156
Şekil 114.	OC-4 DeepCwind platform savrulma hareketi statik ofset testi.....	157
Şekil 115.	OC-4 DeepCwind 1 numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	157
Şekil 116.	OC-4 DeepCwind 2 numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	158
Şekil 117.	OC-4 DeepCwind 3 numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	158
Şekil 118.	OC-4 DeepCwind 1 numaralı halat gerilmesi statik ofset testi (demirleme ucunda)	158
Şekil 119.	OC-4 DeepCwind 2 numaralı halat gerilmesi statik ofset testi (demirleme ucunda)	159
Şekil 120.	OC-4 DeepCwind 3 numaralı halat gerilmesi statik ofset testi (demirleme ucunda)	159
Şekil 121.	OC-4 DeepCwind platform su altı kısmı destekli(a) ve desteksiz (b) [6].	160
Şekil 122.	OC-4 DeepCwind platform ileri öteleme hareketi serbest sönümlleme testi karşılaştırması	161
Şekil 123.	OC-4 DeepCwind platform yanal öteleme hareketi serbest sönümlleme testi karşılaştırması	161
Şekil 124.	OC-4 DeepCwind platform dalıp-çıkma hareketi serbest sönümlleme testi karşılaştırması	161



Şekil 125. OC-4 DeepCwind platform yalpa hareketi serbest sönümleme testi karşılaştırması.....	162
Şekil 126. OC-4 DeepCwind platform baş-kıç vurma hareketi serbest sönümleme testi karşılaştırması.....	162
Şekil 127. OC-4 DeepCwind platform savrulma hareketi serbest sönümleme testi karşılaştırması.....	162
Şekil 128. OC-4 DeepCwind kule baş-kıç (fore-aft) yer değiştirme hareketi serbest sönümleme testi karşılaştırması.....	163
Şekil 129. OC-4 DeepCwind kule-platform baş-kıç (fore-aft) yer değiştirme hareketi serbest sönümleme testi karşılaştırması.....	163
Şekil 130. OC-4 DeepCwind kule bordadan-bordaya (side-side) yer değiştirme hareketi serbest sönümleme testi karşılaştırması.....	164
Şekil 131. OC-4 DeepCwind kule-platform bordadan-bordaya (side-side) yer değiştirme hareketi serbest sönümleme testi karşılaştırması.....	164
Şekil 132. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ileri öteleme hareketi (türbin park durumunda).....	166
Şekil 133. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform yanal öteleme hareketi (türbin park durumunda).....	166
Şekil 134. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform dalıp-çıkma hareketi (türbin park durumunda).....	167
Şekil 135. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform yalpa hareketi (türbin park durumunda).....	167
Şekil 136. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform baş-kıç vurma hareketi (türbin park durumunda).....	167
Şekil 137. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform savrulma hareketi (türbin park durumunda).....	168
Şekil 138. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	168
Şekil 139. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	168
Şekil 140. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	169
Şekil 141. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	169



Şekil 142.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	169
Şekil 143.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda).....	170
Şekil 144.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform tepki değerleri (türbin park konumunda).....	171
Şekil 145.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)	172
Şekil 146.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)	172
Şekil 147.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)	172
Şekil 148.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ileri öteleme hareketi (türbin aktif).....	173
Şekil 149.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform yanıl öteleme hareketi (türbin aktif).....	173
Şekil 150.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform dalıp-çıkma hareketi (türbin aktif).....	174
Şekil 151.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform yalpa hareketi (türbin aktif).....	174
Şekil 152.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform baş-kıç vurma hareketi (türbin aktif).....	174
Şekil 153.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform savrulma hareketi (türbin aktif).....	175
Şekil 154.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif).....	175
Şekil 155.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif).....	175
Şekil 156.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif).....	176
Şekil 157.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif).....	176
Şekil 158.	Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif).....	176



Şekil 159. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	177
Şekil 160. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform tepki değerleri (türbin aktif).....	178
Şekil 161. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	179
Şekil 162. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	179
Şekil 163. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)	179
Şekil 164. Sabit rüzgâr hızı altında OC-4 DeepCwind rotor itkisi	180
Şekil 165. Sabit rüzgâr hızlarına göre OC-4 DeepCwind rotor itki tepkisi	180
Şekil 166. Sabit rüzgâr hızlarına göre düzeltilmiş OC-4 DeepCwind rotor itkisi	181
Şekil 167. Düzenli dalgalar altında (sinüs dalgası) OC-4 DeepCwind platform ve kule RAO'ları	182
Şekil 168. NAUTILUS-DTU konsepti	183
Şekil 169. NAUTILUS-DTU yapısı	185
Şekil 170. NAUTILUS-DTU bağlantı sistemleri düzeni.....	187
Şekil 171. NAUTILUS-DTU platform ileri öteleme hareketi statik ofset testi.....	189
Şekil 172. NAUTILUS-DTU platform yanal öteleme hareketi statik ofset testi.....	189
Şekil 173. NAUTILUS-DTU platform dalıp-çıkma hareketi statik ofset testi.....	189
Şekil 174. NAUTILUS-DTU platform yalpa hareketi statik ofset testi	190
Şekil 175. NAUTILUS-DTU platform baş-kıç vurma hareketi statik ofset testi	190
Şekil 176. NAUTILUS-DTU platform savrulma hareketi statik ofset testi	190
Şekil 177. NAUTILUS-DTU 1- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	191
Şekil 178. NAUTILUS-DTU 2- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	191
Şekil 179. NAUTILUS-DTU 3- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	191
Şekil 180. NAUTILUS-DTU 4- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)	192
Şekil 181. NAUTILUS-DTU 1- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda) ...	192
Şekil 182. NAUTILUS-DTU 2- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda) ...	192
Şekil 183. NAUTILUS-DTU 3- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda) ...	193
Şekil 184. NAUTILUS-DTU 4- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda) ...	193
Şekil 185. NAUTILUS-DTU platform ileri öteleme hareketi serbest sönümlleme testi..	194



Şekil 186. NAUTILUS-DTU platform dalıp-çıkma hareketi serbest sönümlleme testi...	194
Şekil 187. NAUTILUS-DTU platform baş-kıç vurma hareketi serbest sönümlleme testi	195
Şekil 188. NAUTILUS-DTU platform savrulma hareketi serbest sönümlleme testi	195
Şekil 189. NAUTILUS-DTU kule baş-kıç (fore-aft) yer değıştirme hareketi serbest sönümlleme testi	196
Şekil 190. NAUTILUS-DTU kule-platform baş-kıç (fore-aft) yer değıştirme hareketi serbest sönümlleme testi	196
Şekil 191. NAUTILUS-DTU kule bordadan-bordaya (side-side) yer değıştirme hareketi serbest sönümlleme testi	196
Şekil 192. NAUTILUS-DTU kule-platform bordadan-bordaya (side-side) yer değıştirme hareketi serbest sönümlleme testi	197
Şekil 193. NAUTILUS-DTU gelen basamak rüzgâr profili.....	198
Şekil 194. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform ileri öteleme hareketi...	199
Şekil 195. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform yanal öteleme hareketi.	199
Şekil 196. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform dalıp-çıkma hareketi....	199
Şekil 197. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform yalpa hareketi	200
Şekil 198. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform baş-kıç vurma hareketi	200
Şekil 199. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform savrulma hareketi	200
Şekil 200. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında kule baş-kıç vurma (fore-aft) eğilme momenti analizi	201
Şekil 201. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında kule bordadan-bordaya (side-side) eğilme momenti analizi.....	201
Şekil 202. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 1 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)	201
Şekil 203. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 1 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)	202
Şekil 204. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 2 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)	202
Şekil 205. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 2 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)	202
Şekil 206. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 3 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)	203
Şekil 207. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 3 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)	203



Şekil 208. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 4 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)	203
Şekil 209. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 4 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)	204
Şekil 210. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında jeneratör torku	204
Şekil 211. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında jeneratör çıkış gücü	205
Şekil 212. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında jeneratör hızı	205
Şekil 213. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında kanat hatveleri (3- kanat için ortak).....	206
Şekil 214. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında rotor hızı.....	206
Şekil 215. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında nasele ivmesi.....	207
Şekil 216. Düzenli dalgalar altında (sinüs dalgası) NAUTILUS-DTU platform ve kule tepki genlik operatörleri (RAO).....	209
Şekil 217. LIFES50+ OO-STAR konsepti	210
Şekil 218. LIFES50+ OO-STAR kule tanımı	212
Şekil 219. LIFES50+ OO-STAR yarı-batık (semi-sub) platformu.....	213
Şekil 220. LIFES50+ OO-STAR bağlama sistemleri düzeni	214
Şekil 221. LIFES50+ OO-STAR Platform ileri öteleme hareketi statik ofset testi	216
Şekil 222. LIFES50+ OO-STAR Platform yanıl öteleme hareketi statik ofset testi.....	216
Şekil 223. LIFES50+ OO-STAR Platform dalıp-çıkma hareketi statik ofset testi	217
Şekil 224. LIFES50+ OO-STAR Platform yalpa hareketi statik ofset testi	217
Şekil 225. LIFES50+ OO-STAR Platform baş-kıç vurma hareketi statik ofset testi	217
Şekil 226. LIFES50+ OO-STAR Platform savrulma hareketi statik ofset testi	218
Şekil 227. LIFES50+ OO-STAR 1- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda). 218	
Şekil 228. LIFES50+ OO-STAR 2- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda). 218	
Şekil 229. LIFES50+ OO-STAR 3- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda). 219	
Şekil 230. LIFES50+ OO-STAR 1- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda).....	219
Şekil 231. LIFES50+ OO-STAR 2- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)	219
Şekil 232. LIFES50+ OO-STAR 3- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)	220
Şekil 233. LIFES50+ OO-STAR platform ileri öteleme hareketi serbest sönümleme testi.....	221



Şekil 234.	LIFES50+ OO-STAR platform yanıl öteleme hareketi serbest sönümleme testi.....	221
Şekil 235.	LIFES50+ OO-STAR platform baş-kıç vurma hareketi serbest sönümleme testi.....	222
Şekil 236.	LIFES50+ OO-STAR platform savrulma hareketi serbest sönümleme testi..	222
Şekil 237.	LIFES50+ OO-STAR kule baş-kıç (fore-aft) yer değıştirme hareketi serbest sönümleme testi	223
Şekil 238.	LIFES50+ OO-STAR kule-platform baş-kıç (fore-aft) yer değıştirme hareketi serbest sönümleme testi	223
Şekil 239.	LIFES50+ OO-STAR kule bordadan-bordaya (side-side) yer değıştirme hareketi serbest sönümleme testi	223
Şekil 240.	LIFES50+ OO-STAR kule-platform bordadan-bordaya (side-side) yer değıştirme hareketi serbest sönümleme testi	224
Şekil 241.	LIFES50+ OO-STAR gelen basamak rüzgâr profili	225
Şekil 242.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform ileri öteleme hareketi	225
Şekil 243.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform yanıl öteleme hareketi	226
Şekil 244.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform dalıp-çıkma hareketi	226
Şekil 245.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform yalpa hareketi.....	226
Şekil 246.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform baş-kıç vurma hareketi	227
Şekil 247.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform savrulma hareketi...	227
Şekil 248.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında kule baş-kıç vurma (fore-aft) eğilme momenti analizi.....	227
Şekil 249.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında kule bordadan-bordaya (side-side) eğilme momenti analizi.....	228
Şekil 250.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 1 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda).....	228
Şekil 251.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 1 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)	228
Şekil 252.	LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 2 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda).....	229



Şekil 253. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 2 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)	229
Şekil 254. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 3 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)	229
Şekil 255. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 3 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)	230
Şekil 256. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında jeneratör torku	230
Şekil 257. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında jeneratör çıkış gücü	231
Şekil 258. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında jeneratör hızı	231
Şekil 259. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında kanat hatveleri (3- kanat için ortak)	232
Şekil 260. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında rotor hızı	232
Şekil 261. LİFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında nasel ivmesi	233
Şekil 262. Düzenli dalgalar altında (sinüs dalgası) LİFES50+ OO-STAR platform ve kule tepki genlik operatörleri (RAO)	235
Şekil 263. Düzensiz dalga ve rüzgâr altında platform dalıp-çıkma hareketleri	237
Şekil 264. Düzensiz dalga ve rüzgâr altında platform ileri öteleme hareketleri	237
Şekil 265. Düzensiz dalga ve rüzgâr altında platform baş-kıç vurma hareketleri	238
Şekil 266. Kıyıdan uzaklık aralığına göre maliyet katsayısı	245
Şekil 267. Eskalasyon oranına göre yatırım ve birim enerji maliyetlerinin değişimi ($i = \%6$, $N_e = 120$ MW)	258
Şekil 268. Eskalasyon oranına göre geri ödeme süresinin değişimi ($i = \%6$, $N_e = 120$ MW)	259
Şekil 269. Faiz oranına göre yatırım ve birim enerji maliyetlerinin değişimi ($e = \%8$, $N_e = 120$ MW)	259
Şekil 270. Faiz oranına göre geri ödeme süresi değişimi ($e = \%8$, $N_e = 120$ MW)	260



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Stabilizasyon ve hareket uyumlarına göre platform sınıflandırılması	12
Tablo 2. Standart düzeltme (rassallık) değerleri	33
Tablo 3. Bulanık ölçüt karşılaştırma dereceleri	40
Tablo 4. CBS kullanım alanları	41
Tablo 5. Açık deniz rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları	47
Tablo 6. Yüzeyle ait pürüzlülük uzunlukları	49
Tablo 7. İkili karşılaştırma matrisleri ve bulanık ağırlıklar	68
Tablo 8. Durulaştırılmış kriterler öncelik değerleri	71
Tablo 9. Normalize edilmiş kriter öncelik değerleri	72
Tablo 10. NREL 5 MW referans türbini belirlenen özellikleri	102
Tablo 11. NREL 5 MW referans türbin kanat yapısal özellikleri	105
Tablo 12. Dağıtım kanat aerodinamik özellikleri	106
Tablo 13. Göbek ve nasel özellikleri	108
Tablo 14. Sürücü özellikleri	109
Tablo 15. Kule özellikleri	110
Tablo 16. DTU 10 MW referans rüzgâr türbini genel özellikleri	112
Tablo 17. OC-3 Hywind kule özellikleri	115
Tablo 18. OC-3 Hywind platform ana özellikleri	116
Tablo 19. OC-3 Hywind bağlama sistemleri genel özellikleri	118
Tablo 20. OC-3 Hywind platform 6 serbestlik dereceli hareketi başlangıç koşulları	123
Tablo 21. OC-3 halat gerilmeleri (pre-tensions)	123
Tablo 22. OC-3 Hywind platform doğal frekansları	127
Tablo 23. OC-3 Hywind kule doğal frekansları	128
Tablo 24. OC-3 Hywind platform doğal frekansları (Hz) uygulama ile deneysel verilerin karşılaştırılması	128
Tablo 25. OC-3 Hywind kule doğal frekansları (Hz) uygulama ile deneyse verilerin karşılaştırılması	129
Tablo 26. Sabit 18 m/s rüzgâr altında zamana bağlı sonuçların karşılaştırması	144
Tablo 27. OC-4 DeepCwind kule özellikleri	148



Tablo 28. OC-4 DeepCwind Platform ana özellikleri	150
Tablo 29. Elemanların geometrik özellikleri.....	152
Tablo 30. OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri genel özellikleri.....	153
Tablo 31. OC-4 DeepCwind platform 6 serbestlik dereceli hareketi başlangıç koşulları..	159
Tablo 32. OC-4 halat gerilmeleri	160
Tablo 33. OC-4 DeepCwind platform doğal frekansları karşılaştırmalı	164
Tablo 34. OC-4 DeepCwind kule doğal frekansları.....	165
Tablo 35. OC-4 DeepCwind platform doğal frekansları (rad/s) uygulama ile deneysel verilerin karşılaştırılması	165
Tablo 36. Rotor itkileri karşılaştırmaları.....	181
Tablo 37. NAUTILUS-DTU kule özellikleri.....	184
Tablo 38. NAUTILUS-DTU yarı-batık platform özellikleri aktif balast durumunda ve aktif balast yokken	186
Tablo 39. NAUTILUS-DTU yarı-batık platformu pasif beton balastların özellikleri	186
Tablo 40. NAUTILUS-DTU bağlama sistemleri genel özellikleri	187
Tablo 41. NAUTILUS-DTU platform 6 serbestlik dereceli hareketi başlangıç koşulları .	193
Tablo 42. NAUTILUS-DTU halat gerilmeleri.....	193
Tablo 43. NAUTILUS-DTU kule doğal frekansları	197
Tablo 44. NAUTILUS-DTU platform doğal frekansları (Hz) uygulama ile deneysel verilerin karşılaştırılması	198
Tablo 45. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform hareketleri zamana bağlı simülasyon sonuçları	207
Tablo 46. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında kule hareketleri zamana bağlı simülasyon sonuçları	208
Tablo 47. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında bağlama sistemleri halat gerilmeleri zamana bağlı simülasyon sonuçları	208
Tablo 48. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında diğer büyüklükler zamana bağlı simülasyon sonuçları.....	208
Tablo 49. LIFES+ OO-STAR kule özellikleri	211
Tablo 50. LIFES50+ OO-STAR yarı-batık platform özellikleri (balast dahil).....	213
Tablo 51. LIFES50+ OO-STAR dağıtımli yapısal özellikler	214
Tablo 52. LIFES50+ OO-Star bağlama sistemleri genel özellikleri	215
Tablo 53. LIFES50+ platform 6 serbestlik dereceli hareketi başlangıç koşulları	220



Tablo 54. LIFES50+ OO-STAR halat gerilmeleri	220
Tablo 55. LIFES50+ OO-STAR platform doğal frekansları	224
Tablo 56. LIFES50+ OO-STAR kule doğal frekansları	224
Tablo 57. LIFES50+ OO-STAR platform doğal frekansları (Hz) uygulama ile sayısal çalışmanın karşılaştırılması	224
Tablo 58. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform hareketleri zamana bağlı simülasyon sonuçları	233
Tablo 59. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında kule hareketleri zamana bağlı simülasyon sonuçları	234
Tablo 60. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında bağlama sistemleri halat gerilmeleri zamana bağlı simülasyon sonuçları	234
Tablo 61. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında diğer büyüklükler zamana bağlı simülasyon sonuçları	234
Tablo 62. Alternatif bölge seçimi için platformların doğal periyot (s) karşılaştırmaları ...	236
Tablo 63. Alternatif bölge seçimi için platformların doğal frekans karşılaştırmaları (rad/s)	236
Tablo 64. Rüzgâr altında platform tepkilerinin karşılaştırması ($U_w = 12$ m/s, $h_s = 6$ m) ...	238
Tablo 65. Alternatif bölge çevresel koşulları ve operasyonlar	239
Tablo 66. Seçili operasyonlar için simülasyon sonuçları	241
Tablo 67. Operasyonlar altında bağlama sistemi gerilmeleri (platform ve demirleme ucunda)	242
Tablo 68. Derinliğin platform hareketlerine ve performansa etkisi	243
Tablo 69. Derinliğe göre bağlama sistemi halatları gerilmeleri (kN)	243
Tablo 70. Su derinliğine bağlı olarak açık deniz rüzgâr enerjisi yatırım maliyetleri (€/kW)	246
Tablo 71. Kıyıya olan uzaklığa bağlı olarak açık deniz rüzgâr enerjisi yatırım maliyetleri (€/kW)	246
Tablo 72. Birim maliyet hesabında kullanılan değerler	246
Tablo 73. Maliyet dağılımları	247
Tablo 74. İnşaat süresince eskalasyon hesabı (eskalasyon oranı $e = \%8$)	248
Tablo 75. İnşaat süresince faiz hesabı (faiz oranı $i = 6$)	248
Tablo 76. Tesis sermaye maliyet hesabı	250
Tablo 77. Tesis işletme ve onarım maliyeti hesabı	253
Tablo 78. Devlet yerli imalat teşvikleri	255



Tablo 79. Kaynak türüne göre birim enerji alım fiyatı.....	256
--	-----



SEMBOLLER DİZİNİ

A	: İkili karşılaştırma matrisi
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ABS	: Amerikan Loydu (American Bureau of Shipping)
AHP	: Analitik Hiyerarşi Prosesi (Analytic Hierarchy Process)
a_{ij}	: i ve j ölçütleri için karşılaştırma değeri
A_{ij}	: Ek su kütlesi matrisi
A_s	: Rotor süpürme alanı
BEM	: Sınır eleman yöntemi (Boundary Element Method)
BEMT	: Kana teleman moment teorisi (Blade Element Momentum Theory)
B_{jk}	: Hidrostatik sönüm kuvveti katsayıları matrisi
BV	: Fransız Loydu (Brueau Veritas)
c	: Dalga hızı
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design)
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri (Geographical Information Systems)
C_h	: Hidrostatik kuvvetler matrisi
CI	: Tutarlılık indeksi (Consistency Index)
C_{jk}	: Hidrostatik geri getirici kuvvet katsayıları matrisi
CLASSNK	: Japon Loydu (Class Nippon Kaiji Kyokasi)
C_M	: Bağlama sistemi kuvvetleri matrisi
c_p	: Betz limiti
CR	: Tutarlılık oranı (Consistency Ratio)
C_T	: Geri getirici toplam kuvvetler matrisi
D	: Rotor çapı [m]
d	: Deniz derinliği [m]
DNV	: Norveç Loydu (Det Norske Veritas)
DOE	: ABD Enerji Bakanlığı (U.S. Department of Energy)
DOWEC	: Hollanda Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Dönüştürücüsü (Dutch Offshore Wind Energy Converter)
DTU	: Danimarka Teknik Üniversitesi (Danmarks Tekniske Universitet)
DU	: Delft Teknoloji Üniversitesi (Technische Universiteit Delft)
F_a	: Aerodinamik kuvvetler



F- AHP	: Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (Fuzzy- Analytical Hierarchy Process)
FAST	: Yorulma, aerodinamik, yapı ve türbülans birleşik analizi gerçekleştiren paket program (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulance)
F^D	: Kırınım dalga potansiyel kuvveti
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
F_h	: Hidrodinamik kuvvetler
F^I	: Gelen dalga potansiyel kuvveti
F^R	: Radyasyon (yayınım) dalga potansiyel kuvveti
F_t	: Yapıya etkileyen toplam dış yükler
G	: Ağırlık merkezi konumu
g	: Yer çekimi ivmesi [m/s^2]
GDW	: Genelleştirilmiş Dinamik İz Teorileri (Generalized DynamicWake)
GL	: Alman Loydu (Germanischer Lloyd)
GWEC	: Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council)
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
hub	: Türbin göbek grubu
$I_{xx,yy,xy}^W$	: Su hattı alanı atalet momentleri
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
I_{jj}	: Yapısal atalet momentleri
ISSC	: Uluslararası Gemi ve Deniz Yapıları Kongresi (International Ship and Offshore Structures Congress)
JONSWAP	: Ortak Kuzey Denizi Gözlem Projesi (Joint North Sea Observation Project)
LCOE	: Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (Levelized Cost of Energy)
MARIN	: Hollanda Denizcilik Enstitüsü (Maritime Institute of the Netherlands)
NACA	: Havacılık Alanında Ulusal Danışma Komitesi (National Advisory Committee for Aeronautics)
NREL	: Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory)
NWTC	: Ulusal Rüzgâr Teknolojisi Merkezi (National Wind Technology Center)
OC	: Offshore Kod Karşılaştırma İşbirliği (Offshore Code Comparison Collaboration)



OCS	: ABD Açıkdeniz Kıta Sahanelığı (U.S Outer Continental Shelf)
O&M	: İşletme ve bakım (Operation and Maintenance)
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations)
RAO	: Tepki genlik operatörleri (Response Amplitude Operators)
REPA	: Rürkiye Rüzgâr Enerji Potansiyeli Atlası
RES	: Rüzgâr enerjisi santrali
RI	: Rassallık değeri (Random Index)
RWT	: Referans rüzgâr türbini (Reference Wind Turbine)
SPAR	: Safralı tip platform
SWL	: Serbest su yüzeyi (Still Water Level)
T	: Dalga periyodu [s]
TLP	: Gergi ayaklı platform (Tension Leg Platform)
u	: Akışkan hızı [m/s]
V	: Rüzgâr hızı [m/s]
WGS	: Dünya Jeodezik Sistemi (World Geodetic System)
Windpact	: Gelişmiş Bileşen Teknolojisi için Rüzgâr Ortaklığı (Wind Partnership for Advanced Component)
W_i	: Öncelik vektörü
YEKA	: Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı
z_0	: Pürüzlülük yüksekliğı [mm]
λ	: Dalga boyu [m]
ρ	: Rüzgâr yoğunluğu [kg/m ³]
ϕ	: Hız potansiyeli
ω	: Dalga frekansı [rad/s]
∇	: Yapı hacmi

XXX



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkan gereksinimlerin artmasından dolayı her geçen gün artan elektrik enerjisi tüketimi, üreticileri ve kullanıcıları yeni ve çevre uyumlu enerji kaynakları aramaya zorlamaktadır. Kömür ve petrol gibi fosil yakıtların gerek çevreye olumsuz etkileri gerekse de sınırlı ve tükenecek kaynaklar olmaları nedeniyle alternatif enerji kaynakları bulunması ihtiyacı doğmuş ve doğanın kendi döngüsü içinde bir sonraki gün tekrar var olabilen sürekliliğe sahip yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim başlamıştır. Güneş, hidro, rüzgâr, akıntı, gel-git ve dalga enerjisi şeklinde sıralanabilen yenilenebilir enerji kaynakları, karbondioksit emisyonlarını azaltarak doğanın korunmasına yardımcı olduğu gibi, enerjide dışa bağımlılığı azaltmakta ve aynı zamanda istihdamın artmasına da katkı sağlamaktadır [1]. Sonsuz enerji potansiyeli ve sürekliliği göz önüne alındığında rüzgâr enerjisi diğer enerji türlerine göre daha ön plana çıkmaktadır.

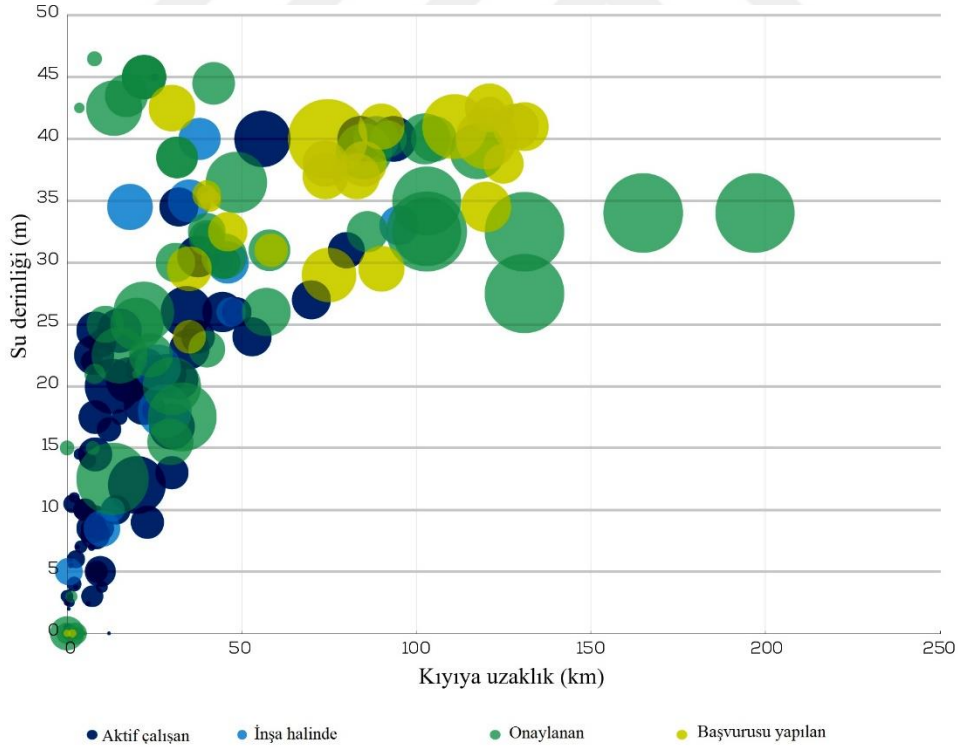
Tarih boyunca, başta değirmenler olmak üzere yelkenli gemilerin deniz ulaşımında kullanılması gibi alanlarda rüzgâr gücünden faydalanılmıştır. Son yıllarda ise gelişen teknoloji ile elektrik üretiminde de rüzgâr gücü kullanılmaktadır. Başta Almanya, Danimarka ve İspanya olmak üzere A.B.D gibi gelişmiş ülkelerin yanı sıra Hindistan ve Çin gibi gelişmekte olan ülkeler de rüzgâr gücü ilgili çalışmalarını artırmaktadır. Ülkemizde de rüzgâr gücünden faydalanarak enerji üretimi son yıllarda artış göstermektedir.

Çevreyi kirletmeyen bir enerji kaynağı olan rüzgâr gücü ile elektrik üretimi, 1800'lü yıllarda yalnızca 12 kW'lık Brush türbinleri kullanımı ile gerçekleşirken, günümüzde daha da geliştirilerek elektrik üretiminde kilit bir unsur olmuştur [2]. Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC), 2001 yılında küresel olarak kurulu rüzgâr gücünü 23900 MW olarak belirtirken, bu sayı 15 yılda yaklaşık 20 kat artış göstererek 2016 yılında 486000 MW'a [3], 2019 yılında ise 51,3 GW yeni kurulum ile birlikte toplam kurulu güç miktarı 591 GW'a yükselmiştir ve 2023 yılına kadar her yıl kara ve açık deniz kurulumu olmak üzere 55GW'lık kurulum hedeflenmektedir [4].



İklim etkileri nedeniyle de açık deniz rüzgâr santrallerinin sayısı ve ölçeği her geçen gün artmaktadır. Açık deniz rüzgâr türbinleri, karadaki santrallere göre birtakım avantajlar sağlamaktadır.

Denizlerdeki basınç farklarının karalara oranla daha fazla olması ve denizlerdeki açık alanların daha fazla olması nedeniyle, deniz üzerindeki rüzgâr enerji potansiyeli daha kararlı ve daha fazladır. Bu nedenlerle açık denizlerde rüzgâr çiftlikleri kurulumu ve buralardan enerji üretimi giderek yaygınlaşmaktadır. Bunun yanında ekonomik zorluklar ve bir takım hidrodinamik karmaşıklıklar ortaya çıkmaktadır [5]. Açık deniz rüzgâr gücünün ilerlemesi de petrol ve gaz endüstrisinin ilk günlerine benzemektedir. 20. yüzyılın başlarında, denizde ilk petrol arayışı sabit yapılar kullanılarak sığ sularda gerçekleşmiştir. Yıllar geçtikçe, yüzer platformların geliştirilmesi daha derin sularda çalışılmasını mümkün kılmıştır. İlk açık deniz rüzgâr platformu, Danimarka’da Vindeby çiftliği, 1991 yılında açılmış ve 2017 yılında kullanım dışı bırakılmıştır. Kurulumun ilk yıllarında 450 kW olan türbin kapasitesi son yıllarda 10-15 MW’ lara ulaşmıştır [6].



Şekil 1. 2016 yılı gelişme durumuna göre sabit yapıların ortalama su derinlikleri. Dairelerin boyutu saha genişliğini göstermektedir [6, 7].



Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC), bu açık deniz tesislerinin %90'nı Avrupa sularında olduğunu belirtmektedir. Çin, Japonya, Güney Kore, Tayvan ve ABD pazarları da küresel ilgi doğrultusunda önemli ölçüde büyüme göstermektedir. Açık deniz kurulumlarının durumu, rüzgâr santrallerinin kıyıdan daha derin sulara hareket ettiğini ortaya koymaktadır. 2013 yılındaki aktif olan rüzgâr santrallerinin 16 m ortalama su derinliği ve 29 km kıyı mesafesi, 2016 yılı sonunda önemli bir artış göstererek, ortalama su derinliği 29,2 m ve kıyıya olan ortalama mesafe ise 43,5 km olmuştur [7]. Şekil 1.'de 2016 yılındaki açık deniz rüzgâr gücü durumu gösterilmiştir. Kıyıya olan uzaklık giderek arttığından buralarda sabit platformlar yetersiz kalacak ve yüzer platformlar daha sık gündeme gelecektir.

Açık deniz rüzgâr türbinleri yatay eksenli türbinlerdir. Bu tip türbinler bir kule ve kulenin tepesinde nasel içerisinde bir elektrik jeneratöründen oluşmaktadır. Jeneratör doğrudan veya bir dişli kutusu vasıtası ile göbek grubuna (hub) ve türbin kanatlarına bağlanabilir. Deniz derinliğine göre kulenin üzerinde duracağı platform tipleri farklılık göstermektedir. Su derinliği 30 metreye kadar olan bölgelerde türbin tek kazık üzerinde olup, bu kazık deniz yatağına çakılıdır. Su derinliği 50 metreye kadar olan bölgelerde ise; türbin kulesi daha geniş bir tabana sahip olan kafes yapısına monte şeklindedir. Daha da derin sularda ise sadece yüzer sistemler uygulanabilmektedir. Buna rağmen sadece kıyıya yakın bölgelerin sığ su olması, burada kurulu sistemler açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle kıyıya yakın türbinler kıyı görünümünü engelleyebilir ve su taşıtları ile uçaklar için seyir engelleri ve potansiyel tehlikeler oluşturabilmektedir.

Platform, yüzer rüzgâr türbinlerinin tanımlayıcı unsurudur. Yüzdürücü üzerindeki hareketler ve yükler, yüzer ve sabit yapıları birbirinden ayıran iki önemli faktördür. Açık deniz platformları hakkındaki temel bilgiler, petrol ve gaz endüstrisinden kazanılan deneyimlere dayanmaktadır. Bununla birlikte ek olarak aerodinamik yükler, bu yeni rüzgâr gücü alanında hareket davranışının farklı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bu birleşik yüklere odaklanmak için kazanılan bilgilerin güncellenmesi ve yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir [6]. Bu kapsamda, son araştırmalar ve projeler yarı-batık platformlar (semi-submersible), gergi ayaklı platformlar (TLP) ve safralı tip platformlar (SPAR) üzerine gerçekleşmiştir. Platformların farklarını anlamak için dinamiklerini anlamak gerekmektedir.



1.2. Açık Deniz Rüzgâr Türbini Platform Konseptleri

Açık deniz rüzgâr türbini endüstrisi geliştikçe talebi karşılamak için önerilen platformların sayısı da önemli ölçüde artmış, yeni yeni yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerin her biri çeşitli yaklaşımlarla sınıflandırılmış farklı konfigürasyonlar kullanmaktadır. Stabilizasyon yöntemlerine bağlı olarak geliştirilen platformlar; “yüzdürme” (buoyancy), “balast stabilizasyonu” (ballast) ve “bağlama” (mooring) stabilize edilmiş platformlar olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır [8]. Uygulamada kullanılan platformlardan herhangi biri bu yapı yöntemlerinin bir kombinasyonuna dayanmaktadır.

Yarı-batık platformlar ve mavnalar (barge) bu sınıflandırmada “yüzdürme stabilize” yapılara örnek olarak verilebilir. İki tip platform da kaldırma kuvvetine bağlı olmaları bakımından birbirine benzemektedir. Ancak hacim dağılımları farklıdır. Mavnalar genellikle daha geniş bir su hattı alanına ve daha küçük bir su çekimine sahiptir. Diğer taraftan yarı-batık platformlar ise daha küçük bir su hattı alanı ile balastlamayı birleştirmektedir. Bu sebeple yarı-batık platformlar stabilite kitaplarında genellikle “kolon stabilize” olarak adlandırılmaktadır [9]. “Yüzdürme stabilize” platformların da “su hattı alanlı stabilize” olarak revize edilmesi, hacim dağılımı ile ilgili bu ayrımı açıklığa kavuşturmaktadır [6].

TLP, tendonları yardımıyla stabil hale gelmektedir ve bu sebeple “bağlama stabilize” yapılara örnektir. Daha derin sularda kullanılan tipping momentini engellemek için derin bir su çekimine ve ağır balasta sahip sütun şeklindeki SPAR platformlar ise “balast stabilize” yapılar altında sınıflanmaktadır. Bunlar göz önüne alındığında platform türleri Şekil 2.’deki gibi bir “stabilite üçgeni” içerisinde gösterilebilmektedir [6]. Aşağıda açıklanan bu 4 alternatifi ayrıca varyasyonları da mevcuttur (dalıp-çıkma hareketi kısıtlı TLP [10] gibi).

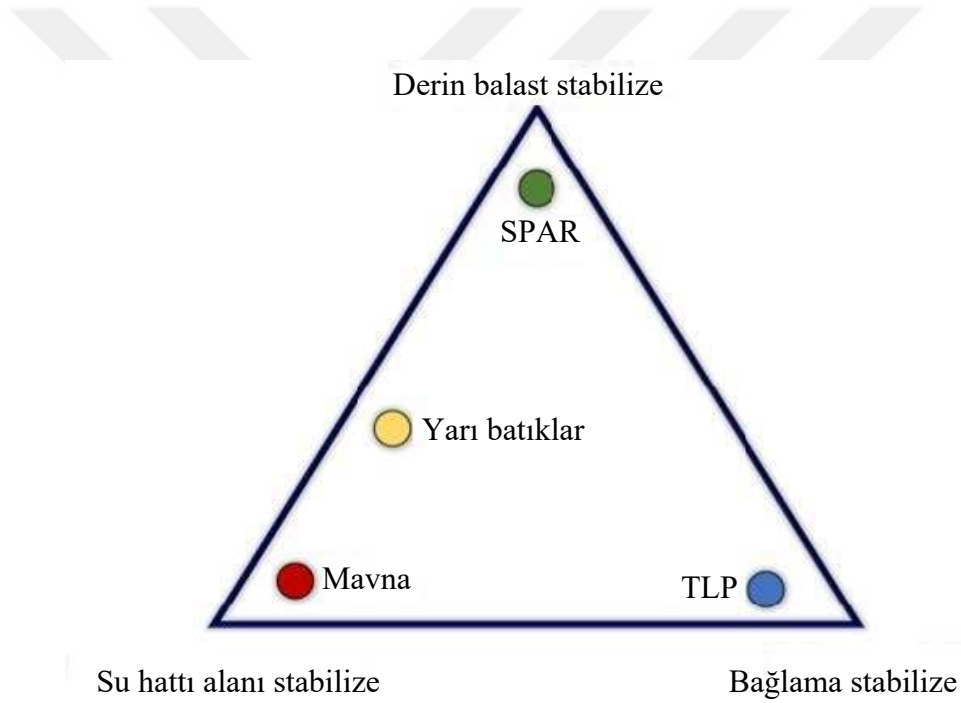
1.2.1. Su Hattı Alanlı Stabilize Platformlar

Mavnalar ve yarı-batık platformlar arasında, yarı-batık platformlar, uygun hareket dinamikleri nedeniyle hem petrol-gaz hem de rüzgâr enerjisi sektörlerinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Petrol ve doğalgaz sektörlerinde ilk nesilleri 1960’larda kullanılmaya başlanmış olup, günümüzde 6. nesil platformlar tasarlanmaya başlanmıştır. Bu nedenle, yarı-batık platformların iyi çalışılmış bir platform türü olduğunu söylemek mümkündür. Dalgalarda, özellikle de dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketine karşı kararlı yapıda oldukları için tercih edilmektedir. Platform boyutları ve karşılaşılan yükler açık deniz



rüzgâr ve petrol-gaz endüstrisi arasında farklılık gösterse de bu tip platformlar hala önemli türlerden olarak kabul edilmektedir.

Yarı-batık platformlar, su altında ana hacmi sağlayan kolonlar ve dubalardan meydana gelmektedir. Buradaki bağlantı elemanları, sistemin yapısal bütünlüğünü korumaktadır. Petrol ve gaz endüstrisinde güvertenin su seviyesinin üzerinde kalması için temeli dalgıç tekne formuna dayanan büyük hacimli dubalar ve kolonlar kullanılmaktadır. Rüzgâr türbini platformlarında ise bu konsept endüstrinin özel ihtiyaçlarına uyacak şekilde tasarlanmaktadır. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin yükünün daha düşük olması ve gerekli güverte alanının bu oranda eşit olarak azaltılmasından dolayı platform hacminin düşürülmesi de ekonomik olarak ekstra bir katkı sağlamaktadır [11].



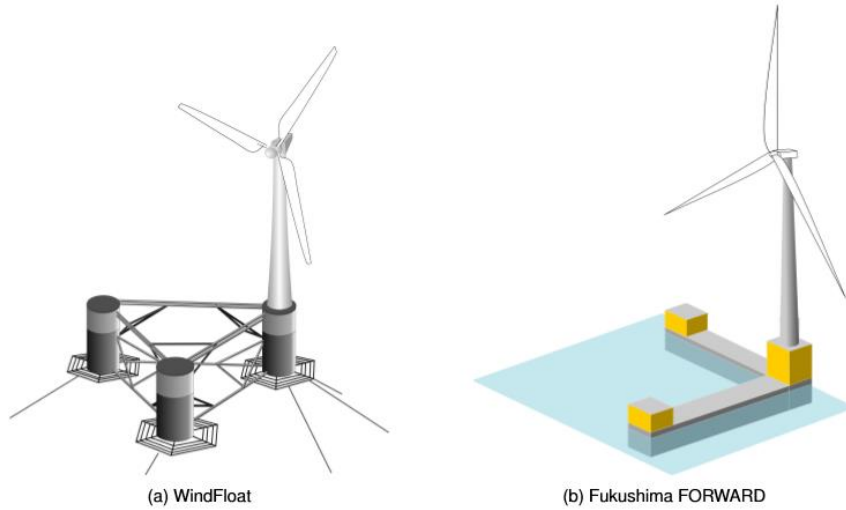
Şekil 2. Stabilité üçgeni ve stabilizasyon yöntemlerine göre platform tipleri [6].

Yarı-batık platformlar, kolon sayılarına göre farklı konseptler oluşturmaktadır. Platform kurulumu göz önüne alındığında, kolonlar arası mesafenin yapının hidrostatikliğini etkilediği görülmüştür. Bağlantı elemanları üzerindeki yükler ve yapısal bütünlük de her bir kolondan gelen momentlerin ve kuvvetlerin fonksiyonu olarak oluşmaktadır. Çok gövdeli (kolonlu) kurulum baş-kıç vurma ve yalpa hareketlerine karşı farklı balastlama seçenekleri sunmaktadır. Dalıp-çıkma hareketini azaltmak için ise yapının alt ucuna geniş yarı çaplı plakalar yerleştirilebilir [12, 13]. Bu tip platformlar oldukça küçük su hattı alanına sahip



olması nedeniyle dalıp-çıkma hareketi doğal frekansı, ekstrem hava ve deniz koşullarında bile dalga frekansından oldukça düşük kalmaktadır. Böylece yapının rezonansa girmesi zorlaşmış olur. Hidrostatik geri getirici kuvveti nedeni ile dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa hareketleri etkisiz hale gelmektedir. İleri öteleme, yanal öteleme ve savrulma hareketleri ise katener tip bağlantı sistemleriyle engellenmektedir.

Platform tasarımı karar aşamaları, kolon şekilleri (dikdörtgen veya silindirik), kule ve türbinin yerleşimini içermektedir. Şekil 3.'te örnek platform tipleri gösterilmiştir. Örneğin WindFloat platformu, açık deniz yüzer rüzgâr türbini teknolojisinin ilk uygulayıcılarından biridir. Burada bağlantı elemanları ile birbirine bağlanmış üç kolon bir araya gelmiştir [14, 15]. Türbin ise bu kolonlardan birine kule ile monte edilmiştir. DeepC rüzgâr konsorsiyumu tarafından tasarlanan yarı-batık platformda ise, türbin merkeze yerleştirilmiş ve dört kolon tarafından desteklenen farklı bir konfigürasyona sahiptir. Bağlantı elemanları olmayan modeller için ise tamamen farklı konseptler kullanılmaktadır. Japon Fukushima Konsorsiyumu [16, 17], dubalarla birbirine bağlanan ve “V” şeklinde yerleştirilmiş 3 dikdörtgen kolon kullanmaktadır. Bu platformlarda, türbin ve kule V'nin alt ucuna yerleştirilmiştir [17].



Şekil 3. Yarı-batık platform örnekleri [6].

Yarı-batık platformlar kurulumlarından dolayı da avantajlı durumdadır. Hidrostatik olarak stabil olan yapılar, karada inşa edildikten sonra çalışma yapacakları yere çekilebilirler. Bağlama sistemleri ve tasarım karmaşıklığı, TLP konseptlerine göre daha



düşüktür. Yapıyı stabilize etmek için bağlama sistemleri bu platform için bir faktör değildir. Platform geometrisi, çalışma derinliğine göre su çekimi (draft) ayarlaması yapılmasına müsaade etmektedir.

1.2.2. Bağlama Stabilize Platformlar

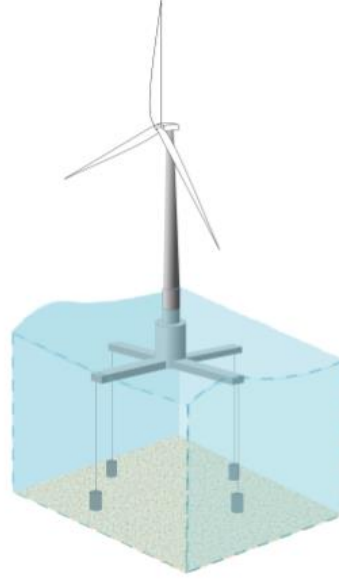
Petrol ve gaz endüstrisinde başlangıçta TLP konsept kullanımı, 1970'lerde daha derin sulardan faydalanmanın maliyetini azaltmanın etkin bir yolu olarak gerçekleştirilmiştir. İlk çalışma tesisi olan Hutton TLP, 1980'lerde Kuzey Denizi'nde Conoco tarafından başarıyla konuşlandırılmıştır [18]. TLP tiplerin ana özelliği, stabilizasyon özelliklerinde yatmaktadır. Sualtı geometrisinden kaynaklanan kaldırma kuvveti ile uygun şekilde dağıtılmış ağırlık arasındaki kuvvet dengesine güvenmek yerine, kararlılık gergin demirleme hatlarına bağlıdır. Bu kurulum, tendonlardan gelen ekstra sertlik nedeniyle hareketlere karşı direnç sağlar, bu da yalpa, baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketlerinin oldukça kısıtlanmasına neden olur. Bu platformlar, bu hareketlerle ilgili daha sabit bir yapı gibi davranırlar. Minimum baş-kıç vurma tepkisi aerodinamik performansı etkileyen önemli bir faktör olduğundan, güç üretimi açısından bir avantajdır [19, 20].

TLP hacmi ve yüzey alanı yarı dalgıçlardan genel olarak daha küçüktür. Bu durum, gelen dalgalardan kaynaklı yükleri azaltır. Su hattında oluşan korozyon direnci açısından da bir avantaj oluşturmaktadır. Alternatif bir geometri olarak, güverteyi taşıyan tek bir kolona bağlı kollar (teller) kullanarak yapısal ağırlığı en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu tip platformlar, SeaStar tasarımı olarak, 1990'larda geliştirilmiştir [21].

Tendon teli sayısı ve aralarındaki açı yapılandırmaya bağlı olarak değişir; ancak yaygın olarak 3 veya 4 tendonlu platformlar kullanılmaktadır. Şekil 4.'te Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tasarımı MIT/NREL TLP gösterilmiştir [22].

TLP'lerde optimizasyon parametreleri, tellerinin şekli (örnek; dikdörtgen veya silindirik), ekstra ağırlık yerleşimi ve genel gövde formlarıdır. Tendonların ana gövdeden uzaklığı, üzerlerindeki momentlerin değişiminde etkilidir. Katener demirleme ile karşılaştırıldığında, tendon uzunluğu daha kısadır. Tendon uzunluğu tendonun gövde üzerindeki bağlantı noktasından deniz tabanına olan doğrudan mesafeye eşittir. Rüzgâr türbini platformlarında, tendonların dalga kuvvetlerinin yanı sıra türbinden gelen aerodinamik yüklemeye karşı koyması gerekir. Bu nedenle, toplam bağlama yüklerinde artış olmaktadır.





Şekil 4. Sea-Star TLP [22].

Platformun bazı modlarındaki rijitliği, yüksek frekans oluşumuna neden olmaktadır. Bu sebeple, platform gövdesi ve bağlama sistemlerinin tasarımı birbirleriyle bağlantılı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yani, bir bileşenin değiştirilmesi, diğer bileşenin de kurulumunda veya tepkisinde temel değişikliklere neden olmaktadır. Burada iki önemli arıza ortaya çıkmaktadır. İlki bir bağlama halatının kırılması stabilite hatasına neden olabilir. Diğerisi ise, bağlama halatındaki gerginlik kaybıdır. Bu durum gerginlik geri döndüğünde yüksek koparma yüklerine yol açar. Bu nedenle, gevşek bağlantı sistemleri, TLP tasarımında bir sınır durumu olarak kabul edilmektedir [23].

Platformun kurulum aşamasında, eklenen ağırlıklar, platform işletim yerine çekilmesi sırasında geçici olarak stabilite sağlayabilir. Bu amaçla, platform kurulum öncesi balast işlemi gerçekleştirilir ve balastlar demirlemelerin takılmasından sonra çıkarılır. Yapı çekilemiyorsa, kurulum mavnaları gibi başka yollarla taşınması gerekmektedir [24]. Bu durum, türbinin bakım için porta taşınması gerektiğinde de geçerlidir. Bu dezavantajlara rağmen, gergi ayaklı platformlar (TLP) diğer platform tiplerine kıyasla en hafif çelik ağırlığına sahip açık deniz rüzgâr platformlarıdır. Bu durum ekonomik olarak da önemli bir avantaj sağlamaktadır [25].



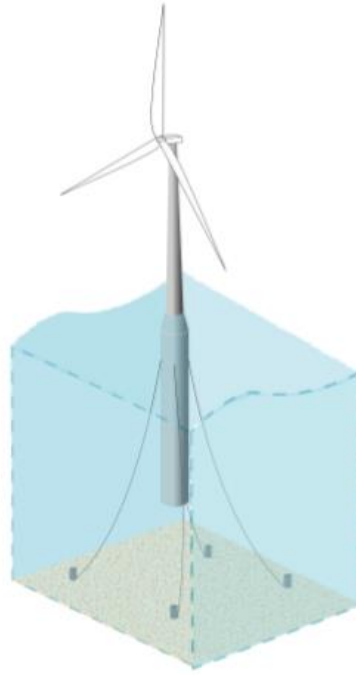
1.2.3. Derin Balast Stabilize Platformlar

SPAR tip platformlar balast stabilize platformdur. Başlangıçta oşinografi bilgileri toplamak için kullanılan şamandıralar olarak tasarlanan bu tip platformlar, 90'lı yıllarda Oryx Neptün sahasında petrol ve gaz endüstrisi tarafından kullanılmıştır. O zamandan beri, farklı uygulamalar için farklı alternatif formları geliştirilmiş ancak ana düşünce değişmemiştir [6]. SPAR platformlar ince bir silindiri andırmaktadır. Ağır bir balast, kaldırma kuvvetinin altındaki ağırlık merkezinin konumunu daha da aşağıya çekmek ve stabilizeyi sağlamak için platformun alt ucunda kullanılmaktadır. Katener bağlama halatları da dengede tutmayı sağlamaktadır.

Bu platformlar, istenen geri getirici momenti elde etmek için yeterince düşük bir balastın yerleştirildiği derin su platformlarıdır. Silindirin tabanına eklenen balast, baş-kıç vurma ve yalpa hareketlerini kısıtlamaktadır. Diğer platform tiplerine nispeten küçük su hattı alanı güçlü dalıp-çıkma kuvveti sağlamakta ve platformu bu modda düşük sertliğe sahip bir platform olarak karakterize etmektedir. Platformun silindir şeklinde olması, simetri ve küçük boyut sağlamaktadır ve bu nedenle hidrodinamik kuvvetler tarafından oluşan platform hareketlerinden sadece savrulma hareketi ihmal edilebilmektedir. Diğer taraftan da bu platform tipi, açık deniz rüzgâr türbinleri için kullanıldığında aerodinamik yükler kanatlarda moment oluşturarak, savrulma hareketine neden olmaktadır [26]. Bununla birlikte, katener bağlama halatları doğrudan platformun gövdesine bağlandığında, sınırlı savrulma geri getirici moment oluşturmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda deniz tabanındaki bağlama kurşunları ile platform arasındaki mesafeler değiştirilerek alternatif düzenekler denenmektedir. Bu platformlar daha yüksek derinliklere yönelik olduğundan, bağlama halatlarının daha uzun olması gerekir ve bu da yüksek maliyet demektir. Bunun aksine, gövde ise ekonomik olarak üretilmesi kolay bir forma sahiptir.

Gövde formunun sadeliği, SPAR tip platformları girdap kaynaklı titreşim (VIV) adı verilen olaya neden olmaktadır. Silindir dalıp-çıktıkça girdaplar oluşmakta ve yüzey boyunca basınç dağılımı değişerek akış daha düzensiz hale gelmektedir. Bu basınç değişikliği, düşük frekanslı girdap kaynaklı titreşimler oluşturarak daha yüksek akım kuvvetlerine ve silindir boyunca yorulmalara neden olmaktadır [27].





Şekil 5. SPAR platform [6].

Platformun önemli sualtı gövdesi göz önüne alındığında, bir SPAR platform tasarlanırken su akımlarının dikkate alınması gerekebilir. Düşük su hattı alanına sahip olması nedeniyle korozyon etkinliği konusunda önemli avantajlarının yanında yavaş ve sınırlı hareketlere de sahiptir. Ancak yüksek derinlik ihtiyacı ekonomik olarak büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır.

1.2.4. Hibrit Platformlar ve Çoklu-Türbin Konfigürasyonları

Birçok durumda, platformlar yukarıda verilen sınıflandırılmalardan birine dahil olmaktadır. Ancak türbin ve kuleyi daha iyi yerleştirmek için alternatif durumlar söz konusu olabilmektedir. Bu tür yapılar oluşturulurken, her bir yaklaşımın avantajlarından yararlanmak için stabilizasyon yöntemlerinin bir kombinasyonunu kullanmaktadır. Diğer hareketlere uyumlu ama dalıp-çıkma hareketi yönünden kısıtlanmış olan TLP ve SPAR konfigürasyonları hibrit platformlara örnek olarak gösterilebilir [28]. Ayrıca dalga enerjisi gibi diğer enerji biçimlerini de tek bir sisteme entegre eden konseptler de bulunmaktadır [29, 30].

Tek bir türbini barındırabilen platformlara alternatif olarak, birden fazla türbini bir araya getirmenin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Tek bir şebeke bağlantısı



ve birden fazla bağlama sistemi kullanılması ve ayrıca ortak bir hizmet alanına sahip olması bu konseptin avantajları olarak gösterilebilir. Konseptin dezavantajları esas olarak türbinlerin yakın olarak yerleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Sabit yapılı açık deniz rüzgâr çiftliklerinde olduğu gibi, önemli miktarda enerji elde etmek ve enerji kaybı yaşamamak için yüzer açık deniz platformlarının da belirli sayılarla ve düzenle kurulması gerekmektedir. Bu yerleşimler, kanatların arkasındaki iz etkisiyle çevredeki türbinlerin performansını etkilemektedir. Bu durum aynı zamanda nasele savrulma hareketinin de iz etkisini azaltmayacağı ve rüzgârı karşılamak için platformun döndürülmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Tüm çoklu-türbin konseptlerinde bu tür etkiler göz önüne alınmalıdır. İsveçli şirket Hexicon, tek bir platformda çoklu-türbin barındıran bir konseptte sahiptir [31].



Şekil 6. Hexicon çoklu-türbin konsepti [31].

1.3. Platform Konseptleri Uygulamaları

Platformlar, her hareket modu için verdikleri tepkilere göre uyumlu veya kısıtlı olarak kategorize edilebilmektedir. Bu koşulların bir özeti Uluslararası Gemi ve Deniz Yapıları Kongresi (ISSC) 2012'de sunulmuştur [32]. Tablo 1' de bu bilgiler platformların stabilizasyonları ile birleştirilerek sunulmuştur. Azalan hareketler bağlama halatları esnekliği ile sınırlıdır [5].



Tablo 1. Stabilizasyon ve hareket uyumlarına göre platform sınıflandırılması [32].

Platform tipi	Stabilizasyon yöntemi	İleri ve Yanal öteleme	Dalıp-çıkma	Baş-Kıç vurma ve Yalpa	Savrulma
SPAR	Derin balast	C	C	C	C
Yarı-batık	Su hattı alanı	C	C	C	C
TLP	Bağlama	C	R	R	C

(C) ve (R) sırasıyla uyumlu ve kısıtlı modları belirtmektedir

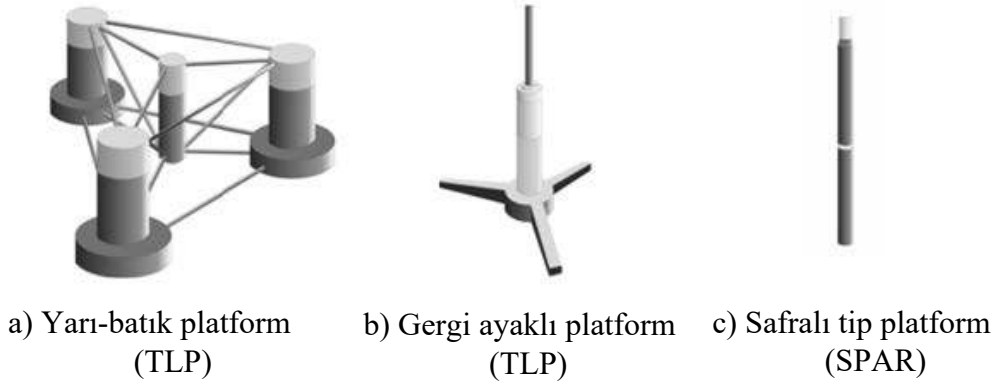
1.3.1. DeepC-Wind Konsorsiyumu

ABD merkezli DeepCwind konsorsiyumu TLP, yarı-batık ve SPAR platform olmak üzere üç platformun testini gerçekleştirmiştir. Çalışma, araştırmacıların açık verilere erişimini sağlamak için (özel bilgileri hariç tutarak) yapılmıştır. Deney programı Hollanda Denizcilik Enstitüsü'nde (MARIN) gerçekleştirilmiştir.

Yarı-batık (semi-submersible) platformlar DeepCwind konsorsiyumu tarafından tasarlanmıştır [33]. Bu platform rüzgâr türbini kule ile ortada yer alacak şekilde üçgen oluşturan 3 yüzdürme sütunu ile 4 sütunlu bir tasarıma sahiptir. TLP konsepti ise Glosten Associates'in PelaStar formuna göre tasarlanmıştır [34]. SPAR ise, daha önceki bir kod karşılaştırma çalışmasının konusu olan Hywind platformunu temel almaktadır [35, 36]. Bunlar Şekil 7.'de gösterilmiş ve aşağıda bulgular tartışılmıştır [37].

Deney ortamı için 1/50 ölçekli Froude benzerliğine sahip model, rüzgâr ve dalga yükleri kullanılmıştır. Deneydeki asıl zorluğun, benzer Reynolds sayılarına bağlı kalarak Froude benzerliğine uygun bir model yapmaktan kaynaklandığı belirtilmiştir. Buna rağmen hem rüzgâr hem de dalga kuvvetleri doğru bir şekilde ölçeklenmiştir. Buradaki zorluk, farklı kanat geometrileri için bir itme eşdeğeri oluşturacak şekilde türbin tasarlanarak aşılmıştır [38]. Bu durumda olduğu gibi benzerlik oranları deneylerde önemli rol oynamaktadır ve ilgili çalışmalarda tartışılmıştır [39, 40].



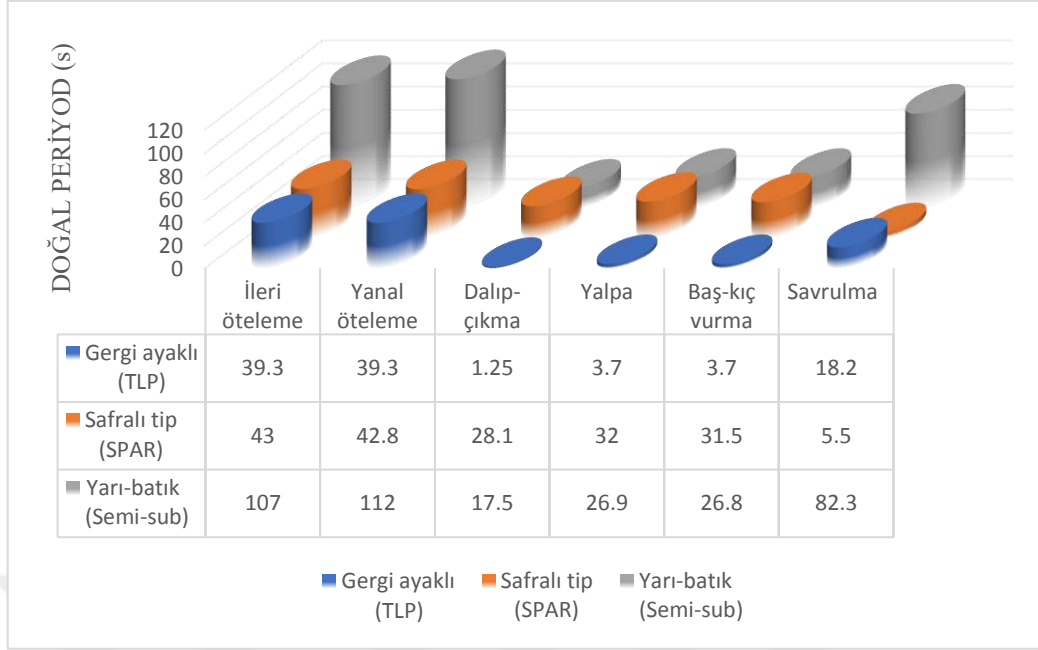


Şekil 7. DeepCwind konsorsiyumu platform modelleri [37].

Test prosedürü ilgili çalışmada [41] Schmidt sertlik testi ile platformların doğal frekansları ve ardından da başlangıç statik denge konumları belirlenmiştir. Viskoz sönümlleme değerleri gibi hidrodinamik özellikler, serbest sönümlleme testi ile hesaplanır. Daha sonra da platform hareketleri önce dış kuvvetler olmadan, sonra rüzgâr ve dalga kuvvetleri altında ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Burada düzenli ve düzensiz dalgalar hidrodinamik çalışmaları içermektedir. Rüzgâr tepkileri ise sabit ve dinamik rüzgâr yükleri ile ilgilenir. Son aşamada ise akuple olarak rüzgâr ve dalga yüklemelerine karşı davranışları içermektedir.

Platformların doğal frekansları Şekil 8.'de özetlenmiştir [42]. Platform tiplerinin karşılaştırılması ve birinci dereceden dalga uyarma aralığının (4-25 s) dikkate alınması, hareketin dinamiği hakkında bilgi vermektedir [43]. Yarı-batıkların ileri öteleme doğal periyotları TLP ve SPAR platformlardan önemli ölçüde daha uzundur. Simetri nedeniyle, yanal öteleme tüm platformlardaki ileri öteleme hareketi ile neredeyse aynıdır. TLP konseptleri, düşük doğal periyotlarda (5 saniyenin altında) dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa hareketlerinde rijit bir yapı olarak davranış göstermektedir. Diğer platformlar 30 saniyeye yakın sürede daha düşük frekanslar sağlamaktadırlar. Savrulma hareketi süresi tüm platformlar için farklıdır. SPAR platformlar ise, kısıtlanmış bir yapıya benzeyen kısa savrulma periyotları oluşturmaktadır. TLP savrulma hareketi süresi ise dalga frekansı (WF) bölgesinin biraz üzerindedir ve yarı-batık diğer iki platforma kıyasla daha uzun sürmektedir. Bu sonuçlar, platforma etkiyen frekanslarının üstüne çıkarak veya altında kalarak rezonanstan kaçınmak için gerekli yöntemleri açıklığa kavuşturmaktadır. Platformun, sistemin toplam rijitliğini değiştirdiği için kulenin eğilme frekanslarını değiştirdiği de görülmüştür [23].





Şekil 8. DeepCwind platformları doğal periyodları [42].

Sonuçlar incelendiğinde sabit rüzgâr yükü altında TLP ve yarı-batık platformların ileri öteleme tepkilerinin benzer olduğu görülmektedir. Hareket genlikleri SPAR platformlardan daha büyüktür. Dalga kuvvetleri ihmal edildiğinde, rüzgâra maruz kalan küçük yüzey alanı, ileri öteleme modunda SPAR platformlara avantaj sağlamaktadır. Bunun aksine, yarı-batık platformlar büyük yüzey alanlarından dolayı genel olarak en yüksek ileri öteleme hareketine sahiptir.

SPAR platformlarda baş-kıç vurma ve yalpa hareketlerine karşı koymak için balastlar konulmuştur. Bu durumdan dolayı diğer platformlara göre yüksek baş-kıç vurma hareketine sahip olduğu Şekil 8’de görülmektedir. Beklenildiği gibi TLP tipler, bağlantı sistemleri (tendonları) tarafından uygulanan kısıtlamalar nedeniyle limitli tepki göstermektedir. Yapılan çalışmalarda deneysel model için, yarı-batık platform, SPAR platform değerlerinin yarısı kadar baş-kıç vurma genliği göstermiştir [23]. Bu modda belirli açıların aşılması, türbinin aerodinamik performansını sınırlandırmaktadır. 4 derecenin üzerindeki açılar aerodinamik hesaplamalarda önemli farklılıklara neden olmaktadır [20]. Bu tasarım kısıtlaması, INNWIND gibi yeni platformlar tasarlayan diğer projelerde, maksimum baş-kıç vurma genliği 3,5 derecenin altında tutarak uygulanmaktadır [44]. Daha yüksek baş-kıç vurma açıları, kulenin tepesindeki nasel-rotor takımının ağırlığı nedeniyle kule tabanında eğilme momentinin artmasına neden olmaktadır.



Deneysel veriler, karışık rüzgâr/dalga yüklerinin tepki genlik operatörlerinin (RAO) rüzgârsız dalgalara verilen tepkilere benzer olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, dalgaların rüzgârın aksine tüm modlarda platform hareketlerinin ana itici gücü olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, aerodinamik özelliklerin, özellikle rüzgâr itkisinin dinamik etkileri, platform hareketlerinde önemli bir role sahiptir.

1.3.2. Japonya'daki Çalışmalar

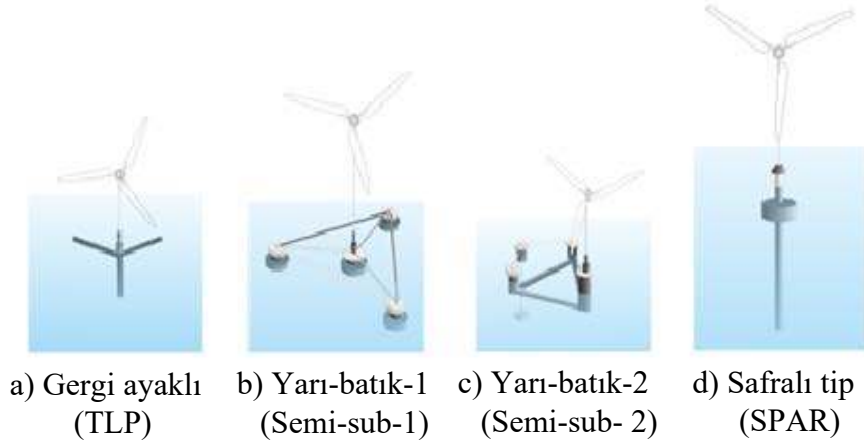
Japonya, 2011 Fukuşima nükleer felaketinden sonra temiz enerjiye yönelmiştir. Bu süreci hızlandırmak için Osaka Eyaleti, Yokohama Ulusal, Nihon ve Osaka Üniversitelerinin ortaklığında karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır [26].

Çalışmada platform 5MW gücünde türbin ve 90 metrelik bir kule için tasarlanmıştır. Bir TLP, iki yarı-batık ve 1/100 ölçeğine sahip bir SPAR platform üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır, Şekil 9.'da gösterilen platformlardan soldaki model DeepCwind TLP ile benzerlikler göstermektedir. 120 derecelik yayılı 3 demirleme hattı mevcuttur. Yarı-batık platform modellerinden ilki tek noktadan bağlama (SPM) sistemini kullanmakta ve türbin 3 kolondan birine yerleştirilmektedir. İkinci olarak değerlendirilen yarı-batık platform ise türbin merkez kolonda olmak üzere 4 kolondan oluşmaktadır. Tasarlanan SPAR platform su çekiminin %15'ine denk gelecek şekilde yerleştirilen disk ile standart silindir formuna alternatif bir form oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın bulguları platform özellikleri ile ilgili DeepCwind çalışmaları ile uyumludur. Çalışmada TLP tiplerin dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa hareketlerinde stabilitesinin olumlu olduğu görülmüştür.

SPAR platformun çoğu çevre koşulunda en yüksek ivme ve hareket değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiş ve yüksek ivmenin nasel seviyesinde çalışan mürettebatı olumsuz etkileyeceğini göz önünde bulundurarak platform bakımının zorluğu irdelenmiştir. Platformların dalga ve rüzgâr kaynaklı hareketlerine ek olarak, çalışma, SPAR platformun rotorun jiroskopik etkisinden dolayı ekstra bir savrulma hareketine maruz olduğu bildirilmiştir.





Şekil 9. Japonya’da geliştirilen platform tipleri [26].

1.4. Platform hareketlerinin Sayısal Analizi

Yüzer rüzgâr türbinlerinin tepki dinamikleri, türbinin aerodinamiği ile platformun hidrodinamiği arasında önemli bir bağlantı içermektedir. Türbin, dalgalar ve bağlantı sistemleri üzerindeki yüklerin tümü sistemin genel tepkisine katkıda bulunmaktadır. Bu soruna yaklaşmanın iki yolu vardır:

Türbin aerodinamiğini de içeren hidrodinamik olarak doğrulanmış bir platform kullanımı, ya da platform hidrodinamiğini de içerecek şekilde genişletilmiş aerodinamik kodlar. Her iki durumda da, rüzgâr türbini platformlarındaki tepkilerin doğrusal olmama durumunu tam olarak yakalamak için, frekans alanı yaklaşımlarının aksine bir zaman alanı analizi tercih edilmektedir [45]. Hidrodinamik hesaplamalarda, kodlar arasındaki temel fark, hareketleri tahmin etmek için kullanılan teorilerin temelinde bulunmaktadır. Morison denklemi, potansiyel teori veya her ikisini beraber içeren bir yaklaşım uygulanabilir. Çoğu durumda, ana yaklaşım, anlık su hattı veya konumu gibi diğer faktörleri içerecek şekilde değiştirilmiştir [46].

Sayısal araç geliştirmede öne çıkan çalışmalardan biri Offshore kod karşılaştırma iş birliği (OC) çalışmalarıdır. Bu birlik, karşılaştırmalı sonuçlar sağlamak için farklı kodlar geliştirmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Görev 23 (OC3), Aşama IV, Hywind SPAR platformunda [35] yedi farklı kod kullanan birden fazla grubun ortak çalışması olarak bir çalışmayı içermektedir. Devam eden bir çalışmada, OC4 Görev 30 Faz II’de [47] artan sayıda işbirlikçi ile bir yarı-batık analiz edilmiştir. Sonuçlar [48]’de yayınlanmıştır. Bu çalışmalar,



çeşitli modelleme yaklaşımlarının geçerliliğinin anlaşılmasına ve uygulanmasına katkıda bulunmuştur.

Kod çalışmaları, teorilerin hareketler üzerindeki etkisini anlamada önemlidir. Deneyden kodlamaya yönelik çalışmalarda ise sistemin doğrulanması esastır. Bu konuyu ele almak için, NREL'in "Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence (FAST)" [49] simülasyon kodundaki sayısal verilerin ve DeepCwind yarı-batık için deneysel verilerin karşılaştırmaları gerçekleştirilen çalışmada [50] yayınlanmıştır.

Açık deniz kod karşılaştırma projesinin beşinci çalışması olan, OC5 Aşama II, DeepCwind yarı-batık platformun [51] sayısal veri karşılaştırmalarına yönelik deneyi içermektedir. Çalışma 11 ülkeden 19 katılımcı tarafından gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar, tartışıldığı gibi bağlama sistemleri vb. kodların iyileştirilmesi gereken alanların belirlenmesinde önemlidir [52, 53].

1.5. Yüzer Rüzgâr Türbini Projeleri

Proje ekipleri ve konsorsiyumlar tarafından yüzer rüzgâr türbinleri araştırmaları devam etmekte ve birçok Ar-Ge projelerine yatırım yapılmaktadır. Küresel anlamda Vestas, Siemens, Areva, Mitsubishi ve Fuji Heavy Industries gibi şirketler bu alanda faaliyet göstermektedir [54].

Avrupa'da, geliştirilmekte olan açık deniz yüzer teknolojilerinin çoğu, derin su açık deniz potansiyeline sahip ülkeler tarafından yönetilmektedir. Konsept geliştirme üzerine çalışma yapan firmalara bakıldığında Hollanda'dan Blue H, Fransa'dan Nass et Wind, IDEOL ve Winflo, Almanya'dan GICON [55], Danimarka'dan Poseidon, İspanya'dan HiPRWind, İsveç'ten Hexicon [31] ve Norveç'ten Statoil'i sıralanabilir. Avrupa haricinde Asya'ya baktığımızda Japonya'da gerçekleştirilen çalışmalar mevcuttur ve çoğu araştırma projesi devlet tarafından finanse edilmektedir [16]. 2011 yılında Kyushu'daki Hakata Körfezi'nde ilk ölçekli model piyasaya sürülmüştür [56]. 2013 yılında, Tokyo Körfezi'nin girişinde Choshi açıklarında 2 MW'lık tam ölçekli bir SPAR rüzgar türbini konuşlandırılmıştır [57]. ABD hükümeti, 2030 yılına kadar enerji gereksinimlerinin %20'sini karşılayacak güç üretimi için rüzgâr türbini teknolojisi geliştirmeyi planlamaktadır [58]. Orta ve derin su derinliklerinde, Seattle merkezli Principle Power şirketi WindFloat yarı-batık platform konseptinin geliştirilmesinde yer almıştır [14, 15]. 2011'in başlarında,



Portekiz kıyılarında da bir Vestas 2MW türbini ile bir yarı-batık platform konuşlandırılmıştır [6].

1.6. Açık Deniz Platformları Tasarımı

1.6.1. Tasarım Standartları

Tasarım standartları, sektörün ihtiyaçlarına ve durumuna göre gelişmektedir. Bu dikkate alındığında, açık deniz rüzgâr türbinleri ile ilgili standartların da oldukça yeni olması beklenmektedir. Ayrıca tasarımda açık deniz rüzgâr türbinlerinin, karşılaşılan yükler bakımından karadaki türbinlerden farklı olarak, hidrodinamik yükler, deniz buzu ve uzun bekleme süreleri gibi farklı çevresel koşullara maruz kalmaları göz önünde bulundurulmaktadır. Ek olarak, rüzgâr yükleri, artan sığ su etkileri nedeniyle açık deniz petrol platformlarından farklıdır ve insanla çalışmadıkları gibi, büyük güverteleri de yoktur. Bu nedenlerden dolayı, tasarım uygulamalarının güvenilirliğini artırmak için tüm bu konuları ele alarak tasarımları gerçekleştirmek gerekmektedir.

Açık deniz rüzgar türbinleri yapıları ile ilgili ilk standartlar Det Norske Veritas (DNV) ve Germanischer Lloyd (GL) tarafından 2004 ve 2005 yıllarında yayınlanmıştır [59, 60]. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) standardı IEC-61400-3, 1999'da başlayan bir geliştirme süreci ile 10 yıllık bir çalışmanın sonucu olarak ilk olarak 2009'da yayınlanmıştır [61]. 2010'da ise American Bureau of Shipping (ABS), ABS standardını yayınlamıştır [62].

Sektördeki eğilimi takip ederek oluşturulan ilk kurallar önceleri sabit açık deniz yapılarına uygulanırken, DNV standardı OS-J101 [63] durumunda olduğu gibi yüzer rüzgâr türbinleri için uygulamalarının değerlendirilmesinde bir öncü olmuştur. Bureau Veritas (BV), 2010'da esas olarak IEC-61400-3'ü ele alan ve test edilecek yük durumlarını tanımlayan açık deniz yüzer rüzgar türbinleriyle ilgili bir not yayınlamıştır [6].

2012 yılından itibaren çalışmaların odağı yüzer platformlarına kaydırılarak klas kuruluşları tarafından yüzer rüzgâr türbinleri ile ilgili standartlar geliştirilmeye başlamıştır. DNV, 2013 yılında ABS ile birlikte [64] OS-J103'ü [28] yayınlamıştır. 2011'deki Fukushima nükleer felaketi olaylarının ardından, Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK) 2012'de kendi kurallarını yayınlamıştır [65]. DNV'nin çalışmaları, alanlarında deneyimli olan Statoil, Navantia, Iberdrola, Alstom Gamesa, Sasebo Heavy Industries, Nippon Steel Corporation, STX, Principle Power ve Glosten Associates firmaları ile Eylül 2011'de başlatılan Ortak



Sanayi Projesinin bir sonucu olarak sunulmuştur [66]. IEC, yüzer rüzgâr türbinleri için tasarım gereksinimlerini tanımlama üzere standartları geliştirmiştir [61]. Yenilenmiş versiyon, yüzer platform ve sabit yapılı rüzgâr türbinleri arasındaki farkları ele almayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada hidrostatik stabilite ve platform üzerindeki ikinci dereceden hidrodinamik etkiler gibi hususlar dikkate alınmıştır [67, 68, 69].

Yüzer rüzgâr türbinleri için sistem, stabilite sorununu çözmeye çalışırken birçok yük türüne maruz kalmaktadır. Bu sebeple klas kuruluşları, yüzer sistemlerin tasarım faktörlerinin, sabit yapılı sistemler için ele alınan konulardan farklı olduğunu söylemektedir [6]. Örneğin, platformun hidrodinamiği kurulum, işletme ve kaza durumlarında farklı şekilde davranış gösterecektir ve bunun kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca kurulum bölgesine bağlı olarak sığ su ya da yüksek dereceli dalga etkileri ön plana çıkabilir. Bu sebeple platformun uzun doğrusal olmayan tepkilerini yakalamak için daha uzun simülasyon sürelerine ihtiyaç duyulabilir [6].

Bunların yanı sıra yüzer rüzgâr türbinlerindeki diğer bir konu da ekonomik zorluklardır [11]. Maliyetleri düşürmek için daha verimli tasarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle klas kuruluşları, standartlarını maliyet-kazanç analizini ve güvenilirliği tasarım sürecine dahil etmeye çalışmaktadır [70].

1.6.2. Tasarım ve Optimizasyon Çalışmaları

Burada asıl önemli olan konu, platformun işlevi ve güvenliği için uygun özellikleri elde etmek adına platform formunu yenilemektir. Petrol ve gaz endüstrisinde kullanılan büyük güverteli alanlar burada kullanılmaz. Olası kombinasyonların sayısı (örneğin, bir yarı-batıktaki destek bağlantıları) sınırsızdır. Bu da tasarım çalışmaları için oldukça geniş bir yelpaze sunmaktadır.

Rüzgâr enerjisi gibi alanlardaki yeni tasarımlar, açık deniz petrol ve gaz endüstrisinin ilk yıllarında karşılaştığı benzer zorlukları ortaya koymaktadır. İkinci nesil yarı-batıkların beşinci nesilleri ile karşılaştırıldığında, gövdelerin 50 yıllık bir süre içinde mevcut formlarına nasıl dönüştüğü görülebilmektedir. Aynı durum rüzgâr platformları için de geçerlidir. Ancak burada çok sayıda bilinmeyen vardır ve en uygun çözüme karar verilmemiştir. Sınırlı kurulum sayısı ve platform tasarımlarındaki önerilen farklılıklar, sektör deneyimini sınırlı kılmaktadır. Örnek olarak, WindFloat yarı-batık platformu, bağlantı destek elemanlarıyla birleştirilmiş 3 silindirik kolondan oluşan modeli [14, 15] ve



prizmatik kolonlarla destek elemansız V-biçimli bir alternatif [17] modeli çalışılmıştır. Benzer şekilde, duba temelli SeaStar tasarımının [21, 71] tek kolon varyasyonları [72, 73] üzerine gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bunun aksine GICON TLP [55] ve [74]'de sunulan model, belirli modifikasyonlar ve uyarlamalar ile gövdenin dört kolonlu gergi ayaklı (TLP) platform tasarımlarına daha yakın olduğu formlara odaklanmaktadır.

Oldukça fazla sayıda bilinmeyen içeren tasarımın erken aşamalarında gerçekleştirilen çalışma [75], karmaşık olan bilgisayar destekli tasarım (CAD) sistemleriyle uğraşmaktan kaçınmak için elektronik tablo tipi hesaplamaların ve kapalı form denklemlerin kullanılmasını önermektedir. Birçok yazar da tasarım [73] ve ölçek büyütme [76] çalışmalarında bu öneriyi kullanmıştır.

Bir platform gövde formunun optimizasyon süreçleri için, 1996'da [77] sunulan panel yöntemlerine girdi olarak parametrelili boyutları kullanan ilk çalışmalar, hesaplama gücü arttıkça yıllar içinde gelişmiştir [78]. Petrol ve gaz platformlarındaki bu çalışmalar, rüzgâr türbini platformlarına [79] bir çözüm olarak da uygulanmış ve özellikle bir TLP [72] için kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, çeşitli parametreler (örneğin, platform derinliği, parçaların çapı) değişkenler olarak seçilir ve gövde şekli, tanımlanan kısıtlamalar ile tasarım sınırları içerisinde değiştirilmiştir. Ardından, istenen performans özelliklerini değerlendirmek için bir dizi geometri oluşturulur. Çoğu durumda, çok gövdeli yapıların bağlantı destek elemanlarının atlanması gibi modeli daha sade hale getiren basitleştirmeler kullanılmıştır [80]. Bilgisayar bilimlerindeki ilerlemeyle birlikte genetik algoritmalar [81] ve diğer benzer yaklaşımların varyasyonları [82] gibi yeni yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Bu yeni yaklaşımın en önemli avantajı, döngülü hesaplamalara kıyasla daha düşük hesaplamalara gereksinimi olmasıdır [81].

Daha önce yayınlanmış hidrodinamik tasarım çalışmalarında [77, 83, 84], platform gövde formundaki değişikliklerden dolayı kütle ve atalet değerlerindeki değişimlerin dikkate alınmadığı görülmüştür. Ağırlık, isteğe bağlı şekillerin atalet değerlerine kıyasla CAD yazılımı olmadan hesaplamak daha kolay olduğu için varsayımlar yoluyla kısmen ele alınmaktadır. Bu nedenle, araştırmalar [78, 85, 86] yalnızca dalıp-çıkma hareketine odaklanmıştır. Bununla birlikte, platformun tepkileri, TLP tendon gerilimlerini belirlemede atalet değerlerinin özellikle önemli olduğu 6x6 kütle matrisine bağlıdır. Baş-kıç vurma ve yalpa hareket modları, bağlama sistemleri kuvvetleri ve momentlerindeki değişikliklerle ilişkilidir. Bu sebeple kütle matrisindeki bir yanlış hesaplama, hareket ve yük tahminlerinde açıkça hatalara yol açacaktır. Bu konu kısmen basit bir şekilde 2015 yılında yayınlanan bir



çalışmada ele alınmıştır. Bu çalışmada bir yarı-batık platformda istatistik tabanlı hesaplamalar ile bir optimizasyon değişkeni olarak yapısal ağırlığı kullanmasına rağmen; ataletten söz edilmemektedir [86]. Hem kütle hem de atalet kuvvetleri [85]'de tartışılmıştır ve gerekçesi açıklanmadan ana boyutların yüzdesi olarak alınmıştır. Benzer şekilde, ağırlık merkezi de bir varsayımla seçilmiştir. Açık deniz rüzgâr türbini platformları gibi yeni alanlarda, kurulum sayısının düşük olması ve gövde formlarının önemli ölçüde farklı olması nedeniyle istatistiklerin mevcut olmadığı da dikkate alınmalıdır. Bu konular, tasarım uygulamaları değerlendirilirken, hareket tahminlerindeki sınırları içerecek şekilde genişletilen bir çalışma ile almak literatüre katkı sağlayacaktır.

1.7. Diğer Literatür Çalışmaları

Yukarıda görüldüğü gibi literatürde farklı tip açık deniz rüzgâr türbinleri için çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğunluğu platform tasarımları ile ilgilidir. Literatürde yine açık deniz rüzgâr çiftliği kurulum yeri belirlenmesi ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Dört tarafı denizlerle çevrili ülkemizde henüz yüzer açık deniz türbinlerinin hareketleri ve performans analizleri ile ilgili çalışma bulunmamaktadır.

Açık deniz alanına yüzer rüzgâr türbinlerinin kurulması zor bir iştir. Zaman verimliliğinin ve maliyetlerinin önemli bir kısmı hava koşullarına duyarlı kurulum yöntemleriyle ilgilidir. Zhiyu vd. [87] kule, nasel ve rotorun bir SPAR platform üzerine kurulması sırasında yüzen sistemi korumak için, basit tasarım kısıtlamaları kullanarak bir yüzer havuz konsepti tasarlamıştır. İki farklı boyutta SPAR platform alınarak yüzer havuz ile birleşik hidrodinamik analizi düzensiz dalgalar için yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Mevcut yüzer havuz tasarımı platformun baş-kıç vurma tepkilerini azaltarak potansiyel olarak türbin-platform etkileşimini artırmıştır. Yine bakım ve onarım için Shanley vd. [88] rüzgâr çiftliği için servis gemisi nümerik tasarımı ve analizini gerçekleştirmiştir. Amate vd. [24], da TLP kurulumu için yüzer mavna tasarımı gerçekleştirmişler ve TLPWind için validasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.

Serret vd. [89] derin deniz için yüzer türbin model deneyi gerçekleştirmişlerdir. Bunun için çalışmada, kule ve nasel setini yükseltip alçaltabilen bir yeniliği hibrit bir SPAR platform ile birleştirip yeni bir konsept geliştirilerek hidrodinamik testleri yapılmıştır ve yeni konsept için model testlerini tanımlanmış ve farklı bağlama sistemleri için rezonans özellikleri ve RAO'ları sunulmuştur.



Oğuz vd. [90] gerçek rüzgâr ve dalga koşullarında Iberdrola, TLPWIND yüzer rüzgar platformları için deneysel ve sayısal bir araştırma yapmıştır. Çalışmada NREL 5MW referans türbini TLP üzerine kurulmuş ve 70 m'lik bir su derinliğinde çalışacak şekilde tasarlanmış, serbest sönümleme testleri, düzenli ve düzensiz dalgalarındaki testleri ve rüzgâr koşullarında simülasyonla gerçekleştirilmiştir. Fiziksel deneylerin yanında aerodinamik yüklerden kaynaklanan platform tepkileri de gözlenmiştir. Bu tepkileri incelemek için NREL laboratuvarı tarafından geliştirilen FAST paket programı kullanılmıştır.

Burmester vd. [91] BEMT (Blade Element Momentum Theory) paket programlarını kullanarak üç boyutlu RANS hesaplamalarını gerçekleştirmiştir.

Oğuz vd. [92] Türkiye’de Güney Marmara bölgesi için açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyelini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla dört farklı bölge seçilmiş ve bölgelerin rüzgâr özellikleri değerlendirilmiştir. Seçilen bölgeler ortalama günlük zaman serileri olarak ölçülen rüzgâr verileri dikkate alınarak analiz edilmiştir. Çalışmada verilen bulgulara göre, Kapıdağ Yarımadası'nın kuzey, doğu ve batı açık deniz alanları, açık deniz rüzgâr türbinlerinin kurulması için uygun görünmektedir. Kapıdağ Yarımadası'nın kuzey tarafında yerleşim alanı bulunmakta ve bu bölgedeki deniz trafiği de seyrek. Civardaki nispeten sığ su derinlikleri incelendiğinde, Marmara adasının kuzey kıyılarına kadar uzanan açık deniz rüzgâr türbinlerinin konuşlandırılması uygun bir yatırım gibi görünmektedir. Çanakkale Boğazı'nın girişine doğru uzanan Karabiga'nın açık deniz tarafı olarak ikinci bir uygulanabilir bölge verilebilirken, Kurşunlu'nun açık deniz tarafı olarak üçüncü bir alan tanımlanmıştır. Düşük rüzgâr hızları nedeniyle en az uygulanabilir bölge ise Yalova bölgesi gösterilmiştir.

Aouani vd. [93] yaptıkları çalışmada iki ve üç kanatlı açık deniz rüzgâr türbinleri için FAST programında analiz gerçekleştirmişlerdir.

Lamai vd. [94] yaptıkları çalışmada yüzer açık deniz rüzgar türbinlerinde hareket ve hidro-elastik analiz gerçekleştirmişlerdir. Yapının dinamik tepkisi hem aerodinamik hem de hidrodinamik yükler tarafından yönlendirilirken, bu çalışma yeni yüzer yapının sadece hidrodinamik yüklere hareketine ve elastik tepkisine odaklanmışlardır. Yapı, birden fazla türbini barındıracak şekilde tasarlanmıştır.

Micallef ve Sant [95] yatay eksenli yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi platformunun ileri öteleme hareketi için yükleme etkilerini çalışmışlardır. Bunun için NREL laboratuvarı örnek 5 MW yatay eksenli rüzgâr türbini kullanılmış, ilgili analizler FAST programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, sabit dalgalanma koşulları ve değişen uç hızı oranları altında



alışan rotorun araştırılması yapılmıştır. Kararsız etkiler çoğunlukla nominal koşulda ve üstünde vurgulanmıştır. Bununla birlikte, böyle bir sonucun, dalgalanma genliği ve frekansına bağlı olarak değişeceği beklenmektedir.



şekil 10. Üçgen yarı-batık platform [94].

Tran vd. ise [96] yarı-batık yüzer açık deniz rüzgâr türbini platformu için dinamik akış ve yapı etkileşimini kullanarak tam bağımlı aero-hidro dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir.

Vire vd. [97], yüzer açık deniz rüzgâr türbini platformlarının tam bağımlı sayısal modellemesini yaparak analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, tamamen doğrusal olmayan modeller kullanarak sıvılar ve katılar arasındaki etkileşimler modellenmiştir. Bu nedenle, bu çalışma akışkan ortam ve yüzer katılar arasındaki etkileşimleri modellemek için birçok olanak sağlamaktadır. Ayrıca, her model akışkan ve katı dinamikler için tam doğrusal olmayan denklem setini çözmüşlerdir.

Recalde ve Leithead [98] yaptıkları çalışmada yüzen rüzgâr türbini platformlarında istenmeyen dalgalanmaların ve hareketlerin azaltılması için yeni bir strateji sunmuştur. Nominal rüzgâr hızlarında, rüzgâr türbininin monte edildiği platform, jeneratör hız kontrol döngüsünün kararsız hale gelmesine neden olmaktadır. Burada nerilen yöntem ise, kule kuvvetleri kullanılarak ölçülen jeneratör hızının ilave bir ayarlanmayla kontrol döngüsünün



stabilitesini sağlamasıdır. Geliştirilen yöntem, platform ve dalga dinamiklerinden bağımsızdır.

Ülkemizde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde ise aşağıdaki örneklere rastlanmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde; çalışmaların daha çok kurulum yeri seçimi üzerine gerçekleştirildiği görülmektedir.

Ülkü [99], yaptığı çalışmayı, türbinlerin konumu, kablo türünü tasarlayan türbinlerin bağlanması ve hem türbin konumunun hem de kablo yerleşimi sorunlarının eş zamanlı çözümü olacak şekilde üç ana bölümde ele almıştır. Rüzgâr enerji santrali içindeki her bir türbinin yerlerinin belirlenmesine türbin yeri (TL) problemi denir. Tezin ilk bölümünde, rüzgâr türbinlerinin yerleşimi için çoklu gölge etkileri dikkate alınarak yeni bir doğrusal olmayan matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Modelde iki amaç fonksiyon ayrı ayrı dikkate alınmaktadır. Bunlar, üretilen toplam gücün en iyiye çıkarılması ve güç birimi başına maliyetin en aza indirilmesidir. Türbinlerin göreceli konumları, gölge etkilerden dolayı toplam enerji üretim miktarını etkilemektedir. Önerilen modele birden fazla gölge etkisini dahil etmek için, Jensen'in gölge modeli kullanılmaktadır. Önerilen modelin çözüm uzayının, bütünsel birimsellik (totally unimodularity) olan bir özelliğe sahip olduğu ve rüzgâr türbini konumlarını gösteren ikili değişkenlerin gevşetilmesinin modelin çözülmesini nispeten kolaylaştırdığı deneysel olarak kanıtlanmıştır. Tezin ikinci bölümünde, türbinler ve koveyör (ler) arasındaki kablo bağlantıları, rüzgâr enerji santrali düzeninin tasarımında zorlayıcı sorunlardan biri olarak ele alınmaktadır. CL tasarımı adı verilen bu problem, özellikli ve yüksek maliyetli kabloların kullanıldığı açık deniz rüzgâr santralleri için özellikle önemlidir. Bu çalışmanın ikinci kısmında, toplam kablo maliyetini en aza indirmek için açık deniz rüzgâr santrallerinin kablo bağlantılarının optimizasyonunu ele almıştır. Bu çalışmanın üçüncü bölümünde, TL ve CL problemlerinin çözümü eşzamanlı olarak ele alınmıştır. Hem TL hem de CL problemlerini çözmek için açık deniz rüzgâr çiftlikleri için bir bütünleşik matematiksel model geliştirilmiştir.

Turhanlar [100] çalışmasında, öncelikle açık deniz rüzgar enerji santrallerinin kurulumundan önce seçilecek konum üzerinde incelenmesi gereken parametreleri gözden geçirerek açıklamış, ardından, Türkiye rüzgar haritasına göre başlangıç bölgesi olarak Ege Bölgesi'nde Çanakkale ve çevresi uygulama alanı olarak seçmiştir. Ardından Çanakkale ve çevresi için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan ortalama rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü bilgilerini inceleyerek Bozcaada ve çevresinin rüzgâr çiftliği kurulumu için en uygun alan olduğunu belirlemiştir. Türbin sayısı, temel tipi ve türbin türü; deniz durumu, rüzgâr hızı,



deniz derinliği, dalga yükleri, çevreye ve yerleşimin deniz ulaşımına etkisi gibi koşullar göz önüne alarak Bozcaada'nın kuzeydoğusu yerleşim alanı olarak seçmiş ve potansiyel yerleşim çalışmasını tamamlanmıştır. Çalışmasında ayrıca “VESTAS V116-2.0 MWIEC IIB” rüzgâr türbininin bölge için en uygun türbin olduğunu tespit etmiştir.

Akalın [1] ise çalışmasında çok kriterli karar verme tekniklerinden Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (F-AHP) kullanarak açık deniz rüzgâr enerjisi türbinlerinin kurulum yeri seçimi için bir model önerisinde bulunmuştur.

Alkan [101] çalışmasında 5 MW'lık referans bir açık deniz rüzgâr enerjisi türbininin için yüzer platform ve demirleme sistemleri tasarımı üzerine odaklanmıştır.

Leblebicioğlu [102] yaptığı çalışmada WindSim programı kullanarak açık deniz rüzgâr santrali mikro konumlandırmasını Bozcaada için gerçekleştirmiştir. Ayrıca çalışmada 2 tane 2 MW'lık türbin kullanarak, kapasite faktörünü %24 olarak hesaplamıştır.

Gülay [103] 2019 yılındaki çalışmasında Gökçeada ve Gaziköy için açık deniz rüzgâr çiftliği tasarımı yapmıştır. Meteorolojiden alınan veriler doğrultusunda “VESTAS V116-2.0 MWIEC IIB” rüzgâr türbininin kullanımının bölge için en uygun olacağını belirtmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda Gökçeada'nın açık deniz rüzgâr santrali için uygun olduğunu söylemiştir.

Yumurtacı ve Özdilim [104] 2017 yılında yaptıkları çalışmada, Türkiye’de açık deniz rüzgâr türbini kurulabilecek bölgeleri ve potansiyel elektrik üretimini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda Bozcaada'nın en uygun bölge olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca kurulumu gerçekleştirilecek olası bir açık deniz rüzgâr santralinin yıllık net getirisini 57381 milyon Euro, geri ödeme süresini ise 8,7 yıl olarak hesaplamışlardır.

Güzel vd. [105] 2012 yılında, fizibilite adımlarını gerçekleştirerek Bozcaada ve Gökçeada örneklemelerinde bulunmuştur. Açık denizde kurulabilecek rüzgâr enerjisi santralinin elektrik üretme kapasitesi ve ekonomik etüdünü yine bu çalışmada incelenmiştir. Ayrıca Bozcaada bölgesi için “1,8 MW VESTAS” türbini ve 100 m gövde yüksekli kullanımını bölge için uygun bir yatırım olacağını belirtmiştir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde, gerçekleştirilen tez kapsamında yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbini sistemlerinin belirli bir deniz derinliğinde, belirli bir konumda, belirli çevresel ve dinamik yükler altında hareket analizleri sayısal gerçekleştirilerek performans üzerindeki etkileri incelenmiştir ve performansa bağlı olarak türbin yerleştirilmesi için iyileştirmeler de tartışılmıştır. Ayrıca simülasyon sonuçları literatürdeki deneysel veriler ile de karşılaştırılarak daha detaylı irdelenme sağlanmıştır.

Bunun için öncelikle yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbini kurulum ve işletim bölgesi belirlenmiştir. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) incelendiğinde çalışmanın odak bölgesi Kuzey Ege Kıyıları seçilmiş, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden B-AHP ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) beraber kullanılarak bir karar modeli oluşturulmuştur. Çalışmada uzman akademik personelin yorum, bilgi ve birikimleri ile literatür araştırmaları dikkate alınarak karar kriterleri belirlenmiştir. Daha sonra bu kriterler vektör veri formatına dönüştürülerek CBS yazılımı olan ArcGIS’de raster veri formatına dönüştürülmüştür. Bu işlem her bir kriter için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve her bir kriter için raster veriler oluşturularak, bunlar ArcGIS yazılımında tek bir tabaka haline getirilmiştir. Kriter verilerinin bütünleştirilmesi aşamasında, beş kriterin eşit ağırlıklı olduğu ve ağırlıkların B-AHP ile belirlendiği iki durum ele alınmıştır. Böylece, Çanakkale ve Gökçeada kıyıları, açık deniz rüzgâr enerji santralleri kurulumu için alternatif bölgeler, en uygun alanlar ve uygun alanlar olmak üzere kategorize edilmiştir.

Sonraki aşamada belirlenen alternatif bölge için kurulumu gerçekleştirecek platform ve kullanılacak türbin belirlenmiştir. Açık deniz rüzgâr türbinleri yatay eksenli rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinler bir kuleye ve kulenin tepesine bağlı bir elektrik jeneratörüne sahiptir. Jeneratör doğrudan veya bir dişli kutusu vasıtasıyla göbek grubuna ve türbin kanatlarına bağlanabilir. Deniz derinliğine göre platform tipleri farklılık gösterir. Su derinliği 30 metreye kadar olan bölgelerde türbin tek kazık platform üzerinde olup, bu deniz yatağına çakılıdır. Su derinliğinin 50 metreye kadar olduğu bölgelerde ise, türbin kulesi daha geniş bir tabana sahip olan kafes yapısına monte şeklindedir. Daha da derin sularda, sadece yüzer sistemler uygulanabilmektedir. Belirlenen alternatif bölgenin deniz



derinliğinde yüzer platform tipleri çalışmaktadır. Çalışma kapsamında 4 adet platform tipi incelenmiş, açık kaynak kodlu FAST paket programı yardımıyla validasyon işlemleri gerçekleştirilmiş ve literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılarak en uygun platform belirlenmiştir. Çalışmada validasyonu gerçekleştirilen platformlardan OC-3 (Hywind) SPAR ve OC-4 (DeepC) yarı-batık NREL tarafından, NAUTILUS ve OOSTAR+ yarı-batık tip platform olup, Danimarka Teknik niversitesi (DTU) tarafından geliştirilmiştir. Ancak bu konseptlerden NREL tarafından geliştirilen 5 MW'lık, DTU'nun platformları ise 10 MW'lık türbinler ile kullanılmaktadır.

En son aşamada ise belirlenen alternatif bölge, belirlenen platform tipi ve türbin ile, belirli çevresel yükler altında simülasyon gerçekleştirilerek sayısal olarak performansları incelenmiştir.

2.1. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Kişiler yaşamlarının her anında sürekli karar vermek zorunda kalmaktadır. Bu kararların arasında birçok kriterin değerlendirilmesi ve kriterlerin önceliğine göre alternatiflerin arasından uygun olanın belirlenmesi, karar verme olarak adlandırılmaktadır. Bazı durumlarda karar verme kolay olurken, bazı durumlarda ise çok karmaşık bir durum haline gelebilmektedir. Bu sebeple özellikle karar vermesi zor olan durumların çözümü için farklı yöntemler geliştirilmiştir [106]. Literatürde çok kriterli karar verme uygulamaları “çok ölçütlü karar verme” (multi attribute decision making) ve “çok amaçlı karar verme” (multi objective decision making) olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır. Çok ölçütlü karar verme uygulamalarında önceden belirlenmiş kısıtlı sayıda alternatifler sınıflandırılırken, çok amaçlı karar verme uygulamalarında ise bundan farklı olarak önceden belirlenmiş alternatif kümesi bulunmaz ve sınırsız sayıda alternatif bulunmaktadır. Çok amaçlı karar verme yöntemlerinde amaç en iyi alternatifin belirlenmesidir. Bu sebeple seçim problemleri çözülürken çok ölçütlü karar verme (multi attribute decision making) yöntemleri, tasarım problemleri çözülürken ise çok amaçlı karar verme (multi objective decision making) yöntemleri kullanılmalıdır [107, 108].

Çok ölçütlü karar verme (multi attribute decision making) uygulamaları için kullanılan en bilindik yöntem, Saaty [109] tarafından çalışılan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)'dir. Bu yöntemde ağırlık kriterleri belirlenerek, bunlara göre “ikili karşılaştırmalar” ve matris



cebir kullanılmaktadır. Çalışma sonucunda alınan karar, değerlendirme kriterlerinden türetilen ağırlıklar ile belirlenmiştir.

Karar vermede sadece nesnel ölçütler kullanılmaz. Bunun yerine öznel ölçütlerin dikkate alınması için karar verme analizinde kişilerin görüşlerine yer verilmelidir. Bu durumda “bulanık karar verme” önermesi ön plana çıkmaktadır. Zadeh [110] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, nitel, kesin olmayan bilgiler ve kötü kararları önlemek için, “bulanık küme teorisi” önerilmiştir. Bulanık küme, kişiler tarafından kontrol edilebilen ancak kesin olarak tanımlaması yapılamayan karmaşık sistemler için önerilmiş bir modelleme aracıdır.

Gerçekleştirilen bu tez kapsamında yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbinin kurulum yeri için alternatif bölge belirlenmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinden *bulanık tabanlı Analitik Hiyerarşi Prosesi (F-AHP)* kullanılmıştır.

2.1.1.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

Hepimiz hayatımızda bazı kararlar veririz. Bu kararlarda ne kadar başarılı olduğumuz, sonuçlar ile ortaya çıkmaktadır. İnsanlar kararlarını iki tür analizle verirler. Birincisi, sezgilerle yapılan otomatik analizdir. Çok hızlı gelişir ve genellikle objektif değildir. Karar vermenin ikinci yolu ise mantıksal analizdir ve muhakkak analitik bir yöntem gerektirir.

Karar verme kriterlerine bakıldığında aynı problem için farklı kişilerin verdiği önerilere bakıldığında, aynı kriterlerin önem derecelerinin ve sıralamalarının değişkenlik gösterdiği görülmüştür [111]. Bu durumda farklı görüşleri yorumlayabilmek için ortak karara ihtiyaç duyulmaktadır.

AHP, ilk olarak 1968 yılında Myers ve Alpert ikilisi tarafından ortaya atılmış ve 1977 de ise Saaty [109, 112] tarafından bir model olarak geliştirilerek karar verme problemlerinin çözümünde kullanılabilir hale getirilmiştir. Yöntem geliştirildiği günden bugüne kadar, her türlü karar verme problemlerinde kullanılmıştır.

2.1.1.1.1. Faktörlerin Yüzde Önem Dağılımlarının Belirlenmesi

Karşılaştırma matrisi, faktörlerin birbirlerine göre önem seviyelerini belirli bir mantık içerisinde gösterir. Ancak bu faktörlerin bütün içerisindeki ağırlıklarını, diğer bir deyişle yüzde önem dağılımlarını belirlemek için karşılaştırma matrisi normalize edilerek



gösterilmesi gereklidir. Bunun için karşılaştırma matrisini oluşturan sütun vektörlerinden yararlanılır ve n adet ve n bileşenli B sütun vektörü oluşturulur.

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

B sütun vektörlerinin hesaplanmasında (4) denkleminde yararlanılmaktadır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (4)$$

Bunu bir örnekle açıklamak için;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 4 \\ 2 & 1 & 4 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanan karşılaştırma matrisini ele alalım. Bu durumda B_1 vektörünün b_{11} elemanı denklem (4)'ten yola çıkarak;



$$b_{11} = \frac{1}{1+2+0,25} \quad (6)$$

şeklinde hesaplanacaktır. Bu işlem diğer bütün vektör elemanları için hesaplandığında B_1 vektörü

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0,3077 \\ 0,5714 \\ 0,1111 \end{bmatrix} \quad (7)$$

şeklinde elde edilebilir ve sütun vektörünün bileşenleri toplandığında toplamın 1 olduğu görülmektedir.

Yukarıdaki adımlar diğer faktörler için de gerçekleştirildiğinde faktör sayısı kadar B sütun vektörü elde edilecektir. n adet B sütun vektörü, bir matris formatında bir araya getirildiğinde ise $n \times n$ boyutunda bir C matrisi oluşmaktadır.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Daha sonra oluşturulan bu C matrisinin her bir satırının aritmetik ortalaması alınarak öncelik vektörü elde edilmektedir. Bunun için C matrisini oluşturan satırlar bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınır ve her bir faktör için yüzde önem ağırlığı hesaplanmış olur.



Böylece öncelik vektörü olarak adlandırılan W sütun vektörü elde edilir. faktörler arasında yapılan birebir karşılaştırmaların tutarlılığın test edilebilmesi imkanını

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (9)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sonuç olarak W sütun vektörü ile çarpılması sonucu karar noktalarındaki ağırlıkların yüzde dağılımı elde edilir. Ağırlığı büyük olandan başlamak üzere alternatiflerin önem sıralaması yapılabilmektedir [111].

2.1.1.1.2. Faktör Kıyaslamalarının Tutarlılık Ölçümü

AHP kendi içerisinde tutarlı bir sistematığe sahip olsa da sonuçların gerçekçiliği karar verici kişilerin faktörler arasında yaptığı ikili karşılaştırmalardaki tutarlılığa bağlıdır. AHP, faktörler arasındaki karşılaştırmadaki tutarlılığın ölçülebilmesi için bir süreç önermektedir [114]. Sonuçta elde edilen Tutarlılık Oranı (CR) ile, faktörler arasında yapılan birebir karşılaştırmaların tutarlılığın test edilebilmesi imkânı sağlanmaktadır. Analitik Hiyerarşi Prosesi CR hesaplamasının özünü, faktör sayısı ile Temel Değer adı verilen (λ) bir katsayının karşılaştırılmasına dayandırmaktadır. λ 'nın hesaplanması için öncelikle A karşılaştırma matrisi ile W öncelik vektörünün matris çarpımından D sütun vektörü elde edilmektedir [114].



$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & w_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & w_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & w_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

(12) denkleminde tanımlandığı gibi, bulunan D sütun vektörü ile W sütun vektörünün karşılıklı elemanlarının bölümünden her bir değerlendirme faktörüne ilişkin temel değer (E) elde edilmektedir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması (13) denklemi ile karşılaştırmaya ilişkin temel değeri (λ) verir.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (13)$$

λ temel değeri hesaplandıktan sonra Tutarlılık Göstergesi (CI), (14) denkleminde yararlanarak hesaplanmaktadır.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (14)$$

Son aşamada ise CI, Random Gösterge (RI) olarak adlandırılan ve Tablo 2.'de gösterilen *standart düzeltme* değerine bölünerek (15) denklemi ile CR elde edilir. Burada



standart düzeltme değeri (rassallık değeri) (RI) Tablo 2.'den faktör sayısına karşılık gelen değer olarak seçilir [115].

Tablo 2. Standart düzeltme (rassallık) değerleri [113].

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (15)$$

Hesaplanan CR değerinin 0,10'dan küçük olması karar vericinin yaptığı karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir [116]. Aksi durumda ya AHP'de bir hesaplama hatası vardır ya da karar verici kişilerin karşılaştırmalarında tutarsızlık söz konusudur. n bileşen sayısı olmak üzere; 1 ve 2 iken karşılık gelen RI değeri 0 olacağından yine bir belirsizlik söz konusu olmaktadır. Bu durumda işlemin kullanılabilmesi için bileşen sayısı en az 3 olmalıdır.

2.1.2. Bulanık Mantık

Normal yaşamda kişiler tarafından alınan kararlar çoğunlukla bulanık yapıdadır. Bir olay veya durumu karşılayacak ifadeler bulanıklık içermektedir. Kişilerin çok genç, genç orta yaşlı, yaşlı, çok yaşlı olarak yaş durumuna göre nitelendirilmesindeki belirsiz ve kesinlik içermeyen hallerde insan beyninin vereceği kararın göstergesinden yola çıkarak Zadeh [117], düşüncelerdeki belirsizlikle ilgili olan “Bulanık Mantık” olgusunu ilk defa gündeme getirmiştir. Bu sistemin en temel elemanı ise “bulanık küme” kavramıdır. Burada her nesne 0 ile 1 arasında bir üyelik derecesi almaktadır [118]. Yani her bir nesnenin değeri 0 ya da 1 olabileceği gibi bunların arasında da bir değer alabilmektedir. Ancak klasik küme teorisinde ise durum farklıdır. Bu teoriye göre nesneler yalnızca 0 ya da 1 değerini alabilmektedir. Ara değerler söz konusu değildir. Bu duruma göre 0 değerindeki nesne, o



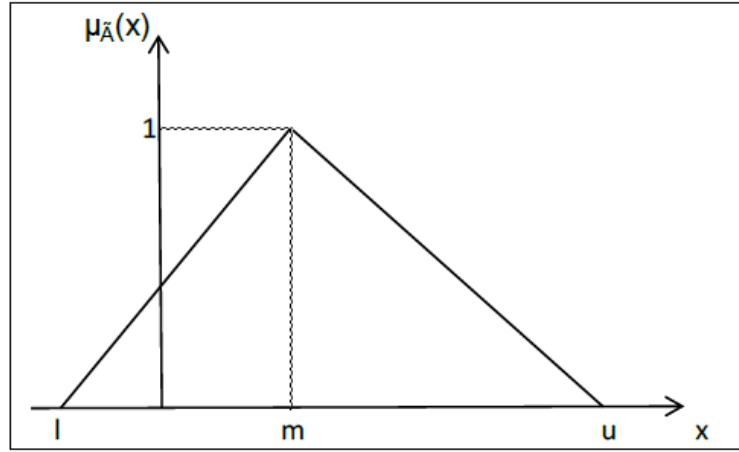
kümenin elemanı olmadığını, 1 ise nesnenin o kümeye ait olduğunu göstermektedir [119, 120].

Bulanık mantığa göre faktörlerde ve kriterlerde kesin sınırlamalar olmadan sınıflama yapılmaktadır. Yöntem, belirsizlik ve kesin olmayan gerçek hayat problemlerinin tanımlanması ve çözülmesi için kullanışlı bir tekniktir. Burada “evet” ya da “hayır”, “doğru” ya da “yanlış” gibi klasik değişkenler yerine “orta”, “yüksek”, “düşük” gibi ortalama değerleri kullanan çok değişkenli bir yapı vardır [117].

Yukarıda bahsedildiği gibi bulanık kümeler, üyelik fonksiyonları ile tanımlanmaktadır. Bir $\tilde{A}$ bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ile gösterilir. $\mu_{\tilde{A}}(x)=0$ olduğunda x faktörü $\tilde{A}$ kümesine kesinlikle ait değil, $\mu_{\tilde{A}}(x)=1$ olduğunda ise kesinlikle ait olmaktadır. Buna göre üyelik derecesi 1’e yaklaştıkça x faktörünün $\tilde{A}$ kümesine ait olma derecesi o kadar artmaktadır. Bulanık kümelerde işlem kolaylığını sağlamak ve sözel ifadeleri matematiksel ifadelerle anlatabilmek için bulanık sayılar kullanılmakta olup genellikle üçgensel bulanık sayılar tercih edilmektedir [121]. Üçgensel bir bulanık sayı ($\tilde{A}$), Şekil 11.’de gösterildiği gibi üyelik fonksiyonu üç gerçek sayı ($l \leq m \leq u$) ile tanımlanarak, (16) denklemi ile elde edilmektedir. Burada l ve u , sırasıyla bulanık üçgenin sınırları olan alt ve üst değerlerini, m is en mümkün değeri göstermektedir.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} (x - l)/(m - l), & l \leq x \leq m \\ (u - x)/(u - m), & m \leq x \leq u \\ 0, & x > u \text{ veya } x < l \end{cases}, \quad (16)$$





Şekil 11. Üçgensel bulanık sayılar [121].

2.1.3. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (F-AHP)

Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi, karışık karar verme problemlerinde, karar alternatifleri ve karar kriterlerine göreceli olarak önem değerleri atamak üzere karar mekanizmasının çalıştırılmasına dayalı bir karar verme yöntemidir [122, 123].

Özgörmüş vd. [124] çok kriterli karar verme metotlarından biri olan Analitik Hiyerarşik Prosesi yaklaşımının kesin olmayan durumlarda karar vermeye tam anlamıyla uygun olmadığı belirtmiştir. Özellikle nitel faktörlerin karşılaştırılmasında gerçek sayıların kullanılması karar vericiler için önemli bir güçlükür. Ayrıca karar vericiler gerçek değerleri kullanarak değerlendirme yapmaktadır. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi yaklaşımı ise bulanık sayıları veya sözel değişkenleri kullanarak daha kolay değerlendirme yapabilmektedir. Bu sebeple bulanık mantıkla AHP iç içe geçirilerek Bulanık Analitik Hiyerarşik Prosesi (F-AHP) oluşturulmuştur. Literatüre bakıldığında, ilk olarak Laarhoven vd. [125] yaptıkları çalışmada bulanık sayıları kullanarak kıyaslama gerçekleştirdikleri görülmektedir. Bu çalışma önderliğinde günümüze kadar birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Karar vericiler genellikle kesin değerleri kapsayan değerlendirmeyi yapmak yerine, aralıklı değerlendirme yapmaktadır. Literatürde, çeşitli yazarlar tarafından ortaya konmuş birçok F-AHP yöntemi bulunmaktadır [126]. Bunlar;

- Kareli ortalama yöntemi
- Kwong Bai yöntemi
- Abdel-Kader ve Dugdale yöntemi
- Bulanık geometrik ortalama yöntemi (en küçük kareler yöntemi)



- Alpha Cut (α -kesme) yöntemi

olarak sıralanabilir [1].

Bu yöntemlerin her birinin kendine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle hangi yöntemin daha iyi olduğunu karar vericiler belirlemektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında yüzer açık deniz rüzgâr türbini uygulama sahasının belirlenmesinde Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemlerinden bulanık geometrik ortalama yöntemi kullanılarak bulanık öncelik ağırlıkları belirlenmiş, daha sonra α -kesme yöntemi kullanılarak durulaştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

2.1.3.1. Kareli Ortalama Yöntemi

Bu yöntem sıfır veya negatif sayıların bulunduğu durumlarda kullanılmaktadır. Sıralama, bulanık sayının sınırlarından birisinin sıfır veya negatif olması halinde gerçekleşmektedir. $\tilde{A}_k = (l, m, u)$ üçgen bulanık sayı için,

$$K(A_k) = \sqrt{\frac{l^2 + m^2 + u^2}{3}} \quad (17)$$

Şeklinde hesaplanıp, $K(A_k)$ değerleri bulunmaktadır [126].

2.1.3.2. Kwong Bai Yöntemi

Kwong ve Bai, aşağıdaki denklem (18) ile üçgen bulanık sayıları sıralamışlardır. Burada $\tilde{A}_k = (l, m, u)$ üçgen bulanık sayı olmak üzere;

$$M_k = \frac{l + 4m + u}{6} \quad (18)$$



şeklinde sıralama yapmaktadır [1, 127].

2.1.3.3. Abdel-Kader ve Dugdale Yöntemi

Bu yöntem, üçgen bulanık sayıyı; “tam üye”, “sağ taraf kısmi üye” ve “sol taraf kısmi üye” olarak 3 gruba ayırmaktadır. Sıralama yöntemi, sol ya da her iki taraftaki üyeleri belirtmektedir. Yöntemde, sıralama sürecinde bir bulanık sayının, sayılacak 3 kısmını da içerecek yeni bir sıralama uygulanmaktadır. Değerleri sıralamak için α - iyimserlik indeksi kullanılmaktadır [128].

Bulanık sayılar;

$S = (l_k, m_l, u_l, \dots, l_k, m_k, u_k)$ ve $V(\tilde{A}_k)$ de $\tilde{A}_k$ 'nn değeri olmak üzere;

$$V(\tilde{A}_k) = m_k \left\{ (\alpha) \left[\frac{u_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min} + u_k - m_k} \right] + (1 - \alpha) \left[1 - \frac{x_{\max} - l_k}{x_{\max} - x_{\min} + m_k - l_k} \right] \right\} \quad (19)$$

olur. Burada $x_{\min}$ ve $x_{\max}$ değerleri denklem (20) ve (21)'de gösterildiği gibi bulunmaktadır.

$$x_{\min} = \inf S \quad (20)$$

$$x_{\max} = \sup S \quad (21)$$

Burada “inf” ve “sup” sırasıyla infimum ve supremum olmak üzere min. ve maks. değerleri



ifade etmektedir.

Bir sonraki yöntem bulanık ortalama kareler yöntemi (logaritmik en küçük kareler yöntemi) olarak adlandırılıp, Van Laarhoven vd. [125] tarafından ortaya atılmıştır.

2.1.3.4. Bulanık Ortalama Kareler (Logaritmik En Küçük Kareler) Yöntemi

Laarhoven vd. [125] 1983 yılında, sözel değişkenleri a_{ij} şeklinde üçgensel bulanık sayılar kullanarak ifade etmiştir. Bu yöntem, karar vericiye benzer alternatifler çifti üzerinde kendi oranlarını ayrı ayrı belirtme imkânı sunmuştur. Ayrıca sözel ifadeler, ikili karşılaştırma matrislerinde, belirgin sayılar yerine üçgen bulanık sayılarla temsil edilmiştir [129].

Önüt vd. [130] tarafından ise bulanık ağırlıklar ve bulanık performans değerleri denklem (22) ve (23) ile ifade edilmektedir.

$$\tilde{W}_k = (W_k^l, W_k^u, W_k^m), k=1, 2, 3, \dots, n \quad (22)$$

$$W_k^s = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{kj}^s)^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij}^m)^{1/n}}, s \in (l, m, u) \quad (23)$$

2.1.3.5. Alpha-Cut (α - Kesme) Yöntemi

Bu yöntemde, karşılaştırma matrisi kullanarak hesaplanan bulanık sayılar, farklı α -kesme değerleri kullanılmak suretiyle α -kesme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu sayede durulaştırılan değerlerin bulanık sayıyı karşılama seviyesi yükseltilmiş olur.

Karar vericilerin iyimserlik dereceleri $0 \leq \lambda \leq 1$ olacak şekildedir. λ 1'e yaklaştıkça daha iyimser bir karar, 0'a yaklaştıkça ise daha karamsar bir karar söz konusudur [131].

Yöntemin uygulamasında ilk olarak, alt-üst sınır öncelik değerleri belirlenmektedir.



$$\text{Alt Sınır (AS)} = \alpha \times (m - l) + l \quad (24)$$

$$\text{Üst Sınır (ÜS)} = u - \alpha \times (u - m), \quad \alpha_l = 1, 2, 3, \dots, L \quad (25)$$

Burada (l, m, u) k faktörü için bulanık öncelik değerleridir. Daha sonra elde edilen alt-üst sınır değerleri;

W_{kA} : k. faktör için alt öncelik değeri,

$W_{kÜ}$: k. faktörün üst öncelik değeri,

W_{dk} : k. faktörün durulaştırılmış değeri,

λ : iyimserlik derecesini,

belirtmek üzere şekilde aşağıdaki denklemlerle birleştirilerek durulaştırılmış değerler bulunur.

$$W_{kA} = \frac{\sum_{l=1}^L \alpha_l (AS_k)_l}{\sum_{l=1}^L \alpha_l} \quad (26)$$

$$W_{kÜ} = \frac{\sum_{l=1}^L \alpha_l (ÜS_k)_l}{\sum_{l=1}^L \alpha_l} \quad (27)$$

$$W_{dk} = \lambda W_{kÜ} + (1 - \lambda) W_{kA}, \quad \lambda \in [0,1] \quad (28)$$



Gerçekleştirilen bu tez kapsamında bulanık oluşturulmuş karşılaştırma matrislerinin analizi için Laarhoven vd. [125] tarafından geliştirilmiş olan Bulanık Ortalama Kareler Yöntemi (Logaritmik En küçük Kareler Yöntemi) kullanılarak üçgen bulanık değerler hesaplanmıştır. Bulunan bu ağırlıklar daha sonra α -kesme yöntemi kullanılarak durulaştırılmış ve kesin değerler elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmada λ iyimserlik derecesi **0,5** olarak alınmıştır. Sonraki bölümde açıklanan CBS ile F-AHP yöntemi ile elde edilen değerler birlikte kullanılarak alternatif bölge için bir karar modeli oluşturulmuştur. F-AHP yönteminde kullanılan birkaç ölçek türünden, bu çalışmada kullanılan ölçek türü ise Tablo 3.'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Bulanık ölçüt karşılaştırma dereceleri [130].

Bulanık Sayı	Gösterdiği Önem Derecesi
1, 1, 1	Eşit önemli
2, 3, 4	Biraz daha fazla önemli (diğərinin üzerinde)
4, 5, 6	Kuvvetli derecede önemli
6, 7, 8	Çok kuvvetli derecede önemli
8, 9, 10	Tamamıyla önemli

2.2.Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS)

Töreayen vd. [132] birçok farklı sektörde kullanılan ve değişik tanımları bulunan Coğrafi Bilgi Sistemleri için “Karmaşık planlama ve yönetim sorunlarının çözülebilmesi için tasarlanan; mekândaki konumu belirlenmiş verilerin kapsanması, yönetimi, işlenmesi, analiz edilmesi, modellenmesi ve görüntülenebilmesi işlemlerini kapsayan donanım, yazılım ve yöntemler sistemidir” tanımlamasında bulunmuştur.

Başka bir çalışmada ise Mekânsal verilere bağlı sözel bilgileri bütünleşik bir biçimde depolayan Coğrafi Bilgi Sistemleri için “Dünya üzerindeki bölgeleri tarif eden, verileri saklayan ve kullanan bilgisayar sistemi” tanımında bulunulmuştur [133].

Bir başka çalışmada ise Coğrafi Bilgi Sistemleri; insan, yer ve mekânla ilgili coğrafi verilerin yeryüzündeki gerçek referansları ile birlikte bir veri tabanında toplanması, bunlar üzerinde amaca göre çeşitli analizlerin yapılması ve sonuçların harita, tablo ve grafikler ile gösterilmesi için tasarlanmış olan bir bilgisayar sistemi olduğu belirtilmiştir [134].

1960'lı yılların başında geliştirilen CBS ile bilgisayar destekli harita tasarlama işleri amaçlanmasına rağmen; günümüzde ise birçok alanda ve farklı hizmetlerde



kullanılabilmektedir. Sistemde grafik ve sözel bilgiler aynı veri tabanı içerisinde bulunurken, mevcut bilgilerden ise yeni bilgilerin elde edilmesinin sağlanması, CBS'nin en önemli özelliğidir [134].

Demirci [134] ise yaptığı çalışmasında CBS'nin, yeryüzündeki nesne ve olaylara ait her türlü verinin gerçek koordinatlara göre bilgisayara girilmesi ve analize tabi tutularak harita, tablo ve grafikler şeklinde gösterilmesi işlemlerinin yapıldığı bir sistemler bütünü olduğunu söylemiştir.

Günümüzde kullanımı yaygınlaşan CBS, grafik ve sözel bilgilerin bütünleştirebilmektedir. Grafik bilgiler, bir nesnenin coğrafik olarak yerini ve biçimini tanımlayan, konumsal bilgilerdir. Bu bilgiler bilgisayarda vektör ya da raster olarak depolanmaktadır. Vektörel bilgi olarak depolanan coğrafik nesneler, nokta, çizgi veya poligon şeklinde gruplanmakta olup, nokta, çizgi ve poligonun çevresini tanımlayan koordinatlar olarak saklanmaktadır. Raster yapıları bilgilerinde ise, bütün detaylar birer “alan” olarak ele alınır ve grafik veri olarak bu alanları oluşturan piksellerin renk tonu değerlerinde sınıflandırılarak saklanmaktadır.

CBS'nin faydaları;

- İş verimliliğini arttırmak,
- Etkili ve doğru analizler (acil durum müdahale, kritik bilgi analizleri vb.) gerçekleştirmek,
- Bilgi akışını hızlandırma,
- Daha verimli üretim ve envanter yönetimi sağlamak,
- Veri güncelleme kolaylığı sağlamak ve
- İş gücünü arttırarak zaman kaybını önlemek,

olarak sıralanabilmektedir.

Tablo 4. CBS kullanım alanları [1].

Kullanım Alanı	Açıklamalar
Çevre yönetimi	Çevre düzeni planları, çevre koruma alanları, göller, göletler, sulak alanların tespiti, hava ve gürültü kirliliği, kıyı yönetimi, meteoroloji
Bayındırlık hizmetleri	İmar faaliyetleri, otoyollar, devlet yolları, afet yönetimi, bina hasar tespitleri, binaların cinslerine göre dağılımları, bölgesel kalkınma dağılımı



Tablo 4.'ün devamı

Eğitim	Araştırma-inceleme, eğitim kurumlarının kapasiteleri ve eğitmen sayıları, planlama
Sağlık yönetimi	Sağlık-coğrafya ilişkisi, sağlık birimlerinin dağılımı, personel yönetimi, hastane vb. birimlerin kapasiteleri, bölgesel hastalık analizleri, sağlık tarama faaliyetleri, ambulans hizmetleri
Belediye faaliyetleri	Kentsel faaliyetler, imar, emlak vergisi toplama, imar düzenlemeleri, çevre, park bahçeler, fen işleri, su-kanalizasyon-doğalgaz tesis işleri, uygulama imar planları, altyapı, ulaşırma planı toplu taşımacılık, belediye yolları ve tesisleri
Ulaşım planlaması	Kara, hava, deniz ulaşım ağıları, doğal gaz boru hatları, yer seçimi, enerji nakil hatları, ulaşım haritaları
Turizm	Turizm bölgeleri alanları ve merkezleri, Turizm amaçlı uygulama imar planları, turizm tesisleri, arkeoloji çalışmaları
Orman ve tarım	Eğim-bakı hesapları, orman sınırları, peyzaj planlaması, milli parklar, arazi örtüsü, toprak haritaları
Ticaret ve sanayi	Sanayi alanları, organize sanayi bölgeleri, bankacılık, pazarlama, sigorta, risk Yönetimi, adres yönetimi
Savunma ve güvenlik	Askeri tesisler, tatbikat ve atış alanları, yasak Bölgeler, sivil savunma, emniyet, suç analizleri, suç haritaları, araç takibi, trafik sistemleri, acil durum

Gerçekleştirilen bu çalışmada alternatif bölge belirlemede kullanılan Coğrafi Bilgi Sistemleri analizi için ESRI firması tarafından geliştirilen ölçeklendirilebilen bütünleşik bir yazılım olan ArcGIS programı kullanılmıştır.



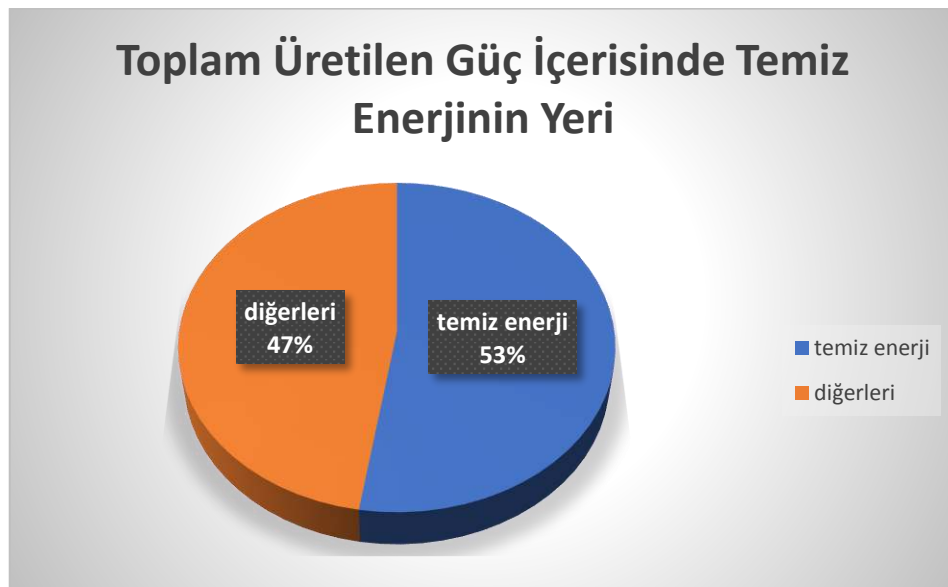
2.3. Türkiye'nin Rüzgâr Enerjisi Politikası ve Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Uygulama Adımları

Bu kısımda, ülkemizin rüzgâr enerjisi politikaları, yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbinlerinin çalışma alanları için alternatif bölge seçimini sağlayan seçim kararları ve uygulama adımları anlatılmıştır.

2.3.1. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) Kapsamında Rüzgâr Enerjisi Politikaları

Deniz üzerindeki basınç farklarının karalara göre daha fazla olması sebebiyle, deniz üzeri rüzgârlar, karadaki rüzgârlara göre daha fazladır. Bu doğrultuda elde edilebilecek enerjinin de fazla olması ve potansiyelden yararlanılabilecek alanların enerji ihtiyaçlarımızı fazlasıyla karşılayabilecek kadar geniş olması nedeniyle açık deniz rüzgâr türbinleri günümüzde daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca açık deniz rüzgâr çiftlikleri temiz enerji üretimi için en uygun biçim olarak da kabul görmektedir [105]. Ülkemizin 4 tarafının da denizlerle çevrili olduğu düşünüldüğünde böyle bir uygulamanın önemi de ortaya çıkmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları incelendiğinde ise rüzgâr enerjisinin ülkemizde gelişmeye en yatkın olan enerji türü olduğu görülmektedir [105].

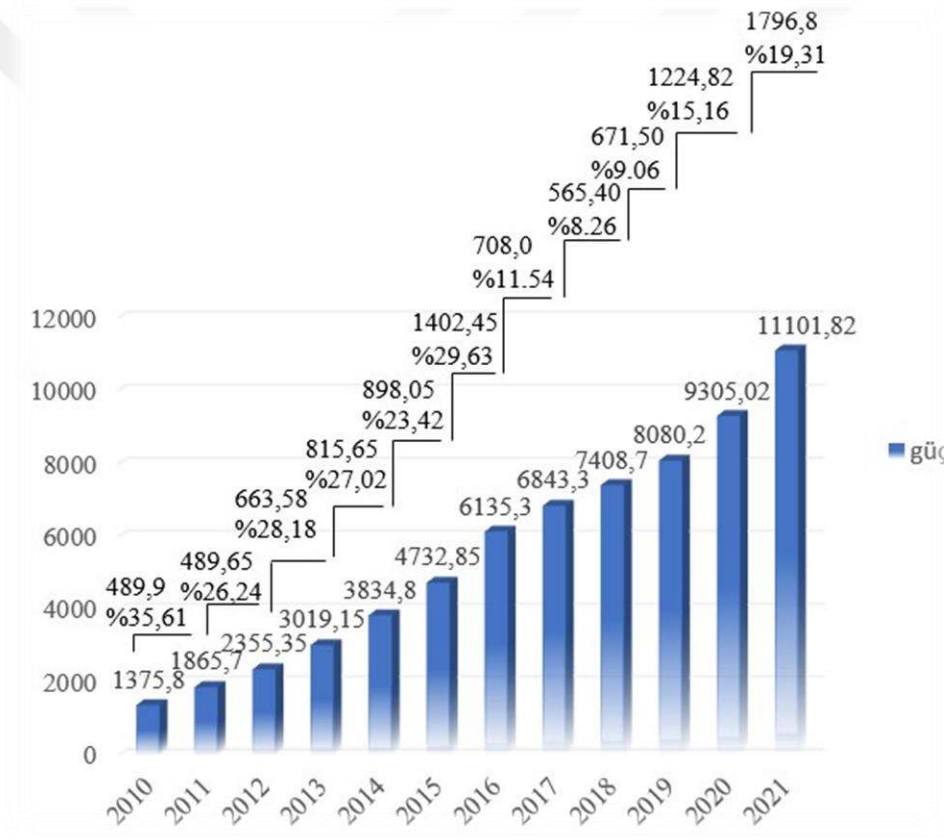


Şekil 12. 2021 yılı Türkiye'nin kurulu toplam elektrik gücü ve payları [135].



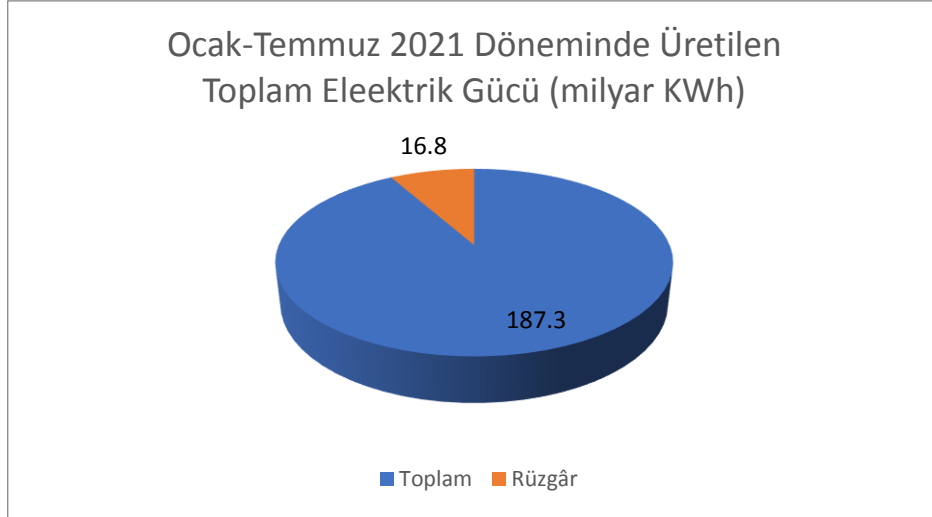
Türkiye, 48GW'lık (38 GW kara ve 10 GW deniz) rüzgâr potansiyeli ile Avrupa'daki birçok ülkeden fazla potansiyele sahip olmasına rağmen kurulu güç olarak bakıldığında ise bu ülkelerden çok daha geride bulunmaktadır. 2020 Temmuz sonu Türkiye rüzgâr enerjisi kurulu gücü 10.010 MW iken, 2021 yılında 1.796 MW'lık devreye alınan güç ile toplam 11.806 MW'a ulaşmıştır [136].

Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi'ne göre yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili ana amaç, elektrik enerjisi üretimi içindeki kaynakların oranının 2023 yılında en az %30 olmasıdır. Bu amacı gerçekleştirmek için, rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 2023 yılına kadar 20.000 MW olması hedeflenmektedir. Ayrıca elektrik ihtiyacının %7'sinin 2025 yılında rüzgar enerjisinden karşılanması ön görülmüştür [1].



Şekil 13. Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum (MW) [136].





Şekil 14. Rüzgâr enerjisinden elde edilen gücün toplam güce oranı [135].

Açık denizlerdeki rüzgârlar, karalardaki rüzgârlardan şiddetli ve daha kararludur. Örneğin, kıydan 10 ile 15 m açıktaki rüzgâr hızı, karaya göre %20- %25 daha fazladır ve bu durum büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca denizlerde pürüzlülük etkisi gibi etkiler olmadığından açık deniz rüzgârında türbülans etkileri çok azdır ve bu durum türbin üzerindeki yorulma yüklerini azaltarak türbin ömrünü artırmaktadır. Açık deniz rüzgâr çiftliklerinin kullanımının bazı diğer avantajları ise şu şekilde sıralanabilir [137]:

- Açık deniz rüzgâr türbinleri, çevreye daha uyumludur. Arazi kullanımı, gürültü etkisi ve görsel etki gibi olumsuzluklar söz konusu değildir.
- Gürültü etkisini daha da azaltmak için kara türbinlerine göre, açık deniz sistemleri %10 daha yüksek bir hızda çalışacak şekilde tasarlanmakta ve daha iyi aerodinamik verimlilik elde edilebilmektedir.

Türkiye üç tarafı denizlerle çevrili olup 3500 km'lik sahil şeridinde sahiptir. Özellikle Marmara ve Ege sahillerinde diğer kıyılara göre rüzgâr sürekli, şiddeti daha büyük, dolayısıyla daha fazla potansiyele sahiptir. Ancak ülkemizde henüz açık deniz rüzgâr türbini ile üretim gerçekleştirilmemektedir.



2.3.2. Türkiye Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Kurulum İçin Alternatif Bölgeler

Uygur vd. [138] rüzgâr enerjisinin tükenmeyecek bir enerji kaynağı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca rüzgâr enerjisi güvenli, yerel ve bağımsızdır. Fosil kaynaklarına bağımlılığı azaltır, tehlikesiz ve verimi yüksektir.

Rüzgâr enerjisi temiz, çevreyi kirlletmeyen bir enerjidir. Rüzgâr enerjisinde ham madde ve ulaştırma masrafı yoktur. Doğadaki rüzgâr enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır [105].

Rüzgâr enerjisi üretimi gerçekleştirdiğimiz rüzgâr türbini karmaşık olmayan basit makinelerdir. Gayet kolay bir şekilde operatör yardımı olmaksızın çalışmaktadır. Ayrıca bu şekilde sadece periyodik bakımları yapılarak 20-30 yıl çalışabilmektedirler [105].

Türkiye’de RES kurulumu potansiyeline bakıldığında, Karadeniz kıyılarında kurulum gücü yüksektir [139]. Foça ve Urla’nın deniz alanları, rüzgâr enerjisi kurulumu için uygundur. Ege Denizi kıta sahanlığı üzerindeki kayalıklar doğal zemin oluşturarak, buralara karadakininden az bir maliyet farkı ile açık deniz rüzgâr enerjisi santrali kurulumu gerçekleştirilebilir [140].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın Nisan 2018’de verdiği bilgiler doğrultusunda, 2018 Ekim ayı içerisinde ihalesinin yapılması planlanan Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) olma özelliğine sahip olacak ilk açık deniz (offshore) rüzgâr santrali projesi için Türkiye’deki en fazla rüzgâr potansiyeline sahip bölgeler arasında Ege bölgesi ortaya çıkmıştır. Ancak kW/saat başına tavan fiyat 8 cent üzerinden açık eksiltme ile yarışacak şekilde mali ve teknik şartları sağlayan yerli firma başvurusu alınamaması sebebiyle ihale ileri bir tarihe ertelenmiştir. Bu aşamadan sonra bu konudaki altyapı eksikliklerini gidermek için Danimarka Enerji İklim ve Kamu Hizmetleri Bakanlığı ile Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı arasında anlaşma imzalanarak, Türkiye’nin yakın dönemde açık deniz rüzgar enerjisine odaklanması amaçlanmıştır [140].

Özellikle Marmara ve Ege kıyıları dikkate alındığında okyanus gibi derinlik olmaması maliyeti düşürecek diğer bir özelliktir. Ege’de özellikle Bozcaada’nın kıta sahanlığı içerisinde kalan bölgeler ve Gökçeada açıklarının, Çanakkale bölgesi ve Saros Körfezi ile Trakya’nın Karadeniz kıyılarının ciddi potansiyele sahip oldukları belirlenmiştir [141].

Türkiye rüzgâr kaynaklarının karakteristiklerini ve dağılımını belirleyen REPA’ya göre yer seviyesinden 100 m yükseklikte 7 m/s’ den büyük rüzgâr hızları incelendiğinde ve



yıllık ortalama değerler esas alındığında, en iyi rüzgâr potansiyeline sahip olan bölgelerin Ege kıyıları ve Marmara Bölgesi'nde olduğu görülmektedir.

Bu bilgiler doğrultusunda çalışmada Gökçeada, Bozcaada ve Çanakkale çevresi boyunca kurulabilecek yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbinleri için alternatif bölge seçimi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2.3.3. Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Türbini Kurulum Yeri Alternatif Bölge Seçim Kararları

Kim vd. [142] yaptıkları çalışmada, bölge seçimi için en önemli faktörün rüzgâr kaynakları ve şiddeti olduğunu belirtmiştir. Deniz derinliği, deniz tabanı durumu ve iletim hattının uzunluğu gibi deniz çevre kriterleri de diğer önemli faktörlerdendir. Bu faktörlerden deniz derinliği, türbin kurulum için kullanılacak platform tipinin belirlenmesinde rol oynamaktadır. Rüzgâr hızı ise, kapasitesine göre kullanılacak türbin tercihinde rol oynamaktadır. Deniz tabanı durumu yine platform tipini ve bağlama sistemleri üzerinde rol oynamaktadır. İletim hattı uzunluğu üretim maliyetini etkilemektedir. Bu nedenle üretilen enerjinin şebekeye verileceği en yakın trafo merkezine göre uygun bir yer seçimi gerçekleştirilmektedir. Aşağıda Tablo 5.'te açık deniz rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları gösterilmiştir.

Tablo 5. Açık deniz rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Alan	Maliyet
Rüzgâr hızı ve potansiyeli	Teknoloji
Pürüzsüz yüzey	Bilgi birikimi
Türbülanssız akım	
Görsel etki	
Gürültü etkisi yok	

Büyük çaplı açık deniz rüzgâr çiftlikleri kurulumu için geniş alanlar gereklidir. Karadaki gibi deniz üzerinde kısıtlı alanlar söz konusu değildir. Bu bakımdan daha fazla alan, açık deniz projeler yönünden birincil avantajlardan biridir. Rüzgâr bakımından verimli alanların karada ulaşması zor bölgelerde bulunması, bu sebeple bakım-onarım zorluklarının



ve maliyetlerinin ortaya çıkması gibi sebeplerle Avrupalı ülkelerin açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerine geçişleri başlamıştır [143].

Türbin tarafından üretilecek güç, denklem (29)'da verildiği gibi rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılıdır. Burada P üretilen gücü (Watt), A türbin kanatlarının süpürdüğü alanı (m^2), v rüzgâr hızını (m/s), ρ ise havanın yoğunluğunu (kg/m^3) göstermektedir. Rüzgâr hızı ve potansiyeli, açık denizde büyük ölçüde fazladır. Bu durum denizlerdeki basınç farklarının karalara oranla çok daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Archer ve Jacobson [144] yaptıkları çalışmada açık denizde rüzgâr hızlarının karaya oranla %90 daha fazla olduğunu göstermiştir.

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (29)$$

Türbinlerden alınacak maksimum verim sınırlıdır. Bu durum Alman fizikçi tarafından tanımlanan “Betz limiti” olarak $c_p = 0,5926$ hesaplanmıştır. Buna göre, rüzgâr türbinlerinin bir yıllık üretilen net gücünün tam kapasite çalışması durumunda oluşacak güce oranını ifade eden kapasite faktörü, Betz limiti üzerine çıkamayarak maksimum %59 olmaktadır. Diğer bir deyişle rüzgâr türbinleri en fazla %59 kapasite ile çalışmaktadır.

Yükseklik ile doğru orantılı artan rüzgâr hızı, çevresel etkilerden dolayı değişken bir profile sahiptir. Bu duruma yüzeydeki sürtünme kuvvetleri ve engeller etki etmektedir. Yüzeyde sürtünmeye ve dolayısıyla rüzgârda türbülansa neden olan pürüzlülük bakımından karşılaştırıldığında, deniz yüzeyi karaya göre neredeyse tamamen pürüzsüzdür. Bu sebeple denizde oluşacak türbülans etkisi karadaki türbülansa oranla daha düşüktür. Bu da yapının daha düşük mekanik yorulmaya maruz kalmasına ve yapının daha uzun ömürlü olmasına katkı sağlamaktadır.

$$V = V_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{z_0} \quad (30)$$



Burada V , yerden h kadar mesafede rüzgâr hızını (m/s), V_0 yerden 10 metre yükseklikteki rüzgâr hızını (m/s), z_0 zeminin pürüzlülük yüksekliğini (mm) göstermektedir. Yüzeyle ait pürüzlülük uzunlukları Tablo 6.'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Yüzeyle ait pürüzlülük uzunlukları

Alan tanımı	Pürüzlülük uzunluğu (z_0) (mm)
Su yüzeyi	0,20
Çim	8,00
Seyrek bitki örtüsüne sahip düz araziler	30,00
Seyrek ağaçlık alanlar	100,00
Ağaçlık alan veya seyrek yerleşim	250,00
Ormanlık alanlar	500,00
Yüksek binaların olduğu şehir merkezleri	3000,00

Açık deniz rüzgâr çiftlikleri, yaşam arazilerinden uzakta bulunmaktadır ve bu nedenle düşük bir görsel etkiye sahiptirler. Türbinlerin yaşam alanından uzak olmasından dolayı insanlar, gürültü ve göz yorulması gibi olaylardan etkilenmezler [143].

Açık deniz rüzgâr santrallerinin maliyetlerine bakılacak olursa, kara rüzgâr santrallerine göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Karadaki rüzgâr türbini kurulumuna göre hemen hemen 1'e 3'lük oranla daha maliyetli olduğu ilgili firmalar tarafından söylenmiştir. Burada en önemli konu derinlikten kaynaklı maliyetlerdir. Derinlik, kablo maliyetini arttıracak gibi, o derinlikte bağlantı sistemleri gibi sistemlerin de ekstra maliyeti olacaktır. Deniz suyu tuzlu olduğu için iletken durumdadır. Bu sebeple sızıntıyı önlemek için deniz altından geçen elektrik iletim hatlarına güçlü bir şekilde izolasyon uygulanmaktadır. Rüzgârlı bölgeler ve dalgalı sular bu iletim hatlarının hızlıca yıpranmasına neden olabilmektedir [145].

Açık deniz rüzgâr çiftliği kurulumu fizibilitesi birçok parametre içermektedir. Bunların çoğu veri bakımından yetersiz kalabilmektedir. Bu durum da yine bir dezavantaj oluşturmaktadır. Çalışılan her bölge, derinlik, akıntı, deniz koşulları, dalga yükseklikleri gibi farklı koşullar içermektedir. Bu nedenle bir platform ya da bağlama sistemi tasarımı genellemek mümkün değildir.

Bu çalışmada belirlenen bölge için belirlenen yüzer platform ve rüzgâr türbini, özel rüzgâr ve dalga koşulları altında birleşik analizi gerçekleştirilmiştir.



2.4. Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Türbini Kurulum Yeri Alternatif Bölge Seçimi Uygulaması

Bu tez çalışmasında alternatif bölge hakkında karar verme süreci “*dışlama*” ve “*değerlendirme*” olarak 2 adımda gerçekleştirilmiştir.

Rüzgâr enerjisi üretiminde en önemli faktör rüzgâr hızı olduğundan, ilk olarak rüzgâr potansiyeli haritası oluşturularak Türkiye kıyılarında, yüzer açık deniz rüzgâr türbini kurulumu için öncelikli alanlar belirlenmiştir.

Daha sonra rüzgâr enerjisi potansiyeli için mevcut bir CBS tabanlı yazılım olan ArcGIS programı, rüzgâr hızının, deniz derinliği, fay hatları gibi fiziksel faktörlere şebeke trafo merkezine, deniz trafik güzergahlarına, askeri alanlara, balıkçılık bölgelerine, balık ve kuş göç yollarına uzaklıkları gibi faktörlerin eklenmesiyle kullanılmıştır.

Ayrıca dalga yüksekliği kriteri için, açık deniz rüzgâr santralleri kurulumunda, belirgin dalga yükseklikleri 5-10 m olarak dikkate alınmalıdır [146].

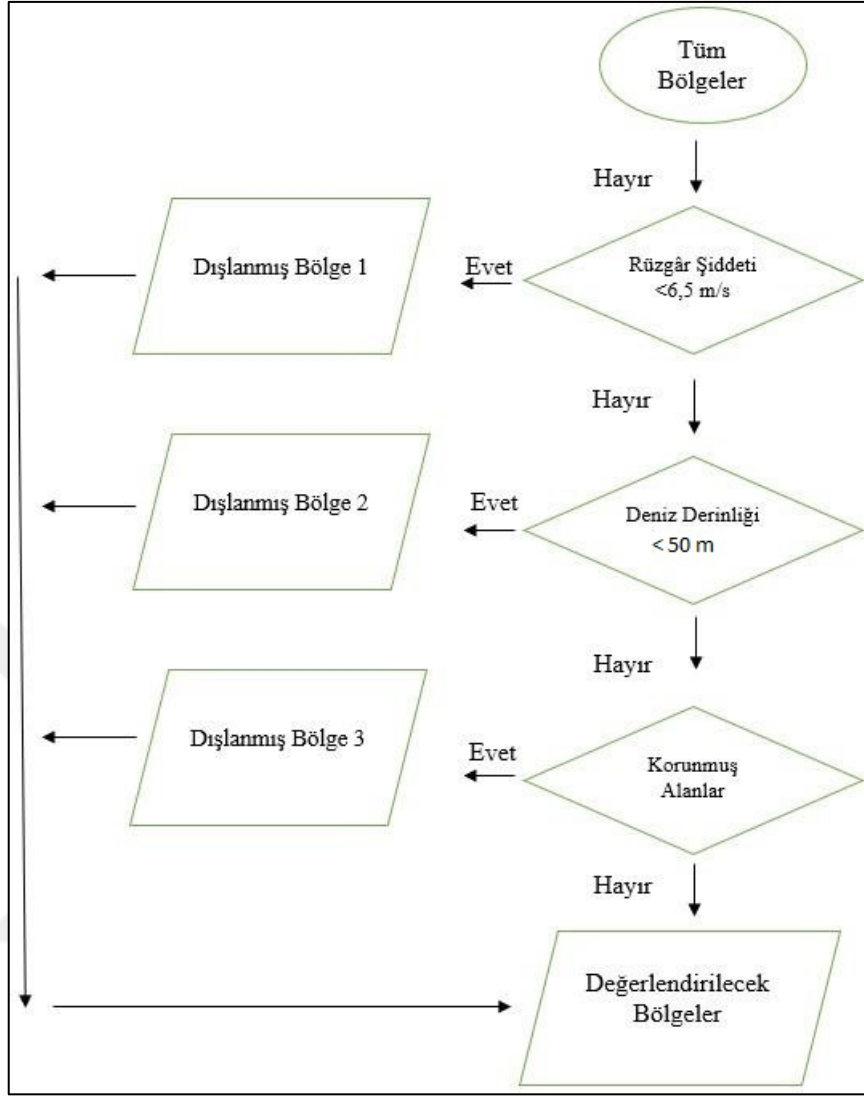
Ancak denizlerimizde, okyanuslardaki gibi yüksek dalgalar söz konusu olmadığından alınan görüşler doğrultusunda kurulum için alternatif bölge seçiminde belirgin dalga yükseklikleri dikkate alınmamıştır.

2.4.1. Dışlanmış Bölgelerin Coğrafi Bilgi Sistemi ile Belirlenmesi

3 tane hariç tutulan bölge, CBS kullanılarak dışlanmış bölge olarak belirlenmiş ve alternatif bölge için kararlardan hariç tutulmuştur. Bunlar;

- Rüzgâr hızının 6,5 m/s’den az olduğu bölgeler,
- Deniz derinliğinin 50 m’den az olduğu bölgeler, (50 metreden az derinlikte sabit kazık temelli platformlar kullanılmaktadır)
- Askeri alanlar, balık göç yolları, kuş göç yolları gibi korunmuş alanlar.



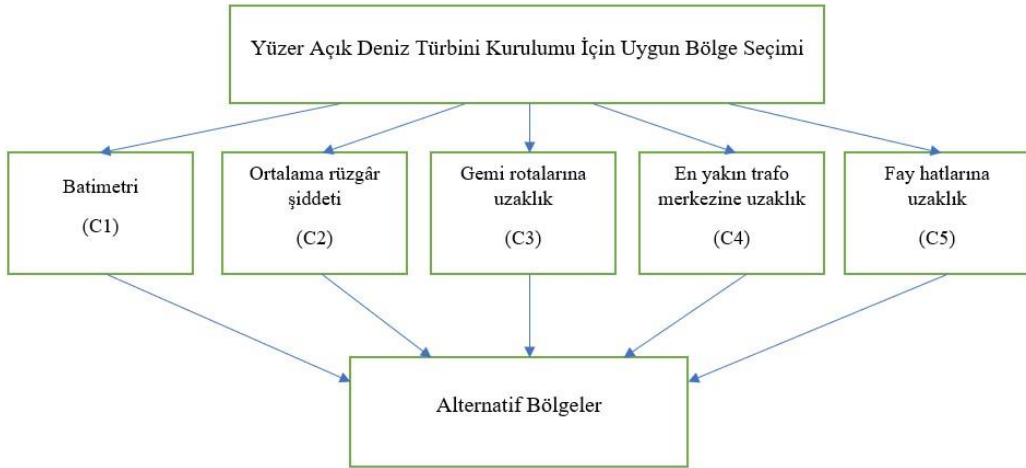


Şekil 15. Bölge seçimi akış şeması

2.4.2. Uygun Bölgelerin Değerlendirmesi

Bu bölümde gerçekleştirilen CBS ile yüzer açık deniz rüzgâr türbini kurulumu için yapılan fizibilite değerlendirmesinde, batimetri, rüzgâr hızı, deniz koruma en yakın şebekeye olan uzaklık, deniz trafik rotaları ve fay hatlarına uzaklık temel parametreler olarak belirlenmiştir. Bu kriterler literatür araştırması ve bu konuda çalışmalar yapan akademik personelin görüşü sonucunda belirlenmiştir. Alternatif bölge seçimi için gerçekleştirilen hiyerarşik yapı Şekil 16.'da gösterilmiştir.





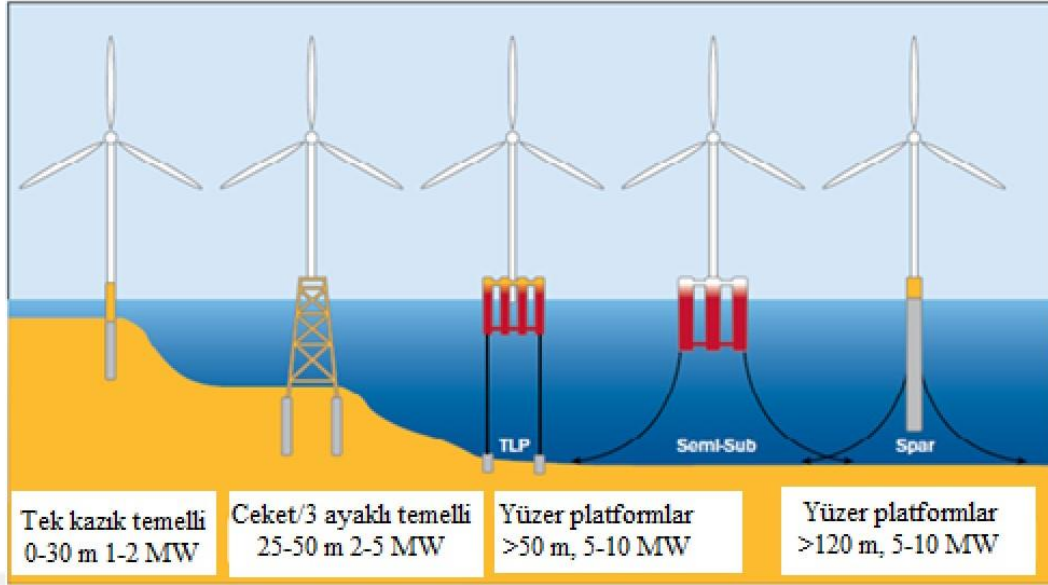
Şekil 16. Yüzer açık deniz rüzgâr türbini kurulum alanı seçimi hiyerarşik yapısı

2.4.2.1. Batimetri (Deniz Derinliği)

Deniz derinliği, kulenin monte edileceği platformun türünü ve niteliğini ve dolayısıyla maliyetini belirleyen önemli bir kriterdir. Derinlik arttıkça sabit kazık temellerin kurulması mümkün olmamaktadır. Çünkü derinlik arttıkça kullanılacak temel malzemesi ve dolayısıyla ağırlık artacak, bu da maliyet artışına neden olacaktır. Literatürde ve yapılan uygulamalarda türbin kurulumu için ideal derinlik 15-75 m olarak belirlenmiştir [147]. Bu seviyeden sonra yüzer platformların kullanımı uygun olacaktır. Platform yüzdüğü için ekstra temel, dolayısıyla ekstra ağırlık gerekmeyecek, bu durumdan maliyet artışı etkilenmeyecektir. Çok derin sularda (300 m<) bu sefer de kullanılacak olan bağlama sistemleri uzunluktan dolayı artacak ve bu oranda yine maliyet artışı gerçekleşecektir. Bu durumda derinlik-maliyet dengesini iyi gerçekleştirmek gerekmektedir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ortalama derinlik 75m-110 m arasında olup, yüzer platformlar kullanılmıştır.





Şekil 17. Derinliklere göre çeşitli platform türleri [148].

Türkiye'nin batimetri haritası Şekil 18.'de verilmiştir [149].



Şekil 18. Türkiye batimetri (derinlik) haritası [149].

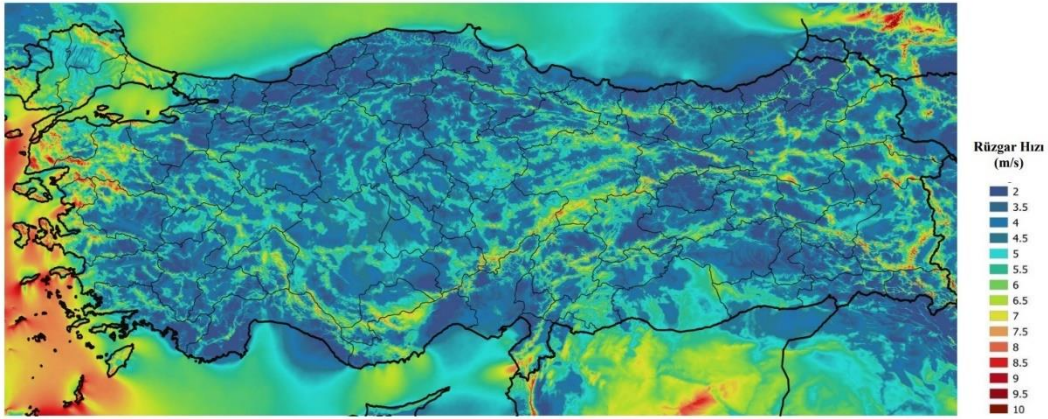
2.4.2.2. Ortalama Rüzgâr Hızı

Tricoli vd. [150] yaptıkları çalışmada bir bölgenin en önemli fizibilite parametrelerinden olan rüzgâr hızının optimum güç üretmek için minimum değerinin kara



için 5–5,5 m/s, açık deniz için ise 6,5 m/s ve üzeri olması gerektiğini söylemişlerdir. Rüzgâr hızının artması ekonomik olarak sistemin uygulanabilirliği için de önemlidir. Ancak rüzgâr hızı 25 m/s üzerine geçtikten sonra kasırga koşulları ve ekstrem durumlar söz konusu olmaktadır. Bu yüksek hızlar kule üzerindeki jeneratör ve ilgili ekipmanları içeren *nasel* üzerinde ekstra ivme oluşturmaktadır. Böyle bir durumda sistem çalışmaya devam ederse, çalışan parçalar hasar görebilmektedir. Ülkemizde REPA tarafından hazırlanan Türkiye Rüzgâr Atlası haritası incelendiğinde 100 m yükseklikteki ortalama rüzgâr hızlarının maksimum 10 m/s civarında olduğu görülmektedir.

YILLIK ORTALAMA RÜZGAR HIZI DAĞILIMI – 100 METRE

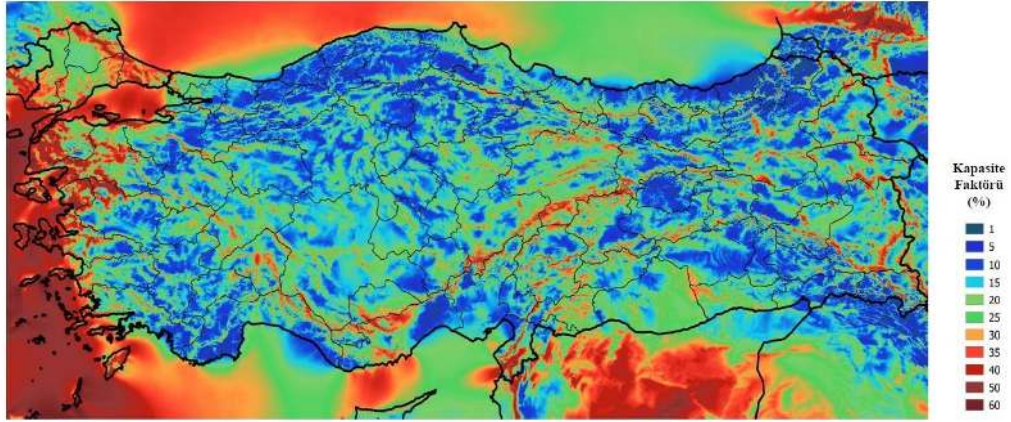


Şekil 19. Türkiye rüzgâr atlası [141].

Şekil 19. ve Şekil 20.’den görüleceği gibi rüzgâr hızının ve yoğunluğunun en fazla olduğu bölge Çanakkale ve kıyılarıdır. Gerçekleştirilen bu çalışmada alternatif bölgeler için çalışma alanı olarak Çanakkale, Gökçeada, Bozcaada ve kıyılarını içeren bölge seçilmiştir.



KAPASİTE FAKTÖRÜ DAĞILIMI – 100 METRE



Şekil 20. Türkiye kapasite faktörü dağılımı [141]

2.4.2.3. Gemi Rotalarına Olan Uzaklık

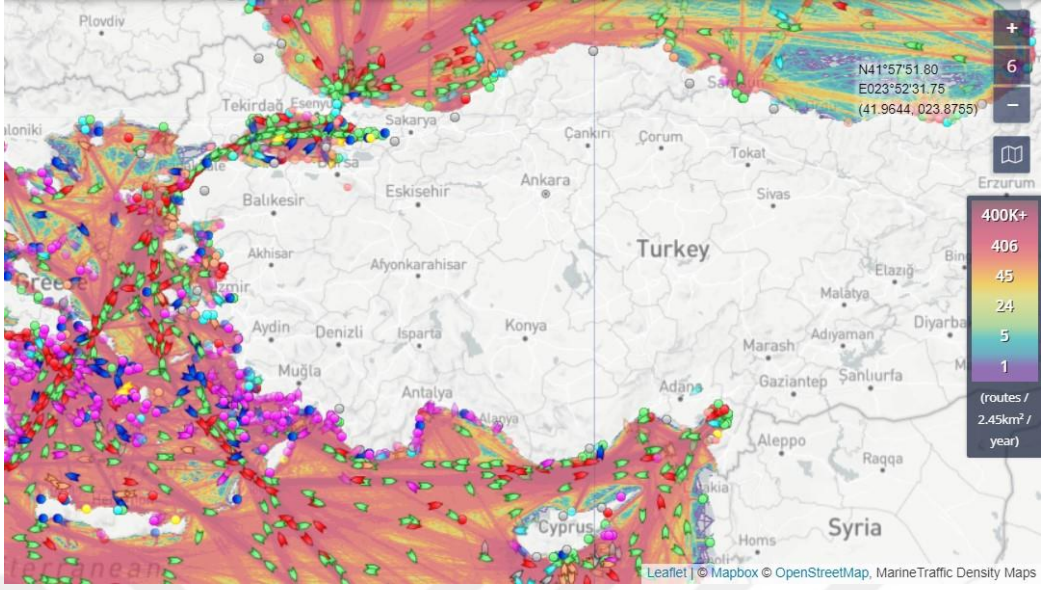
Ülkemizde deniz trafiği oldukça yoğundur. Açık deniz rüzgâr enerjisi türbinlerinin kurulması nedeniyle, gemiler ile bu yapılar arasında çarpışma ihtimalleri ortaya çıkmaktadır. Oluşan çarpışma nedeniyle petrol sızıntıları, kimyasal akıntılar gibi kirlilikler oluşabileceği gibi rüzgâr türbinlerinde ve sistemde de hasarlar meydana gelebilir. Bu hasarlar da enerji üretiminde büyük bir kayba sebebiyet verebilir. Türbinlerin normal işletme zamanlarında herhangi bir personel bulunmamaktadır. Ancak, yeni kurulum ya da tamir-bakım faaliyetleri esnasında olası bir çarpışma, personel yaralanmalarına ya da kaybına neden olabilir. Bu sebeplerle kurulacak rüzgâr sistemlerinin deniz trafiğinden uzak bir noktada konuşlandırılması gerekmektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada deniz trafiğinden ve gemi rotalarından 2 km dışarıda kalan mesafeler kurulum alanı için dikkate alınacak kriter olarak belirlenmiştir.

1

Kapasite faktörü dağılımı haritası (Şekil 20.) 3 MW gücündeki bir rüzgâr türbininin teknik değerleri dikkate alınarak hazırlanmıştır [141].





Şekil 21. Türkiye deniz trafik yoğunluğu [151].

2.4.2.4. Korunmuş Alanlar

Önceki bölümde anlatıldığı üzere dışlanmış alanlarda tutulan yasa ile koruma altına alınmış ticari balıkçılık alanları, arkeolojik alanlar, balık ve kuş göç yolları, askeri alanlar vb. bölgelerde rüzgâr enerjisi santralleri kurulumu uygun değildir.



Şekil 22. Deniz koruma alanları [152].



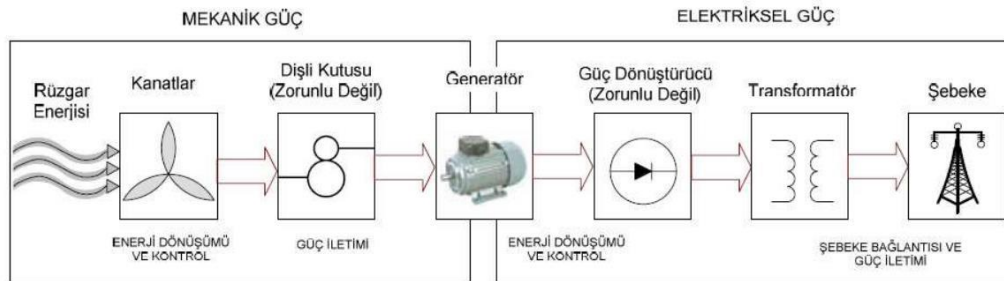
Şekil 22.'de görüldüğü gibi, seçilen yüzer açık deniz rüzgâr türbini kurulum bölgesinde herhangi bir korunmuş bölgeye rastlanmamasından dolayı, gerçekleştirilen tez çalışmasında korunmuş alanlar alternatif bölge tercihinde kriter olarak kullanılmamıştır.

2.4.2.5. Mevcut En Yakın Trafo Merkezine Uzaklık

Açık deniz rüzgâr santralleri ile sistemdeki güç iletim şebekeleri arasındaki uzaklık, olası elektrik şebeke mesafesi olarak tanımlanmaktadır [1].

Trafolarla veya enerji nakil hatlarına uzaklık, kablo maliyetlerine bağlı olarak yatırım maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca enerji iletilirken oluşacak kayıplar da dikkate alındığında seçilecek olan bölgenin enerji nakil hatlarına ve trafolarla yakın olması gerekmektedir.

Enerji iletim hatlarının maliyeti hattın yerleşimine, uzunluğuna, tipine, voltajına ayrıca güç santrali kapasitesine bağlıdır. Kabaca bakılacak olursa iletim hatlarının maliyeti km başına 50.000 USD ile 100.000 USD arasında değişmektedir. Trafo maliyetlerinin ise 2.000.000 USD'yi geçtiği görülmektedir [1].



Şekil 23. Rüzgâr türbininin şebekeye bağlanması [1]

2.4.2.6. Fay Hatlarına Uzaklık

Deprem kuşağında yer alan ülkemiz için bu konu önemli kriterlerdendir. Deprem hissedilen etkisi, fay hattının geçtiği yerin türüne, fay hattının yapısına, fayın deprem sırasında kırılma şekline, oluşan depremin süresine ve şiddetine bağlıdır. Açık deniz rüzgâr enerjisi santralleri üzerinde deprem etkisine bakacak olursak, deniz tabanında kazık temelli platformların, yüzer platformlara oranla daha fazla etkileneceği ortadadır. Çünkü denizin içinden geçse dahi, fay zeminden geçer. Bu sebeple kazık temellerle doğrudan etkileşim



halindedir. Yüzer açık deniz platformlarında ise, deniz tabanında bazı platform türleri için bağlantı sistemlerinin etkilenmesi söz konusudur. Platform olarak da deprem nedeniyle oluşabilecek dalga yüklerinden etkilenmeyi önleyecek şekilde davranmaları beklenmektedir.



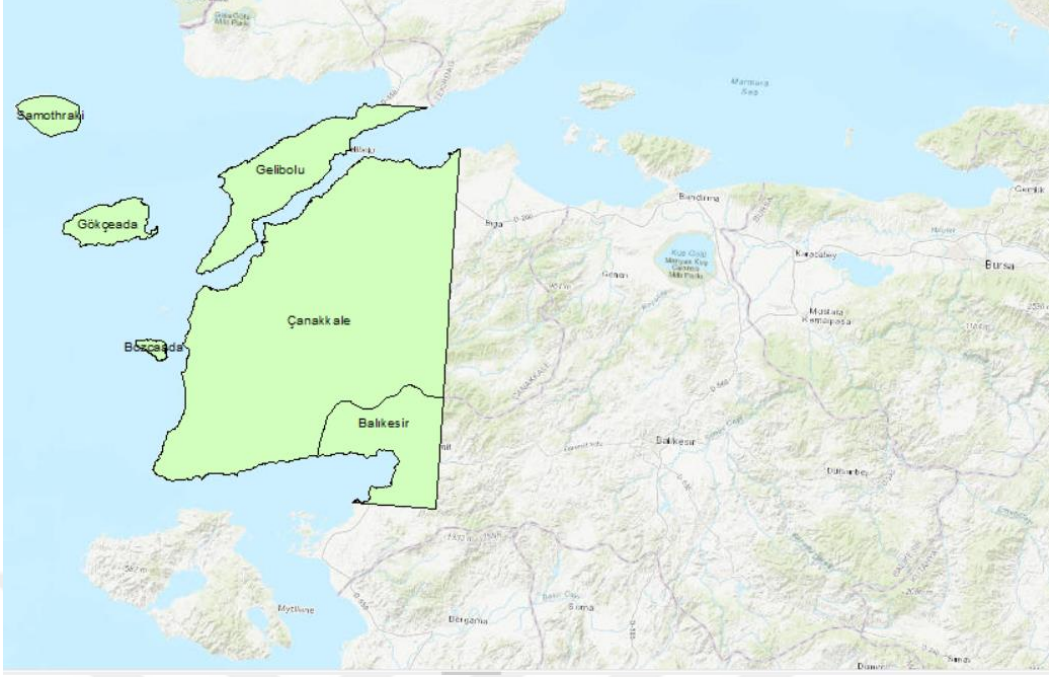
Şekil 24. Türkiye fay hatları haritası [153].

Gerçekleştirilen çalışmada fay hatlarından 2 km uzaklıktaki bölgeler alternatif bölge belirlenmesi için fay hatlarına olan uzaklık kriteri olarak seçilmiştir.

2.4.3. Sayısallaştırılmış Bölgeler

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında CBS tabanlı bir program olan ArcGIS yazılımı kullanılarak, yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbinleri kurulumu fizibilite değerlendirmesinde kullanılacak parametrelerin sayısallaştırma işlemleri bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Program ile veri katmanları oluşturulmuş, daha sonra bu katmanlar üst üste konularak yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbinleri kurulumu için alternatif bölge belirlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi gerçekleştirilen bu tez kapsamında yüksek rüzgâr hızı ve potansiyeli, deniz trafiği ve konumu nedeni ile çalışma bölgesi olarak Şekil 25.'te gösterilen Çanakkale bölgesi seçilmiştir.



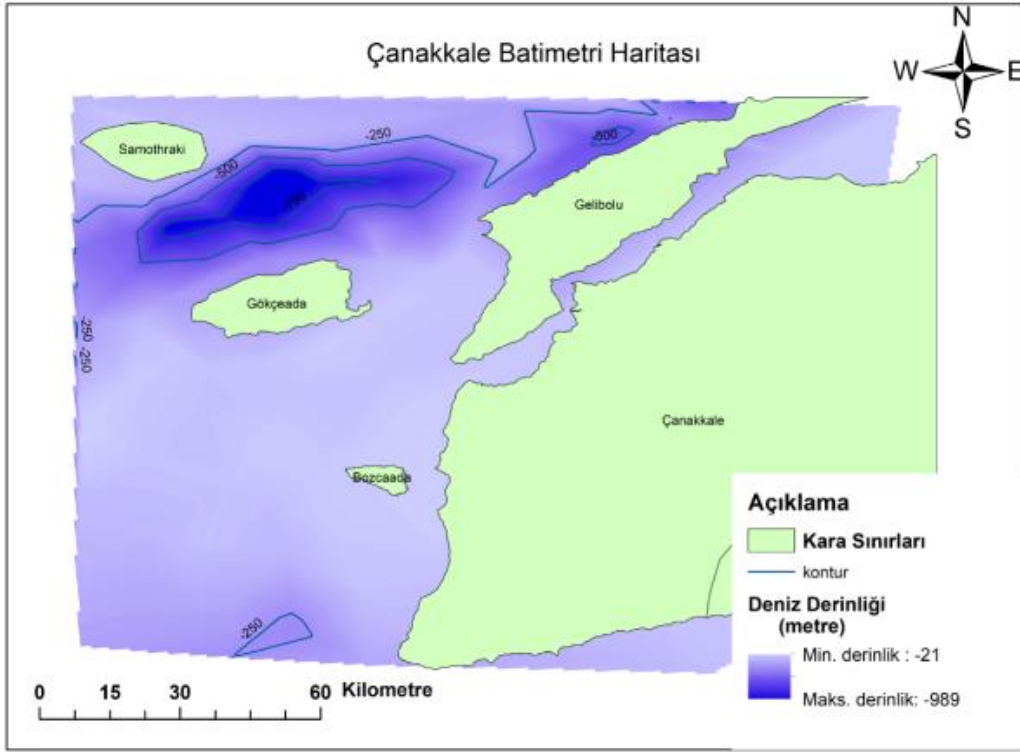


Şekil 25. Sayısallaştırma yapılan çalışma bölgesinin topografya haritası üzerinde gösterilmesi

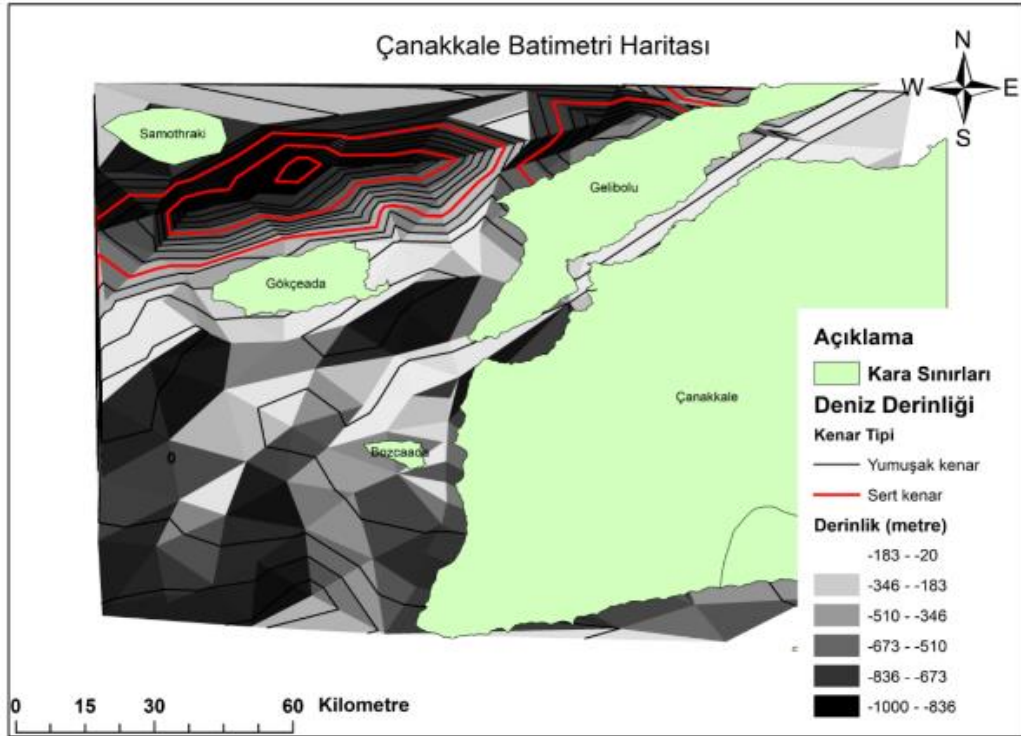
2.4.3.1. Sayısallaştırılmış Batimetri (Deniz Derinliği)

Yüzer rüzgâr türbinlerinin 100 m derinlikten sonra kullanılması uygundur. Derinlik arttıkça maliyet artışı da göz önünde bulundurularak bu çalışmada 50-300 m arası kabul edilmiş ve diğer derinlikler dışlanmış bölgeler olarak uygun yer seçiminde dikkate alınmamıştır. Bu kısımda sayısallaştırma işlemi National Centers for Environmental Informations online haritası [149] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlgili sayısallaştırılmış haritalar Şekil 26. ve Şekil 27.'de gösterilmiştir.





Şekil 26. Çanakkale batimetri haritası-1



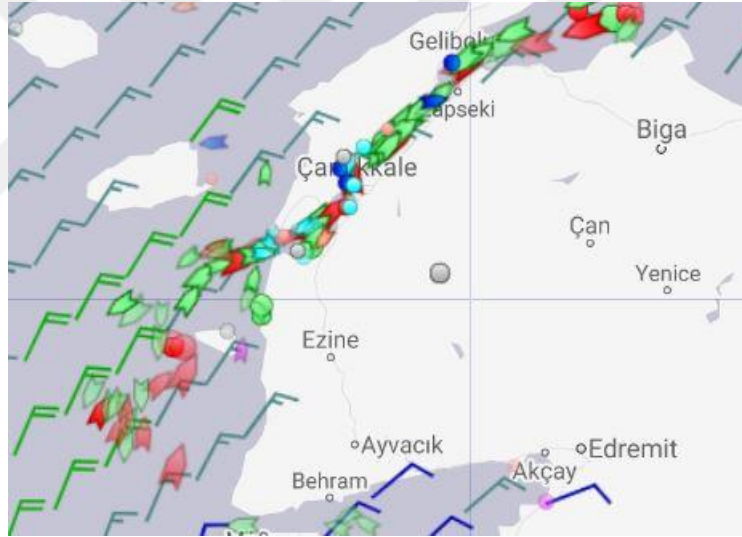
Şekil 27. Çanakkale batimetri haritası-2



2.4.3.2. Sayısallaştırılmış Ortalama Rüzgâr Hızı

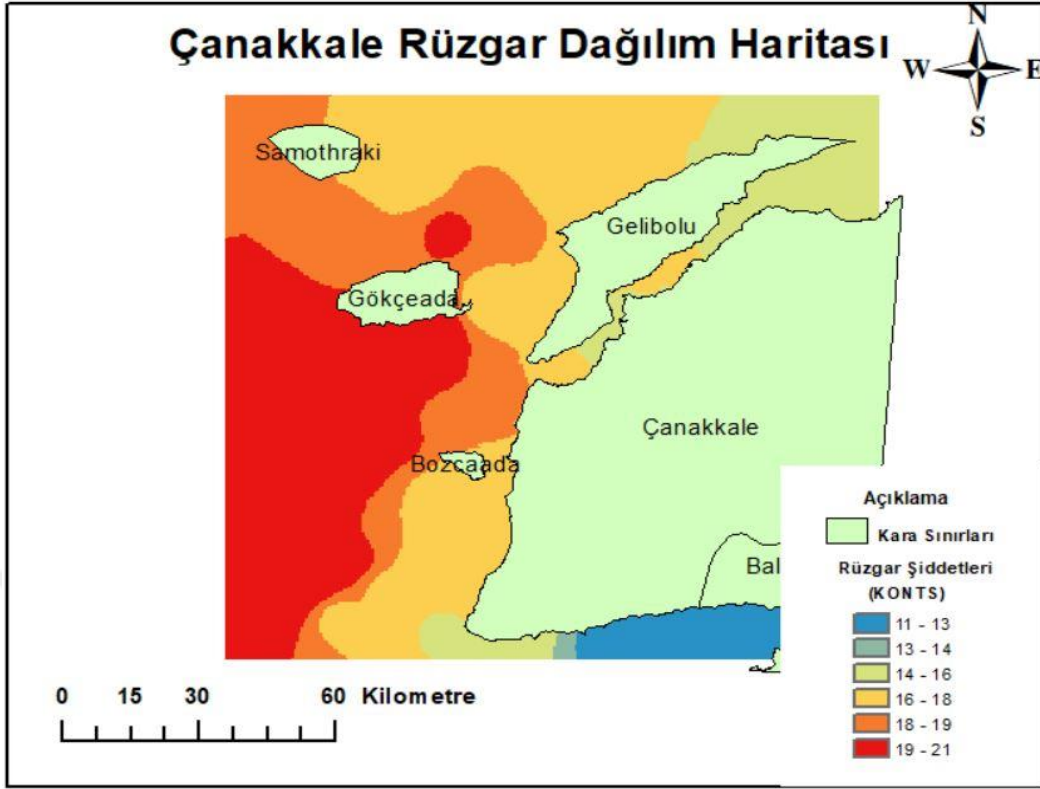
Bu çalışmada yer seviyesinden 100 m yüksekte ve ortalama 6,5 m/s'den büyük rüzgâr hızları dikkate alınmıştır. Bu sebeple 13 knot ve üzerindeki rüzgâr hızları çalışmada kullanılmıştır. Sayısallaştırma işleminde Marine Traffic online haritası [154] rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. İlgili rüzgâr değerleri vektör verileri olarak CBS programı ArcGIS yazılımına girilmiştir. Son aşamada IDW yöntemi kullanılarak sayısallaştırma gerçekleştirilmiş ve çalışma bölgesi için ortalama rüzgâr dağılımı haritası elde edilmiştir.

Burada kullanılan IDW (Inverse Distance Weighted) yöntemi ters mesafe ağırlıklı analiz yöntemi olup, belirli bir bölge hakkında veri tahmini yapabilmek için o bölgeye yakın olan noktaların tahmin hesaplamasında daha ağırlıklı olması ve daha uzak olan noktaların ise daha az etkili olması esasına dayanarak gerçekleştirilen bir işlemidir [133].



Şekil 28. Marine Traffic online haritası rüzgâr hızları [154].



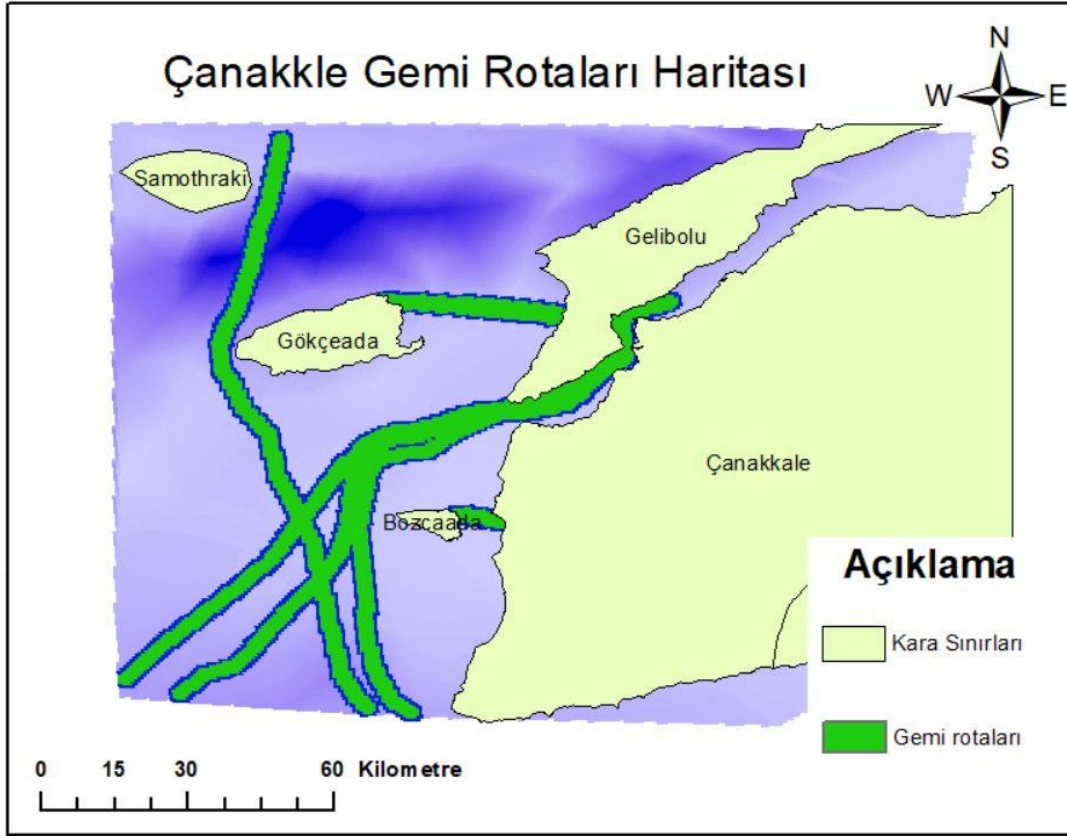


Şekil 29. Sayısallaştırılmış rüzgâr dağılım haritası

2.4.3.3. Sayısallaştırılmış Gemi Rotalarına Uzaklık

Literatür incelendiğinde gerçekleştirilen çalışmalarda gemi rotalarına uzaklık ortalama 1000 m olarak ele alınmıştır [155]. Ancak yapılan bu tez çalışmasında güvenlik açısından ilgili akademisyenlerin uzman görüşleri doğrultusunda gemi rotalarına uzaklık ortalama 2000 m olarak seçilmiştir. Yani gemi rotalarından ortalama 2000 m uzaklıktaki mesafeler kurulum için güvenli olarak belirlenmiştir.





Şekil 30. Gemi rotaları haritası

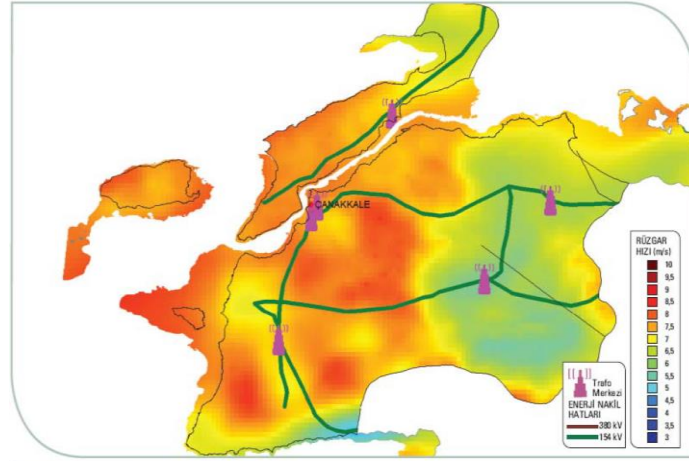
Marine Traffic Online haritasından [151] alınan rota verileri, ArcGIS yazılımına sürekli çizgi (polyline) vektör verileri kullanılarak girilmiştir. Öklid mesafe yöntemi (Euclidean Distance) kullanılarak sayısallaştırma gerçekleştirilmiş ve gemi rotaları haritası oluşturulmuştur. Rota üzerinde görülen mavi alanlar 2000 metreye kadar olan uzaklığı göstermektedir.

Burada kullanılan Öklid mesafe yöntemi her bir hücreden en yakın kaynağa olan düz-çizgi mesafesini ölçen bir fonksiyondur [133].

2.4.3.4. Sayısallaştırılmış Mevcut En Yakın Trafo Merkezleri

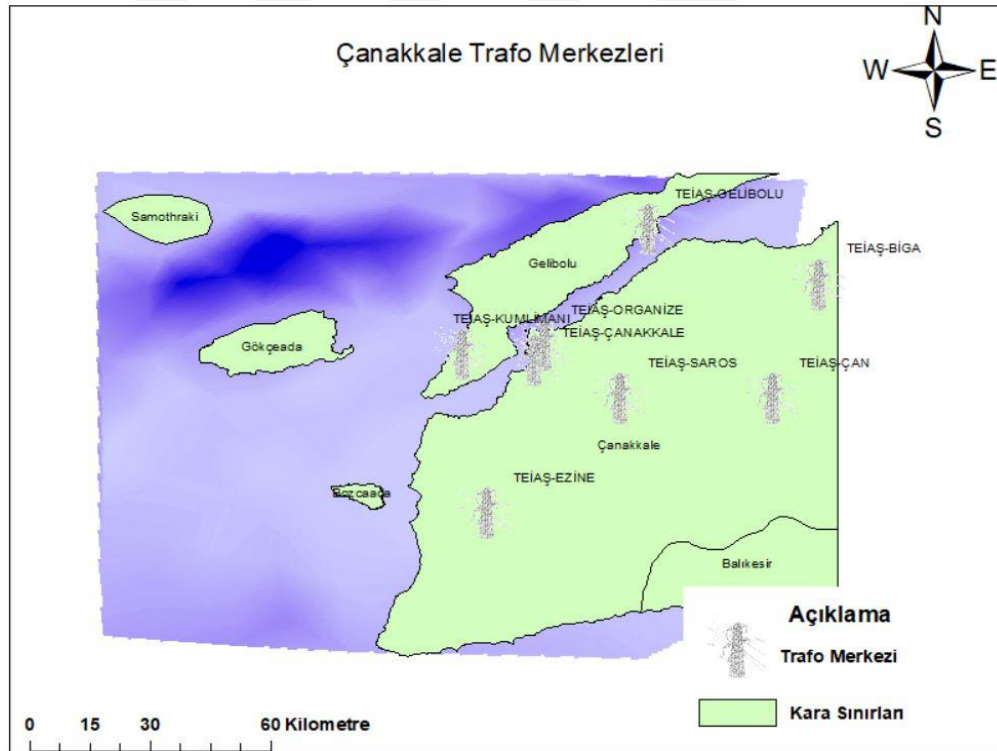
Bu bölümde REPA [156]'dan elde edilen trafo ve nakil hatları verileri referans alınarak ArcGIS yazılımına nokta veri şeklinde girilerek trafo merkezleri oluşturulmuştur. Şebekeye uzaklık, kurulacak olan iletim hatlarının uzunluğunu etkileyerek kablo maliyetlerini ve dolayısıyla yatırım maliyetlerini önemli ölçüde belirleyecektir. Bu sebeple üretilen enerjinin mümkün olan en yakın noktadan şebekeye verilmesi gerekmektedir.





Şekil 31. Çanakkale REPA trafo merkezleri ve enerji nakil hatları [156].

ArcGIS ile oluşturulan Çanakkale trafo merkezleri haritası Şekil 32.'de gösterilmiştir.

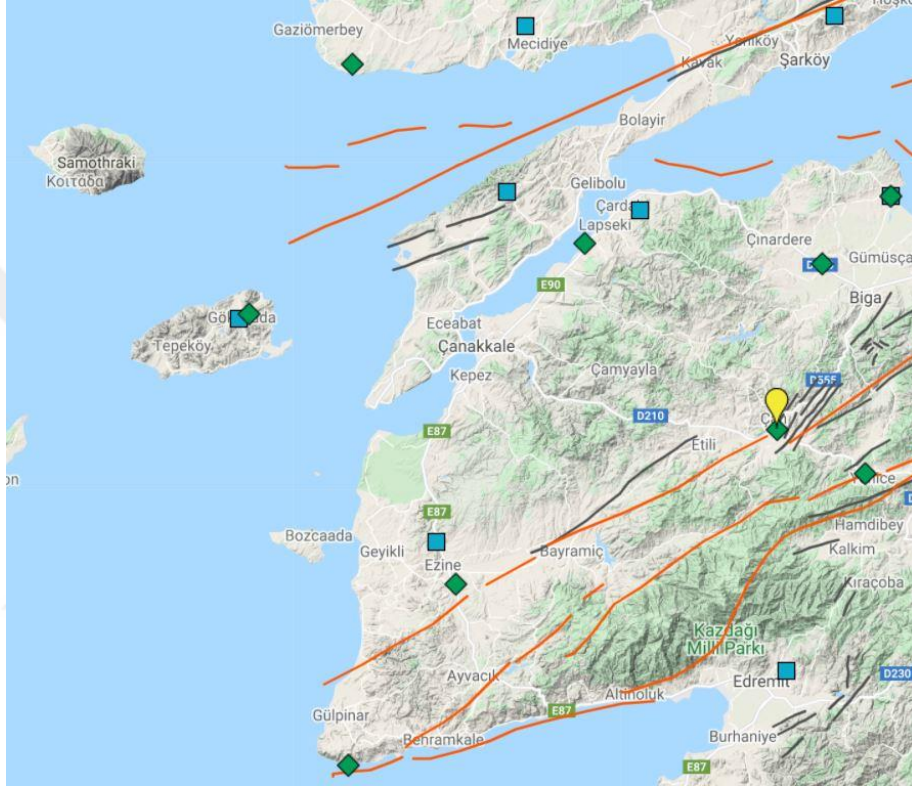


Şekil 32. Çanakkale trafo merkezleri haritası



2.4.3.5. Sayısallaştırılmış Fay Hatları Haritası

Çalışmada Kandilli Rasathanesinden [157] alınan veriler ile fay hatları değerlendirilmiştir. İlgili veriler ArcGIS programında polyline verisi oluşturularak sayısallaştırma gerçekleştirilmiş, fay hatları haritası elde edilmiştir.

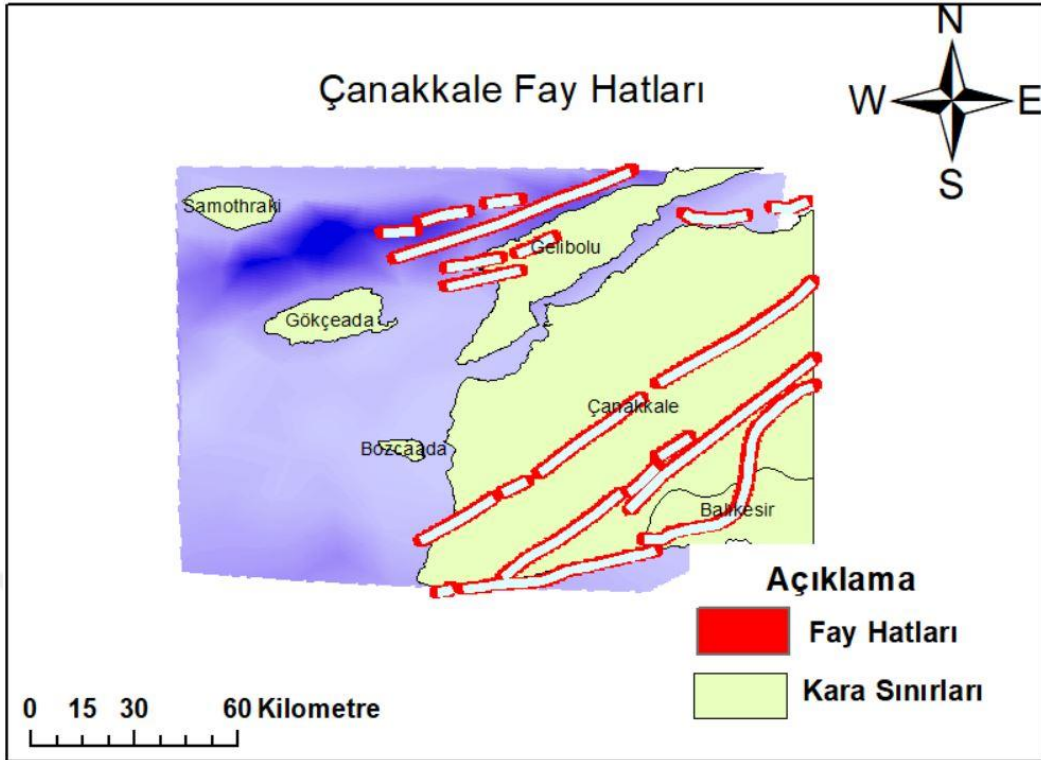


Şekil 33. Kandilli Rasathanesi Çanakkale fay hatları haritası [157].

Literatür çalışmalarından elde edilen veriler incelendiğinde, uzman görüşlerine göre birincil kriterlerde yer alan fay hatlarına uzaklık, 2000 metre olarak görülmüştür.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ise güvenli mesafe olarak uzman akademisyen görüşleri doğrultusunda fay hatlarından 3000 m uzaklıktaki bölgeler en uygun yer olarak seçilmiştir. Polyline verisi olarak ArcGIS yardımıyla oluşturulan fay hatları (Çizgisel Sismojenik Kaynaklar, Mekânsal Sismojenik Kaynaklar) Şekil 34’te gösterilmiştir. Kırmızı olarak çizilen sınırlar, fay hatlarından 3000 m uzaklığa kadar olan mesafeleri göstermektedir.





Şekil 34. Sayısallaştırılmış Çanakkale fay hatları haritası

2.4.4. Sayısallaştırılmış Katmanların Birleştirilmesi ve En Uygun Yer Seçimi

Seçilen kriterlerden gemi rotalarına uzaklık, trafo merkezlerine uzaklık ve fay hatlarına uzaklık için sayısallaştırma işlemi ArcGIS yazılımında Öklid mesafe yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr hızı ve batimetri vektör verileri ise sırasıyla IDW ve TIN yöntemleri kullanılarak sayısallaştırılmış ve raster verileri elde edilmiştir.

Elde edilen raster verileri yeniden sınıflandırma yapılarak (reclassify) son halini almıştır. Bu yeniden sınıflandırma işlemi ile aynı özellikteki verilerin kendi aralarında sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.

Gemi rotaları için oluşturulan raster verilerinin yeniden sınıflandırılmasında, rotalardan 3000 m uzaklıktaki alanlar sınıflandırmaya dahil edilmiştir. Fay hattı raster verilerinin yeniden sınıflandırılmasında ise 2000 m uzaklıktaki alanlar sınıflandırmaya katılmıştır.

Yüzer platformların verimli çalışma derinlikleri 100-300 metre arasındadır. 100 m altında sabit kazık platformlar daha ekonomik olmaktadır. 300 m üzerindeki derinliklerde ise derinlik arttıkça gerekli bağlantı kablolarının boyları uzaması nedeniyle yine maliyet artacaktır. Bu sebeplerle batimetri raster verilerinin sınıflandırılmasında 100 ila 300 m



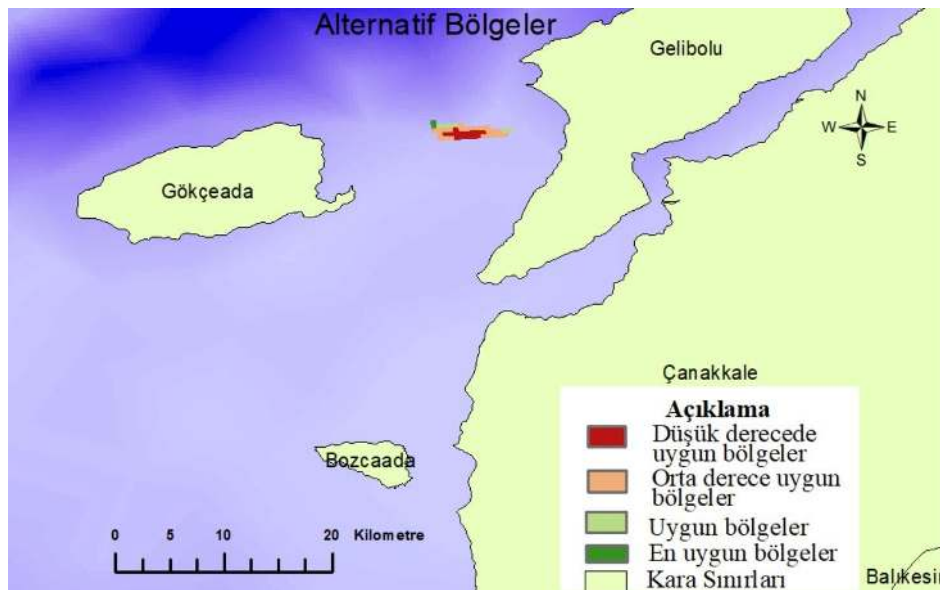
arasındaki derinlikler arasındaki alanlara yüksek, diğer derinliğe sahip alanlara düşük değerler verilerek sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Trafo merkezleri raster verilerinin sınıflandırılması işlemi ise, trafo merkezine yakın bölgeler yüksek, diğer bölgeler düşük olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Burada, bütün yeniden sınıflandırma işlemlerinde kullanılan değerler; 1 (en düşük) ile 6 (en yüksek) arasında olacak şekilde seçilmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında, aynı koordinat düzleminde (koordinat sistemi olarak Geographic Coordinate Systems WGS1984 kullanılmıştır) bulunarak yeniden sınıflandırılan sayısallaştırılmış raster veri tabakaları, ağırlık bindirme yöntemi ile (weighted overlay) önce eşit ağırlıklar atanarak, daha sonra çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan B-AHP ile elde edilen farklı kriter ağırlıkları ile üst üste bindirilmiş ve yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbini çalışma bölgesi için en uygun yer seçimi gerçekleştirilmiştir.

2.4.4.1. Senaryo 1: Eşit Ağırlıklı Katmanların Birleştirilmesi ile En Uygun Yer Seçimi

Çalışmanın bu bölümünde ağırlık bindirme (weighted overlay) yöntemi ile birleştirilmiş sayısallaştırılmış katmanlara öncelik ağırlık değerleri eşit olarak verilmiştir. Bu şekilde oluşturulan yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbini kurulumu için en uygun bölgeler Şekil 35.'de gösterilmiştir.



Şekil 35.. Eşit ağırlıklı kriterler ile belirtilmiş en uygun alternatif bölgeler haritası



Burada ortalama rüzgâr hızı 7 m/s'den (13 Knot) yüksek, 100-300 m arasındaki deniz derinliğine sahip, en yakın trafo merkezi, gemi rotaları ve fay hatları üzerinde bulunmayan alanlar görülmektedir. Yeniden sınıflandırma ile en uygun, uygun, orta derece uygun ve düşük derecede uygun bölgeler belirlenmiştir.

2.4.4.2. Senaryo 2: Öncelik Ağırlık Değerlerinin Bulanık Analitik Hiyerarşi (F-AHP) ile Belirlenerek Oluşturulan Katmanlar ile En Uygun Yer Seçimi

Çalışmanın bu bölümünde ise “ağırlık bindirme” (weighted overlay) yöntemi ile birleştirilmiş sayısallaştırılmış katmanların öncelik ağırlık değerleri, F-AHP ile elde edilmiştir.

Kriterlerin kendi içerisinde değerlendirilirken Tablo 2.'de gösterilen önem skalası dikkate alınarak, deneyimleri doğrultusunda konu ile ilgili uzman kişilerin görüşlerine başvurulmuştur. Uzman yorumları kullanılarak Tablo 4.'teki bulanık ölçüt karşılaştırma dereceleri ile bulanık üçgenler oluşturularak ikili kıyaslama matrisleri elde edilmiştir. Son olarak Laarhoven ve Pedrycz [125] tarafından geliştirilen bulanık geometrik ortalama yöntemi ile bulanık ağırlıklar belirlenmiştir.

Tablo 7. İkili karşılaştırma matrisleri ve bulanık ağırlıklar

C	C1			C2			C3			C4			C5			GEOMETRİK ORTALAMA			BULANIK AĞIRLIK		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
C1	1,00	1,00	1,00	0,25	0,33	0,50	5,00	6,00	7,00	2,00	3,00	4,00	2,00	3,00	4,00	1,38	1,78	2,24	0,20	0,26	0,32
C2	2,00	3,00	4,00	1,00	1,00	1,00	4,00	5,00	6,00	3,00	4,00	5,00	5,00	6,00	7,00	2,61	3,25	3,84	0,38	0,47	0,56
C3	0,25	0,33	0,50	0,17	0,20	0,25	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	4,00	2,00	3,00	4,00	0,70	0,90	1,15	0,10	0,13	0,17
C4	0,20	0,25	0,33	0,20	0,25	0,33	0,33	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	4,00	0,48	0,62	0,85	0,07	0,09	0,12
C5	0,20	0,25	0,33	0,14	0,17	0,20	0,20	0,33	0,50	0,20	0,33	0,50	1,00	1,00	1,00	0,26	0,34	0,44	0,04	0,05	0,06
Toplam(m)=																6,89					

C1 (batimetri) kriteri bulanık geometrik ortalaması şu şekilde hesaplanmıştır;

$$(1 \times 0,25 \times 5 \times 2 \times 2)^{1/5}, (1 \times 0,33 \times 6 \times 3 \times 3)^{1/5}, (1 \times 0,5 \times 7 \times 4 \times 4)^{1/5} = (0,2; 0,26; 0,32) \quad (31)$$



C2 (rüzgâr hızı) kriteri bulanık geometrik ortalaması;

$$(2 \times 1 \times 4 \times 3 \times 5)^{1/5}, (3 \times 1 \times 5 \times 4 \times 6)^{1/5}, (4 \times 1 \times 6 \times 5 \times 7)^{1/5} = (0,38; 0,47; 0,56) \quad (32)$$

C3 (gemi rotalarına uzaklık) kriteri bulanık geometrik ortalaması;

$$(0,25 \times 0,17 \times 1 \times 2 \times 2)^{1/5}, (0,33 \times 0,20 \times 1 \times 3 \times 3)^{1/5}, (0,50 \times 0,25 \times 1 \times 4 \times 4)^{1/5} = (0,10; 0,13; 0,17) \quad (33)$$

C4 (trafo merkezleri) kriteri bulanık geometrik ortalaması;

$$(0,20 \times 0,20 \times 0,33 \times 1 \times 2)^{1/5}, (0,25 \times 0,25 \times 0,33 \times 1 \times 3)^{1/5}, (0,33 \times 0,33 \times 1 \times 1 \times 4)^{1/5} = (0,48; 0,62; 0,85) \quad (34)$$

C5 (fay hatlarına uzaklık) kriteri bulanık geometrik ortalaması ise;



$$(0,20 \times 0,14 \times 0,20 \times 0,20 \times 1)^{1/5}, (0,25 \times 0,17 \times 0,33 \times 0,33 \times 1)^{1/5}, (0,33 \times 0,20 \times 0,50 \times 0,50 \times 1)^{1/5} = (0,26; 0,34; 0,44) \quad (35)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

m bulanık geometrik bulanık sayıların toplamı:

$$(1,78 + 3,25 + 0,90 + 0,62 + 0,34) = 6,89 \quad (36)$$

Kriterlerin bulanık ağırlıkları (WK) ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

- C1 (batimetri) kriteri bulanık ağırlığı;

$$[(1,38 \div 6,89), (1,78 \div 6,89), (2,24 \div 6,89)] = (0,20; 0,26; 0,32) \quad (37)$$

- C2 (rüzgâr) kriteri bulanık ağırlığı;

$$[(2,61 \div 6,89), (3,25 \div 6,89), (3,84 \div 6,89)] = (0,38; 0,47; 0,56) \quad (38)$$

- C3 (gemi rota) kriteri bulanık ağırlığı;



$$[(0,70 \div 6,89), (0,90 \div 6,89), (1,15 \div 6,89)] = (0,10; 0,13; 0,17) \quad (39)$$

- C4 (trafo) kriteri bulanık ağırlığı;

$$[(0,48 \div 6,89), (0,62 \div 6,89), (0,85 \div 6,89)] = (0,07; 0,09; 0,12) \quad (40)$$

- C5 (fay) kriteri bulanık ağırlığı;

$$[(0,26 \div 6,89), (0,34 \div 6,89), (0,44 \div 6,89)] = (0,04; 0,05; 0,06) \quad (41)$$

Bu işlemlerden sonra α -kesme yöntemi kullanılarak, denklem (26), (27) ve (28) ile kriterler için durulaştırılmış değerler elde edilmiştir.

Tablo 8. Durulaştırılmış kriterler öncelik değerleri

Kriterler	Bulanık Ağırlık (WK)	Durulaştırılmış
C1 (batimetri)	(0,20; 0,26; 0,32)	0,26
C2 (rüzgâr)	(0,38; 0,47; 0,56)	0,47
C3 (gemi rotaları)	(0,10; 0,13; 0,17)	0,13
C4 (trafo)	(0,07; 0,09; 0,12)	0,09
C5 (fay hatları)	(0,04; 0,05; 0,06)	0,05
Toplam=		1.00

Durulaştırılan bu değerler normalize edilerek yüzer açık deniz rüzgâr türbinleri kurulumu için en uygun alternatif bölgelerin belirlenmesinde kullanılan öncelik ağırlıkları her bir kriter için elde edilmiştir.

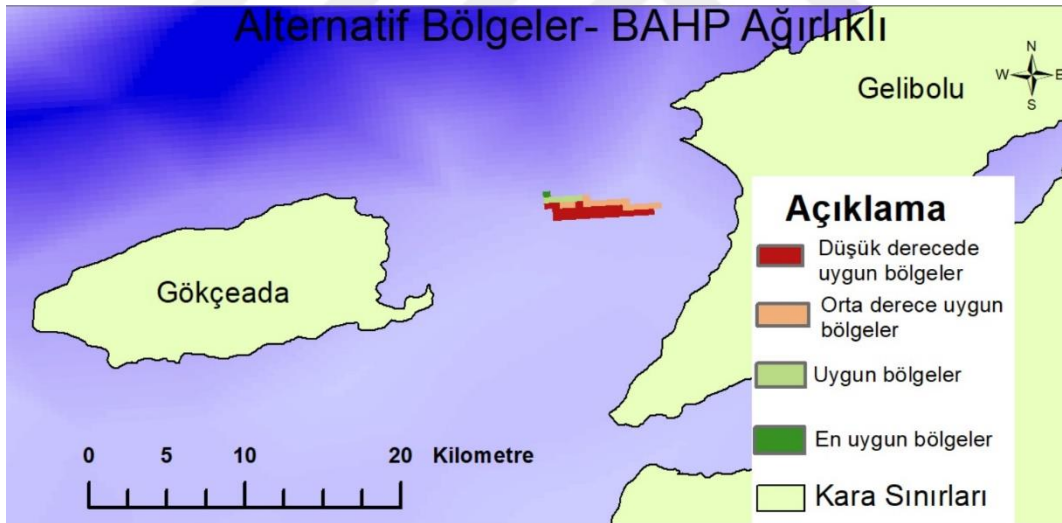


Tablo 9. Normalize edilmiş kriter öncelik değerleri

Kriterler	Normalleştirilmiş öncelik değerleri
C1 (batimetri)	0,26
C2 (rüzgâr)	0,47
C3 (gemi rotaları)	0,13
C4 (trafo)	0,09
C5 (fay hatları)	0,05

Tablo 9.'da normalize edilmiş kriter öncelik değerleri incelendiğinde, birinci önceliğe sahip olan kriterin, ortalama rüzgâr hızı kriteri (C2) olduğu görülmektedir. Bu kriteri, sırasıyla C1(batimetri), C3 (gemi rotalarına olan uzaklık), C4 (en yakın trafo merkezine uzaklık) ve C5 (fay hatlarına uzaklık) kriterleri izlemektedir.

Son olarak kriterlerin öncelik ağırlıkları dikkate alınarak ağırlıklı çakıştırma (weighted overlay) yöntemi kullanılmıştır. Böylece yüzer açık deniz rüzgâr türbini kurulumu için en uygun alternatif bölgeler Şekil 36.'daki gibi belirlenmiştir.



Şekil 36. Kriter ağırlık önceliklerine göre belirlenmiş en uygun yer seçimi

En uygun yer haritaları için Şekil 35. ve Şekil 36. incelendiğinde en uygun bölgelerin Gökçeada ve Gelibolu arasında, her iki kıyıya da yaklaşık 12 km mesafede olduğu görülmektedir. Bölgedeki ortalama derinlik 110 m, ortalama rüzgâr hızı 18 knot (9,26 m/s) olduğu görülmüştür. Sonraki aşamada seçilen bölge ve çevresel koşullara uygun olarak platform ve türbin seçimi gerçekleştirilip, akuple analizleri yapılmıştır.



2.5. Yüzer Platformların Dinamik Analizi

Bu kısımda dinamik dalga yükleri ve yüzer yapıların dinamik tepkileri incelenmektedir. Bunun için öncelikle ikinci dereceden doğrusal dalga teorileri serbest su yüzeyi sınır değer problemleri göz önüne alınarak incelenir ve Morison denklemleri ve dalga sürüklenme sönümlmeleri dikkate alınarak serbest su yüzeyi sınır değer problemi için çözüm yollarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.5.1. Yüzey Dalgalarında Sınır Değer Problemleri

Serbest yüzey sınırını çevreleyen bölgedeki akış, sınır değer problemi olarak tanımlanır. Yüzey dalga teorisi ise serbest yüzey ile sınır değer probleminin türetilmesinden elde edilmiştir. Burada akış çevrimsiz ve sıkıştırılamaz kabul edilerek hız potansiyeli Laplace denklemi kullanılarak (42) ve (43) şeklinde ifade edilebilir [158].

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (42)$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (43)$$

Burada u akışkan hızının x -, y - ve z - eksenlerindeki bileşenlerini temsil eder ve denklem (44) ile ifade edilir.

$$u = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (44)$$



Bu ifadede ϕ hız potansiyeli olarak tanımlanır. (43) denklemini çözmek için belirli sınır koşullarına ihtiyaç vardır. Deniz tabanı bir sınır koşuludur. Buna ek olarak dinamik ve kinematik olmak üzere iki tane de serbest yüzey koşulu vardır. Deniz tabanı sınır koşulu şöyle ifade edilir:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = -d \quad (45)$$

Burada d , deniz derinliğini temsil etmektedir. Kinematik koşullar serbest yüzeydeki akış partiküllerinin serbest yüzeyin herhangi bir yerinde pozisyonunu koruma isteğidir. Kinematik serbest yüzey koşulu (46) denklemi ile gösterilmektedir:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial z} = 0, \quad z = -\eta \quad (46)$$

Burada ise $\eta(x, y, t)$ serbest yüzey düzleminde zamana bağlı yer değişimini ifade eder. Dinamik serbest yüzey koşulu ise serbest yüzey üzerindeki basıncın sabit, atmosfer basıncına eşit ve normal atmosfer basıncının sıfır kabul edildiği durumdur. g yer çekimi ivmesi olmak üzere denklem (47) ile gösterilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \phi \cdot \nabla \phi) + gz = 0, \quad z = -\eta \quad (47)$$

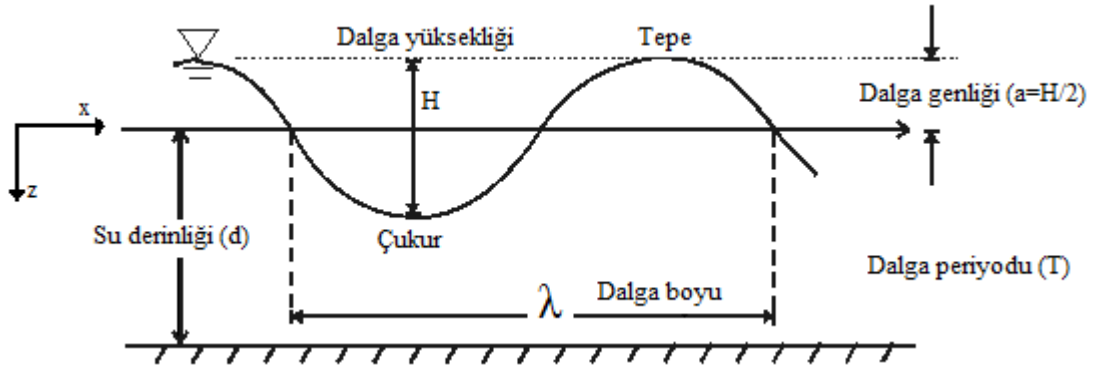


Belirli yaklaşımlar altında denklem (47)'nin çözümünü gerçekleştirmek için en uygun yöntem pertürbasyon yöntemidir. Burada dalga genliği serbest yüzey sınır koşullarını sağlamak için çok küçük kabul edilir. Yöntemde, dalga yüksekliği (dalga parçacık deplasmanı) ve hız potansiyeli kuvvet serileri çok küçük boyutsuz pertürbasyon parametresi oluşturacak şekilde alınmalıdır. Lineer, ikinci dereceden veya daha yüksek mertebelerden dalgaların eldesi için ise; dalga yüksekliği ve hız potansiyeli pertürbasyon parametrelerini göstermek üzere, dalga denkleminin pertürbasyon formülü ile çözümü yapılabilir.

2.5.2. Dalga Teorisi

Serbest yüzeydeki dalga etkileri gemi ve diğer deniz yapıları hidromekaniği için çok önemlidir. Hidrodinamik, yüzen veya sabit yapılar üzerindeki dalga etkilerini incelemektedir.

Düzenli dalgalar, sonsuz dalga tepesi ve dalga çukurundan oluşan sinüzoidal profile sahiptir. Dalga tepesi ve dalga çukuru dalga ilerleme yönüne dik olarak sıralanmaktadır [158].



Şekil 37. Düzenli dalga profili [158].

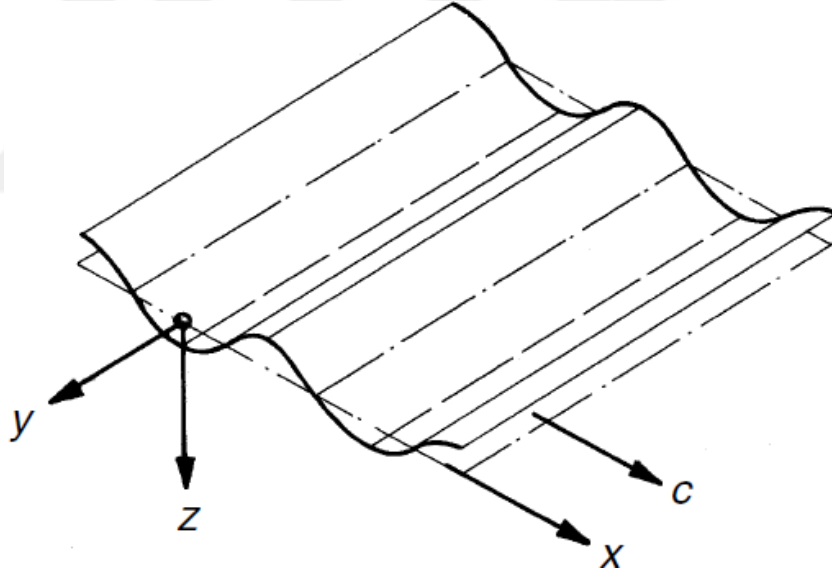
Düzenli dalgalar bir dalga boyu (λ), ya da dalga sayısı (k), ve bir zaman parametresi olan dalga periyodu (T), ya da dalga frekansı (ω) ile ifade edilmektedir. Şekil 37.'deki düzenli dalga profilinde, H , dalga genliğinin 2 katı olacak şekilde dalga yüksekliğini göstermektedir. Birbirinin izleyen iki dalga tepesi ya da dalga çukuru arasındaki mesafe dalga boyu (λ) olarak adlandırılmaktadır. Bir dalga boyu kadar yol için geçen süre ise dalga



periyodunu (T) ifade etmektedir. Dalga sayısı (k) ve dalga frekansı (ω) ise sırasıyla şöyle tanımlanmaktadır:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (48)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (49)$$



Şekil 38. Düzenli dalgalar [159].

Bir dalga tepesi ya da çukurunun yer değiştirme hızı, dalga hızı (c) olarak adlandırılır ve denklem (50) ile bulunmaktadır.

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (50)$$



Düzenli dalgalarda k ile aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:

$$k = \frac{\omega^2}{g} \text{ derin suda,} \quad k \tanh(kd) = \frac{\omega^2}{g} \text{ sığ suda} \quad (51)$$

Burada g yerçekimi ivmesini, d ise su derinliğini ifade etmektedir. Bu denklemler düzenlenerek derin su için dalga hızı şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$c = \sqrt{\frac{g}{K}} = \frac{g}{\omega} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi} \quad (52)$$

Yüzer yapıların hareketlerinde, söz konusu dalgaların yerçekimi ve yüzey gerilim etkileri önem taşımaktadır. Suyun sıkıştırabilir özelliği ve derin sulardaki hareketleri için viskozite ihmal edilerek ideal akışkan varsayımı, dalgaların tanımında potansiyel teoriyi kullanılabilir kılmıştır [159].

Sınır değer problemlerinde birinci ve ikinci mertebeli çözümlere bakıldığında, birinci dereceden çözüm ile lineer dalga teorisi, ikinci dereceden çözüm ile ikinci dereceden dalga teorisi (lineer olmayan dalga) elde edilmektedir. Denklem (53) ve (54) sırasıyla hız potansiyelini ve dalga genliğini göstermektedir.

$$\phi = \sum \varepsilon^{(n)} \phi^{(n)} \quad (53)$$



$$\eta = \sum \varepsilon^{(n)} \eta^{(n)} \quad (54)$$

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

Birinci dereceden hız potansiyeli:

$$\phi^{(1)} = \text{Re} \left[\frac{-igA \cosh(k(z+d))}{\omega \cosh(kd)} e^{i(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t)} \right] \quad (55)$$

Birinci dereceden dalga genliği ise;

$$\eta^{(1)} = A \cos(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t) \quad (56)$$

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

İkinci dereceden potansiyel:

$$\phi^{(2)} = \text{Re} \left[\frac{3}{8} \omega A^2 \frac{\cosh 2k(z+d)}{\sin^4 kd} e^{i(2kx \cos \theta + 2ky \sin \theta - 2\omega t)} \right] \quad (57)$$



İkinci dereceden dalga yüksekliği ise denklem (58)'da gösterilmiştir.

$$\eta^{(2)} = A^2 k \frac{\cosh(kd)}{\sin^3 h(kd)} (2 + \cosh(2kd)) \cos(2kx \cos \theta + 2ky \sin \theta - 2\omega k) \quad (58)$$

2.5.3. Zaman ve Frekans Tanımlı Alanlarda Deniz Durumları

Yukarıda gösterilen düzenli dalga durumlarına rağmen gerçek denizde ise, dalgalar düzensiz fazlı ve karışıktır. Tam gelişmiş dalga, enerji spektrumları ile rastgele ve karışık fazlı, düzensiz dalga topluluklarıyla birlikte modellenmektedir [158]. Frekans tanımlı alanda hesaplamalar gerçekleştirmek için deniz durumunun bir güç spektrumu olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Dalga salınım periyodu başına spektral genlik, dalga koşullarını karakterize etmektedir. Burada Pierson-Moskowitz, ISSC, ve Joint North Sea Wave Observation Project (JONSWAP) spektrumları en yaygın bilinen ve kullanışlı olan enerji spektrumları olarak gösterilmektedir [160]. Pierson-Moskowitz ve JONSWAP spektrumları birbiriyle yakından ilişkilidir.

$$S_i(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega_i} \right)^4 \right] \gamma^r \quad (59)$$

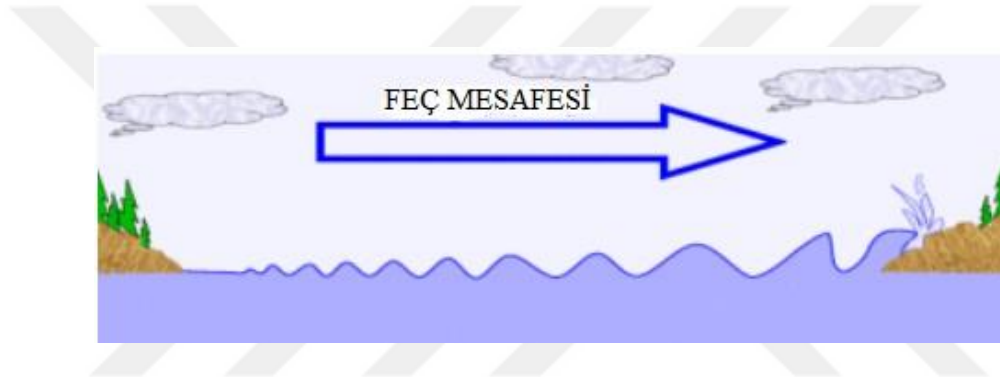
$$r = \exp \left[-\frac{(\omega_i - \omega_p)^2}{2 \sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (60)$$

$$\alpha = 0,076 \left(\frac{U_{10}^2}{x g} \right)^{0,22} \quad (61)$$



$$\omega_p = 0,076 \left(\frac{x g}{U_{10}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (62)$$

Yukarıdaki ifadelerde α parametresi, $\omega < \omega_p$ olduğu müddetçe 0,07, diğer durumlarda is 0,09'dur. x feç mesafesini, U_{10} ise deniz seviyesinden 10 m yükseklikteki rüzgâr hızını göstermektedir [6]. Belirgin dalga yüksekliği (h_s) ve pik periyodu (γ) JONSWAP dalga spektrumuna etki eden faktörlerdendir. Burada JONSWAP spektrumunda pik periyodu $\gamma=1$ olduğu durumda, Pierson-Moskowitz spektrumu elde edilmiş olur.



Şekil 39. Feç mesafesi [161].

Zaman tanımlı alan hesapları ise Fourier dönüşümleri aracılığıyla frekans tanımlı alan spektrumları ile ilişkilidir. Cooley-Tukey [162] hızlı Fourier dönüşümü (FFT), SIMO-Riflex [163] gibi yazılımlarda uygulama örneklerinde de kullanılan bir algoritmadır. Bu çalışmada FFT uygulamasını aşağıdaki gibi açıklayan zaman tanımlı alan çözümü için NREL tarafından geliştirilen FAST [164] yazılımı kullanılmıştır.

$$\eta(t)|_{t=n\delta t} = \frac{1}{N} \sum_{k_s=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} W[k_s] \sqrt{\frac{2\pi}{\delta t}} S_{\eta}(\omega)|_{\omega=k\Delta\omega} e^{j\frac{2\pi k_s n}{N}} \quad (63)$$



Denklem (63)'de $j \sqrt{-1}$ değerinde olan sanal sayıyı temsil etmektedir. Deniz durumunu zaman tanımlı alan simülasyonlarında temsil etmek için kullanılan n ve k_2 ayrık zaman adımı ve ayrık frekans adımı sayaçlarıdır. N ise toplam ayrık adım sayısıdır ve denklem (64) ile tanımlanmaktadır.

$$N = \frac{t_{max}}{\Delta t} = \frac{2 \omega_{max}}{\Delta \omega} = \frac{2\pi}{\Delta t \Delta \omega} \quad (64)$$

Buna göre simülasyon zamanı ile frekans tanımlı alan analizinden elde edilen bilgiler birbirleriyle ilişkili olduğu görülmektedir.

2.5.4. Hidrostatik ve Düşey Stabilite

Hidrostatik geri getirici kuvvet, katener bağlı yapılarda stabilite sağlar. Aynı zamanda, genel sertliğe katkıda bulunarak platform hareketleri ve doğal frekanslarla da ilgilidir. Yüzen bir yapı üzerine uygulanan kaldırma kuvveti, yer değiştiren sıvının merkezine etki etmektedir. Yapı n kadar hacme ayrıldığı kabul edilirse:

$$\nabla = \sum_{i=1}^n \nabla_i \quad (65)$$

Yüzdürme merkezinin konumunu bulmak için x , y ve z eksenlerindeki hacimlerin ağırlık merkezleri omurgaya (K) göre düşey olarak hesaplanmaktadır:

$$(x_b, y_b, z_b) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \nabla_i x_i}{\nabla}, \frac{\sum_{i=1}^n \nabla_i y_i}{\nabla}, \frac{\sum_{i=1}^n \nabla_i z_i}{\nabla} \right) \quad (66)$$



Statik dengede kaldırma kuvveti, G ağırlık merkezinde hareket eden ağırlığa karşı koyar ve her iki kuvvet de aynı dikey çizgi üzerinde hareket etmektedir. Yapı döndükçe, su altı geometrisi değişmekte ve bu durum, kaldırma kuvvetinin merkezi yer değiştirmesine neden olmaktadır. Kaldırma kuvvetinin yeni hareket çizgisi, M metasantr merkezinde bir öncekiyle kesişir. Bu nokta ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe, GM, yapının ilk kararlılığını göstermektedir. Bu değerin pozitif olması, yüzer yapının verilen pozisyonda sabit olduğunu söylemektedir. Değer negatif ise yapı, bağlama sistemleri gibi diğer bileşenlerle mevcut konumunda tutulmadığı sürece bir denge noktasına ulaşılan kadar dönmeye devam edecektir. Metasantrik yükseklik aşağıdaki parametreler kullanılarak denklem (67) ile tanımlanmaktadır:

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (67)$$

Denklem (65)'i kullanabilmek için ağırlık merkezinin konumunun, $CG = (x_g, y_g, z_g)$, bilinmesi gereklidir. BM ise su hattının ataletine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$BM = \frac{I_{ij}^w}{\nabla} \quad (68)$$

Denklem (68)'da I_{ij}^w terimi, ij alt indisi yalpa hareketi için xx , baş-kıç vurma hareketi için ise yy indislerine dönüşerek su hattı alanı momentlerini temsil etmektedir. x ve y eksenleri sırasıyla boyuna ve enine eksenler olarak tanımlanmaktadır. Yapının su hattı alanı temel bir şekle (daire veya dikdörtgen gibi) sahip ise, bunlar analitik formüller aracılığıyla hesaplanabilir. Aksi durumda genelleştirilmiş bir sayısal çözüm gereklidir. Su hattı alanı



köşeleri $V(x_i, y_i)$ olacak şekilde kapalı bir çokgen olarak tanımlanırsa, bu durumda alanın ikinci momenti şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$I_{xx} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n (y_i^2 + y_i y_{i+1} + y_{i+1}^2) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (69)$$

$$I_{yy} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n (x_i^2 + x_i x_{i+1} + x_{i+1}^2) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (70)$$

$$I_{xy} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n (x_i^2 + x_i x_{i+1} + x_{i+1}^2 + y_i^2 + y_i y_{i+1} + y_{i+1}^2) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (71)$$

Hidrostatik kuvvetler, aynı zamanda, geri getirici kuvvet katsayıları ile yapının hareketlerini de etkilemektedir. $n = (n_1, n_2, n_3)$ gövdeye dik birim alan ve S_b ıslak yüzey alanı olmak üzere, denge konumundaki geri getirici kuvvet katsayıları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [165]:

$$C_{33} = \rho g \iint_{S_b} n_3 dS \quad (72)$$

$$C_{34} = \rho g \iint_{S_b} y n_3 dS \quad (73)$$



$$C_{35} = -\rho g \iint_{S_b} x n_3 dS \quad (74)$$

$$C_{44} = \rho g \iint_{S_b} y^2 n_3 dS + \rho g \nabla z_b - m g z_g \quad (75)$$

$$C_{45} = -\rho g \iint_{S_b} x y n_3 dS \quad (76)$$

$$C_{46} = -\rho g \nabla x_b + m g x_g \quad (77)$$

$$C_{55} = \rho g \iint_{S_b} x^2 n_3 dS + \rho g \nabla z_b - m g z_g \quad (78)$$

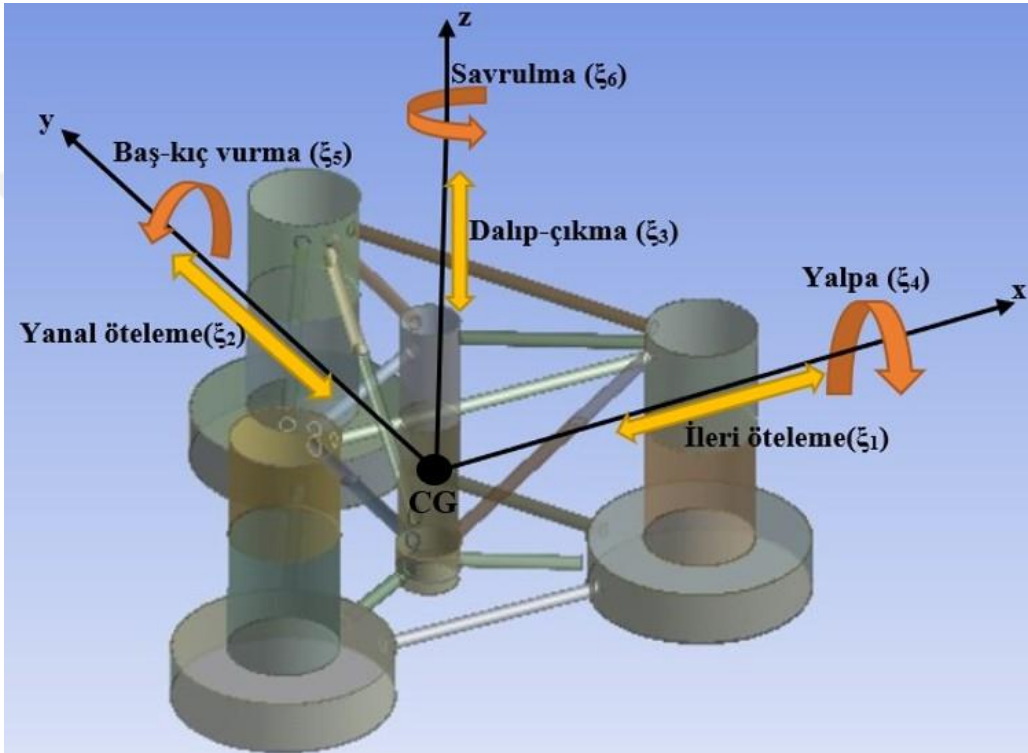
$$C_{56} = -\rho g \nabla y_b + m g y_g \quad (79)$$

Burada, 3, 4, 5, 6 alt indisleri sırasıyla dalıp-çıkma, yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma hareketlerini göstermektedir. Şekil 40'ta bu hareketler tanımlanmıştır. Diğer kullanılmayan hidrostatik geri getirici terimler sıfırdır. Yapının su hattı alanı ve atalet momentleri, ağırlık merkezi ve su altı hacmi, geri getirici kuvvet matrisini elde etmek için gerekli olan değişkenlerdir. Ağırlık merkezi ve yüzme merkezi aynı doğrultuda olmayan yapılar için yalpa ve savrulma akuple hareketine (C_{46}) dikkat edilmelidir. Bu durum çoğu yatay eksenli



rüzgâr türbinleri için de geçerlidir (örneğin NREL 5 MW türbini kullanılan DeepC [166] platformlarından herhangi biri).

Yüzer yapının hareket dinamiğinde önemli bir konu olan geri getirici kuvvetler, yüzen yapının türüne bağlıdır. Yarı-batık ve SPAR platformlar için hidrostatik geri getirici kuvvetler ve düşey stabilite kritik öneme sahiptir. TLP konseptlerinde ise, hareketler tendonlar tarafından kısıtlanmaktadır.



Şekil 40. Platform hareketleri

2.5.5. Yapı Üzerindeki Dalga Yükleri

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

- Yerel hidrodinamik basınç yükleri,
- Basınç farklılıklarının integrallerinden kaynaklanan boyuna kesme kuvvetleri, burulma ve eğilme momentleri,



- Güverte su basması ve dövünme esnasında yerel olarak gemi üzerinde oluşacak ani basınç değişimlerinin teknede yaratacağı titreşimden kaynaklanan eğilme ve burulma momentler [167].

Gövde üzerindeki ikinci mertebeden hidrodinamik kuvvetler ve momentler, yapı ıslak yüzey üzerine etki eden hidrostatik basıncın integrasyonu ile anlık zaman adımıyla doğrudan bulunabilmektedir [158].

$$P^{(2)} = -\rho \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi^{(1)})^2 \quad (80)$$

Ayrıca dalga boyu ile kıyaslamalı olarak yapının boyutuna ve yapı üzerindeki akış rejimine bağlı olarak basınç etkileri değişiklik göstermektedir. Bağlama halatları gibi silindirik ve küçük kesitli yapılar için, yapı etrafındaki dalga alanını bozmayacak kadar küçük olduğu varsayılan bir ampirik ifade olan Morison Denklemi [168] kullanılmaktadır. Daha büyük göreceli yapılar için, platformun varlığı dalga alanını değiştireceğinden dalgadaki kırınım ve radyasyon bileşenlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Yüzer yapılar üzerindeki basınç etkilerinin bir dökümü şu şekilde sıralanabilir [6]:

- Bozulmamış gelen dalgalar için Froude-Krilov kuvvetleri;
- İdeal bir akışkandaki su partikülleri ve yapısal bileşenler arasındaki bağıl ivme ve hız nedeniyle oluşan, radyasyon bileşeni ve ilgili hidrodinamik ek su kütlesi ve potansiyel sönümlenme kuvvetleri;
- Gelen dalganın yapı tarafından kırılmasıyla oluşan dalgaların neden olduğu kırınım bileşenleri.

2.5.5.1. Difraksiyon ve Radyasyon Teorisi

Gelen dalgaların tekne ve platformlar üzerinde oluşturduğu kuvvetler uyarıcı dalga kuvvetleri olarak tanımlanmaktadır. Bu kuvvetler Froude-Krylov ve difraksiyon kuvvetleri



olarak ikiye ayrılır. Froude-Krylov kuvvetleri, gelen dalgalar etkisiyle yüzer yapı üzerinde oluşan hidrodinamik basınç alanlarından kaynaklanan kuvvetlerdir.

Serbest yüzen veya sabitlenmiş yapılar yüzeyine gelerek kırınımına uğrayan dalgalar difraksiyon (kırınım) dalgaları olarak adlandırılmaktadır. Bu dalgaların etkisiyle yüzen cisimler üzerinde oluşan hidrodinamik basınç alanları kaynaklı kuvvetler de difraksiyon kuvvetleri olarak adlandırılmaktadır.

Radyasyon (saçılım, yayılım) dalgaları ise serbest yüzmekte olan yapıların dalgalar arasındaki hareketinden kaynaklanan ya da yapının sakin suda zorlanmış salınım hareketinden dolayı oluşturduğu dalgalardır. Sabitlenmiş yapılar için radyasyon dalgalarından söz edilemez. Radyasyon dalgalarının bu yüzer yapılar üzerinde oluşturduğu hidrodinamik basınç alanından kaynaklanan kuvvetler de radyasyon kuvvetleridir ve bu kuvvetler ek su kütlesi ve sönüm katsayısı terimleri cinsinden ifade edilebilir [169].

2.5.5.2. Morison Denklemi

İnce silindirik yüzer yapılarda atalet, ek su kütlesi ve sürüklenme kuvveti sönümleme etkilerinin hesaplanması için Morison vd. [168] tarafından denklem (81) önerilmiştir.

$$F_M = C_M \rho V \ddot{u}_n - C_M \rho V \ddot{\zeta}_n + \frac{1}{2} \rho C_D D_S (u_n - \dot{\zeta}_n) |u_n - \dot{\zeta}_n| \quad (81)$$

Burada F_m Morison kuvvetini, V ise birim uzunluk başına düşen hacmi temsil etmektedir ve D silindirik ince yapının çapı olmak üzere denklem (82) ile hesaplanmaktadır. Denklem (83)'de ise atalet kuvvetleri katsayısı olan C_M 'nin hesaplanması gösterilmiştir.

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \quad (82)$$



$$C_M = 1 + C_a \quad (83)$$

Burada C_a ek su kütlesi katsayısıdır. Denklem (81)'da geçen diğer bilinmeyenler ise; C_D sürüklenme katsayısını, D_s silindirik ince yapının çap ya da genişliğini, $\dot{u}_n$ ve u_n sırasıyla silindirik yapı üzerindeki normal akışın ivmesini ve hızını, $\ddot{\zeta}_n$ ve $\dot{\zeta}_n$ ise sırasıyla ince silindirik yapının ivmesini ve hızını göstermektedir. Yüzer yapının narinliği (genişlik ya da çapının uzunluğa oranı) dalga boyu ile karşılaştırıldığında çok küçük kalmaktadır. Bu sebeple yapı üzerindeki sürüklenme kuvvetleri yok sayılamaz. Yine aynı sebeple viskoz etkiler de ihmal edilebilir değildir. Son olarak denklem (81) bulunan kuvvet dalga kuvvetlerine eklenerek yapı üzerindeki toplam kuvvetler bulunmuş olur.

Düz silindirler için daha önce gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları Morison denkleminin doğruluğunu göstermiştir [170]. Bununla birlikte, son çalışmalarda türbin gücü ile birlikte yapı boyutunun da kaçınılmaz olarak artması nedeniyle yüzer rüzgar platformlarındaki tutarsızlıklar da tartışılmaktadır [55].

2.5.6. Hidrodinamik Olarak Kompakt Yapılar

Morison tarafından önerilen çözüm, yapının (veya yapısal elemanın) dalgaya kesintisiz geçişe izin verecek kadar küçük olduğunu kabul etmektedir. Bu tür yapılar hidrodinamik olarak şeffaf olarak tanımlanabilir. Kırınım parametresi, durumun böyle olup olmadığını göstermektedir [6]:

$$Kırınım\ parametresi = \frac{\pi D}{\lambda} \quad (84)$$

Burada λ dalga boyudur. 0,5'ten büyük kırınım parametreleri için akış yapıdan ayrılır ve potansiyel akış yaklaşımı geçersiz olmaktadır. Bu durumda Morison Denklemi



uygulanabilir kılınmaktadır. Keulegan-Carpenter ve Reynolds sayıları, akış rejimini sürüklenme veya atalet baskın olarak tanımlamaktadır.

Tersi durumda, kırınım parametresi 0,5'in üzerinde iken yapı hidrodinamik olarak kompakt olarak kabul edilebilmektedir. Bu senaryoda, akış yapının yüzeyine bağlı kalmaktadır. Böylece basınç alanını verilen dalga saçılımı, radyasyon ve kırınım bileşenlerine ayırarak bir çözüm elde etmeyi mümkün kılmaktadır [6].

$$\tilde{\phi} = \phi^I + \phi^D + \phi^R \quad (85)$$

Buradaki $\tilde{\phi}(\vec{x}, t)$ kararsız terimi, doğrusallaştırılarak gelen dalga (ϕ^I), kırınım dalgaları (ϕ^D) ve radyasyon (yayınım) dalgaları (ϕ^R) olacak şekilde ayrılmıştır. Ayrıca bunlardan radyasyon (yayınım) potansiyeli, yapının 6 serbestlik derecesi ile ilişkilidir.

$$\phi^R = \sum_{j=1}^6 \phi_j^R, \quad j = [1, 6] \quad (86)$$

Yapılan doğrusallaştırma ve uygulanan Bernoulli denkleminde sonra yapı üzerindeki kuvvetler aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$F^I = \rho \iint_{aS_b} \frac{d\phi^I}{dt} n ds \quad (87)$$



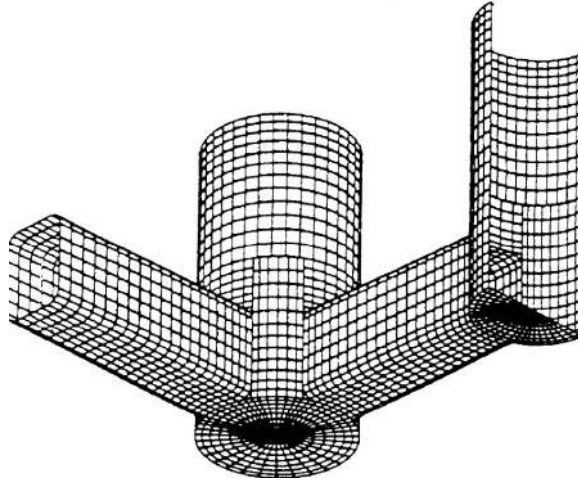
$$F^D = \rho \iint_{dS_b} \frac{d\phi^D}{dt} n ds \quad (88)$$

$$F^R = \rho \iint_{dS_b} \frac{d\phi^R}{dt} n ds \quad (89)$$

Burada F^I , F^D , F^R sırasıyla gelen dalga kuvvetini, kırınım ve radyasyon (yayınım) dalga potansiyel kuvvetlerini göstermektedir.

Yapının dalga alanını bozmadığını varsayan hesaplamalar ise (bozulmamış gelen dalga) yapı üzerine etki eden Froude-Krylov kuvvetini vermektedir. Pratikte ise nispeten büyük bir yapı dalgayla karşılaştığında, çevresindeki akış biçimini değiştirmektedir. Değişen bu akış davranışı, potansiyel akış teorisi tarafından verilen sınırlamalara uymaktadır [6]. Sınır eleman yöntemi (BEM) gibi yaklaşımlar, probleme sayısal bir çözüm sunmaktadır. Bunun için yapının su altı geometrisinin 3 boyutlu olarak tanımlanması gerekmektedir. Tanımlanan bu gövde köşelerinin koordinatları belirli olan panellere ayrılarak (mesh oluşturularak) çözümleme gerçekleştirilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, yakınsamanın sağlanabilmesi için yapı yüzeyinin, üzerindeki basınç ve kaynak gücünün eşit dağılımlı olacak şekilde yeterli sayıda panel (mesh) oluşturulması gerekliliğidir. Bu durum Haskind ilişkisi olarak bilinmektedir [6]. Geometri ve hız potansiyeli bilindiğinde, her bir panelin geometrik merkezindeki basınç, Bernoulli denkleminin lineer teriminden elde edilmektedir. Basınç alanı, yapının yüzeyi üzerinde bir integrasyon olarak hesaplanan altı serbestlik derecesindeki kuvvetlere ve momentlere yol açmaktadır.





Şekil 41. Panellere ayrılmış örnek platform [171].

Yüzen yapı nedeniyle kırılan ve saçılan dalgalarla birlikte yayılan dalgalar oluşmaktadır. Yüzeyde ortaya çıkan basınç alanları, her hareket modu ile ilişkilidir. Kırınım potansiyelinde olduğu gibi bu basınç alanlarının yapı gövdesi üzerinde integrasyonu, ek kütle ve sönüm katsayılarına neden olmaktadır. Burada hız ile aynı fazdaki bileşen potansiyel sönüm değeri ile ilgiliyken, ivme fazındaki terim ise ek kütleyi vermektedir. Bunların büyüklükleri salınım frekansına bağlıdır [6].

2.6. Rüzgâr Yükleri

Türbinlere gelen rüzgâr yükleri ve ilgili kontrol dinamikleri karmaşık bir etkileşime sahiptir. Bir platformun konseptinin tasarım aşamasında, en önemli faktörler, birleşik hidrodinamik davranışı doğrudan etkileyen faktörlerdir. Örneğin, türbülanslı rüzgârda kanat hatvelerinin açılarının incelenmesi, kontrol sistemlerinin temel konusunu oluşturmaktadır. Bununla birlikte, kurulum nedeniyle ortaya çıkan itme ve rüzgâr kuvvetleri platform dinamiklerinde de önemli rol oynamaktadır [6].

2.6.1. Rüzgâr Kaynakları

Yıllar arası, yıllık, günlük ve kısa süreli rüzgâr ve türbülans kavramları, rüzgâr hızının zaman içindeki değişimini karakterize eden kavramlardır [172]. Yıllar arası değişimler, bir yıldan daha fazla zaman ölçeğinde meydana gelmektedir ve bir bölgedeki uzun vadeli rüzgâr



kaynağının değerlendirilmesinde önemlidir. Mevsimsel sapmaların bir sonucu olarak yıllık zaman diliminde rüzgâr hızlarında da değişiklikler vardır. Benzer şekilde karada, gündüz-gece farklılıklarının bir yansıması olarak, gündüz rüzgâr hızında artış ve gece saatlerinde azalma yaygın olarak görülmektedir. En büyük günlük değişiklikler ilkbahar ve yaz aylarında meydana gelmektedir. Kısa vadeli dalgalanmalar türbülans ve fırtınaları içerir ve yaklaşık 10 dakikalık bir zaman aralığına işaret eder. Türbülans, sürekli rüzgâr alanı içerisindeki ani rüzgârları ve rüzgâr hızındaki değişiklikleri ifade etmektedir. Türbülans, rüzgâr bir saat veya daha fazla zaman periyodunda nispeten sabit bir ortalama değere sahip olabilir. Ancak, bir dakikalık veya daha kısa zaman dilimlerinde ani değişiklikler göstermektedir.

Türbülans yoğunluğu (TI), rüzgâr davranışının temel bir ölçüsüdür ve rüzgâr hızının standart sapmasının (σ_u) ortalama değerine (U) oranı olarak verilmektedir.

$$TI = \frac{\sigma_u}{U} \quad (90)$$

Düşük rüzgâr hızlarının daha yüksek türbülans yoğunluğuna neden olduğu durumlarda, türbülans yoğunluğu değeri genellikle 0,1-0,4 arasında olmaktadır. Rüzgâr da dalgalara ve diğer stokastik süreçler gibi, bir güç spektrumu ile temsil edilebilmektedir.

Rüzgâr türbini yüklerini simüle etmek için Kaimal spektrumu formülü DNV [28] tarafından önerilmektedir. Rüzgâr davranışının iyi bilinen bir başka tanımı, ilk olarak 1957 NACA raporunda [173] tartışılan von Karman spektrumuna dayanmaktadır.

Bir 3-boyutlu rüzgâr alanında rüzgâr hızları, yükseklikle birlikte artarak zamanın fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu değişiklik, logaritmik ve güç yasaları ile tanımlanarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (91)$$



Burada $U(Z)$, z yüksekliğindeki, $U(Z_r)$ ise z_r yüksekliğindeki rüzgâr hızlarını göstermektedir. α ise güç yoğunluğu katsayısıdır.

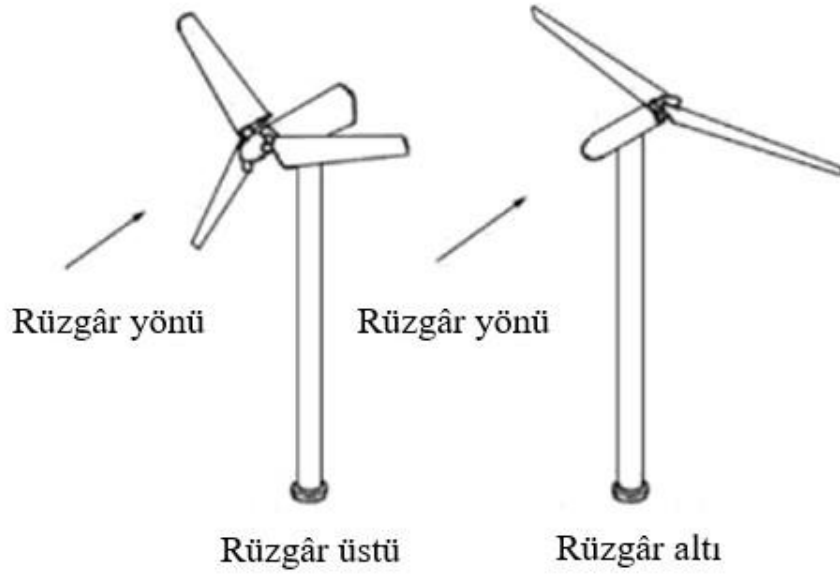
2.6.2. Rotor ve Kule Üzerindeki Rüzgâr Yükleri

Kanat Elemanı Momentumu (BEM) ve Genelleştirilmiş Dinamik İz teorileri (GDW), türbin aerodinamiği izini modellemede öne çıkan yaklaşımlardan ikisidir [6]. Kanat Elemanı Momentum teorisinin kökleri 20. yüzyılın başlarına dayanmaktadır ve NREL'in FAST [174] modelinde de son versiyonunda uygulanmaktadır. Kanatların, açıklığı boyunca birkaç elemente bölünebileceğini varsayan kanat elemanı ve momentum teorilerinin bir kombinasyonudur. Bu bölümler üzerindeki aerodinamik kuvvetler, yerel akış koşullarına göre hesaplanmaktadır. Bu değerlerin kanat boyunca integrasyonu gerçekleştirilerek türbine etki eden kuvvet ve momentler elde edilmektedir. Momentum kaybının etkisi ve indüklenen rüzgâr hızları, teorisinin momentum kısmı aracılığıyla ele alınarak toplam kuvvetlere dahil edilmektedir [174]. İki teori birleştirilerek, toplam aerodinamik yükler ve rotor civarında indüklenen rüzgâr hızları elde edilmektedir. Burada kanadın 2-boyutlu olduğu varsayımı bir teorik sınırlamadır ve bu durumda yayılma yönündeki akışı gözden kaçırmaktadır. Bunlara ek olarak, kanat profili kaynaklı hızların anlık olduğu kabul edilirken, gerçekte bir gecikme içermektedir [175]. Bu basitleştirmelerden bazıları, göbek ve kanat ucu kayıplarını ayarlamak için Prandtl modeli gibi düzeltmeler eklenerek revize edilmiştir [176].

Operasyon esnasında, rüzgâr türbini aerodinamiğinin ve kontrol sistemlerinin karmaşıklığı da anlık dinamik problemlere yol açmaktadır. Türbülanslı bir rüzgâr alanında, değişen hücum açılarından dolayı kaldırma ve sürüklenme katsayılarındaki anlık değişim, dinamik stall olarak açıklanmaktadır. Beddoes ve Leishmann [177] tarafından bu varyasyonları açıklamak için yarı deneysel bir model önerilmiştir.

Türbin ve rotorun yanı sıra kule de arkasındaki hava akışını etkilemektedir. Bu, rüzgâr yönündeki (rüzgâr üstü) türbinler için önemli bir etkidir. Rüzgâra karşı (rüzgâr altı) türbinlerde, kanatların her biri kulenin önünden geçerken akış değişmektedir [172]. Ayrıca kule özellikle fırtına koşullarında büyük rüzgâr basıncına maruz kalmaktadır. Ortaya çıkan kuvvete kule sürüklenmesi olarak adlandırılmaktadır ve kule yüzeyinde belirli bir sürtünme katsayısı kullanılarak bu sorun ortadan kaldırılabilir.





Şekil 42. Rüzgâr üstü ve rüzgâr altı türbinler [172].

2.7. Bağlama Sistemleri Dinamiği

Bağlama sistemleri rüzgâr türbini platformlarının pozisyonunu koruma yeteneklerini sağlayarak, davranış ve hareket dinamiklerini etkilemektedir. Deniz tabanı ve yapı üzerindeki bağlantı noktası arasındaki halat bağlantısı, yapının yerinde kalması için rüzgâr, dalga ve akım yüklerine karşı koymalıdır. Katener ve gergin (taut) olmak üzere 2 temel çeşidi bulunmaktadır.

Katener bağlama halatları, yapı üzerindeki noktadan serbestçe asılarak düşük dikey gerilime maruz kalmaktadır. Hattın bir kısmı deniz tabanında olduğu için yatay yükleri taşımaktadır. Platform hareketlerine sınırlı miktarda geri getirici etkiler bulunmaktadır [6]. Dış yükler olmadan platforma uygulanan bağlama kuvveti, halatları serbest asılı konumlarına döndürmek için gereken kuvvete eşittir. Katener bağlı sistemlerin sağladığı geri getirici etki, platform stabilitesine sınırlı katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, katener bağlı yapılar, balastlama veya hidrostatik geri getirici terimlerine dayanmalıdır. Bağlama hatlarının şekli, uzunluğu boyunca ağırlıklar ve şamandıralar eklenerek değiştirilebilmektedir. Böyle durumda, bağlama sistemleri dinamikleri daha karmaşık hale gelmektedir. Deniz tabanına bağlantı ise çapalarlar ile sağlanmaktadır.

Katener bağlamanın aksine, gergin (taut) bağlama sistemleri önemli ölçüde dikey ve yatay gerilim taşımaktadır. Toplam geri getirici kuvvete katkısı, esneklik özelliklerinin bir



fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa hareketlerinden kaynaklı hidrostatik geri getirici yükler, sabit yapıların platform davranışlarına benzeyecek ölçüde gerçekleşmektedir [6]. Sınırlı hareket modlarında yapının doğal frekansı artmaktadır. Gergin (taut) bağlı yapılarda da hareket kısıtlı olduğu için doğal frekansları artmaktadır. Katener bağlı sistemlerle kıyaslandığında gergin (taut) bağlı sistemlerde daha kısa hatlar gerektiği için daha derin sularda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Buna karşın deniz tabanında çapaların karmaşık yapılarda olması, önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Bağlama sistemlerinde halat malzemesi olarak metalik veya sentetik-naylon malzemeler kullanılabilir. Açık deniz platformlarında çelik zincir ve tel kablolar (halatlar) düzenli olarak kullanılmaktadır. Ancak derinlik arttıkça çelik zincirlerin ağırlığının sorun oluşturması nedeniyle daha hafif malzeme kullanım ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu sebeple daha hafif sentetik iplerden oluşan halatlar tercih edilir hale gelmiştir. Ultra derin sulardaki uygulamalarda ise çelik zincir- sentetik ip- çelik zincir kombinasyonundan oluşan bağlantı halatları karşımıza çıkmaktadır [178]. Metaller ile karşılaştırıldığında, bu sentetik malzemeler daha iyi korozyon direncine ve daha fazla uzama miktarına sahiptir.

Bağlama sistemleri tepkileri yarı-statik ve dinamik yaklaşımlarla elde edilebilmektedir. Yarı-statik hesaplamaların temel dayanağı, ihmal edilebilir atalet kuvvetleri ve deniz tabanı sürtünmesidir [179]. Doğru boyunca teğetsel sürükleme ihmal edilirken sadece normal sürükleme kuvvetleri dikkate alınmaktadır. İnce silindirik yapıların çözümünde kullanılan Morison denklemi, bağlama sistemleri halatları üzerindeki hidrodinamik sürükleme kuvvetlerini tanımlamada yeterli olmaktadır. NREL FAST'ta kullanılan Demirleme Analiz Programındaki (MAP++) bir uygulama, çok parçalı yarı-statik bir modeldir [180]. Dinamik modellerde bağlantı hatları, her bir eleman üzerindeki atalet ve sürükleme kuvvetlerinin dikkate alındığı segmentlerin toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle, ek su kütlesi ve sönüm katsayısı, tepki hesaplamalarında faktör haline gelmektedir [181]. Sonlu elemanlar yöntemi [182] ve toplu kütle [53] çalışmaları, NREL tarafından geliştirilen FAST'ta mevcut olan uygulamalardır. Bu modeller arasındaki farklılıklar yıllar boyunca çeşitli yazarlar tarafından değerlendirilmiş [182, 46] ve dinamik uygulamaların deneysel verilere göre daha iyi sonuç verdiğini ortaya konmuştur [184].



2.8. Yüzer Rüzgâr Türbini Platformları Birleşik Hareket Dinamikleri

Platform-kule ve bağlama sistemleri ve statik ve dinamik çözümü verilen bilgiler ve sınır koşulları ile yapılmaktadır. Her iki sistemin de uçlarındaki sınır şartları farklıdır. Halat bağlantısının platform ucundaki nodları, yüzer platform ile aynı yer değiştirmeye sahip olmaktadır. Halatların diğer uçları deniz tabanına demir çapa ile bağlanarak altı serbestlik dereceli koşullar için tamamen sabit hale getirilmiş ve sınırlandırılmıştır. Platformun ise global koordinat sisteminde, merkezde tek bir nokta olduğu varsayılmaktadır. Rijit yapı gibi davranış gösteren yüzer platform denklem (92)'da verilen altı serbestlik dereceli harekete sahip bir sistem durumundadır. Yapının davranışı bağlama halatları ve enerji nakil kabloları gibi diğer sistemlerin hareketlerinden de büyük ölçüde etkilenmektedir.

$$m_k \ddot{x}_k + \sum_{l=1}^6 (A_{lk} \ddot{x}_l + B_{lk} \dot{x}_l + C_{lk} x_l) = F_k \exp(-i \omega t), \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (92)$$

Burada m_k kütle matrisini göstermektedir. Ek su kütlesi ve sönümleme katsayıları sırasıyla A_{lk} ve B_{lk} ile gösterilmiştir. Geri getirici matris C_{lk} ise hidrostatik ve çevresel dış kuvvetlerin toplamından oluşmaktadır. Problemin doğrusal çözümü için hareketler ve kuvvetler harmonik olarak kabul edilmektedir. ϵ_l fazlı bir hareketin X_k genliği için (93) denkliği aşağıdaki gibi yazılmaktadır [6]:

$$\sum_{l=1}^6 [-\omega^2 (m_{kl} + A_{kl}) - i \omega B_{kl} + C_{kl}] X_l \exp i \epsilon_l = F_k ; \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (93)$$

Denklem (93)'ün ayrıştırılması ile tasarım değişkenlerinin eldesi gerçekleşmektedir. Atalet terimleri için 6x6 kütle matrisi gerekmektedir. Platform (m_p), nasel (m_n), rotor (m_r) ve



kulenin (m_t) kütleleri ve bunların bağlantı terimleri bir yüzer açık deniz rüzgâr türbini için toplam kütle (m_s) oluşturmaktadır.

$$[m_s]_{6 \times 6} = [m_p]_{6 \times 6} + [m_n]_{6 \times 6} + [m_r]_{6 \times 6} + [m_t]_{6 \times 6} \quad (94)$$

Ek su kütlesi hidrodinamik özellikleri belirli olan bir yapı için tablo verilerinden elde edilebilmektedir [6]. Kompakt yapılarda panel metodu gibi uygulanabilir bir yaklaşım kullanılarak, yapı üzerindeki radyasyon etkileri azaltılabilmektedir. Sönümleme terimi, potansiyel ve viskoz bileşenleri içermektedir. Daha büyük ve daha küçük yapısal elemanlar içeren yapılar için, potansiyel akış hesaplarına Morison hesapları eklenerek hibrit bir yaklaşım geliştirilebileceği yapılan çalışmalarda önerilmektedir [6].

Geri getirici kuvvetler toplam matrisi (C_t), hidrostatik (C_h) kuvvetler ve bağlama sistemleri (C_m) rijitlikleri toplamından oluşmakta ve aşağıdaki şekilde matris formunda gösterilmektedir:

$$[C_t]_{6 \times 6} = [C_h]_{6 \times 6} + [C_m]_{6 \times 6} \quad (95)$$

Simetriden dolayı her iki bileşen de sıfır değerli terimler bulunmaktadır. Yapıya etkiyen dış yüklerin toplamı (F_t), aerodinamik (F_a) ve hidrodinamik (F_h) kuvvetlerin toplamı olarak;

$$[F_t]_{6 \times 6} = [F_a]_{6 \times 6} + [F_h]_{6 \times 6} \quad (96)$$



olacak şekilde matris formunda hesaplanmaktadır.

Ayrıca yüzer rüzgâr türbinlerine etkiyen buz yükleri, depremler ve tesadüfi yükler gibi olası ek yükler de mevcuttur. Bunların varlığı bilinse de ayrı ayrı tartışılmadan, hareketlerin elde edilmesi için minimum gereksinimler aşağıdaki gibi özetlenmiştir [6]:

- Kütle matrisi,
- Aerodinamik ve hidrodinamik uyarıcı yükler,
- Hidrostatik geri getirici kuvvetler,
- Bağlama sistemleri rijitliği,
- Hidrodinamik katsayılar.

Bu bilgilere sahip olan yüzer rüzgâr türbini platform tepkileri hem frekans hem de zaman tanımlı alanında çözümlenebilmektedir. Zaman tanımlı alan çözümü, değişkenleri doğrusal olmayan bir şekilde gerçekleşirken, frekans tanımlı alan yaklaşımları soruna daha hızlı çözümler sunmaktadır.

2.9. Zaman Tanımlı Alan Çözümleri ve Karşılaştırmaları

Çalışmanın bu kısmında açık kodlu kaynak erişimine sahip 4 çeşit platformun zaman tanımlı alanda sayısal çözümleri yapılarak hem literatürdeki deneysel veriler ile hem de birbirlerine göre karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modellerin doğrulamalarının gerçekleştirilmesi için NREL tarafından geliştirilen FAST programı kullanılmıştır. Karşılaştırmadan sonra en uygun platform ve türbin konsepti seçilerek daha önceki kısımlarda belirlenen açık deniz yüzer rüzgâr türbini kurulum bölgesi için çevresel yükler ve koşullar altında zaman tanımlı ve frekans tanımlı alanlarda sayısal olarak analizleri yapılarak sonuçları ilerleyen bölümlerde tartışılmıştır.

Çalışmada karşılaştırmaları yapılacak açık kodlu kaynak erişimine sahip açık deniz yüzer rüzgâr enerjisi türbin-platform konseptleri şu şekildedir:

- SPAR platforma sahip 5 MW NREL türbini ile OC-3 Hywind türbin-platform konsepti,
- Yarı-batık platforma sahip 5 MW NREL türbini ile OC-4 DeepCwind türbin-platform konsepti,
- Yarı-batık platforma sahip 10 MW DTU türbini ile NAUTILUS-DTU türbin-platform konsepti,



- Yarı-batık platforma sahip 10 MW DTU türbini ile LIFES50+ OO-STAR türbin-platform konsepti.

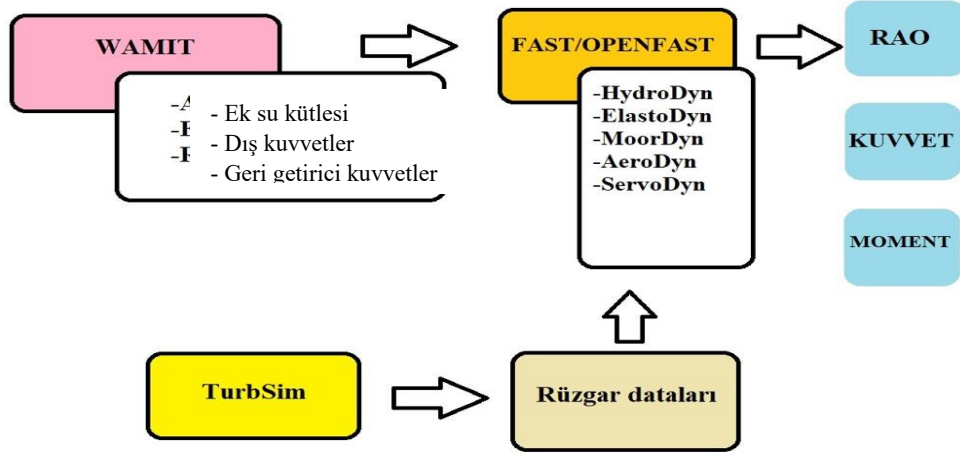
2.9.1. FAST Programına Genel Bakış

FAST, ABD’de NREL tarafından geliştirilen, yatay eksenli rüzgâr türbinleri için bir zaman alanı tanımlı aero-servo-elastik çözümleme bilgisayar destekli mühendislik aracıdır [185]. Program, aerodinamik, hidrodinamik, yapısal modeller ve kontrol sistemleri ile ilgilenen farklı modülleri FAST olarak adlandırılan bir çerçevede bir araya getirmektedir.

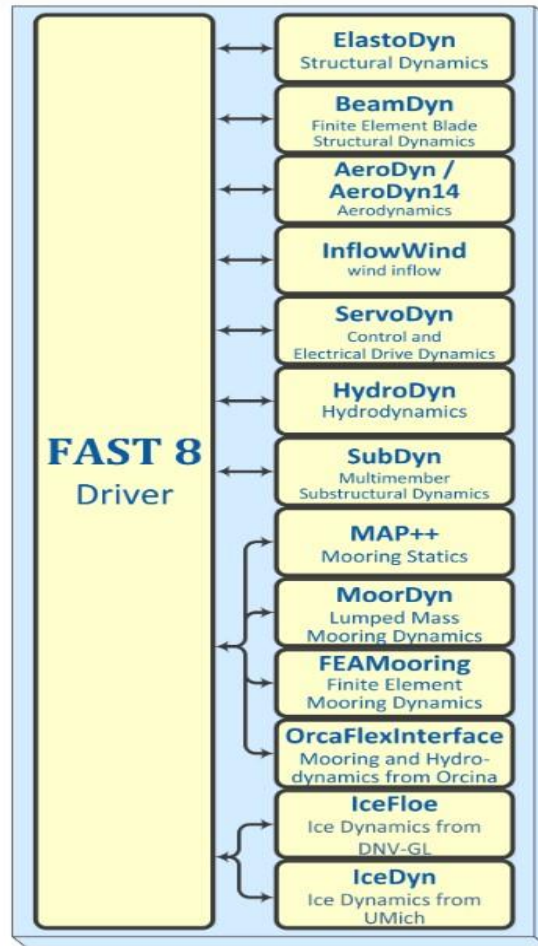
Yedinci versiyona kadar hidrodinamik ve aerodinamik hesaplamalar sırasıyla HydroDyn ve AeroDyn paket programları ile gerçekleştirilmekteydi. Kodun servo elastik dinamiklerini değerlendiren kısmı da eklenince program FAST olarak adlandırıldı. Ayrıca bu sürümden sonra FAST diğer modüller arasındaki etkileşimi sağlayan bir sürücü kodu görevi üstlenmiştir. FAST'ın sekizinci versiyonundan itibaren ise bu durum değişerek, FAST modülünün kendisi bir sürücü koduna indirgenmiştir ve hesaplamanın her bir kısmı ilgili alt modülü tarafından gerçekleştirildiği duruma gelmiştir. Bu yaklaşım kodlara esnek olma, bakım kolaylığı ve güncellenebilir olma gibi özellikler kazandırmaktadır. Böylece her bir modül üzerinde ayrı ayrı çalışma ve doğrulama yapılabilir ve bir kısım üzerinde yapılan değişiklik, diğer kısımları değiştirmez. Programlama dilinde gevşek bağlaşım (loose-coupled) olarak adlandırılan bu durum istenen bir durumdur ve programın gelecekteki gelişimi açısından faydalıdır.

FAST içerisindeki ElastoDyn modülü, rotor, aktarma organları, nasel, kule ve platformun yapısal dinamikleri için kullanılmaktadır. Girdi olarak, platform ve kulenin hesaplanan serbestlik dereceleri türbin konfigürasyonu ile ayarlanmaktadır. Hareket dinamikleri bu modül ile çözülmektedir. Aerodinamik yükler, hızlar, türbinin anlık yapısal konumları ve yönelimleri AeroDyn alt programı tarafından ele alınmaktadır. Yine Kanat ve kule nodları üzerindeki aerodinamik yükleri hesaplamak için belirli bir zamandaki rüzgâr özellikleri ve hareketler de bu modül tarafından kullanılmaktadır. Rüzgâr akışı InflowWind modülü tarafından değerlendirilirken, türbinin servo dinamiğine (örneğin kanat eğimi) ilişkin tepkisi ServoDyn aracılığıyla hesaplanmaktadır. Rüzgâr türbini açık denizde kuruluysa, HydroDyn dalgalar nedeniyle platforma etki eden yükleri değerlendirmektedir. MAP++, MoorDyn ve FEAMooring, modülleri de bağlama sistemleri çözümü için kullanılan alt modüllerdir.





Şekil 43. FAST program şeması



Şekil 44. FAST program bileşenleri [186].



Aşağıda ilk olarak türbin konfigürasyonları ele alınmış, daha sonra ise platform konseptleri anlatılmıştır.

2.9.2. NREL 5 MW Referans Türbini Özellikleri

ABD Enerji Bakanlığı (DOE) NREL ve Ulusal Rüzgâr Teknolojisi Merkezi (NWTTC) aracılığıyla, ABD açık deniz kıta sahanlığının (OCS) sığ ve derin sularında ve dünyanın diğer bölgelerinde açık deniz rüzgâr çiftliklerine, kısaca bu yeni teknolojinin geliştirilmesi için gerçekleştirilen çalışmalara sponsor olmaktadır [166]. Bu tür çalışmalardan faydalı bilgiler elde etmek için gerçekçi ve standartlaştırılmış girdi verilerinin kullanılması gerekmektedir. Bu doğrultuda tipik şebeke ölçeğinde kara ve deniz tabanlı yüksek multimegawatt güçlü türbinleri temsil eden ve derin sularda kullanıma da uygun büyük bir rüzgâr türbininin ayrıntılı özellikleri hazırlanarak “NREL Açık Deniz 5-MW Temel Rüzgâr Türbini” adlı referans türbini oluşturulmuştur [166].

Ayrıntılı özellikleri belirlemeden önce ise makinenin temel boyutunun ve güç derecesinin seçilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bir açık deniz rüzgar sisteminin sabit ya da yüzer destek yapıları sistemleri nedeniyle büyük maliyetler oluşturması ve derinliğin artmasıyla da bu maliyetlerin giderek artması nedeniyle kurulacak her bir rüzgar türbininin 5 MW veya daha yüksek olarak derecelendirilmesi gerektiğini yapılan çalışmada [187] sunulmuştur. Temel için 5 MW ile 20 MW arasındaki değerler dikkate alınırken, gerçekleştirilen ilk çalışma olması sebebiyle referansın 5 MW olması gerektiği kararlaştırılmıştır [166]. Aşağıda literatürden bazı çalışmalar maddeler halinde sunulmuştur:

- Musial vd. [187] tarafından belirlenen açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yüzdürücü platform konfigürasyonlarında, 5 MW'lık türbin varsayımına dayanmaktadır.
- Yayınlanmamış DOE açık deniz yapısı maliyet çalışmasında, 128 m'lik rotora sahip 5 ila 6 MW'lık bir rüzgâr türbinini kullanılmıştır.
- WindPACT (Wind Partnership for Advanced Component Technology) karasal rüzgâr türbinleri için yaptığı seri çalışmalarda 5 MW'a kadar rüzgâr türbini sistemlerini kullanmıştır [188, 189, 190].
- Offshore Rüzgâr Türbinlerinin Tasarımı için Öneriler projesi (RECOFF), kavramsal tasarım hesaplamalarını 5 MW'lık bir rüzgâr türbini kullanarak gerçekleştirmiştir



- Hollanda Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Dönüştürücüsü (DOWEC) projesi, kavramsal tasarım hesaplamalarını 6 MW'lık bir rüzgâr türbini üzerine dayandırmıştır [191, 192, 193].
- NREL Açık Deniz 5-MW Temel Rüzgâr Türbini referansı hazırlanırken dünyanın en büyük rüzgâr türbini prototipleri, her biri 5 MW olan Multibrid M5000 [194] ve REpower 5M [18,26,27] türbinleri prototipleridir [195].

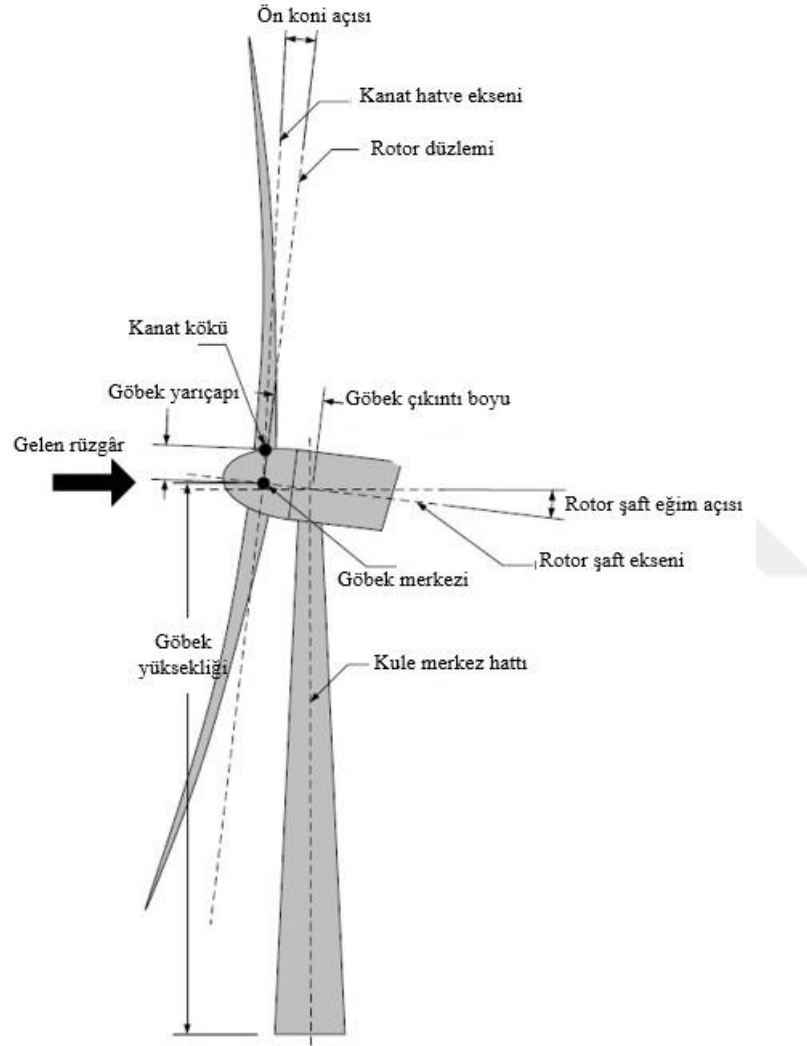
İlgili literatür çalışmaları doğrultusuna NREL Açık Deniz 5-MW Temel Rüzgâr Türbini özellikleri Tablo 10.'daki şekilde belirlenmiştir [166].

Tablo 10. NREL 5 MW referans türbini belirlenen özellikleri [166].

Özellik	Değer
Sınıflandırma	5 MW
Rotor konfigürasyonu	İleri yönlü/ 3 kanatlı
Kontrol	Değişken hızlı, ortak hatveli
Sürücü	Yüksek hızlı, çok kademeli şanzıman
Rotor ve göbek çapı	126 m, 3 m
Göbek yüksekliği	90 m
Devreye girme- anma-devreden çıkma- rüzgâr hızları	3 m/s, 11,4 m/s, 25 m/s
Devreye girme- anma rotor hızı	6,9 rpm, 12,1 rpm
Nominal uç hızı	80 m/s
Göbek çıkıntı boyu- shaft açısı- koni açısı (overhang-shaft tilt-precone)	5 m, 5° , 2,5°
Rotor kütlesi	110.000 kg
Nasel kütlesi	240.000 kg
Kule kütlesi	347.460 kg
Kütle merkezi konumu	(-0,2 m; 0,0 m; 64,0 m)



Burada rüzgâr türbininin toplam kütle merkezinin (CM) konumunun (x, y, z) koordinatları, yer veya ortalama deniz seviyesindeki (MSL) kule merkez hattı boyunca ortaya çıkan bir kule-taban koordinat sisteminde gösterilmektedir. Bu koordinat sisteminin x- eksenini rüzgâr yönüne, y- eksenini rüzgâr yönünün enine doğru ve z- eksenini kule tabanından dikey olarak yukarıya doğru olmaktadır.



Şekil 45. NREL 5 MW referans türbin geometrisi [196].

Şekil 45.'de NREL 5 MW referans türbinin geometrik tanımlamaları gösterilmiştir. Şekil 46.'da ise türbinin önen görünüşüne yer verilerek kanatların taradığı alan ve kanat çapı gösterilmiştir. Tablo 11.'de belirtilen rotor çapı, gerçek çapı ve süpürme alanını azaltan kanat



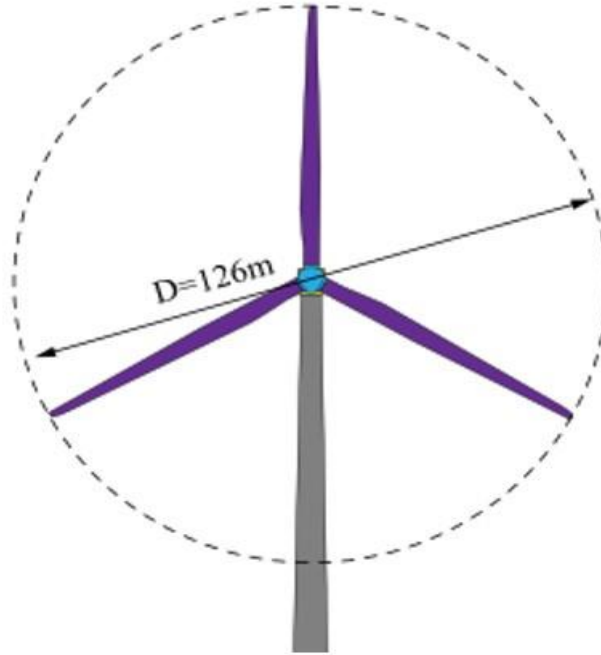
ön konisinin etkisini yok saymaktadır. Türbin spesifikasyonlarındaki tam rotor çapı (kanatların bükülmediği varsayılarak) gerçekte;

$$D = 126 \times \cos(2,5^\circ) = 125,88 \text{ m} \quad (97)$$

ve rotor kanatlarının gerçek süpürme alanı ise bu rotor çapına bağlı olarak;

$$A_s = \frac{\pi}{4} \times D_r^2 = \frac{\pi}{4} \times (125,88)^2 = 124.445,24 \text{ m}^2 \quad (98)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 46. NREL 5 MW referans türbini ön görünüşü [197].



2.9.2.1. Kanatların Yapısal Özellikleri

NREL açık deniz 5 MW referans rüzgâr türbini yatay eksenli üç kanatlı bir türbindir. Her bir kanadın dağıtımlı kanat yapısal özellikleri, DOWEC çalışmasında kullanılan 62,6 m uzunluğundaki LM Glasfiber tarafından üretilen kanadın yapısal özelliklerine dayandırılmıştır [193]. DOWEC çalışmasında kullanılan kanatlar, gerçek REpower 5M türbininde kullanılan 61,5 m uzunluğundaki LM Glasfiber kanatlardan 1,1 m daha uzun olduğundan, yapısal özelliklerin eldesi için 62,6 m uzunluğundaki kanatlar 61,5 m'ye kısaltılmıştır [166].

Tablo 11. NREL 5 MW referans türbin kanat yapısal özellikleri [166].

Özellik	Değer	Birim
Uzunluk (kanat kökünden itibaren)	61,5	m
Kütle ölçeklendirme faktörü	%4,536	
Genel (toplam) kütle	17.740	kg
İkinci dereceden eylemsizlik momenti	11.776,047	kg x m ²
Birinci dereceden eylemsizlik momenti	363.231	kg x m
Kütle merkezi konumu (ön koni eksenini boyunca)	20,475	m
Yapısal sönümleme oranı	%0,477465	

2.9.2.2. Kanatların Aerodinamik Özellikleri

NREL 5 MW temel rüzgâr türbini kanatlarının yapısal özelliklerinde olduğu gibi kanat aerodinamik özellikleri de DOWEC çalışmasındaki kanatların aerodinamiğine dayanarak yapılmıştır [192, 193]. AeroDyn modeli ile FAST ve AeroDyn modelleriyle ADAMS yazılımları kullanılarak, aerodinamik ve yapısal kuvvetlerin entegre bir şekilde



hesaplanabilmesi için kanatlar 17 nodal elemana ayrılmıştır [166]. Kanat kökündeki büyük yapısal eğilmeler ve kanat ucundaki büyük aerodinamik eğilmeler bu nodlar yapısal eğimleri ve kanat ucundaki büyük aerodinamik eğimleri daha iyi yakalamak için kullanılan 3 iç ve 3 dış nodal eleman, orta açıklıkta bulunan eşit aralıklı 11 nodal elemanın üçte ikisi kadardır [166]. Tablo 12.'de bu nodal elemanlar ve özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 12. Dağıtılmış kanat aerodinamik özellikleri [166].

Nod	R-Nod (m)	Aero twist (°)	DR-Nod (m)	Chord (m)	Airfoil Modeli
1	2,8667	13,308	2,7333	3,542	Cylinder1.dat
2	5,6000	13,308	2,7333	3,854	Cylinder1.dat
3	8,3333	13,308	2,7333	4,167	Cylinder2.dat
7	11,7500	13,308	4,1000	4,557	DU40_A17.dat
5	15,8500	11,480	4,1000	4,652	DU35_A17.dat
6	19,9500	10,162	4,1000	4,458	DU35_A17.dat
7	24,0500	9,011	4,1000	4,249	DU30_A17.dat
8	28,1500	7,795	4,1000	4,007	DU25_A17.dat
9	32,2500	6,544	4,1000	3,748	DU25_A17.dat
10	36,3500	5,361	4,1000	3,502	DU21_A17.dat
11	40,4500	4,188	4,1000	3,256	DU21_A17.dat
12	44,5500	3,125	4,1000	3,010	NACA64_A17.dat
13	48,6500	2,319	4,700	2,764	NACA64_A17.dat
14	52,7500	1,526	4700	2,518	NACA64_A17.dat
15	56,1667	0,863	2,7333	2,313	NACA64_A17.dat
16	58,9000	0,370	2,7333	2,086	NACA64_A17.dat
17	61,6333	0,106	4000	1,419	NACA64_A17.dat

Tablo 12.'de "RNodlar" olarak etiketlenen kanat düğümü konumları, rotor merkezinden (tepe) kanat ucu en kesitlerine doğru olacak şekilde kanat hatvesi eksenini boyunca yönelmektedir [166]. "DRNod" eleman uzunlukları toplamını belirtir ve Tablo 11.'de belirtilen toplam 61,5 m kanat uzunluğunun toplamıdır. Tablo 12.'de verilen aerodinamik büküm "AeroTwist", sıfır büküm referans konumunun kanat ucunda olmasını



sağlamak amacıyla -0.09182° değeri ile dengelenmiştir [193]. Kanat açıklığı boyunca chord uzunluğu dağılımını entegre etmek, rotor sağlamlığının kabaca %5,16 olduğunu ortaya çıkarmaktadır [166].

Tablo 12.'de belirtildiği gibi, NREL açık deniz 5 MW temel rüzgâr türbini için birbirinden farklı sekiz benzersiz kanat profili veri tablosu geliştirilmiştir. En içteki iki kanat profili tablosu, 0,50 (Cylinder1.dat) ve 0,35 (Cylinder2.dat) sürtünme katsayılarına sahip ve kaldırma içermeyen silindirleri temsil etmektedir [166]. DOWEC çalışmasında kullanılan altı kanat profilinin iki boyutlu kanat profili-veri katsayılarına üç boyutlu davranış için düzeltmeler yaparak kalan altı kanat profili tablosunu oluşturulmuştur [192]. Burada "DU" Delft Üniversitesi'ni ve "NACA" ise Havacılık Ulusal Danışma Komitesini (The National Advisory Committee for Aeronautics) ifade etmektedir.

2.9.2.3. Göbek ve Nasel Özellikleri

Tablo 11.'de belirtilen şekilde, NREL 5 MW temel rüzgâr türbininin göbeği, sistem durur vaziyette iken yerden 90 m yükseklikte, kule merkez hattının ise 5 m ilerisinde rüzgâr yönünde olacak şekilde yerleştirilmiştir [166]. Ayrıca, DOWEC çalışması [192] tarafından kullanılan kule tepesinden göbek merkezine kadar olan düşey mesafe de 2,4 m olarak belirlenmiş ve bu değer NREL 5 MW temel rüzgâr türbininde de kullanılmıştır. Bu durumda sapma (yaw) merkezinin yerden veya deniz seviyesinden (MSL) yüksekliği 87,6 m olmaktadır. Ayrıca 5° olan rotor şaft eğimi nedeniyle göbek merkezinden sapma (yaw) eksenine şaft boyunca olan yeni mesafe 5,01910 m ve kule tepesinden şafta olan sapma eksenine boyunca yeni düşey mesafe ise 1,96256 m olmuştur. NREL 5 MW temel rüzgâr türbin göbeği ve naseli için geliştirilen diğer özellikler Tablo 13.'te sunulmuştur [166].



Tablo 13. Göbek ve nasel özellikleri [166].

Özellik	Birim	Değer
Sapma yatağının yüksekliği	m	87,6
Sapma eksenini üzerinde şaft ile sapma yatağı düşey mesafesi	m	1,96256
Şaft boyunca göbekten sapma eksenine olan mesafe	m	5,01910
Şaft boyunca göbekten ana yatağa olan mesafe	m	1,912
Göbek kütlesi	kg	56.780
Düşük hızlı şafta göre göbek ataleti	kg x m ²	115.926
Nasel kütlesi	kg	240.000
Sapma eksenine göre nasel ataleti		
Nasel kütle merkezi konumu (sapma eksenine göre rüzgâr altı yönünde)	m	1,9
Nasel kütle merkezi konumu (sapma yatağı üzerinde)	m	1,75
Nasel-sapma-aktüatör eşdeğer lineer yay sabiti	N x m /rad	9.028.320.000
Nasel-sapma-aktüatör eşdeğer sönümleme sabiti	N x m / (rad/s)	19.160.000
N _p minal nasel- sapma oranı		%0,3

2.9.2.4. Sürücü Özellikleri

NREL 5 MW temel rüzgâr türbinini, REpower 5M makinesiyle aynı nominal rotor hızına (12.1 rpm), nominal jeneratör hızına (1173.7 rpm) ve dişli kutusu oranına (97:1) sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Burada dişli kutusu için, tipik çok kademeli dişli kutusu olduğu, ancak sürtünme kayıplarının olmadığı varsayılmıştır. Bu varsayım ADAMS ve FAST gibi programlarında model oluşturmak için ön işlemci işlevselliğinin bir gereğidir



[185]. NREL 5 MW temel rüzgâr türbin sürücüsü için geliştirilen diğer özellikler Tablo 14.'te sunulmuştur [166].

Jeneratörün elektriksel verimi DOWEC çalışmasında [192] olduğu gibi kabaca %94,4 olarak seçilmiştir. Yine aynı çalışmada olduğu gibi yüksek hızlı şaft etrafındaki jeneratör ataleti 534,116 kgxm² olarak alınmıştır.

Tablo 14. Sürücü özellikleri [166].

Özellik	Birim	Değer
Nominal rotor hızı	rpm	12,1
Nominal jeneratör hızı	rpm	1173,7
Dişli kutusu oranı		97:1
Jeneratör verimi		%94,4
Yüksek hızlı şaft etrafındaki jeneratör ataleti	kg x m ²	534,116
Şaft mili eşdeğer burulma-yay sabiti	m/rad	867.637.000
Şaft mili eşdeğer burulma-sönümlleme sabiti	N x m/(rad/s)	6.215.000
Tam devreye alınmış yüksek hızlı şaft fren torku	N x m	28.116,2
Yüksek hızlı şaft fren zaman sabiti	s	0,6

2.9.2.5. Kule Özellikleri

Kule, rotor-nasel sistemini taşıyan elemandır. Kulenin özellikleri, üzerinde bulunacağı taşıyıcı platformun özelliklerine bağlıdır. Platform özelliklerinin su derinliği, deniz tabanı yapısı, rüzgâr ve dalga yükleri gibi kurulum sahasına ait çevresel koşullar nedeniyle farklılıklar göstermesi, kule özellikleri üzerinde önemli ölçüde etkiye sahiptir. Daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi sabit tabanlı kazık platformlar, yerçekimi temelli beton yapılar ve yine 3 ve 4 ayaklı kafes platformlar ile yarı-batık, (TLP ve SPAR tip yüzer platformlar, türbin kulesinin üzerinde bulunacağı platform tipleridir. Bu durumda her bir platform tipine göre türbin kulesi ayrı ayrı tasarlanmaktadır. Örneğin, NREL 5 MW temel rüzgâr türbini



için farklı tipte açık deniz platformları için kule tasarımları, OC3 projesinin her aşaması için ayrı ayrı çalışılmıştır [198].

NREL 5 MW kara temelli referans türbini için ise baktığımızda, yapılan örnek çalışmalardan [192] yola çıkılarak taban yarıçapı 6 m, et kalınlığı 0,027 m, tepe yarıçapı ise 3,87 m ve et kalınlığı 0,019 m olacak şekilde tasarlanmıştır [166]. Young modülü $E = 210$ GPa, kesme modülü $G = 80,8$ GPa ve çeliğin efektif yoğunluğu $\rho_{ef} = 8.500$ kg/m³ olarak alınmıştır. Bu değer ile çeliğin normal yoğunluğu olan $\rho = 7.850$ kg/m³ arasındaki fark, kule kalınlık verilerinde hesaba katılmayan boya, cıvata, kaynak ve flanşların hesaba katılmasından kaynaklanmaktadır. Kulenin yarıçapı ve et kalınlığının, kule tabanından kulenin tepesine doğru doğrusal olarak sivrilerek konikleşmektedir. NREL 5 MW temel rüzgâr türbin kule özellikleri Tablo 15.'da sunulmuştur [166].

Tablo 15. Kule özellikleri [166].

Özellik	Birim	Değer
Kulenin yerden yüksekliği	m	87,6
Kulenin toplam kütlesi	kg	347.460
Kule kütle merkezi konumu (kule merkez hattı boyunca zeminden yüksekliği)	m	38,234
Yapısal sönümleme		%1

2.9.2.6. Temel Kontrol Sistemi Özellikleri

NREL 5-MW temel rüzgâr türbini için, geleneksel bir değişken hızlı ve değişken değişken kanat hatveli-pervane ayarlamalı konfigürasyonu seçilmiştir [166]. Bu tür rüzgâr türbinlerinde, güç üretim operasyonunu kontrol etmek için jeneratör-tork kontrolörü ve tam boy rotor-kanat hatve (blade-pitch) kontrolörü olmak üzere iki geleneksel yaklaşım bulunmaktadır.

Jeneratör torku, filtrelenmiş jeneratör hızının tablolanmış bir fonksiyonu olarak beş kontrol bölgesi için hesaplanmaktadır. Bu bölgeler; 1, 1½, 2, 2½ ve 3 olarak adlandırılmaktadır. Bölge 1, jeneratör torkunun sıfır olduğu, devreye girme (cut-in) rüzgâr hızından önceki kontrol bölgesini göstermektedir. Bu bölgede rüzgârdan hiçbir güç çekilmez, bunun yerine rüzgâr rotorun ivmelendirilerek dönmeye başlamasında



kullanılmaktadır. Bölge 2, güç yakalamayı optimize etmek için bir kontrol bölgesidir. Burada, sabit (optimal) bir uç-hız oranını korumak için jeneratör torku, filtrelenmiş jeneratör hızının karesiyle orantılıdır. Bölge 3'te, jeneratör gücü, jeneratör torku filtrelenmiş jeneratör hızıyla ters orantılı olacak şekilde sabit tutulmaktadır. Bir başlatma bölgesi olan Bölge 1½, Bölge 1 ve Bölge 2 arasında doğrusal bir geçiş bölgesidir. Bu bölgede, jeneratörün daha düşük bir sınır hızda çalışması sağlanarak, rüzgâr türbininin çalışma hızı aralığını sınırlandırılmaktadır. Bölge 2½, bir asenkron makinenin eğimine karşılık gelen bir tork eğimi ile Bölge 2 ve 3 arasında doğrusal bir geçiş bölgesidir. Nominal güçte uç hızını ve dolayısıyla gürültü emisyonları sınırlandırılmaktadır.

Kanat hatvesi kontrol sisteminin amacı, jeneratör hızını düzenlemek gelen rüzgârın şiddetine göre kanadın açılıp kapanmasını sağlayarak jeneratörün hızını düzenlemektir. Bölge 3'te, tam boy rotor-kanat hatve açısı komutları, filtrelenmiş jeneratör hızı ile nominal jeneratör hızı (1173,7 rpm) arasındaki hız hatası üzerinde kazanç programlı orantılı-integral (PI) kontrolü kullanılarak hesaplanmaktadır [166]. NREL 5 MW temel rüzgâr türbininde rüzgâr türbininin basit tek serbestlik dereceli modelini kullanarak kanat hatve açısı kontrol sistemini tasarlanmıştır [166].

2.9.3. DTU 10 MW Referans Rüzgâr Türbin Özellikleri

DTU 10 MW Referans Rüzgâr Türbini (DTU 10MW RWT), optimize edilmiş kanatlardan, bir aktarma organı ve bir kuleden oluşmaktadır. Tasarlanmasında NREL 5 MW temel rüzgâr türbini referans olarak alınarak, bir açık deniz sahasında (IEC Sınıf 1A) çalışmak üzere geliştirilmiştir [199]. Ortalama deniz suyu seviyesine göre 119 m göbek yüksekliğine ve 178,3 m rotor çapına sahiptir. Bu yeni projede (Light Rotor 10 MW Reference Wind Turbine) projesinde yeni yöntemler geliştirilse de 10 MW referans kanatların tasarımında kullanılan yöntemler mevcut yöntemlerdir ve projede daha sonra rotor tasarım sürecinde güncellenmiş yöntemlerin kullanılmasının etkisini de ortaya koymaktadır. Böylece kanat ağırlığı mevcut yöntemler kullanılarak en aza indirilecek, ancak yeni konseptler veya malzemeler kullanılmamıştır. Bu nedenle, mevcut kanatlara kıyasla kütlede önemli bir azalma olmamıştır [200]. Tablo 16.'da DTU 10 MW referans rüzgâr türbininin özellikleri verilmiştir [199].



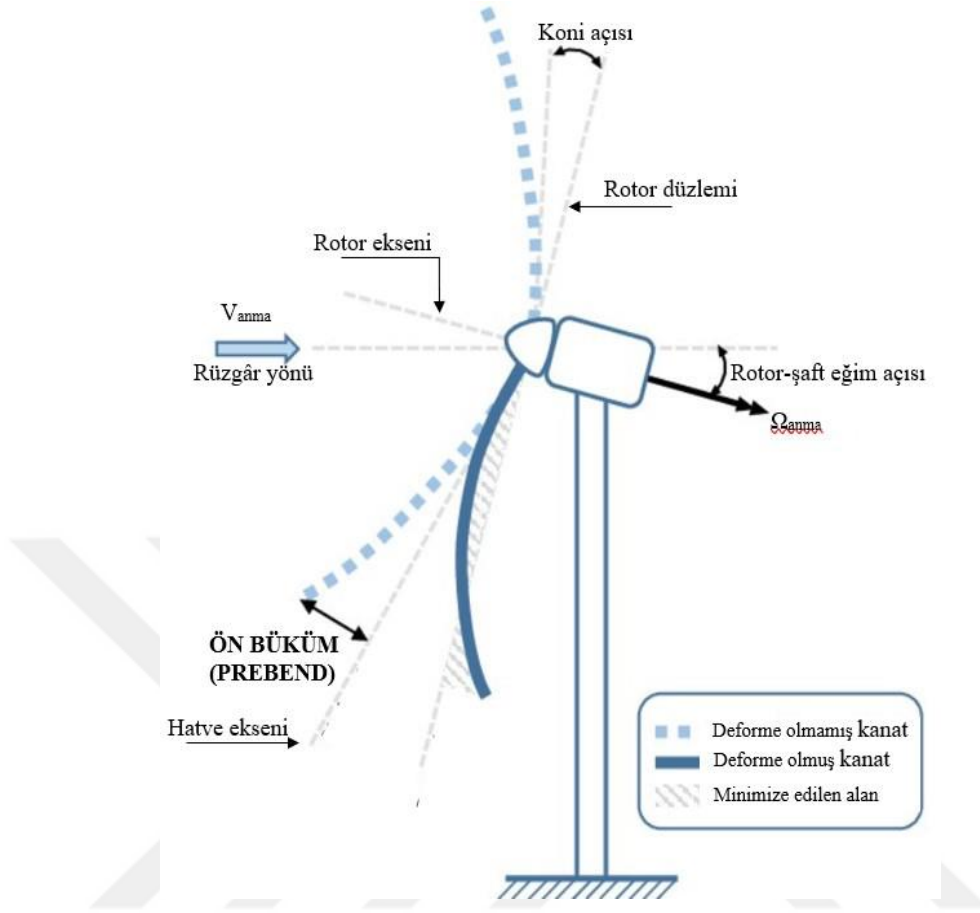
2.9.3.1. Kanat Profili Seçimi

Birçok farklı kanat profili mevcuttur ve kanat tasarımı için potansiyel olarak seçilebilmektedir. Bununla birlikte, 10 MW rüzgâr türbini için kanat üzerinde, ağırlığın azaltılmasına özel önem verilmektedir ve bu amaçla kanat profillerinin nispi kalınlığı artırılarak kanat serleştirilmektedir. Bu nedenle tasarımda kullanılan kanat profilleri orta kalınlıktan- kalına doğru sıralanmıştır. Bununla birlikte, yüksek nispi kalınlıktaki ağırlığa sahip oldukça az sayıda kanat profili serisi mevcuttur. Bu sebeple, FFA kanat profilleri [201], DU kanat profilleri [202] ve Risø kanat profilleri [203, 204] kullanılmaktadır.

Tablo 16. DTU 10 MW referans rüzgâr türbini genel özellikleri [199].

Özellik	Değer
Sınıflandırma	10 MW
Rotor konfigürasyonu	İleri yönlü/ 3 kanatlı
Kontrol	Değişken hızlı, ortak hatveli
Sürücü	Orta hızlı, çok kademeli şanzıman
Rotor ve göbek çapı	178,3 m, 5,6 m
Göbek yüksekliği	119 m
Devreye girme- anma- devreden çıkma- rüzgâr hızları	4 m/s, 11,4 m/s, 25 m/s
Devreye girme- anma rotor hızı	6 rpm, 9,6 rpm
Nominal uç hızı	90 m/s
Göbek çıkıntı boyu- shaft açısı- koni açısı (overhang-shaft tilt-precone)	7,07 m, 5° , 2,5°
Rotor kütlesi	229.000 kg (her bir kanat 41ton ağırlığında)
Nasel kütlesi	446.000 kg
Kule kütlesi	605.000 kg
Ön büküm (pre-bend)	3 m





Şekil 47. Ön büküm optimizasyonu tanımı [205].

2.9.4. Platformların Validasyonları

Bu kısımda platform konseptleri validasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Önceki kısımlarda uygun türbin ve kule sistemleri seçilerek gerçekleştirilen platform tasarımları ele alınmıştır. Burada incelenen ve sonuçları tartışılan platform konseptleri, açık kaynak kodlu olarak şunlardır:

- OC-3 Hywind konsepti
- OC-4 DeepCwind konsepti
- NAUTILUS-DTU konsepti
- LIFES50+ OO-STAR konsepti.



Bu platform konseptlerinden OC-3 Hywind ve OC-4 DeepC konseptleri NREL 5 MW referans rüzgâr türbinini, NAUTILUS-DTU ve LIFES50+ OO-STAR konseptleri ise DTU 10 MW referans rüzgâr türbinini kullanmaktadır.

Bu kısımda öncelikle her bir platformun zaman tanımlı alan içerisinde çözümleri validasyonu gerçekleştirilmiş, deneysel sonuçları ile karşılaştırılarak doğruluğu kontrol edilmiştir.

Daha sonraki aşamada her bir platform kendi aralarında karşılaştırılmış, önceki bölümlerde belirlenen yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi türbini kurulum bölgesine göre en uygun olanı seçilmiştir.

Son olarak seçilen platform ve türbin konseptinin kurulum bölgesindeki çevresel koşullara göre zaman tanımlı alan ve frekans tanımlı alan çözümleri gerçekleştirilmiş ve RAO çizilerek platform hareketlerinin performans üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

2.9.4.1. OC-3 Hywind Konsepti

IEA Ek-23 Offshore Kod Karşılaştırma İşbirliğinin (OC-3) IV. Aşaması, bir açık deniz yüzer rüzgâr türbininin modellenmesini içermektedir. Projenin önceki aşamalarında da olduğu gibi Faz IV'te de Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (NREL) açık deniz 5 MW temel rüzgar türbini [166] özellikleri kullanılmıştır.

Açık deniz rüzgâr türbinleri için, SPAR, TLP, mavnalar ve bunların hibrit konseptleri dahil olmak üzere çok sayıda yüzer platform konsepti oluşturmak mümkündür. OC-3 katılımcılarının talebi üzerine, Faz IV'ün modelleme faaliyetlerinde Norveç'ten Statoil tarafından geliştirilen “Hywind” adlı SPAR platformu kullanılmıştır [36].

Bu kısımda Statoil tarafından geliştirilen OC-3 Hywind SPAR platform konsepti validasyonu gerçekleştirilmiştir.

2.9.4.1.1. OC-3 Hywind Kule Özellikleri

Kulenin tabanı platformun en üst noktasına denk gelerek, sakin su seviyesinden (SWL) 10 m yükseklikte bulunmaktadır. Kulenin tepesi, yalpalama yatağı ile çıkmaktadır ve sakin su seviyesinden 87,6 m yukarıda bulunmaktadır. Burada göbek kuleye eklendiğinde sakin su seviyesinden itibaren oluşan 90 m göbek yüksekliği NREL 5 MW temel rüzgar türbini ile



[166] uygun hale gelmektedir. Tüm bu özellikler platformun yer değiştirmemiş durumdaki konumuyla ilgilidir.

OC-3 Hywind SPAR platform üzerinde kurulu olan NREL 5 MW referans türbini için ise baktığımızda, dağıtım kule, platformun üst kısmının çapına uyacak şekilde 6,5 m taban çapına sahip olacak şekilde kurulmuştur. Et kalınlığı 0,027 m, tepe yarıçapı ise 3,87 m ve et kalınlığı 0,019 m olacak şekilde kule tasarlanmıştır [36]. Kulenin efektif çelik yapı özellikleri ise gerçekleştirilen [192] çalışmasında olduğu gibi Young modülü $E = 210$ GPa, kesme modülü $G = 80,8$ GPa ve çeliğin efektif yoğunluğu $\rho_{ef} = 8.500$ kg/m³ olarak alınmıştır. Bu değer ile çeliğin normal yoğunluğu olan $\rho = 7.850$ kg/m³ arasındaki fark, kule kalınlık verilerinde hesaba katılmayan boya, cıvata, kaynak ve flanşların hesaba katılmasından kaynaklanmaktadır. Dağıtım kule özellikleri Ek Tablo 1.'de verilmiştir. OC-3 Hywind SPAR konsepti için kurulan kulenin genel özellikleri ise Tablo 17.'de verilmiştir.

Tablo 17. OC-3 Hywind kule özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Platform fribordu (serbest yüzeyden kule tabanına yükseklik)	m	10
Serbest su yüzeyinden kule tepesine olan yükseklik	m	87,6
Kulenin toplam kütlesi	kg	249.718
Kule kütle merkezi konumu (kule merkez hattı boyunca zeminden yüksekliği)	m	43,4
Yapısal sönümleme		%1

2.9.4.1.2. OC-3 Hywind Platform ve Bağlama Sistemleri Tasarım Parametreleri

Bu kısımda OC-3 Hywind SPAR platformu için tasarım parametreleri verilmiştir. İlk olarak platformun friborduna konulan bir konsol üzerinde kule yerleştirilmiştir. Böylece kulenin rijit bir yapı gibi davranmasını sağlanmıştır. Platformun su çekimi 120 m'dir. SPAR platform doğrusal bir şekilde uzanmamaktadır. Platformun alt ucundan üst ucuna doğru doğrusal olarak sivrilerek konik bölge oluşturan iki silindirden oluşmaktadır. OC3-Hywind



SPAR platformu doğrusal olarak sivrilen konik bir bölge ile birbirine bağlanan iki silindirik bölgeden oluşmaktadır. Silindirin alt kısmının çapı 9,4 m olmasına rağmen, serbest su yüzeyine yakın olan silindirin üst kısmı 6,5 olarak daha narin bir yapıya sahiptir. Böylece serbest su yüzeyindeki hidrodinamik etkiler azaltılmaktadır. Doğrusal olarak sivrilen konik bölge, serbest su yüzeyinin 4 m altından 12 m derinliğe kadar uzanmaktadır. Bu özelliklerin tümü, platformun yer değiştirmemiş konumuyla ilgilidir.

Yüzer platformun balast dahil kütlesi 7.466.330 kg'dır. Bu kütle, rotor-nasel düzeneğinin, kulenin ve platformun toplam ağırlığı ile sudaki bağlama sisteminin ağırlığını içeren deplasman tonajına eşittir. Toplam kütle merkezi konumu (CM) serbest su yüzeyinin 89,9155 m aşağısında konumlanmaktadır. Yüzer platformun CM'si etrafındaki yalpa ve baş-kıç vurma ataletleri $4.229.230.000 \text{ kg} \times \text{m}^2$ ve yüzer platformun merkez hattı etrafındaki savrulma ataleti $164.230.000 \text{ kg} \times \text{m}^2$ 'dir. Bu ataletler, yüzer platforma uygun bir kütle dağılımı kullanılarak hesaplanmıştır [36]. Tam OC3-Hywind sisteminin ataletleri, Statoil'in Hywind sisteminden daha yüksektir çünkü NREL açık deniz 5 MW temel rüzgar türbini, Statoil'in Hywind sistemindeki türbinden daha ağırdır [36].

Tablo 18. OC-3 Hywind platform ana özellikleri [206]

Genel bilgiler	Birim	Değer
Türbin gücü	MW	5
Su derinliği	m	320
Rotor kütlesi	kg	110.000
Rotor çapı	m	126
Göbek kütlesi	kg	56.780
Göbek çapı	m	3
Kanat kütlesi	kg	17.740
Nasel kütlesi	kg	240.000
Platform toplam su çekimi	m	120
Platform kütlesi (balast dahil)	kg	7.466.330
Kütle merkezi (CM) konumu (serbest yüzeyin altından)	m	89,9155



Tablo 18.'in devamı

Platform yalpa ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	4.229.230.000
Platform baş-kıç vurma ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	4.229.230.000
Platform savrulma ataleti (platform merkez hattı etrafında)	kg x m ²	164.230.000
Serbest su yüzeyi altında konikliğin üst noktasına kadar olan mesafe	m	4
Serbest su yüzeyi altında konikliğin altına kadar olan mesafe	m	12
Kule üst çapı	m	3,87
Platformun üst çapı (Kule tabanı çapı)	m	6,5
Platform alt çapı	m	9,4



Şekil 48. NREL 5 MW OC-3 Hywind SPAR [36].



Statoil'in Hywind platformu bağlama sistemi üç katener hattın oluşmaktadır. Halatlar, palamarların savrulmaya karşı sertliği artırmak için platforma "kaz ayağı" (delta bağlantısı) aracılığıyla bağlanmaktadır [36]. Bu bağlama halatlarının her biri değişken ağırlıklara ve özelliklere sahip birkaç parçadan oluşabilmektedir.

OC-3 Hywind bağlantı sistemleri analizleri için birtakım sadeleştirmeler yapılmaktadır. Bu sadeleştirmelerden ilki, uygun toplam savrulma sertliğini elde etmek için bağlama delta bağlantısı ortadan kaldırılmasıdır. İkinci olarak, çok parçalı bağlama halatlarının her biri, kütle, ağırlık ve rijitliğin ağırlıklı ortalama değerleri olarak türetilen özelliklere sahip eşdeğer tek parça hat şeklinde gösterilir. Üçüncü ve son olarak, tüm sürüklenme kuvvetleri dahil olmak üzere tüm bağlama sistemi sönümlemeleri ihmal edilmektedir. OC-3 Hywind SPAR platformun bağlama sistemleri özellikleri Tablo 19.'da verilmiştir [36].

Tablo 19. OC-3 Hywind bağlama sistemleri genel özellikleri [36].

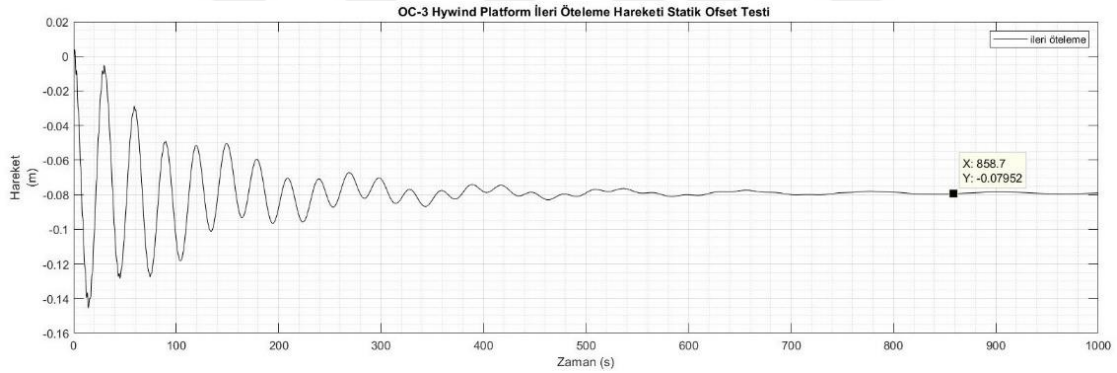
Genel bilgiler	Birim	Değer
Su derinliği	m	320
Halat sayısı		3
Halatlar arası açısı	der.	120
Serbest su yüzeyi altından halat bağlantı noktası derinliği (platform üzerinde)	m	70
Platform merkez hattından çapa noktalarına olan yarıçap uzunluğu (deniz tabanında)	m	853,87
Platform merkez hattından bağlantı noktalarına olan yarıçap uzunluğu (platform üzerinde)	m	5,2
Her bir bağlama halatı toplam uzunluğu (gerilmemiş halde)	m	902,2
Bağlama halatı çapı	m	0,09
Eşdeğer halat kütle yoğunluğu	kg/m	77,7066
Birim uzunluk başına düşen eşdeğer ıslak ağırlık	N/m	698.094
Eş değer uzama sertliği (AE)	N	384.243.000
Ek savrulma yayı sertliği	Nm/rad	98.340.000



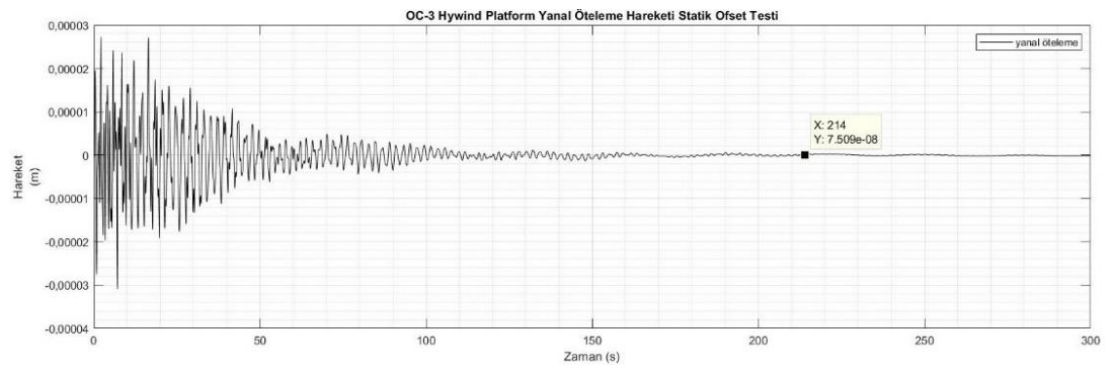
2.9.4.1.3. OC-3 Hywind Statik Ofset Testi

Bu kısımda statik ofset testi gerçekleştirilerek platform için başlangıç koşulları belirlenmiştir. Test sonucuna göre bulunan başlangıç koşulları ile platformun çevresel yükler altında zaman tanımlı alanda analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bakımdan statik ofseti testi önemlidir.

Testi gerçekleştirmek için ELASTODYN girdi dosyasında platformun ve kulenin 6 serbestlik dereceleri, rotor hızları, gibi değerler “0” girilmiştir. Yani herhangi bir zorlayıcı kuvvet ya da moment bulunmamaktadır. Platforma gelen dalga olmayıp sakin su etkileri uygulanmaktadır. Bu doğrultuda hidrodinamik yüklerin girildiği HYDRODYN girdi dosyasında ilgili ayarlamalar gerçekleştirilmiştir. Aerodinamik kuvvetlerin girdilerini içeren ve bu simülasyonu gerçekleştiren AERODYN girdi dosyası rüzgâr yükleri olmayacak şekilde düzenlenmiştir. Bu şartlar altında FAST programının 8. sürümü olan OPENFAST yazılımı ile simülasyon koşturulmuş, sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

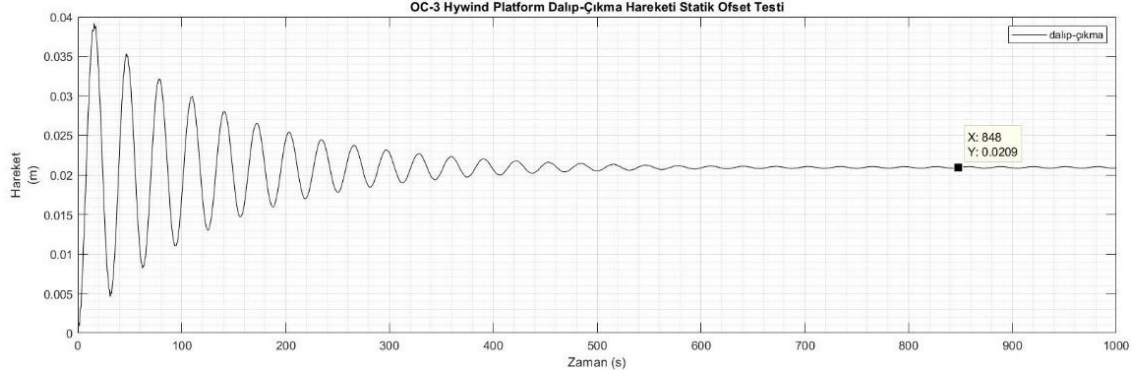


Şekil 49. OC-3 Hywind platform ileri öteleme hareketi statik ofset testi

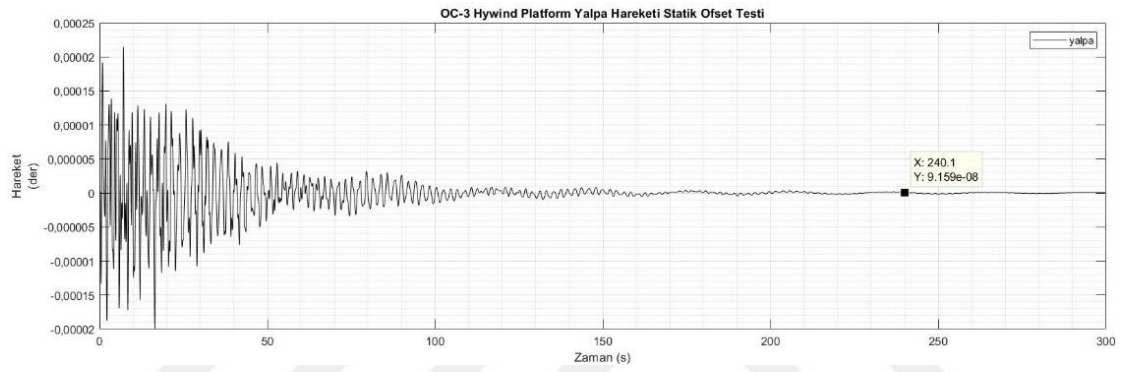


Şekil 50. OC-3 Hywind platform yanal öteleme hareketi statik ofset testi

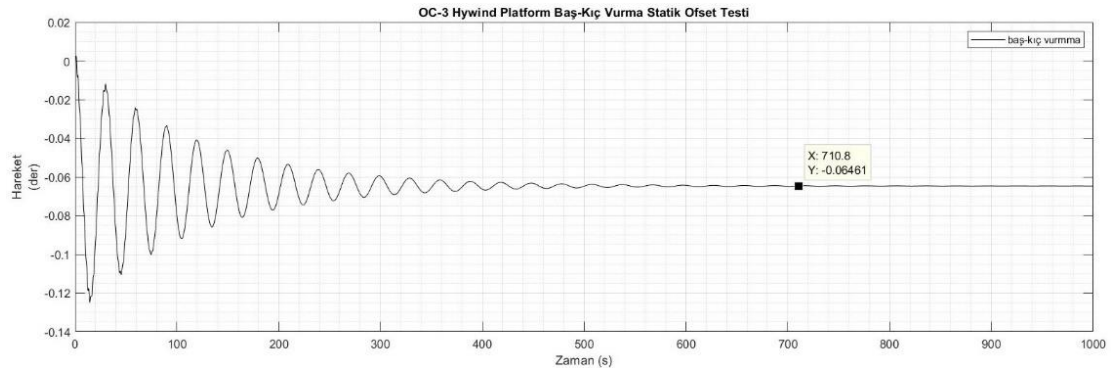




Şekil 51. OC-3 Hywind platform dalıp-çıkma hareketi statik ofset testi

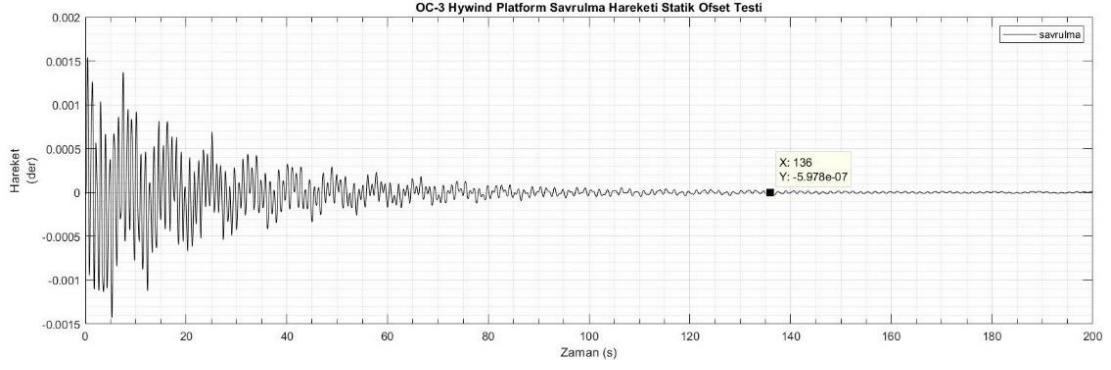


Şekil 52. OC-3 Hywind platform yalpa hareketi statik ofset testi



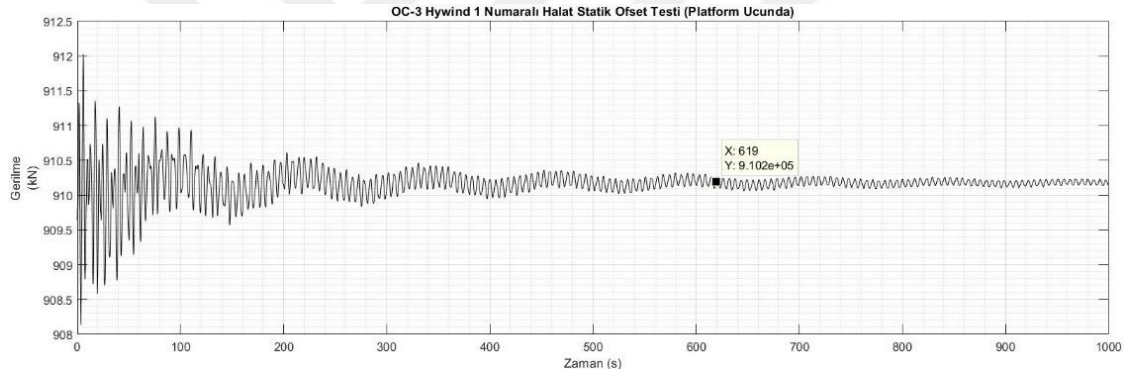
Şekil 53. OC-3 Hywind platform baş-kıç vurma hareketi statik ofset testi



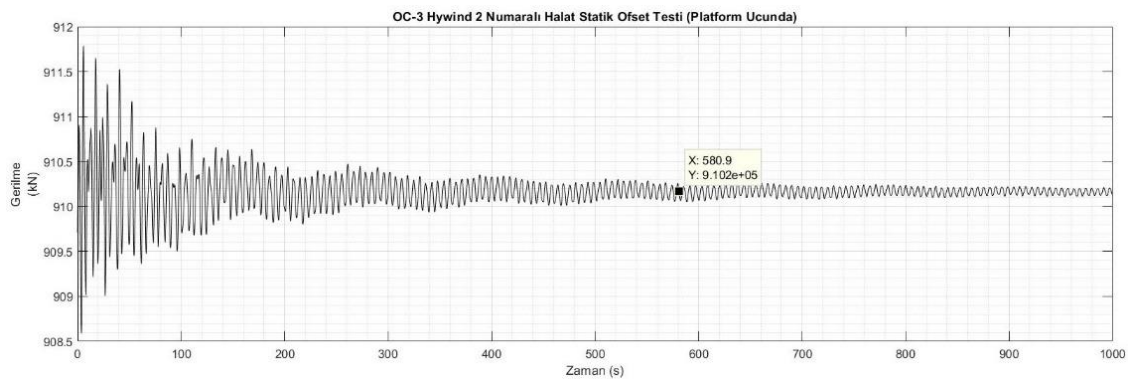


Şekil 54. OC-3 Hywind platform savrulma hareketi statik ofset testi

Bağlama sistemlerindeki ön-gerilme (pre-tension) değerleri de aynı şekilde statik ofset testi ile belirlenmiştir.

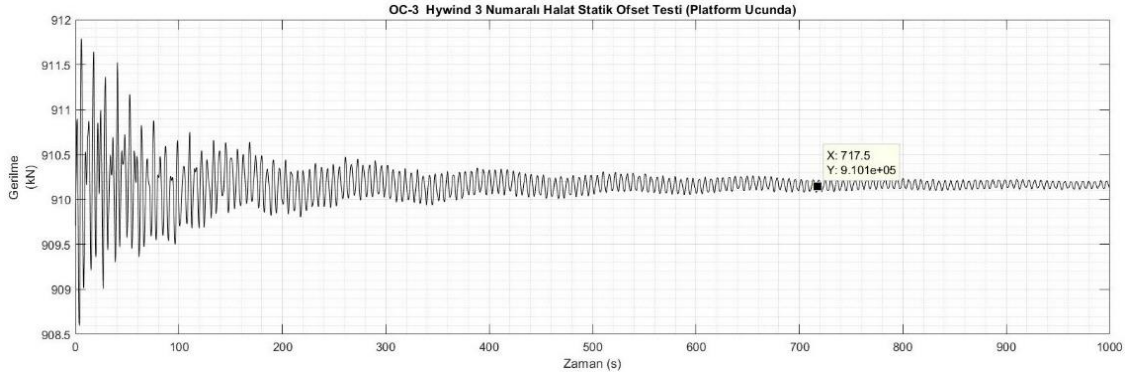


Şekil 55. OC-3 Hywind 1- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

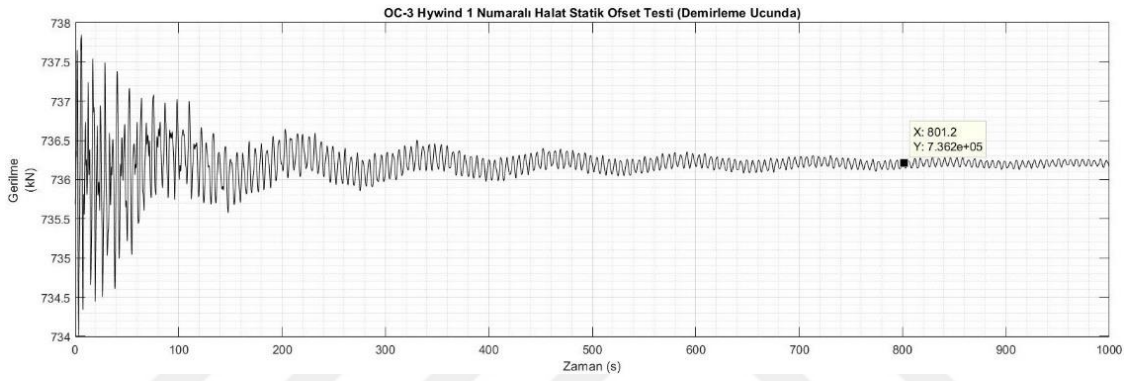


Şekil 56. OC-3 Hywind 2- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

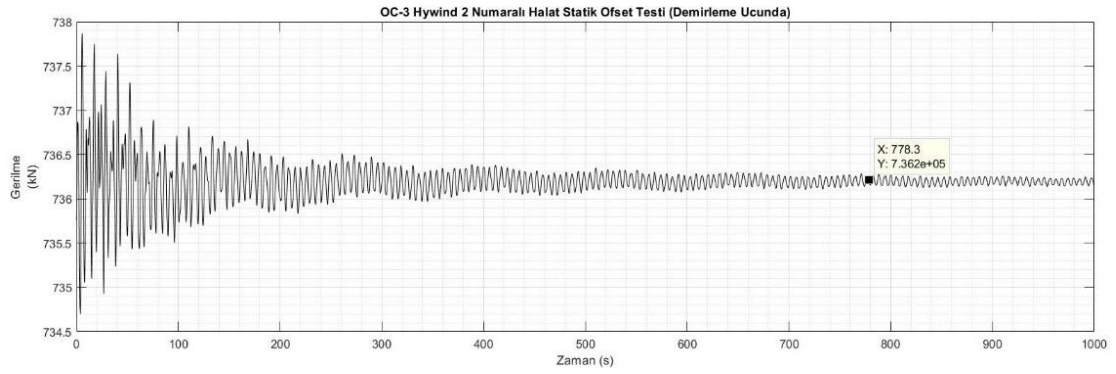




Şekil 57. OC-3 Hywind 3- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

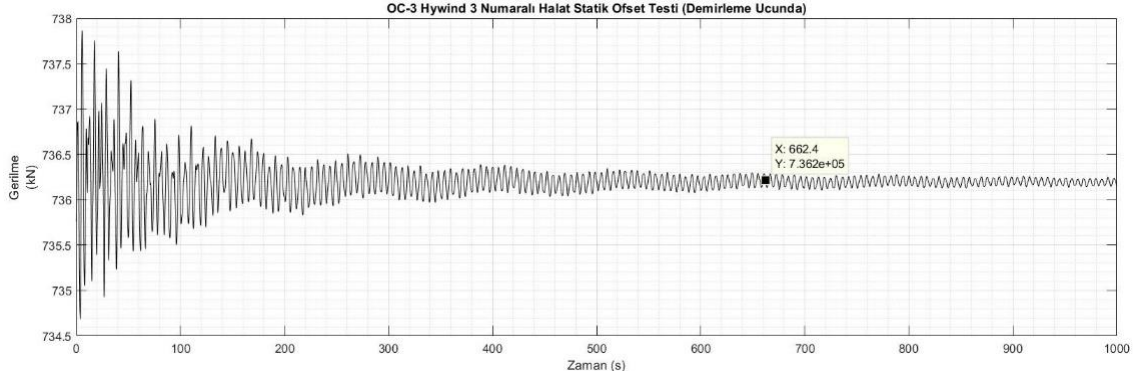


Şekil 58. OC-3 Hywind 1- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)



Şekil 59. OC-3 Hywind 2- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)





Şekil 60. OC-3 Hywind 3- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)

Elde edilen platform başlangıç koşulları ve bağlama sistemleri gerilmeleri aşağıda tablolarda verilmiştir.

Tablo 20. OC-3 Hywind platform 6 serbestlik dereceli hareketi başlangıç koşulları

	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp-çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
Başlangıç koşulları	-0,079 m	0 m	0,021 m	0°	-0,065°	0°

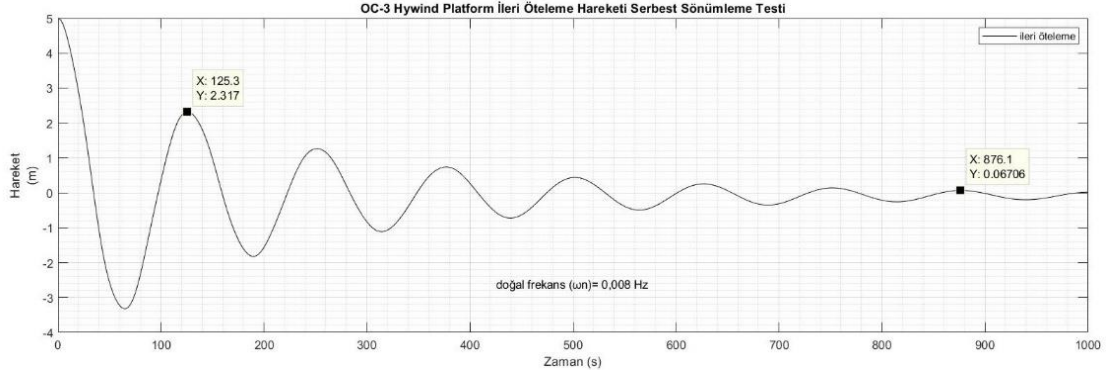
Tablo 21. OC-3 halat gerilmeleri

Halat numarası	Halat ön gerilmeleri (kN)	
	Platform ucu	Demirleme ucu
Halat-1	910,2	736,2
Halat-2	910,2	736,2
Halat-3	910,1	736,2

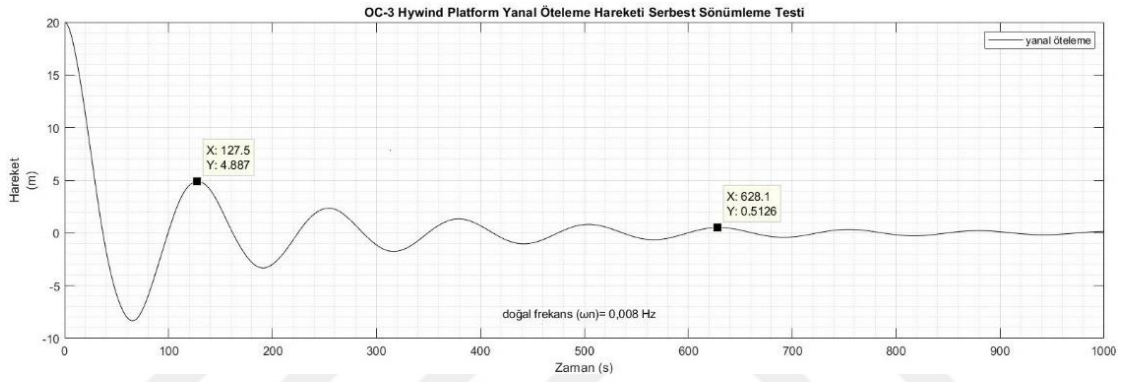
2.9.4.1.4. OC-3 Hywind Serbest Sönümlleme Testi

Bu test ile doğal frekanslar belirlenerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Test için statik ofset testinde olduğu gibi NREL tarafından geliştirilen FAST yazılımının 8. Sürümü olan OPENFAST kullanılmıştır. Serbest sönümlleme testi, doğal frekansları belirlemek için dış kuvvetler olmadan (gelen dalga ve rüzgâr yok) belirli başlangıç değerleri ile hareketin başlamasına izin verilerek simüle edilerek gerçekleştirilmektedir. Sonuçlar, platformun 6 serbestlik dereceli hareketleri (ileri öteleme, yanal öteleme, dalıp-çıkma, yalpa, baş-kıç vurma, savrulma) için verilmiştir. Burada kule, kanatlar ve jeneratör rijit kabul edilerek birlikte hareket etmektedir. Platform ve bağlantı sistemleri için 6 serbestlik dereceli harekete izin verilmiştir. Sonuçlar Tablo 22.'de verilmiştir.

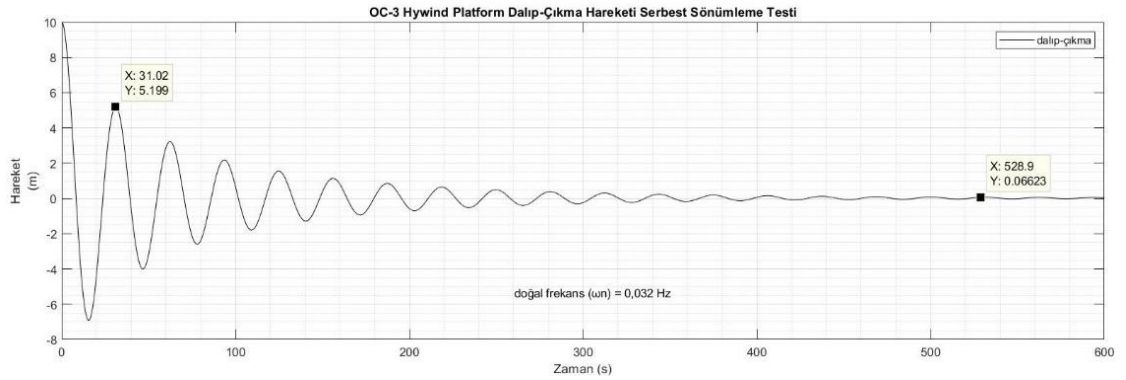




Şekil 61. OC-3 Hywind platform ileri öteleme hareketi serbest sönümlenme testi

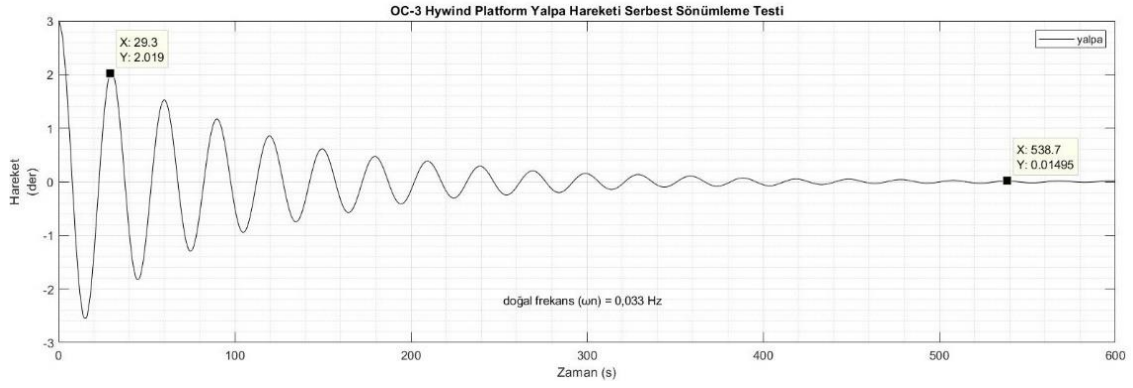


Şekil 62. OC-3 Hywind platform yanal öteleme hareketi serbest sönümlenme testi

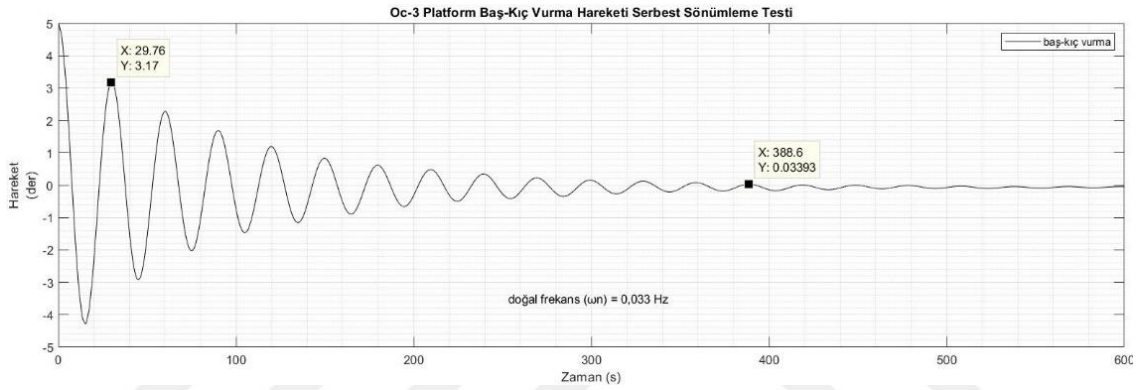


Şekil 63. OC-3 Hywind platform dalıp-çıkma hareketi serbest sönümlenme testi

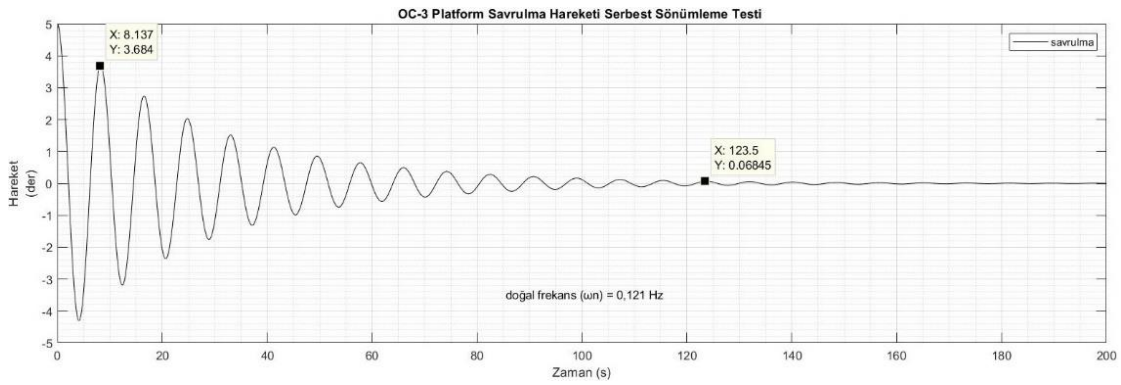




Şekil 64. OC-3 Hywind platform yalpa hareketi serbest sönümlleme testi



Şekil 65. OC-3 Hywind platform baş-kıç vurma hareketi serbest sönümlleme testi



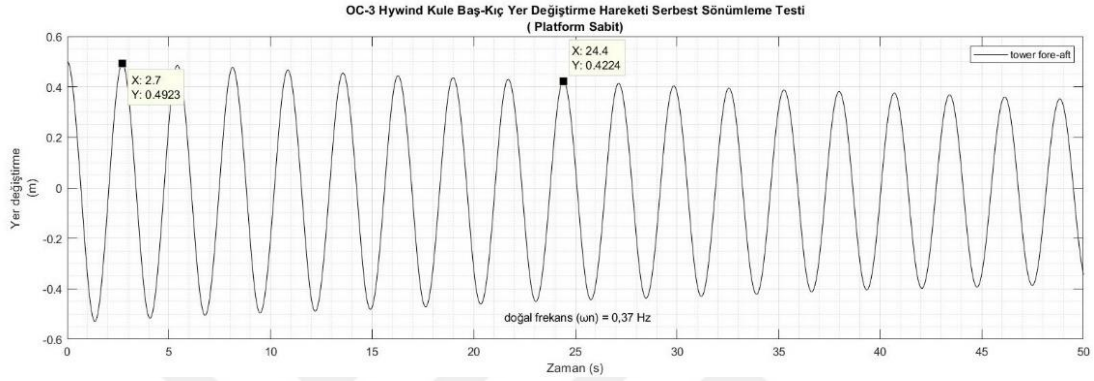
Şekil 66. OC-3 Hywind platform savrulma hareketi serbest sönümlleme testi

Platform hareketlerinin serbest sönümlleme testleri gerçekleştirildiği gibi, aynı şekilde kule için de serbest sönümlleme testi gerçekleştirilmiştir. Burada ilk önce platform hareketleri kısıtlanarak platform sabit hale getirilmiş şekilde, kulenin platformdan bağımsız olarak hareket ettiği kabul edilmiş ve serbest sönümlleme testi gerçekleştirilmiştir. Daha

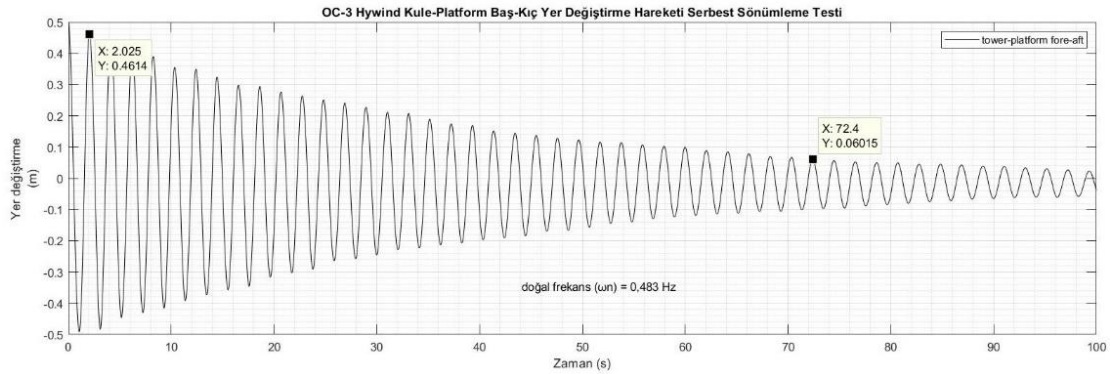


sonra kule ve platform beraber hareket edecek şekilde platformun hareketleri kısıtlanmadan serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Böylece yalnız kulenin ve kule platform birlikte iken doğal frekansları (ω_n) karşılaştırılmıştır.

Kulenin hareketleri, x- ekseni yönünde baş-kıç yer değiştirme hareketi (fore-aft) ve y- ekseninde ise bordadan-bordaya yer değiştirme (side-side) olacak şekilde adlandırılmıştır.

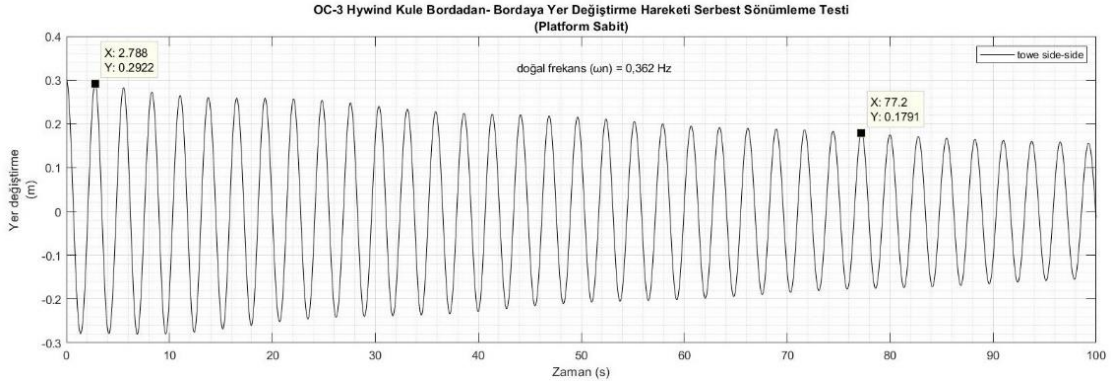


Şekil 67. OC-3 Hywind kule baş-kıç yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi

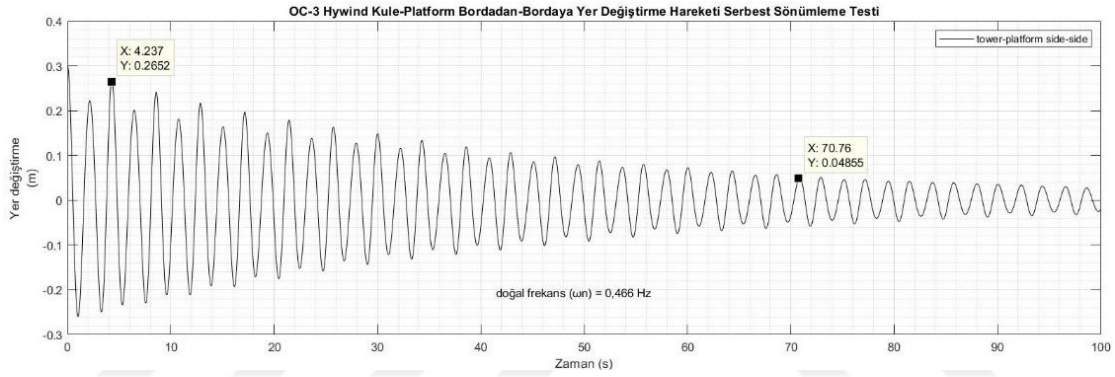


Şekil 68. OC-3 Hywind kule-platform baş-kıç yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi





şekil 69. OC-3 Hywind kule bordadan-bordaya yer değiştirme hareketi serbest sönümleme testi



şekil 70. OC-3 Hywind kule-platform bordadan- bordaya yer değiştirme hareketi serbest sönümleme testi

Doğal frekans sonuçları Tablo 22.'de verilmiştir.

Tablo 22. OC-3 Hywind platform doğal frekansları

Özellik	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp-çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
Doğal periyot (s)	125,13	125,15	31,12	29,96	29,90	8,24
Doğal frekans (Hz)	0,008	0,008	0,032	0,033	0,033	0,121
Doğal açısal frekans (rad/s)	0,050	0,039	0,202	0,208	0,210	0,763
Sönüm oranı	0,052	0,063	0,028	0,027	0,034	0,031

Burada ve sonraki kısımlarda da geçen sönüm oranı hesaplanmalarında “logaritmik azalma” yöntemi kullanılmıştır.



$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} \quad (99)$$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \quad (100)$$

δ ve ζ sırasıyla logaritmik azalma oranı ile sönüm oranını göstermektedir. Kule doğal frekansları Tablo 23.'de gösterilmiştir.

Tablo 23. OC-3 Hywind kule doğal frekansları

Özellik	Kule f-a	Kule s-s	Kule+platform f-a	Kule+platform s-s
Doğal periyot (s)	2,71	2,76	2,07	2,15
Doğal frekans (Hz)	0,37	0,362	0,483	0,466
Doğal açısal frekans (rad/s)	2,32	2,28	3,04	2,92
Sönüm oranı	0,003	0,003	0,010	0,009

Bulunan sonuçlar bu sonuçların Wang vd. [207], ve Xu ve Day [208] tarafından gerçekleştirilen model testleri ve Ramachandran vd. [209] tarafından hesaplanan NREL referans değerleri ile karşılaştırması aşağıdaki gibi Tablo 24.'de verilmiştir.

Tablo 24. OC-3 Hywind platform doğal frekansları (Hz) uygulama ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Çalışmalar	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp-çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
Uygulama	0,008	0,008	0,032	0,033	0,033	0,121
Wang vd. [207]	0,025	-	0,036	-	0,029	0,168
Xu ve Day [208]	0,069	-	0,275	0,292	0,292	0,292
Ramachandran-NREL [209]	0,08	0,039	0,202	0,208	0,210	0,763

OC-3 Hywind Kule için gerçekleştirilen uygulama ve Ramachandran vd. [209] tarafından hesaplanan NREL çalışması karşılaştırması da Tablo 25.'de gösterilmiştir.



Tablo 25. OC-3 Hywind kule doğal frekansları (Hz) uygulama ile deneyse verilerin karşılaştırılması

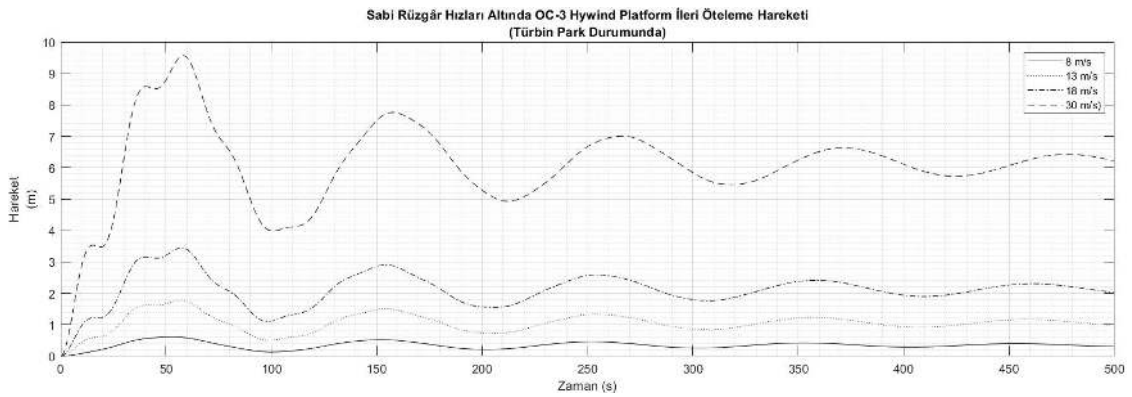
Çalışmalar	Kule f-a	Kule s-s	Kule+platform f-a	Kule+platform s-s
Uygulama	0,37	0,362	0,483	0,466
Ramachandran-NREL [209]	-	-	0,473	0,457

Gerçekleştirilen uygulama ile deneyler arasındaki farkların sebebi, deneylerin model ölçeğinde, çalışmanın ise tam ölçekte yapılmış olmasındandır. Yapılan model testlerinde ortam parametreleri ve deneysel model Froude benzerlik kuralına göre ölçeklendirilmiştir. Ayrıca Reynolds sayısının farklılığından kaynaklanan ölçek etkisi de yenilenmiştir.

Yine sonuçlar incelendiğinde NREL referans çalışması ile [209] tutarlılık gösterdiği görülmektedir. Böylece OC-3 Hywind konsepti için validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

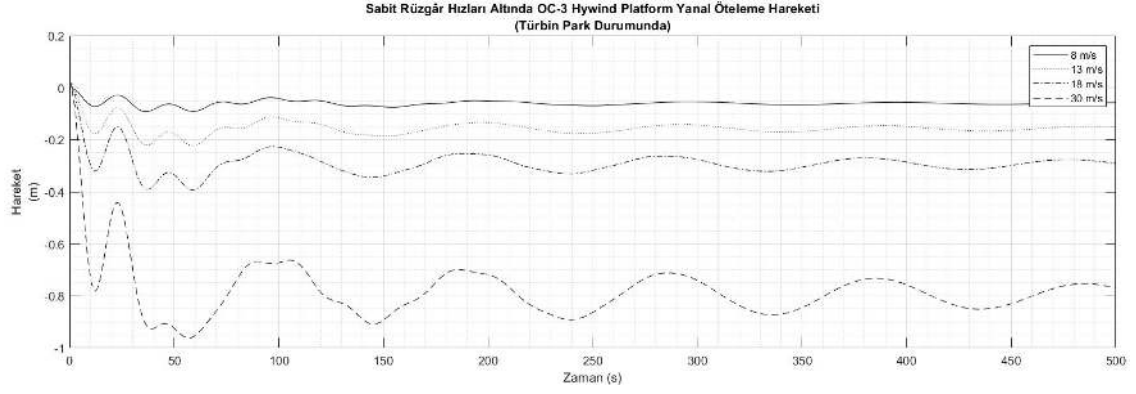
2.9.4.1.5. Sabit Rüzgâr Altında OC-3 Hywind Konsepti Tepkileri

OC-3 Hywind konsepti sabit rüzgâr altında zaman tanımlı alanda gerçekleştirilen simülasyon çalışması için 8 m/s, 13 m/s, 18 m/s ve 30 m/s'lik sabit rüzgâr hızları seçilmiştir. Simülasyon 1000 s için gerçekleştirilmiş olup grafiklerde hareketler azalarak salınımlar ihmal edilecek kadar küçüldüğü zaman adımı sonrasını gösterilmemiştir.

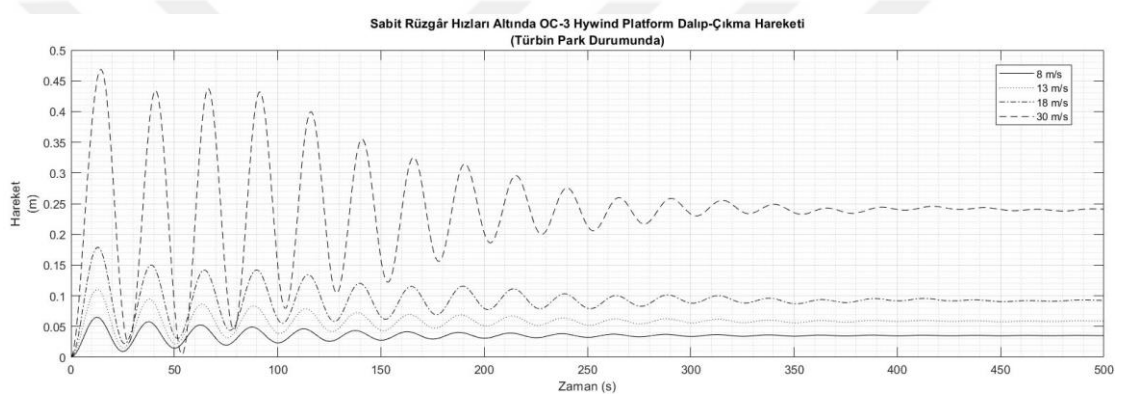


Şekil 71. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ileri öteleme hareketi (türbin park durumunda)

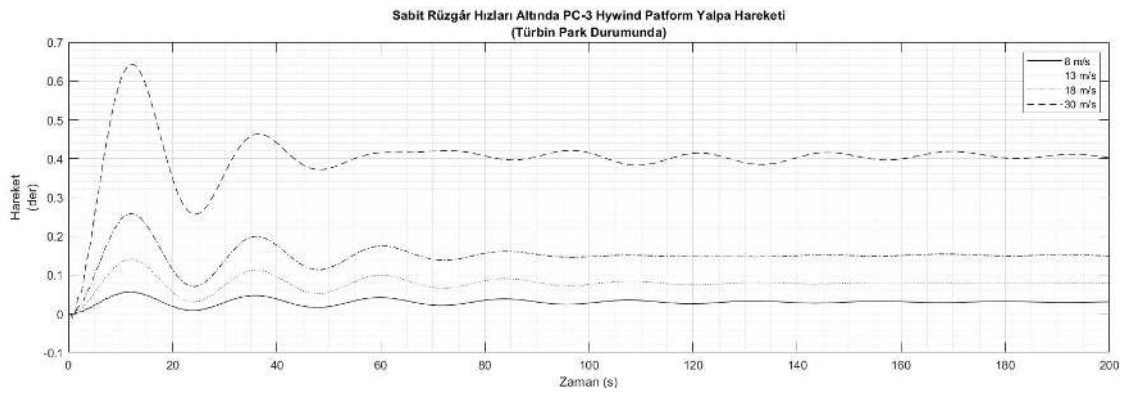




Şekil 72. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform yanıl öteleme hareketi (türbin park durumunda)

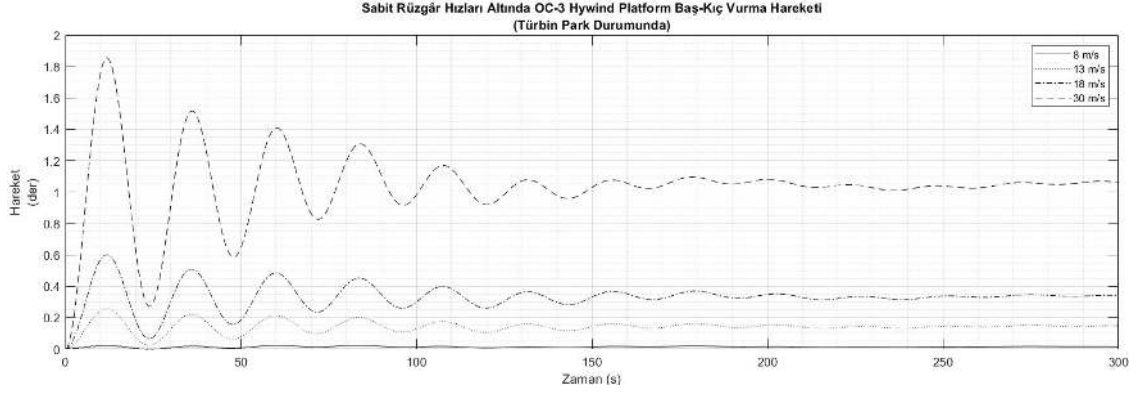


Şekil 73. Sabit rüzgâr hızı altında OC-3 Hywind platform dalıp-çıkma hareketi (türbin park durumunda)

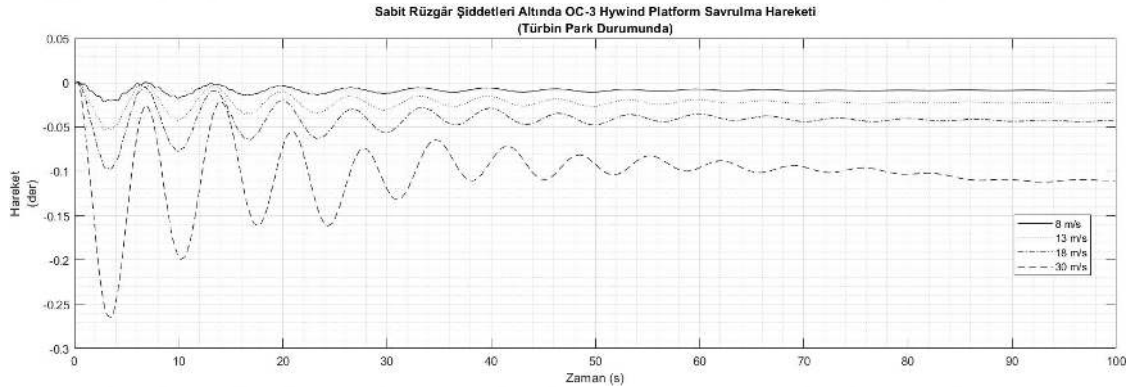


Şekil 74. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform yalpa hareketi (türbin park durumunda)

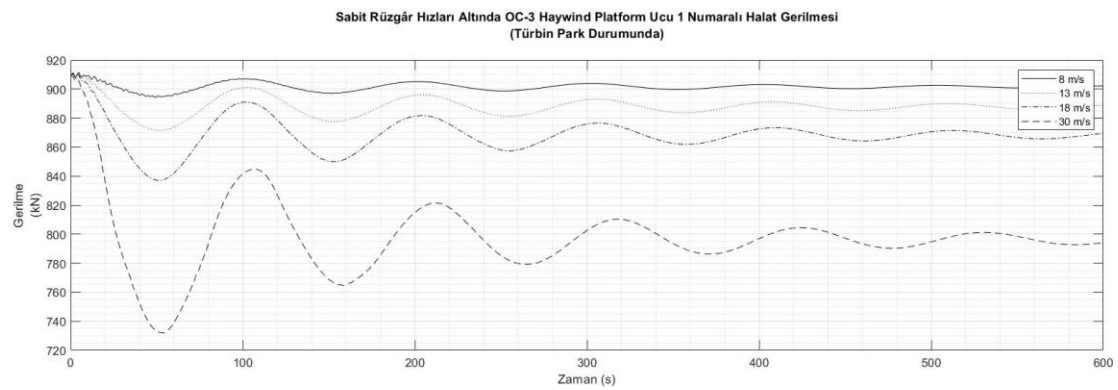




Şekil 75. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform baş-kıç vurma hareketi (türbin park durumunda)

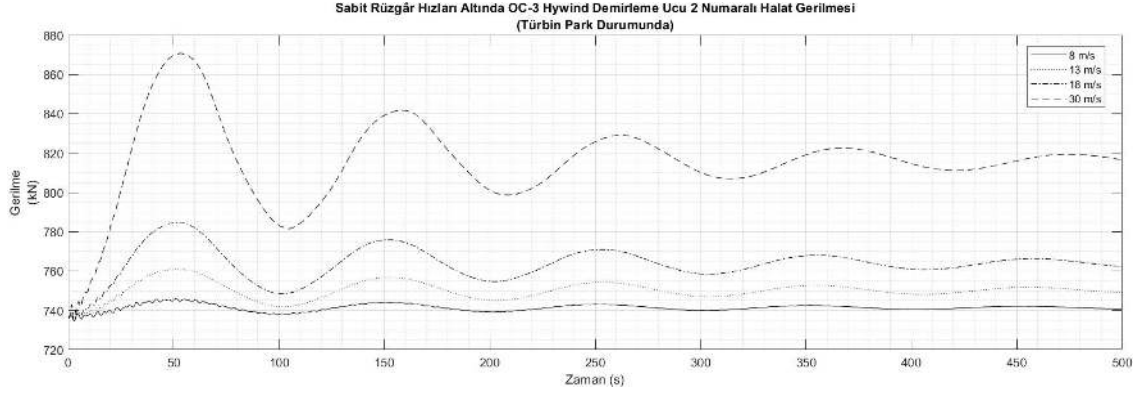


Şekil 76. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform savrulma hareketi (türbin park durumunda)

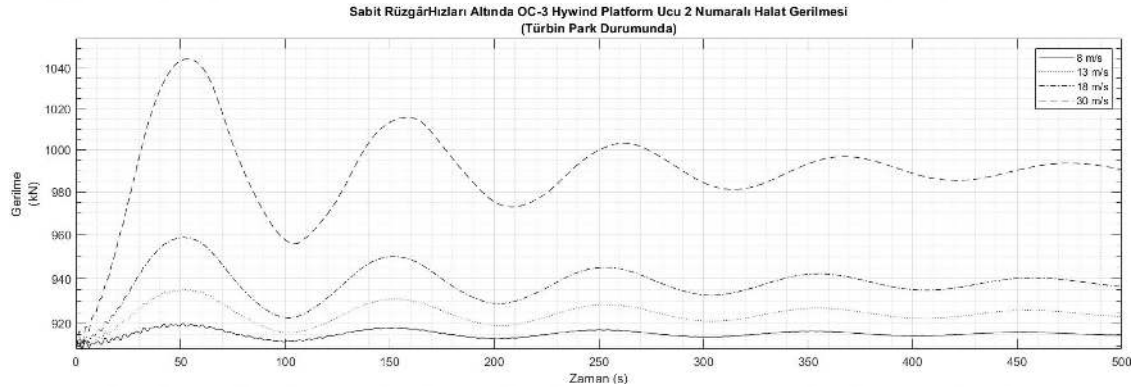


Şekil 77. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)

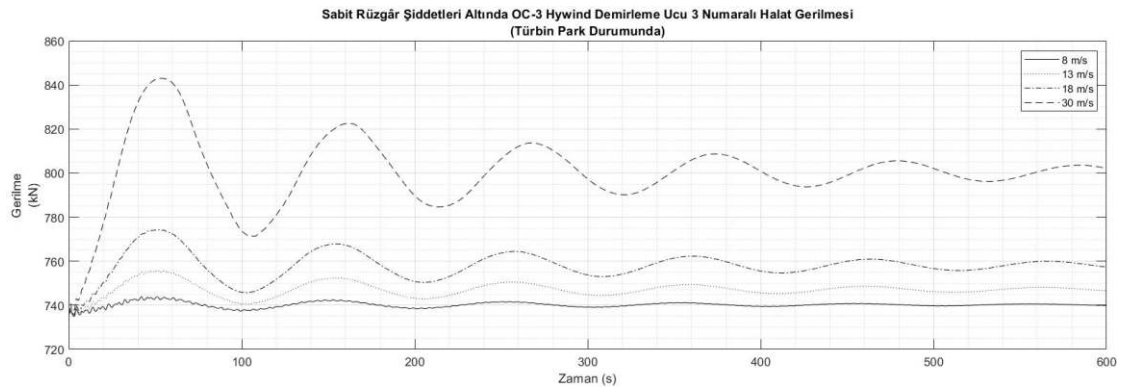




Şekil 78. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)

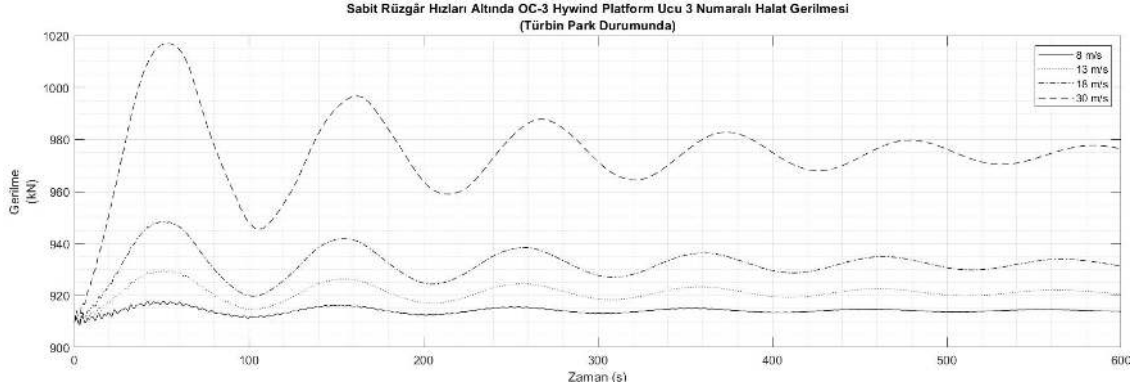


Şekil 79. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)



Şekil 80. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)





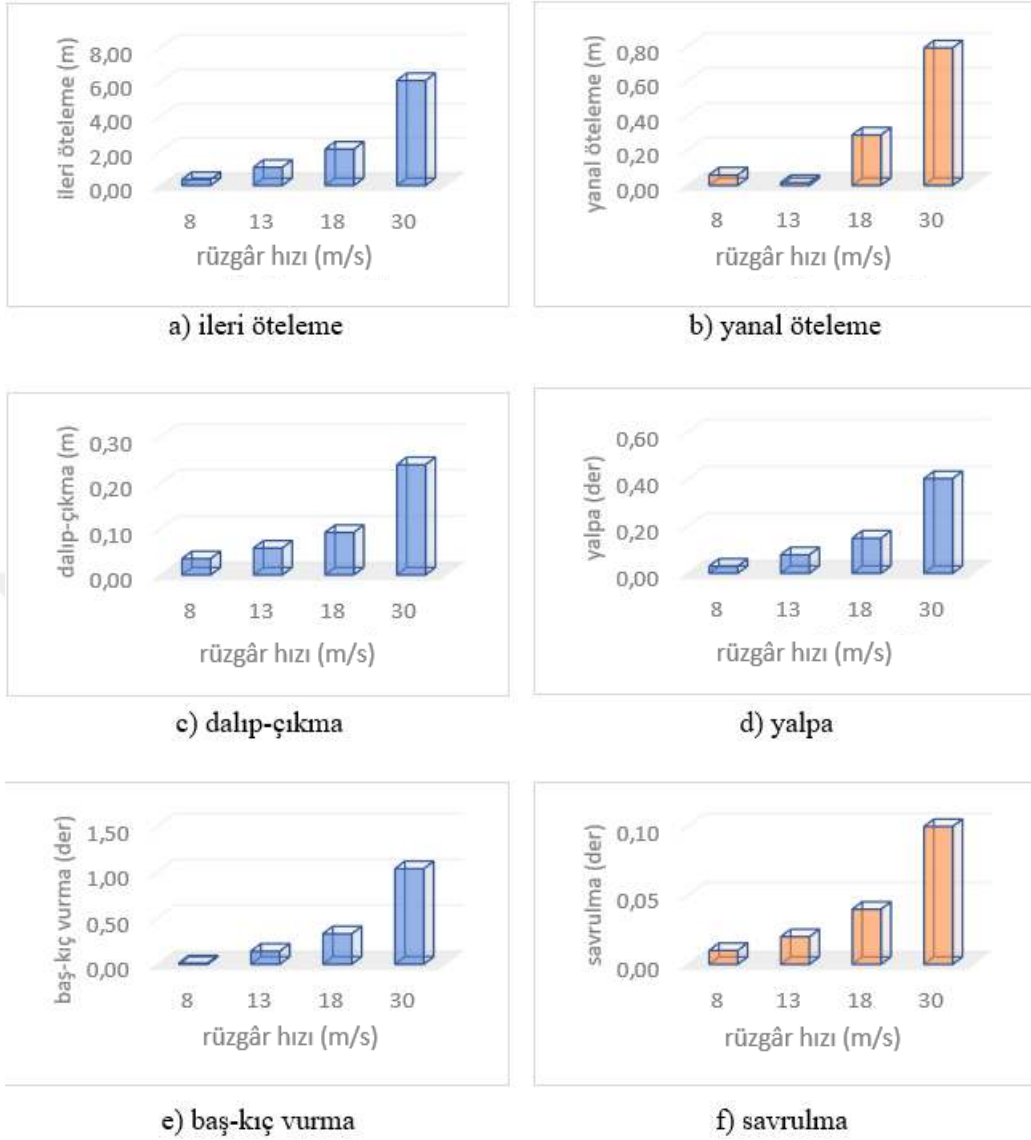
Şekil 81. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)

Türbinin park pozisyonunda olduğu OC-3 Hywind platform hareketlerinden ileri öteleme, yanal öteleme ve dalıp çıkma hareketi için grafiklerde ilk 500 s'deki hareketleri gözlenmiştir. Buradan sonra salınımlar kaybolmuştur. Platform yalpa hareketi için bu durum 200 s, baş-kıç vurma için 300 s ve savrulma hareketi için 100 s olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yine türbinin park pozisyonunda olduğu durumda OC-3 Hywind bağlama sistemlerindeki gerilmeleri görmek adına 1, 2 ve 3 numaralı halatların zaman tanımlı alanda davranışları sırasıyla demirleme ve platform ucunda olmak üzere Şekil 76. ile Şekil 81. arasında gösterilmiştir. Burada da simülasyon 1000 s için gerçekleştirilmiş olup, grafikte 1 ve 3 numaralı halatların gerilmeleri için 600 s, 2 numaralı halat gerilmeleri için ise 500 s' den sonraki gösterime, bu zaman adımlarından itibaren salınımların kaybolması nedeniyle yer verilmemiştir.

Aşağıda Şekil 82.'de sabit rüzgâr hızları altında türbin park konumunda olmak üzere OC-3 Hywind konseptinin platform tepki değerleri gösterilmiştir.



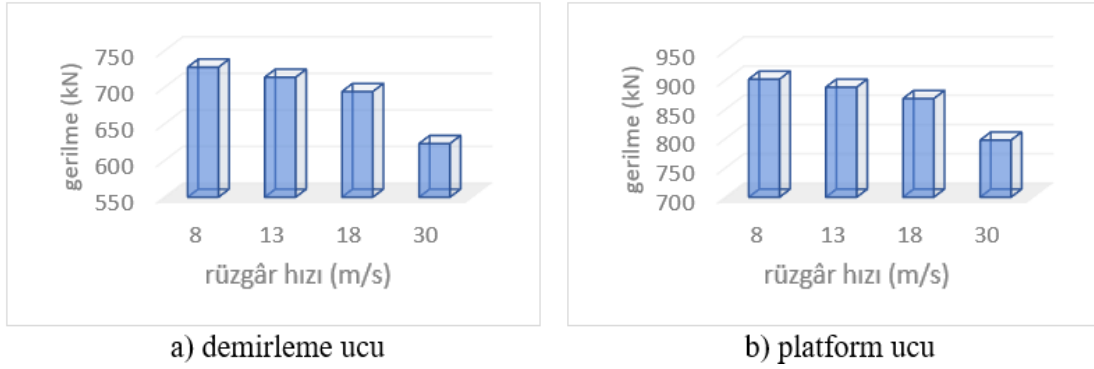


Şekil 82. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform tepki değerleri (türbin park konumunda)

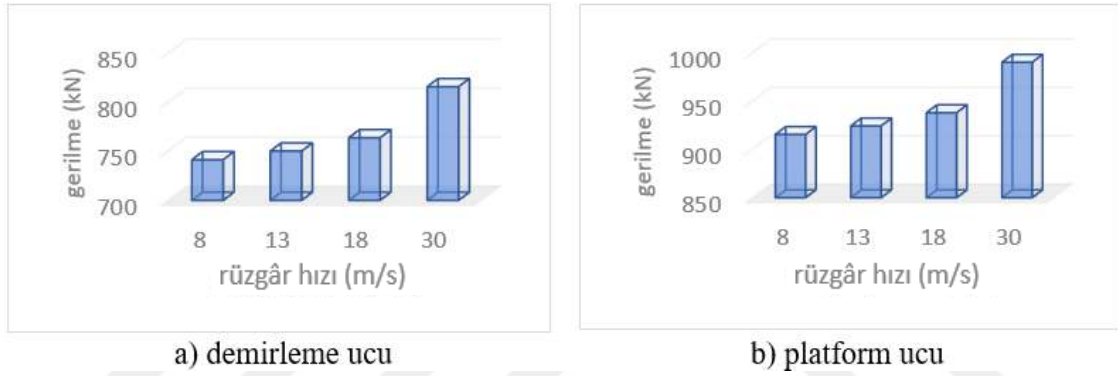
Burada kırmızı dolgulu olan yanal öteleme hareketi ile savrulma hareketi, ilgili oldukları eksene göre negatif yönlü olup, grafikte değerleri pozitif gösterilmiştir.

Sabit rüzgâr hızları altında türbinin park pozisyonunda olduğu durumda OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri de aşağıda gösterilmiştir. OC-3 Hywind konsepti bağlama sistemleri 3 katener bağlı halattan oluşmaktadır. Halat üzerindeki gerilme tepkileri demirleme ucunda (anch-ten) ve platform ucunda (fair-ten) olmak zere 2 şekilde ele alınmıştır.

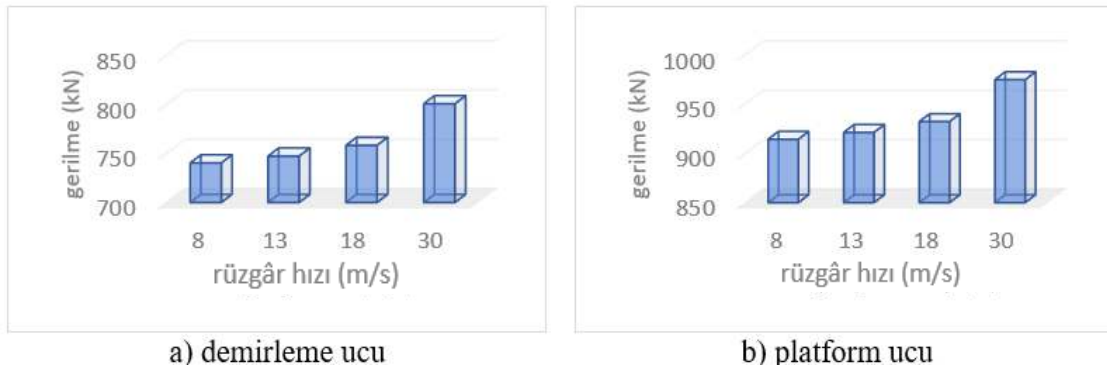




Şekil 83. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)



Şekil 84. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)

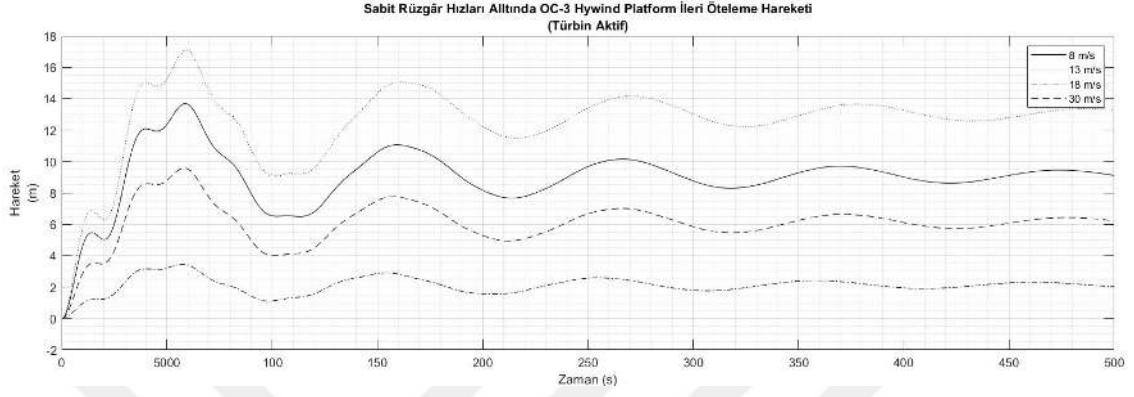


Şekil 85. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)

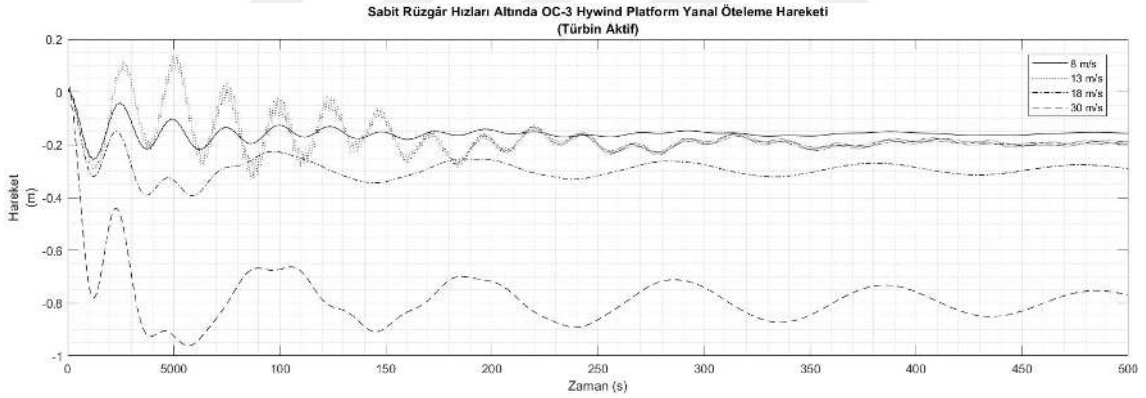
Sabit rüzgâr hızı altında OC-3 Hywind konseptinin türbin aktif haldeki simülasyonu da aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Burada türbin için başlangıç koşulu olarak rotor hızı 6 rpm girilmiştir. 8 m/s, 13 m/s ve 18 m/s’lik rüzgâr hızları için kanat hatveleri 0° , 30 m/s’lik



rüzgâr hızı için ise kanat hatvesi 3 kanat için de 82° olarak ayarlanmıştır. Türbin özellikleri gereği 25 m/s üzerindeki rüzgâr hızlarında kanat hatvesi 82° ayarlanmaktadır. Sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

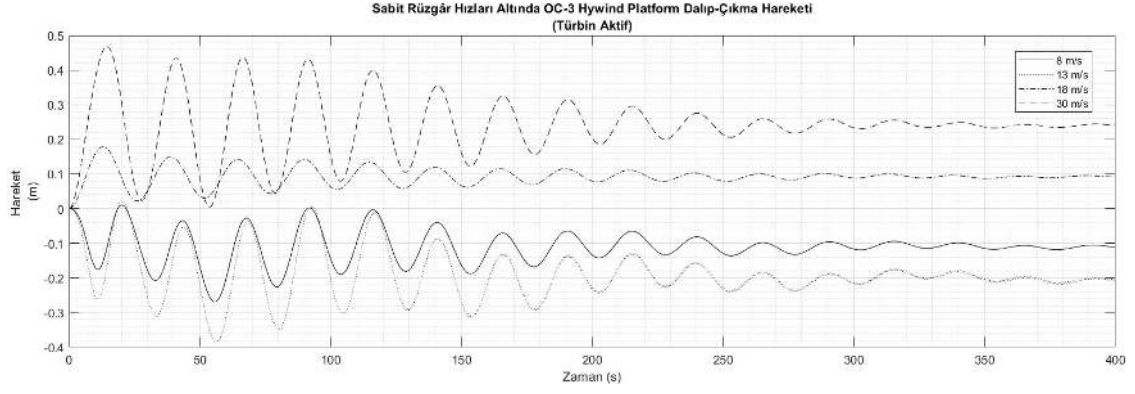


Şekil 86. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ileri öteleme hareketi (türbin aktif)

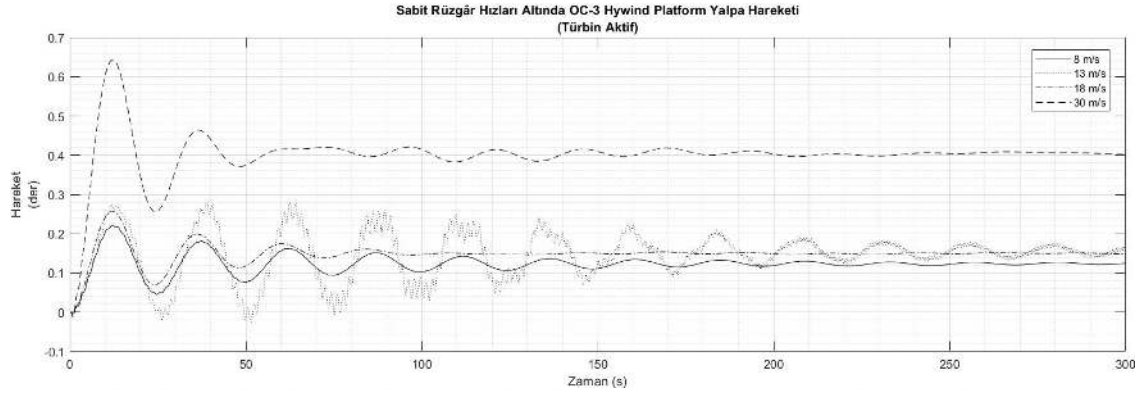


Şekil 87. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform yanıl öteleme hareketi (türbin aktif)

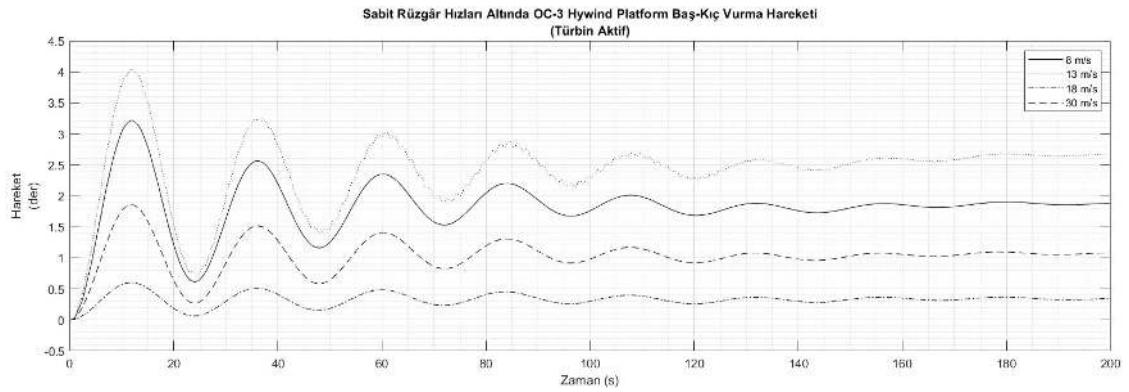




Şekil 88. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform dalıp-çıkma hareketi (türbin aktif)

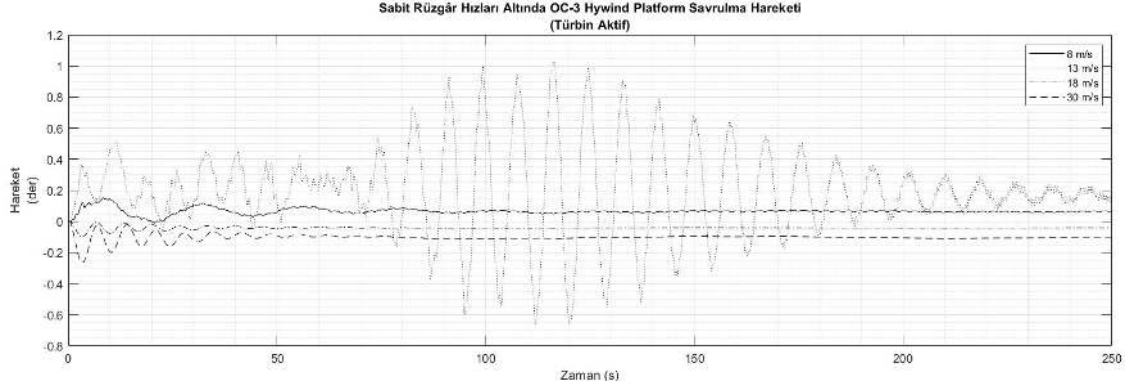


Şekil 89. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform yalpa hareketi (türbin aktif)

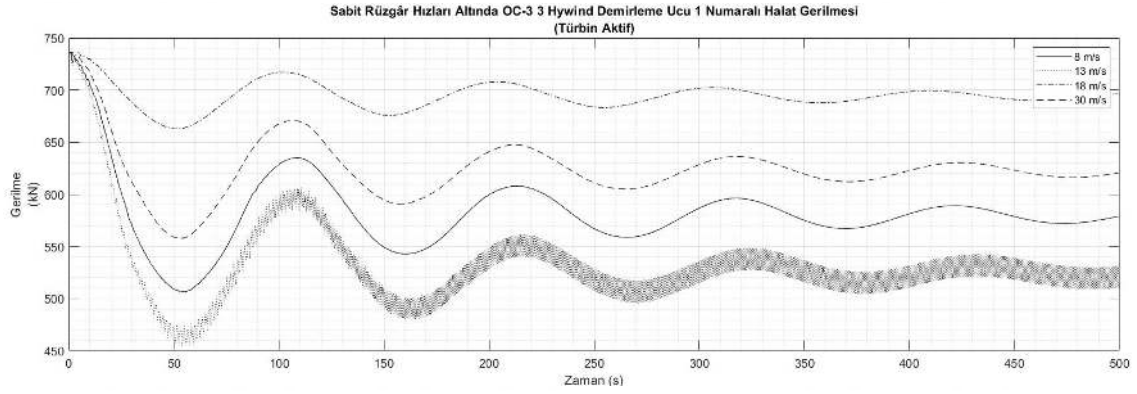


Şekil 90. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform baş-kıç vurma hareketi (türbin aktif)

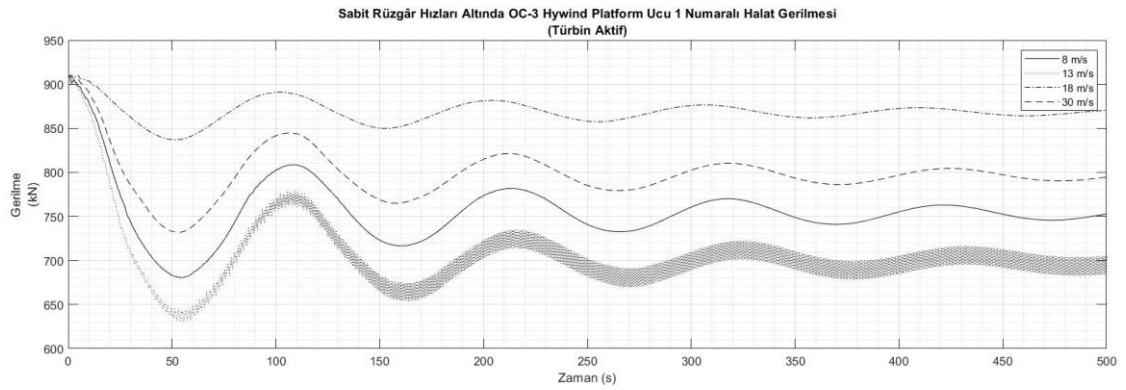




Şekil 91. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform savrulma hareketi (türbin aktif)

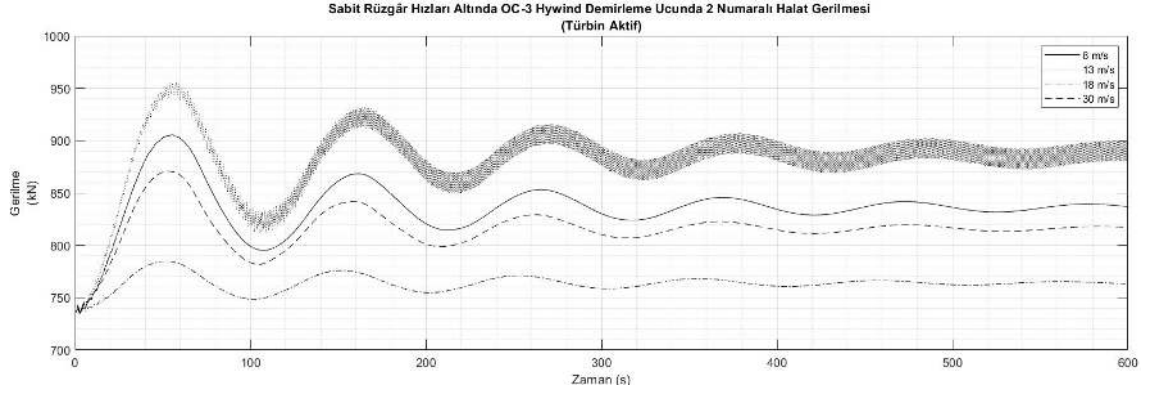


Şekil 92. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

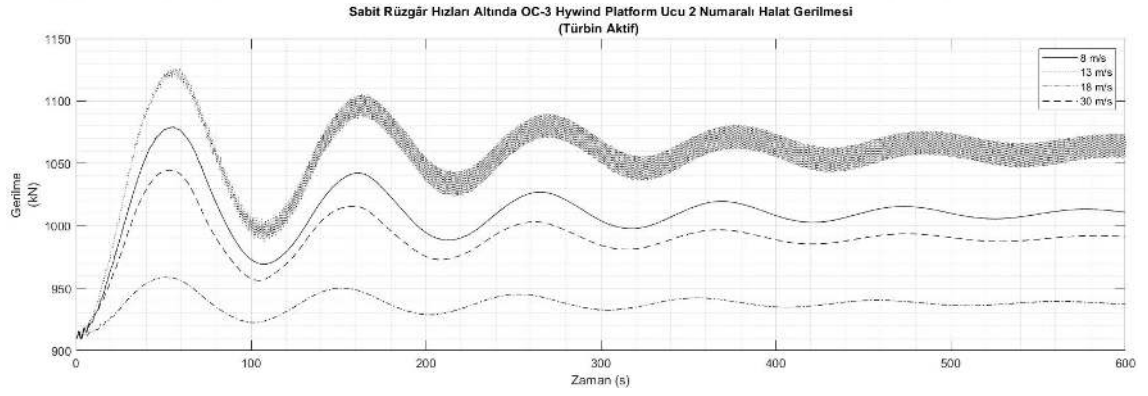


Şekil 93. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

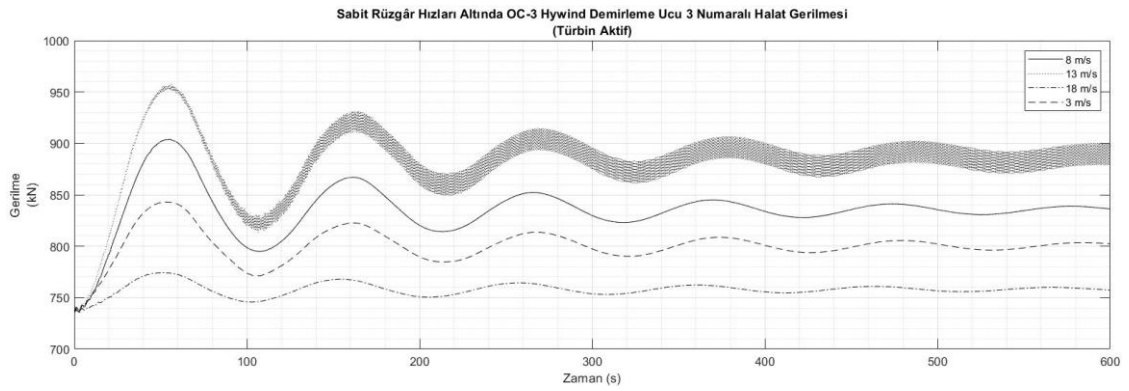




Şekil 94. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

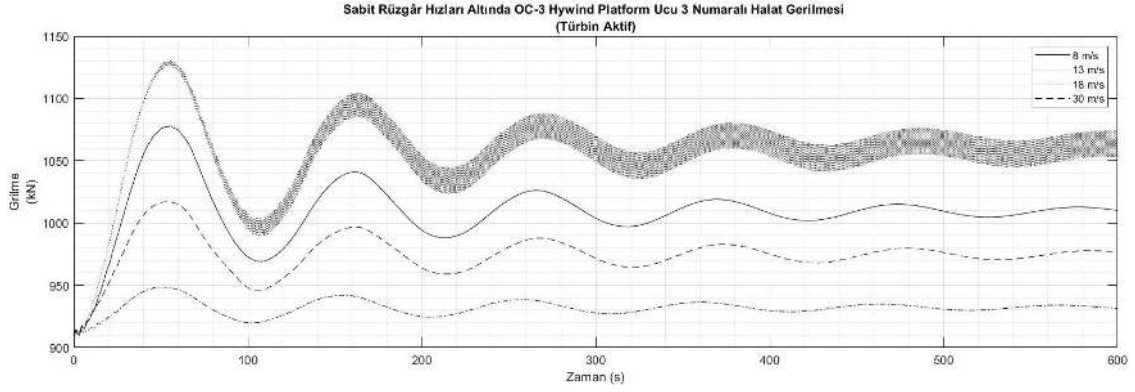


Şekil 95. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)



Şekil 96. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind demirleme ucunda 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)





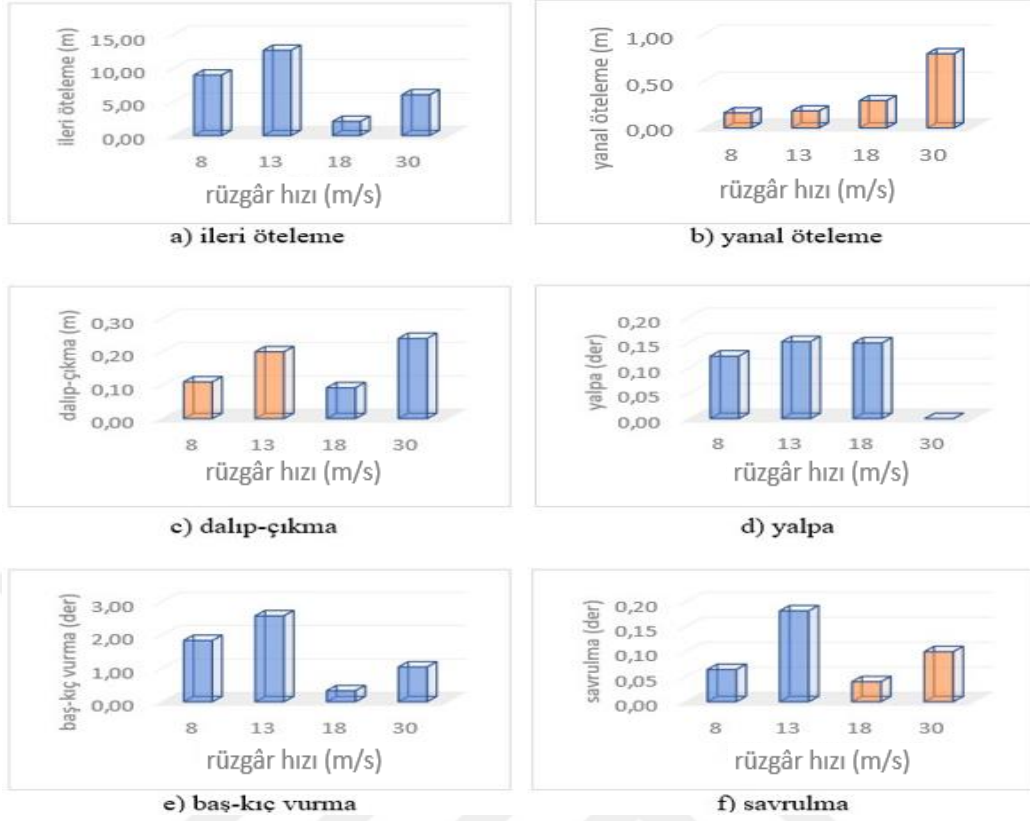
Şekil 97. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform ucunda 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

Türbinin aktif olduğu OC-3 Hywind platform hareketlerinden ileri öteleme ve yanıl öteleme 500 s'deki hareketleri gözlenmiştir. Buradan sonra salınımlar önemli değışiklik olmayacak şekilde azalmıştır. Platform dalıp-çıkma hareketi için ise bu durum 400 s, yalpa hareketi için 300 s, baş-kıç vurma için 200 s ve savrulma hareketi için 250 s'den sonra gerçekleşmiştir. Bu sebeple ilgili sürelerden sonraki kısımlar grafiklerde gösterilmemiştir.

Sabit rüzgâr hızı altında ve türbinin aktif durumunda OC-3 Hywind bağlama sistemlerindeki gerilmeleri görmek adına 1, 2 ve 3 numaralı halatların zaman tanımlı alanda davranışları sırasıyla demirleme ve platform ucunda olmak üzere Şekil 91. ile Şekil 94. arasında gösterilmiştir. Burada da simülasyon 1000 s için gerçekleştirilmiş olup, grafikte 1 numaralı halat gerilmesi için 500 s, 2 ve 3 numaralı halatların gerilmeleri için 600 s' den sonraki gösterime, bu zaman adımlarından itibaren salınımların kaybolması nedeniyle yer verilmemiştir. Halat gerilmelerindeki davranışlara bakıldığında, 2 ve 3 numaralı halatın birlikte, 1 numaralı halatın onlara ters olarak hareket ettiği görülmektedir. Yani diğler bir deyişle 2 ve 3 numaralı halat gergin durumdayken 1 numaralı halat gevşek, 2 ve 3 numaralı halatlar gevşek iken 1 numaralı halat gergin durumdadır. Bu durum demirleme konumuyla alakalı bir durumdur.

Sabit rüzgâr hızı altında aktif durumdaki türbini ile OC-3 Hywind platformunun hareket tepkilerinin değlerleri aşağıda Şekil 95 ile gösterilmiştir.



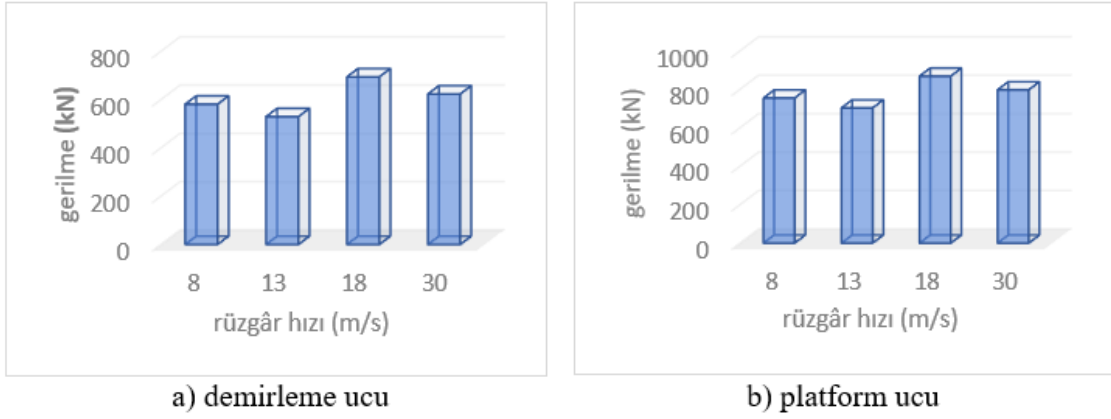


Şekil 98. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind platform tepki değerleri (türbin aktif durumda)

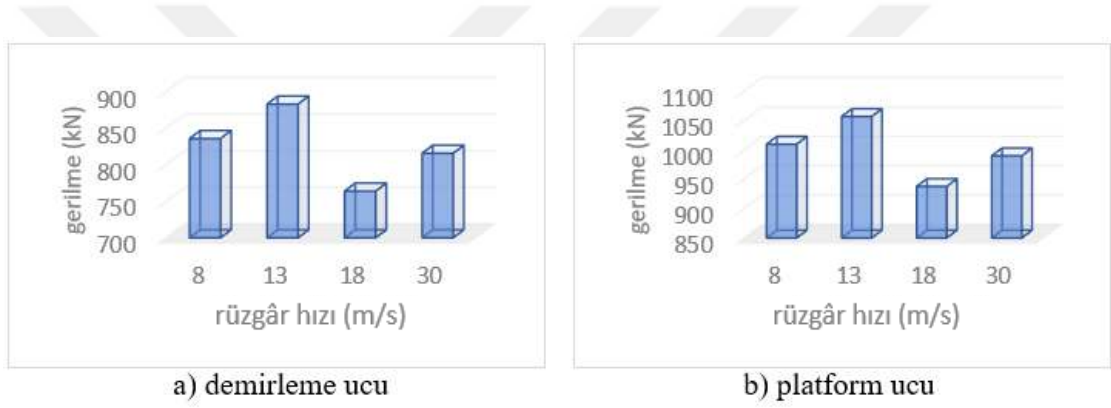
Burada kırmızı dolgulu olan büyüklükler, ilgili oldukları eksene göre negatif yönlü olup, grafikte değerleri pozitif gösterilmiştir.

Sabit rüzgâr hızları altında türbinin aktif olduğu durumda OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri de aşağıda gösterilmiştir. Yine halat üzerindeki gerilme tepkileri demirleme ucunda (anch-ten) ve platform ucunda (fair-ten) olmak üzere 2 şekilde ele alınmıştır.

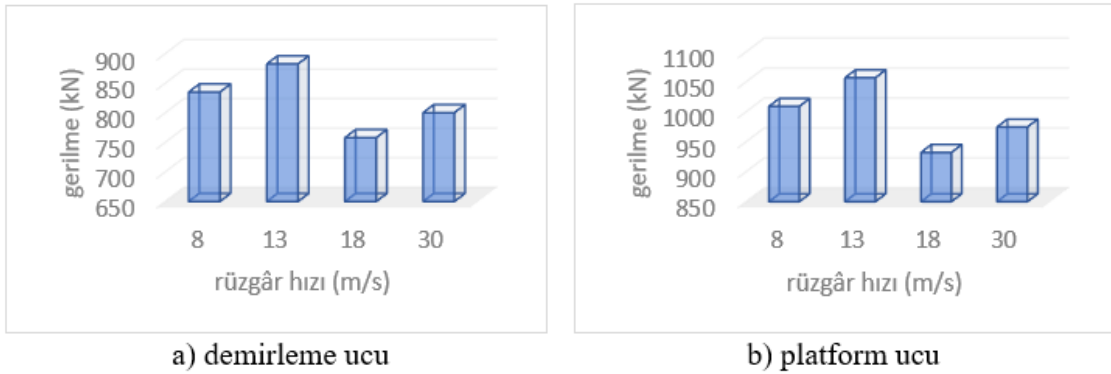




Şekil 99. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)



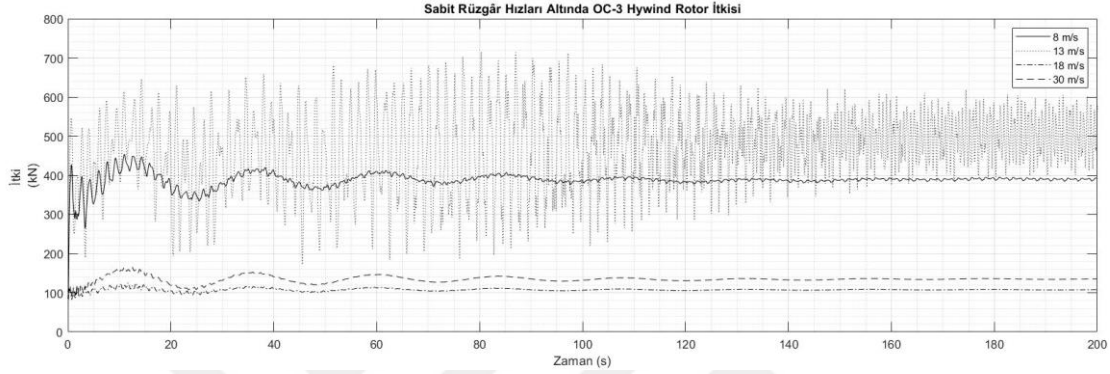
Şekil 100. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)



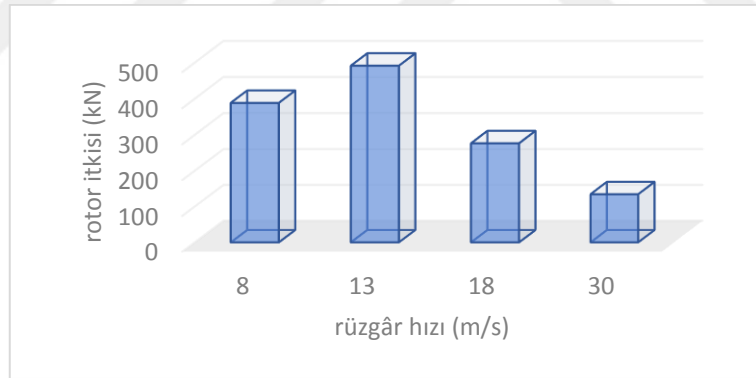
Şekil 101. Sabit rüzgâr hızları altında OC-3 Hywind bağlama sistemleri tepkileri 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)



Grafikler karşılaştırıldığında türbinin aktif olduğu durumdaki hem platform hareket tepkileri hem de bağlantı sistemleri halat tepkileri, türbinin park halindeki durumundan daha fazladır. Bunun nedeni, türbin aktif iken rotor çalışmakta, kanatlar dönmekte ve bir itki meydana gelmektedir Rotor tarafından oluşturulan rotor itkisi (rotor-thrust) rüzgâr hızlarına göre değişimi ve değerleri aşağıda Şekil 101. ve şekil 102. ile gösterilmiştir.



Şekil 102. Sabit rüzgâr hızı altında OC-3 Hywind rotor itkisi



Şekil 103. Sabit rüzgâr hızlarına göre OC-3 Hywind rotor itkisi

Gelen rüzgâr hızına bağlı olarak kanat hatvesi artmaktadır. 30 m/s'lik rüzgâr hızı varken kanat hatvesi 82° ayarlanmıştır. Bu yüzden en yüksek hızda oluşan itki daha düşüktür. 8 m/s ve 13 m/s'lik sabit rüzgâr hızı uygulanırken rotor ilk hızı 6 rpm girilmiştir. Diğer rüzgâr hızlarında ise rotor ilk hızı mevcut değildir. Sabit rüzgâr hızı rotoru belli bir şekilde çevirmektedir ama cut-in değerinden düşük olduğu için elektrik üretimine geçememektedir. Ayrıca enerji üretimi için bir spektruma ihtiyaç vardır.

Bulunan bu sonuçlardan ileri öteleme ve baş-kıç vurma hareketi ile rotor itkisi sonuçları, Wang vd. [207] tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışma ve Duan vd. [210]



tarafından gerçekleştirilen model test deneyi ile karşılaştırılarak sonuçları aşağıda sunulmuştur. Yapılan karşılaştırma 18 m/s'lik rüzgâr hızı için bulunan verileri içermektedir. Model deneyi için Shanghai Jiao Tong Üniversitesi'nde Duan vd. [210] tarafından geliştirilen , 200 m derinlikte çalışmaya uyarlanmış sıkı (taut) bağlı delta bağlama sistemlerine sahip OC-3 konfigürasyonunun 1:50 ölçekli modeli kullanılmıştır

Tablo 26. Sabit 18 m/s rüzgâr altında zamana bağlı sonuçların karşılaştırması

		Uygulama	Wang vd. [207] sayısal	Duan vd. [210] model test
İleri öteleme (m)	Ortalama	2,11	5,05	6,04
	Min.	0,0	4,97	5,44
	Maks.	3,45	5,12	6,72
	Std.	0,43	0,15	1,28
Baş-kıç vurma (der)	Ortalama	0,33	3,44	4,27
	Min.	0,0	3,42	3,82
	Maks.	0,60	3,46	4,74
	Std.	0,05	0,04	0,92
Rotor itkisi (kN)	Ortalama	108	517	657
	Min.	82,87	-	-
	Maks.	112,15	-	-
	Std.	1,85	-	-

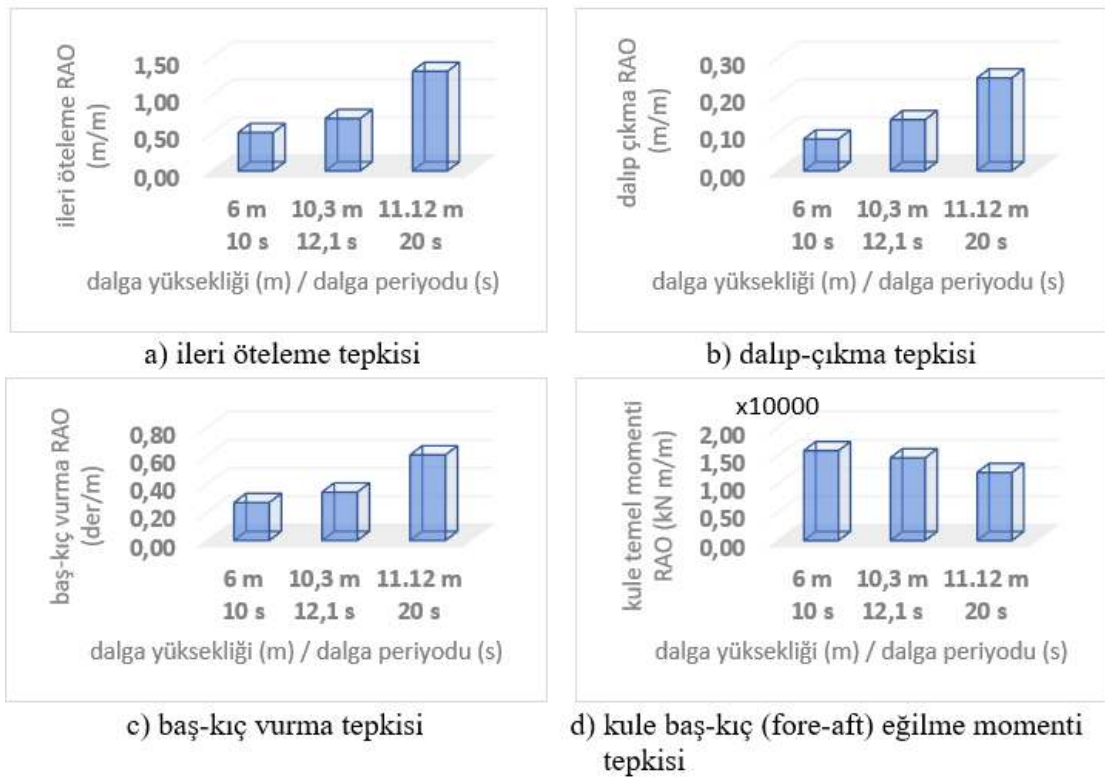
Gerçekleştirilen uygulama ile diğer çalışmalar [207, 210] karşılaştırıldığında, uygulamadaki sonuçların daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. Uygulama 320 m derinlik için gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen diğer çalışmalar [207, 210] ise su derinliği olarak 200 m kullanmıştır. Aradaki farkların bu sebeple ve model ölçeği etkisiyle olduğu düşünülmektedir. Ayrıca uygulamada kullanılan bağlama sistemleri katener bağlı olup, diğer çalışmalar [207, 210]'da ise sıkı (taut) bağlıdır. Yine bu durum aradaki farklarda etkili rol oynamaktadır.

2.9.4.1.6. Düzenli Dalga Altında OC-3 Hywind Konsepti Tepkileri

Bu kısımda rüzgârın olmadığı, düzenli dalga (sinüs dalgası) altındaki hareketler incelenmiştir. Simülasyon zamanı 2600 s seçilmiştir. Kanat hatveleri de 3 kanat için ortak olacak şekilde 82° ayarlanmıştır. İlgili dalgalar için tepki genlik operatörleri (RAO)



karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırılan dalga yükseklikleri 6 m, 10,3 m ve 11,12 m olup, pik periyotları sırasıyla 10 s, 12,1 s ve 20 s olarak belirlenmiştir. Hareketlerden ileri öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri ile kule baş-kıç (fore-aft) momenti karşılaştırmaları gösterilmiştir. Diğer hareketlerden yanal öteleme, yalpa ve savrulma hareketi ile kule bordadan-bordaya (side-side) moment tepki genlikleri ihmal edilecek kadar çok küçük olduğu için 0' a eşit alınmış ve grafiklerde gösterilmemiştir. Zaman tanımlı alanda gerçekleştirilen simülasyon için Fourier dönüşümü kullanılarak frekans tanımlı alandaki tepkiler elde edilmiştir aşağıdaki gibi elde edilmiştir.



Şekil 104. Düzenli dalgalar altında (sinüs dalgası) OC-3 Hywind platform ve kule tepki genlik operatörleri (RAO)

Düzenli dalgalar altında tepkiler incelendiğinde artan her bir dalga yüksekliği için tepkinin de arttığı görülmüştür. Kule momenti incelendiğinde ise bu durumun tersi söz konusu olduğu görülmektedir. Artan dalga yüksekliği ile oluşan kule baş-kıç (fore-aft) eğilme momenti (y- eksen etrafında) azalmaktadır. Kule bordadan-bordaya (side-side) eğilme momenti (x- eksen etrafında) ise ihmal edilecek kadar küçük olup grafikte gösterilmemiştir. Şekil 101.'e bakıldığında baş-kıç vurma hareketi, rüzgâr durumlarına



kıyasla genliklerin daha iyi tahmin edildiği gösterilmektedir. Bulunan kule temel momentleri ise bu baş-kıç vurma tepkileriyle oluşmaktadır.

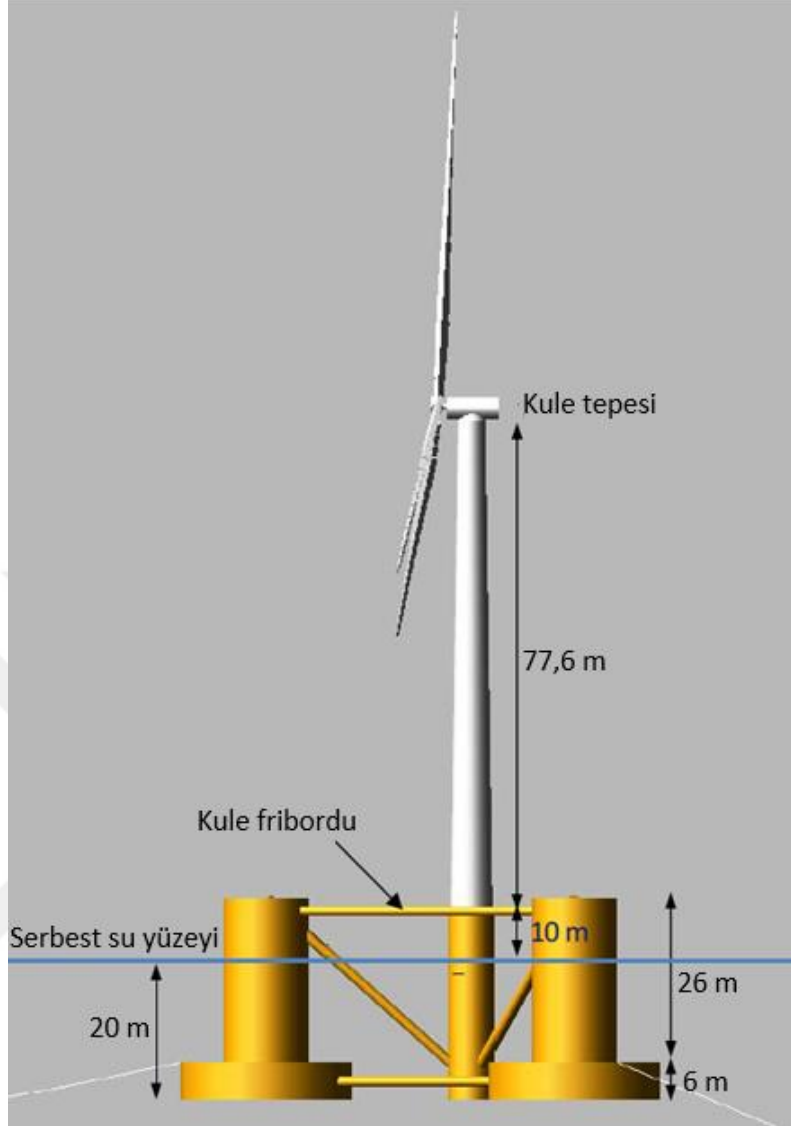
2.9.4.2. OC-4 DeepC Konsepti

OC-3 Offshore Kod Karşılaştırma İşbirliği'nin projesinin bir devamı niteliğinde olan OC-4 projesi 2. fazı yarı-batık (semi sub) tip platformun konseptini tanımlamaktadır. Bu konseptte de OC-3 Hywind konseptinde olduğu gibi Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (NREL) açık deniz 5 MW temel rüzgar türbini [166] özellikleri kullanılmıştır.

OC-4, ABD merkezli bir proje olan DeepCwind projesi için yarı-batık (semi-sub) tasarım kullanılmaktadır. Bu projenin ilk aşamasında, birleşik rüzgâr-dalga yükleri altında bir dalga havuzunda 1:50 ölçeğindeki OC-3 projesindeki safralı tip (SPAR), gergi ayaklı (TLP) ve yarı-batık (semi-sub) içeren 3 farklı yüzer rüzgâr türbini konfigürasyonu test edilmiştir [211]. OC-4 projesinde (tam ölçekte) DeepCwind yarı-batık (semi-sub) tasarımının analiz edilmesi, dalga tankı verileriyle karşılaştırılarak sistemin simüle edilmiş dinamiklerinin doğrulanmasını sağlamaktadır. Ancak OC-4 projesi, çeşitli araçlar arasında simüle edilmiş yanıtların sonuçlarını karşılaştırarak modelleme araçlarının doğrulanmasına odaklanmaktadır [212].

Bu kısımda OC-4 DeepCwind yarı-batık (semi-sub) platform konseptinin validasyonu gerçekleştirilmiştir.





Şekil 105. NREL 5 MW OC-4 DeepCwind yarı-batık (semi-sub) [212].

2.9.4.2.1. OC-4 DeepCwind Kule Özellikleri

OC-4 DeepCwind yarı-batık için kullanılan kule, OC-3 Hywind SPAR konsepti kulesi ile hemen hemen aynıdır. Buradaki tek fark, kulenin esnekliğini temsil etmek için bazı araçlar tarafından kullanılan kule mod şekilleridir. Mod şekilleri, platformdaki ve bağlantı sistemlerindeki değişikliklerden kaynaklanan kule tabanındaki sınır koşullarındaki değişiklik nedeniyle farklılık göstermektedir. Bu kısımda genel özellikleri verilen kule, OC-3 Faz IV [36] için yüzer sistem tanım belgesinde verilen bilgilerle aynıdır.

Kulenin tabanı platformun en üst noktasına denk gelerek, sakin su seviyesinden (SWL) 10 m yükseklikte bulunmaktadır. Kulenin tepesi, yalpalama yatağı ile çakışmaktadır ve sakin



su seviyesinden 87,6 m yukarıda bulunmaktadır. Burada göbek kuleye eklendiğinde sakin su seviyesinden itibaren oluşan 90 m göbek yüksekliği NREL 5 MW temel rüzgar türbini ile [166] uygun hale gelmektedir. Tüm bu özellikler platformun yer değiştirmemiş durumdaki konumuyla ilgilidir.

OC-4 DeepCwind yarı-batık tip platform üzerinde kurulu olan NREL 5 MW referans türbini için ise baktığımızda, dağıtım kule, platformun üst kısmının çapına uyacak şekilde 6,5 m taban çapına sahip olacak şekilde kurulmuştur. Et kalınlığı 0,027 m, tepe yarıçapı ise 3,87 m ve et kalınlığı 0,019 m olacak şekilde kule tasarlanmıştır [36]. Kulenin efektif çelik yapı özellikleri ise gerçekleştirilen [192] çalışmasında olduğu gibi Young modülü $E = 210$ GPa, kesme modülü $G = 80,8$ GPa ve çeliğin efektif yoğunluğu $\rho_{ef} = 8.500$ kg/m³ olarak alınmıştır. Bu değer ile çeliğin normal yoğunluğu olan $\rho = 7.850$ kg/m³ arasındaki fark, kule kalınlık verilerinde hesaba katılmayan boya, cıvata, kaynak ve flanşların hesaba katılmasından kaynaklanmaktadır. OC-4 DeepCwind yarı-batık (semi-sub) tip platform konsepti için kurulan kulenin genel özellikleri ise Tablo 27.'de verilmiştir.

Tablo 27. OC-4 DeepCwind kule özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Platform fribordu (serbest yüzeyden kule tabanına yükseklik)	m	10
Serbest su yüzeyinden kule tepesine olan yükseklik	m	87,6
Kulenin toplam kütlesi	kg	249.718
Kule kütle merkezi konumu (kule merkez hattı boyunca zeminden yüksekliği)	m	43,4
Yapısal sönümleme		%1



2.9.4.2.2. OC-4 DeepCwind Platform ve Bağlama Sistemleri Tasarım Parametreleri

Bu kısımda OC-4 DeepCwind yarı-batık platform konsepti için tasarım parametreleri verilmiştir.

Yüzer platform yapısının detayları Şekil 105. ve Şekil 106.'da verilmiştir (elemanların kısaltmalarının açıklaması Tablo 29.'da verilmiştir). Platformun su çekimi 20 m'dir. Kule, yüzer platformun ana kolonunun (MC) tepesine SWL'nin 10 m yukarısında dirsekli bir şekildedir. Platformun üstü ve altı arasında, OC-4 DeepCwind yarı-batık platform, kuleye bağlı bir ana kolondan ve ana kolona bir dizi daha küçük çaplı duba ve traverslerle bağlanan üç ofset (destek) kolondan oluşmaktadır. Bu küçük üyelerin 5 seti bulunmaktadır (Şekil 105.'deki siyah üyeler):

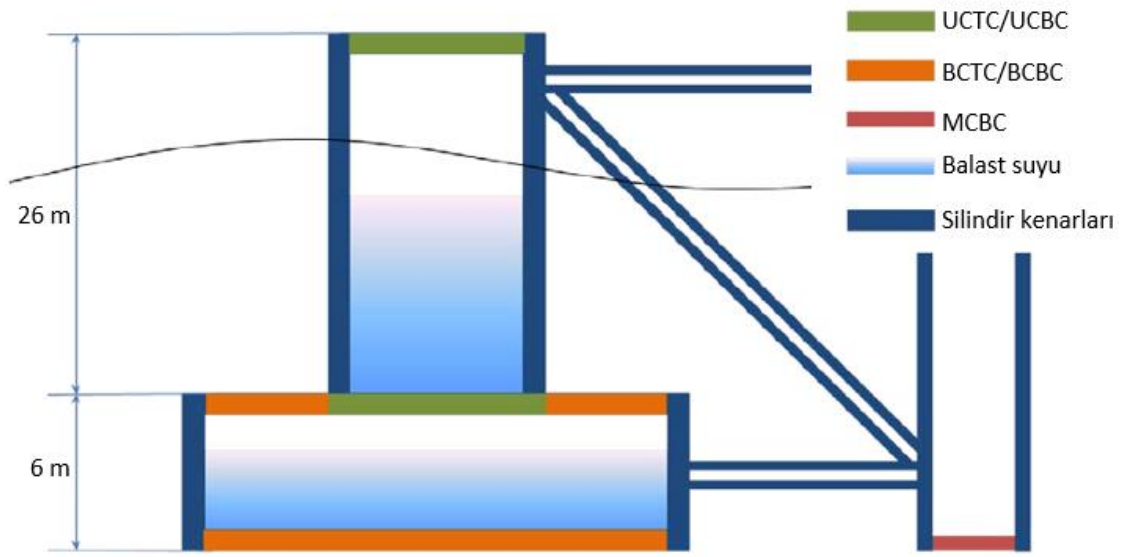
- Ofset kolonları birbirine bağlayan 3 dubadan oluşan 2 set (toplam 6 eleman için), yarı-batık platformun tepesinde (DU 1-3) ve altında (DL 1-3) bir üçgen (veya delta) oluşturmaktadır.
- Ofset kolonları ana kolona bağlayan 3 dubadan oluşan 5 set (toplam 6 eleman için), yarı-batık platformun üstünde (YU 1-3) ve altında (YL 1-3) bir y-bağlantısı oluşturmaktadır.
- Ana kolonun altını ofset kolonlarının üst kısmına bağlayan 3 çapraz destek elemanı.



Şekil 106. OC-4 DeepCwind yarı-batık platformu 1:50 test ölçeği modeli [212].



Her ofset sütunu (UC 1-3), serbest su yüzeyinin (SWL) üzerinde başlamakta ve suyun altında devam etmektedir. 3 ofset sütunun tabanında, hareketi (özellikle dalıp-çıkma, aynı zamanda ileri öteleme, yanal öteleme, yalpa ve baş-kıç vurma hareketleri) bastırmaya yardımcı olan daha büyük çaplı bir silindir veya taban sütunu (BC 1-3) bulunmaktadır [212]. Her bir elemanın çapı da dahil olmak üzere geometrinin bir özeti Tablo 28. ve Tablo 29.'da verilmiştir. Bu özelliklerin tümü, platformun yer değiştirmemiş konumuyla ilgilidir. Kapakların duvarları ve sınırları Şekil 107.'da gösterilmiştir.



Şekil 107. OC-4 DeepCwind platform kenarlarının yan görünümü [212].

Tablo 28. OC-4 DeepCwind Platform ana özellikleri [212].

Genel bilgiler	Birim	Değer
Türbin gücü	MW	5
Su derinliği	m	320
Rotor kütlesi	kg	110.000
Rotor çapı	m	126
Göbek kütlesi	kg	56.780
Kanat kütlesi	kg	17.740
Nasel kütlesi	kg	240.000



Tablo 28.'in devamı

Platform toplam su çekimi	m	20
Ana kolonun (kule tabanı) serbest su yüzeyin üzerinde yüksekliği	m	10
Serbest su yüzeyi üzerinde ofset kolonlarının yüksekliği	m	12
Ofset kolonları arası mesafe	m	50
Ofset kolonların uzunluğu	m	26
Ana kolon uzunluğu	m	6
Serbest su yüzeyi altındaki taban kolonlarının üst kısmına kadar olan derinlik	m	14
Ana kolon çapı	m	6,5
Ofset kolonlarının (üst kolonların) çapı	m	12
Temel kolon çapı	m	24
Destek elemanları ve dubaları çapı	m	1,6
Platform kütlesi (balast dahil)	kg	13.473.000
Kütle merkezi (CM) konumu, serbest yüzeyin altından	m	13,46
Platform yalpa ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	6.827.000.000
Platform baş-kıç vurma ataleti	kg x m ²	6.827.000.000
Platform savrulma ataleti (platform merkez hattı etrafında)	kg x m ²	12.260.000.000



Tablo 29. Elemanların geometrik özellikleri [212].

Kolon adı	Adlandırma	Başlangıç noktası (X; Y; Z)	Bitiş noktası (X; Y; Z)	Uzunluk (m)	Et kalınlığı (m)
Ana kolon	MC	(0; 0; -20)	(0; 0; 10)	30	0,03
Ofset kolon 1	UC1	(14,43; 25; -14)	(14,43; 25; 12)	26	0,06
Ofset kolon 2	UC2	(-28,87; 0; -14)	(-28,87; 0; 12)	26	0,06
Ofset kolon 3	UC3	(14,43; -25; -14)	(14,43; -25; 12)	26	0,06
Temel kolon 1	BC1	(14,43; 25; -20)	(14,43; 25; -14)	6	0,06
Temel kolon 2	BC2	(-28,87; 0; -20)	(-28,87; 0; -14)	6	0,06
Temel kolon 3	BC3	(14,43; -25; -20)	(14,43; -25; -14)	6	0,06
Üst delta duba 1	DU1	(9,20; 22; 10)	(-23,67; 3; 10)	38	0,0175
Üst delta duba 2	DU2	(-23,67; -3; 10)	(9,20; -22; 10)	38	0,0175
Üst delta duba 3	DU3	(14,43; -19; 10)	(14,43; 19; 10)	38	0,0175
Alt delta duba 1	DL1	(4; 19; -17)	(-18,47; 6; -17)	26	0,0175
Alt delta duba 2	DL2	(-18,47; -6; -17)	(4; -19; -17)	26	0,0175
Alt delta duba 3	DL3	(14,43; -13; -17)	(14,43; 13; -17)	26	0,0175
Üst Y duba 1	YU1	(1,625; 2,815; 10)	(11,43; 19,81; 10)	19,62	0,0175
Üst Y duba 2	YU2	(-3,25; 0; 10)	(-22,87; 0; 10)	19,62	0,0175
Üst Y duba 3	YU3	(1,625; -2,815; 10)	(11,43; -19,81; 10)	19,62	0,0175
Alt Y duba 1	YL1	(1,625; 2,815; -17)	(8,4; 14,6; -17)	13,62	0,0175
Alt Y duba 2	YL2	(-3,25; 0; -17)	(-16,87; 0; -17)	13,62	0,0175



Tablo 29.'un devamı

Alt Y duba 3	YL3	(1,625; -2,815; -17)	(8,4; -14,6; -17)	13,62	0,0175
Çapraz destek 1	CB1	(1,625; 2,815; -16,2)	(11,43; 19,81; 9,13)	32,04	0,0175
Çapraz destek 2	CB2	(-3,25; 0; -16,2)	(-22,87; 0; 9,13)	32,04	0,0175
Çapraz destek 3	CB3	(1,625; -2,815; -16,2)	(11,43; -19,81; 9,13)	32,04	0,0175
Ofset kolon üst kapak	UCTC				0,06
Ofset kolon alt kapak	UCBC				0,06
Temel kolon üst kapak	BCTC				0,06
Temel kolon alt kapak	BCBC				0,06
Ana kolon alt kapak	MCBC				0,03

Platformu emniyetli bir şekilde sabitlemek için, OC-4 DeepCwind yarı-batık, platformu Z eksenini etrafında simetrik olarak yayılmış üç katener bağlantı hattı ile demirlenmiştir. Deniz tabanındaki bağlama düzeni Şekil 108.'de gösterilmiş, bağlama sistemi özellikleri ise Tablo 30.'da listelenmiştir [212].

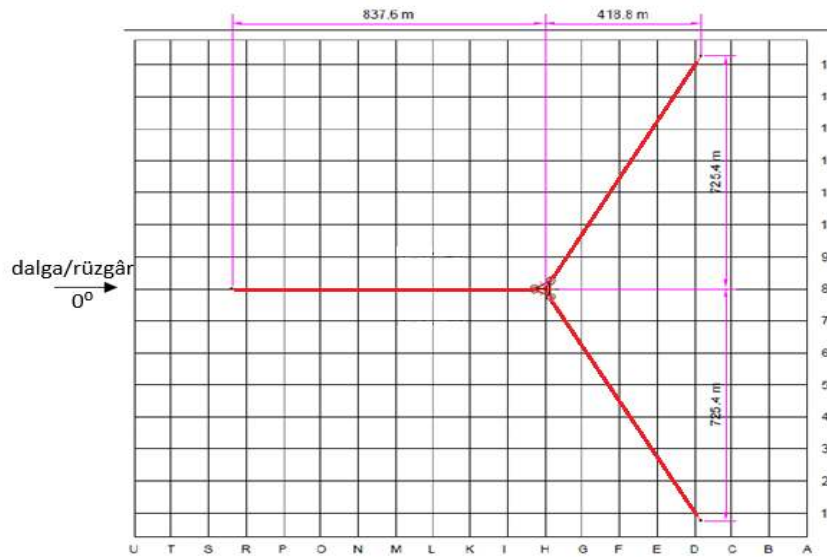
Tablo 30. OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri genel özellikleri [212].

Genel bilgiler	Birim	Değer
Su derinliği	m	200
Halat sayısı		3
Halatlar arası aç	der.	120
Serbest su yüzeyi altından halat bağlantı noktası derinliği (platform üzerinde)	m	14



Tablo 30.'un devamı

Platform merkez hattından çapa noktalarına olan yarıçap uzunluğu (deniz tabanında)	m	837,6
Platform merkez hattından bağlantı noktalarına olan yarıçap uzunluğu (platform üzerinde)	m	40,868
Her bir bağlama halatı toplam uzunluğu (gerilmemiş halde)	m	835,5
Bağlama halatı çapı	m	0,0766
Eşdeğer halat kütle yoğunluğu	kg/m	113,35
Eşdeğer halat kütlesi (su içerisinde)	kg/m	108,63
Eş değer uzama sertliği (AE)	MN	753,6
Bağlama halatları için hidrodinamik sürüklenme katsayısı	-	1,1
Bağlama halatları için hidrodinamik ek su kütlesi katsayısı	-	1,0
Bağlama halatları için deniz tabanı sürüklenme katsayısı	-	1,0
Demirleme halatları yapısal sönümlemesi	%	2,0



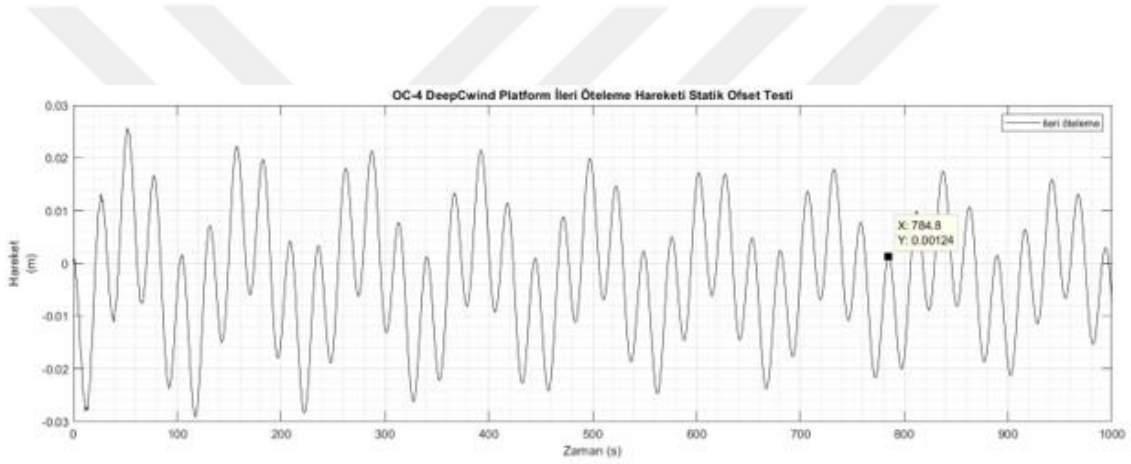
Şekil 108. OC-4 DeepCwind deniz tabanı demirleme düzeni [212].



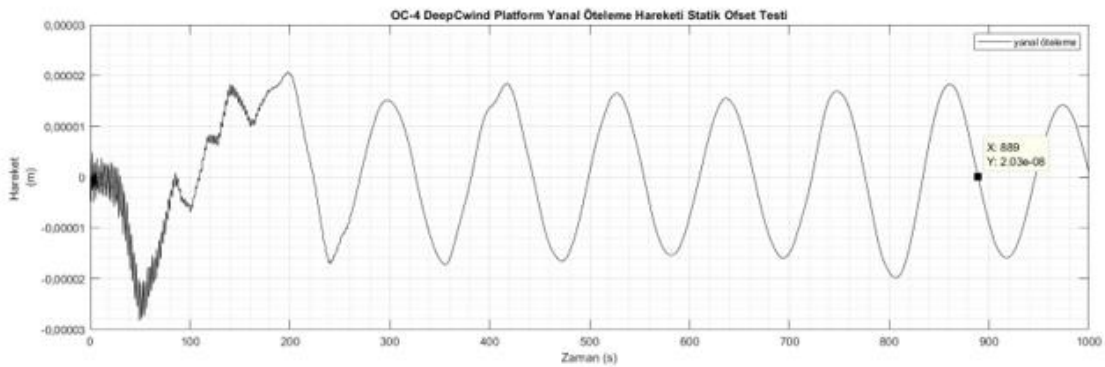
2.9.4.2.3. OC-4 DeepCwind Statik Ofset Testi

Bu kısımda statik ofset testi gerçekleştirilerek OC-4 DeepCwind platformu için başlangıç koşulları belirlenmiştir. Test sonucuna göre bulunan başlangıç koşulları ile platformun çevresel yükler altında zaman tanımlı alanda analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bakımdan statik ofset testi önemlidir.

Testin gerçekleştirilmesi için gerekli olan giriş dosyaları (ELASSTODYN, HYDRODYN, AERODYN) hazırlığı ve ilgili yazılımın çalıştırılması (OPENFAST) daha önceki kısımda (OC-3 Hywind Statik Ofset Testi) anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

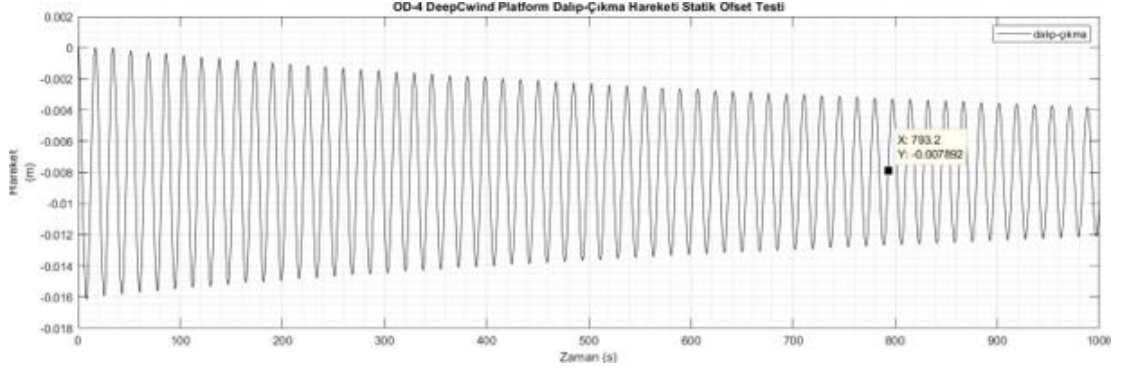


Şekil 109. OC-4 DeepCwind platform ileri öteleme hareketi statik ofset testi

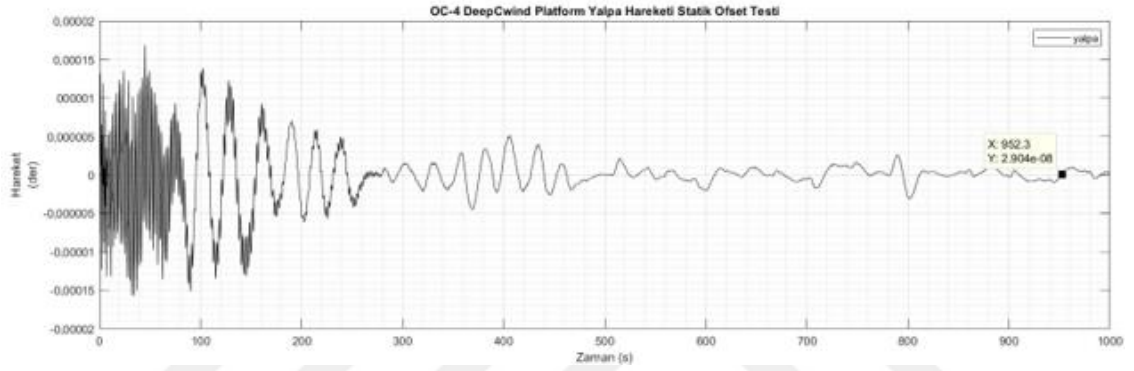


Şekil 110. OC-4 DeepCwind platform yanal öteleme hareketi statik ofset testi

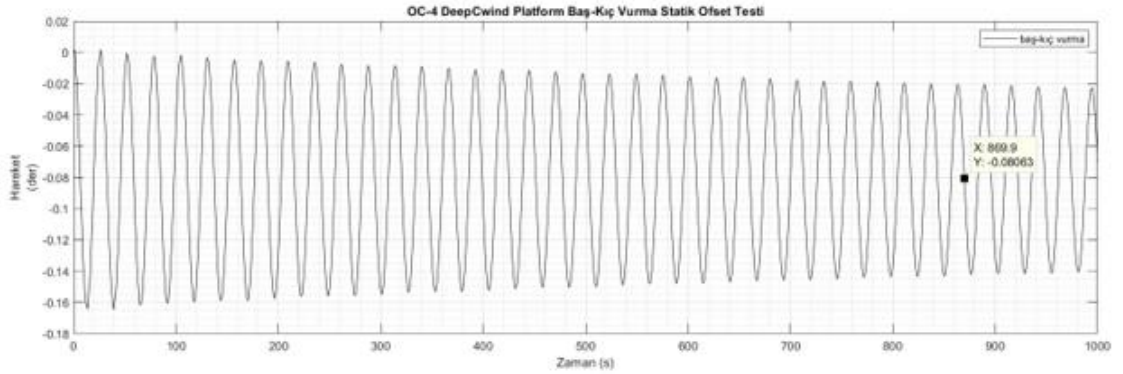




Şekil 111. OC-4 DeepCwind platform dalıp-çıkma hareketi statik ofset testi

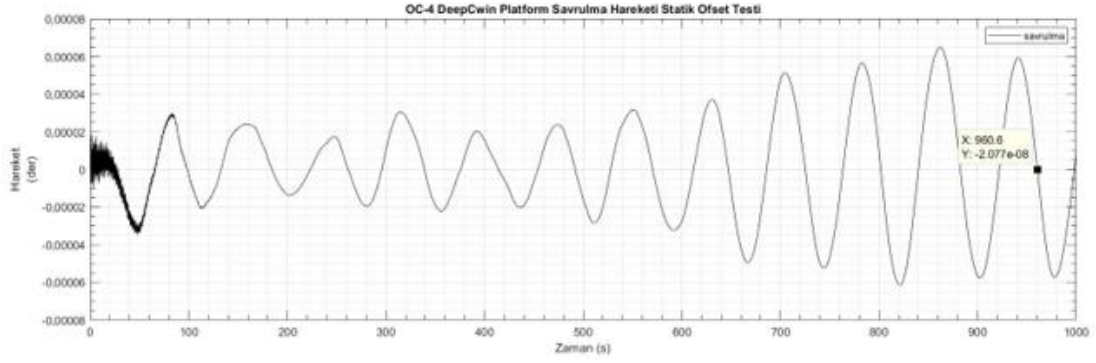


Şekil 112. OC-4 DeepCwind platform yalpa hareketi statik ofset testi



Şekil 113. OC-4 DeepCwind platform baş-kıç vurma hareketi statik ofset testi

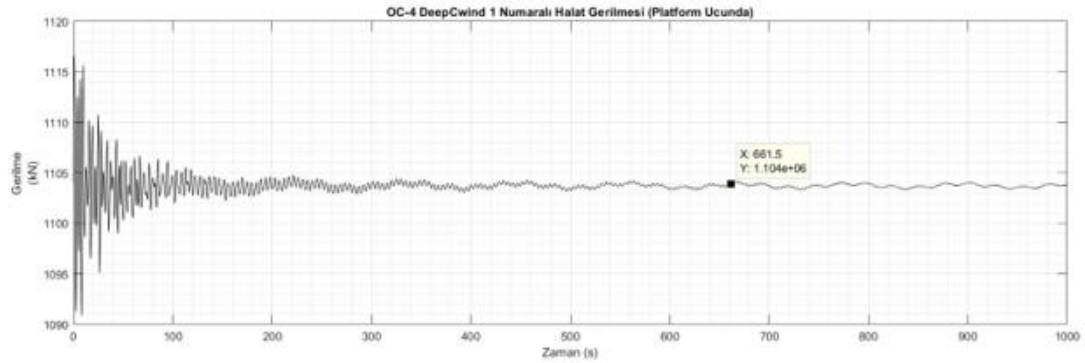




Şekil 114. OC-4 DeepCwind platform savrulma hareketi statik ofset testi

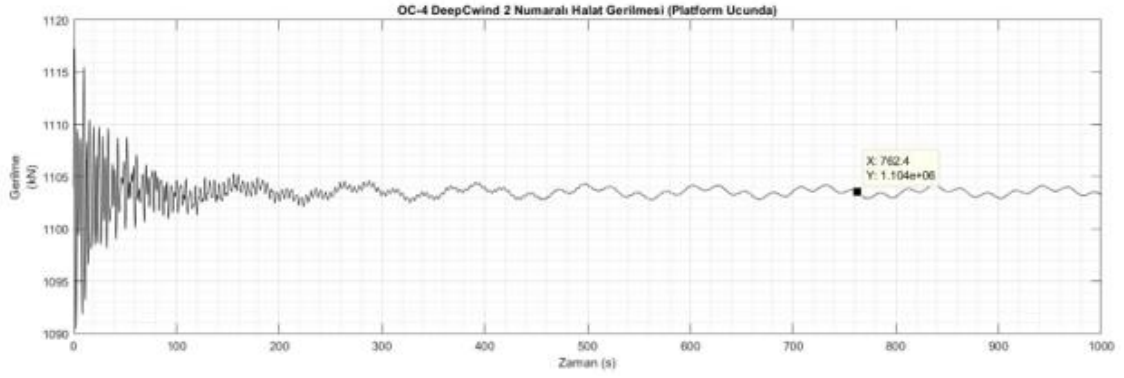
Platform hareketlerinde gözlemlenen bu genliklerin, OC-3 Hywind platformuna göre daha fazla olmasının sebebi, OC-4 DeepCwind platform konseptinin tek bir gövdeden değil, birden çok gövde, duba ve destek /elemanından oluşmasından kaynaklanmaktadır. Destek elemanları ve dubalarının hareket üzerindeki etkileri sonraki bölümde, OC-4 DeepCwind serbest sönümlleme testi kısmında karşılaştırmalı olarak gösterilecektir.

Bağlama sistemlerindeki gerilme değerleri de aynı şekilde statik ofset testi ile belirlenmiştir.

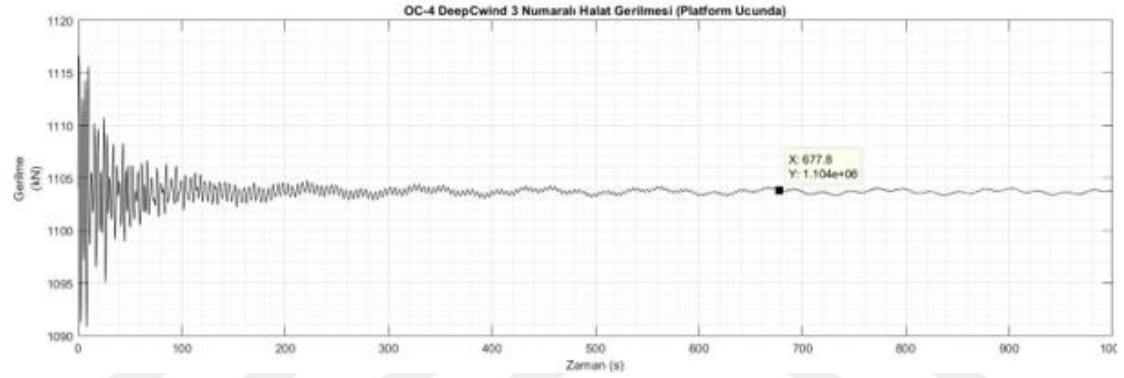


Şekil 115. OC-4 DeepCwind 1 numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

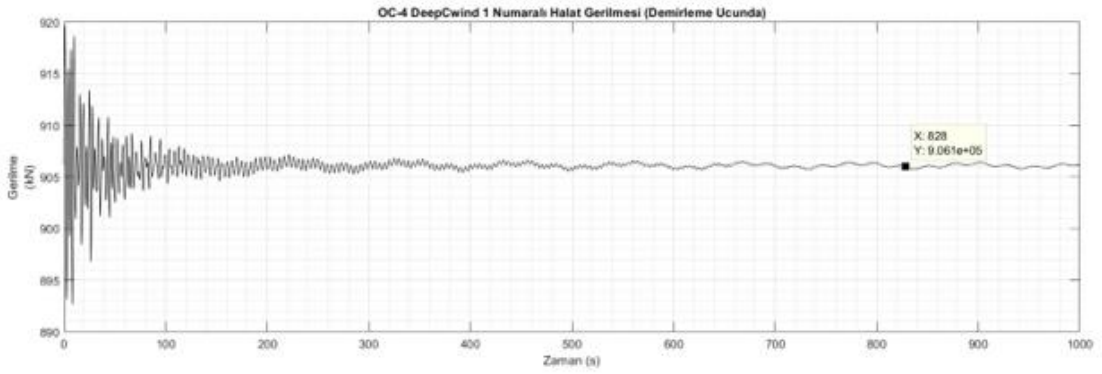




Şekil 116. OC-4 DeepCwind 2 numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

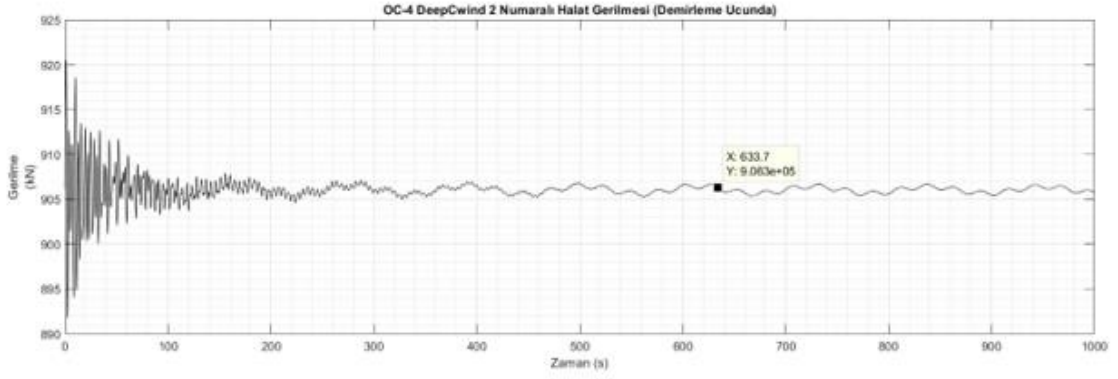


Şekil 117. OC-4 DeepCwind 3 numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

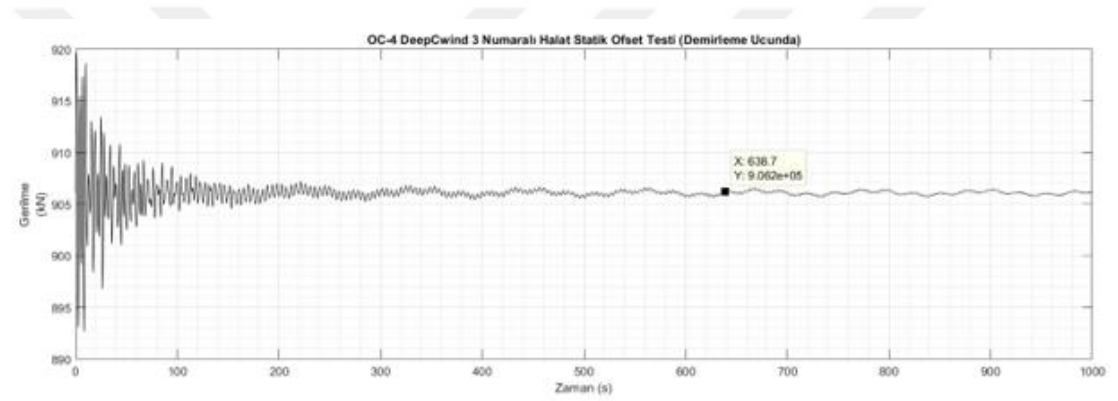


Şekil 118. OC-4 DeepCwind 1 numaralı halat gerilmesi statik ofset testi (demirleme ucunda)





Şekil 119. OC-4 DeepCwind 2 numaralı halat gerilmesi statik ofset testi (demirleme ucunda)



Şekil 120. OC-4 DeepCwind 3 numaralı halat gerilmesi statik ofset testi (demirleme ucunda)

Elde edilen platform başlangıç koşulları ve bağlama sistemleri gerilmeleri aşağıda tablolarda verilmiştir.

Tablo 31. OC-4 DeepCwind platform 6 serbestlik dereceli hareketi başlangıç koşulları

	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp-çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
Başlangıç koşulları	0,0012 m	0 m	-0,008 m	0°	-0,081°	0°

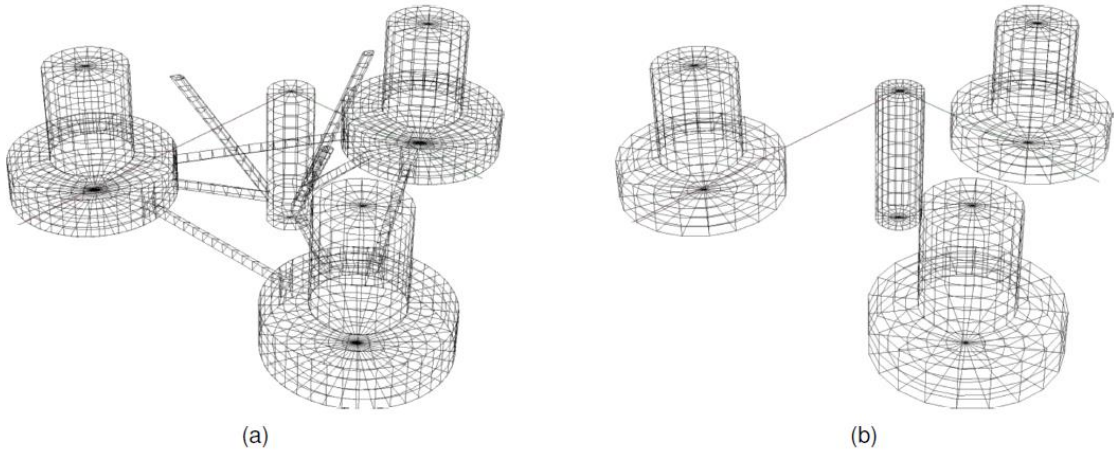


Tablo 32. OC-4 halat gerilmeleri

Halat numarası	Halat gerilmeleri (kN)	
	Platform ucu	Demirleme ucu
Halat-1	1104	906,1
Halat-2	1104	906,3
Halat-3	1104	906,2

2.9.4.2.4. OC-4 DeepCwind Serbest Sönümlleme Testi

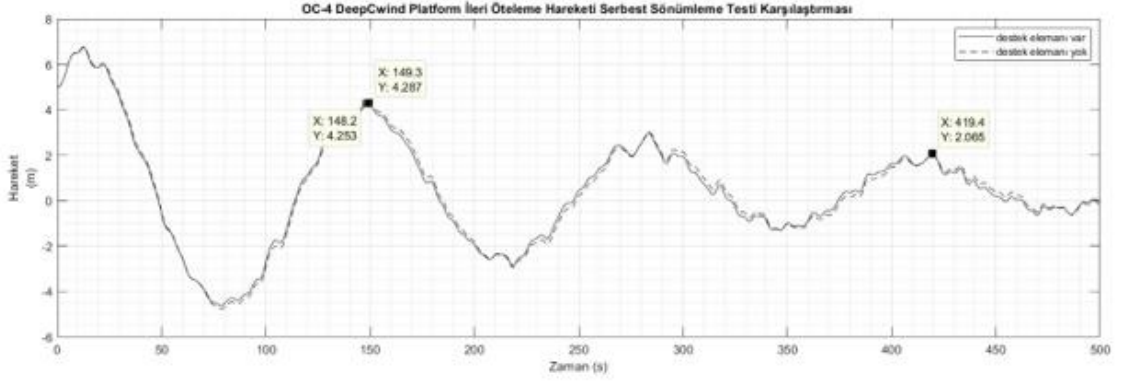
Bu test ile doğal frekanslar belirlenerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca destek elemanlarının doğal frekanslar üzerindeki etkileri de burada incelenmiştir. Bunun için hem destek elemanlı hem de destek elemansız bir şekilde simülasyon gerçekleştirilmiş, sonuçlar sunulmuştur.



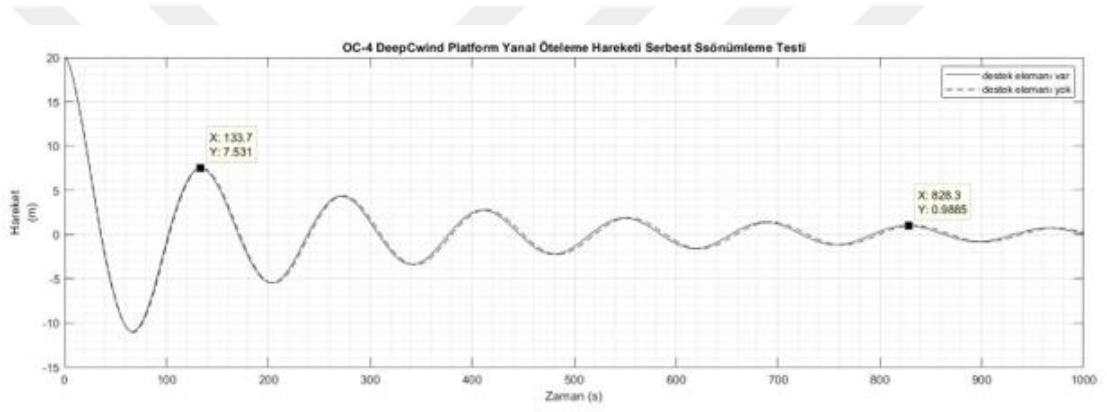
Şekil 121. OC-4 DeepCwind platform su altı kısmı destekli(a) ve desteksiz (b) [6].

Test için statik ofset testinde olduğu gibi NREL tarafından geliştirilen FAST yazılımının 8. Sürümü olan OPENFAST kullanılmıştır. Serbest sönümlleme testi, doğal frekansları belirlemek için dış kuvvetler olmadan (gelen dalga ve rüzgâr yok) belirli başlangıç değerleri ile hareketin başlamasına izin verilerek simüle edilerek gerçekleştirilmektedir. Sonuçlar, platformun 6 serbestlik dereceli hareketleri (ileri öteleme, yanal öteleme, dalıp-çıkma, yalpa, baş-kıç vurma, savrulma) için verilmiştir. Burada kule, kanatlar ve jeneratör rijit kabul edilerek birlikte hareket etmektedir. Platform ve bağlantı sistemleri için 6 serbestlik dereceli harekete izin verilmiştir. Sonuçlar Tablo 34. ve Tablo 35.' de verilmiştir.

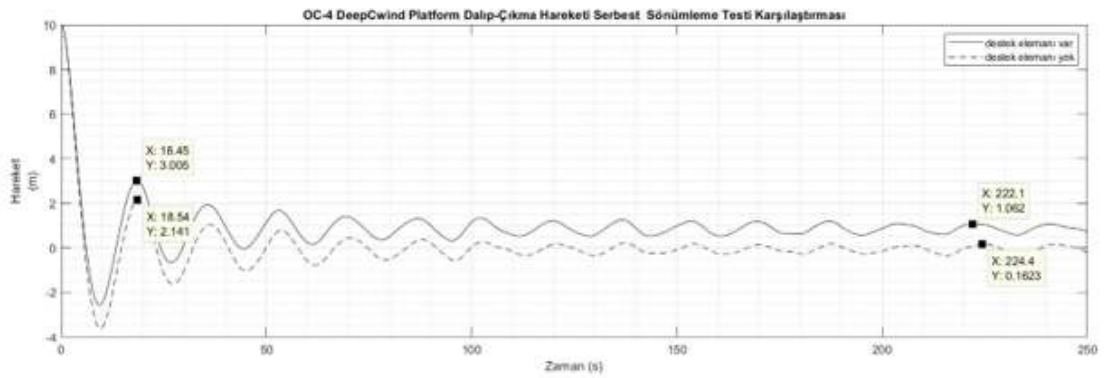




Şekil 122. OC-4 DeepCwind platform ileri öteleme hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması

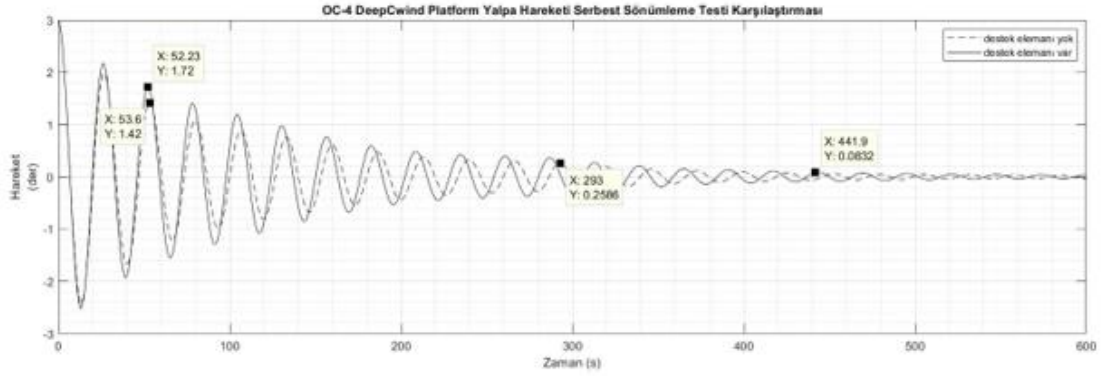


Şekil 123. OC-4 DeepCwind platform yanal öteleme hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması

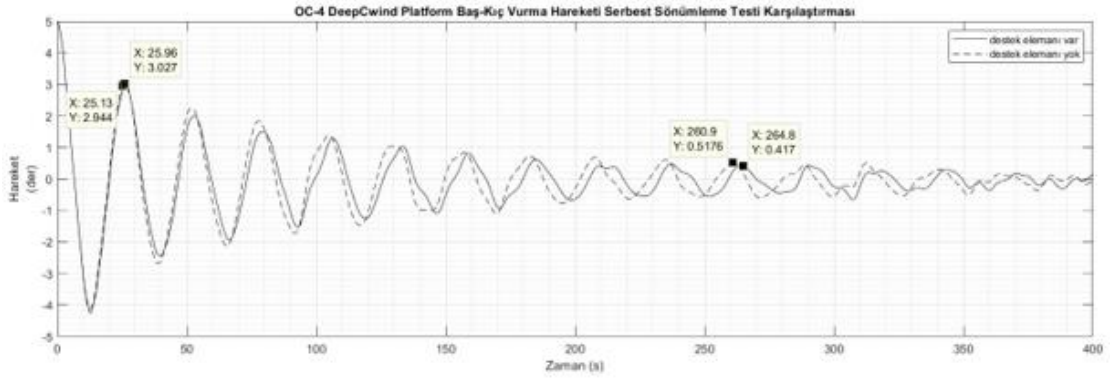


Şekil 124. OC-4 DeepCwind platform dalıp-çıkma hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması

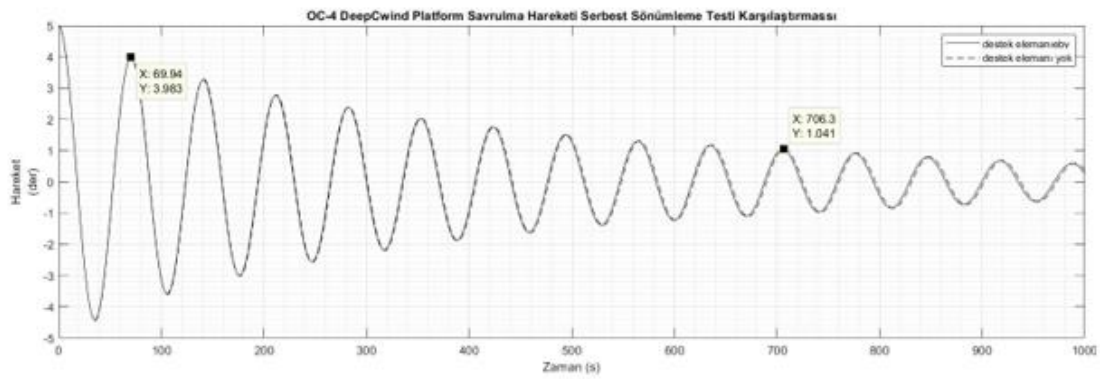




Şekil 125. OC-4 DeepCwind platform yalpa hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması



Şekil 126. OC-4 DeepCwind platform baş-kıç vurma hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması



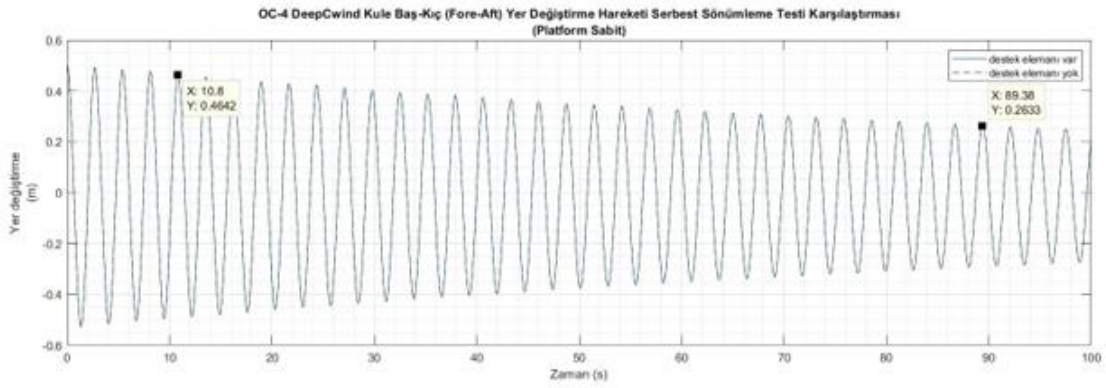
Şekil 127. OC-4 DeepCwind platform savrulma hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması

Platform hareketlerinin serbest sönümlenme testleri gerçekleştirildiği gibi, aynı şekilde kule için de serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Burada ilk önce platform

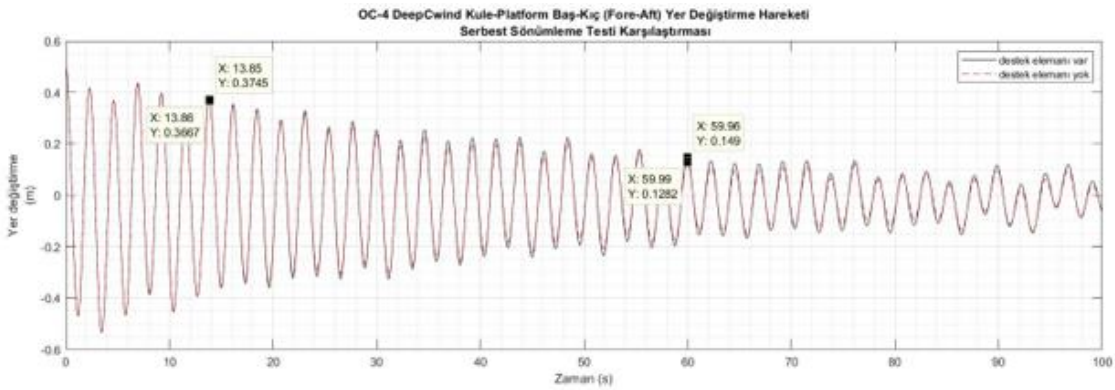


hareketleri kısıtlanarak platform sabit hale getirilmiş şekilde, kulenin platformdan bağımsız olarak hareket ettiği kabul edilmiş ve serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kule ve platform beraber hareket edecek şekilde platformun hareketleri kısıtlanmadan serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Böylece yalnız kulenin ve kule platform birlikte iken doğal frekansları (ω_n) karşılaştırılmıştır.

Kulenin hareketleri, x- eksenı yönünde baş-kıç yer değıştirme hareketi (fore-aft) ve y- ekseninde ise bordadan-bordaya yer değıştirme (side-side) olacak şekilde adlandırılmıştır

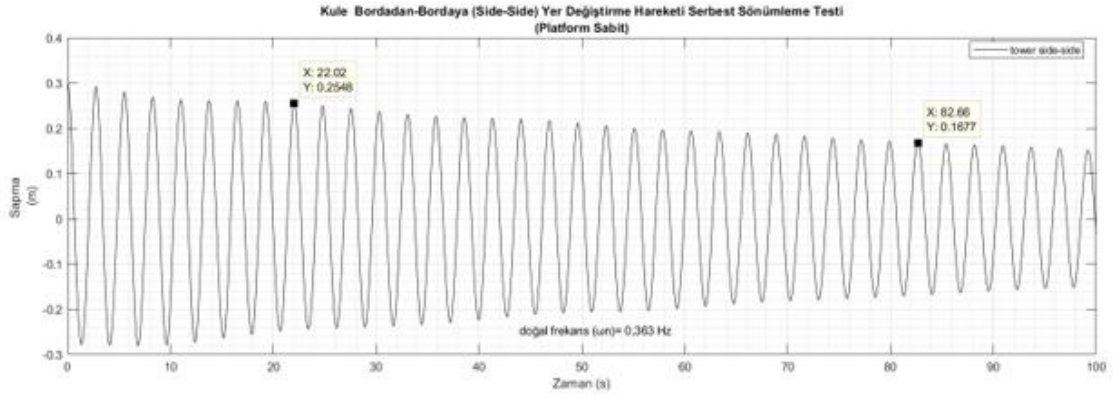


Şekil 128. OC-4 DeepCwind kule baş-kıç (fore-aft) yer değıştirme hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması

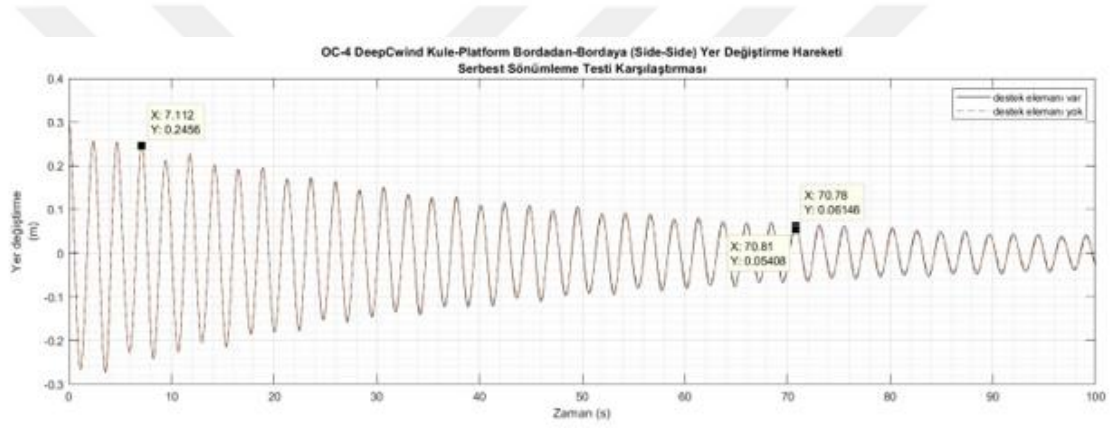


Şekil 129. OC-4 DeepCwind kule-platform baş-kıç (fore-aft) yer değıştirme hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması





Şekil 130. OC-4 DeepCwind kule bordadan-bordaya (side-side) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması



Şekil 131. OC-4 DeepCwind kule-platform bordadan-bordaya (side-side) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi karşılaştırması

Doğal frekans sonuçları tabloda aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

Tablo 33. OC-4 DeepCwind platform doğal frekansları karşılaştırmalı

Özellik	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp-çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
Doğal periyot (s)						
- destek elemanı var	135,05	138,92	17,16	25,98	26,10	70,71
- destek elemanı yok	135,6	138,92	16,97	26,15	26,63	70,71
Doğal frekans (Hz)						
- destek elemanı var	0,0074	0,0072	0,0583	0,0385	0,0383	0,0141
- destek elemanı yok	0,0074	0,0072	0,0589	0,0382	0,0376	0,0141
Doğal açısal frekans (rad/s)						
- destek elemanı var	0,0465	0,0452	0,3662	0,2418	0,2407	0,8889
- destek elemanı yok	0,0463	0,0452	0,3703	0,2403	0,2359	0,8889
Sönüm oranı						
- destek elemanı var	0,082	0,058	0,033	0,023	0,041	0,041
- destek elemanı yok	0,082	0,058	0,033	0,030	0,042	0,041



Tablo 34. OC-4 DeepCwind kule doğal frekansları

Özellik	Kule f-a	Kule s-s	Kule+platform f-a	Kule+platform s-s
Doğal periyot (s)				
- destek elemanı var	2,71	2,76	2,31	2,36
- destek elemanı yok	2,71	2,76	2,31	2,36
Doğal frekans (Hz)				
- destek elemanı var	0,369	0,362	0,433	0,424
- destek elemanı yok	0,369	0,362	0,433	0,424
Doğal açısal frekans (rad/s)				
- destek elemanı var	2,319	2,277	2,720	2,662
- destek elemanı yok	2,319	2,277	2,720	2,662
Sönüm oranı				
- destek elemanı var	0,012	0,010	0,012	0,014
- destek elemanı yok	0,012	0,010	0,012	0,014

Tablo 33. incelendiğinde destek elemanlarının etkisinin az da olsa özellikle platform dalıp-çıkma, yalpa ve baş-kıç vurma hareketleri üzerine olduğu görülmektedir. Çapraz destek elemanlarının kullanımı bu hareketlerden dalıp-çıkma salınım periyodunu artırırken, yalpa ve baş-kıç vurma periyotlarını azaltıcı rol oynamıştır. Kule hareketleri incelendiğinde ise platformdaki herhangi bir destekleyici elemanın kule hareketi üzerinde etkisi olmadığı Tablo 34.'de görülmektedir.

Aşağıda, bulunan bu sonuçların Kim vd. [213] tarafından gerçekleştirilen CHARM3D&FAST sayısal analizi ve Technip/NREL/UMaine tarafından gerçekleştirilen 1:50 ölçekli model test deneyi ile karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 35. OC-4 DeepCwind platform doğal frekansları (rad/s) uygulama ile deneysel verileri karşılaştırması

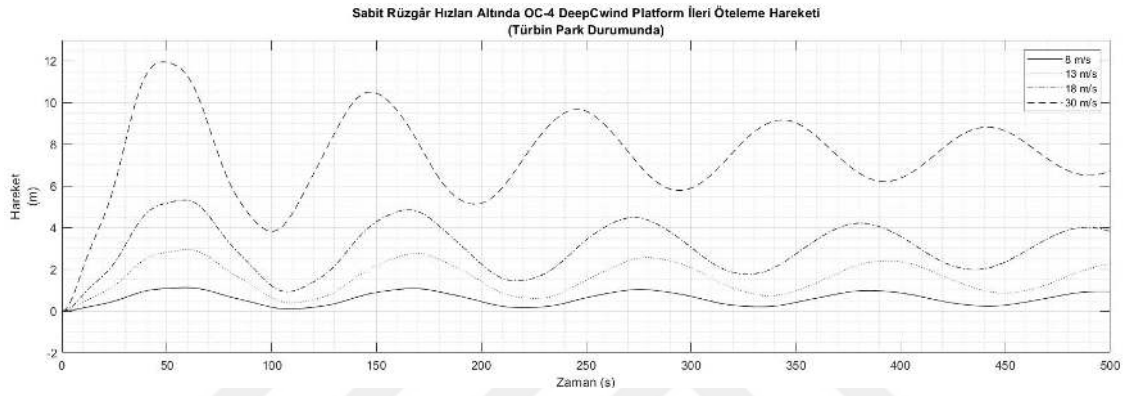
Çalışmalar	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp-çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
Uygulama	0,0465	0,0452	0,3662	0,2418	0,2407	0,8889
Kim vd. sayısal [213]	0,0556	-	0,3605	-	0,2381	-
NREL model test [213]	0,0555	-	0,3641	-	0,2277	-

Sonuçlar incelendiğinde tutarlı bir şekilde analizlerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Aradaki küçük farklar, model ölçekli kaynaklanan hatalardan dolayı meydana gelmektedir. Böylece OC-4 DeepCwind konsepti validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

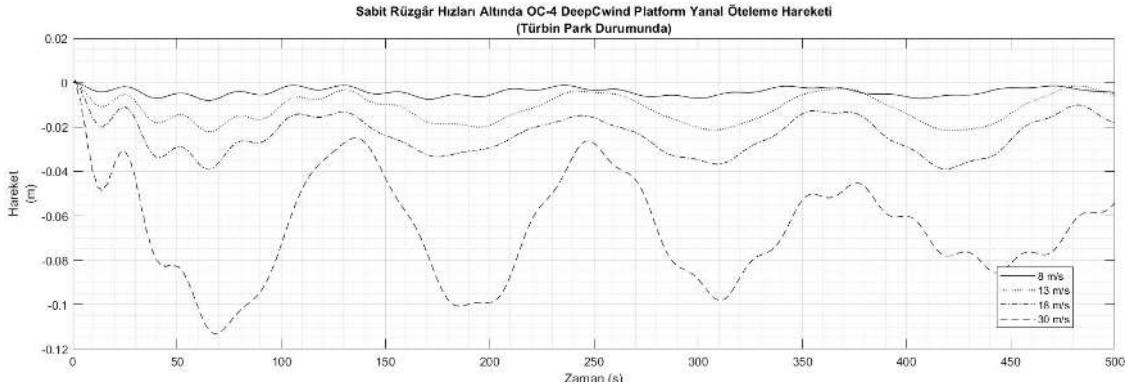


2.9.4.2.5. Sabit Rüzgâr Altında OC-4 DeepCwind Konsepti Tepkileri

OC-4 DeepCwind konsepti sabit rüzgâr altında zaman tanımlı alanda gerçekleştirilen simülasyon çalışması için OC-3 Hywind konseptinde olduğu gibi 8 m/s, 13 m/s, 18 m/s ve 30 m/s'lik sabit rüzgâr hızları seçilmiştir. Simülasyon 1000 s için gerçekleştirilmiş olup grafiklerde hareketler azalarak salınımlar ihmal edilecek kadar küçüldüğü zaman adımından sonrası gösterilmemiştir.

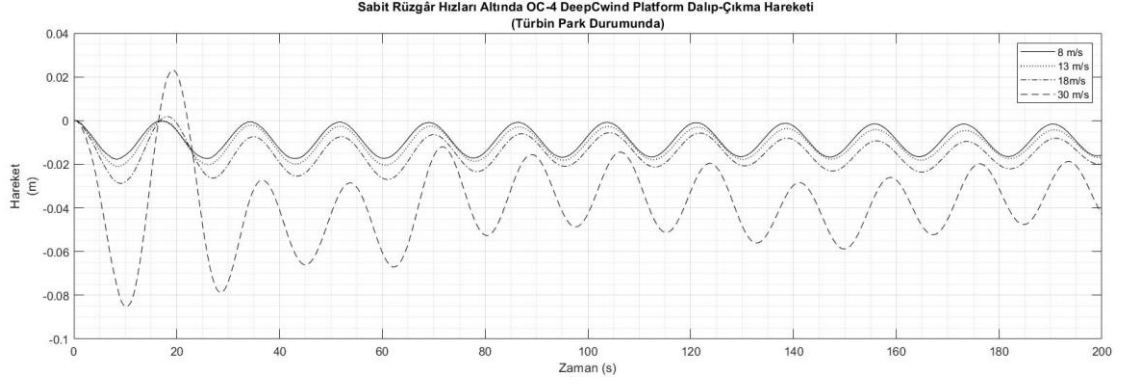


Şekil 132. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ileri öteleme hareketi (türbin park durumunda)

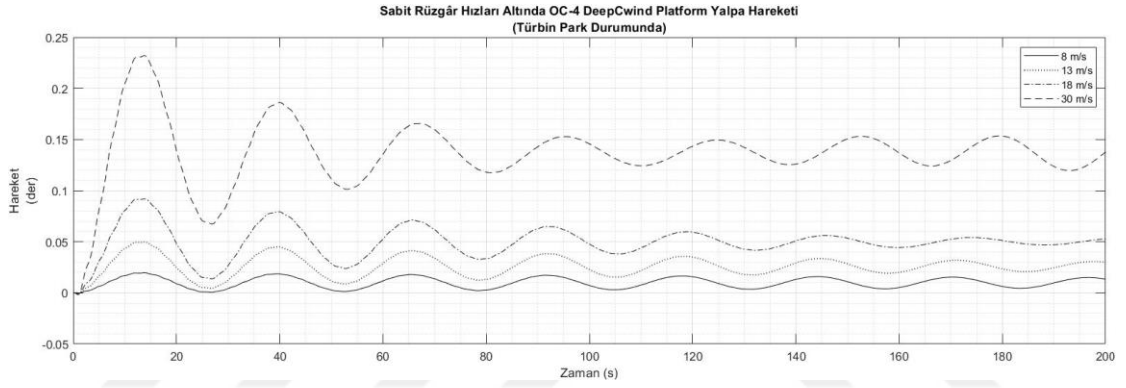


Şekil 133. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform yanıl öteleme hareketi (türbin park durumunda)

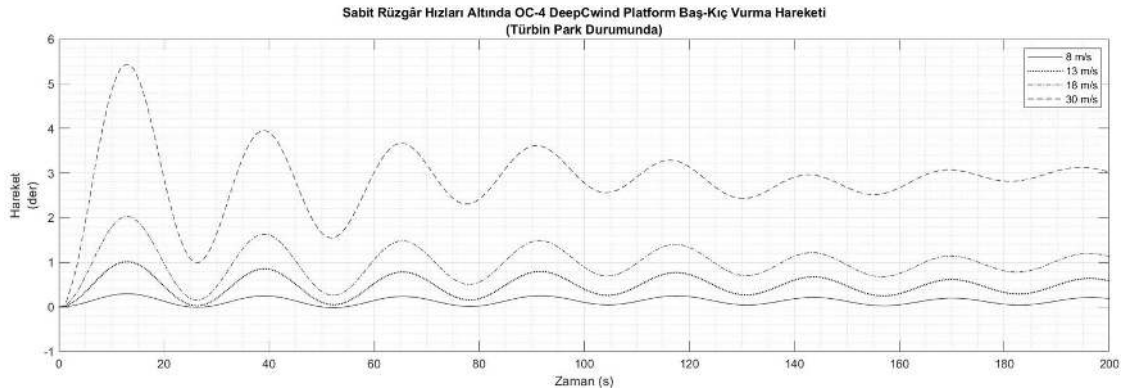




Şekil 134. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform dalıp-çıkma hareketi (türbin park durumunda)

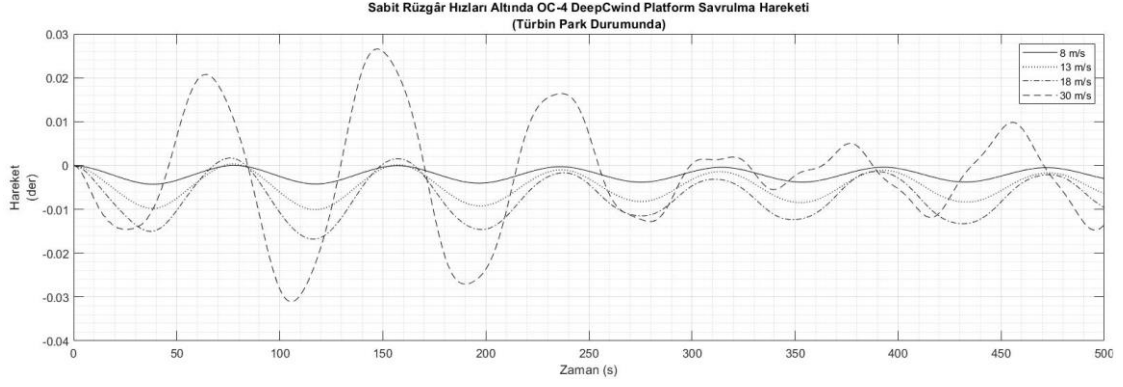


Şekil 135. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform yalpa hareketi (türbin park durumunda)

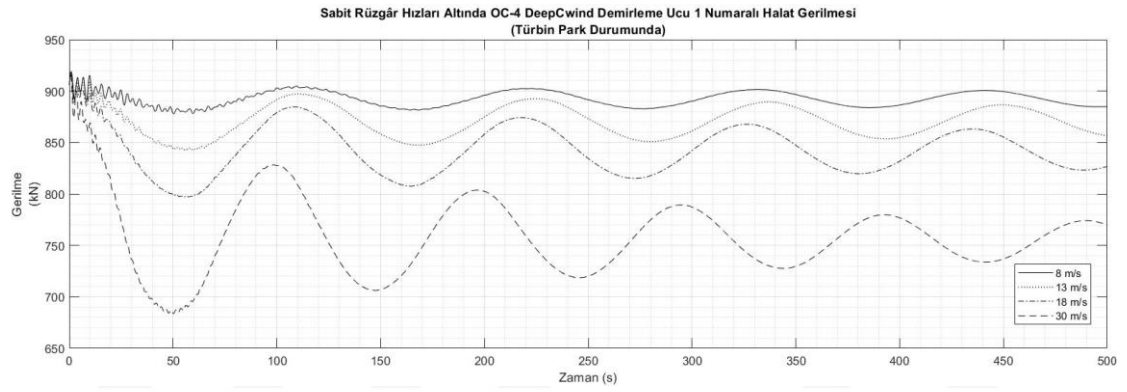


Şekil 136. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform baş-kıç vurma hareketi (türbin park durumunda)

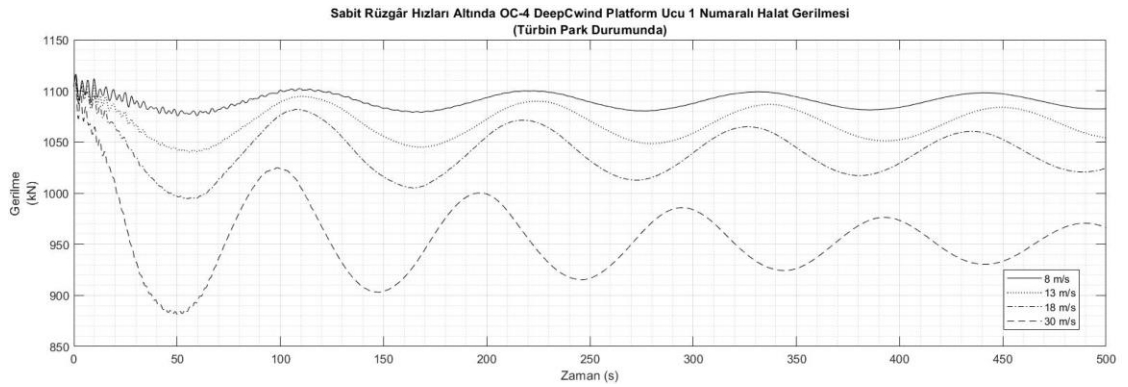




Şekil 137. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform savrulma hareketi (türbin park durumunda)

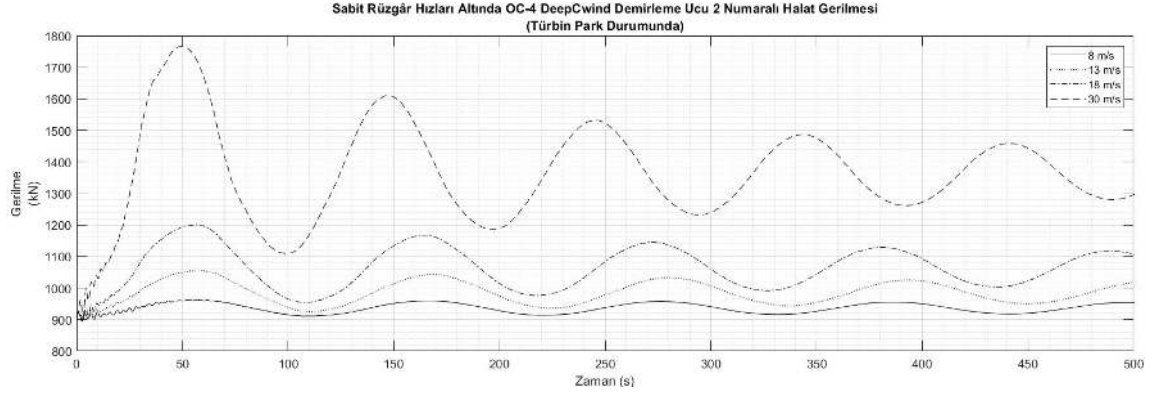


Şekil 138. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)

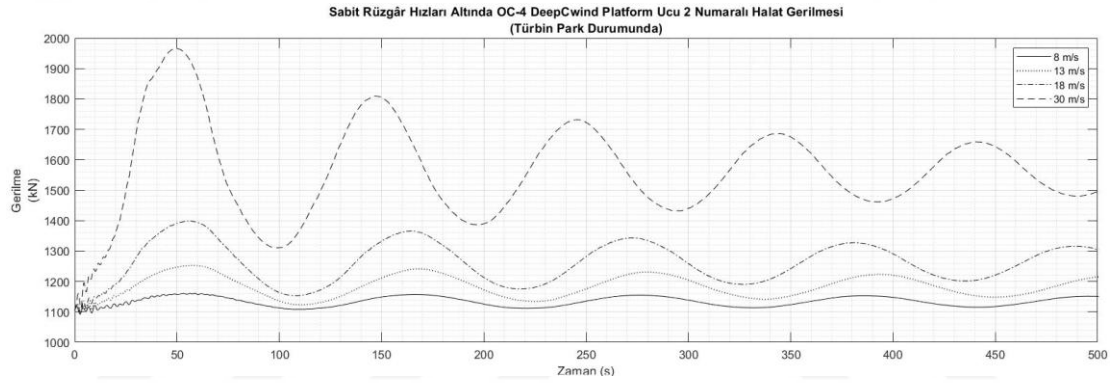


Şekil 139. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)

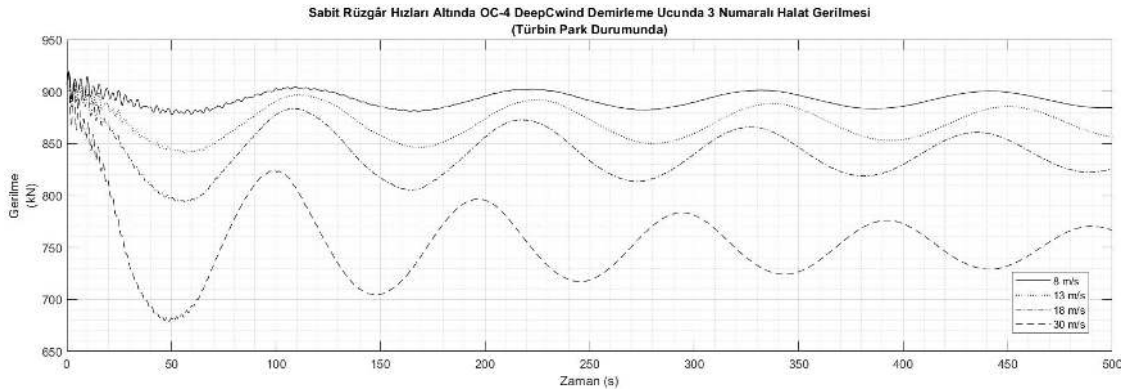




Şekil 140. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)

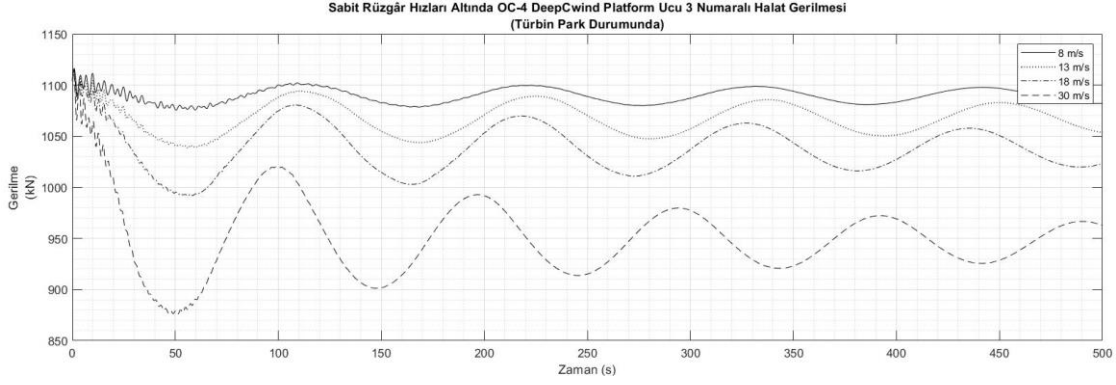


Şekil 141. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)



Şekil 142. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)





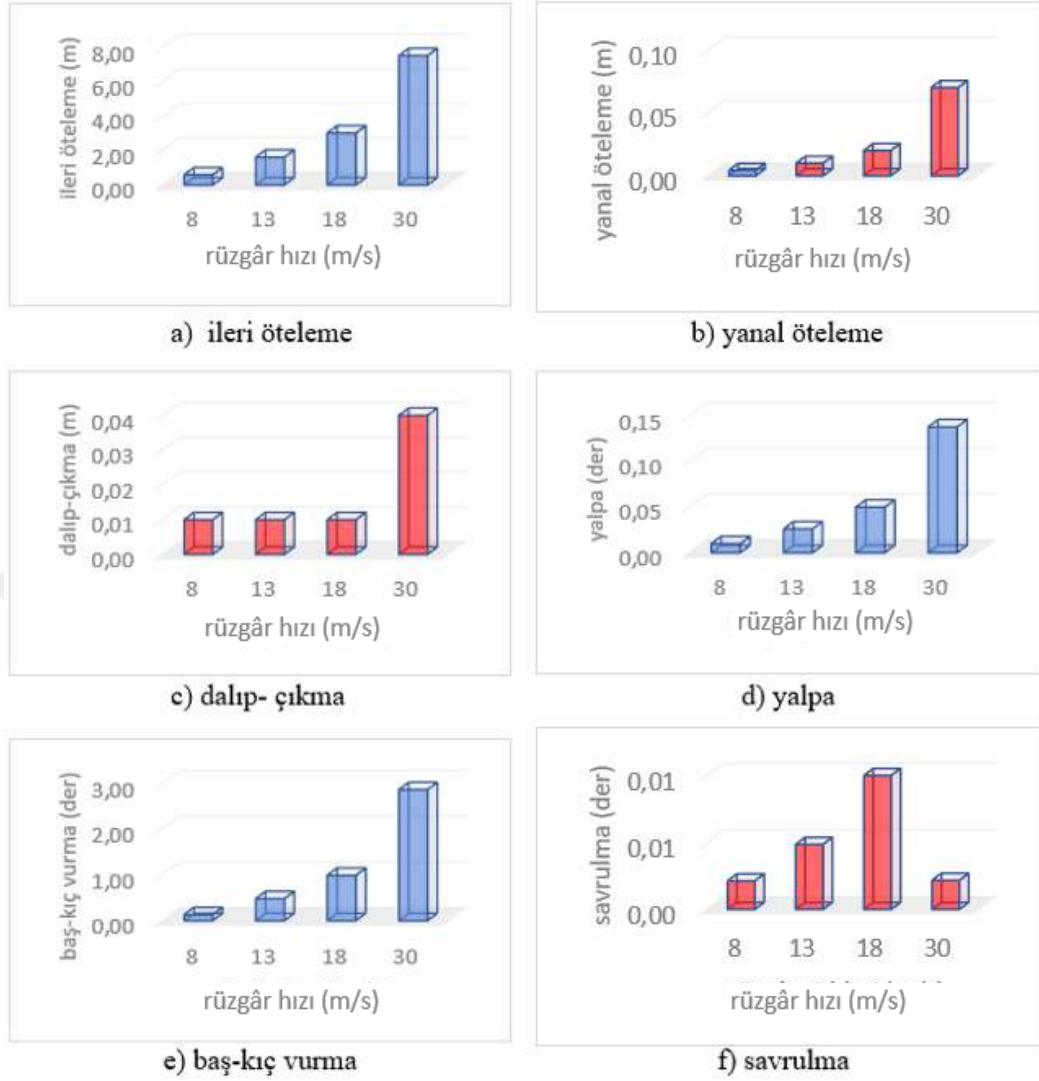
Şekil 143. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park durumunda)

Türbinin park pozisyonunda olduğu OC-4 DeepCwind platform hareketlerinden ileri öteleme, yanal öteleme ve savrulma hareketleri için grafiklerde ilk 500 s'deki hareketler dikkate alınmıştır. Buradan sonraki salınımlar yok denecek kadar azdır. Platform dalıp-çıkma, yalpa ve baş-kıç vurma hareketleri için ise bu durum 200 s olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yine türbinin park pozisyonunda olduğu durumda OC-4 DeepCwind bağlama sistemlerindeki gerilmeleri görmek adına 1, 2 ve 3 numaralı halatların zaman tanımlı alanda davranışları sırasıyla demirleme ve platform ucunda olmak üzere Şekil 138. ile Şekil 143. arasında gösterilmiştir. Burada da simülasyon 1000 s için gerçekleştirilmiş olup, 500 s' den sonraki gösterime, bu zaman adımlarından itibaren salınımların değişimi dikkate alınmayacak şekilde az olması nedeniyle yer verilmemiştir.

Aşağıda Şekil 144.'te sabit rüzgâr değerleri altında türbin park konumunda olmak üzere OC-4 DeepCwind konseptinin platform tepki değerleri gösterilmiştir.



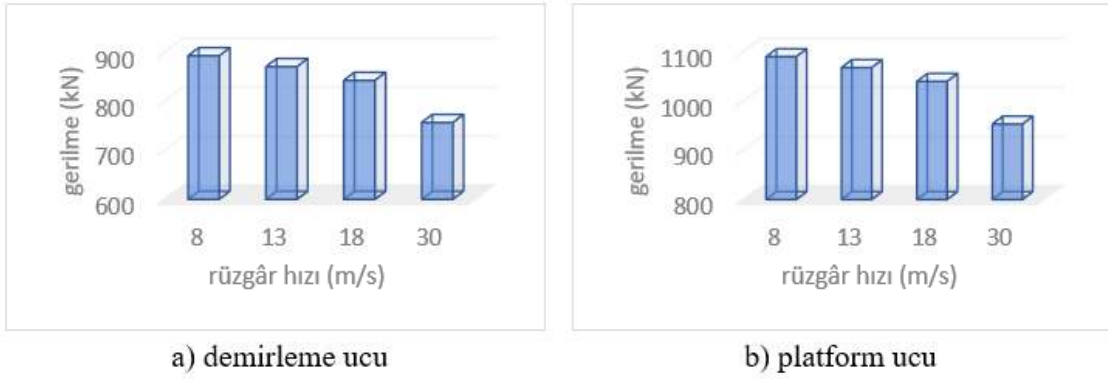


Şekil 144. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform tepki değerleri (türbin park konumunda)

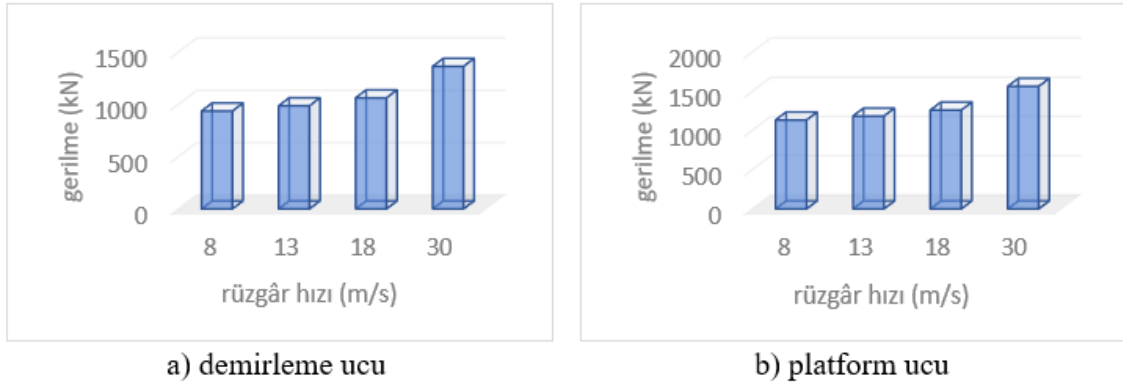
Burada kırmızı dolgulu olan yanal öteleme, dalıp-çıkma ve savrulma hareketleri, ilgili oldukları eksene göre negatif yönlü olup, grafikte değerleri pozitif gösterilmiştir.

Sabit rüzgâr hızları altında türbinin park pozisyonunda olduğu durumda OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri de aşağıda gösterilmiştir. OC-4 DeepCwind konsepti bağlama sitemi 3 kateneri bağlı halattan oluşmaktadır. Halat üzerindeki gerilme tepkileri demirleme ucunda (anch-ten) ve platform ucunda (fair-ten) olmak üzere 2 şekilde ele alınmıştır.

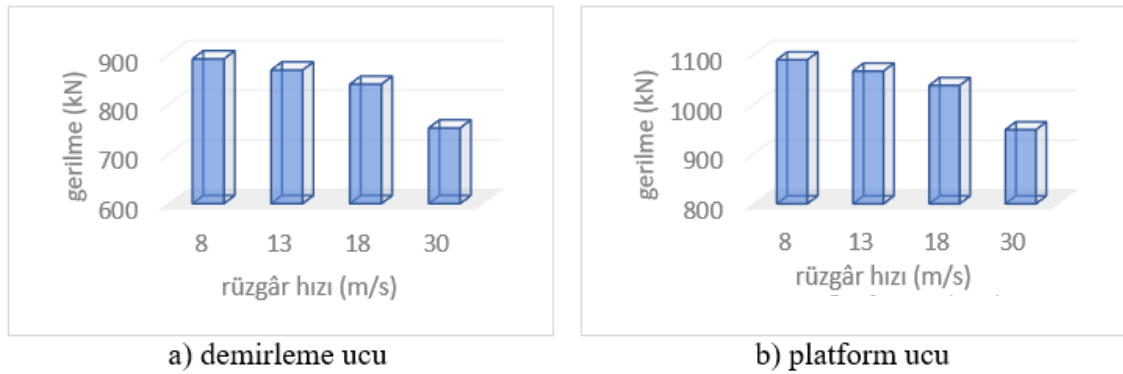




Şekil 145. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 1 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)



Şekil 146. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 2 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)

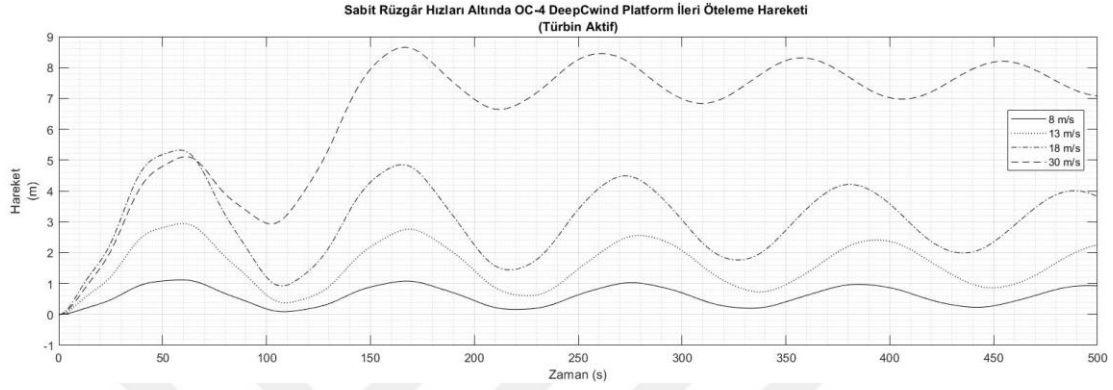


Şekil 147. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 3 numaralı halat gerilmesi (türbin park konumunda)

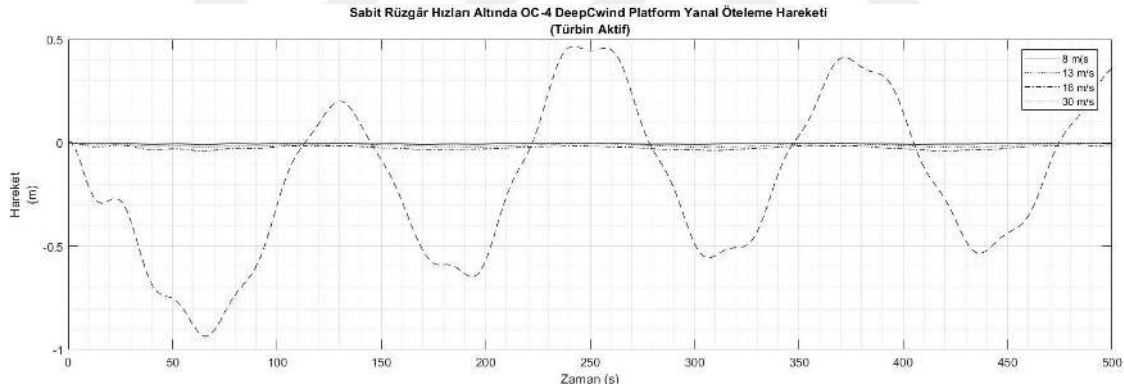
Sabit rüzgâr hızı altında OC-4 DeepCwind konseptinin türbin aktif haldeki simülasyonu da aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Burada türbin için başlangıç koşulu olarak



rotor hızı 6 rpm girilmiştir. 8 m/s, 13 m/s ve 18 m/s'lik rüzgâr hızları için kanat hatveleri 0° , 30 m/s'lik rüzgâr hızı için ise kanat hatvesi 3 kanat için de 82° olarak ayarlanmıştır. Türbin özellikleri gereği 25 m/s üzerindeki rüzgâr hızlarında kanat hatvesi 82° ayarlanmaktadır. Sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

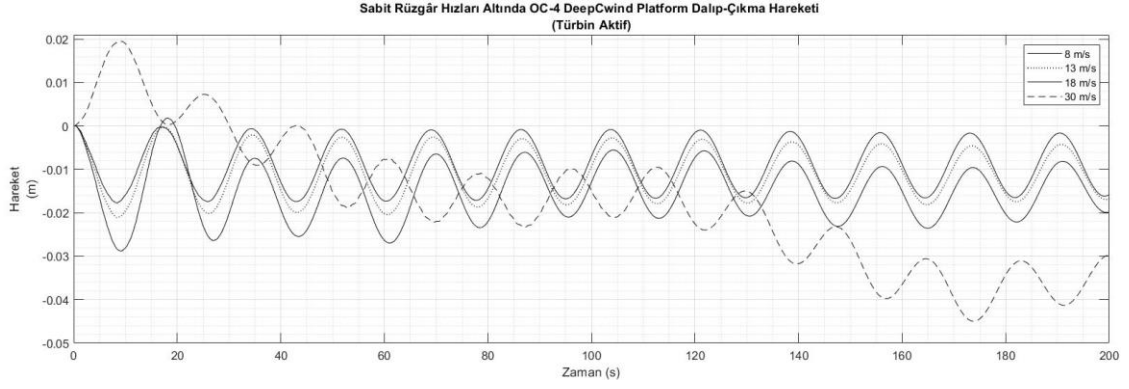


Şekil 148. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ileri öteleme hareketi (türbin aktif)

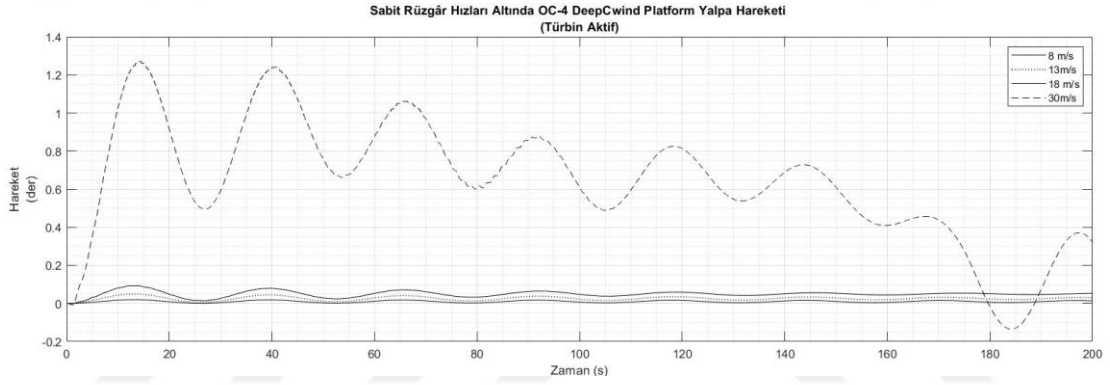


Şekil 149. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform yanıl öteleme hareketi (türbin aktif)

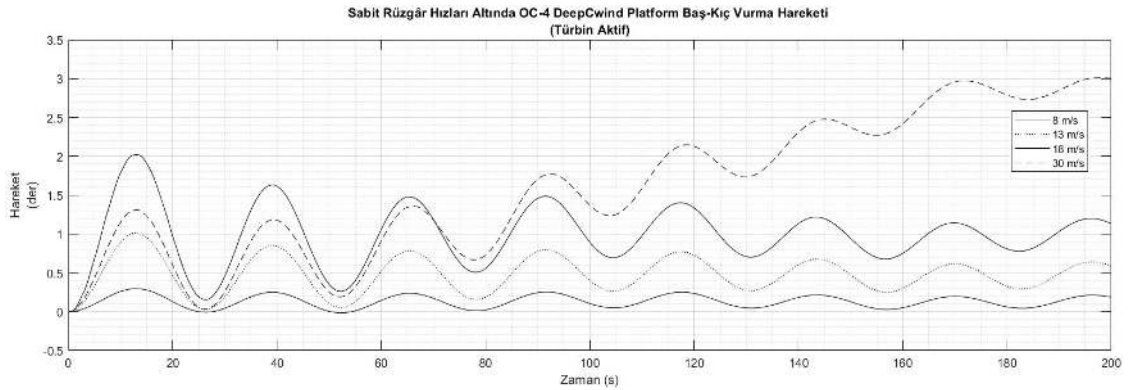




Şekil 150. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform dalıp-çıkma hareketi (türbin aktif)

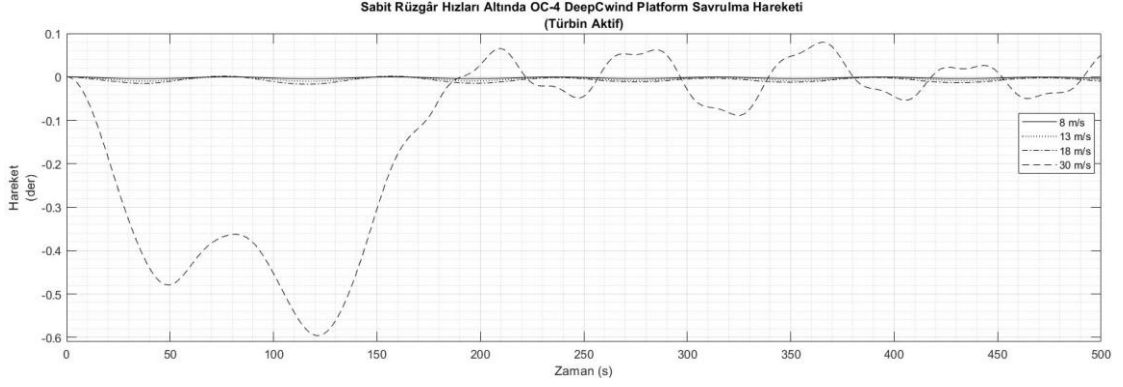


Şekil 151. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform yalpa hareketi (türbin aktif)

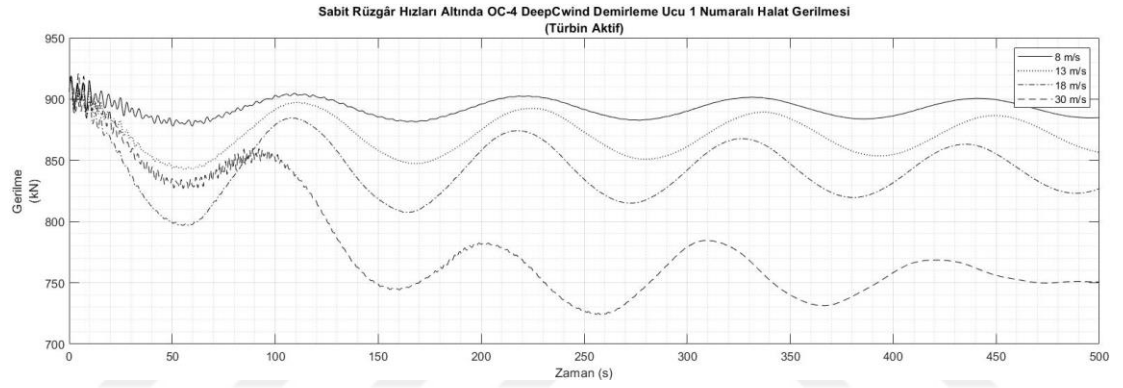


Şekil 152. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform baş-kıç vurma hareketi (türbin aktif)

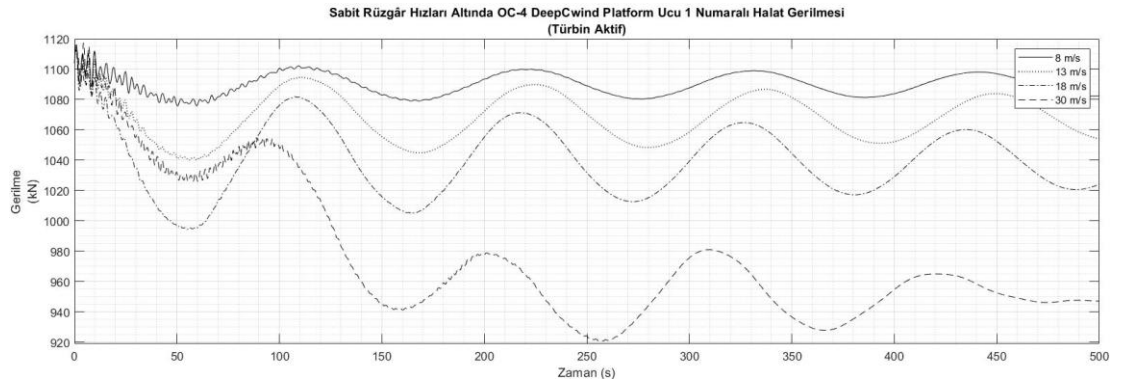




Şekil 153. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform savrulma hareketi (türbin aktif)

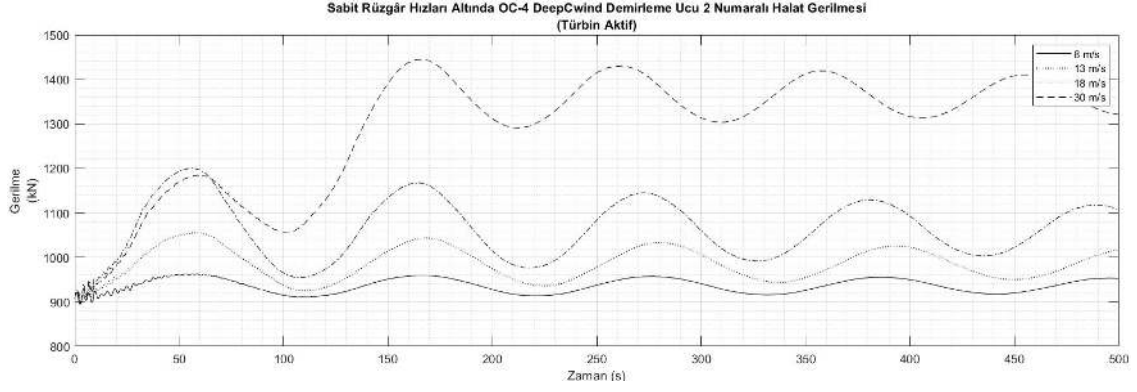


Şekil 154. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

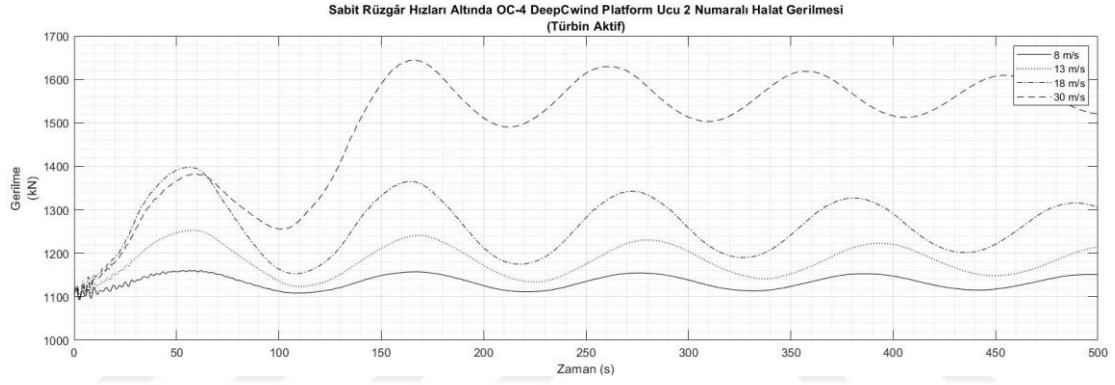


Şekil 155. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

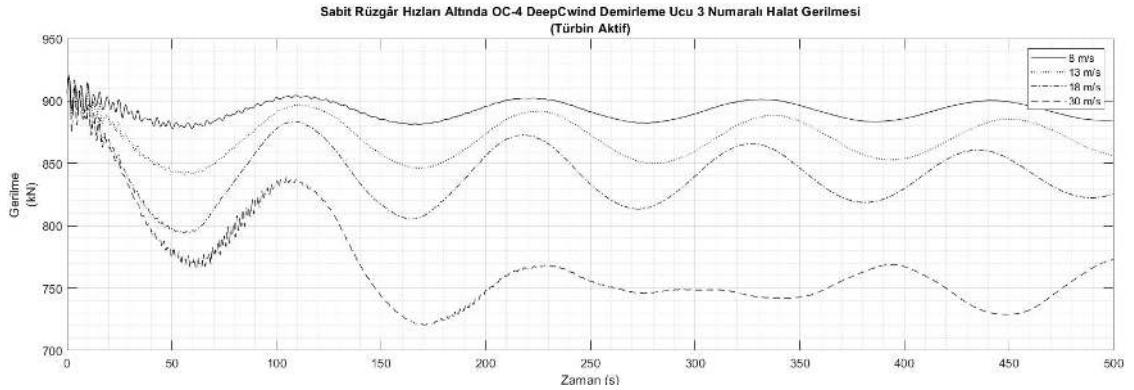




Şekil 156. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

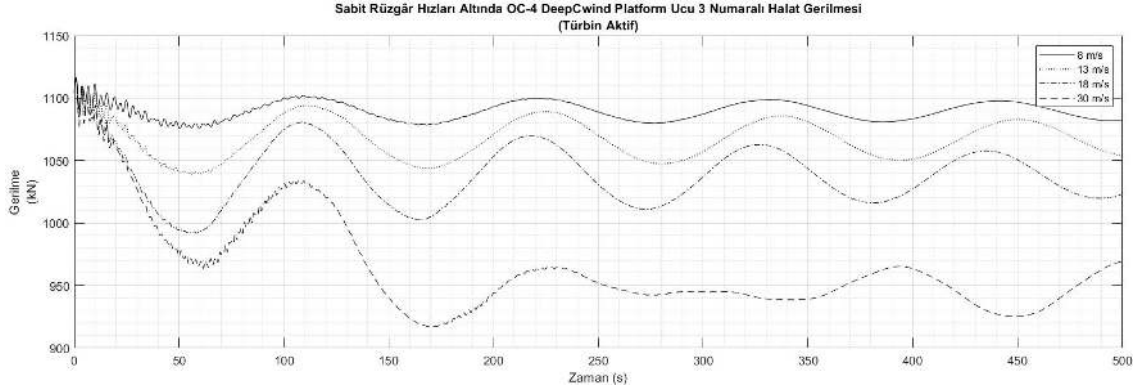


Şekil 157. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)



Şekil 158. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind demirleme ucu 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)



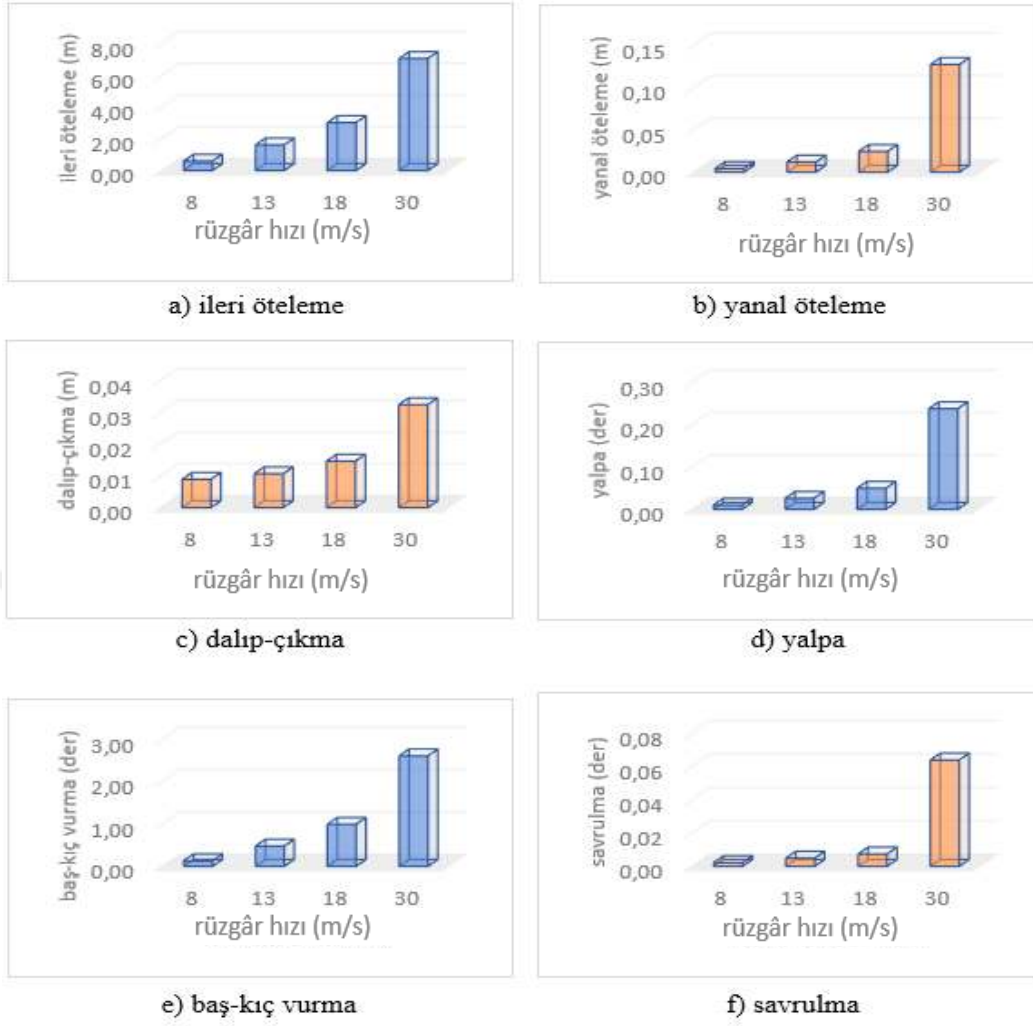


Şekil 159. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform ucu 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

Türbinin aktif olduğu OC-4 DeepCwind platform hareketlerinden ileri öteleme, yanal öteleme ve savrulma için 500 s'deki hareketleri gözlenmiştir. Buradan sonra salınımlar önemli değişiklik olmayacak şekilde azalmıştır. Platform dalıp-çıkma, yalpa ve baş-kıç vurma hareketleri için ise bu durum 200 s'den sonra gerçekleşmiştir. Bu sebeple ilgili sürelerden sonraki kısımlar grafiklerde gösterilmemiştir.

Sabit rüzgâr hızı altında ve türbinin aktif durumunda OC-4 DeepCwind bağlama sistemlerindeki gerilmeleri görmek adına 1, 2 ve 3 numaralı halatların zaman tanımlı alanda davranışları sırasıyla demirleme ve platform ucunda olmak üzere Şekil 154. ile Şekil 159. arasında gösterilmiştir. Burada da simülasyon 1000 s için gerçekleştirilmiş olup, grafiklerde 500 s'den sonraki gösterime, bu zaman adımlarından itibaren salınımların kaybolması nedeniyle yer verilmemiştir. Halat gerilmelerindeki davranışlara bakıldığında, 1 ve 3 numaralı halatın birlikte, 2 numaralı halatın onlara ters olarak hareket ettiği görülmektedir. Yani diğer bir deyişle 1 ve 3 numaralı halat gergin durumdayken 2 numaralı halat gevşek, 1 ve 3 numaralı halatlar gevşek iken 2 numaralı halat gergin durumdadır. Bu durum demirleme konumuyla alakalı bir durumdur.



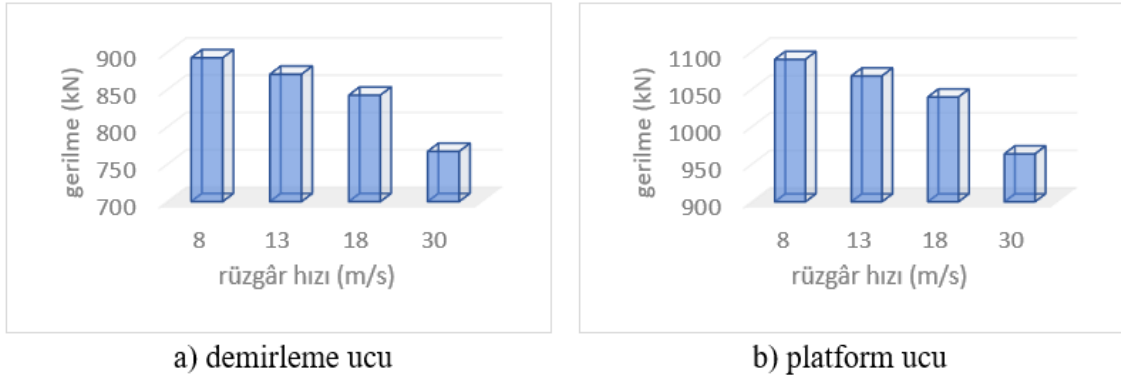


Şekil 160. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind platform tepki değerleri (türbin aktif)

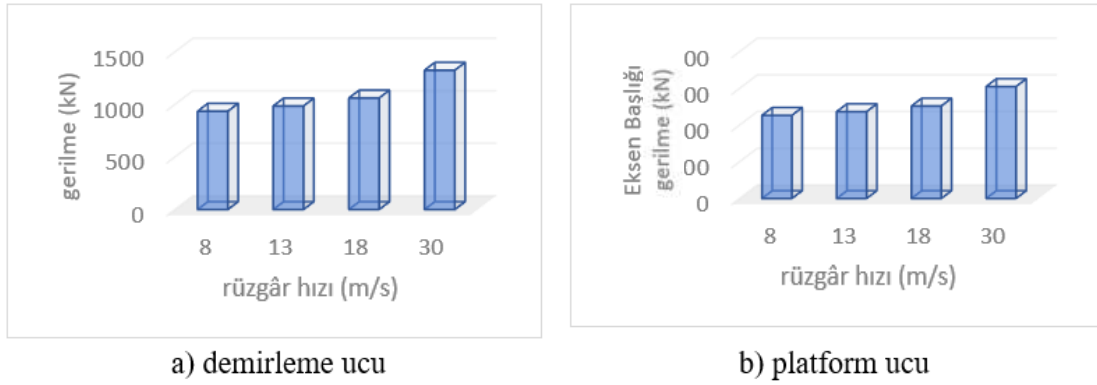
Burada Şekil 160.'da sabit rüzgâr hızı altında aktif durumdaki türbini ile OC-4 DeepCwind platformunun hareket tepkilerinin değerleri gösterilmiştir. Yine burada kırmızı dolgulu olan büyüklükler, ilgili oldukları eksene göre negatif yönlü olup, grafikte değerleri pozitif gösterilmiştir.

Sabit rüzgâr hızları altında türbinin aktif olduğu durumda OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri de aşağıda gösterilmiştir. Yine halat üzerindeki gerilme tepkileri demirleme ucunda (anch-ten) ve platform ucunda (fair-ten) olmak üzere 2 şekilde ele alınmıştır.

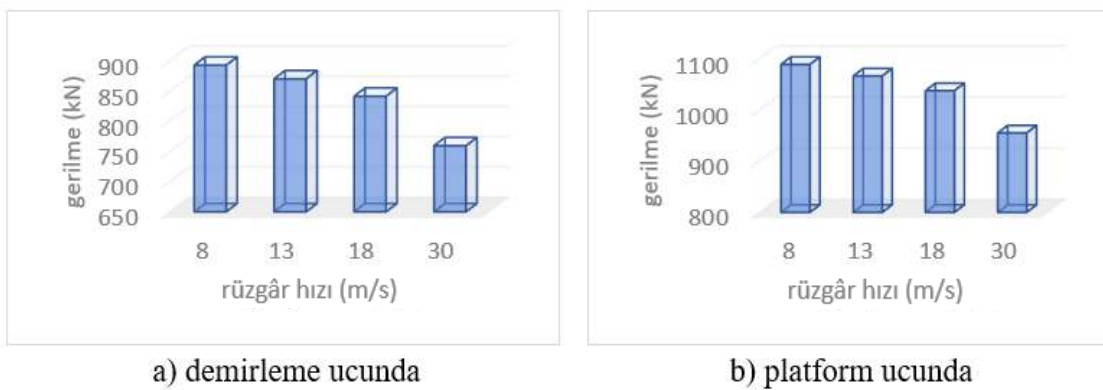




Şekil 161. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 1 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)



Şekil 162. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 2 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

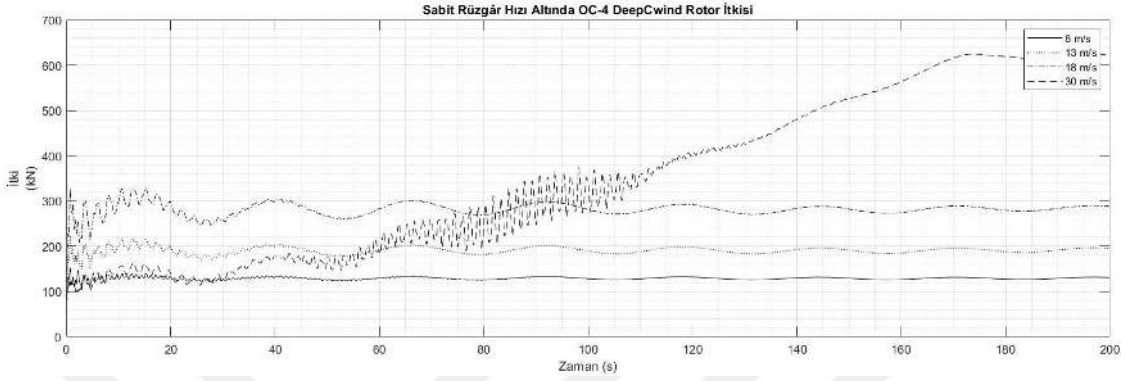


Şekil 163. Sabit rüzgâr hızları altında OC-4 DeepCwind bağlama sistemleri tepkileri 3 numaralı halat gerilmesi (türbin aktif)

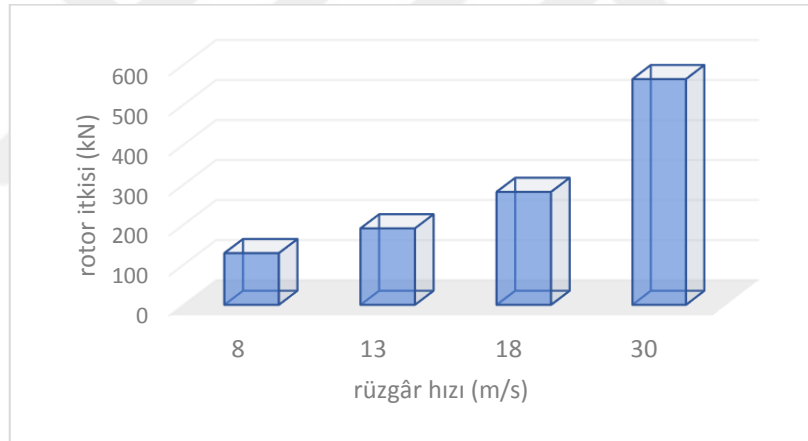
Grafikler karşılaştırıldığında türbinin aktif olduğu durumdaki hem platform hareket tepkileri hem de bağlantı sistemleri halat tepkileri, türbinin park halindeki durumundan daha



fazladır. Bunun nedeni, türbin aktif iken rotor çalışmakta, kanatlar dönmekte ve bir itki meydana gelmektedir. Rotor tarafından oluşturulan rotor itkisi (rotor-thrust) rüzgâr hızlarına göre değişimi ve değerleri aşağıda Şekil 164. ve şekil 165. ile gösterilmiştir.



Şekil 164. Sabit rüzgâr hızı altında OC-4 DeepCwind rotor itkisi

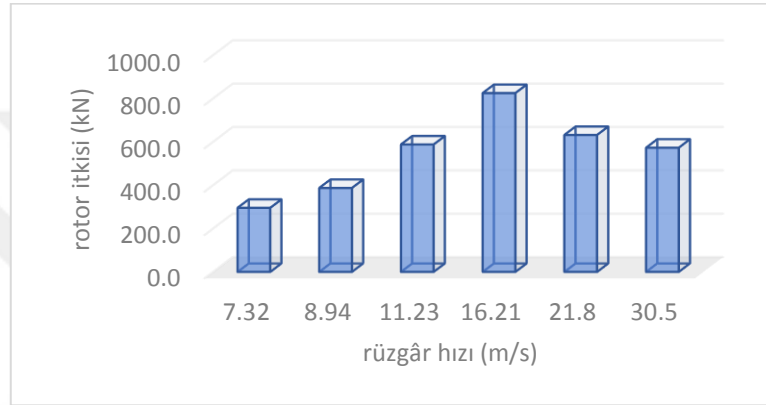


Şekil 165. Sabit rüzgâr hızlarına göre OC-4 DeepCwind rotor itki tepkisi

Yukarıda beklenen durum 30 m/s'lik hız olduğunda rotor itkisinin diğer rüzgâr hızlarında oluşan itkiye göre düşük olması yönündeydi. Çünkü yüksek hızdan dolayı sistem türbini otomatik olarak park durumuna almaktadır ve bu durumda rotor çalışmaz. Oluşan itki ise fren sistemi (brake) tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple başlangıç koşulları aşağıdaki gibi düzenlenerek simülasyon tekrar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Uzunoğlu [6] tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışma ve Technip/NREL/UMaine tarafından gerçekleştirilen 1:50 ölçekli model test deneyi sonuçları ile karşılaştırılarak validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



- 30,50 m/s’lik sabit rüzgâr hızı altındaki rotor hızı 0 rpm’dir. Bunun sebebi NREL 5 MW rüzgâr türbinin operasyonel çalışma şiddetinden büyük olmasından kaynaklanmaktadır ve türbin park durumundadır. Diğer durumlarda ise rotor hızı tabloda verilmiştir.
- Aynı sebeple 30,50 m/s’lik sabit rüzgâr hızı altındaki durumda kanat hatve açıları her 3 kanat için 85° olarak ayarlanmıştır. Diğer durumlarda ise kanat hatveleri $6,4^\circ$ olarak ayarlanmıştır.



Şekil 166. Sabit rüzgâr hızlarına göre düzeltilmiş OC-4 DeepCwind rotor itkisi

Tablo 36. Rotor itkileri karşılaştırmaları

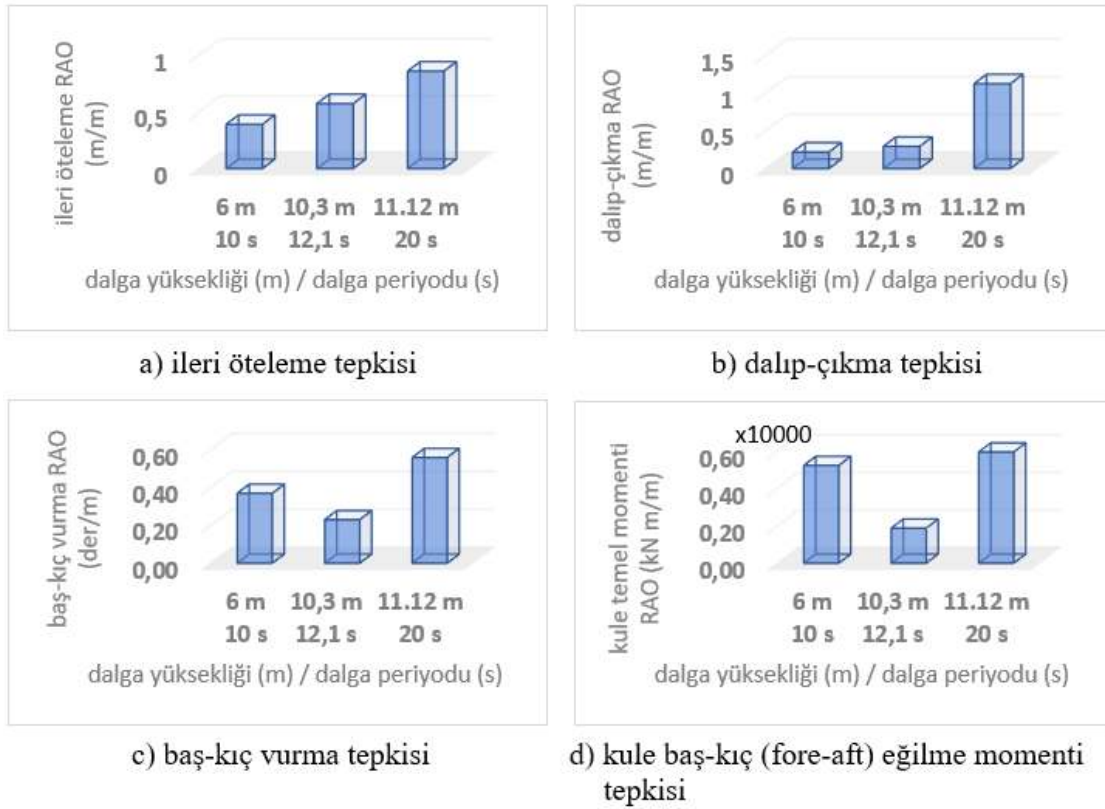
Rüzgâr hızı (m/s)	Rotor hızı (rpm)	Çalışma (kN)	Uzunoglu sayısal [6] (kN)	NREL model test (kN)
7,32	4,95	295,7	97,7	126,1
8,94	5,66	387,4	142,6	156,9
11,23	7,78	587,9	249,3	202,7
16,24	9,19	825,1	434,7	381,7
21,80	12,3	631,7	793,2	749,8
30,50	85	573,1	141,8	156,8

Buradaki fark referans çalışmaların ve model test deneyinin 1:50 ölçeğinde olmasındandır. Yapılan tez çalışmasında ise tam ölçekte simülasyon gerçekleştirilmiştir.



2.9.4.2.6. Düzenli Dalga Altında OC-4 DeepCwind Konsepti Tepkileri

Bu kısımda rüzgârın olmadığı, düzenli dalga (sinüs dalgası) altındaki hareketler incelenmiştir. Simülasyon zamanı 2600 s seçilmiştir. Kanat hatveleri de 3 kanat için ortak olacak şekilde 82° ayarlanmıştır. İlgili dalgalar için RAO karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırılan dalga yükseklikleri 6 m, 10,3 m ve 11,12 m olup, pik periyotları sırasıyla 10 s, 12,1 s ve 20 s olarak belirlenmiştir. Hareketlerden ileri öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri ile kule baş-kıç (fore-aft) momenti karşılaştırmaları gösterilmiştir. Diğer hareketlerden yanal öteleme, yalpa ve savrulma hareketi ile kule bordadan-bordaya (side-side) momenti ihmal edilecek kadar çok küçük olduğu için 0' a eşit alınmış ve grafiklerde gösterilmemiştir. Grafikler Fourier dönüşümü kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 167. Düzenli dalgalar altında (sinüs dalgası) OC-4 DeepCwind platform ve kule RAO'ları

Düzenli dalgalar altında tepkiler incelendiğinde artan her bir dalga yüksekliği için ileri öteleme ve dalıp-çıkma tepkilerinin de arttığı görülmüştür. Baş-kıç vurma tepkisi ve kule momenti incelendiğinde ise farklı bir durumun söz konusu olduğu görülmektedir. Artan



dalga yüksekliği ile oluşan kule baş-kıç (fore-aft) eğilme momenti (y- eksenini etrafında) ilk önce azalmış, daha sonra artma yönünde eğilim göstermiştir. Kule bordadan-bordaya (side-side) eğilme momenti (x- eksenini etrafında) ise ihmal edilecek kadar küçük olup grafikte gösterilmemiştir. Bulunan kule temel momentleri ise baş-kıç vurma tepkileriyle oluşmaktadır.

2.9.4.3. NAUTILUS-DTU Konsepti

Bu kısımda validasyonu gerçekleştirilen NAUTILUS-DTU konsepti, HORIZON 2020 LIFES50+ projesi olarak Maine Körfezi (GoM) için geliştirilmiştir.

NAUTILUS yarı-batık (semi-sub) bir platform olup, altta dört dış kolonu birbirine bağlayan düz bir alt yzeeye sahip karesel-halka tabanlı bir dubadan oluşmaktadır. Bu dört kolon, merkezinde rüzgâr türbini kulesini destekleyen bütünleşmiş bir çapraz destek elemanı ile üstte de birbirine bağlanmaktadır. Ayrıca S-355-J2H çeliğinden üretilen yapıyı bağlamak için 4 adet katener bağlı halat kullanılmıştır.



şekil 168. NAUTILUS-DTU konsepti [214].



2.9.4.3.1. NAUTILUS-DTU Kule Özellikleri

Maine Körfezi için NAUTILUS-DTU yüzer platform için orijinal kule tasarımı, alt ve üst flanşları aracılığıyla cıvatalı beş konik bölümden oluşmaktadır. Ancak bu flanşlı yapılardan kaçınmak için “akademik” kule tanımı yapılmıştır. Böylece gerçekleştirilen çalışmalarda kule daha sade bir hale gelmektedir. Ancak daha önce başka araştırmacılar tarafından da kullanılan “akademik kule” kavramı ile gerçek tasarımlar arasında gözle görülür farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda kule, S-355-J2H ($\rho=7.850 \text{ kg/m}^3$, $E=210 \text{ GPa}$ ve $\nu=0,3$) çelikten yapılmıştır ve burada malzeme yoğunluğu gerçek kütleyi hesaba katabilmek için 8.500 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Genel karasal rüzgâr türbin (WT) kule modellerinde olduğu gibi bu kule bölümleri de flanş, cıvata, tali yapılardan oluşmuş ve bunlara boya uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kule tabanı 10.5 m'lik bir dış çap sunarken, kule üstü RNA gereksinimlerini karşılamak için 5,5 m'lik dış çap bulundurmaktadır [215]. Kule taban ve üst kalınlıkları sırasıyla 0,040 m ve 0,037 m'dir. Kulenin toplam uzunluğu 107 m'dir.

Tablo 37. NAUTILUS-DTU kule özellikleri

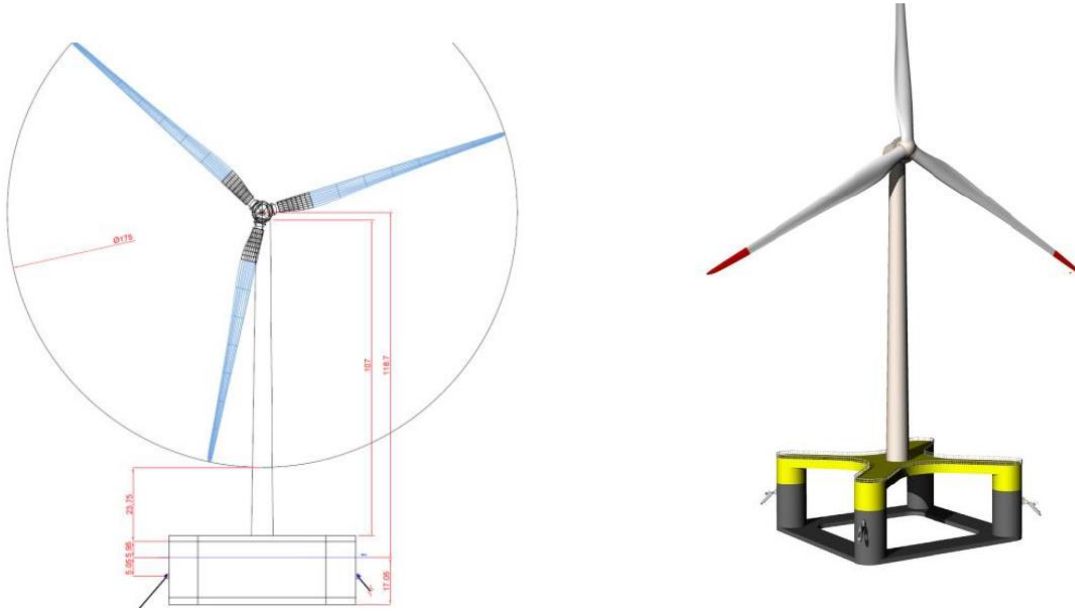
Özellik	Birim	Değer
Platform fribordu (serbest yüzeyden kule tabanına yükseklik, tam aktif balast halinde)	m	7,667
Serbest su yüzeyinden kule tepesine olan yükseklik (tam aktif balast halinde)	m	114,667
Kulenin toplam kütlesi	kg	879.381
Kule kütle merkezi konumu (kule merkez hattı boyunca zeminden yüksekliği)	m	54,908
Kule malzemesi yoğunluğu	kg/m^3	8500
Elastisite modülü (E)	N/m^2	2,1 E+11
Kayma modülü (G)	N/m^2	8,08 E+10
Yapısal sönümleme		%1



2.9.4.3.2. NAUTILUS-DTU Platform ve Bağlama Sistemleri Tasarım Parametreleri

Bu kısımda NAUTILUS-DTU yarı-batık (semi-sub) tip platformu ve bağlantı sistemleri için tasarım parametreleri verilmiştir.

NAUTILUS-DTU yarı-batık (semi-sub), kare şeklinde bir halka duba ile omurga düzleminde birbirine bağlanan dört kolondan ve kolonların tepesinde X şeklinde bir ana güverteden oluşan simetrik bir yüzer platformdur. Kuleyi birbirine bağlayan geçiş parçası, ana güverte merkezi konumuna gömülüdür. Tüm yapı, yapıyı su geçirmez tutmak için bölümlere ayrılmıştır. Ana koordinat sistemi (ana rüzgâr yönü ile aynı doğrultuda) Şekil 169.'da gösterilmiştir. Platform, balast (tam aktif ve pasif) dahil toplam 9,337e6 kg kütleye sahiptir. Aktif balast kontrolü tanklara su alımı ile sağlanırken, pasif balast ise beton plaka halindedir. Platformun ana kütle özellikleri Tablo 38.'de verilmiştir.



Şekil 169. NAUTILUS-DTU yapısı [214].



Tablo 38. NAUTILUS-DTU yarı-batık platform özellikleri aktif balast durumunda ve aktif balast yokken [214].

Genel bilgiler	Birim	Aktif balast yok	Aktif balast ful
Platform kütlesi (kule ve bağlama sistemleri hariç)	kg	6.581.000	7.781.000
Kütle merkezi konumu (CM), serbest yüzeyin altında	m	10,748	14,283
Platform yalpa ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	3.920.000.000	4.829.000.000
Platform baş-kıç vurma ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	3.920.000.000	4.829.000.000
Platform savrulma ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	5.636.000.000	7.451.000.000
Operasyonel su çekimi (bağlantı sistemleri mevcut)	m	14,952	18,333
Platform deplasman hacmi (bağlantı sistemleri mevcut)	m ³	8.113,06	9.280,96

Tablo 39. NAUTILUS-DTU yarı-batık platformu pasif beton balastların özellikleri [214].

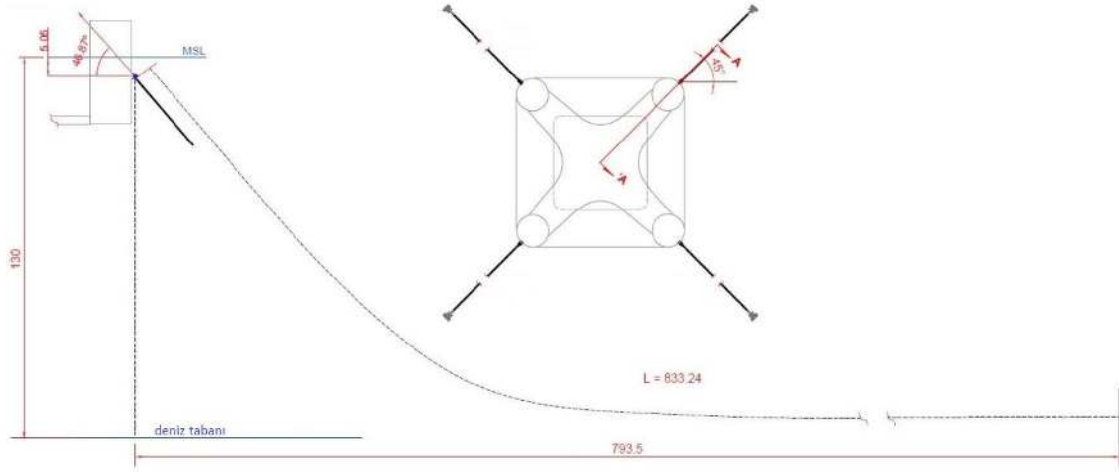
Genel bilgiler	Birim	Değer
Kütle	kg	3.890.000
CMx	m	0
CMy	m	0
CMz (omurga hattından yukarıda)	m	0,356

NAUTILUS-DTU bağlantı sistemleri 4 katener bağlı halattan oluşmaktadır. Platform ucundaki bağlantı noktaları, serbest su yüzeyinden 6,333 m aşağıda, omurgadan 12 m yukarıda ve 43,96 m platform merkez hattından xy- düzleminde olacak şekilde konumlanmıştır.

Bağlama sistemi demirleme noktaları ise deniz tabanında, platform bağlantı ucundan 793,50 m ileride, yani platform merkez hattından 837,46 m uzaklıkta olacak şekilde sabitlenmektedir. Bağlama sistemlerinin tüm halatları 833,24 m gerdirilmemiş uzunluğa



sahiptir. Bağlama halatları 97 mm çapa sahip ve R3 kalite, çivisiz zincirden oluşmaktadır[214]. Halat yayılı kütle yoğunluğu 188,2 kg/m, uzama (eksenel) rijitliği EA 803,5 MN'dir.



Şekil 170. NAUTILUS-DTU bağlantı sistemleri düzeni [214].

Tablo 40. NAUTILUS-DTU bağlama sistemleri genel özellikleri [214].

Genel bilgiler	Birim	Değer
Su derinliği	m	130
Halat sayısı	-	4
Halatlar arası açı	der.	90
Serbest su yüzeyi altından platform ucu halat bağlantı noktası derinliği (fairlead)	m	-6,333
Platform merkez hattından çapa noktalarına olan yarıçap uzunluğu (deniz tabanında)	m	837,46
Platform merkez hattından bağlantı noktalarına olan yarıçap uzunluğu (platform üzerinde)	m	43,9637
Her bir bağlama halatı toplam uzunluğu (gerilmemiş halde)	m	833,24
Bağlama halatı çapı	m	0,097
Eşdeğer halat kütle yoğunluğu	kg/m	188,2
Halat ön gerilmeleri	kN	406,3



Tablo 40.'ın devamı

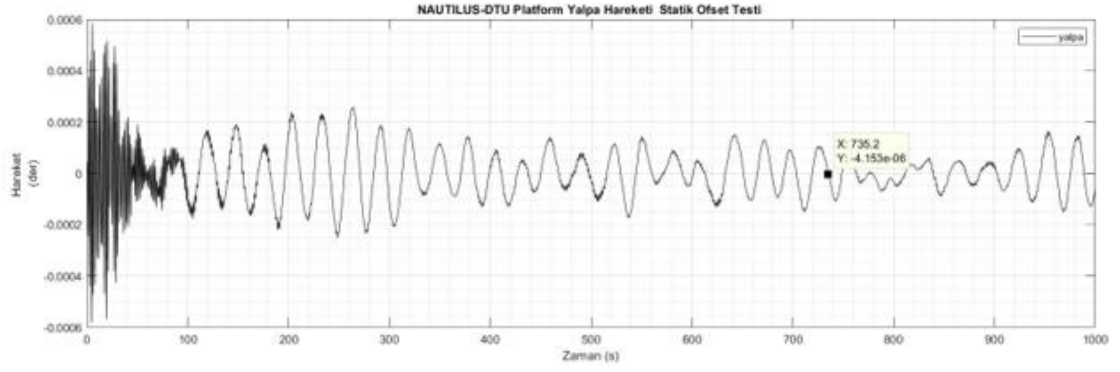
Eş değer uzama sertliği (AE)	MN	803,5
Bağlama halatları için hidrodinamik sürüklenme katsayısı	-	2,4
Bağlama halatları için hidrodinamik ek su kütlesi katsayısı	-	1,0
Bağlama halatları için deniz tabanı sürüklenme katsayısı	-	1,0
Demirleme halatları yapısal sönümlemesi	%	0
Deniz tabanı sertliği	Pa/m	3.000.000
Deniz tabanı sönümlemesi	Pa S/m	300.000
Deniz tabanı sürtünme katsayısı	-	0

2.9.4.3.3. NAUTILUS-DTU Statik Ofset Testi

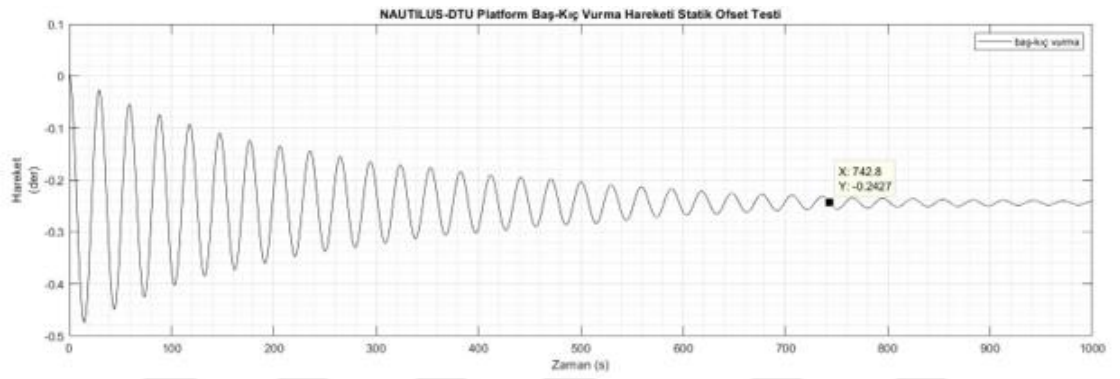
Bu kısımda statik ofset testi gerçekleştirilerek platform için başlangıç koşulları belirlenmiştir. Test sonucuna göre bulunan başlangıç koşulları ile platformun çevresel yükler altında zaman tanımlı alanda analizleri gerçekleştirilmiştir.

Testin gerçekleştirilmesi için gerekli olan giriş dosyaları (ELASSTODYN, HYDRODYN, AERODYN) hazırlığı ve ilgili yazılımın çalıştırılması (OPENFAST) daha önceki kısımda (OC-3 Hywind Statik Ofset Testi) anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıdaki sunulmuştur.

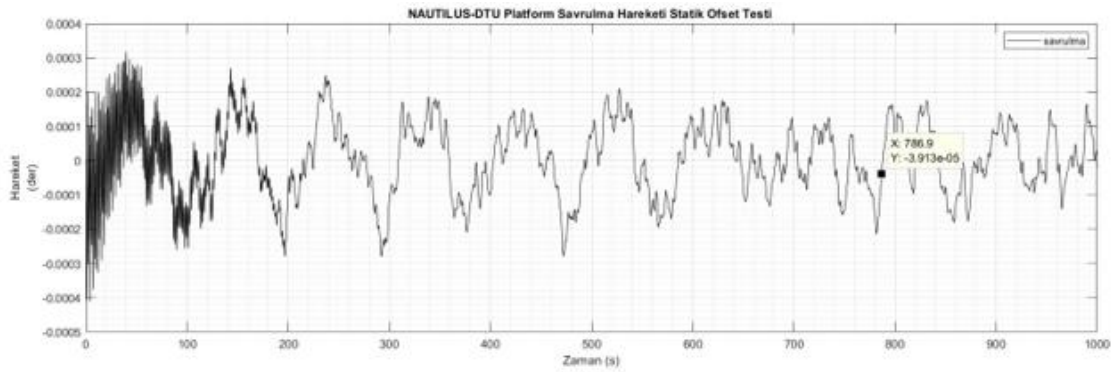




Şekil 174. NAUTILUS-DTU platform yalpa hareketi statik ofset testi



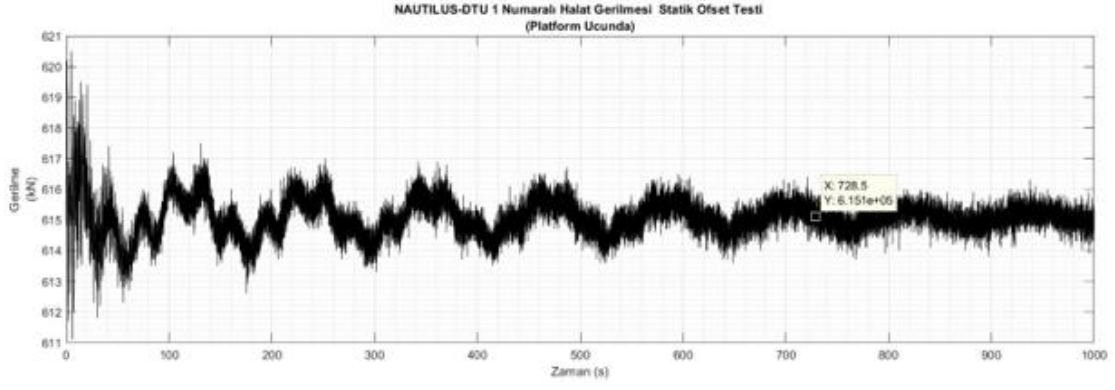
Şekil 175. NAUTILUS-DTU platform baş-kıç vurma hareketi statik ofset testi



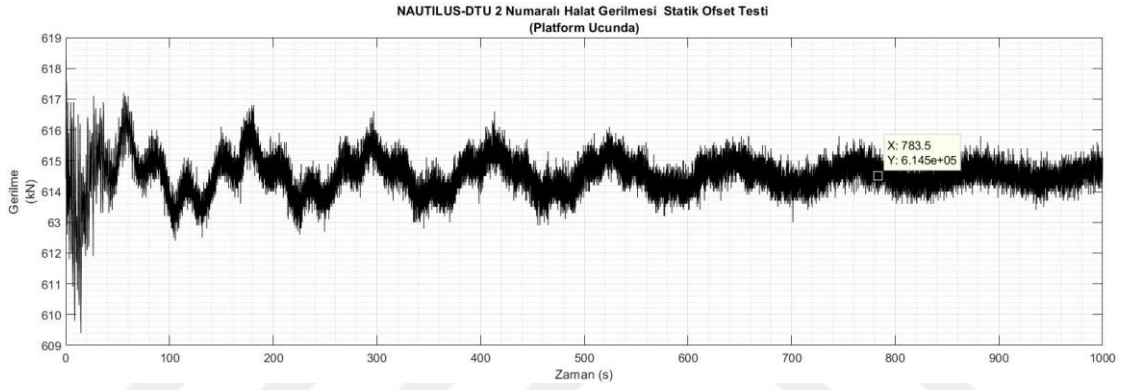
Şekil 176. NAUTILUS-DTU platform savrulma hareketi statik ofset testi

Bağlama sistemlerindeki gerilme değerleri de aynı şekilde statik ofset testi ile belirlenmiştir.

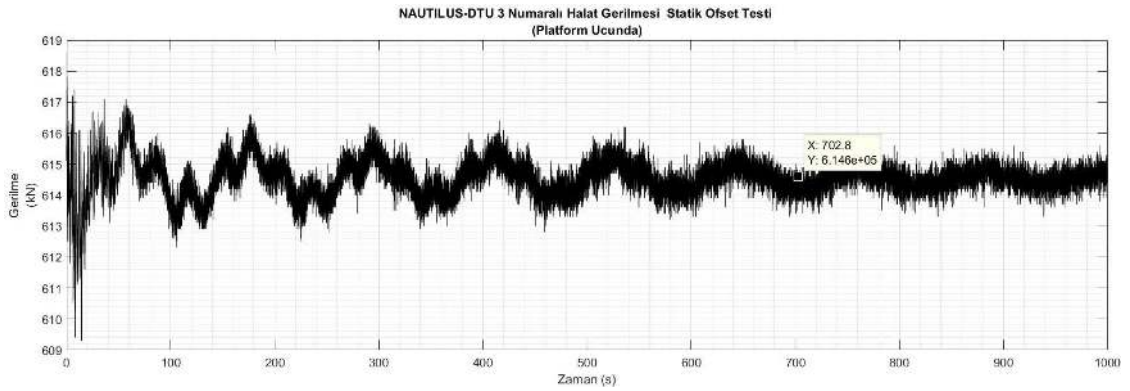




Şekil 177. NAUTILUS-DTU 1- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

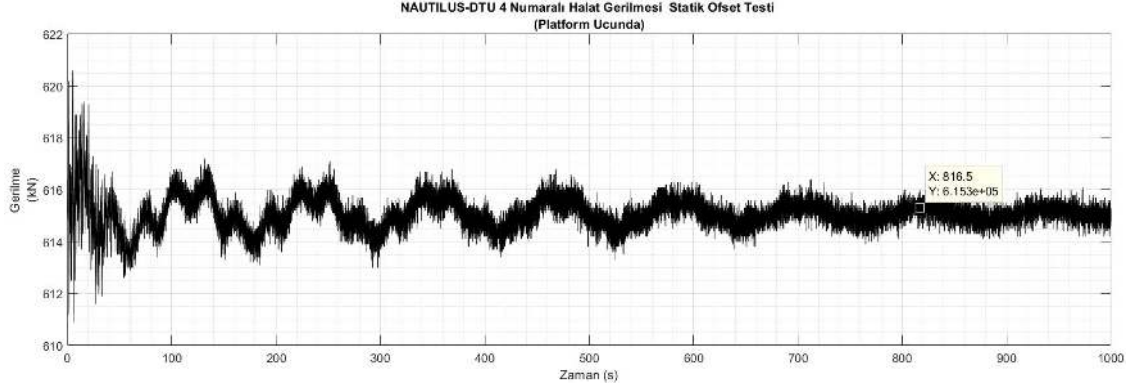


Şekil 178. NAUTILUS-DTU 2- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

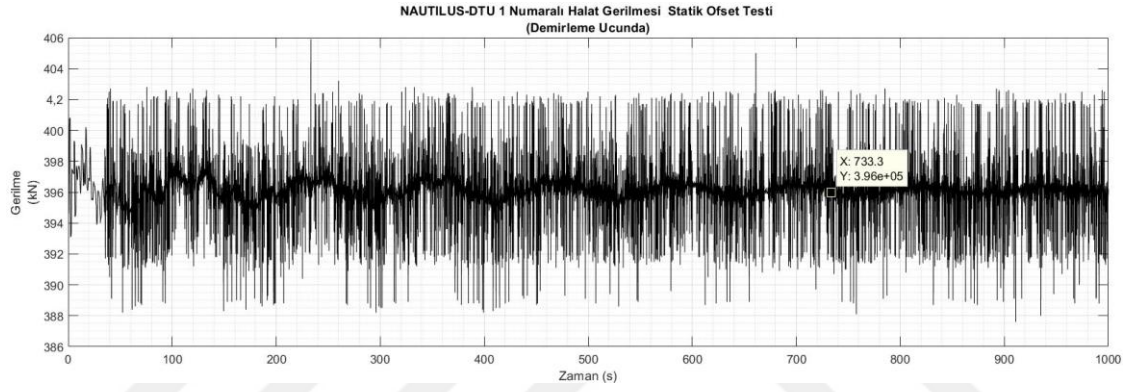


Şekil 179. NAUTILUS-DTU 3- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

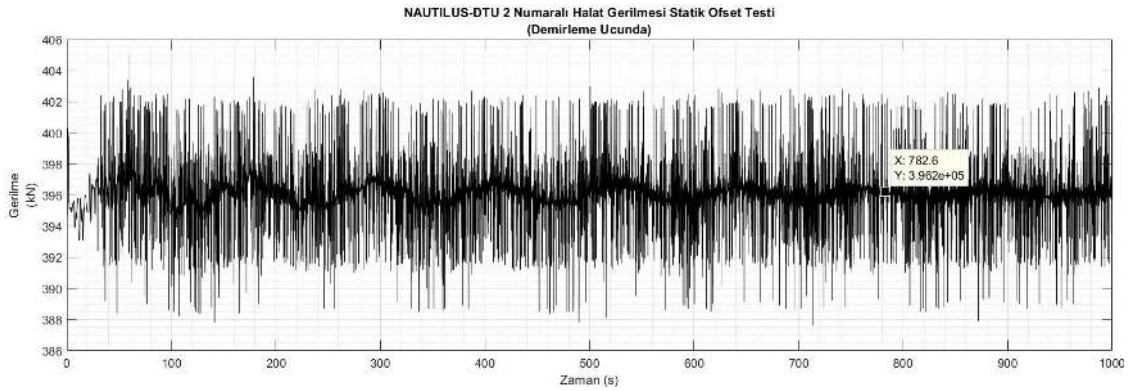




Şekil 180. NAUTILUS-DTU 4- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

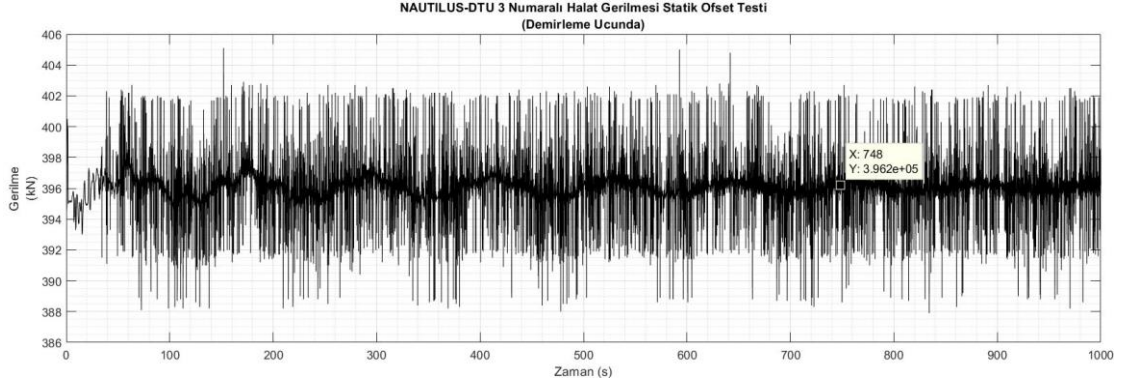


Şekil 181. NAUTILUS-DTU 1- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)

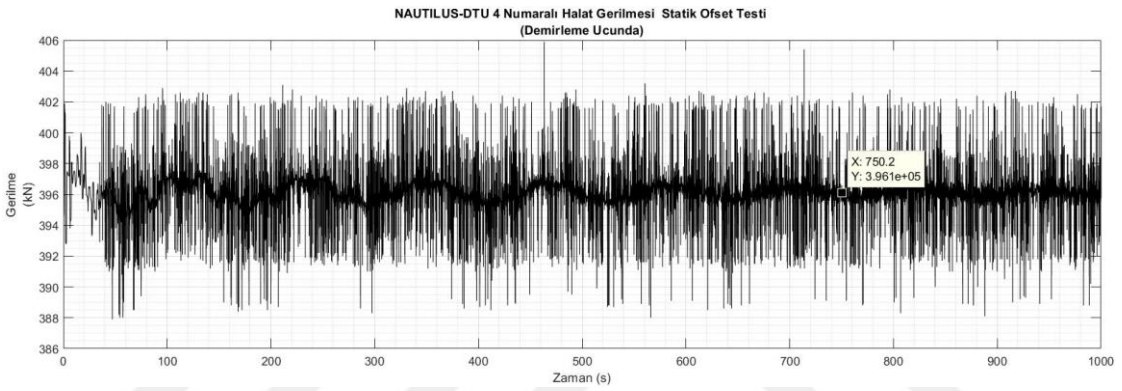


Şekil 182. NAUTILUS-DTU 2- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)





Şekil 183. NAUTILUS-DTU 3- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)



Şekil 184. NAUTILUS-DTU 4- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)

Elde edilen platform başlangıç koşulları ve bağlama sistemleri gerilmeleri aşağıda tablolarda verilmiştir.

Tablo 41. NAUTILUS-DTU platform 6 serbestlik dereceli hareketi başlangıç koşulları

	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp- çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
Başlangıç koşulları	0,060 m	-0 m	-0,045 m	-0°	-0,243°	-0°

Tablo 42. NAUTILUS-DTU halat gerilmeleri

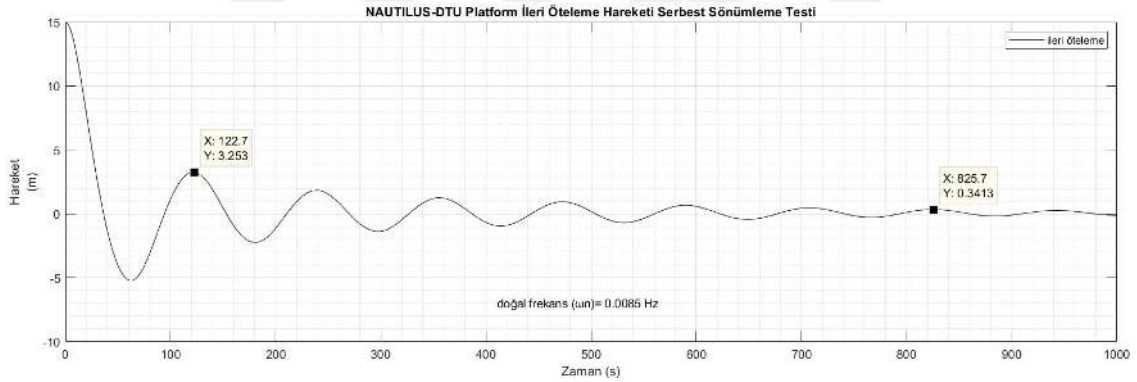
Halat numarası	Halat gerilmeleri (kN)	
	Platform ucu	Demirleme ucu
Halat-1	651,1	396,0
Halat-2	614,5	396,2
Halat-3	614,6	396,2
Halat-4	615,3	396,1



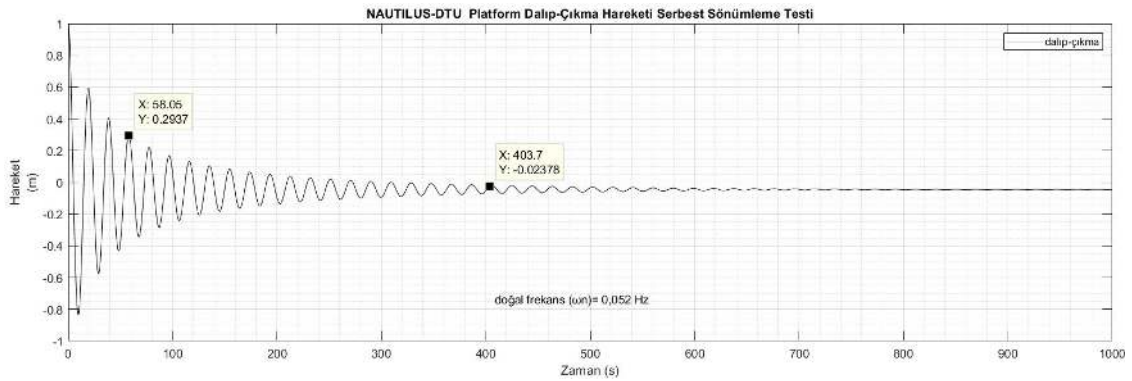
2.9.4.3.4. NAUTILUS-DTU Serbest Sönümlleme Testi

Bu test ile doğal frekanslar belirlenerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca destek elemanlarının doğal frekanslar üzerindeki etkileri de burada incelenmiştir. Bunun için hem destek elemanlı hem de destek elemansız bir şekilde simülasyon gerçekleştirilmiş, sonuçlar sunulmuştur.

Test için statik ofset testinde olduğu gibi NREL tarafından geliştirilen FAST yazılımının 8. Sürümü olan OPENFAST kullanılmıştır. Serbest sönümlleme testi, doğal frekansları belirlemek için dış kuvvetler olmadan (gelen dalga ve rüzgâr yok) belirli başlangıç değerleri ile hareketin başlamasına izin verilerek simüle edilerek gerçekleştirilmektedir. Sonuçlar, platformun 4 serbestlik dereceli hareketleri (ileri öteleme,, dalıp-çıkma, baş-kıç vurma, savrulma) için verilmiştir. Burada kule, kanatlar ve jeneratör rijit kabul edilerek birlikte hareket etmektedir. Platform ve bağlantı sistemleri için 6 serbestlik dereceli harekete izin verilmiştir. Sonuçlar Tablo 44. ve Tablo 45.' de verilmiştir.

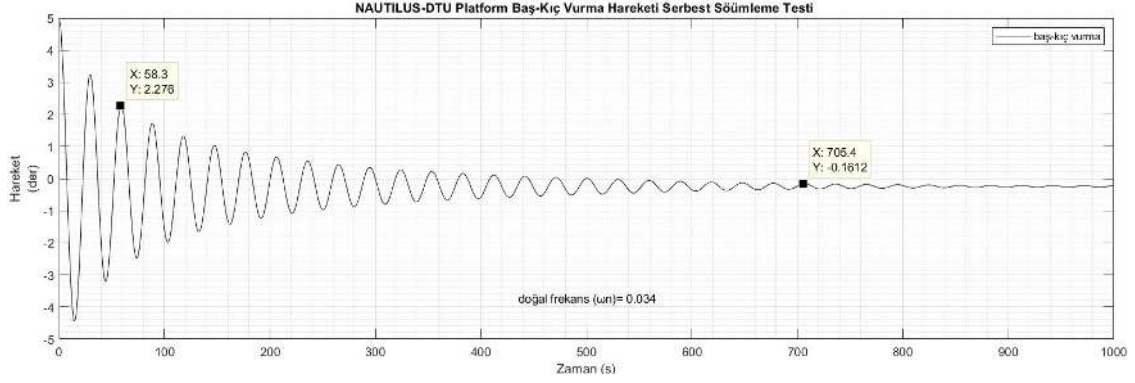


Şekil 185. NAUTILUS-DTU platform ileri öteleme hareketi serbest sönümlleme testi

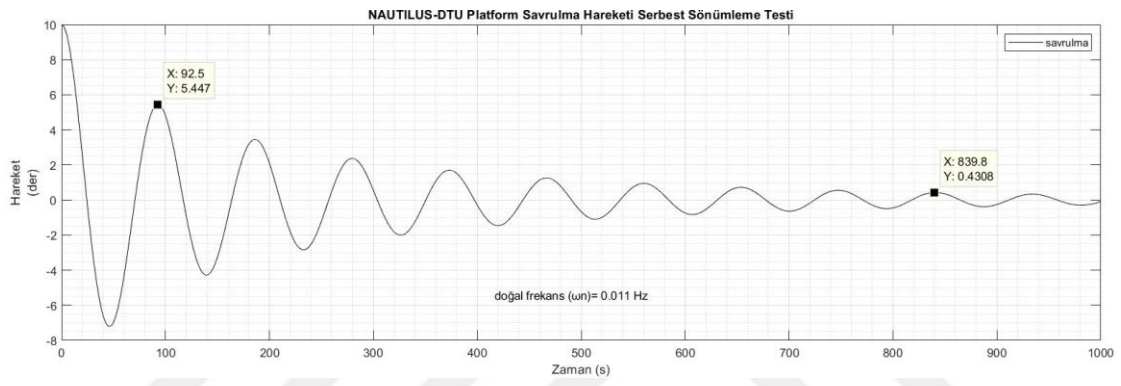


Şekil 186. NAUTILUS-DTU platform dalıp-çıkma hareketi serbest sönümlleme testi





Şekil 187. NAUTILUS-DTU platform baş-kıç vurma hareketi serbest sönümlenme testi



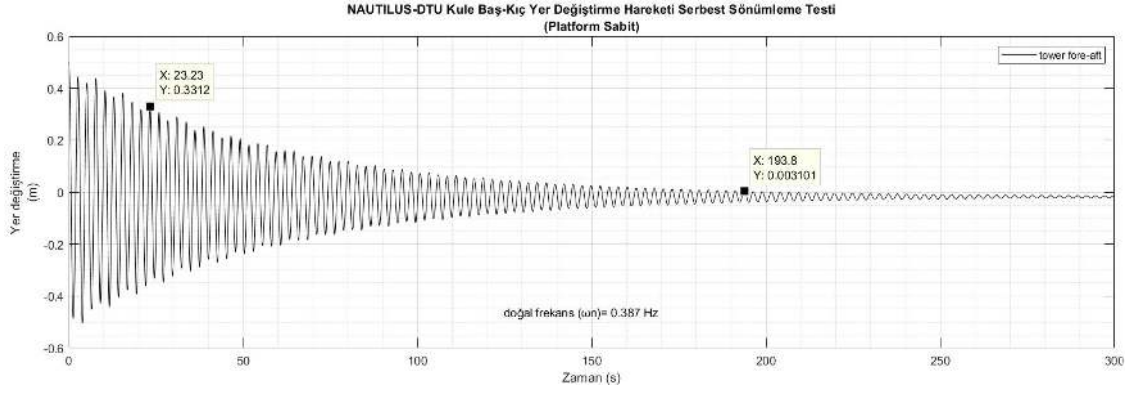
Şekil 188. NAUTILUS-DTU platform savrulma hareketi serbest sönümlenme testi

Platformun simetrik olmasından dolayı, yanal öteleme hareketi burada gösterilmemiştir. Ayrıca yalpa hareketi de baş-kıç vurma hareketinden çok daha küçük olmasından dolayı burada yine gösterilmemiştir. Ayrıca platformun baş-kıç vurma hareketi yalpa hareketini de içermektedir.

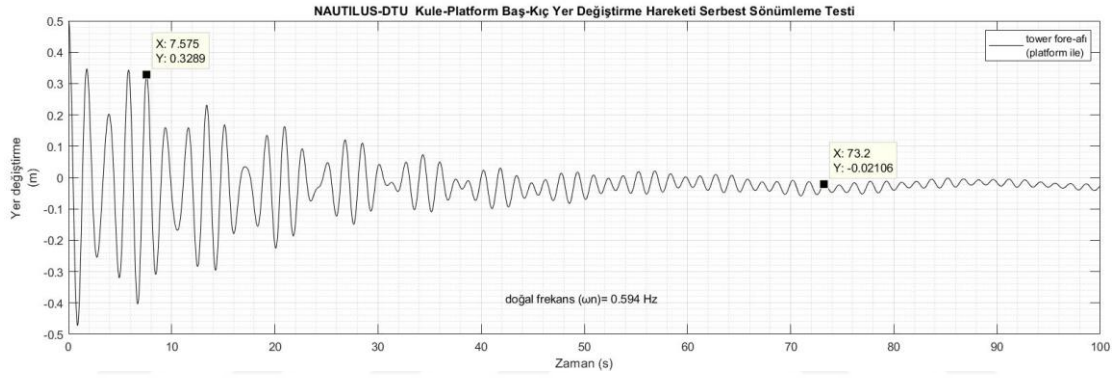
Platform hareketlerinin serbest sönümlenme testleri gerçekleştirildiği gibi, aynı şekilde kule için de serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Burada ilk önce platform hareketleri kısıtlanarak platform sabit hale getirilmiş şekilde, kulenin platformdan bağımsız olarak hareket ettiği kabul edilerek serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kule ve platform beraber hareket edecek şekilde platformun hareketleri kısıtlanmadan serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Böylece yalnız kulenin ve kule platform birlikte iken doğal frekansları (ω_n) karşılaştırılmıştır.

Kulenin hareketleri, x- ekseni yönünde baş-kıç yer değiştirme hareketi (fore-aft) ve y- ekseninde ise bordadan-bordaya yer değiştirme (side-side) olacak şekilde adlandırılmıştır.

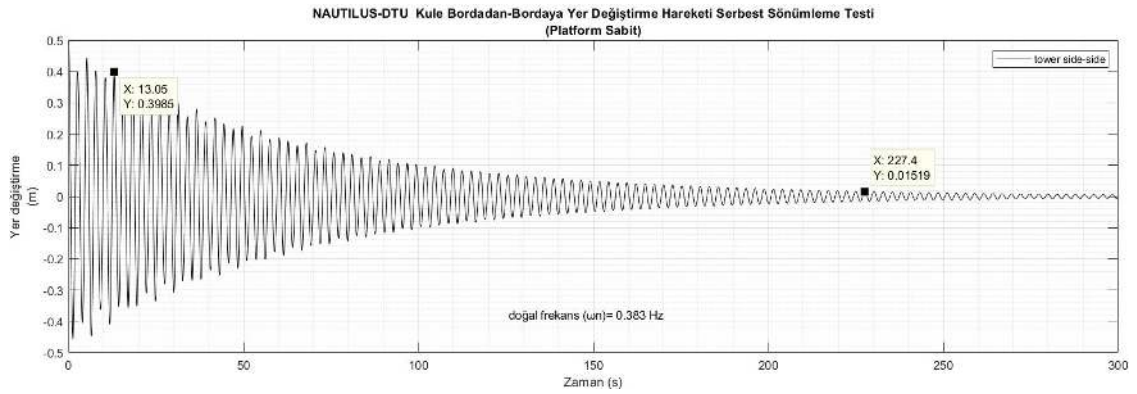




Şekil 189. NAUTILUS-DTU kule baş-kıç (fore-aft) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi

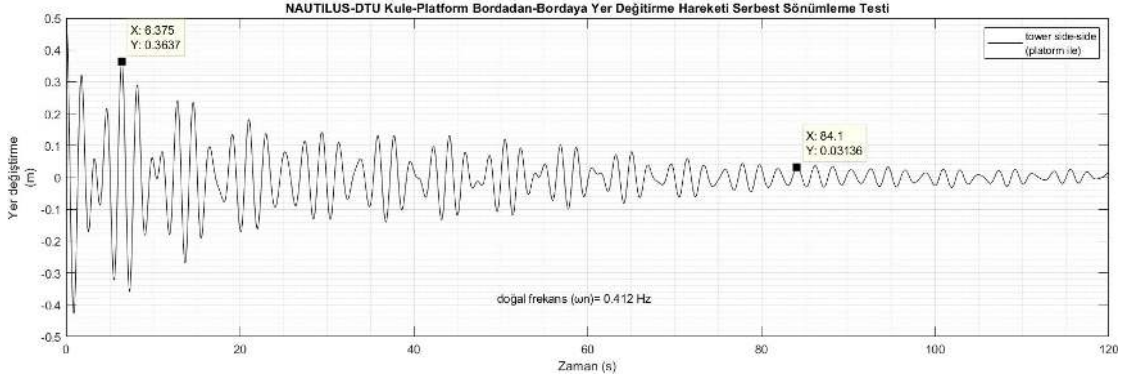


Şekil 190. NAUTILUS-DTU kule-platform baş-kıç (fore-aft) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi



Şekil 191. NAUTILUS-DTU kule bordadan-bordaya (side-side) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi





Şekil 192. NAUTILUS-DTU kule-platform bordadan-bordaya (side-side) yer değiştirme hareketi serbest sönümleme testi

NAUTILUS-DTU konsepti için doğal frekans sonuçları tabloda aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

Tablo 44. NAUTILUS-DTU platform doğal frekansları

Özellik	İleri öteleme	Dalıp-çıkma	Baş-kıç vurma	Savrulma
Doğal periyot (s)	117,17	19,20	29,41	93,41
Doğal frekans (Hz)	0,0085	0,0521	0,0340	0,011
Doğal açısal frekans (rad/s)	0,054	0,327	0,214	0,067
Sönüm oranı	0,051	0,017	0,018	0,044

Tablo 43. NAUTILUS-DTU kule doğal frekansları

Özellik	Kule f-a	Kule s-s	Kule+platform f-a	Kule+platform s-s
Doğal periyot (s)	2,58	2,61	1,68	2,43
Doğal frekans (Hz)	0,387	0,383	0,594	0,412
Doğal açısal frekans (rad/s)	2,44	2,41	3,74	2,59
Sönüm oranı	0,005	0,006	0,009	0,013

Tablo 43. kule frekansları incelendiğinde, platformun sabit olduğu durumdaki doğal periyotları (fore-aft ve side-side için) kule + platformun birlikte hareket ettiği duruma göre daha büyük; dolayısıyla doğal frekanslarının daha küçük olduğu görülmektedir. Böylece rezonans durumundan uzaklaşmaktadır. Ayrıca sönüm oranı kule ve platform birlikte hareket ettiği durumlarda daha fazladır.

NAUTILUS-DTU uygulamasının Hmedi vd. [216] tarafından gerçekleştirilen sayısal uygulama ve Galvan vd. [217] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmanın karşılaştırması aşağıda verilmiştir.



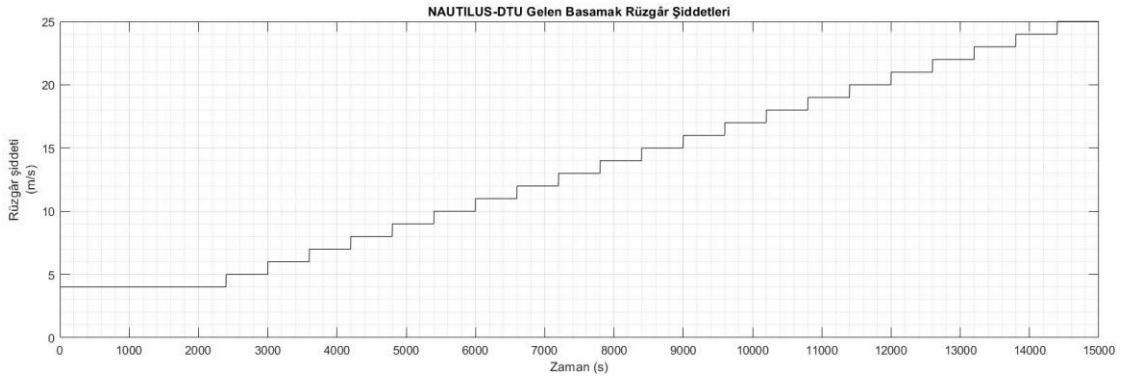
Tablo 44. NAUTILUS-DTU platform doğal frekansları (Hz) uygulama ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Çalışmalar	İleri öteleme	Dalıp-çıkma	Baş-kıç vurma	Savrulma
Uygulama	0,0085	0,0521	0,034	0,011
Hmedi vd. sayısal [216]	0,0085	0,052	0,033	0,011
Galvan vd. deneysel [217]	0,0085	0,052	0,034	0,011

Sonuçlar incelendiğinde tutarlı bir şekilde analizlerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Böylece NAUTILUS-DTU konsepti validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.9.4.3.5. Basamak Rüzgâr Altında NAUTILUS-DTU Konsepti Tepkileri

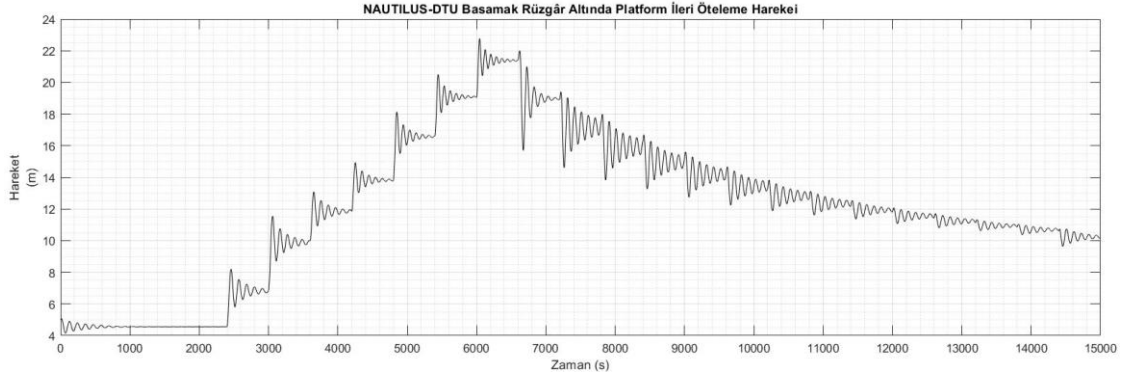
NAUTILUS-DTU konseptinin rüzgâr altındaki simülasyonu, önceki kısımlarda anlatılan OC-3 Hywind ve OC-4 DeepCwind konseptlerinden farklı olarak, sabit rüzgâr yerine basamak rüzgâr (stepwind) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için 4 m/s-25 m/s arasında düzenli şekilde artış gösteren rüzgâr hızları bilgileri kullanılmış ve simülasyon 15000 s sürmüştür. Grafikler aşağıda sunulmuştur.



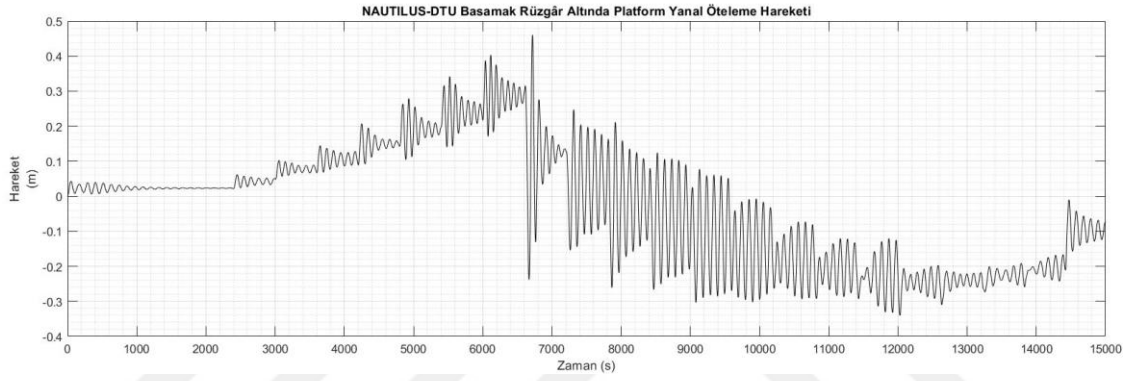
Şekil 193. NAUTILUS-DTU gelen basamak rüzgâr profili

Gelen rüzgâr profili Şekil 194.'deki gibi verilmiştir. 15000 s boyunca 4 m/s ile 25 m/s arasında gelen rüzgâr hızı düzgün bir şekilde artmaktadır. Bu süreler ve ilgili rüzgâr hızı altında NAUTILUS-DTU platform hareketleri ise aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

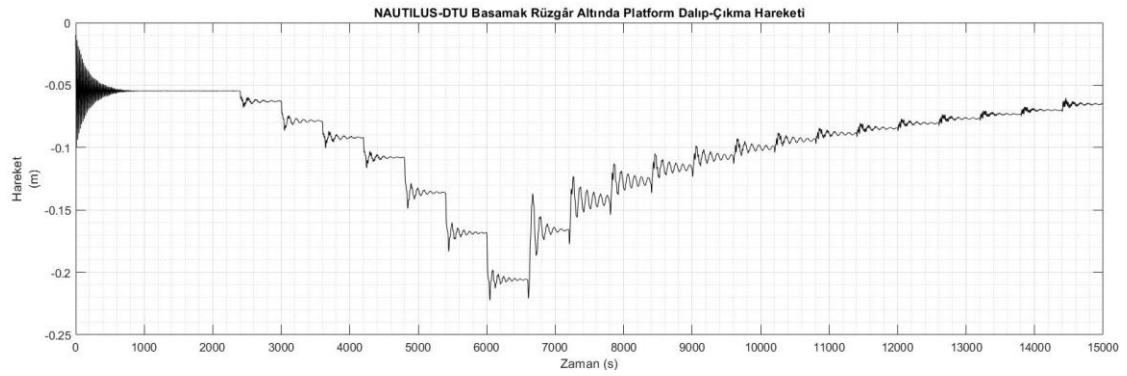




Şekil 194. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform ileri öteleme hareketi

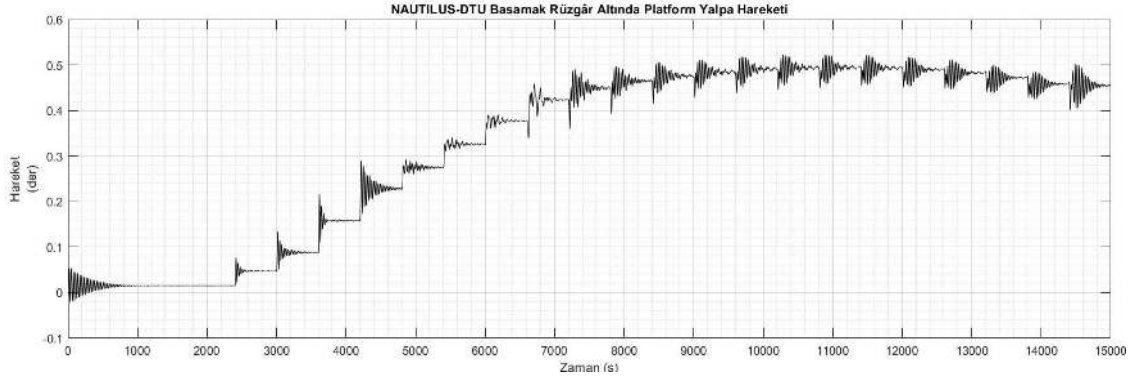


Şekil 195. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform yanal öteleme hareketi

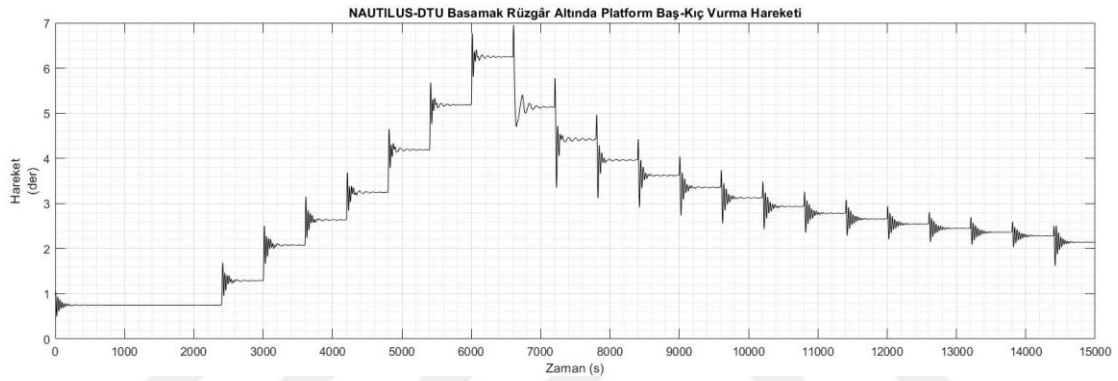


Şekil 196. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform dalıp-çıkma hareketi

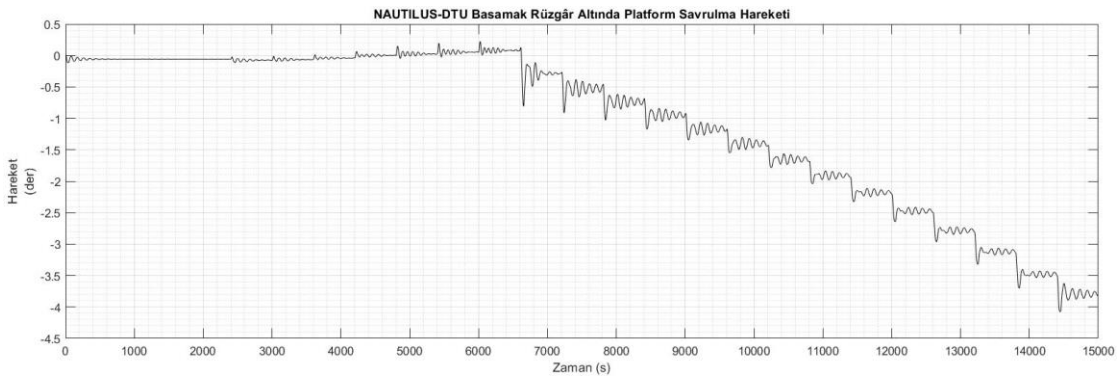




Şekil 197. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform yalpa hareketi



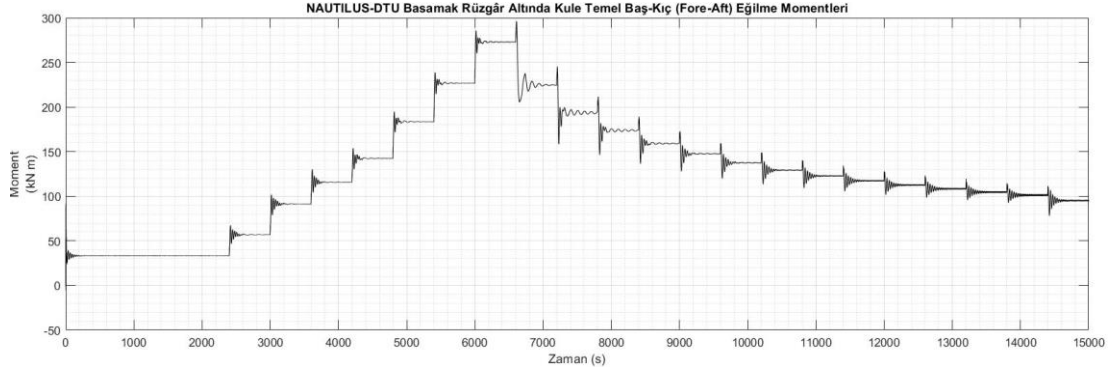
Şekil 198. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform baş-kıç vurma hareketi



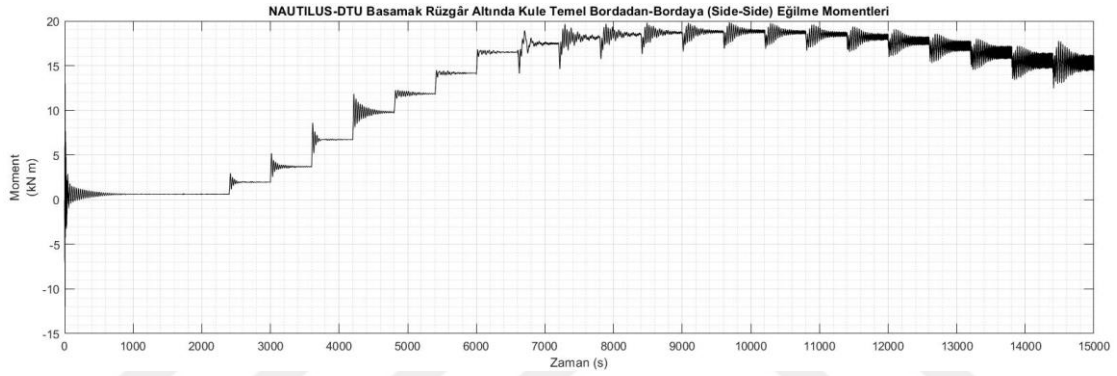
Şekil 199. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform savrulma hareketi

NAUTILUS-DTU kule hareketleri için ise, kule temelini x- ekseninde oluşan bordadan-bordaya (side-side) ve y- ekseninde oluşan baş-kıç (fore-aft) eğilme momentleri değişimleri aşağıda şekillerdeki gibi bulunmuştur.



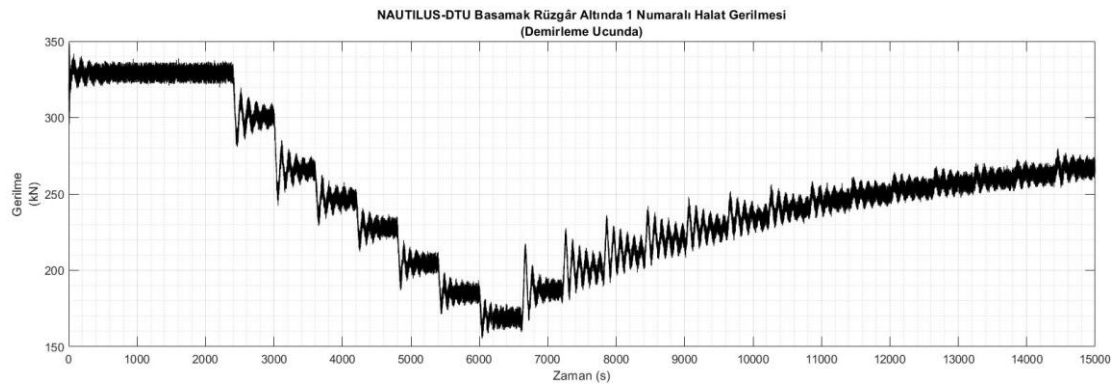


Şekil 200. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında kule baş-kıç vurma (fore-aft) eğilme momenti analizi



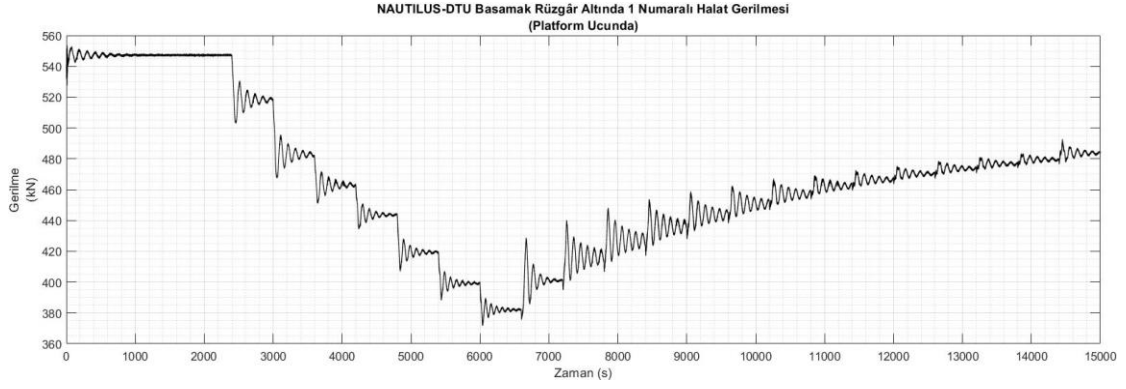
Şekil 201. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında kule bordadan-bordaya (side-side) eğilme momenti analizi

Basamak rüzgâr altında NAUTILUS-DTU bağlantı sistemlerindeki gerilmeler aşağıdaki gibi gösterilmiştir. Bağlantı sistemleri 4 katener bağlı halattan oluşmak üzere, platform ucu (fairten) ve demirleme ucundaki(anchten) gerilmeler gösterilmiştir.

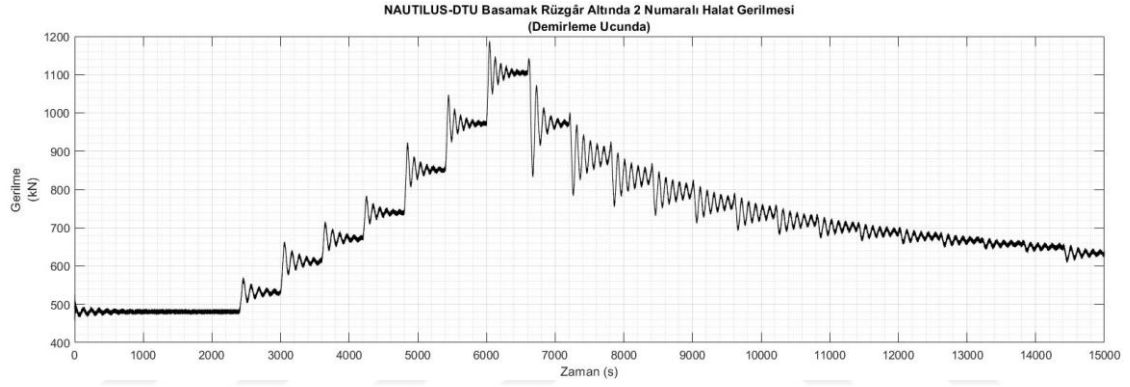


Şekil 202. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 1 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)

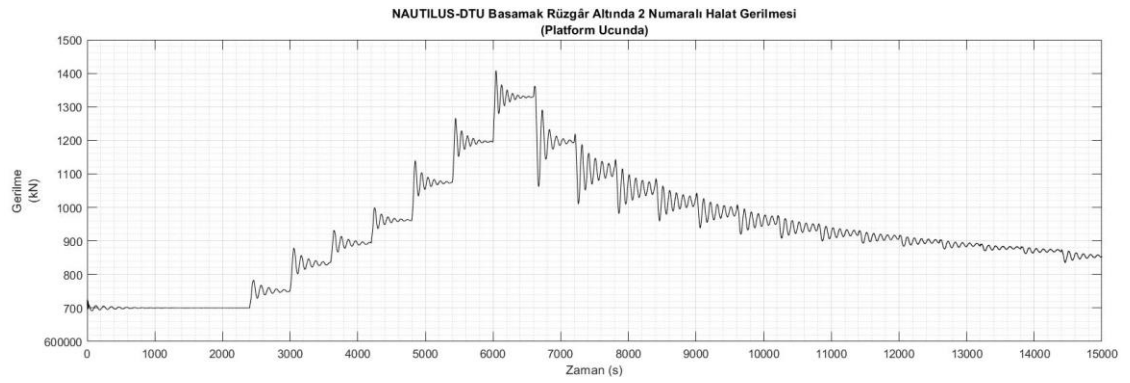




Şekil 203. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 1 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)

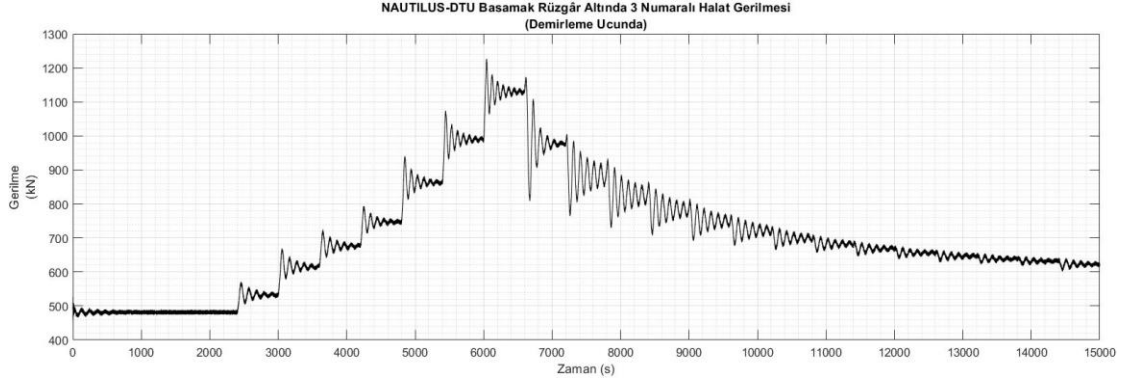


Şekil 204. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 2 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)

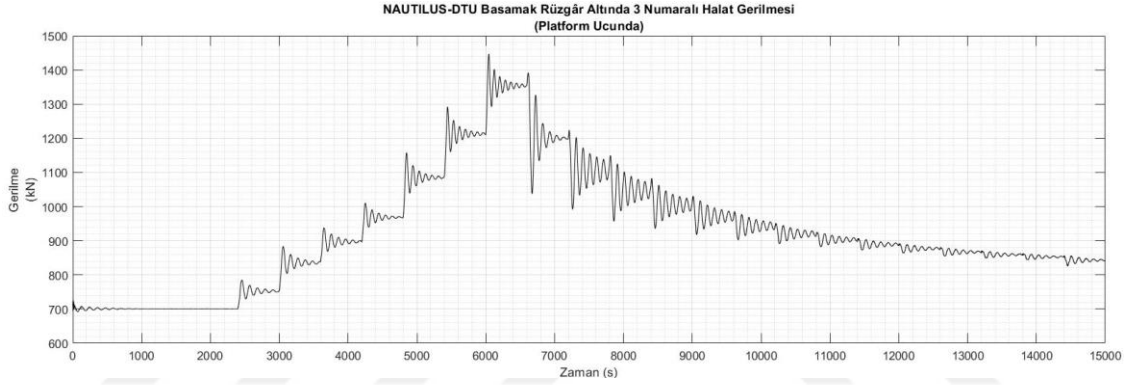


Şekil 205. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 2 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)

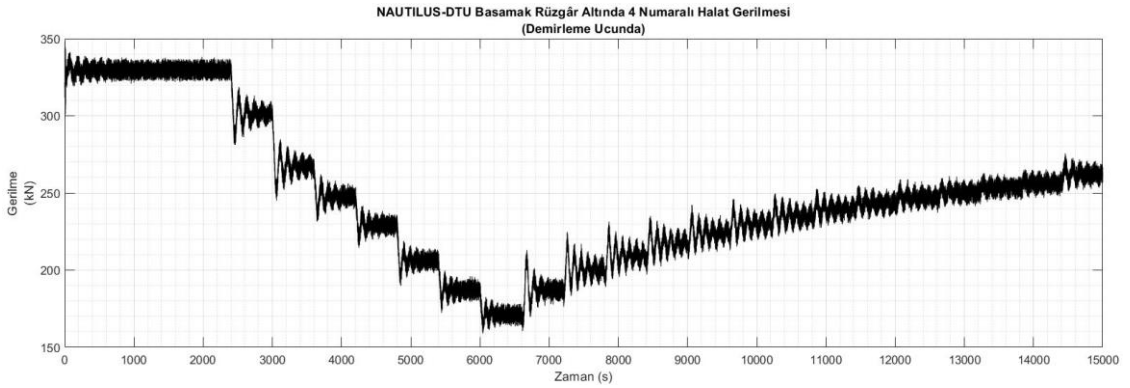




Şekil 206. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 3 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)

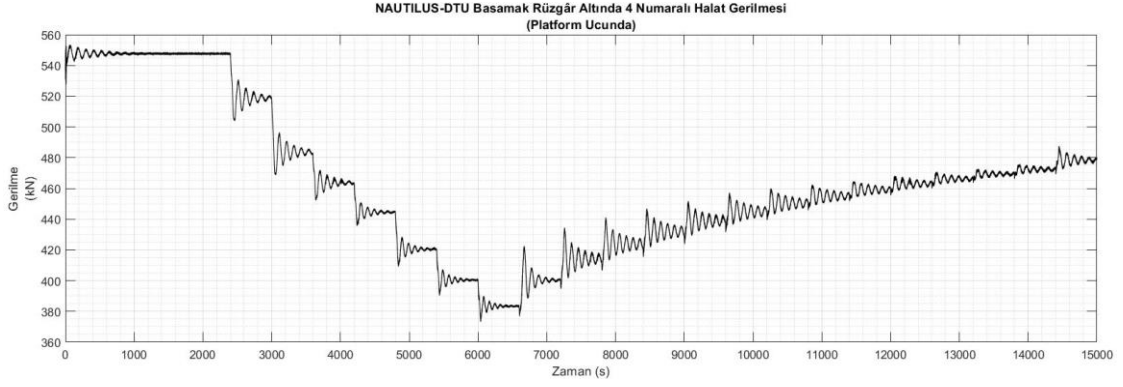


Şekil 207. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 3 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)



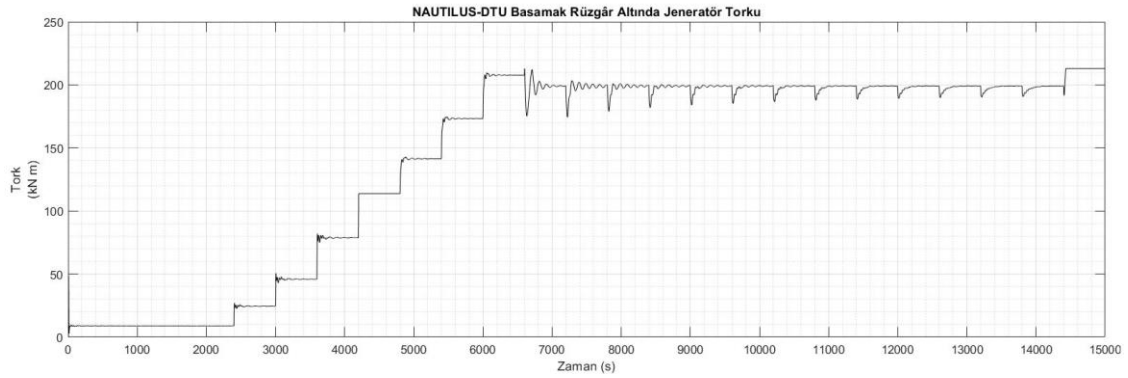
Şekil 208. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 4 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)





Şekil 209. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında 4 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)

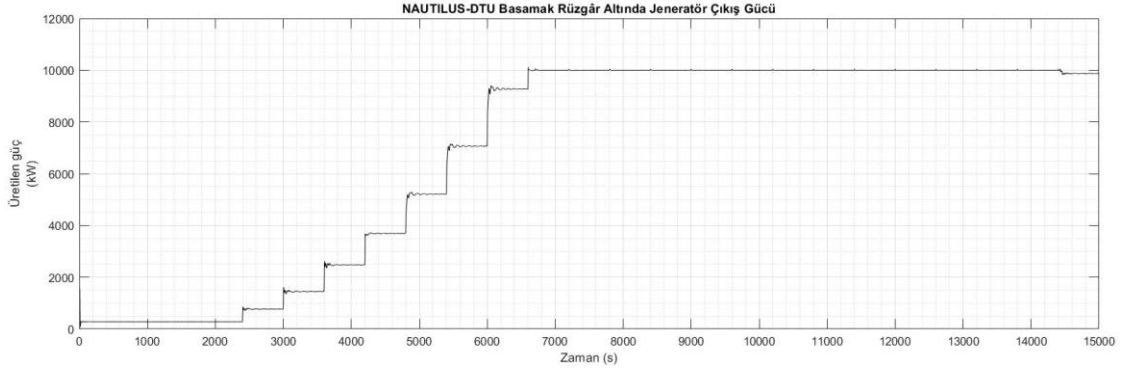
Bu analizde kontroller aktif durumdadır. Rüzgârın şiddetine göre türbin park pozisyonuna otomatik olarak geçmektedir. Türbin park durumundayken jeneratör çalışmamaktadır. Bu durumu gösteren jeneratör torku davranışı Şekil 210.'de gösterilmiştir.



Şekil 210. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında jeneratör torku

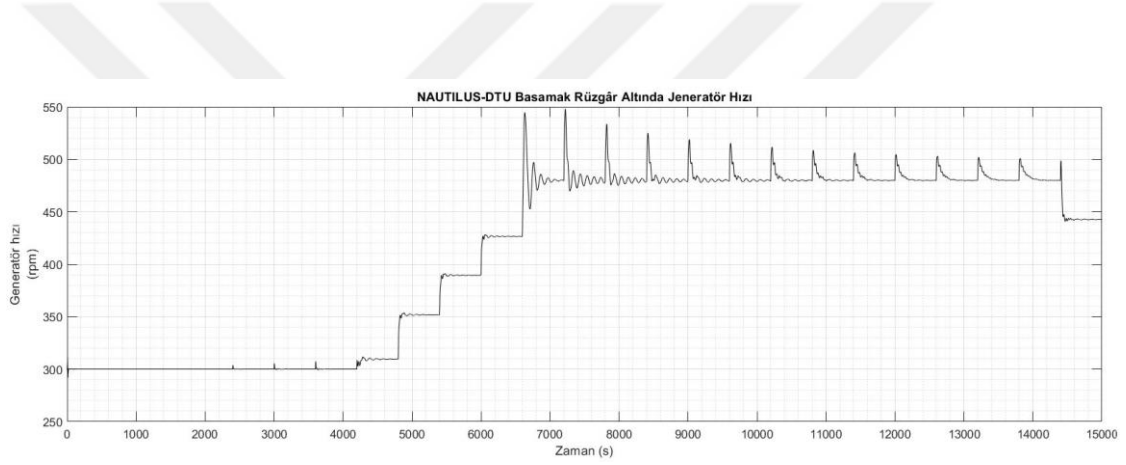
Oluşan bu jeneratör torkuna göre de basamak rüzgâr hızı altında türbin çıkışından alınan güç Şekil 211.'de verilmiştir.





Şekil 211. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında jeneratör çıkış gücü

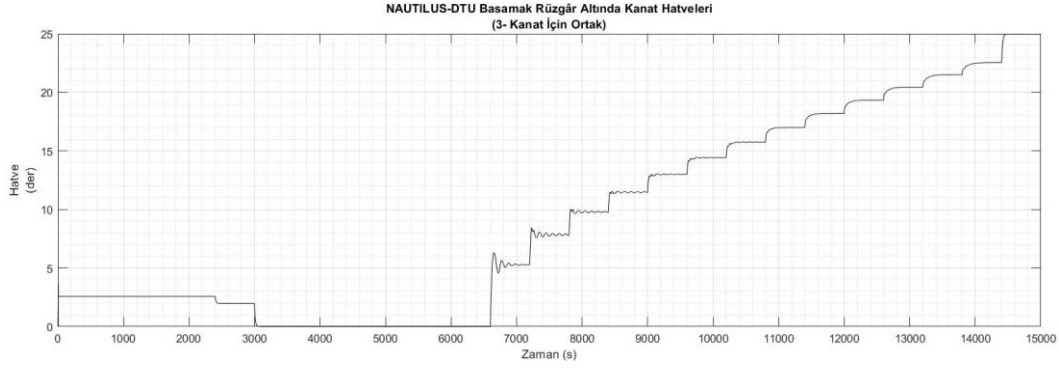
Jeneratör hızı ise, şekil 212.'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 212. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında jeneratör hızı

Kanat hatve kontrol mekanizması, gelen rüzgâr hızına göre kanat hatvelerini otomatik olarak ayarlamaktadır. Şekil 213.'de 3 kanat için ortak kanat hatvelerinin değişimi gösterilmiştir.

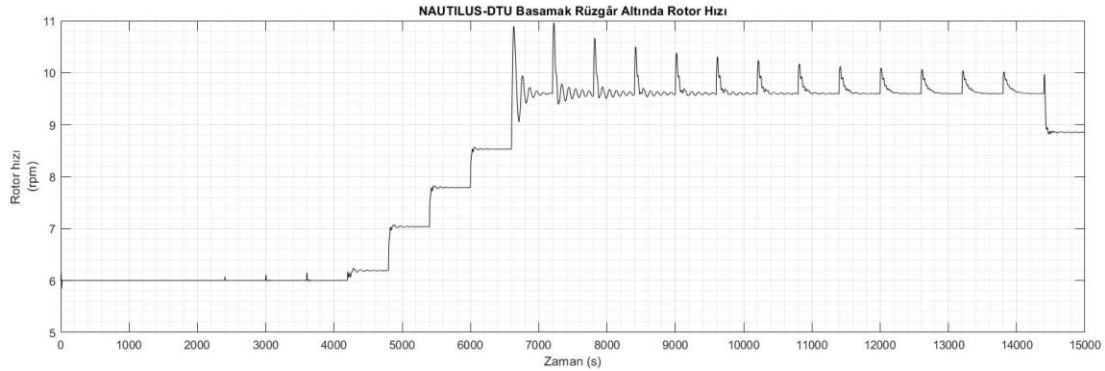




Şekil 213. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında kanat hatveleri (3- kanat için ortak)

Şekil 213. incelendiğinde kanat hatvesinin, 3000 s ile 6600 s simülasyon zamanı arasında 0° olduğu görülmektedir. Aynı simülasyon zamanlarında Şekil 193.'e göre rüzgâr hızı 11 m/s ile 15 m/s arasında değişmektedir. Bu değerler türbinin anma şiddeti ile denk gelmektedir ve türbin çıkışından alınan güç maksimumdur. Bu durum da Şekil 211.'den anlaşılmaktadır.

Türbinin çalışmasını etkileyen diğer faktör olan rotor hızı için zaman tanımlı alanda basamak rüzgâr altındaki analizi de Şekil 214.te gösterilmiştir.

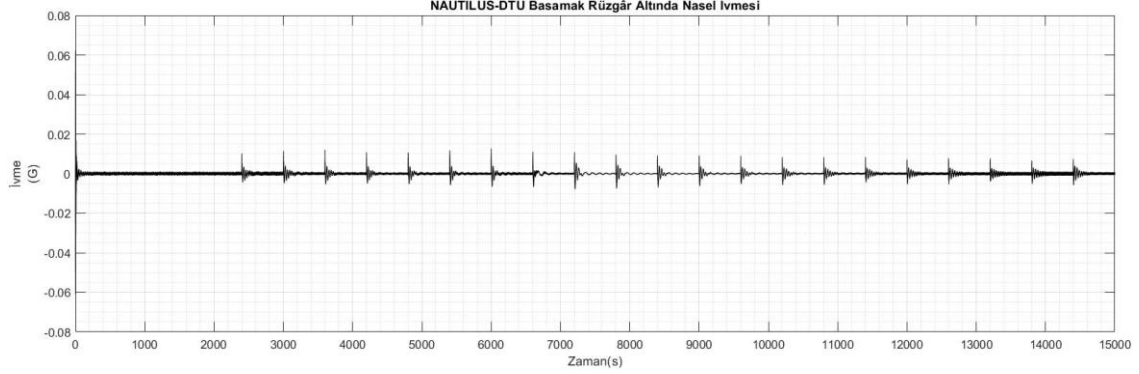


Şekil 214. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında rotor hızı

NAUTILUS-DTU naseli incelenecek olursa, sabit düzenli artan basamak rüzgâr hızları altında nasel üzerindeki oluşan ivmenin, yerçekimi kuvveti (G) cinsinden analizi Şekil 215.'de gösterilmiştir. Buna göre nasel hareketi kaynaklı ivme 0,02 G'den az olması durumunda herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Ancak 0,02 G'nin üzerindeki değerler



türbine ve kuleye zarar verebilmektedir [6]. Gerçekleştirilen bu simülasyon şartlarına göre nasele hareketinden dolayı oluşacak herhangi bir kuvvet tehlike arz etmemektedir.



Şekil 215. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında nasele ivmesi

Gerçekleştirilen bu analizlerden sonra NAUTILUS-DTU konsepti için sabit olarak artan basamak rüzgâr hızları altında platform hareketleri, kule hareketleri, bağlama sistemleri tepkileri, jeneratör torku, jeneratör çıkış gücü, kanat hatveleri, rotor hızı ve nasele ivmesi için istatistiksel değerler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Tablo 45. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında platform hareketleri zamana bağlı simülasyon sonuçları

Platform hareketleri	Birim	Ortalama	Min.	Maks.	Std.
İleri öteleme	m	12,1651	4,1510	22,77	4,6281
Yanal öteleme	m	-0,0262	-0,3407	0,4611	0,1694
Dalıp-çıkma	m	-0,0986	-0,2223	-0,010	0,0397
Yalpa	der.	0,3260	-0,0221	0,5225	0,1865
Baş-kıç vurma	der.	2,8674	0,0551	6,9490	1,4330
Savrulma	der.	-1,0684	-4,0780	0,2235	1,2327



Tablo 46. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında kule hareketleri zamana bağlı simülasyon sonuçları

Kule hareketleri	Birim	Ortalama	Min.	Maks.	Std.
Kule f-a momenti	kN	126,11	-5,284	296,3	62,45
Kule s-s momenti	kN	12,55	-11,96	19,83	6,95

Tablo 47. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında bağlama sistemleri halat gerilmeleri zamana bağlı simülasyon sonuçları

Bağlama halatları	Konumu	Birim	Ortalama	Min.	Maks.	Std.
Halat no 1	Anch.	kN	249,48	155,3	348,5	45,49
	Fair.	kN	465,68	371,7	553,5	46,75
Halat no 2	Anch	kN	711,93	455,7	1188	161,7
	Fair	kN	933,60	690,9	1408	163,0
Halat no 3	Anch	kN	706,87	457,5	1227	166,8
	Fair	kN	929,97	691,9	1447	167,9
Halat no 4	Anch	kN	247,33	159,0	348	45,55
	Fair	kN	462,95	373,2	553,5	47,04

Tablo 48. NAUTILUS-DTU basamak rüzgâr altında diğer büyüklükler zamana bağlı simülasyon sonuçları

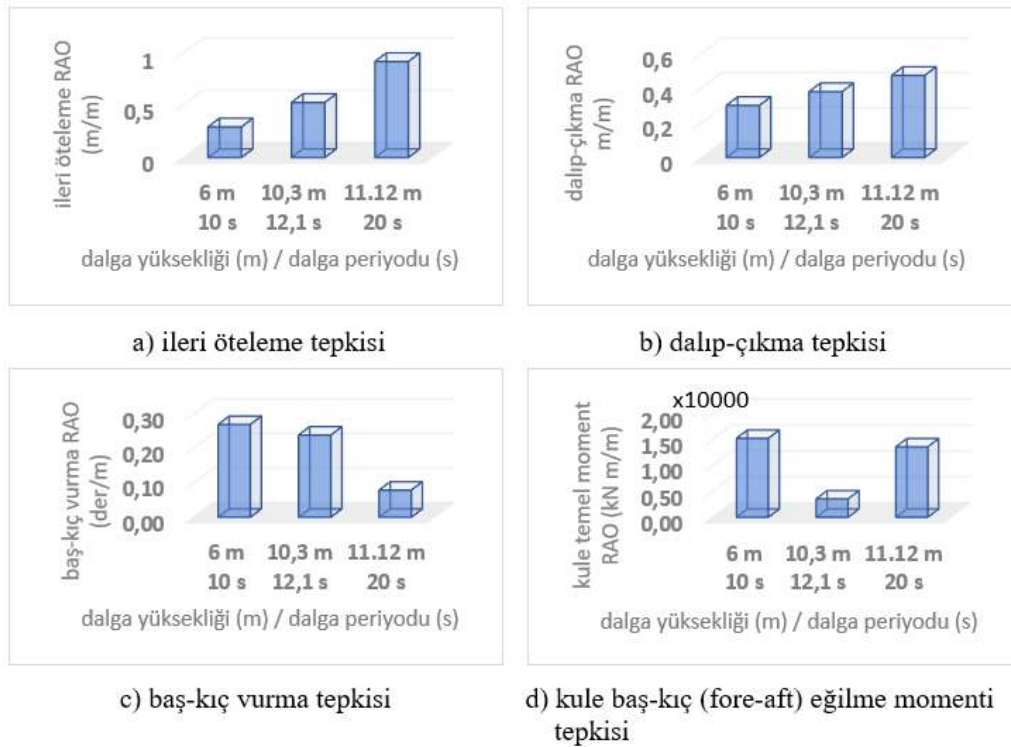
Özellik	Birim	Ortalama	Min.	Maks.	Std.
Jeneratör torku	kN m	144,101	0	212,9	77,35
Jeneratör çıkış gücü	kW	6832,8	0	10120	4074,8
Jeneratör hızı	rpm	411,93	291,70	547,90	82,54
Kanat hatvesi	der	9,32	0	24,97	8,43
Rotor hızı	rpm	8,24	5,84	10,96	1,65
Nasel ivmesi	G	1,513e-07	-0,061	0,0623	0,0011



Tablo 48.'de bulunan nasel ivmesi için maksimum değer 0,06 G değeri, 0,02 G'den büyüktür. Burada naselin hasar vereceği düşünülebilir ancak; Şekil 215.'e bakıldığında bu değer bir anlık başlangıç zamanı içerisinde (0 s) olduğu, uzun sürmediği görülmektedir. Bu durumda herhangi bir olumsuzluk beklenmemektedir.

2.9.4.3.6. Düzenli Dalga Altında NAUTILUS-DTU Konsepti Tepkileri

Bu kısımda rüzgârın olmadığı, düzenli dalga (sinüs dalgası) altındaki hareketler incelenmiştir. Simülasyon zamanı 1800 s seçilmiştir. Kanat hatveleri 0° ancak jeneratör kapalı durumdadır. İlgili dalgalar için tepki genlik operatörleri (RAO) karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırılan dalga yükseklikleri 6 m, 10,3 m ve 11,12 m olup, pik periyotları sırasıyla 10 s, 12,1 s ve 20 s olarak belirlenmiştir. Hareketlerden ileri öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri ile kule baş-kıç (fore-aft) momenti karşılaştırmaları gösterilmiştir. Diğer hareketlerden yanal öteleme, yalpa ve savrulma hareketi ile kule bordadan-bordaya (side-side) moment tepki genlikleri ihmal edilecek kadar çok küçük olduğu için 0' a eşit alınmış ve grafiklerde gösterilmemiştir.



Şekil 216. Düzenli dalgalar altında (sinüs dalgası) NAUTILUS-DTU platform ve kule tepki genlik operatörleri (RAO)



2.9.4.4. LIFES50+ OO-STAR Konsepti

Bu kısımda validasyonu gerçekleştirilen OO-STAR+ konsepti, HORIZON 2020 LIFES50+ projesi olarak Maine Körfezi (GoM) için Olav Olsen [218] tarafından geliştirilmiş diğer platform konseptidir.

OO-STAR+ yarı-batık (semi-sub) bir platform olup, 3 kolondan oluşmaktadır. Kolonlar beton olarak yapılabileceği gibi, hibrit olarak da imal edilebilmektedir. Altta 3 dış kolonu birbirine bağlayan Y tabanlı bir dubadan oluşmaktadır. Türbin kulesi bu 3 kolonun merkezine bir destek elemanı ile bağlanmıştır. Konsept bağlama sistemlerinde ise 3 katır bağli halat kullanılmaktadır.



Şekil 217. LIFES50+ OO-STAR konsepti [218].



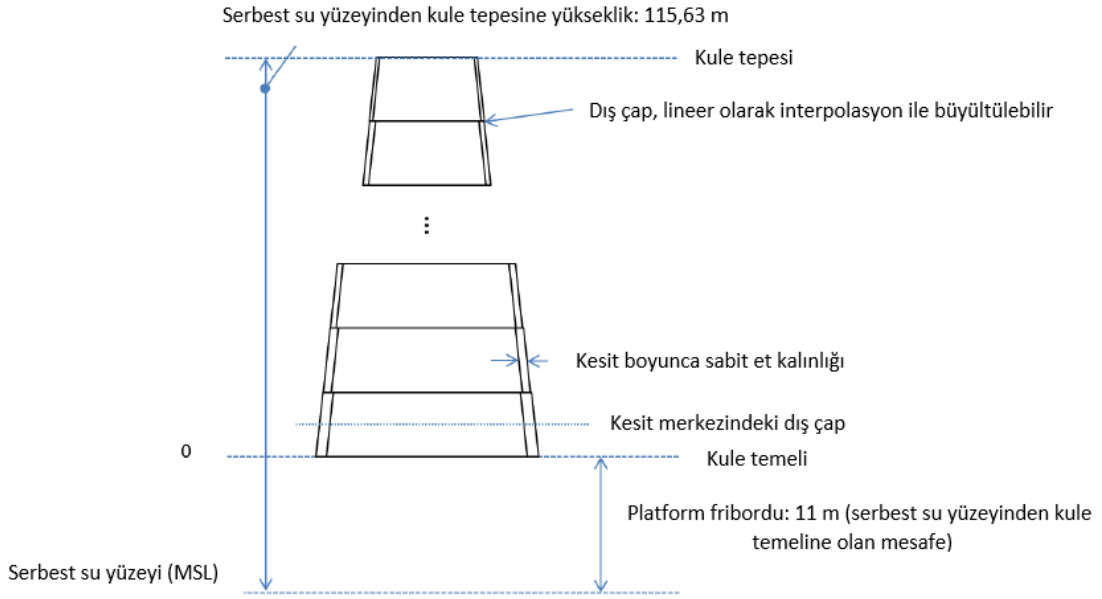
2.9.4.4.1. LIFES50+ OO-STAR Kule Özellikleri

LIFES50+ OO-STAR yarı-batık (semi-sub) platformu tasarımının kulesi, her biri sabit bir duvar kalınlığına sahip segmentler halinde Şekil 217.'de [218] gösterildiği gibi tanımlanmaktadır. Öte yandan çap, her segment içinde doğrusal olarak enterpolasyon yapılarak bulunmaktadır. Kule üstü doğrudan nasek kutusuna (RN) bağlanmaktadır. Kule kurulumunun bir taslağı Şekil 217'de [218] gösterilmiştir.

Tablo 49. LIFES+ OO-STAR kule özellikleri [218].

Özellik	Birim	Değer
Platform fribordu (serbest yüzeyden kule tabanına yükseklik, tam aktif balast halinde)	m	11
Serbest su yüzeyinden kule tepesine olan yükseklik (tam aktif balast halinde)	m	115,63
Kulenin toplam kütlesi	kg	1.257.000
Kule kütle merkezi konumu (kule merkez hattı boyunca zeminden yüksekliği)	m	49,8
Elastisite modülü (E)	N/m ²	2,1 E+11
Kayma modülü (G)	N/m ²	8,08E+10
Yapısal sönümleme		%1



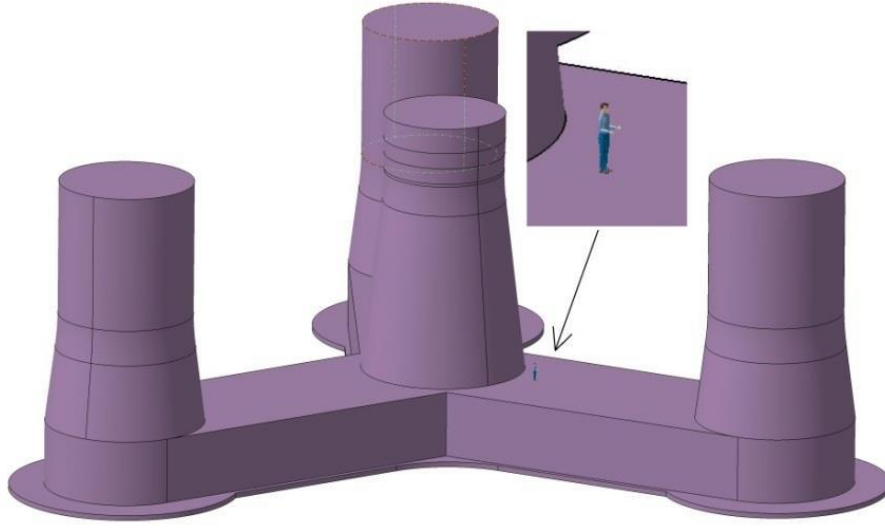


Şekil 218. LIFES50+ OO-STAR kule tanımı [218].

2.9.4.4.2. LIFES50+ OO-STAR Platform ve Bağlama Sistemleri Tasarım Parametreleri

LIFES50+ OO-STAR yarı-batık platformu, üzerine merkezi bir kolon ve üç dış kolonun monte edildiği, yıldız şeklinde bir dubadan oluşmaktadır. Tüm kolonlar silindirik bir üst kısma ve konik bir alt kısma sahiptir. Ana malzeme olarak, çelik yapılarda olduğu gibi daha yüksek bir yer değiştirme hacmi sağlayan ardgermeli beton kullanılmaktadır [218]. Burada ardgerme, beton döküldükten sonra uygulanan öngerme işlemi ve tekniği olarak tanımlanmaktadır. Germe işlemi kalıbın içinde yapılmaktadır.





Şekil 219. LIFES50+ OO-STAR yarı-batık (semi-sub) platformu [218].

Tablo 50. LIFES50+ OO-STAR yarı-batık platform özellikleri (balast dahil) [214].

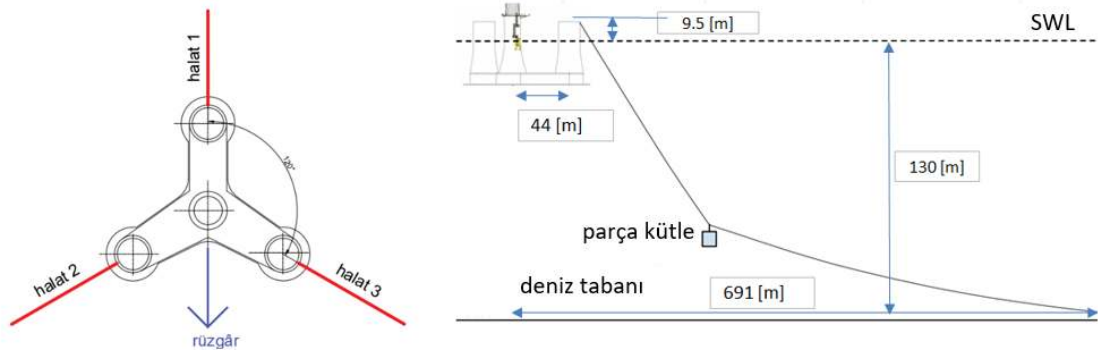
Genel bilgiler	Birim	Değer
Platform kütlesi (kule ve bağlama sistemleri hariç)	kg	21.709.000
Kütle merkezi konumu (CM), serbest yüzeyin altında	m	15,225
Platform yalpa ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	9.430.000.000
Platform baş-kıç vurma ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	9.430.000.000
Platform savrulma ataleti (CM etrafında)	kg x m ²	16.300.000.000
Serbest su yüzeyinden kuleye olan yükseklik	m	11
Denge pozisyonunda platform su çekimi (bağlama sistemleri mevcut)	m	22
Platform deplasman hacmi	m ³	23509
Hacim merkezinin (CB) konumu (MSL'nin altında)	m	14,236



Tablo 51. LIFES50+ OO-STAR dağıtımli yapısal özellikler [218].

Üye	Tanım	Yarı çap	Yoğunluk	Uzunluk	EA	EI _y	EI _z	GJ
-	-	m	kg/m	m	N	N m ²	N m ²	N m ²
1	Duba	-	1,73E5	21,1	6,39E11	5,53E12	1,97E13	1,05E13
2	Alt dış kolon	7,9	1,4E5	7	5,81E11	2,20E13	2,20E13	1,83E13
3	Dış kolon konik kısmı	-	9,28E5	11,5	5,36E11	1,62E13	1,62E13	1,35E13
4	Üst dış kolon	6,7	4,55E4	13,5	4,90E11	1,04E13	1,04E13	8,64E12
5	Alt merkez şaft	8,1	1,17E5	7	8,82E11	2,69E13	2,69E13	2,24E13
6	Konik kısm merkez şaft	-	8,73E4	17,775	7,39E11	1,84E13	1,84E13	1,53E13
7	Üst merkez şaft	6,03	5,76E4	8,225	5,96E11	9,88E12	9,88E12	8,23E12

LIFES50+ OO-STAR konsepti bağlantı sistemleri 3 katener bağlı halattan oluşmaktadır. Halatlar arası açı 120°'dir. Her halata, sistemi iki parçaya ayıran bir parça kütle (clump weight) eklenmiştir [218].



Şekil 220. LIFES50+ OO-STAR bağlama sistemleri düzeni



Tablo 52. LIFES50+ OO-Star bağlama sistemleri genel özellikleri [218].

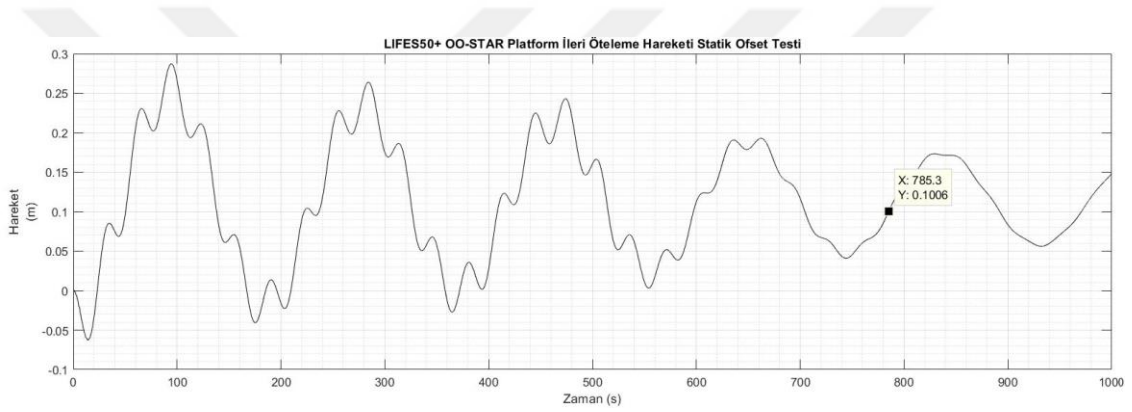
Genel bilgiler	Birim	Değer
Su derinliği	m	130
Halat sayısı	-	3
Halatlar arası açısı	der.	120
Parça kütle ağırlığı (suda)	kg	50000
Gerilmemiş bağlama halatı toplam uzunluğu (platform arası-parça kütle arası)	m	118
Gerilmemiş bağlama halatı toplam uzunluğu (parça kütle-deniz tabanı arası)	m	585
Serbest su yüzeyi altından platform ucu halat bağlantı noktası derinliği (fairlead)	m	9,5
Platform merkez hattından çapa noktalarına olan yarıçap uzunluğu (deniz tabanında)	m	691
Platform merkez hattından bağlantı noktalarına olan yarıçap uzunluğu (platform üzerinde)	m	44
Parça kütle başlangıç konumu (su hattı altında)	m	90,45
Platform merkez hattından parça kütleye olan başlangıç yarıçap uzunluğu	m	148,6
Bağlama halatı çapı	m	0,137
Efektim hidrolik zincir çapı	m	0,246
Halat ön gerilmeleri	kN	1670
Eş değer uzama sertliği (AE)	MN	1506
Bağlama halatları için hidrodinamik sürüklenme katsayısı	-	2,0
Bağlama halatları için hidrodinamik ek su kütlesi katsayısı	-	0,8
Eşdeğer halat birim kütlesi	kg/m	375,38
Eşdeğer halat birim ağırlığı (suda)	N/m	3200,6
Deniz tabanı sertliği	Pa/m	3.000.000
Deniz tabanı sönümlemesi	Pa S/m	300.000



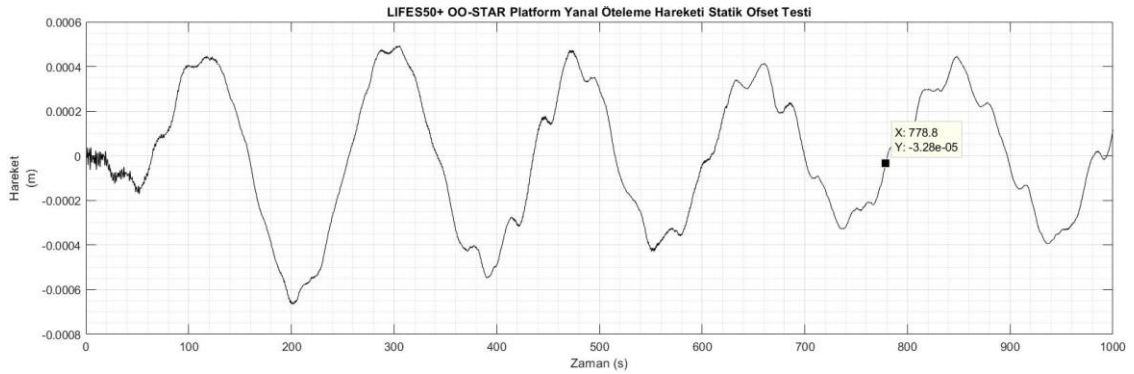
2.9.4.4.3. LIFES50+ OO-STAR Statik Ofset Testi

Bu kısımda LIFES50+ OO-STAR yarı-batık (semi-sub) platformu için statik ofset testi gerçekleştirilerek başlangıç koşulları belirlenmiştir. Test sonucuna göre bulunan başlangıç koşulları ile platformun çevresel yükler altında zaman tanımlı alanda analizleri gerçekleştirilmiştir.

Testin gerçekleştirilmesi için gerekli olan giriş dosyaları (ELASSTODYN, HYDRODYN, AERODYN) hazırlığı ve ilgili yazılımın çalıştırılması (OPENFAST) daha önceki kısımda (OC-3 Hywind Statik Ofset Testi) anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıdaki sunulmuştur.

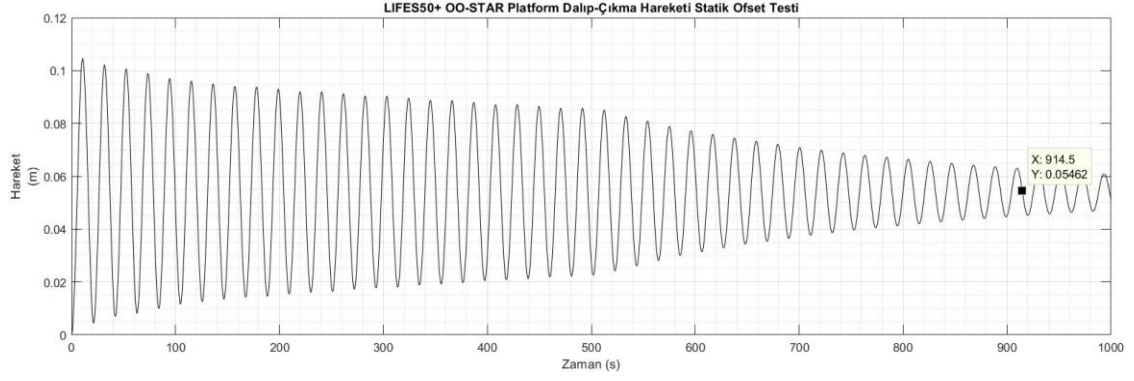


Şekil 221. LIFES50+ OO-STAR Platform ileri öteleme hareketi statik ofset testi

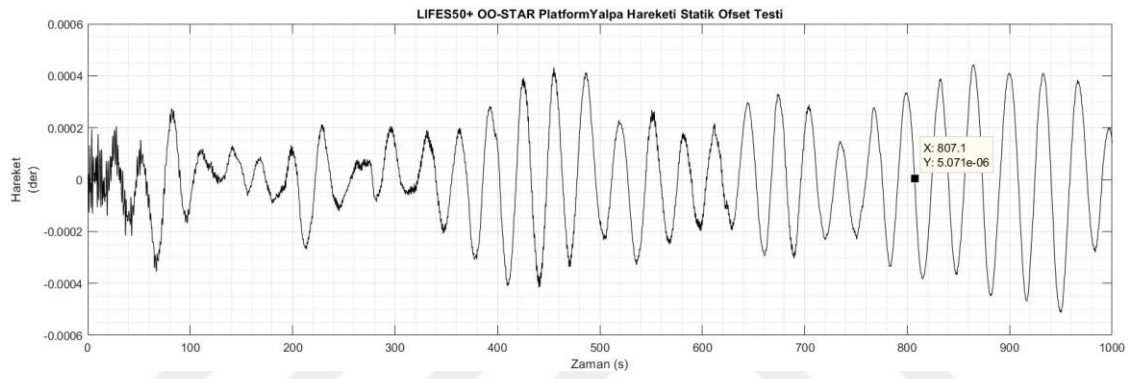


Şekil 222. LIFES50+ OO-STAR Platform yanal öteleme hareketi statik ofset testi

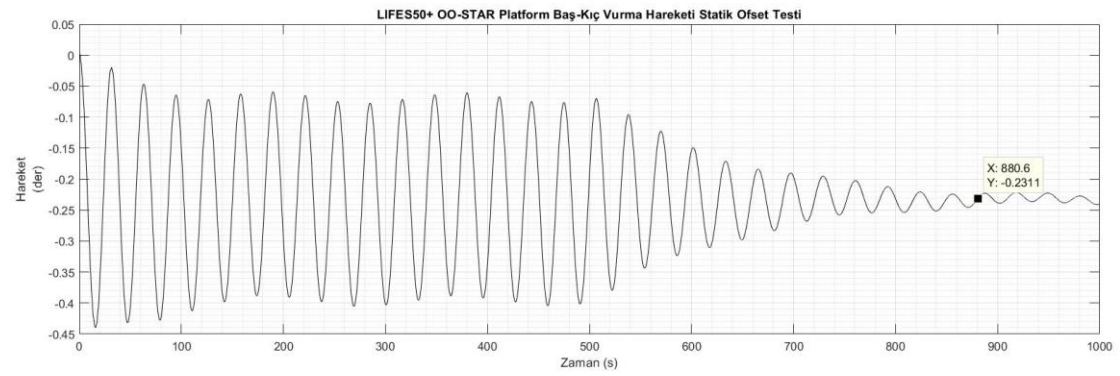




Şekil 223. LIFES50+ OO-STAR Platform dalıp-çıkma hareketi statik ofset testi

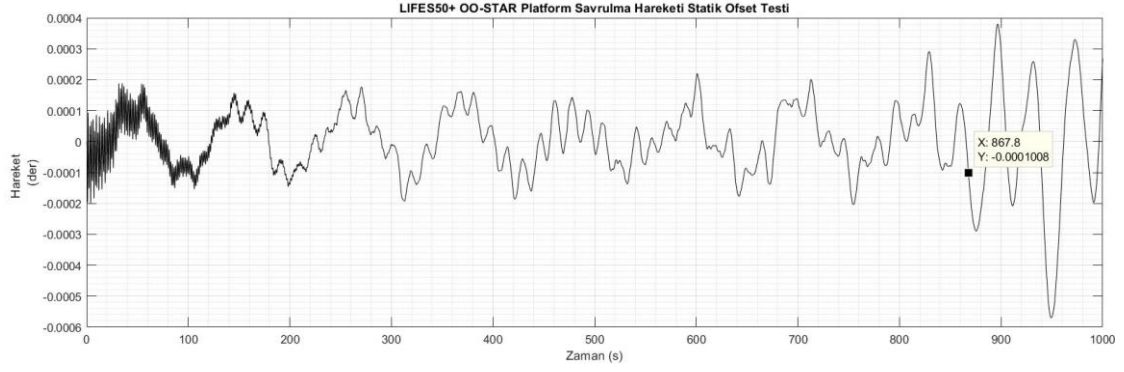


Şekil 224. LIFES50+ OO-STAR Platform yalpa hareketi statik ofset testi



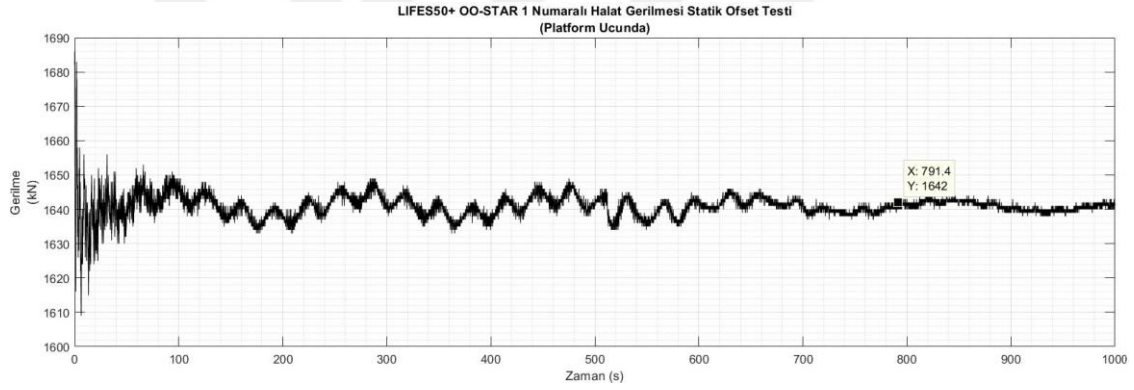
Şekil 225. LIFES50+ OO-STAR Platform baş-kıç vurma hareketi statik ofset testi



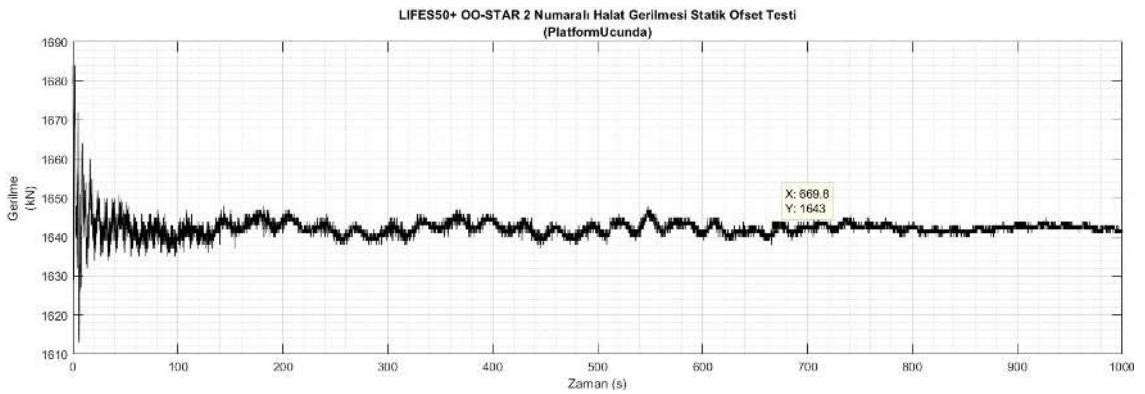


Şekil 226. LIFES50+ OO-STAR Platform savrulma hareketi statik ofset testi

Bağlama sistemlerindeki ön-gerilme (pre-tension) değerleri de aynı şekilde statik ofset testi ile belirlenmiştir.

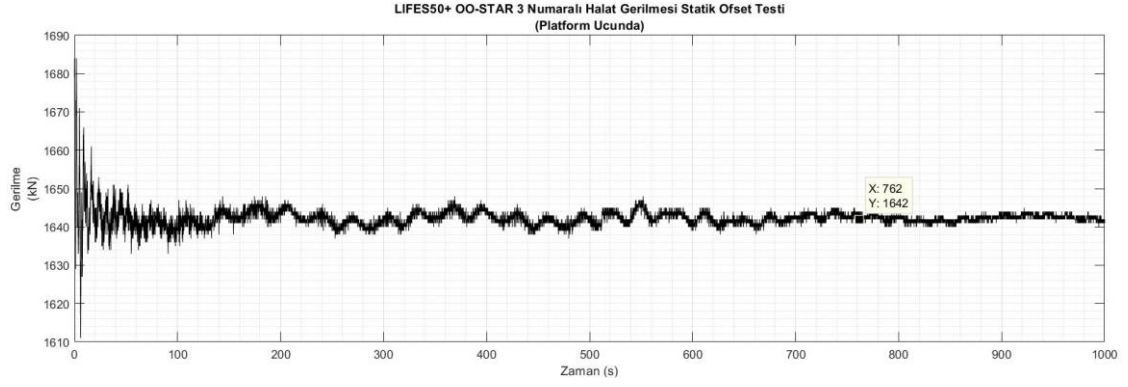


Şekil 227. LIFES50+ OO-STAR 1- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

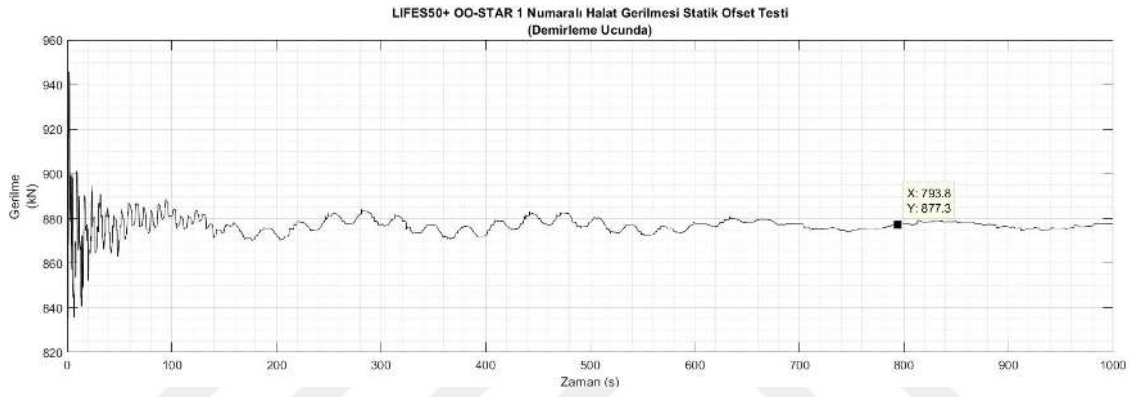


Şekil 228. LIFES50+ OO-STAR 2- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

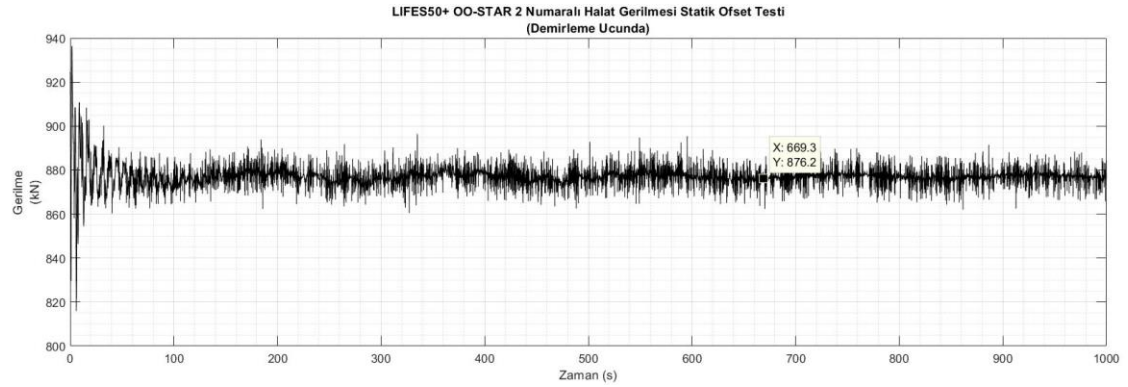




Şekil 229. LIFES50+ OO-STAR 3- numaralı halat statik ofset testi (platform ucunda)

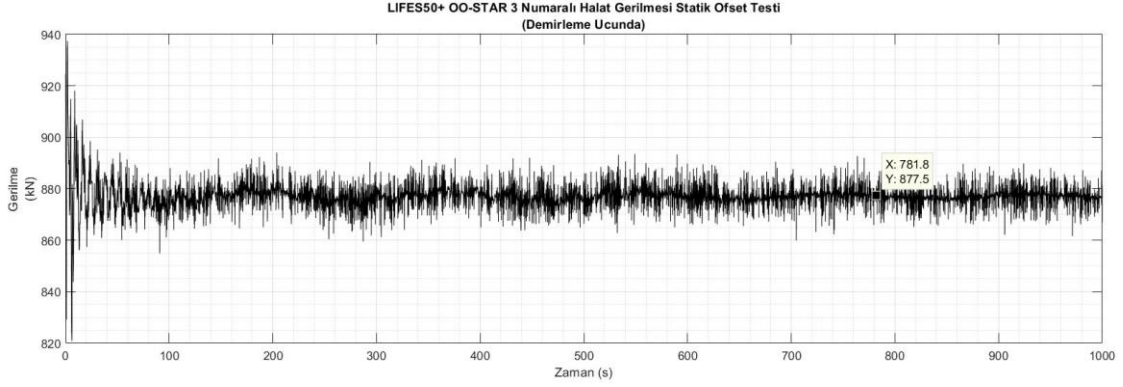


Şekil 230. LIFES50+ OO-STAR 1- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)



Şekil 231. LIFES50+ OO-STAR 2- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)





Şekil 232. LIFES50+ OO-STAR 3- numaralı halat statik ofset testi (demirleme ucunda)

Elde edilen platform başlangıç koşulları ve bağlama sistemleri gerilmeleri aşağıda tablolarda verilmiştir.

Tablo 53. LIFES50+ platform 6 serbestlik dereceli hareketi başlangıç koşulları

	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp- çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
Başlangıç koşulları	0,10 m	-0 m	-0,054 m	0°	-0,231°	-0°

Tablo 54. LIFES50+ OO-STAR halat gerilmeleri

Halat numarası	Halat ön gerilmeleri (kN)	
	Platform ucu	Demirleme ucu
Halat-1	1642	877,3
Halat-2	1643	876,2
Halat-3	1642	877,5

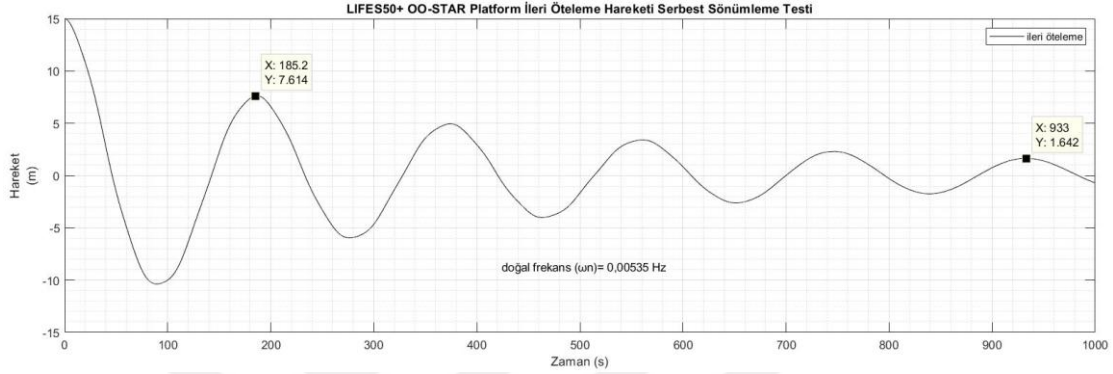
2.9.4.4. LIFES50+ OO-STAR Serbest Sönümlleme Testi

Bu test ile doğal frekanslar belirlenerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca destek elemanlarının doğal frekanslar üzerindeki etkileri de burada incelenmiştir. Bunun için hem destek elemanlı hem de destek elemansız bir şekilde simülasyon gerçekleştirilmiş, sonuçlar sunulmuştur.

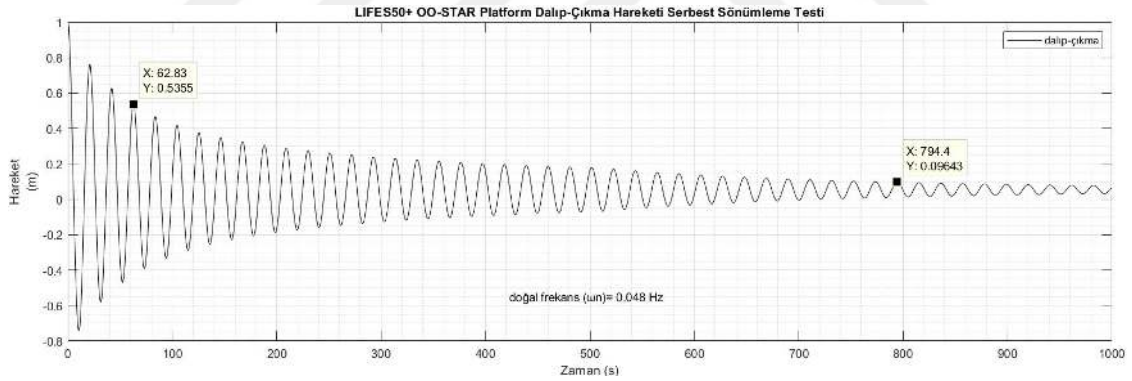
Test için statik ofset testinde olduğu gibi NREL tarafından geliştirilen FAST yazılımının 8. Sürümü olan OPENFAST kullanılmıştır. Serbest sönümlleme testi, doğal frekansları belirlemek için dış kuvvetler olmadan (gelen dalga ve rüzgâr yok) belirli



başlangıç değerleri ile hareketin başlamasına izin verilerek simüle edilerek gerçekleştirilmektedir. Sonuçlar, platformun 4 serbestlik dereceli hareketleri (ileri öteleme, dalıp-çıkma, baş-kıç vurma, savrulma) için verilmiştir. Burada kule, kanatlar ve jeneratör rijit kabul edilerek birlikte hareket etmektedir. Platform ve bağlantı sistemleri için 6 serbestlik dereceli harekete izin verilmiştir. Sonuçlar Tablo 56. ve Tablo 57.' de verilmiştir.

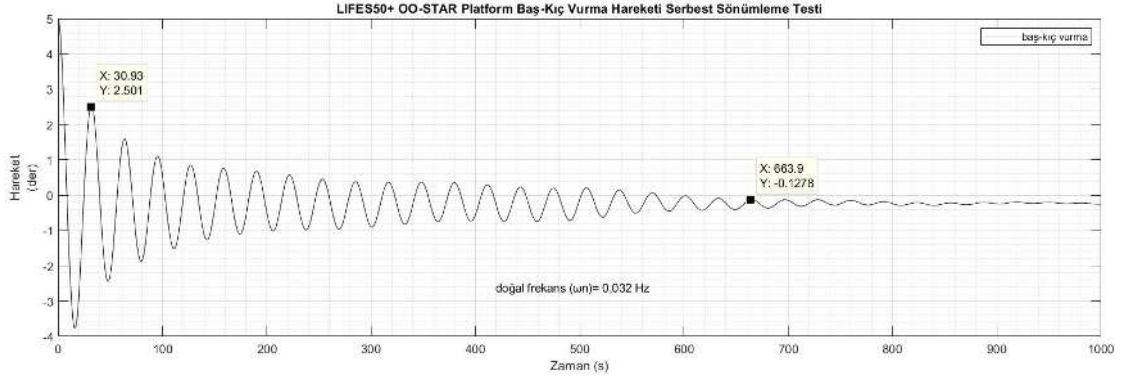


Şekil 233. LIFES50+ OO-STAR platform ileri öteleme hareketi serbest sönümlenme testi

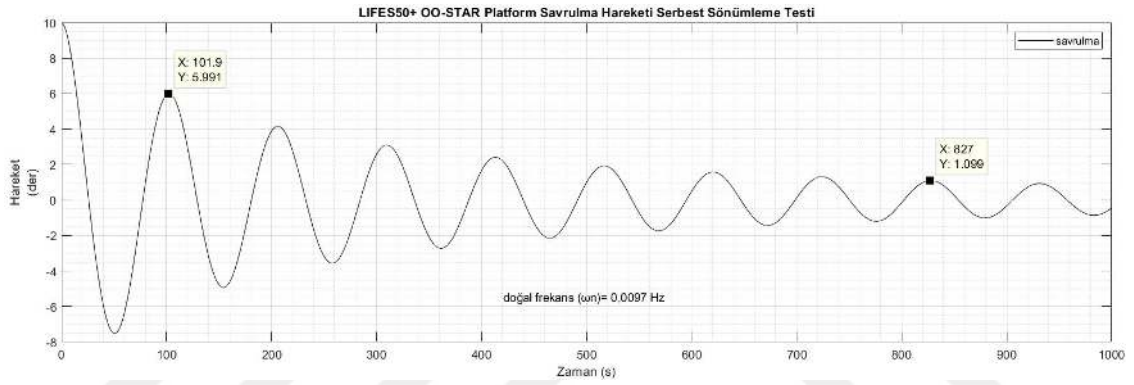


Şekil 234. LIFES50+ OO-STAR platform yanal öteleme hareketi serbest sönümlenme testi





Şekil 235. LIFES50+ OO-STAR platform baş-kıç vurma hareketi serbest sönümlenme testi

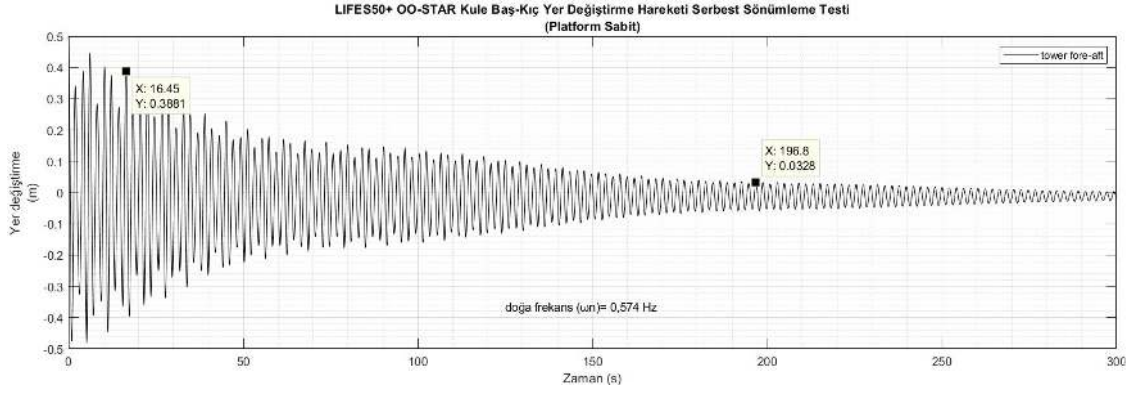


Şekil 236. LIFES50+ OO-STAR platform savrulma hareketi serbest sönümlenme testi

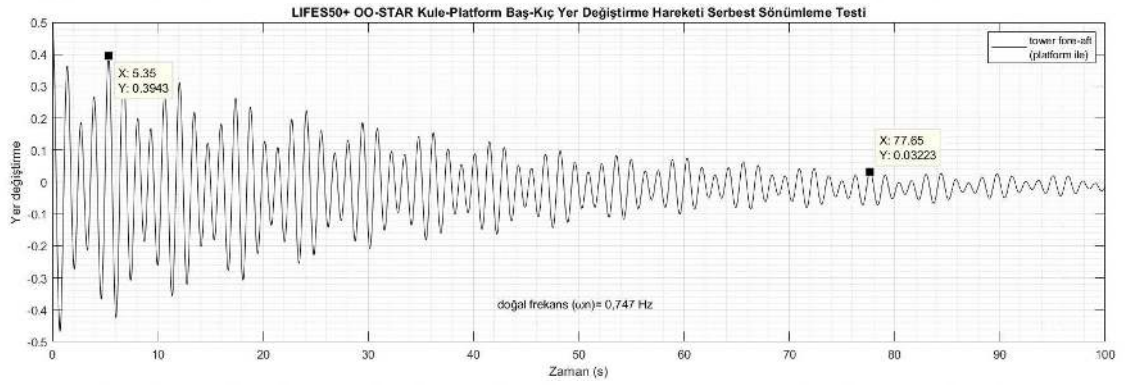
Platform hareketlerinin serbest sönümlenme testleri gerçekleştirildiği gibi, aynı şekilde kule için de serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Burada ilk önce platform hareketleri kısıtlanarak platform sabit hale getirilmiş şekilde, kulenin platformdan bağımsız olarak hareket ettiği kabul edilmiş ve serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kule ve platform beraber hareket edecek şekilde platformun hareketleri kısıtlanmadan serbest sönümlenme testi gerçekleştirilmiştir. Böylece yalnız kulenin ve kule platform birlikte iken doğal frekansları (ω_n) karşılaştırılmıştır.

Kulenin hareketleri, x- eksenı yönünde baş-kıç yer değiştirme hareketi (fore-aft) ve y- ekseninde ise bordadan-bordaya yer değiştirme (side-side) olacak şekilde adlandırılmıştır.

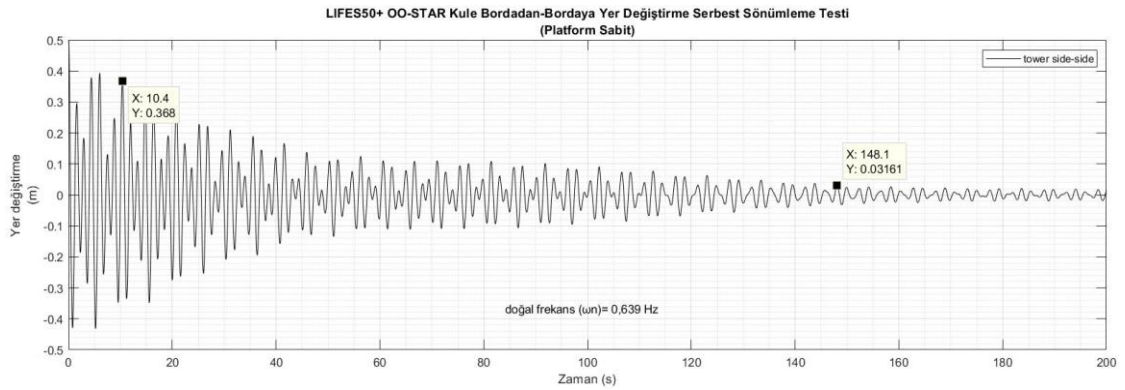




Şekil 237. LIFES50+ OO-STAR kule baş-kıç (fore-aft) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi

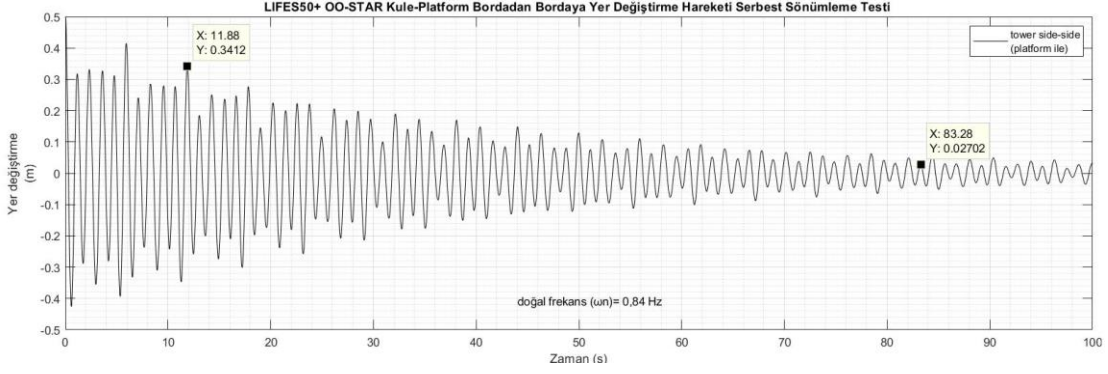


Şekil 238. LIFES50+ OO-STAR kule-platform baş-kıç (fore-aft) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi



Şekil 239. LIFES50+ OO-STAR kule bordadan-bordaya (side-side) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi





Şekil 240. LIFES50+ OO-STAR kule-platform bordadan-bordaya (side-side) yer değiştirme hareketi serbest sönümlenme testi

Tablo 55. LIFES50+ OO-STAR platform doğal frekansları

Özellik	İleri öteleme	Dalıp-çıkma	Baş-kıç vurma	Savrulma
Doğal periyot (s)	186,95	20,90	31,65	103,59
Doğal frekans (Hz)	0,0054	0,048	0,032	0,0097
Doğal açısal frekans (rad/s)	0,034	0,301	0,199	0,061
Sönüm oranı	0,064	0,012	0,024	0,048

Tablo 56. LIFES50+ OO-STAR kule doğal frekansları

Özellik	Kule f-a	Kule s-s	Kule+platform f-a	Kule+platform s-s
Doğal periyot (s)	1,73	1,56	1,34	1,19
Doğal frekans (Hz)	0,58	0,64	0,75	0,84
Doğal açısal frekans (rad/s)	3,62	4,02	4,69	5,28
Sönüm oranı	0,004	0,005	0,008	0,005

Tablo 56. kule doğal frekansları incelendiğinde, burada da platformun sabit olduğu durumdaki doğal periyotların kule + platformun birlikte hareket ettiği duruma göre daha büyük; dolayısıyla doğal frekanslarının daha küçük olduğu görülmektedir.

Aşağıda uygulama ile Pegalajar vd. [219] tarafından gerçekleştirilen hızlı yük analiz modeli (QuLAF) sayısal çalışması karşılaştırılarak sonuçları sunulmuştur.

Tablo 57. LIFES50+ OO-STAR platform doğal frekansları (Hz) uygulama ile sayısal çalışmanın karşılaştırılması

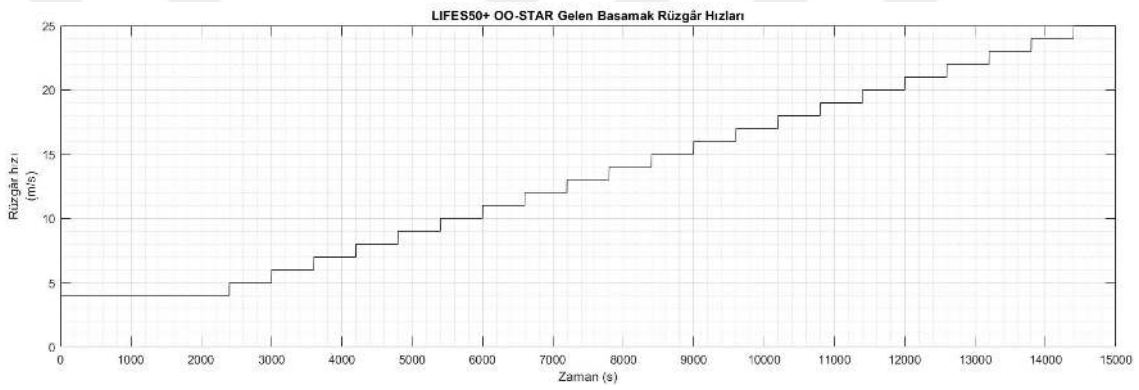
Çalışmalar	İleri öteleme	Dalıp-çıkma	Baş-kıç vurma	Kule+platform f-a
Uygulama	0,0054	0,048	0,0320	0,750
QuLAF [219]	0,0054	0,048	0,0320	0,682



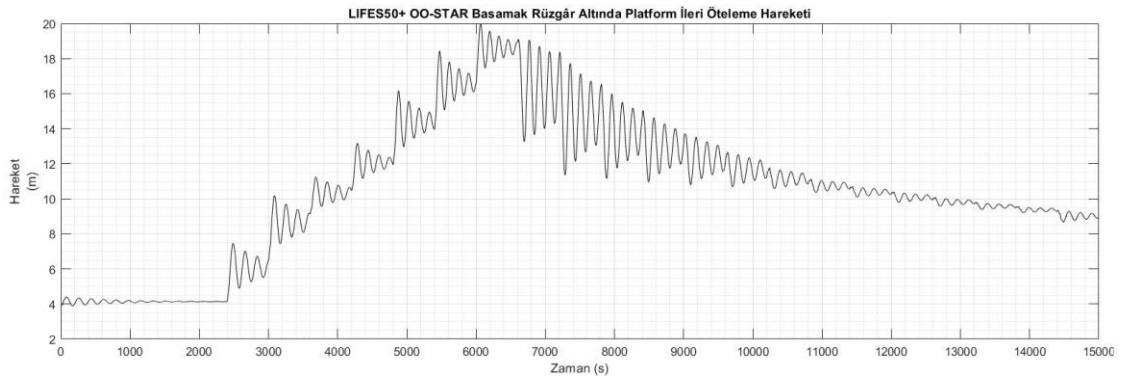
Sonuçlar incelendiğinde tutalı bir şekilde analizlerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Böylece LIFES50+ OO-STAR konsepti validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.9.4.4.5. Basamak Rüzgâr Altında LIFES50+ OO-STAR Konsepti Tepkileri

Bu kısımda LIFES50+ OO-STAR konsepti için, NAUTILUS-DTU konseptinde olduğu gibi basamak rüzgâr (stepwind) altında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için 4 m/s-25 m/s arasında düzenli şekilde artış gösteren rüzgâr hızları bilgileri kullanılmış ve simülasyon 15000 s sürmüştür. Grafikler aşağıda sunulmuştur.

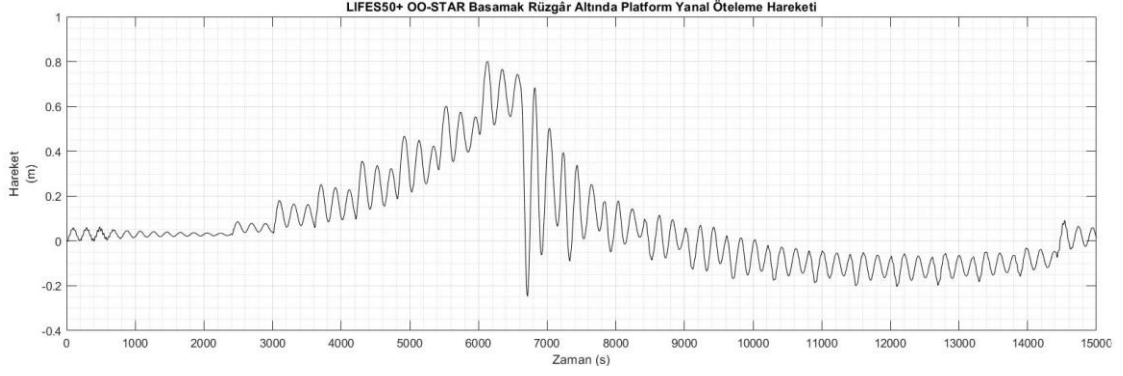


Şekil 241. LIFES50+ OO-STAR gelen basamak rüzgâr profili

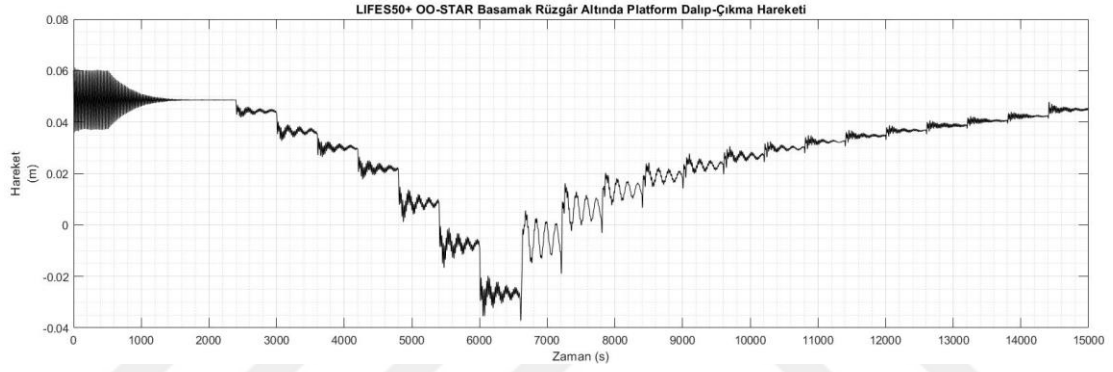


Şekil 242. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform ileri öteleme hareketi

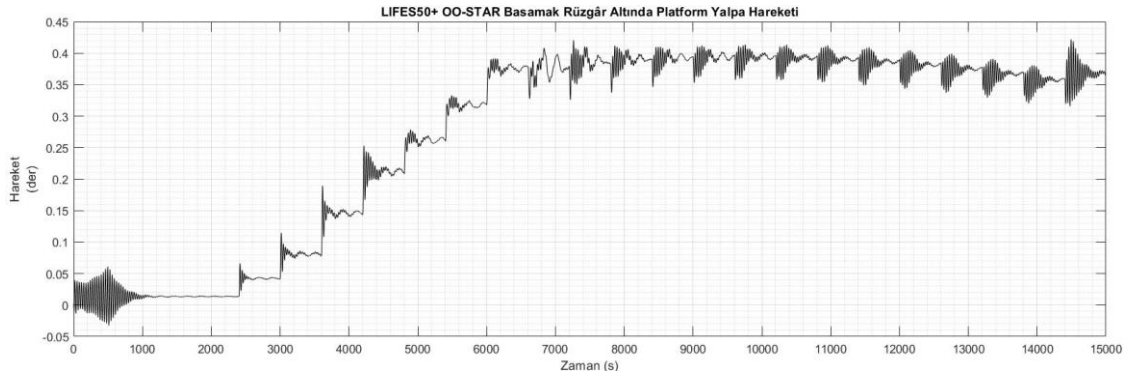




Şekil 243. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform yanal öteleme hareketi

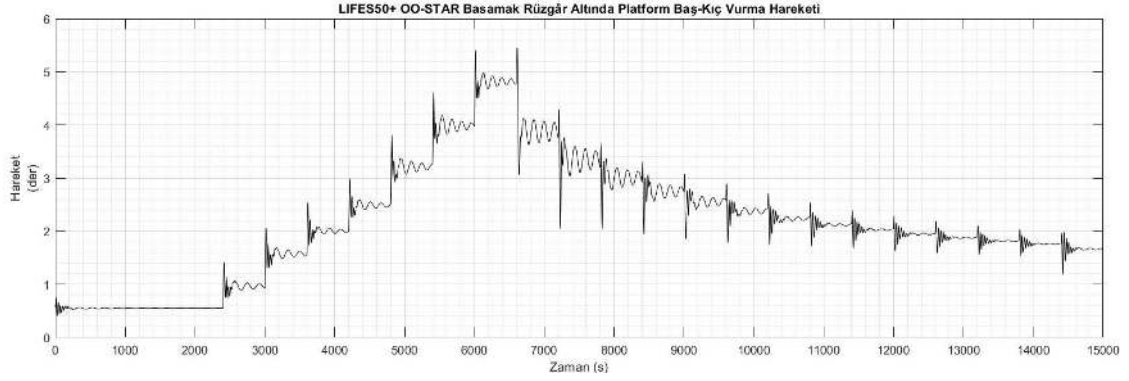


Şekil 244. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform dalıp-çıkma hareketi

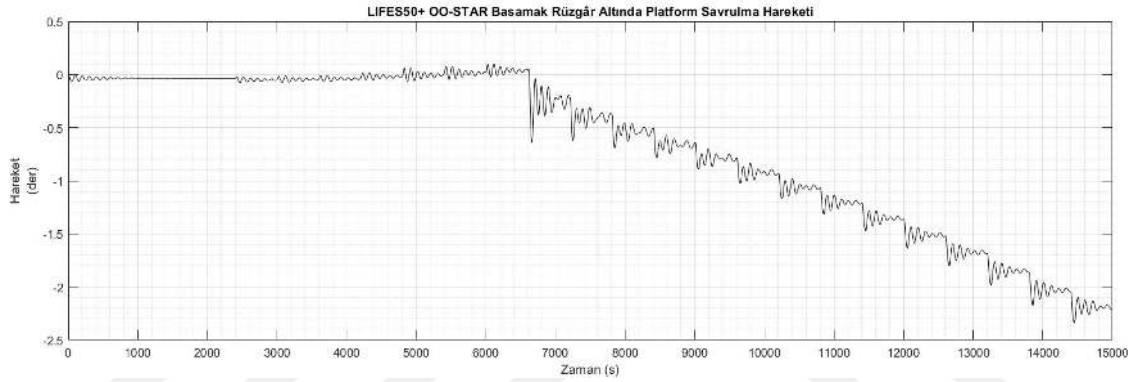


Şekil 245. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform yalpa hareketi



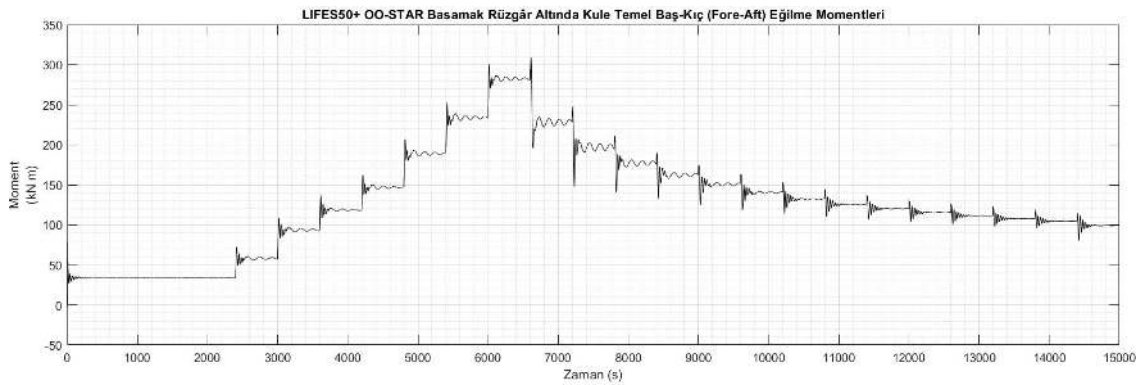


Şekil 246. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform baş-kıç vurma hareketi



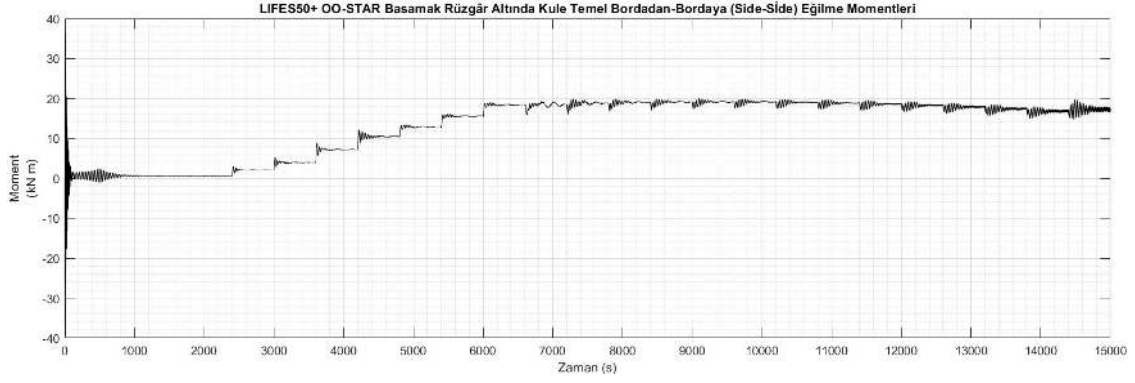
Şekil 247. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform savrulma hareketi

LIFES50+ OO-STAR kule hareketleri için ise, kule temelini x- eksenini etrafında oluşan bordadan-bordaya (side-side) ve y- eksenini etrafında oluşan baş-kıç (fore-aft) eğilme momentleri değişimleri aşağıda şekillerdeki gibi elde edilmiştir.



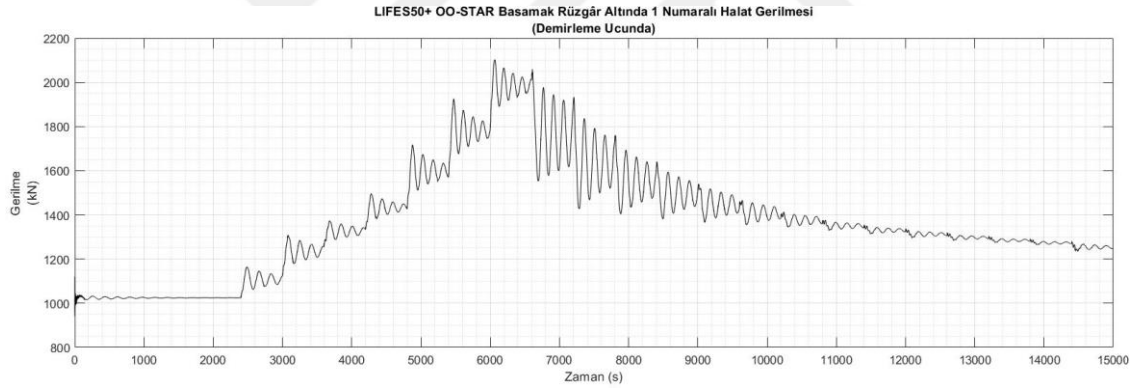
Şekil 248. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında kule baş-kıç vurma (fore-aft) eğilme momentleri analizi



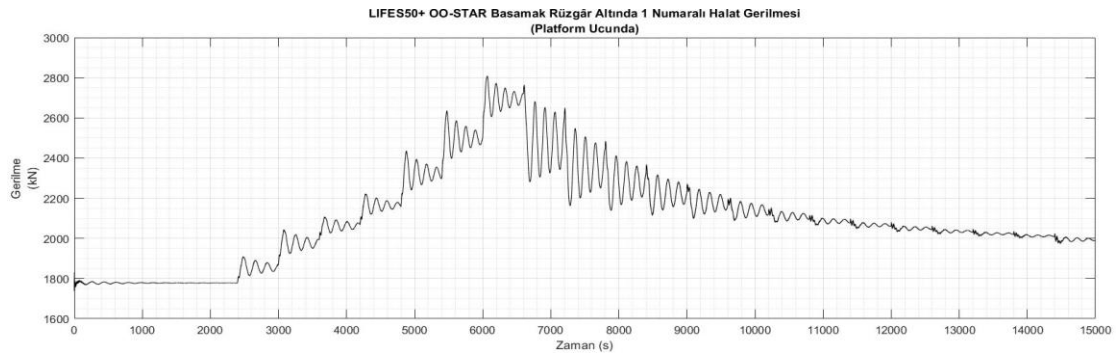


Şekil 249. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında kule bordadan-bordaya (side-side) eğilme momenti analizi

Basamak rüzgâr altında LIFES50+ OO-STAR bağlantı sistemlerindeki gerilmeler aşağıdaki gibi gösterilmiştir. Bağlantı sistemleri 3 katener bağlı halattan oluşmak üzere, platform ucu (fairten) ve demirleme ucundaki (anchten) gerilmeler gösterilmiştir.

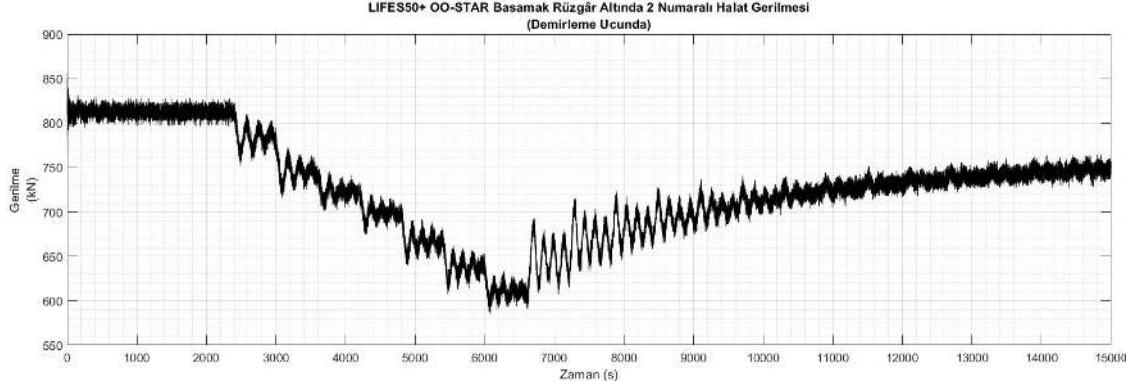


Şekil 250. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 1 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)

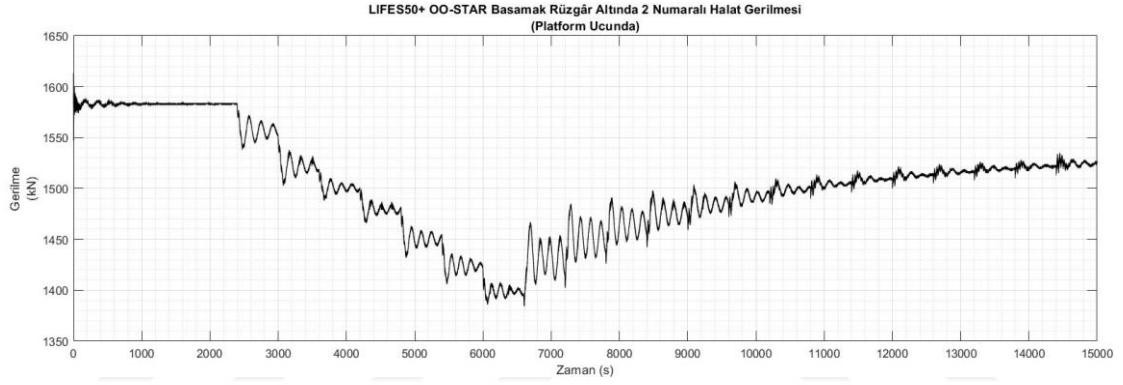


Şekil 251. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 1 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)

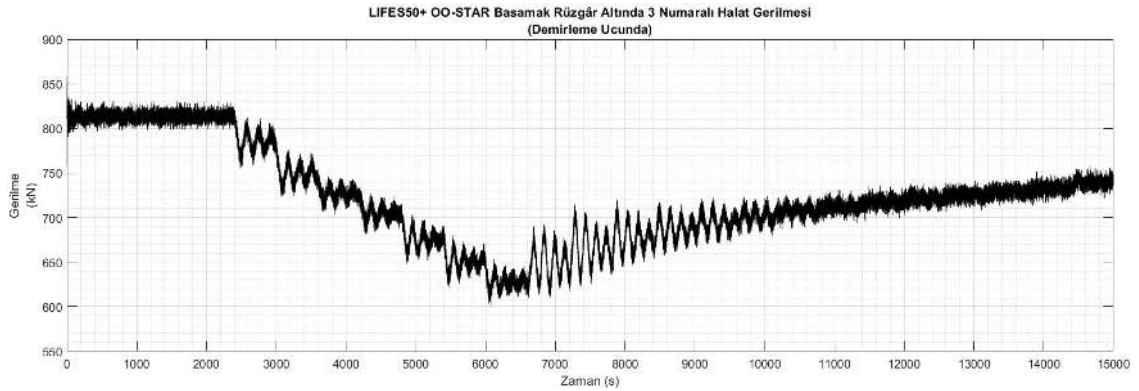




Şekil 252. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 2 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)

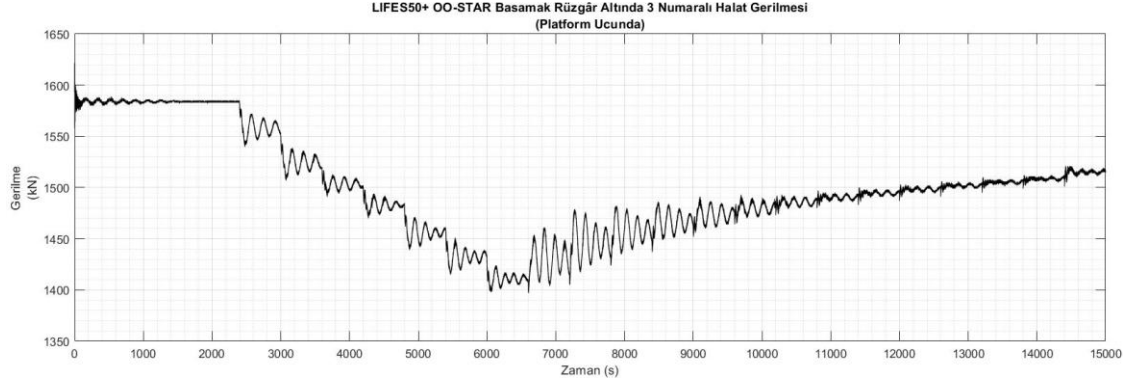


Şekil 253. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 2 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)



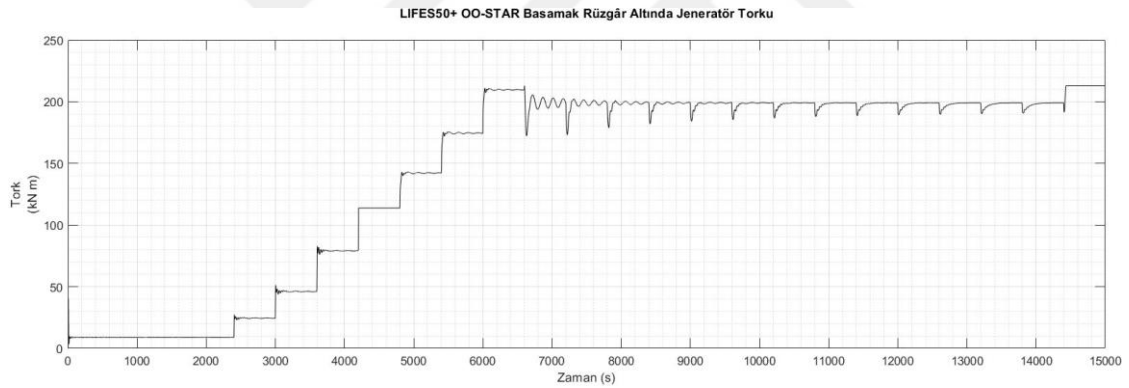
Şekil 254. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 3 numaralı halat gerilmesi (demirleme ucunda)





Şekil 255. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında 3 numaralı halat gerilmesi (platform ucunda)

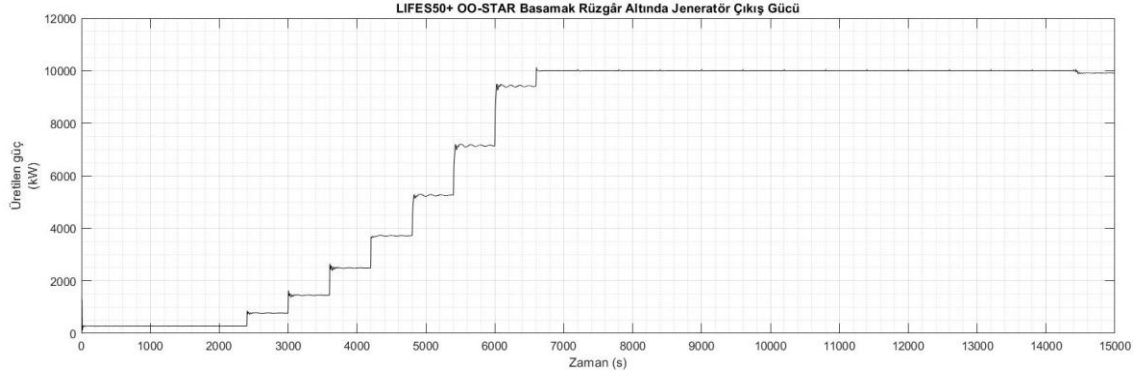
Bu analizde kontroller aktif durumdadır. Rüzgârın şiddetine göre türbin park pozisyonuna otomatik olarak geçmektedir. Türbin park durumundayken jeneratör çalışmamaktadır. Bu durumu gösteren jeneratör torku davranışı Şekil 25.'da gösterilmiştir.



Şekil 256. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında jeneratör torku

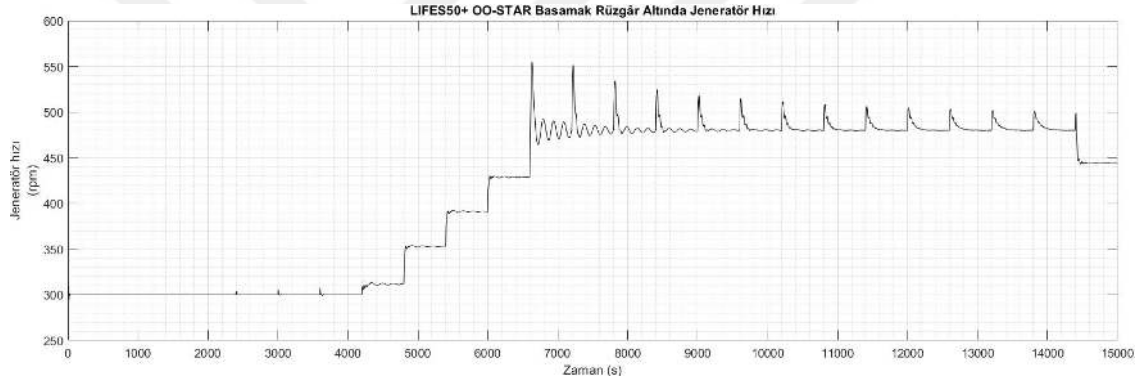
Oluşan bu jeneratör torkuna göre de basamak rüzgâr hızı altında türbin çıkışından alınan güç Şekil 257.'de verilmiştir.





Şekil 257. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında jeneratör çıkış gücü

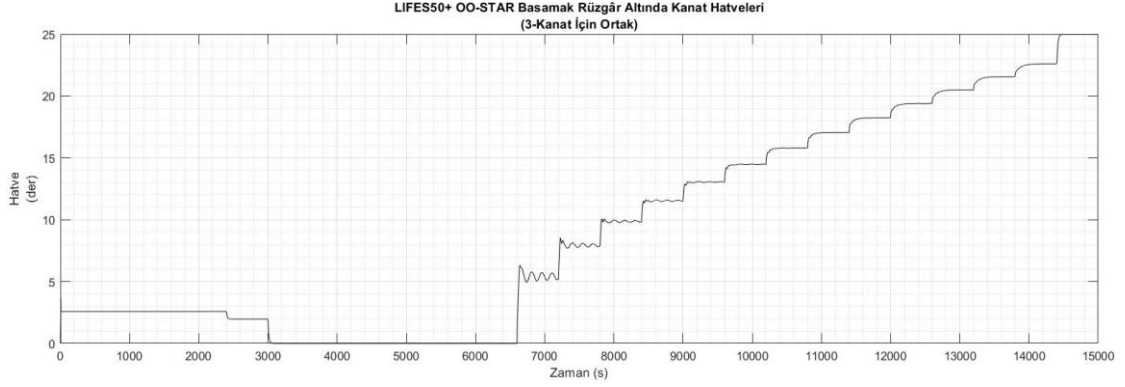
Jeneratör hızı ise, Şekil 258.'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 258. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında jeneratör hızı

Kanat hatve kontrol mekanizması, gelen rüzgâr hızına göre kanat hatvelerini otomatik olarak ayarlamaktadır. Şekil 259.'da 3 kanat için ortak kanat hatvelerinin değişimi gösterilmiştir.

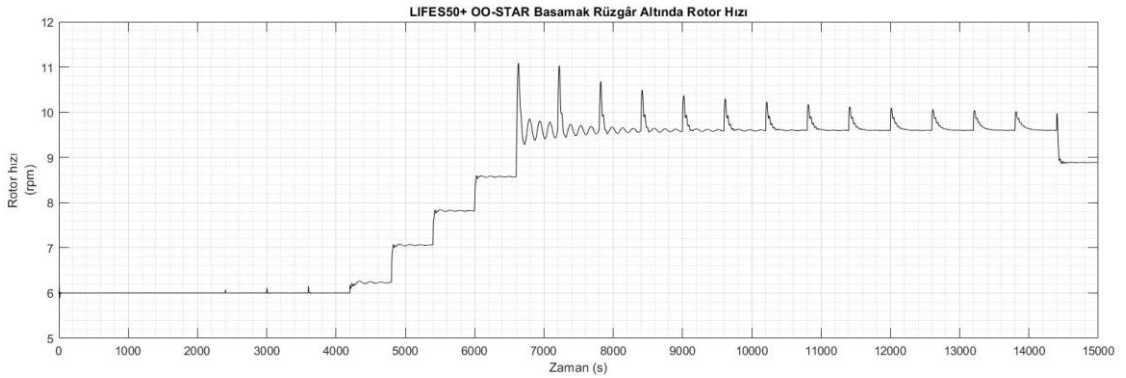




Şekil 259. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında kanat hatveleri (3- kanat için ortak)

Şekil 259. incelendiğinde kanat hatvesinin, 3000 s ile 6600 s simülasyon zamanı arasında 0° olduğu görülmektedir. Aynı simülasyon zamanlarında Şekil 241.'e göre rüzgâr hızı 11 m/s ile 15 m/s arasında değişmektedir. Bu değerler türbinin anma şiddeti ile denk gelmektedir ve türbin çıkışından alınan güç maksimumdur. Bu durum da Şekil 257.'den anlaşılmaktadır.

Türbinin çalışmasını etkileyen diğer faktör olan rotor hızı için zaman tanımlı alanda basamak rüzgâr altındaki analizi de Şekil 260.'ta gösterilmiştir.

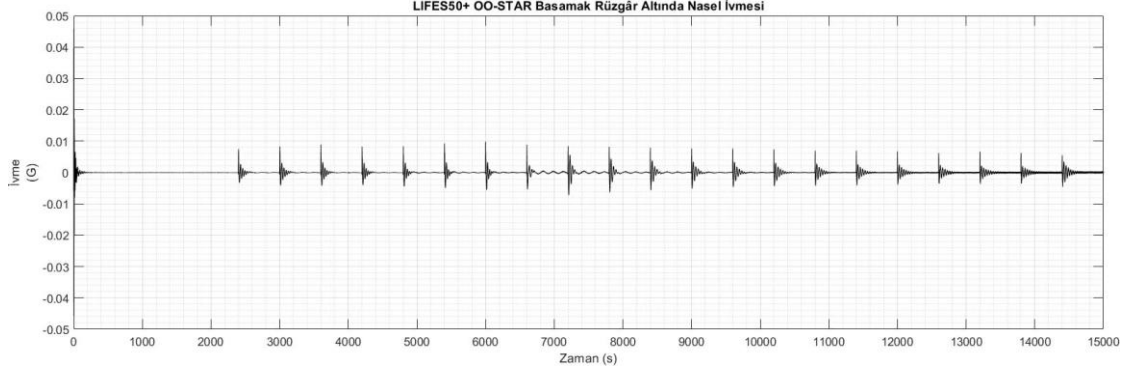


Şekil 260. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında rotor hızı

LIFES50+ OO-STAR naseli incelenecek olursa, sabit düzenli artan basamak rüzgâr hızları altında nasele üzerindeki oluşan ivmenin, yerçekimi kuvveti (G) cinsinden analizi Şekil 261.'de gösterilmiştir. Buna göre nasele hareketi kaynaklı ivme 0,02 G'den az olması durumunda herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Ancak 0,02 G'nin üzerindeki değerler



türbine ve kuleye zarar verebilmektedir [6]. Gerçekleştirilen bu simülasyon şartlarına göre nasele hareketinden dolayı oluşacak herhangi bir kuvvet tehlike arz etmemektedir.



Şekil 261. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında nasele ivmesi

Gerçekleştirilen bu analizlerden sonra LIFES50+ OO-STAR konsepti için sabit olarak artan basamak rüzgâr hızları altında platform hareketleri, kule hareketleri, bağlama sistemleri tepkileri, jeneratör torku, jeneratör çıkış gücü, kanat hatveleri, rotor hızı ve nasele ivmesi için istatistiki değerler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Tablo 58. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında platform hareketleri zamana bağlı simülasyon sonuçları

Platform hareketleri	Birim	Ortalama	Min.	Maks.	Std.
İleri öteleme	m	10,5981	3,8570	19,98	3,9852
Yanal öteleme	m	0,0732	-0,2467	0,8004	0,2070
Dalıp-çıkma	m	0,0273	-0,0372	0,0612	0,0197
Yalpa	der.	0,2726	-0,0327	0,4219	0,1495
Baş-kıç vurma	der.	2,1852	0,4038	5,4530	1,1058
Savrulma	der.	-0,6678	-2,3390	0,1021	0,7274



Tablo 59. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında kule hareketleri zamana bağlı simülasyon sonuçları

Kule hareketleri	Birim	Ortalama	Min.	Maks.	Std.
Kule f-a momenti	kN	129,29	-1,867	309,3	64,18
Kule s-s momenti	kN	13,17	-39,2	36,56	7,226

Tablo 60. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında bağlama sistemleri halat gerilmeleri zamana bağlı simülasyon sonuçları

Bağlama halatları	Konumu	Birim	Ortalama	Min.	Maks.	Std.
Halat no 1	Anch.	kN	1373,6	941,4	2103	249,04
	Fair.	kN	2018,5	1738	2809	237,3
Halat no 2	Anch	kN	724,37	585,3	856,9	54,94
	Fair	kN	1502,7	1384	1613	50,04
Halat no 3	Anch	kN	721,26	559,1	858,7	53,08
	Fair	kN	1498,3	1397	1622	49,10

Tablo 61. LIFES50+ OO-STAR basamak rüzgâr altında diğer büyüklükler zamana bağlı simülasyon sonuçları

Özellik	Birim	Ortalama	Min.	Maks.	Std.
Jeneratör torku	kN m	144,2921	0	212,9	77,39
Jeneratör çıkış gücü	kW	6846,9	0	10.130	4076,7
Jeneratör hızı	rpm	412,29	293,7	554,3	82,46
Kanat hatvesi	der	9,35	0	24,97	8,45
Rotor hızı	rpm	8,25	5,88	11,09	1,65
Nasel ivmesi	G	1,152e-07	-0,046	0,046	0,0009

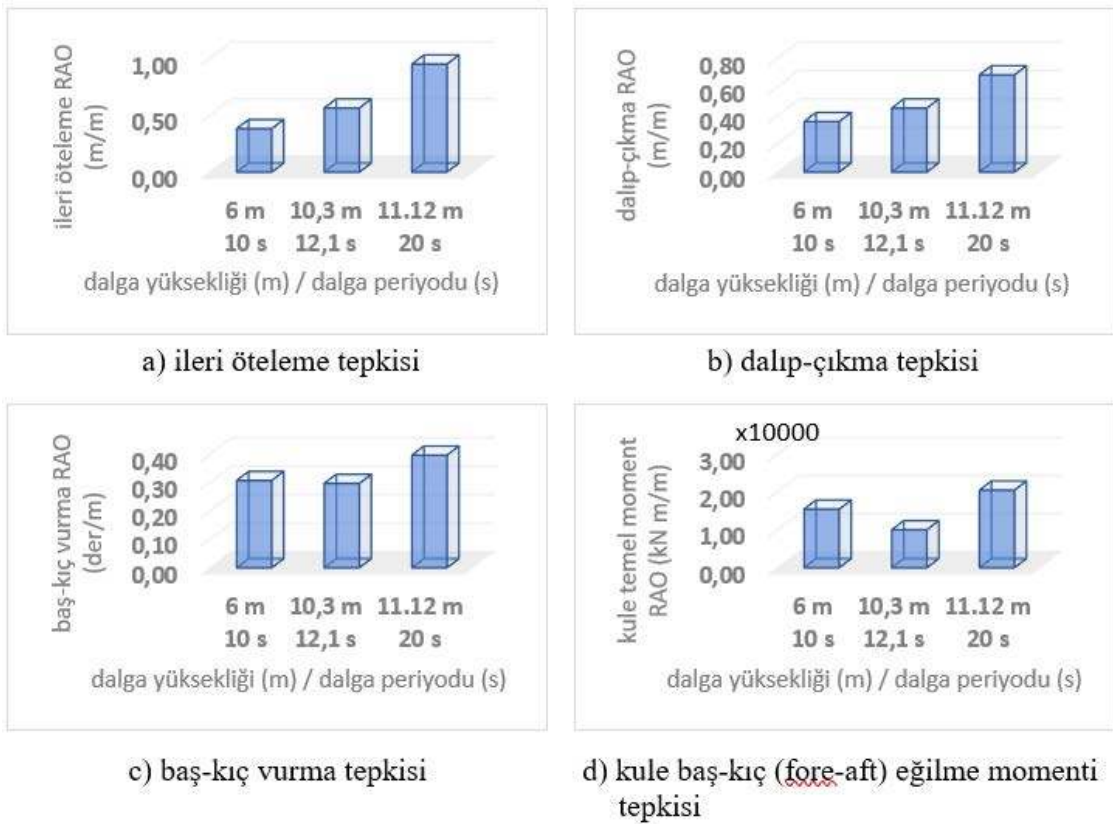
Tablo 61.'de bulunan nasel ivmesi için maksimum değer 0,04 G değeri, 0,02 G'den büyüktür. Burada naselin hasar vereceği düşünülebilir ancak; Şekil 260.'a bakıldığında bu



değerin bir anlık başlangıç zamanı içerisinde (0 s) oluştuğu, uzun sürmediği görülmektedir. Bu durumda herhangi bir olumsuzluk beklenmemektedir.

2.9.4.4.6. Düzenli Dalga Altında LIFES50+ OO-STAR Konsepti Tepkileri

Bu kısımda rüzgârın olmadığı, düzenli dalga (sinüs dalgası) altındaki hareketler incelenmiştir. Simülasyon zamanı 1000 s seçilmiştir. Kanat hatveleri 0° ancak jeneratör kapalı durumdadır. İlgili dalgalar için tepki genlik operatörleri (RAO) karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırılan dalga yükseklikleri 6 m, 10,3 m ve 11,12 m olup, pik periyotları sırasıyla 10 s, 12,1 s ve 20 s olarak belirlenmiştir. Hareketlerden ileri öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri ile kule baş-kıç (fore-aft) momenti karşılaştırmaları gösterilmiştir. Diğer hareketlerden yanal öteleme, yalpa ve savrulma hareketi ile kule bordadan-bordaya (side-side) moment tepki genlikleri ihmal edilecek kadar çok küçük olduğu için 0' a eşit alınmış ve grafiklerde gösterilmemiştir.



Şekil 262. Düzenli dalgalar altında (sinüs dalgası) LIFES50+ OO-STAR platform ve kule tepki genlik operatörleri (RAO)



2.10. Alternatif Bölge İçin Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Türbini Uygulaması

Yukarıdaki bölümlerde yüzer açık deniz rüzgâr türbini konseptleri karşılaştırıldığında, uygulama sahası için alternatif bölge özelliklerine en uygun konseptin Olav Olsen tarafından geliştirilen LIFES50+ OO-STAR konsepti olduğu görülmektedir. Platform doğal frekansları ve rüzgâr altında platform tepkileri, aşağıda karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 62. Alternatif bölge seçimi için platformların doğal periyot (s) karşılaştırmaları

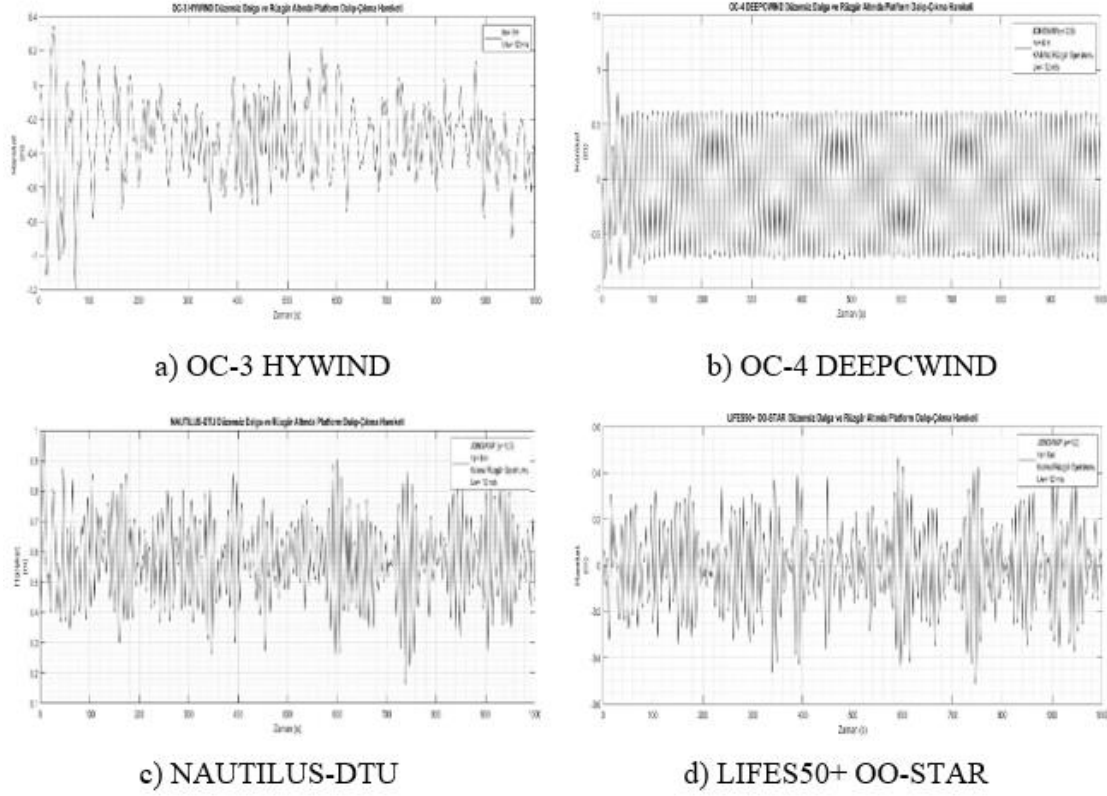
Platform tipi	Serbest sönümlenme testi doğal periyotlar (s)					
	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp- çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
OC-3	125,13	125,15	31,12	29,96	29,90	8,24
OC-4	135,05	138,92	17,16	25,98	26,10	70,71
NAUTILUS	117,17	-	19,20	-	29,41	93,41
OO-STAR	186,95	-	20,90	-	31,65	103,59

Tablo 63. Alternatif bölge seçimi için platformların doğal frekans karşılaştırmaları (rad/s)

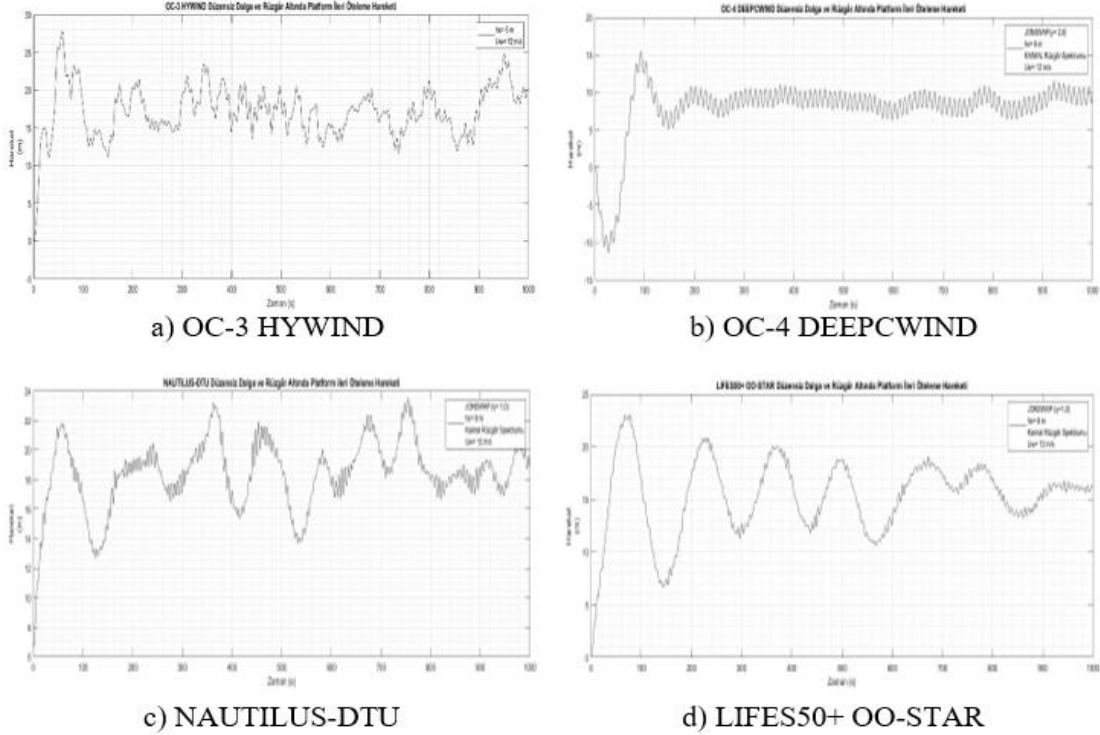
Platform tipi	Serbest sönümlenme testi doğal periyotlar (s)					
	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp- çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
OC-3	0,050	0,050	0,202	0,210	0,210	0,763
OC-4	0,047	0,045	0,366	0,242	0,241	0,089
NAUTILUS	0,054	-	0,327	-	0,214	0,067
OO-STAR	0,034	-	0,301	-	0,199	0,061

Tablo 62.'de platformların doğal periyotları (s) gösterilmiştir. Buna göre platform doğal frekansları (rad/s) hesaplanmıştır ve karşılaştırmaları Tablo 63.'te sunulmuştur. Tablo 63.'e bakıldığında dalıp-çıkma hareketi doğal frekansı en düşük olan OC-3 safralı tip platformu en iyi olarak gözükmeye rağmen, diğer hareketlere bakıldığında ise en düşük doğal frekans değerlerine Olev Olsen tarafından geliştirilen LIFES50+ OO-STAR platformunun sahip olduğu görülmektedir. Düşük frekans rezonans riskini azaltmaktadır. Platformlar simetrik olduğundan ileri öteleme hareketi ile yanal öteleme hareketi frekansı ve baş-kıç vurma hareketi ile yalpa hareketleri hemen hemen eşit doğal frekans değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



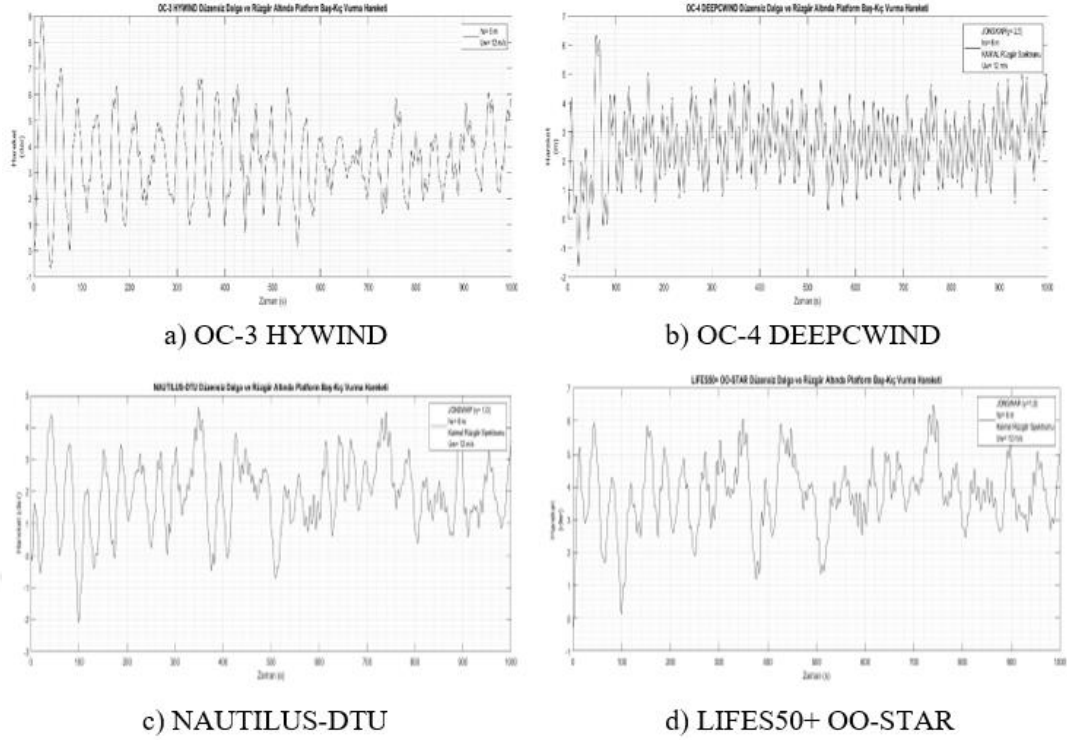


Şekil 263. Düzensiz dalga ve rüzgâr altında platform dalıp-çıkma hareketleri



Şekil 264. Düzensiz dalga ve rüzgâr altında platform ileri öteleme hareketleri





Şekil 265. Düzensiz dalga ve rüzgâr altında platform baş-kıç vurma hareketleri

Doğal frekansların bulunmasından sonra düzensiz dalga ve rüzgâr altında platform konseptlerinin hareketleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar 12 m/s rüzgâr hızı ve 6 m belirgin dalga yüksekliği için gerçekleştirilmiştir. Platform dalıp-çıkma, ileri öteleme ve baş-kıç vurma hareketleri için grafikler sırasıyla Şekil 266, Şekil 267. ve Şekil 268.'de gösterilmiş olup, diğer hareketlerin karşılaştırma grafikleri ise ekte sunulmuştur.

Tablo 64. Rüzgâr altında platform tepkilerinin karşılaştırması ($U_w = 12$ m/s, $h_s = 6$ m)

Platform tipi	İleri öteleme	Yanal öteleme	Dalıp-çıkma	Yalpa	Baş-kıç vurma	Savrulma
OC-3	17,20	-0,53	-0,32	0,28	3,55	0,01
OC-4	7,89	-0,34	-0,05	0,29	2,58	0,02
NAUTILUS	18,38	0,08	0,58	0,45	1,88	0,46
OO-STAR	15,46	0,11	-0,004	0,43	3,79	0,14

Tablo 64'te 12 m/s rüzgâr hızı altında platform tepkilerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Burada karşılaştırmalara bakıldığında ileri öteleme tepkisi için OC-4 platformu ön plana çıkmaktadır.



Ancak dalıp-çıkma hareketleri karşılaştırıldığında ise LIFES50+ OO-STAR platformunun en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Burada dalıp-çıkma hareketi yok denecek kadar azdır ve platform sabit gibi davranmaktadır. Ancak az miktarda baş-kıç vurma hareketine maruz kalmaktadır. Burada baş-kıç vurma hareketinin OC-4 platformundan fazla olmasının sebebi, OO-STAR konseptinde kullanılan kulenin OC-3 platformundaki kuleye göre daha yüksek olmasındandır. Ayrıca bu konseptte 10 MW'lık türbin kullanılmaktadır.

Tablo 63. ve Tablo 64. Beraber incelendiğinde gerek kısıtlı iyi hareketler gerekse de düşük doğal frekans değerleri nedeniyle uygulama için seçilen alternatif bölgede Olev Olsen tarafından geliştirilen 10 MW'lık LIFES50+ OO-STAR platform konseptinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu kısımdan sonra konseptin alternatif bölgenin çevresel koşullar ve yükler altında analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır. İlgili konseptin daha önceki bölümlerde gerçekleştirilen statik ofset testleri ve serbest sönümleme testleri ile validasyonda kullanılan sabit basamak rüzgâr altında tepkileri ve düzenli dalga (sinüs dalgası) altındaki tepkileri, bu kısımda ele alınmamıştır. Bu kısımda sadece kurulum için seçilen konseptin, belirlenen alternatif bölge çevresel ve farklı operasyonel koşullar altındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Operasyonel koşullar için 10 farklı durum belirlenmiştir. Bu çevresel koşullar ve operasyonlar Tablo 65.'te verilmiştir.

Tablo 65. Alternatif bölge çevresel koşulları ve operasyonlar

Tanım	Birim	Değer
Çevresel koşullar		
Deniz derinliği	m	110
Dalga yönü	der	0
Dalga spektrumu	Pierson-Moskowitz ($\gamma=1,0$)	
Referans rüzgâr yüksekliği	m	119
Rüzgâr yönü	der	0
Rüzgâr spektrumu	Kaimal Spektrum	
Operasyon -1		
Belirgin dalga yüksekliği	m	1,38
Dalga periyodu	s	7
Rüzgâr hızı	m/s	5



Tablo 65'in devamı

Operasyon -2		
Belirgin dalga yüksekliği	m	1,67
Dalga periyodu	s	7
Rüzgâr hızı	m/s	7,1
Operasyon -3		
Belirgin dalga yüksekliği	m	2,20
Dalga periyodu	s	8
Rüzgâr hızı	m/s	10,3
Operasyon -4		
Belirgin dalga yüksekliği	m	3,04
Dalga periyodu	s	9,5
Rüzgâr hızı	m/s	12
Operasyon -5		
Belirgin dalga yüksekliği	m	4,29
Dalga periyodu	s	10
Rüzgâr hızı	m/s	17,9
Operasyon -6		
Belirgin dalga yüksekliği	m	6,20
Dalga periyodu	s	12,5
Rüzgâr hızı	m/s	22,1
Operasyon -7		
Belirgin dalga yüksekliği	m	8,31
Dalga periyodu	s	12
Rüzgâr hızı	m/s	25
Operasyon -nihai 1		
Belirgin dalga yüksekliği	m	10,9
Dalga periyodu	s	16
Rüzgâr hızı	m/s	7,1
Operasyon -nihai 2		
Belirgin dalga yüksekliği	m	10,9
Dalga periyodu	s	16



Tablo 65.'in devamı

Rüzgâr hızı	m/s	22,1
Operasyon -ekstrem		
Belirgin dalga yüksekliği	m	10,9
Dalga periyodu	s	16
Rüzgâr hızı	m/s	44

Tablo 65. ile verilen koşullar altında alternatif bölge için yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi analizi 5600 s simüle edilerek sonuçlar aşağıda Tablo 66.'da sunulmuştur.

Tablo 66. Seçili operasyonlar için simülasyon sonuçları

Operasyon no	İleri öteleme (m)	Dalıp-çıkma (m)	Baş-kıç vurma (der)	Üretilen güç (kW)	Kanat hatvesi (der)
Operasyon-1	6,194	0,04	1,068	2811	1,49
Operasyon-2	10,26	0,03	2,1	2661	0,1
Operasyon-3	15,9	-0,007	3,95	7481	1,06
Operasyon-4	15,46	-0,004	3,79	9255	5,131
Operasyon-5	10,93	0,03	2,4	9886	15,5
Operasyon-6	9,35	0,04	2,03	9978	20,9
Operasyon-7	8,59	0,04	1,863	9734	24,5
Operasyon nihai-1	10,37	0,03	2,09	2665	0,1
Operasyon nihai-2	9,40	0,04	2,03	9805	20,9
Operasyon Ekstrem	18,52	-0,04	5,02	0	0,3

Tablo 66.'da platform hareketlerinden önemli olan ileri öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri gösterilmiştir. Yanal öteleme, yalpa ve savrulma hareketleri dikkate alacak ölçüde değişmemektedir ve burada yer verilmemiştir. Tablo 66. incelendiğinde rüzgâr hızına bağlı olarak üretilen enerji miktarının ve kanat hatvesinin arttığı görülmektedir.



Operasyon-6'dan operasyon-7'ye geçildiğinde ise rüzgâr hızı 17,9 m/s'den 25 m/s'ye gelmesine rağmen üretilen enerji miktarı azalmıştır. Çünkü kanat hatvesi 25 dereceye ulaşmaktadır. Bu durum türbin rotorunun hızında dolayısıyla jeneratörün hızında düşüşe yol açmaktadır. Ekstrem durumda ise türbin kanatları arasındaki açı sabit hale gelir ve türbin park durumuna geçerek enerji üretimini durdurmaktadır. Yine de bu koşullar altında da platform hareketlerinde güzel davranışlar görülmektedir. Aşağıda Tablo 67.'de ise operasyonlar altında bağlama sistemi halatları üzerindeki gerilmeleri platform ucunda ve demirleme ucunda olmak üzere sırasıyla gösterilmektedir.

Tablo 67. Operasyonlar altında bağlama sistemi gerilmeleri (platform ve demirleme ucunda)

Op. Adı	Platform Ucunda Gerilmeler (kN)			Demirleme Ucunda Gerilmeler (kN)		
	Halat No 1	Halat No 2	Halat No 3	Halat No 1	Halat No 2	Halat No 3
1	1870	1556	1556	1122	783,6	783
2	2070	1505	1502	1333	726,9	724,8
3	2469	1437	1435	1750	652,4	653,2
4	2278	1471	1456	1552	689,7	675,9
5	2106	1510	1478	1372	732,9	699,6
6	2020	1539	1489	1280	764,2	711,6
7	1981	1554	1494	1239	780,9	716,6
Ult.1	2073	1505	1502	1336	726,2	724
Ult.2	2022	1539	1490	1282	764,1	711,8
Ekstrem	2207	1400	1413	1994	611,6	629,3

Tablo 67. bağlama sistemi halatlarının davranışlarını göstermektedir. Platform ve demirleme ucundaki gerilmelere bakıldığında, halat 1 üzerindeki gerilmeler artarken, halat 2 ve halat 3 üzerindeki gerilmeler azalmaktadır. Yani halat 1 gerilirken halat 2 ve halat 3 gevşemektedir. Bu durumun tersi de söz konusudur.



2.10.1. Derinliğin Platform Hareketlerine ve Performansa Etkisi

Bu kısımda derinlik değişiminin platform ve performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun için 75 m ve 110 m derinliklerde 9,26 m/s rüzgâr hızı altında analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon zamanı olarak 1000 s seçilmiştir. Sonuçlar aşağıda Tablo 68.'de sunulmuştur. Hareket grafikleri ise ekte verilmiştir.

Tablo 68. Derinliğin platform hareketlerine ve performansa etkisi

Özellik	Birim	75 m			110 m		
		Maks.	Min.	Ort.	Maks.	Min.	Ort.
Platform ileri öteleme	m	5,09	0,13	2,78	13,84	0,13	8,25
Platform yanal öteleme	m	0,57	-0,46	0,11	3,24	-1,79	0,16
Platform dalıp-çıkma	m	0,13	-0,20	0,004	0,28	-0,35	-0,04
Platform yalpa	der	0,71	-0,13	0,29	0,95	-0,07	0,37
Platform baş-kıç vurma	der	7,32	-0,25	3,40	7,80	-0,25	3,99
Platform savrulma	der	2,28	-2,42	0,06	3,36	-3,20	0,12
Kanat hatvesi	der	1,47	0	0,03	8,17	0	1,05
Üretilen güç	kW	10650	0	5466	14450	0	7483

Tablo 68. incelendiğinde derinlik ile platform hareketlerinin arttığı görülmektedir.

Bağlama sistemi halatlarının derinlik ile değişimi ise aşağıda Tablo 69.'daki gibi olmaktadır. Bunun için sadece 1 numaralı halat üzerindeki gerilmeler incelenmiştir.

Tablo 69. Derinliğe göre bağlama sistemi 1 numaralı halatın gerilmeleri (kN)

75 m						110 m					
Deniz tabanı			Platform ucu			Deniz tabanı			Platform ucu		
Mak	Min.	Ort.	Maks	Min.	Ort.	Maks	Min	Ort.	Mak	Min.	Ort.
3217	1887	2534	3657	2417	3006	3066	1229	2133	3652	2001	2763



Yalnızca 1 numaralı halat için gerçekleştirilen analiz sonucunda, Tablo 69.'da verildiği gibi derinlik azaldıkça deniz tabanındaki halat demirleme noktasında oluşan gerilmeler artarken, konsept gereği kullanılan ek ağırlık (clump-weight) ile platform arasındaki halatta oluşan ise gerilmeler azalmaktadır. Bu durum diğer halatlar için de aynıdır.

2.11. Maliyet Analiz

Bu kısımda seçilen alternatif bölgede kurulumu gerçekleştirilecek olan yüzer açık deniz rüzgâr türbini konsepti için maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Kârlı bir yatırım için üretilecek birim enerjinin, belirle süre için hesaplanan yıllık giderlerin, yıllık üretilebilecek enerji miktarına oranıyla bulunan maliyetin altında olması istenmektedir.

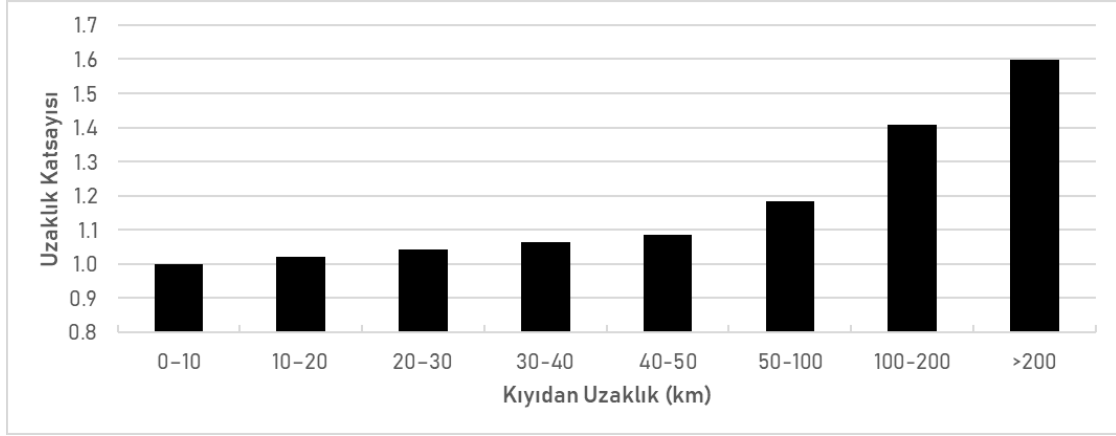
$$g = \frac{C_k + C_m}{E} \quad (101)$$

Burada g birim enerji maliyetini, C_k yıllık sermaye masraflarını, C_m yıllık işletme ve bakım masraflarını, E ise yıllık üretilecek enerji miktarını göstermektedir.

Ege Denizi ve Gökçeada kıyılarında yüzer deniz üzeri tesisi yatırımının çözümlenmesi için gereken en önemli belirsizlik kıyıdan uzaklaştıkça hızla artan deniz derinliğidir. Ülkemizde henüz kurulu bir yüzer deniz üzeri rüzgâr enerjisi santrali olmadığı için belirsiz olan CAPEX ve OPEX değerleri yatırım öncesi çalışmalarda bir bilinmezlik söz konusu olmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmalarda genellikle yatırımcılar, Kuzey Denizi gibi bölgelerde kurulu olan santral örneklerine yönelmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada kurulum gerçekleştirilecek alternatif bölgenin her iki kıyıya da uzaklığı 12 km'dir. Yapılan çalışmalarda ise kıyıdan uzaklığın 50 km'den sonra maliyete ve işletme giderlerine fark edilir derecede etki yarattığı gösterilmiştir [220]. Bu çalışmadan yola çıkılarak kurulum gerçekleştirilecek alternatif bölge olan Gökçeada çevresi için kıyıdan uzaklığın benzer maliyetlere neden olacağı kabul edilmiştir.





Şekil 266. Kıydan uzaklık aralığına göre maliyet katsayısı [220].

Bir ekonomik yatırım faiz ve eskalasyon değerlerinden etkilenmektedir [104]. Bu sebeple enerji maliyetinin daha doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için, kurulacak türbin inşaatı ve işletim süresince gerçekleştirilecek olan toplam maliyetlerin yapı ömrü boyunca üretilen toplam enerji miktarına bölünmesi gerekmektedir. Bu yöntem ‘bir değere getirilmiş maliyetler yöntemi’ (levelized costs) olarak adlandırılmakta ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [221].

$$g = \frac{\sum_{t=0}^n [C_k(t)C_m(t)] (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n E(t)(1+r)^{-t}} \quad (102)$$

Burada r iskonto oranını, t yılı göstermektedir.

Deniz üzeri rüzgâr santralleri tesis maliyetleri, kıydan uzaklık, deniz yatağı yapısı ve deniz derinliğine göre değişmektedir. Kurulum gerçekleştirilecek alternatif bölgenin kıyıya uzaklığı 10-20 km ve derinliği 110-120 metre arasında olduğundan birim tesis maliyeti 3100€/kW olarak seçilmiştir. Burada deniz derinliğine göre değişen maliyetler Tablo 70.’ten belirlenirken, 110-120 metre için olan değerler, ilgili referans çalışması üzerinden interpolasyon gerçekleştirilerek bulunmuştur. Kıydan uzaklık için maliyetler ise Tablo 71.’de gösterilmiştir [222].



Tablo 70. Su derinliğine bağlı olarak açık deniz rüzgâr enerjisi yatırım maliyetleri (€/kW) [222].

Maliyetler	Su derinliği (m)			
	10-20	20-30	30-40	40-50
Türbin	772	772	772	772
Temel	352	466	625	900
Kurulum	465	465	605	605
Şebeke bağlantısı	133	133	133	133
Diğer giderler	79	85	92	105
Toplam	1801	1921	2227	2515

Tablo 71. Kıyıya olan uzaklığa bağlı olarak açık deniz rüzgâr enerjisi yatırım maliyetleri (€/kW) [220].

Maliyetler	Kıyıya olan uzaklık (km)							
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-100	100-200	>200
Türbin	772	772	772	772	772	772	772	772
Temel	352	352	352	352	352	352	352	352
Kurulum	465	133	487	500	511	607	816	964
Şebeke bağlantısı	133	159	159	211	236	314	507	702
Diğer	79	81	81	84	85	87	88	80
Toplam	1801	1840	1851	1919	1956	2132	2535	2879

Tablo 72. Birim maliyet hesabında kullanılan değerler

Değişken	Birim	Değer
Birim tesis maliyeti	€/kWh	3100
Yapı ömrü	Yıl	30
İnşaat süresi	Yıl	3
Birim işletme ve bakım maliyeti	€/kW-yıl	68
Faiz oranı	%	6
İskonto oranı	%	14,75
Eskalasyon oranı	%	8



Tablo 72.'de verilen bu değerlerden inşaat süresi boyunca yatırım dağılımı ilk yıl için %40, ikinci yıl için %30 ve üçüncü yıl için ise %30 olduğu kabul edilmiştir. Eskalasyon oranı 2022 yılı 3. Dönem için açıklanan eskalasyon oranlarından alınmıştır [222]. Faiz oranı ise politika faizidir. Tesis ömrü ise rüzgâr enerji santralleri için kararlarda 20 yıl iken, denizlerdeki türbülans etkilerinin az olmasından dolayı 25-30 yıl civarında olmaktadır [223]. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise yapı ömrü Tablo 72.'deki gibi 30 yıl olarak alınmıştır.

2.11.1. Yıllık Sermaye Masrafları

Çalışmada gerçekleştirilen yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi santrali kurulum alternatif bölgesi için birim maliyeti (C_s) 3100 €/kW olarak hesaplanmıştır. Aşağıda Tablo 73.'te ise literatür çalışmaları [224] doğrultusunda belirlenen maliyet dağılımları gösterilmiştir.

Tablo 73. Maliyet dağılımları [224].

	Yüzde (%)	Birim maliyeti (€/kW)
Türbin + kule	55	1705
Trafo + kablo	15	465
Platform tipi	20	620
Projelendirme ve mühendislik	6	186
Çevre analizi	3	93
Diğer	1	31
Toplam	100	3100

Tablo 73. incelendiğinde en fazla giderin türbin ve kule masrafları (1705 €/kW) ve daha sonra platform tipi (620 €/kW) olduğu görülmektedir. İlk yatırım tutarı denklem (103)'e göre aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$I_d = C_s \times N_e \quad (103)$$



Buna göre $I_d = 3100 \times 120 \times 10^3 \text{ (kW)} = 372.000.000 \text{ €}$ olur. Kurulum gerçekleştirilecek olan alternatif bölgeden kıyıya uzaklığı 12 km'dir. Şekil 285.' te belirtilen kıyidan uzaklık aralığına göre maliyet katsayısı göz önüne alındığında bu mesafe 10-20 km aralığına düşmektedir ve bu katsayı yaklaşık olarak 1,01 olarak okunmaktadır. Bu nedenle toplam ilk yatırım tutarı $I_d = 372.000.000 \times 1,01 = 375.720.000 \text{ €}$ olmaktadır. Tesisin devreye alınma tarihindeki gerçek toplam yatırım maliyetinin bulunması için ise faiz ve eskalasyon oranlarının da hesaba katılması gerekmektedir. Belirlenen inşaat süresinin 3 yıl olmasından dolayı her yıla ait eskalasyon yükleri ve masrafları hesaplanarak Tablo 74.'te sunulmuştur.

Tablo 74. İnşaat süresince eskalasyon hesabı (eskalasyon oranı $e = \%8$)

İnşaat Süresi (Yıl)	Harcama Dağılımı (%)	Eskalasyonsuz Harcama Planı (M€)	Eskalasyon Yükü (M€)	Eskale Edilmiş Fiyat (M€)
1	40	150,288	12,02	162,31
2	30	112,716	18,03	130,75
3	30	112,716	27,05	139,77
Toplam	100	375,12	57,11	432,83

Gerçekleştirilecek olan inşaat süresince yapılan harcamalar için kredi çekilecek olursa, inşaat süresi sonunda oluşacak ek faiz yükünün de geri ödenmesi gereklidir [221]. Bu durum da oluşacak yeni maliyet Tablo 75.' te gösterilmiştir.

Tablo 75. İnşaat süresince faiz hesabı (faiz oranı $i = 6$)

İnşaat Süresi (Yıl)	Eskale Edilmiş Fiyat (M€)	Faiz Yükü (M€)	Eskale Edilmiş Fiyat + Faiz (M€)
1	162,31	29,22	191,53
2	130,75	15,69	146,44
3	139,77	8,39	148,15
Toplam	432,83	53,29	486,12



Tablo 74. ve Tablo 75.'ten anlaşıldığı üzere ilk yatırım maliyeti üzerine 57,11 Milyon € eskalasyon ve 53,29 Milyon € faiz yükleri eklenmiştir. Böylece tesisin inşaat süresi sonunda gerçek toplam sermaye maliyeti 486,12 Milyon € olmuştur.

Santralin enerji üretimine başladığı tarihte P değerine sahip olan yatırım, kullanım ömrü boyunca sabit yıllık sermaye masrafı (yıllık taksit) denklem (104) ile hesaplanmaktadır.

$$C_k = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (104)$$

Bu denklemde i , faiz oranı ve n kullanım ömrü olmak üzere yerine yazılırsa, sabit yıllık sermaye masrafı;

$$C_k = 486,12 \frac{0,06(1+0,06)^{30}}{(1+0,06)^{30} - 1} = 35,32 \text{ Milyon €/yıl olarak hesaplanır.}$$

Santralin kullanım ömrü boyunca sabit sermaye masrafı olan 35,32 Milyon € tutarının ana para ve faiz bölümü ile bir değere getirilmiş maliyetler yöntemi (levelized cost) ile tesis sermaye maliyet hesabı aşağıda Tablo 76.'da verilmiştir. Tablodaki '*bugünkü değer*' sütunu ile, yıllık ödemelerin üretime geçildiği tarihe göre indirgenmiş değerler ifade edilmektedir. Diğer sütunlardan *işletme periyodu*, yapı kullanım ömrünü, *borç*, çekilen krediden kalan borç miktarını, *yıllık sermaye masrafı*, yıllık sabit kredi taksit tutarını, *ödenen yıllık faiz tutarı*, yıllık sabit kredi taksit tutarının faiz kısmını, *ödenen ana para tutarı*, yıllık sabit kredi taksit tutarının ana para kısmını, r ise iskonto oranını göstermektedir.



Tablo 76. Tesis sermaye maliyet hesabı

İşletme Periyodu (yıl)	Borç (M€)	Yıllık sermaye masrafı (C _k) (M€)	Ödenen faiz tutarı (M€)	Ödenen ana tutarı para (M€)	$1/(1+r)^t$ r=%14,75	Bugünkü değer (M€)
1	486,12	35,32	29,17	6,15	0,871	30,78
2	476,97	35,32	28,80	6,52	0,759	26,82
3	473,45	35,32	28,41	6,91	0,662	23,37
4	466,55	35,32	27,99	7,32	0,577	20,37
5	459,22	35,32	27,55	7,76	0,503	17,75
6	451,46	35,32	27,09	8,23	0,438	15,47
7	443,23	35,32	26,59	8,72	0,382	13,48
8	434,51	35,32	26,07	9,25	0,333	11,75
9	425,26	35,32	25,52	9,80	0,290	10,24
10	415,46	35,32	24,93	10,39	0,253	8,92
11	405,07	35,32	24,30	11,01	0,220	7,77
12	394,06	35,32	23,64	11,67	0,192	6,78
13	382,39	35,32	22,94	12,37	0,167	5,90
14	370,02	35,32	22,20	13,12	0,146	5,15
15	356,90	35,32	21,41	13,90	0,127	4,48
16	343,00	35,32	20,58	17,74	0,111	3,91
17	328,26	35,32	19,70	15,62	0,096	3,41
18	312,64	35,32	18,76	16,56	0,084	2,97
19	296,09	35,32	17,77	17,55	0,073	2,59
20	278,53	35,32	16,71	18,60	0,064	2,25
21	259,93	35,32	15,60	19,72	0,056	1,96
22	240,21	35,32	14,41	20,90	0,048	1,71
23	219,31	35,32	13,16	22,16	0,042	1,49
24	197,15	35,32	11,83	23,49	0,037	1,30
25	173,66	35,32	10,42	24,90	0,032	1,13
26	148,76	35,32	8,93	26,39	0,028	0,99
27	122,37	35,32	7,34	27,97	0,024	0,86
28	94,40	35,32	5,66	29,65	0,021	0,75
29	64,75	35,32	3,88	31,43	0,019	0,65
30	33,32	35,32	2,00	33,32	0,016	0,57
Toplam=			573,36	486,12		235,57



Tablo 76.'ya göre santralin kullanım ömrü süresince ödenecek sabit yıllık sermaye masraflarının bugünkü değeri denklem (105)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\sum_{t=1}^n C_k(t)(1+r)^{-t} \quad (105)$$

Burada n , C_k ve t değerleri yerine konulursa, sabit yıllık sermaye masraflarının bugünkü değeri;

$$\sum_{t=1}^{30} 35,32 (1 + 0,1475)^{-t} = 486,12 \text{ Milyon € } \text{olmaktadır.}$$

Daha sonra santralin yıllık ortalama enerji üretimi denklem (106)'ya göre hesaplanır ve tesisin kullanım ömrü boyunca üretilen toplam enerji miktarı hesaplanır.

$$E = 8760 \times N_e \times C_p \quad (106)$$

$$E = 8760 \times 120 \times 10^3 \times 0,4 = 420,48 \times 10^6 \text{ kWh/yıl olarak hesaplanır.}$$

Kullanım ömrü boyunca üretilen toplam enerji miktarı ise;



$$\sum_{t=1}^{30} E(t) (1 + r)^{-t} \quad (107)$$

denkleminde hesaplanarak;

$$\sum_{t=1}^{30} 420,48 \times 10^6 (1 + 0,1475)^{-t} = 2,8 \times 10^9 \text{ kWh olarak bulunur.}$$

Daha sonra denklem (105)'ten bulunan değerin, denklem (107)'den bulunan değere bölünmesi ile, santralin kullanım ömrü boyunca *birim enerji başına düşen sermaye maliyeti* hesaplanmış olur. Bu oranın denklem (102)'de verilen bir değere getirilmiş maliyetler (levelized cost) yöntemi olduğu görülmektedir. Birim enerji başına düşen sermaye maliyeti;

$$g_k = \frac{235,37 \times 10^8}{2,80 \times 10^9} = 8,41 \text{ cent/kWh olur.}$$

2.11.2. Tesis Yıllık İşletme ve Bakım Masrafları (O&M)

İşletme ve bakım giderleri, santralin kullanım ömrü süresince, işçilik, malzeme, kira, bakım ve onarım gibi giderlerin tümüdür. Deniz üzeri rüzgâr enerjisi üretim tesislerinde işletme ve bakım maliyetleri 72 \$/kW-yıl olarak kabul edilmektedir [225]. Bunun %31'ni bakım ve yedek parça masrafları, %21'ini işletme masrafları, %18'ini yer kirası, %13'ünü



sigorta ve %17'sini de diğer masraflar oluşturmaktadır [226]. Buna göre santralin yıllık işletme ve bakım masrafları,

$$C_m = 72 \times 0,94 \times 120 \times 10^3 = 8,16 \text{ Milyon €/yıl olarak hesaplanmıştır.}$$

Burada $1\$/0,94\text{€}$ eşitliği kabul edilmiştir. Aşağıda Tablo 77.'de ise santralin kullanım ömrü boyunca işletme ve bakım giderleri maliyet hesabı sunulmuştur.

Tablo 77. Tesis işletme ve onarım maliyeti hesabı

İşletme Periyodu	Yıllık O&M Masrafı (C _m) (M€)	$1/(1+R)^T$ r=%14,75	Şimdiki Değer (M€)
1	8,16	0,871	7,11
2	8,16	0,759	6,20
3	8,16	0,662	5,40
4	8,16	0,577	4,71
5	8,16	0,503	4,10
6	8,16	0,438	3,57
7	8,16	0,382	3,11
8	8,16	0,333	2,71
9	8,16	0,290	2,37
10	8,16	0,253	2,06
11	8,16	0,220	1,80
12	8,16	0,192	1,57
13	8,16	0,167	1,36
14	8,16	0,146	1,19
15	8,16	0,127	1,04
16	8,16	0,111	0,90
17	8,16	0,096	0,79
18	8,16	0,084	0,69
19	8,16	0,073	0,60
20	8,16	0,064	0,52
21	8,16	0,056	0,45
22	8,16	0,048	0,40
23	8,16	0,042	0,34
24	8,16	0,037	0,30



Tablo 77.'nin devamı

25	8,16	0,032	0,26
26	8,16	0,028	0,23
27	8,16	0,024	0,20
28	8,16	0,021	0,17
29	8,16	0,019	0,15
30	8,16	0,016	0,13
Toplam=			54,43

Tablo 77.'de gösterildiği gibi santralin kullanım ömrü boyunca işletme ve bakım masraflarının bugünkü değeri 54,43 Milyon € olarak hesaplanmıştır. Buna göre birim enerji başına işletme ve bakım masrafı (O&M) ise;

$$g_m = \frac{54,43 \times 10^8}{2,80 \times 10^9} = 1,94 \text{ €cent/ kWh olarak bulunur.}$$

2.11.3. Birim Enerji Maliyeti

İşletme-bakım masrafları ve sermaye masrafları toplanarak santralden elde edilecek enerjinin birim maliyeti bulunmaktadır. Buna göre birim enerji maliyeti;

$$g = g_k + g_m = 8,40 + 1,94 = 10,34 \text{ €cent/kWh olmaktadır.}$$



2.11.4. Yerli İmalat Teşviki ve Karbon Emisyonu Geliri

Son günlerde ülkemizde de yenilenebilir enerjinin yaygınlaştırılması hususunda devlet desteği giderek artmaktadır. Bu alanda en önemli devlet desteği, 2010 yılında yürürlüğe giren 6094 sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu gereği santral ekipmanlarının yerli imalat olması sonucunda kazanılan ek gelirlerdir [104].

Tablo 78. Devlet yerli imalat teşvikleri

Ekipman	Teşvik miktarı
Kanat	0,8 \$cent/kWh
Jeneratör ve güç elektroniği	1,0 \$cent/kWh
Türbin kulesi	0,6 \$cent/kWh
Rotor ve nasele mekanik aksam tasarımları	1,3 \$cent/kWh

Günümüzde Tablo 78.'deki ekipmanların neredeyse tamamı yerli olarak üretilmekte olup bu nedenle imalat teşvikinden elde edilebilecek maksimum gelir;

$$g_y = (0,8 + 1,0 + 0,6 + 1,3) \times 0,94 = 3,48 \text{ €cent/kWh} \text{ olmaktadır. (1\$=0,94€)}$$

2009 yılında ülkemizin de imzaladığı Kyoto Protokolü kabulünden beri karbon ayak izi konusu ciddi şekilde gündeme gelmektedir. Tesislerin havaya saldıkları karbon miktarları devlet tarafından denetlenmesi zorunlu hale gelmiştir. Yenilenebilir enerji tesislerine ise 'sıfır' emisyonlu olduğu için 'karbon emisyonu geliri' adı altında ek bir ödenek verilmektedir. Kömür kullanan termik santraller tarafından ortalama kWh başına 1100 g CO₂ çevreye salınmaktadır [227]. Avrupa'da Nisan 2022'den itibaren geçerli olmak üzere ortalama 1 ton CO₂ ortalama 42,77€'dur [228]. Böylece santral,

$$g_c = 1100 \text{ g/kWh} \times 42,77 \text{ €/t} = 4,70 \text{ €cent/kWh}$$



karbon emisyon geliri elde etmiş olur.

2.11.5. Birim Enerji Geliri ve Net Kazanç

Devletler, yenilenebilir enerji teşvikleri kapsamında yenilenebilir enerji santrallerine yüksek alım garantisi de vermektedir. Ülkemizde verilen bu alım garantisi, diğer kaynaklardan üretilen enerjiye göre daha fazla sunulmaktadır. 6094 sayılı Enerji Kanunu gereği kaynak türüne göre birim enerji alım fiyatları aşağıda Tablo 79.'de verilmiştir [229].

Tablo 79. Kaynak türüne göre birim enerji alım fiyatı [229].

Yenilenebilir enerji tesis türü	Birim enerji alım fiyatı (\$/kWh)
Hidroelektrik santral	7,3
Rüzgâr santrali (karasal)	7,3
Jeotermal santral	10,5
Biyokütle santrali	13,3
Güneş enerjisi santrali	13,3

Tablo 79.'dan de görüldüğü gibi ülkemizde henüz uygulaması bulunmadığından dolayı, kanun ile ilgili de bir düzenleme mevcut değildir. Fakat Tablo 79.'dan yola çıkılarak deniz üzeri rüzgâr santralleri için ileriki dönemde gerçekleştirilebilecek alım garantisi tahmin yapılabilir.

Kanunda uygulanan fiyatlandırmalar birim tesis maliyetlerine göre yapılmaktadır. Birim tesis maliyeti düşük olana düşük, yüksek olana daha yüksek fiyat garantisi verilmektedir. Birim tesis maliyeti 1000-1200 \$/kW olan karasal rüzgâr santralleri için alım garantisi 7,3 \$cent/kWh, 1600-1900 \$/kW olan jeotermal santraller için 10,5 \$cent/kWh, 2000-2500 \$/kW olan güneş santralleri için ise 13,3 \$cent/kWh alım garantisi verilmiştir [167]. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise alternatif bölge için kurulumu gerçekleştirilecek olan açık yüzer açık deniz rüzgâr santrali için birim tesis maliyeti yukarıda 3100 €/kW olarak belirlenmişti. 1\$=0,94€ dönüşümü gerçekleştirildiğinde ise yaklaşık 3300 \$/kW olan birim enerji maliyeti, tabloda verilen aralıkların dışında kaldığı için bu tesise en yüksek değer olan 13,3 \$cent/kWh fiyat alım garantisi uygulandığı kabul edilmiştir.

Bunun üzerine daha önceki kısımlarda hesaplanan yerli imalat teşviki (g_y) ve karbon emisyon gelirini (g_c) de eklenerek, tesis için toplam birim enerji geliri bulunmuş olur.



$$g_T = g_e + g_y + g_c \quad (108)$$

$$g_T = (13,3 \times 0,94) + 3,48 + 4,77 = 20,75 \text{ cent/kWh}$$

Burada g_e için $1\$=0,94\text{}$ dönüşümü gerçekleştirilmiştir.

Yapılan tüm birim başına gelir ve gider hesaplarından sonra alternatif bölgeye kurulumu gerçekleştirilecek olan yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi santrali için net kazanç is

$$\text{Net kazanç} = g_T - g = 20,75 - 10,34 = 10,41 \text{ cent/kWh}$$

olur.

2.11.6. Tesis Geri Ödeme Süresi

Enerji santrali kurulumunda önemli noktalardan diğeri de yatırımın kendini geri ödeme süresidir. Tesisin ne kadar sürede kendini geri ödeyeceğı, bu yatırımın uygun ve mantıklı olup olmadığı hakkında bize bilgi vermektedir. Genellikle deniz üzeri rüzgâr santrallerinin, tüm maliyetlerini 8-10 yıl arasında çıkarması istenmektedir. Bu aralık dışında kalanlar tesis ekonomik ömrü göz önüne alındığında uygun ve mantıklı bir yatırım olarak değerlendirilmektedir.

Tüm gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda tesis yatırımının kendini geri ödeme süresi; yatırımın şimdiki toplam maliyet değerinin, 1 yılda ele edilecek net kazanç oranlanması ile bulunur. Buna göre, belirlenen alternatif bölgede kurulumu

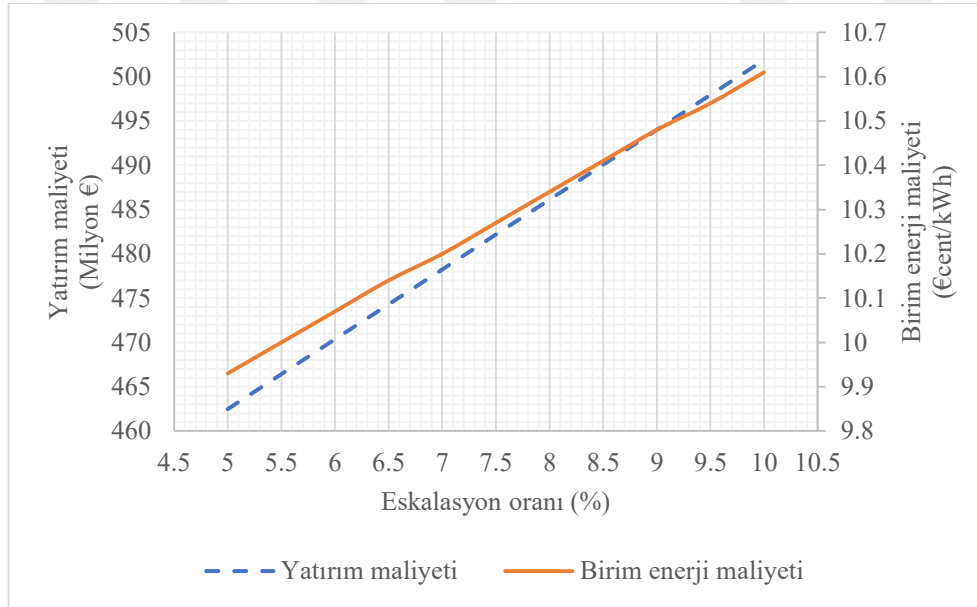


gerçekleştirilecek olan, her biri 10 MW gücünde 12 türbinden oluşan 120 MW'lık kurulu güce sahip bir yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi santralının geri ödeme süresi;

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{235.570.000 \text{ €}}{10,41 \frac{\text{€cent}}{\text{kWh}} \times 2,80 \times 10^9 \frac{\text{kWh}}{\text{yıl}}} = 8,08 \text{ yıl yani 8 yıl 29 gün olarak bulunur.}$$

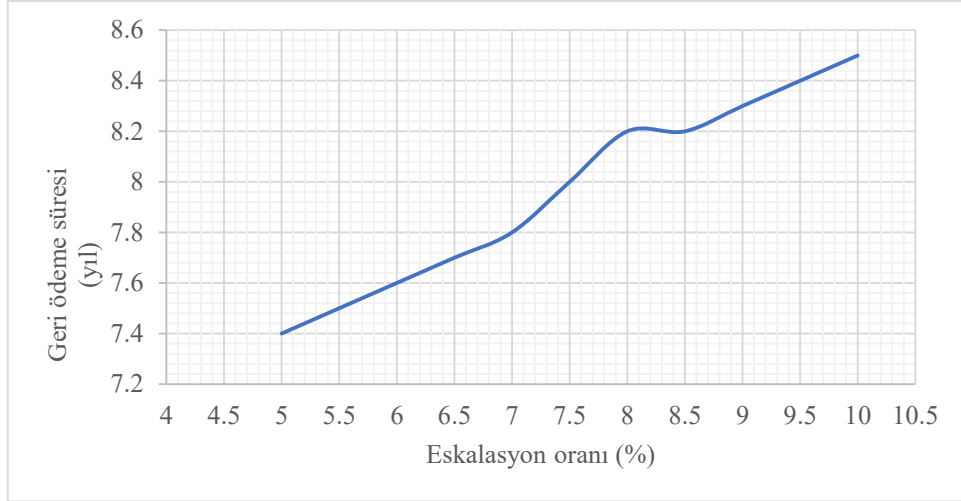
2.11.7. Eskalasyon, Faiz ve Kurulu Gücün Ekonomik Analize Etkisi

Gerçekleştirilen ekonomik analizlerde kullanılan eskalasyon ve faiz oranları zamana veya kurumlara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu değerlerden birinin değişiminin yatırım maliyeti, birim enerji maliyeti ve geri ödeme süreleri üzerindeki etkileri aşağıda şekillerde sırasıyla gösterilmiştir.

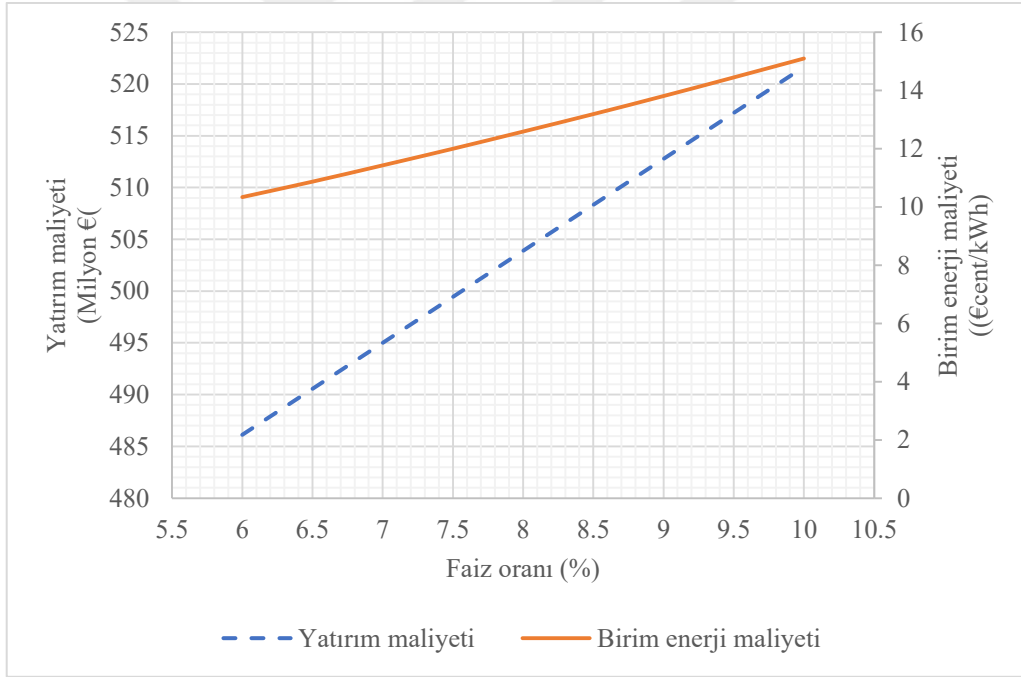


Şekil 267. Eskalasyon oranına göre yatırım ve birim enerji maliyetlerinin değişimi (i= %6, N_e= 120 MW)



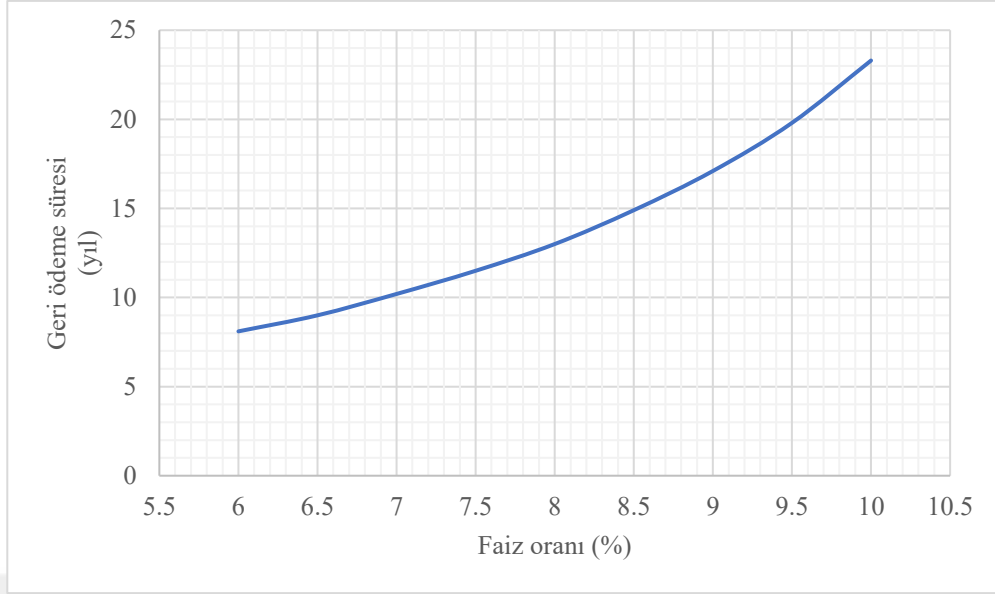


Şekil 268. Eskalasyon oranına göre geri ödeme süresinin değişimi ($i = \%6$, $N_e = 120$ MW)



Şekil 269. Faiz oranına göre yatırım ve birim enerji maliyetlerinin değişimi ($e = \%8$, $N_e = 120$ MW)





Şekil 270. Faiz oranına göre geri ödeme süresi değişimi ($e = \%8$, $N_e = 120$ MW)



3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye karasularında kurulabilecek bir yüzer açık deniz rüzgâr türbini enerjisi türbinleri için hareket analizleri ve performansları üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçları irdelenmiştir.

Öncelikle çalışmanın gerçekleştirileceği alternatif kurulum bölgesi, Türkiye karasularında seçilmiştir. Bunu gerçekleştirirken uzman görüşleri doğrultusunda belirlenen kriterlere göre Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi kullanılmıştır. Bulunan en uygun kurulum bölgesi Çanakkale ile Gökçeada arasında, Gökçeada'nın Kuzeybatısında 12 km açığı belirlenmiştir.

Daha sonra açık erişim kodlu yüzer açık deniz rüzgâr türbini platform konseptleri türlerinden dört tanesi belirlenmiştir ve validasyon işlemleri gerçekleştirilerek birbirleri arasında kıyaslaması yapılmıştır ve en uygun bölge için uygun konsept belirlenmiştir. Validasyon işlemi için aero- servo- elastik çözümleme yapan NREL tarafından geliştirilmiş FAST programı kullanılmıştır. Bu program ile öncelikle statik ofset testleri gerçekleştirilerek platformun analiz için başlangıç koşulları belirlenmiştir. Daha sonra serbest sönümlenme testleri gerçekleştirilmiş ve doğal frekansları ile doğal periyodları belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar literatürde gerçekleştirilen model testleri ve sayısal çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda bulunan ancak çalışmaya olumsuz etkisi olmayan farklar, deney ölçekleri ve havuz derinliğinin yanı sıra, model yüzey pürüzlülüğünden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sonraki aşamada en uygun alternatif bölgede kurulumu gerçekleştirilecek yüzer açık deniz rüzgâr türbini konsepti belirlenerek çevresel koşullar ve yükler altında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle rüzgâr hızına göre hesaplar gerçekleştirilerek türbin ve bu türbin ve kulesine uygun platform tipi seçilmelidir. Kurulum gerçekleştirmek üzere belirlenen alternatif bölgede ortalama rüzgâr hızı 9,26 m/s'dir. Göbek yükseklikleri dikkate alınarak 90 m ve 119 m için hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve türbin göbek yüksekliği olan 119 m seviyesinde rüzgâr hızı 11,25 m/s olarak hesaplanmıştır. Hesaplama *logaritmik güç kanunu* yöntemi kullanılmıştır. Bulunan bu rüzgâr hızına göre, rüzgâr gücü ise 8,93 MW olarak bulunmuştur. Bu gücün eldesi için DTU tarafından geliştirilen 10 MW'lık referans rüzgâr türbini alternatif bölgede kullanılmak üzere seçilmiştir. Çalışmada



incelenen konseptlerden NAUTILUS ve Olev Olsen tarafından geliştirilen LIFES50+ OO-STAR türbinleri bu türbin ve kulesini destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bunlardan da hareket analizleri incelendiğinde daha stabil olan LIFES50+ OO-STAR platformu gerçekleştirilen bu çalışmada alternatif bölge için tercih edilmiştir. Böylece alternatif bölge için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon için toplam 10 operasyonel koşul belirlenmiştir. Bu operasyonel koşullar altında zaman tanımlı alanda simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon süresi olarak 5600 s belirlenmiştir. Bu zaman diliminden sonraki sürelerde belirli olarak periyodik olarak hareketler tekrar ettiği görülmüştür. Gerçekleştirilen simülasyonlara göre bölge için seçilen türbin ve platform konseptinin uygulanabilir olduğu gözlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma ile belirli operasyonel koşulların yüzer açık deniz rüzgâr türbini hareketleri ve bunun performansa etkileri gösterilmiştir. Henüz ülkemizde üretimi gerçekleştirilmeyen ancak yatırım yapılması gündemde olan açık deniz rüzgâr enerjisi üretimi fizibilite çalışmalarına ışık tutacak bu çalışma, bundan sonraki gerçekleştirilecek çalışmalara da referans olacaktır.

Çalışmanın son kısmında ise belirlenen alternatif bölgenin maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Bölge her iki kıyıya da 12 km uzaklıktadır. Bölge düşeyde 6000 m, yatayda ise 2000 m'lik bir alan içerisinde çalışmaya olanak tanımaktadır. Bu sınırlar haricinde kalan alanlar kurulum için uygun olmayan bölgelerdir. Rüzgâr türbinleri kurulurken D kanat çapı olmak üzere aralarında yatay doğrultuda 5D, düşey doğrultuda ise 10 D boşluk bırakılmalıdır. Bu husus dikkate alındığında yatayda 3 sıra, düşeyde ise 4 sıra olmak üzere toplam $3 \times 4 = 12$ tane yüzer açık deniz rüzgâr türbini kurulumu gerçekleştirilebilecektir. Seçilen 10 MW'lık türbin göz önüne alındığında 12 türbinli yüzer açık deniz rüzgâr enerjisi santrali kurulu gücü $12 \times 10 \text{ MW} = 120 \text{ MW}$ olacaktır. Gerçekleştirilen maliyet analizi de 120 MW'lık bir santral için yapılmıştır. Ülkemizde henüz açık deniz rüzgâr enerjisi santralleri için bir kanun, bir yürütme olmadığından referans çalışmalar öz önünde bulundurularak olası bir maliyet hesaplaması yapılmıştır. Bunun için şimdiki değere indirme yöntemi (Levelized Cost of Energy) kullanılmıştır. Burada ilk yatırım maliyeti olarak 3100€/kWh belirlenmiştir. Daha sonraki hesaplamalar için %6 faiz oranı, %14,75 iskonto oranı ve % 8 eskalasyon oranı belirlenerek yapılan hesaplamalar sonucunda 486,12 Milyon €' luk bir yatırımın için birim maliyet, işletme ve bakım masrafları dahil 8,40 €cent/kWh olarak hesaplanmıştır. Ülkemizde deniz üzeri rüzgâr enerjisi santralleri ile ilgili bir teşvik ve tarife henüz olmadığından diğer yenilenebilir enerji santralleri göz önünde bulundurularak bu çalışma gerçekleştirilmiş ve bu yatırımın ilgili



teşvik ve tarifeler doğrultusunda yaklaşık 8 yıl gibi bir sürede kendini geri ödeyeceği bulunmuştur.

Maliyet analizi bu seçilen bölge, kurulu güç kapasitesi ve banka ve firmaların oranlarına göre değişebilmektedir. Bir başka bölge veya kurulu güç için ve bir başka yatırım maliyeti ve faiz oranları için yatırım uygun olmayabilir. Bu sebeple bir an önce tarife ve teşvikler belirlenmelidir. Çalışmanın olası teşvik ve tarife fiyatları için fikir verebileceği düşünülmektedir.

Çalışmanın daha da ileriye taşınması için kurulumu gerçekleştirilecek bölgelerin çalışmaları artırılabilir. Çalışmalar için yerinde ölçümler daha etkili sonu verecektir. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) incelediğinde Güneybatı Ege, İzmir açıkları, Karadeniz'in Kuzeydoğusu Tekirdağ açıkları için alternatif bölge çalışmaları gerçekleştirilebilir. Ancak derinlik arttıkça maliyetin artması, Karadeniz'in çok çabuk derinleşmesi yapılacak olan çalışmaları kısıtlayabilmektedir. Maliyetin azaltılması için yerli üretimlere geçilebilir. İzmir açıkları için ise karasularımızın sınırları hususunda olumsuzluklar çıkabilmesi olasıdır. Çünkü rüzgârın karasal engellerden etkilenmeden tamamen sürtünmesiz olarak verimli bir şekilde oluşması için 5 km gibi bir feç mesafesine ihtiyaç vardır. Ege'deki irili ufaklı adalar bu konuda engel teşkil edebilmektedir.

Diğer taraftan bu konuda gelişebilmek için yeni konseptler geliştirilebilir. Bunun için konu ile çalışmalar gerçekleştirilecek bilgi birikime sahip kişiler yetiştirilmelidir. Bu amaçla üniversitelerde konu ile ilgi dersler ve uygulamalar verilebilir. Ayrıca yerlileş Böylece üç tarafı denizlerle kaplı ülkemizde sürdürülebilir bu enerji hakkında farkındalık oluşturulacaktır.



4. KAYNAKLAR

1. Akalın, S., Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Türbinlerinin Kurulum Yeri Seçimi İçin Bir Model Önerisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2018.
2. Kaldellis, J., K., ve Zafirakis, D., The Wind Energy (R)evolution: A Short Review of a Long History, Renewable Energy, 26,7 (2011) 1887-1901.
3. Global Wind Energy Council, Global Wind Report, Bonn, 2017.
4. Global Wind Energy Council, GWEC Global Wind Report-2019, Bonn, 2019.
5. Uzunoglu E., Karmakar, D. ve Soares, C., G., Floating Offshore Wind Farms, Springer, 53-76, 2016.
6. Uzunoglu, E., A System for the Hydrodynamic Design of Floating Wind Turbine Platforms, Doktora Tezi, Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portekiz, 2019.
7. Intelligence, W., B., The European Offshore Wind Industry–Key Trends and Statistics 2016, Wind Europe, 20 (2017).
8. Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J. ve Sclavounos, P., Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2007.
9. Det Norske Veritas, Stability and Watertight Integrity, DNV-OS C301, Oslo, 2011.
10. Hopstad, A., L., H., Argyriadis, K., Manjock, A., Goldsmith, J. ve Ronold, K., O., DNV GL Standard for Floating Wind Turbines, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Kasım 2018, California, Bildiriler Kitabı, 1035-1040.
11. Laura C., S. ve Vicente, D., C., Life-Cycle Cost Analysis of Floating Offshore Wind Farms, Renewable Energy, 66 (2014) 41-48.
12. Chen, C., Y., Mei, X. ve Tills, M., Effect of Heave Plate on Semisubmersible Response, 17th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Temmuz 2007, Lisbon, Bildiriler Kitabı, 2217-2221.
13. Lopez-Pavon C. ve Souto-Iglesias, A., Hydrodynamic Coefficients and Pressure Loads on Heave Plates for Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbines: A Comparative Analysis Using Large Scale Models, Renewable Energy, 81 (2015) 864-881.



14. Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A. ve Weinstein, A., WindFloat: A Floating Foundation for Offshore Wind Turbines, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2,3 (2010).
15. Cermelli, C., Roddier, D. ve Aubault, A., WindFloat: A Floating Foundation for Offshore Wind Turbines-Part II: Hydrodynamics Analysis, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Mayıs 2009, Honolulu, Bildiriler Kitabı, 135-143.
16. F. O. W. Consortium, Fukushima Floating Offshore Wind Farm Demonstration Project (Fukushima FORWARD), Fukushima, 2014.
17. Marimirad, M. ve Michailides, C., V-Shaped Semisubmersible Offshore Wind Turbine: An Alternative Concept for Offshore Wind Technology, Renewable Energy, 83 (2015) 126-143.
18. J. A. Mercier, J., A., Branch, D., W., Vories, D., W. ve Marr, T., O., Design of the Hutton TLP, Offshore South East Asia Show, Şubat 1982, Singapore, Bildiriler Kitabı 10418.
19. Jeon, M., Lee, S. ve Lee, S., Unsteady Aerodynamics of Offshore Floating Wind Turbines in Platform Pitching Motion Using Vortex Lattice Method, Renewable Energy, 65 (2014) 207-212.
20. Tran T., T. ve Kim, D., H., The Platform Pitching Motion of Floating Offshore Wind Turbine: A Preliminary Unsteady Aerodynamic Analysis, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 142 (2015) 65-81.
21. Kibbee, S., E., Chianis, J., Davies, K., B. ve Sarwono, B., A., The Seastar Tension-Leg Platform, Offshore Technology Conference, Mayıs 1994, Texas, Bildiriler Kitabı, 243-256.
22. Matha, D., Model Development and Loads Analysis of an Offshore Wind Turbine on a Tension Leg Platform with a Comparison to Other Floating Turbine Concepts: April 2009, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado 2010.
23. Uzunoglu E. ve Guedes Soares, C., A System for the Hydrodynamic Design of Tension Leg Platforms of Floating Wind Turbines, Ocean Engineering, 171 (2019) 78-92.
24. Amate, J., Sánchez, G., D. ve González, G., Development of a Semi-Submersible Barge for the Installation of a TLP Floating Substructure. TLPWIND® case study, Windeurope Summit 2016, Eylül 2016, Hamburg, Bildiriler Kitabı 12016-12030.
25. James , R. ve Ros, M., C., Carbon Trust, Floating Offshore Wind: Market and Technology Review, London, 2015.
26. Nihei, Y., Iijima, K., Murai, M. ve Ikoma, T., A Comparative Study of Motion



Performance of Four Different FOWT Designs in Combined Wind and Wave Loads, ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Haziran 2014, California, Bildiriler Kitabı.

27. Hirdaris S., E., Bai, W., Dessi, D., Ergin, A., Gu, X., Hermundstad, O., A., Huijsmans, R., Iijima, K., Nielsen, U., D., Parunov, J., Fonseca, N., Papanikolaou, A., Argyriadis, K. ve Incecik A., Loads for Use in the Design of Ships and Offshore Structures, Ocean Engineering, 78 (2014) 131-174.
28. Det Norske Veritas, Design of Floating Wind Turbine Structures, DNV-OS-J103, Hovik, 2013.
29. Guedes Soares, C., Bhattacharjee, J. ve Karmakar, D., Overview and Prospects for Development of Wave and Offshore Wind Energy, Brodogradnja: Teorija i Praksa Brodogradnje i Pomorske Tehnike, 65,2 (2014) 87-109.
30. Muliawan, M., J., Karimirad, M., Gao, Z. ve Moan, T., Extreme Responses of a Combined Spar-Type Floating Wind Turbine and Floating Wave Energy Converter (STC) System with Survival Modes, Ocean Engineering, 65 (2013) 71-82.
31. Chen, L., Ponta, F., L. ve Lago, L., I., Perspectives on Innovative Concepts in Wind-Power Generation, Energy for Sustainable Development, 15,4 (2011) 398-410.
32. Fricke, W. ve Bronsart, R., Offshore Renewable Energy, International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC), Aralık 2012, Rostock, Bildiriler Kitabı 2,4: 153-200.
33. Thiagarajan K., P. ve Dagher, H., J., A Review of Floating Platform Concepts for Offshore Wind Energy Generation, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 136,2 (2014).
34. Moon III, W., L. ve Nordstrom, C., J., Tension Leg Platform Turbine: A Unique Integration of Mature Technologies, SNAME 16th Offshore Symposium, Şubat 2010, Texas, Bildiriler Kitabı.
35. Jonkman, J., M. ve Musial, W., Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Wind Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2010.
36. Jonkman, J., M., Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2010.
37. Robertson A., N., Jonkman, J., M., Goupee A., J., Coulling, A., J., Prowell, I., Browning, J., Masciola, M., D. ve Molta P., Summary of Conclusions and Recommendations Drawn from the DeepCwind Scaled Floating Offshore Wind System Test Campaign, ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Haziran 2013, Nantes, Bildiriler Kitabı, 10817-10829.



38. Coulling, A., J., Goupee, A., J., Robertson, A., N., Jonkman, J., M. ve Dagher, H., J., Validation of a FAST Semi-Submersible Floating Wind Turbine Numerical Model With DeepCwind Test Data, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 5,2 (2013) 23116-23146.
39. Jain, A., Goupee, A., J., Robertson, A., N., Kimball, R., W., Jonkman, J., M. ve Swift, A., H., P., FAST Code Verification of Scaling Laws for DeepCwind Floating Wind System, 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Haziran 2012, Rhodes, Bildiriler Kitabı, 355-365.
40. Martin, H. R., Kimball, R. W., Viselli, A., M. ve Goupee, A., J., Methodology for Wind/Wave Basin Testing of Floating Offshore Wind Turbines, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 136,2, (2014).
41. Koo, B., J., Goupee, A., J., Kimball, R., W. ve Lambrakos, K., F., Model Tests for a Floating Wind Turbine on Three Different Floaters, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 136,2, (2014).
42. Kimball, R. W., Goupee, A., J., Coulling, A., J. ve Dagher, H., J., Model Test Comparisons of TLP, Spar-Buoy and Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbine Systems, SNAME Maritime Convention, Ekim 2012, Rhode Island. Bildiriler Kitabı.
43. Det Norske Veritas, Offshore Standard: Design of Offshore Wind turbine Structures, DNV-OS-J101, As, 2013.
44. Azcona, J., Vittori, F., Schmidt, U., Svanije, F., Kapogiannis, G., Karvelas, X., Manolas, D., Voutsinas, S., Amann, F. ve Faerron-Guzman, R., Design Solutions for 10 MW Floating Offshore Wind Turbines, INNWind. EU, Deliverable D, 4 (2017) 37.
45. Cordle, A. ve Jonkman, J., M., State of the Art in Floating Wind Turbine Design Tools, 21st International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Haziran 2011 Hawaii, Birdiriler Kitabı, 367-374.
46. Uzunoglu E. ve Guedes Soares, C., On the Model Uncertainty of Wave Induced Platform Motions and Mooring Loads of a Semisubmersible Based Wind Turbine, Ocean Engineering, 148 (2018) 277-85.
47. Robertson, A. Jonkman, J., M., Masciola, M., Song, H., Goupee, A., J., Coulling, A., J. ve Luan, C., National Renewable Energy Laboratory (NREL), Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4, Colorado, 2014.
48. Robertson, A., Jonkman, J., M., Vorpahl, F., Popko, W., Qvist, J., Froyd, L., Chen, X., Azcona, J., Uzunoglu, E. ve Guedes Soares, C., Offshore Code Comparison Collaboration Continuation within IEA Wind Task 30: Phase II Results Regarding a Floating Semisubmersible Wind System, ASME 33rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Haziran 2014, California, Bildiriler Kitabı 45547.



49. Jonkman, J., M., Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2007.
50. Goupee, A., J., Koo, B., J., Kimball, R., W., Lambrakos, K., F. ve Dagher, H., J., Experimental Comparison of Three Floating Wind Turbine Concepts, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 136,2 (2014).
51. Robertson, A., N., Wendt, F., Jonkman, J., M., Popko, W., Dagher, H., Gueydon, S., Qvist, J., Vittori, F., Azcona, J. ve Uzunoglu, E., OC5 Project Phase II: Validation of Global Loads of the DeepCwind Floating Semisubmersible Wind Turbine, Energy Procedia, 137 (2017) 38-57.
52. Uzunoglu, E. ve Guedes Soares, C., Comparison of Numerical and Experimental Data for a DeepCwind Type Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbine, Renewable Energies Offshore (2015) 747-754.
53. Hall, M. ve Goupee, A., J., Validation of a Lumped-Mass Mooring Line Model with DeepCwind Semisubmersible Model Test Data, Ocean Engineering, 104, (2015) 590-603.
54. Bossler, A., Floating Offshore Wind Foundations: Industry Consortia and Projects in the United States, Europe and Japan, Maine International Consulting LLC, 1 (2013) 1-45.
55. Adam, F., Steinke, C., Dahlhaus, F. ve Großmann, J., GICON®-TLP for Wind Turbines-Validation of Calculated Results, 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Haziran 2013, Alaska, Bildiriler Kitabı. 421-427.
56. Hu, C., Sueyoshi, M., Liu, C., Kyojuka, Y. ve Ohya, Y., Numerical and Experimental Study on a Floating Platform for Offshore Renewable Energy, ASME 32nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Haziran 2013, Nantes, Bildiriler Kitabı 55423: V008T09A069.
57. Umay, M., Noguchi, T., Uchida, M., Shibata, M., Kawai, Y. ve Notomi, R., Wind Power Generation-Development Status of Offshore Wind Turbines, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 50,3 (2013) 29.
58. Executive Office of the President, Planning for federal Sustainability in the Next Decade, Executive Order 13693, Washington, DC, 2015.
59. Det Norske Veritas, Design of Offshore Wind Turbine Structure, Offshore Standards DNV-OS-J101, As, 2004.
60. German Lloyd, Part 2-Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Rules and Guidelines: IV-Industrial Services, Hamburg, 2005.
61. International Electrotechnical Commission, Wind turbines Part3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines, IEC 61400-3, Geneva, 2009.



62. American Bureau of Shipping, Guide for Building and Classing Bottom-Founded Offshore Wind Turbine Installations, ABS-176, Texas, 2015.
63. Ronold, K., O., Hansen, V., L., Godvik, M., Landet, E., Jørgensen, E., R. ve Hopstad, A., L., H., Guideline for Offshore Floating Wind Turbine Structures, ASME 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Haziran 2010, Shangai, Bildiriler Kitabı 49118: 381-388.
64. American Bureau of Shipping, Guide for Building and Classing Floating Offshore Wind Turbine Installations, Texas, 2013.
65. Nippon Kaiji Kyokai (NK), ClassNK Guidelines for Offshore Floating Wind Turbine Structures, Tokyo, 2012.
66. Hopstad, A., L., H., Ronold, K., O., Sixtensson, C. ve Sandberg, J., Standard Development for Floating Wind Turbine Structures, Proceedings of EWEA Offshore, 2013.
67. Simos, A., N., Ruggeri, F., Watai, R., A., Souto-Iglesias, A. ve Lopez-Pavon, C., Slow-Drift of a Floating Wind Turbine: An Assessment of Frequency-Domain Methods Based on Model Tests, Renewable Energy, 116 (2018) 133-154.
68. López-Pavón, C., Watai, R., A., Ruggeri, F., Simos, A., N. ve Souto-Iglesias, A., Influence of Wave Induced Second-Order Forces in Semisubmersible FOWT Mooring Design, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 137,3 (2015).
69. Srinivas, S., Musial, W., Bailey, B. ve Filippelli, M., Assessment of Offshore Wind System Design, Safety, and Operation Standards, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2014.
70. Karmakar, D., Guedes Soares, C. ve Pena, F., L., Reliability Based Design Loads of an Offshore Semi-Submersible Floating Wind Turbine, Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources, (2014) 919-926.
71. Kibbee, S., E., Leverette, S., J., Davies, K., B. ve Matten, R., B., Morpeth Seastar Mini-Tlp, Offshore Technology Conference, Mayıs 1999, Texas, Bildiriler Kitabı.
72. Tracy, C., C., H., Parametric Design of Floating Wind Turbines, Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2007.
73. Bachynski E., E. ve Moan, T., Design Considerations for Tension Leg Platform Wind Turbines, Marine Structures, 29,1 (2012) 89-114.
74. Han, Y., Le, C., Ding, H., Cheng, Z. ve Zhang, P., Stability and Dynamic Response Analysis of a Submerged Tension Leg Platform for Offshore Wind Turbines, Ocean Engineering, 129 (2017) 68-82.
75. Chakrabarti, S., Handbook of Offshore Engineering (2-volume set). Elsevier, 2005.



76. Leimeister, M., Bachynski, E., E., Muskulus, M. ve Thomas, P., Rational Upscaling of a Semi-Submersible Floating Platform Supporting Wind Turbine, Energy Procedia, 94 (2016) 434-442.
77. Clauss, G., F. ve Birk, L., Hydrodynamic Shape Optimization of Large Offshore Structures, Applied Ocean Research, 18,4 (1996) 157-171.
78. Birk, L., Application of Constrained Multi-Objective Optimization to the Design of Offshore Structure Hulls, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 131,1 (2009).
79. Sclavounos, P., Tracy, C. ve Lee, S., Floating Offshore Wind Turbines: Responses in a Seastate Pareto Optimal Designs and Economic Assessment, ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Haziran 2008, Estoril, Bildiriler Kitabı 48234: 31-41.
80. Andersen, M., T., Hindhede, D. ve Lauridsen, J., Influence of Model Simplifications Excitation Force in Surge for a Floating Foundation for Offshore Wind Turbines, Energies, 8,4 (2015) 3212-3224.
81. Hall, M., Buckham, B. ve Crawford, C., Evolving Offshore Wind: A Genetic Algorithm-Based Support Structure Optimization Framework for Floating Wind Turbines, 2013 MTS/IEEE OCEANS, Haziran 2013, Bergen, Bildiriler Kitabı, 1-10.
82. Kim, J., H., Hong, S., Y. ve Kim, H., J., The Shape Design and Analysis of Floating Offshore Wind Turbine Structures with Damper Structure and Shallow Draft, 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Haziran 2013. Alaska, Bildiriler Kitabı, 329-335.
83. Lee, J., Y., Koo, B., J., Samsung Heavy Industries Co Ltd., Clauss, G. ve TU Berlin, Automated Design of a Tension Leg Platform with Minimized Tendon Fatigue Damage and Its Verification by a Fully Coupled Analysis, Ship Technology Research, 54,1 (2007) 11-27.
84. Lee, J., Y. ve Lim, S., J., Hull Form Optimization of a Tension-Leg Platform Based on Coupled Analysis, 18th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Temmuz 2008, Vancouver, Bildiriler Kitabı, 100-107.
85. Venzon, R., Z., Tancredi, T., P. ve de Andrade, B., L., R., Hull Optimization of Semisubmersible with Multidirectional Seakeeping Criteria Evaluated with Neural Network Response Surface, Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources: Proceeding of IMAM 2013, (2014)
86. Park, Y., Jang, B., S. ve Kim, J., D., Hull-Form Optimization of Semi-Submersible FPU Considering Seakeeping Capability and Structural Weight, Ocean Engineering, 104 (2015) 714-724.
87. Jiang, Z., Yttervik, R., Gao, Z. ve Sandvik, P., C., Design, Modelling, and Analysis of a Large Floating Dock for Spar Floating Wind Turbine Installation, Marine



Structures, 72 (2020) 102781.

88. Shanley, M., Wright, C., Desmond, C., Murphy, J. ve Otter, A., Access to a Floating Wind Turbine, Design and Construction of Wind Farm Support Vessels, Mart 2017, London, Bildiriler Kitabı.
89. Serret, J., Tezdogan, T., Stratford, T., Thies, P., R. ve Venugopal, V., Model Test of the DTI-Floating Wind Concept, RENEW 2018 3rd International Conference on Offshore Renewable Energy, Ekim 2018, Lisbon, Bildiriler Kitabı.
90. Oguz, E., Clelland, D., Day, A., H., Incecik, A., Lopez, J., A., Sanchez, G. ve Almeria, G., G., Experimental and Numerical Analysis of a TLP Floating Offshore Wind Turbine, Ocean Engineering, 147 (2018) 591-605.
91. Burmester, S., Gueydon, S. ve Make, M., Determination of Scaled Wind Turbine Rotor Characteristics from Three Dimensional RANS Calculations, Journal of Physics: Conference Series, 753,8 (2016) 82003.
92. Oguz, E., Akgul, A. ve Incecik, A., Offshore Wind Farms: Potential and Applicability in the Southern Marmara Region, Turkey, 15th Congress of International Maritime Association of the Mediterranean, Ekim 2013, Coruna, Bildiriler Kitabı.
93. Aouani, N., Ritschel, U. ve Chaabane, F., Comparative Study of Two and Three-Bladed Wind Turbine's Performances, FAST as Framework, ERDD'2019 3rd International Conference on Renewable Energies and Sustainability, Eylül 2019, Monastir, Bildiriler Kitabı.
94. Lamei, A., Hayatdavoodi, M., Wong, C. ve Tang, B., On Motion and Hydroelastic Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine, ASME 38th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Haziran 2019, Glasgow, Bildiriler Kitabı.
95. Micallef, D. ve Sant, T., Loading Effects on Floating Offshore Horizontal Axis Wind Turbines in Surge Motion, Renewable Energy, 83 (2015) 737-748.
96. Tran, T., T. ve Kim, D., H., Fully Coupled Aero-Hydrodynamic Analysis of a Semi-Submersible FOWT Using a Dynamic Fluid Body Interaction Approach, Renewable Energy, 92 (2016) 244-261.
97. Viré, A., Xiang, J., Piggott, M., Cotter, C. ve Pain, C., Towards the Fully-Coupled Numerical Modelling of Floating Wind Turbines, Energy Procedia, 35 (2013) 43-51.
98. Recalde, L., F. ve Leithead, W., E., Reduction of Unwanted Swings and Motions in Floating Wind Turbines, Journal of Physics: Conference Series, 1037,3 (2018).
99. Ülkü, İ., Offshore Wind Farm Layout Optimization Using Mathematical Approaches and Heuristic Techniques, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.



100. Turhanlar, O., A Potential Offshore Wind Farm Arrangement off the Bozcaada Shores, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
101. Alkan, S., Bir Açık Deniz Rüzgâr Türbini İçin Yüzer Platform Sistemi Tasarımı ve Demirleme Sisteminin Hidrodinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2013.
102. Leblebicioğlu, E., An Onshore Wind Farm Design in Büyükada via WindSim, International 100% Renewable Energy Conference (IRENEC), Haziran 2020, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 50-60.
103. Gülay, A., Potential Offshore Wind Farm on Gaziköy and Gökçeada, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2019.
104. Yumurtacı, A., M., Türkiye’de Kurulabilecek Deniz Üstü Rüzgar Santrallerinin Teknik ve Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
105. Barış, G., Açık Deniz Rüzgar Enerjisi, Fizibilite Adımları ile Bozcaada ve Gökçeada Örnek Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2012.
106. Karakaşoğlu, N., Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli, 2008.
107. Kahraman, C., Fuzzy Multi-Criteria Decision Making: Theory and Applications with Recent Developments, Volume 16, Springer Science & Business Media, İstanbul, 2008.
108. Kafalı, M., Gemi İnşa Sanayinde Bulanık Karar Verme Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
109. Saaty, R., W., The Analytic Hierarchy Process-What It Is and How It Is Used, Mathematical Modelling, 9,3-5 (1987) 161-176.
110. Zadeh, L., A., Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems, Volume 6, World Scientific, New York, 1996.
111. Adıgüzel, O., Personel Seçiminin Analitik Hiyerarşisi Prosesi Yöntemiyle Gerçekleştirilmesi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 24 (2009) 243-251.
112. Saaty, T., L., Highlights and Critical Points in the Theory and Application of the Analytic Hierarchy Process, European Journal of Operational Research, 74,3 (1994), 426-447.
113. Saaty T., L. ve Vargas, L., G., Models, Methods, Concepts & Applications of the



Analytic Hierarchy Process, Second Edition, Springer, New York, 2012.

114. Supçiller, A. ve Çapraz, O., AHP-TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi Uygulaması, Istanbul University Econometrics and Statistics e-Journal, 13 (2011) 1-22.
115. Lee, C., An Integrated Multicriteria Decision-Making Model for Resource Allocation in a Health Care System, Doktora Tezi, Saint Louis University, Graduate School, Missouri, 1997.
116. Bodin, L. ve Gass, S., I., On Teaching the Analytic Hierarchy Process, Computers and Operations Research, 30,10 (2003) 1487-1497.
117. Zadeh, L., A., Similarity Relations and Fuzzy Orderings, Information Sciences, 3,2 (1971) 177-200.
118. Türksen, I., B., Interval Valued Fuzzy Sets Based on Normal Forms, Fuzzy Sets and Systems, 20,2 (1986) 191-210.
119. Altaş, İ., H., Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, 62 (1999) 80-85.
120. Türk, A., Tersane Kuruluş Yeri Seçimi ve Yerleşiminin Genetik Algoritma Tabanlı Olarak Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2019.
121. Zimmermann, H., J., Fuzzy Set Theory and Its Applications, Springer Science & Business Media, 2011.
122. Timor, M., Analitik Hiyerarşi Prosesi, Türkmen Kitabevi, 2011.
123. Timor, M., Kolayda Ürünler İçin Perakende Satış Yeri Seçimi: Bir Analitik Hiyerarşi Prosesi Uygulaması, İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi, 13,41 (2002) 23-36.
124. Özgörmüş, E., Mutlu, Ö. ve Güner, H., Bulanık AHP ile Personel Seçimi, 5. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, Kasım 2005, İstanbul, Bildiriler Kitabı.
125. Van Laarhoven P., J., M. ve Pedrycz, W., A Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory, Fuzzy Sets and System, 11,1-3 (1983) 229-241.
126. Göksu A. ve Güngör, İ, Bulanık Analitik Hiyerarşik Proses ve Üniversite Tercih Sıralamasında Uygulanması, Suleyman Demirel University The Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences 3 (2008) 1-26.
127. Kwong, C., K. ve and Bai, H., Determining the Importance Weights for the Customer Requirements in QFD Using a Fuzzy AHP with an Extent Analysis Approach, Iie Transactions, 35,7 (2003) 619-626.



128. Abdel-Kader M., G. ve and Dugdale, D., Evaluating Investments in Advanced Manufacturing Technology: A Fuzzy Set Theory Approach, The British Accounting Reviews, 33,4 (2001) 455-489.
129. Ayyıldız, G., CIM Yatırımlarının Bulanık AHP Yöntemi ile Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
130. Önüt, S., Kara, S., S. ve Işık, E., Long Term Supplier Selection Using A Combined Fuzzy MCDM Approach: A Case Study for a Telecommunication Company, Expert Systems with Applications, 36,2 (2009) 3887-3895.
131. Özçelik, S., Çok Yönlü Personellerin Değerlendirilmesi ve Üretim Hattı Personel Atama Problemi İçin Bir Optimizasyon Modeli, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
132. Töreay, G., Özdemir, İ. ve Kurt, T., ArcGIS 10 Desktop Uygulama Dokümanı, İşlem Coğrafi Bilgi Sistemleri Mühendislik ve Eğitim Ltd. Şti., (2010) 1-4.
133. Kol, Ç. ve Küpçü, S., ArcGIS Spatial Analiz, İşlem Coğrafi Bilgi Sistemleri Mühendislik ve Eğitim Ltd. Şti., 2008.
134. Fitzpatrick, C. ve Maguire, D., J., GIS in Schools: Infrastructure, Methodology and Role, GIS: A Sourcebook for School, (2000) 62-73.
135. <https://temizenerji.org/2021/08/11/turkiyenin-ruzgar-enerjisi-kurulu-gucu-10-bin-mwi-asti/amp/>. 17.06.2022.
136. TÜREB, Rüzgarda Toplam Kurulu Güç 10 Gw'ı Aştı, Ankara, 2021.
137. Mathew, S., Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer, Kerala, 2006.
138. Uygur, İ., Demirci, R., Saruhan, H., Özkan, A. ve Belenli, İ., Batı Karadeniz Bölgesindeki Dalga Enerjisi Potansiyelinin Araştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12,1 (2006) 7-13.
139. Alaçakır, F. B., Ülkemizde Elektrik Üretimini Destekleyen Bir Çözüm: Güneş Pilleri, YEKSEM Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, pp. 182–185, 2001.
140. <https://www.polat.com/enerji/polat-enerji/> Polat Enerji. Türkiye'deki Rüzgâr Enerjisi Durumu-2018. 19.06.2022.
141. <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/iller/YOZGAT-REPA.pdf/> T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı-100 Metre, REPA2021. 19.06.2022.
142. Kim, J., Y., Oh, K., Y., Kang, K., S. ve Lee, J., S., Site Selection of Offshore Wind Farms Around the Korean Peninsula Through Economic Evaluation, Renewable



Energy, 54 (2013) 189-195.

143. LCC AWS Truewind, Offshore Wind Technology Overview, New York, 2009.
144. Archer C. ve Jacobson, M., Spatial and Temporal Distributions of U.S. Winds and Wind Power at 80 m Derived from Measurements, Journal of Geophysical Research, vol. 108,D9 (2003).
145. Murali, M., Pj, V., Modi, P. ve Seelam, J., Site Selection for Offshore Wind Farms Along the Indian Coast, Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 43 (2014) 1401-1406.
146. Sulaiman, O., O., Magee, A., Bahrain, Z., Kader, A., S., A., Maimun, A., Pauzi, A., G., Wan Nick, W., B. ve Othman, K., Mooring Analysis for Very Large Offshore Aquaculture Ocean Plantation Floating Structure, Ocean and Coastal Management, 80 (2013) 80-88.
147. Malhotra, S., Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations, Wind Turbine, Ibrahim H. Al- Bahadly, IntechOpen, Palmerston North, 2011.
148. Salunkhe, A., N., Raut, N., S. ve Birajdar, M., R., Offshore Floating Wind Turbine, International Journal of Research in Advent Technology (IJRAT) Special Issue, (2017) 1-5.
149. <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>. Nacional Centers for Environmental Informations, Türkiye Batimetri Haritası. 01.07.2022.
150. Tricoli, C., Barsanti, M. ve Delbono, I., Offshore Wind Farms Along The Italian Coasts: A First Selection of Suitable Areas Based on Wind and Bathymetric Data, European Seminar OWEMES-Offshore Wind Energy in Mediterranean and other European Seas, Nisan 2006, Civitavecchia, Bildiriler Kitabı.
151. <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:29.2/centery:38.6/zoom:6/> Marine Traffic, Türkiye Deniz Trafiği Yoğunluğu. 05.07.2022.
152. Meola, B. ve Webster, C., The 2016 Status of Marine Protected Areas in the Mediterranean, MedPAN&SPA/RAC, Tunis, 2019.
153. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/son-depremler/harita-uzerinde/>. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi. Türkiye Fay Hatları Haritası. 10.07.2022.
154. <https://www.marinetraffic.com/> Marine Traffic. Çanakkele Rüzgâr Haritası. 10.07.2022
155. Rawson A. ve Rogers, E., Assessing the Impacts to Vessel Traffic from Offshore Wind Farms in the Thames Estuary, Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w



Szczecinie, 43,115 (2015) 99-107.

156. <https://repa.enerji.gov.tr/> Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Çanakkale İli Rüzgâr Kaynak Bilgileri. 10.07.2018.
157. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/son-depremler/harita-uzerinde/>. Kandilli Rasathanesi. Çanakkale Deprem Haritası. 11.07.2022.
158. Erkurtulmuş, S., A., Çok Noktalı Bağlamalı Sistemler ile Bağlı Yüzer, Üretim, Depolama ve Nakil Amaçlı Açık Deniz Yapılarının (FPSO) Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
159. Bertram, V., Practical Ship Hydrodynamics, ButterworthHeinemann, Great Britain, 2000.
160. Hasselmann K., Barnett,T.,P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., E., Enke, K., Ewing, J., A., Gieenapp, H., Hasselmann, D., E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D., Richte, K., Sell, W. ve Walden, H., Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift 8,12 (1973) 1-95.
161. El-Hawary, F., The Ocean Engineering Handbook. Crc Press, 2000.
162. Cooley, J., W. ve Tukey, J., W., An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Mathematics of Computation, 19,90 (1965) 297-301.
163. Ocean, S., SIMO 4.10. 3 User Guide, September, 2017.
164. Jonkman, J., M., Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, University of Colorado, Boulder, 2007.
165. Lewis, E., V., Principles of Naval Architecture Second Revision, Jersey: Sname, 2 (1998).
166. Jonkman, J., M., Butterfield, S., Musial, W. ve Scott, G., Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2009.
167. Sarıöz, K., Kükner, A. ve Alkan, A., D., Gemi Mühendisliği El Kitabı, Gemi Mühendisleri Odası Yayınları Şekil A: 3, İstanbul, 2008.
168. Morison, J., R., Johnson, J., W. ve Schaaf, S., A., The Force Exerted by Surface Waves on Piles, Journal of Petroleum Technology 2,05 (1950) 149-154.
169. Kolukısa, D., C., Baştan Gelen Dalgalarda Kanatçıkların Dalıp Çıkma ve Baş Kıç Vurma Hareketleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
170. Östergaard C. ve Schellin, T., E., Comparison of Experimental and Theoretical Wave



Actions on Floating and Compliant Offshore Structures, Applied Ocean Research 9,4 (1987) 192-213.

171. Korsmeyer, F., T., Lee, C., H., Newman, J., N. ve Sclavounos, P., D., The Analysis of Wave Effects on Tension-Leg Platforms, 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Ocak 1988, Texas, Bildiriler Kitabı 1: 14.
172. Manwell, J., F., McGowan, J., G. ve Rogers, A., L., Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, 2010.
173. Diederich, F., W. ve Drischler, J., A., Effect of Spanwise Variations in Gust Intensity on the Lift due to Atmospheric Turbulence, National Advisory Committee for Aeronautics, 1957.
174. Moriarty P., J. ve Hansen, A., C., AeroDyn Theory Manual, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2005.
175. Hansen, M., O., L., Sørensen, J., N., Voutsinas, S., Sørensen, N. ve Madsen, H., A., State of the Art in Wind Turbine Aerodynamics and Aeroelasticity, Progress in Aerospace Sciences, 42,4 (2006) 285-330.
176. Jenkins, N., Burton, T., L., Bossanyi, E., Sharpe, D. ve Graham, M., Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, 2021.
177. Leishman J., G. ve Beddoes, T., S., A Semi- Empirical Model for Dynamic Stall, Journal of the American Helicopter Society, 34,3 (1989) 3-17.
178. Erkurtulmuş, S., A. ve Peşman, E., A Vessel/Mooring Coupled Dynamic Analysis Of Catenary-moored Fpso Installed For Black Sea 1st International Congress on Ship and Marine Technology (GMO-SHIPMAR), Aralık 2016, İstanbul, Bildiriler Kitabı.
179. Fan, T., Qiao, D., Yan, J., Chen, C. ve Ou, J., An Improved Quasi-Static Model for Mooring-Induced Damping Estimation Using in the Truncation Design Of Mooring System, Ocean Engineering, 136 (2017) 322-29.
180. Masciola, M., Jonkman, J., M. ve Robertson, A., Implementation of a Multisegmented, Quasi-Static Cable Model, 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Haziran 2013, Alaska, Bildiriler Kitabı.
181. Azcona, J., Munduate, X., González, L. ve Nygaard, T., A., Experimental Validation of a Dynamic Mooring Lines Code With Tension and Motion Measurements of a Submerged Chain, Ocean Engineering, 129 (2017) 415-427.
182. Aamo O., M. ve Fossen, T., I., Finite Element Modelling of Mooring Lines, Mathematics and Computers in Simulation, 53,4-6 (2000) 415-422.
183. Kwan C., T. ve Bruen, F., J., Mooring Line Dynamics: Comparison of Time Domain, Frequency Domain, and Quasi-Static Analyses, in Offshore Technology Conference, Mayıs 1991, Texas, Bildiriler Kitabı.



184. Andersen, M., T., Wendt, F., F., Robertson, A., N., Jonkman, J., M. ve Hall, M., Verification and Validation of Multisegmented Mooring Capabilities in FAST V8, 26th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Temmuz 2016, Rhodes, Bildiriler Kitabı.
185. Jonkman J., M. ve Buhl, M., L., FAST User's Guide, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Volume 365, Colorado, 2005.
186. Jonkman, J., M., Wright, A., D., Hayman, G., J. ve Robertson, A., N., Full-System Linearization for Floating Offshore Wind Turbines in OpenFAST, ASME 2018 1st Offshore Wind Technical Conference, Kasım 2018, California, Bildiriler Kitabı.
187. Musial, W., Butterfield, S. ve Boone, A., Feasibility of floating Platform Systems for Wind Turbines, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Ocak 2004, Nevada, Bildiriler Kitabı, 1007.
188. Malcolm D., J. ve Hansen, A., C., WindPACT Turbine Rotor Design Study: June 2000- June 2002 (Revised), National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2006.
189. Dykes, K., L. ve Rinker, J., WindPACT Reference Wind Turbines, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2018.
190. Smith, K., WindPACT Turbine Design Scaling Studies Technical Area 2: Turbine, Rotor and Blade Logistics, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2001.
191. Goezinne, F., Terms of reference DOWEC, DOWEC Dutch Offshore Wind Energy Converter 1997–2003 Public Reports, (2001).
192. Kooijman, H., J., T., Lindenburg, C., Winkelaar, D. ve Van der Hooft, E., L., DOWEC 6 MW Pre-Design: Aero-Elastic Modeling of the DOWEC 6 MW Pre-Design in PHATAS, DOWEC Dutch Offshore Wind Energy Converter 1997–2003 Public Reports, (2003).
193. Lindenburg, C., Aeroelastic Modelling of the LMH64-5 Blade, Energy Research Center of the Netherlands, (2002).
194. de Vries, E., Multibrid: A New Offshore Wind Turbine Contender, Renewable Energy World, 7 (2004) 52-65.
195. Laino, D., J. ve Hansen, A., C., User's Guide to the Wind Turbine Dynamics Aerodynamics Computer Software AeroDyn, Windward Engineering, Utah, 2002.
196. Jonkman, J., M., Hayman, G., J., Jonkman, B., J., Damiani, R., R. ve Murray, R., E., AeroDyn V15 User's Guide and Theory Manual, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 45, Colorado, 2015.
197. Miao, W., Li, C., Yang, J. ve Xie, X., Numerical Investigation of the Yawed Wake



And its Effects on the Downstream Wind Turbine, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 8,3 (2016) 33303.

198. Passon, P., Kühn, M., Butterfield, S., Jonkman, J., M., Camp, T. ve Larsen, T., J., OC3-Benchmark Exercise of Aero-Elastic Offshore Wind Turbine Codes, Journal of Physics: Conference Series, 75,1 (2007) 12071.
199. Bak, C., Zahle, F., Bitsche, R., Kim, T., Yde, A., Henriksen, L., C., Hansen, M., H., Blasques, J., P., A., A., Gaunaa, M. ve Natarajan, A., The DTU 10-MW Reference Wind Turbine, Danish Wind Power Research 2013, Mayıs 2013, Fredericia, Bildiriler Kitabı.
200. Bak, C., Bitsche, R., Yde, A., Kim, T., Hansen, M., H., Zahle, F., Gaunaa, M., Blasques, J., P., A., A., Døssing, M. ve Wedel Heinen, J., Light Rotor: The 10-MW Reference Wind Turbine, EWEA 2012 European Wind Energy Conference & Exhibition, Nisan 2012, Copenhagen, Bildiriler Kitabı.
201. Bjork, A., Coordinates and Calculations for the FFA-W1-xxx, FFA-W2-xxx, FFA-W3-xxx Series of Airfoils for HAWTS, FFATN1990-15, Stockholm, 1990.
202. Timmer, W., A. ve Van Rooij, R. P., J., O., M, Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils, Journal of Solar Energy Engineering, 125,4 (2003) 488-496.
203. Fuglsang, P. ve Bak, C., Development of the Risø Wind Turbine Airfoils, Wind Energy 7,2 (2004) 145-162.
204. Bak, C., Anderson, P., Madsen, H., Gaunaa, M., Fuglsang, P. ve Bove, S., Design and Verification of Airfoils Resistant to Surface Contamination and Turbulence Intensity, 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Haziran 2008, Hawaii, Bildiriler Kitabı 7050.
205. Sartori, L., Bortolotti, P., Croce, A. ve Bottasso, C., Integration of Prebend Optimization in a Holistic Wind Turbine Design Tool, Journal of Physics: Conference Series, 753 (2016) 62006.
206. Ahn, H., J. ve Shin, H., Model Test and Numerical Simulation of OC3 Spar Type Floating Offshore Wind Turbine, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 11,1 (2019) 1-10.
207. Wang, H., Hu, Z. ve Meng, X., Dynamic Performance Investigation of A Spar-Type Floating Wind Turbine Under Different Sea Conditions, China Ocean Engineering, 32,3 (2018) 256-265.
208. Xu, X. ve Day, S., Experimental Investigation on Dynamic Responses of a Spar-Type Offshore Floating Wind Turbine and Its Mooring System Behaviour, Ocean Engineering, 236 (2021) 109488.
209. Ramachandran, G., K., V., Robertson, A., Jonkman, J., M. ve Masciola, M., D.,



- Investigation of Response Amplitude Operators for Floating Offshore Wind Turbines, 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Haziran 2013, Alaska, Bildiriler Kitabı.
210. Duan, F., Hu, Z. ve Niedzwecki, J., M., Model Test Investigation of a Spar Floating Wind Turbine, Marine Structures, 49 (2016) 76-96.
 211. Goupee, A., J., Koo, B., Lambrakos, K. ve Kimball, R., Model Tests For Three Floating Wind Turbine Concepts, Offshore Technology Conference, Nisan 2012, Texas, Bildiriler Kitabı, 2584-2599.
 212. Robertson, A., Jonkman, J., M., Masciola, M., Song, H., Goupee, A., J., Coulling, A. ve Luan, C., Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, 2014.
 213. Kim, H., C. ve Kim, M., H., Comparison of Simulated Platform Dynamics in Steady/Dynamic Winds and Irregular Waves for OC4 Semi-Submersible 5MW Wind-Turbine Against Deepwind Model-Test Results, Ocean Systems Engineering, 6,1 (2016) 1-21.
 - [214. Yu, W., Müller, K., Lemmer, F., Bredmose, H., Borg, M., Sanchez, G. ve Landbø, T., "D4. 2 Public Definition of the Two LIFES50+ 10MW Floater Concepts, Stuttgart, 2018.
 215. Pegalajar Jurado, Bredmose, H., Borg, M., Straume, J., G., Landbø, T., Andersen, H., S., Yu, W., Müller, K. ve Lemmer, F., State-of-the-Art Model for the LIFES50+ OO-Star Wind Floater Semi 10MW Floating Wind Turbine, Journal of Physics: Conference Series, 1104,1 (2018) 12024.
 216. Hmedi, M., Uzunoğlu, E. ve Guedes Soares, C., Influence of Platform Configuration on the Hydrodynamic Performance of Semi-Submersibles for Offshore Wind Energy, Trends in Maritime Technology and Engineering, Volume 2, 411-420, Taylor&Francis Group, 2022.
 217. Galvan, J., Sánchez Lara, M. ve Mendikoa, I., Definition and Analysis of NAUTILUS-DTU10 MW Floating Offshore Wind Turbine at Gulf of Maine: Experiments at Sintef Ocean & PoliMi, Tecnalia R&I, TRI-ORE-PUB-001, Basque Country, 2017.
 218. Landbø, T., OO-Star Wind Floater, the Future of Offshore Wind. https://www.sintef.no/globalassets/project/eera-deepwind-2018/presentations/closing_landbo.pdf 10.08.2022.
 219. Pegalajar Jurado, A., Borg, M. ve Bredmose, H., An Efficient Frequency-Domain Model for Quick Load Analysis of Floating Offshore Wind Turbines, Wind Energy Science, 3,2 (2018) 693-712.
 220. Swart, R., J., Coppens, C., Gordijn, H., Piek, M., Ruysenaars, P., Schrandt, J., J., de met, P., Hoogwijk, M., Papalexandrou, M. ve de Visser, E., Europe's Onshore



and Offshore Wind Energy Potential: An Assessment of Environmental and Economic Constrains, European Environment Agency, Copenhagen, 2009.

221. Dağdaş, A., Jeotermal Güç Santrallerinde Enerji Maliyeti, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2 (2005) 84-94.
222. T.C. Resmî Gazete, Yapı, tesis ve onarım işleri ihalelerine kullanılan müteahhitlik karneleri ve iş bitirme belgelerinin 2022/3 yılına ait değerlendirme katsayıları hakkında tebliğ, (31949),10.10.2022, 40.
223. Castella, X., T., Operations and Maintenance Cost for Offshore Wind Farm, Yüksek Lisans Tezi, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2020.
224. Morhorst, P., E., Awerbuch, S., The Economics of Wind Energy, European Wind Energy Association (EWA), Søren Krohn, Bruxelles, 2009.
225. International Energy Agency, Renewable Energy Technology Deployment (IEA-RETD), Offshore Renewable Energy, (2012).
226. European Energy Association (EVEA), The Economics of wind Energy, Bruxelles, 2015.
227. Dincer, İ. ve Acar, C., A Review of Clean Energy Solutions for Better Sustainability, International Journal of Energy Research, 39 (2015) 585-606.
228. <https://taxfoundation.org/carbon-taxes-in-europe-2022/> EU Emissions Trading System (EU ETS), AB ton başına emisyon vergileri. 11.11.2022.
229. T.C. Resmî Gazete, Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun, (6094), 29.12.2010.

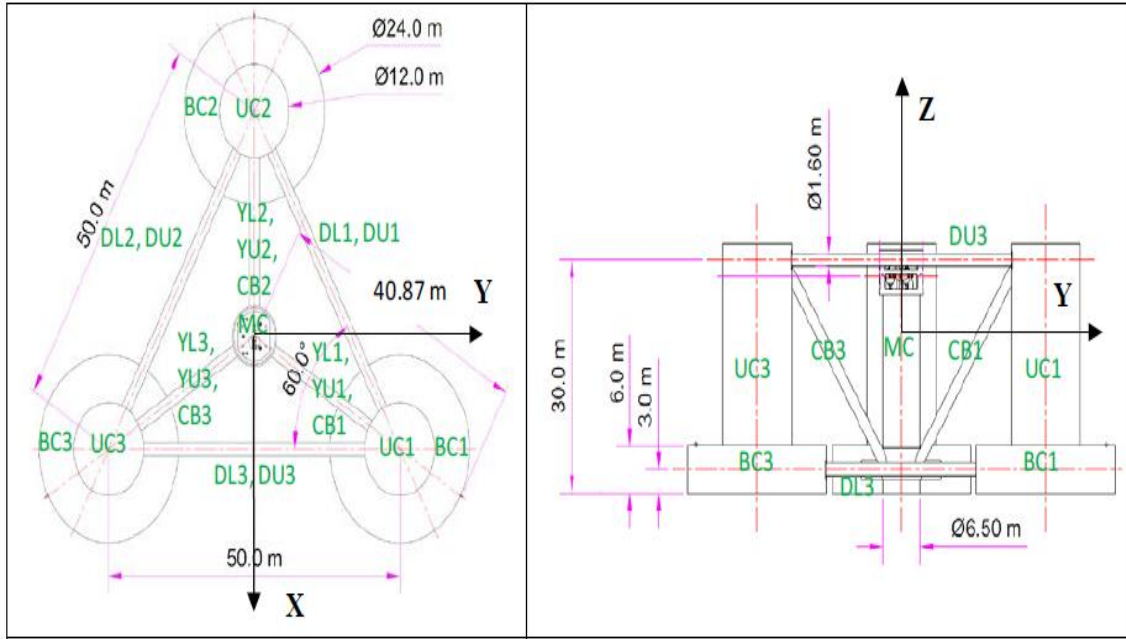


5. EKLER

Ek Tablo 1. OC-Hywind ve OC-4 DeepCwind dağıtımlı kule özellikleri [36, 47].

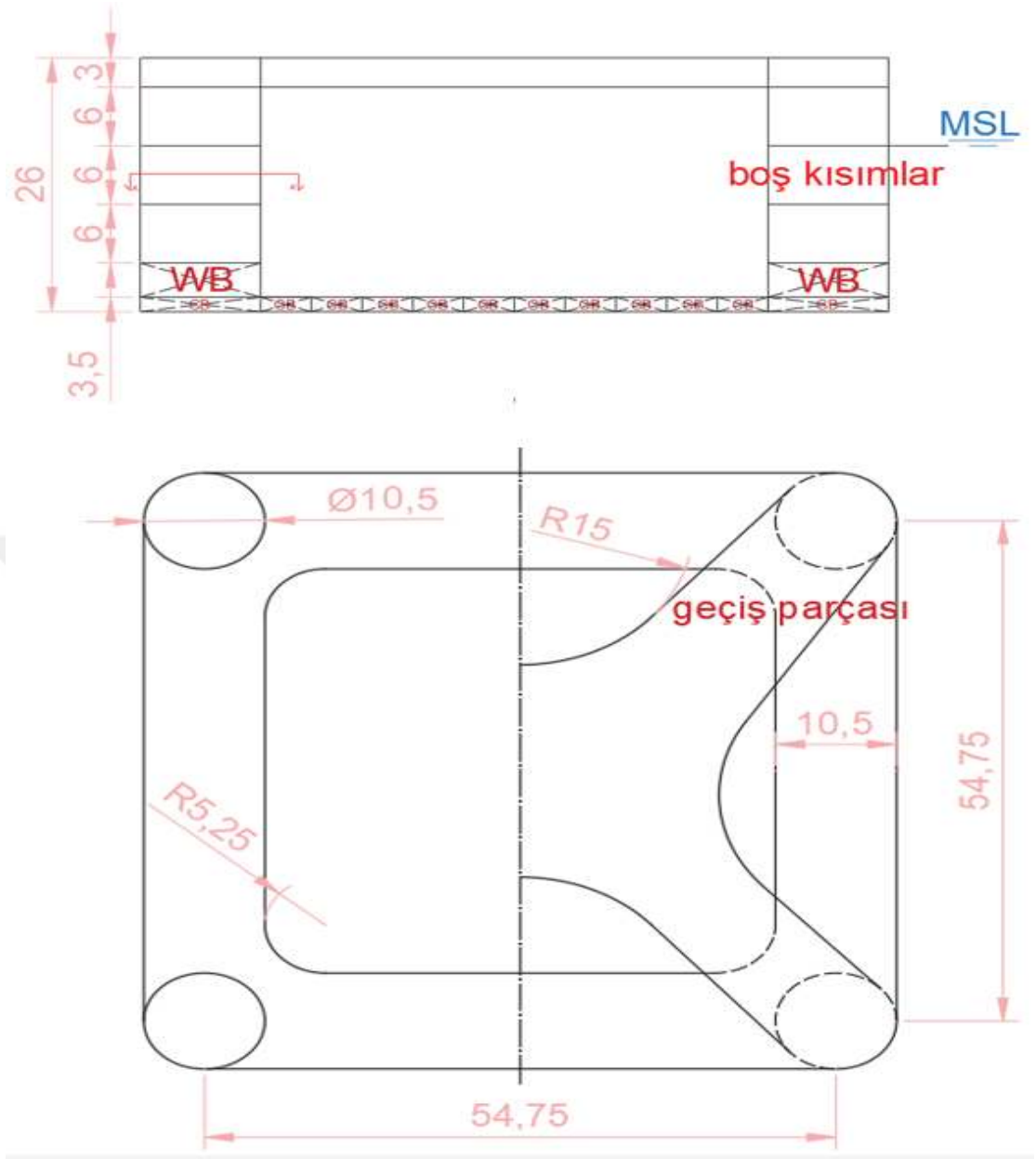
Yükseklik (m)	Ht (-)	Kütlesel Yoğunluk (kg/m)	Kule-FA Sertlik (N m ²)	Kule-SS Sertlik (N m ²)	Kule Savrulma Sertlik (Nm ²)	Kule EA (N)	Kule- FA Ataleti (kg m)	Kule- SS Ataleti (kg m)
10,00	0,0	4667,00	603,903E+9	603,903E+9	464,718E+9	115,302E+9	24443,7	24443,7
17,76	0,1	4345,48	517,644E+9	517,644E+9	398,339E+9	107,354E+9	20952,2	20952,2
25,52	0,2	4034,76	440,925E+9	440,925E+9	339,303E+9	99,682E+9	17847,0	17847,0
33,28	0,3	3735,44	373,022E+9	373,022E+9	287,049E+9	92,287E+9	15098,5	15,98,5
41,04	0,4	3447,32	313,236E+9	313,236E+9	241,043E+9	85,169E+9	12678,6	12678,6
48,80	0,5	3170,40	260,897E+9	260,897E+9	200,767E+9	78,328E+9	10560,1	10560,1
56,56	0,6	2904,69	215,365E+9	215,365E+9	165,729E+9	71,763E+9	8717,2	8717,2
64,32	0,7	2650,18	176,026E+9	176,028E+9	135,458E+9	65,475E+9	7124,9	7124,9
72,08	0,8	2406,88	142,301E+9	142,301E+9	109,504E+9	59,464E+9	5759,8	5759,8
79,84	0,9	2174,77	113,630E+9	113,630E+9	87,441E+9	53,730E+9	4599,3	4599,3
87,60	1,0	1953,87	89,488E+9	89,488E+9	68,863E+9	48,272E+9	3622,1	3622,1





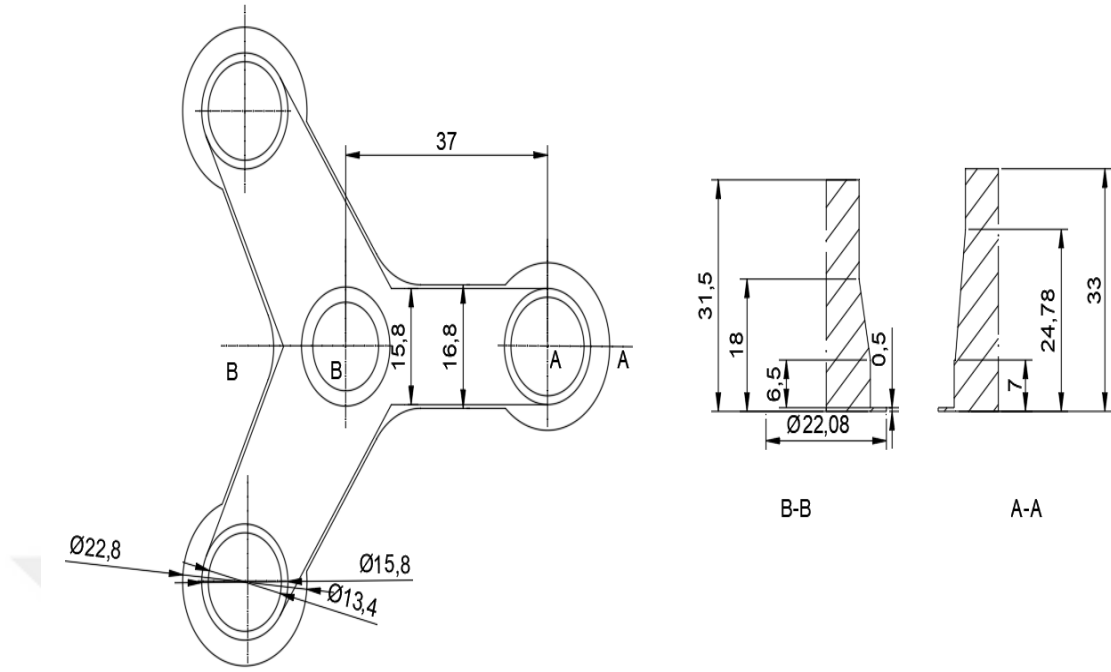
Ek Şekil 1. OC-4 DeepCwind platform görünüşleri [212].





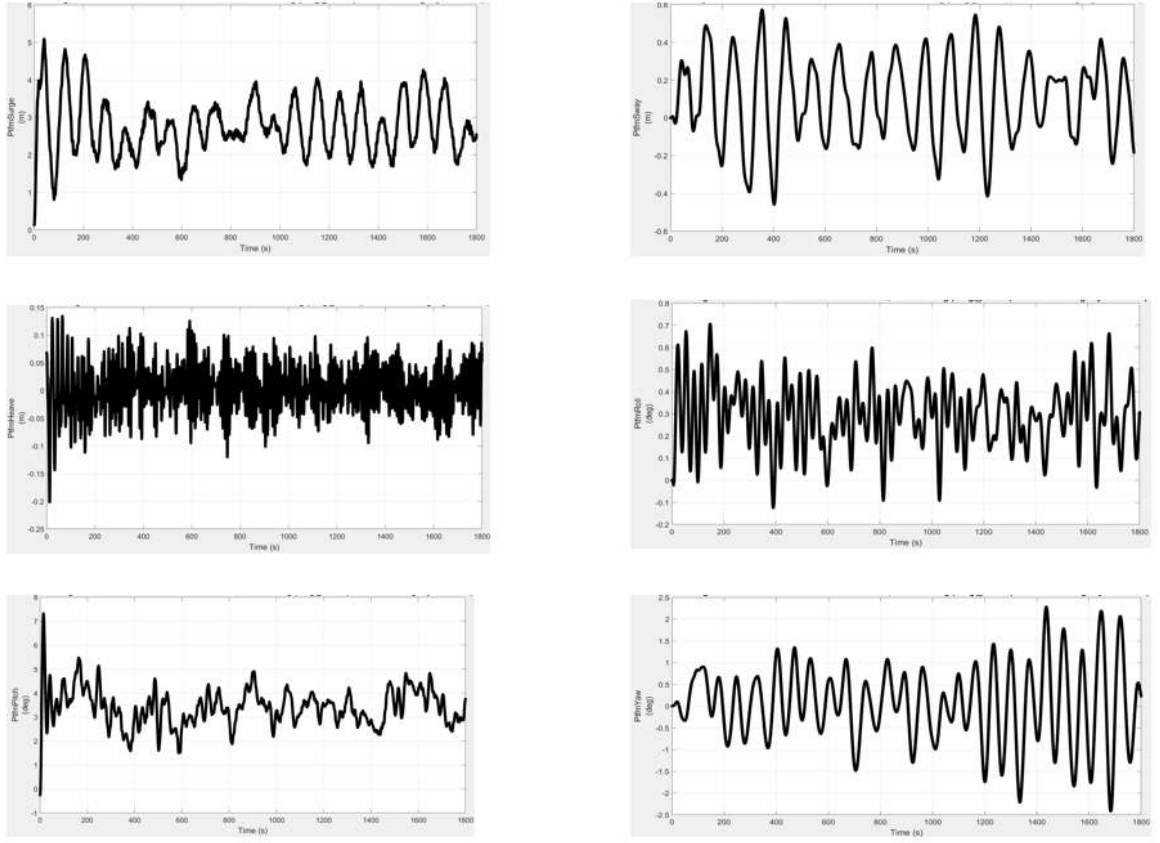
Ek Şekil 2. NAUTILUS-DTU platform ana boyutları ve görünüşleri





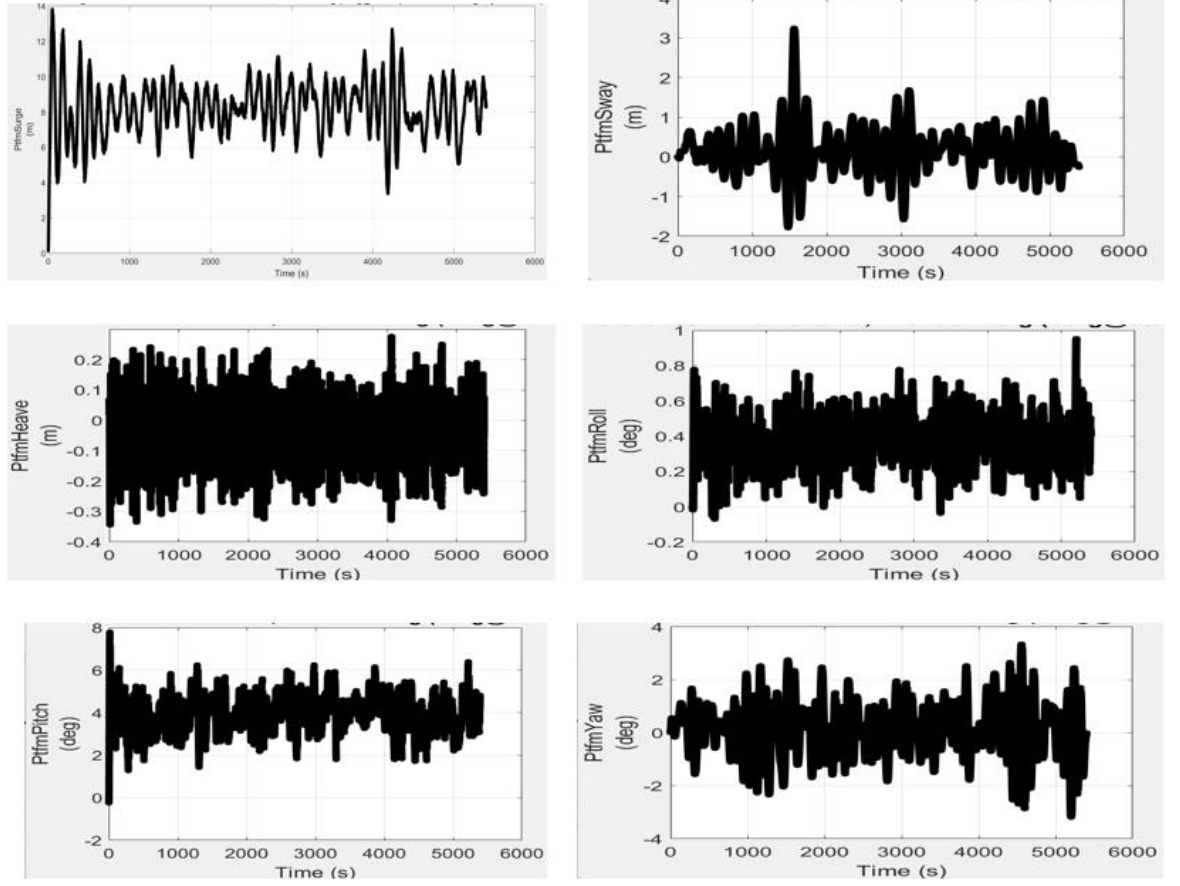
Ek Şekil 3. LIFES50+ OO-STAR üst ve kesit görünüşleri





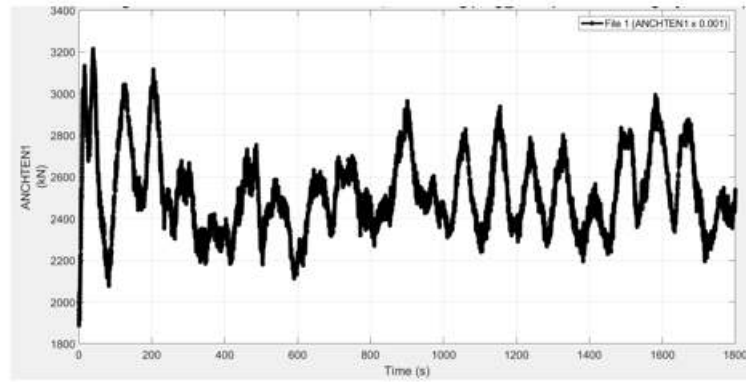
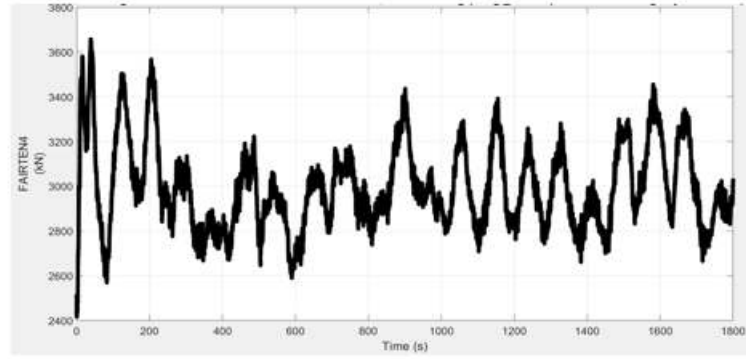
Ek Şekil 4. Belirlenen bölgede 75 m derinlik ve 9,26 m/s rüzgâr hızı altında seçilen platformun hareketleri (1800 saniyeden sonra hareket tekrara dönmüştür)





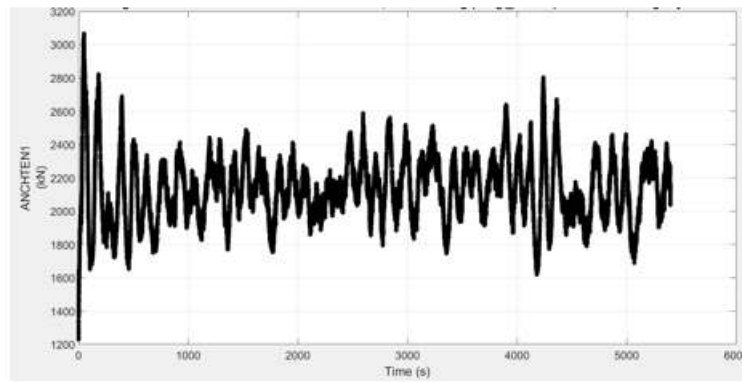
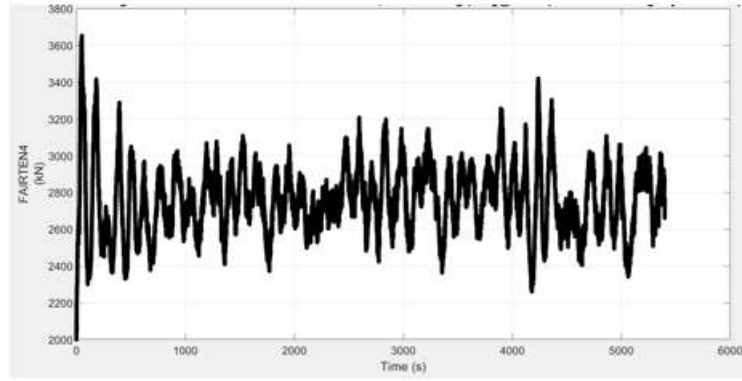
Ek Şekil 5. Belirlenen bölgede 110 m derinlik ve 9,26 m/s rüzgâr hızı altında seçilen platformun hareketleri





Ek Şekil 6. Belirlenen bölgede 75 m derinlik ve 9,26 m/s rüzgâr hızı altında seçilen platformun 1 numaralı halat gerilmeleri (platform ve demirleme ucunda)





Ek Şekil 7. Belirlenen bölgede 110 m derinlik ve 9,26 m/s rüzgâr hızı altında seçilen platformun 1 numaralı halat gerilmeleri (platform ve demirleme ucunda)



ÖZGEÇMİŞ

Selahattin Alp ERKURTULMUŞ Lise öğrenimini Bursa Osmangazi Turhan Tayan Anadolu Lisesinde tamamladı. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2012 Haziran ayında Makine Mühendisi olarak dereceyle mezun oldu. 2012-2013 Eğitim ve Öğretim Güz yarıyılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2014-2015 eğitim öğretim yılı güz ve bahar yarıyıllarında Erasmus+ değişim programı kapsamında Hırvatistan'da University of Zagreb'de öğrenim gördü. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nden mezun olarak Gemi İnşaatı Yüksek Lisansı unvanı aldı. 2014 Şubat-2019 Mart arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümünde Araştırma görevlisi olarak görev yaptı, 2019 Mart'tan itibaren Yalova Üniversitesi Altınova MYO'da Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi seviyede İngilizce bilmektedir.

