T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YARI BATIK AÇIK DENİZ YÜZER RÜZGAR TÜRBİN PLATFORMUNUN HİDRODİNAMİK DAVRANIŞI

Mehmet Utku ÖĞÜR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL

Ocak, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YARI BATIK AÇIK DENİZ YÜZER RÜZGAR TÜRBİN PLATFORMUNUN HİDRODİNAMİK DAVRANIŞI

Mehmet Utku ÖĞÜR tarafından hazırlanan tez çalışması 31.01.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Serdar Beji, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ferdi Çakıcı, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yarı Batık Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbin Platformunun Hidrodinamik Davranışı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mehmet Utku ÖĞÜR

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün Çok Disiplinli FCD-2021-4200 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Değerli Aileme…

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından sonuna her aşamasında desteğini esirgemeyen, değerli görüş ve önerileri ile daima bana yol gösteren, çalışmam boyunca bana ilham veren tez danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca bana her konuda yardımcı olan Doç. Dr. Ferdi ÇAKICI ve Arş. Gör. Umutcan İNAL'a ve deneyler sırasında teknik desteği ile deneylerin işlemesini sağlayan teknisyen Muhammed ULUÇAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez çalışmam süresince bilgilerinden her zaman yararlandığım Yıldız Teknik Üniversitesi Kıyı ve Liman Mühendisliği programındaki tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca sevgi ve desteklerini her zaman hissettiğim, maddi ve manevi yanımda olan değerli aileme verdiği emekler için teşekkür ederim.

Mehmet Utku ÖĞÜR

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR **v**
SİMGE LİSTESİ **viii**
KISALTMA LİSTESİ **ix**
ŞEKİL LİSTESİ **xi**
TABLO LİSTESİ **xvii**
ÖZET **xviii**
ABSTRACT **xx**
1 GİRİŞ **22**
1.1 Literatür Özeti 22
1.2 Tezin Amacı 29
2 YENİLENEBİLİR ENERJİ ve YÜZER RÜZGAR TÜRBİNLERİ **32**
2.1 Enerji ve İklim Değişikliği 32
2.2 Yenilenebilir Enerji 35
2.3 Rüzgar Enerjisi 40
2.4 Rüzgar Türbinleri 41
2.5 Yüzer Rüzgar Türbinleri 46
3 DENEY SİSTEMİ **50**
3.1 Dalga Baseni 50
3.2 Model Yüzer Rüzgar Türbini 53
3.3 Ölçüm Sistemleri 55
3.3.1 IMU 55
3.3.2 Kamera 56
3.3.3 Rüzgar Üretim Sistemi 57
3.3.4 Load Cell 58
3.4 Fiziksel Model ve Deney Koşulları 60
3.5 Rüzgar Türbini Model Özellikleri 62
3.5.1 Rüzgar Hızı ve Drone Özellikleri 63
3.5.2 Serbest Salınım Testleri 65
3.5.3 Meyil Deneyi 69
3.5.4 Denge Deneyi 75
3.5.5 Model Özellikleri 77
3.6 Ölçümlerin Sayısallaştırılması 78
4 DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA **87**

4.1 Düzenli Dalga Durumu 87
4.1.1 D275 Yükleme Durumu W8R1 Dalgası 90
4.1.2 D275 Yükleme Durumu W15R3 Dalgası 97
4.2 Bir Yıl Yineleme Periyodu için Ortalama (Operasyonel) Tasarım Durumu 103
4.2.1 Sırf Rüzgar Durumu 103
4.2.2 Sırf Dalga Durumu 104
4.2.3 Rüzgar ve Dalganın Birlikte Olduğu Durum 111
4.3 Ekstrem Tasarım Koşulları 117
4.3.1 D275 Yükleme Durumu W2 Dalgası 117
4.3.2 D275 Yükleme Durumu W3 Dalgası 123
4.4 Davranış Genlik Spektrumu 129
5 SONUÇ ve ÖNERİ **139**
KAYNAKÇA **143**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **147**

SİMGE LİSTESİ

H	Dalga yüksekliği
H_s	Belirgin Dalga Yüksekliği
T	Dalga periyodu
T_p	Dalga pik periyodu
f	Dalga frekansı
s	Saniye
m	Metre
cm	Santimetre
kg	Kilogram
∇	Deplasman hacmi

KISALTMA LİSTESİ

AREB	Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği
BDT	Bağımsız Devletler Topluluğu
CFD	Computional Fluid Dynamics
CH_4	Metan
CO_2	Karbondioksit
CO_2e	Karbondioksit eşdeğeri
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
DWL	Design Water Level
EDF	Électricitéde France
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
FAST	Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence
FFT	Fast Fourier Transform
FOWC	Floating Oscillating Water Column
FOWT	Floating Offshore Wind Turbine
GES	Güneş Enerji Santrali
GWP	Global Warming Potential
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HAWC2	Horizontal Axis Wind turbine simulation Code 2nd generation
HES	Hidroelektrik Santral
IMU	International Measurement Unit
K-YBRT	Konik Yarı Batık Rüzgar Türbini
MAM	Marmara Araştırma Merkezi
MARIN	Maritime Research Institute
MW	Megawatt

N2O	Nitroz oksit
NREL	National Renewable Energy Lab
OC4	Offshore Code Comparison Collaboration Continuation
OC5	Offshore Code Comparison, Collaboration, Continued, with Correlation
RAO	Response Amplitude Operator
RES	Rüzgar Enerji Santrali
SPAR	Single Point Anchorage
SPIC	Semi-submersible platform with Partially Inclined Columns
TLP	Tension Leg Platform
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Açık deniz ve kıyı rüzgar enerjisi yatırımları.....22

Şekil 1.2 Deneysel çalışmada kullanılan rüzgar türbini modelleri. Soldan sağa saat yönünde; spar, gergi ayaklı platform (TLP), yarı batık platform 23

Şekil 1.3 MARIN açık deniz dalga basenindeki DeepCwind yarı batık rüzgar türbini modeli.....25

Şekil 1.4 SPIC platformunun gösterimi.....27

Şekil 2.1 2016 yılı global karbondioksit eşdeğer (CO_2e) sera gazı emisyonunun gaz türlerine göre oranı.....33

Şekil 2.2 2000-2021 yılları arası dünya geneli bölgelere göre karbondioksit eşdeğeri (CO_2e) emisyonu [mt].....34

Şekil 2.3 2021 yılında dünya genelinde kullanılan birincil enerji kaynakları oranı 34

Şekil 2.4 2010-2020 yılları arasında dünya genelinde elektrik üretimi için kullanılan kaynakların oranı. 35

Şekil 2.5 1990-2019 yılları arası dünya geneli yenilenebilir enerjiden üretilen elektriğin yenilenebilir enerji çeşitlerine göre tüketim miktarı (sol eksen) [EJ], dünya geneli elektrik tüketiminin yenilenebilir enerjideki payı (sağ eksen).....36

Şekil 2.6 (a) 2022 yılı Türkiye geneli üretilen elektriğin kaynaklara göre oranı, (b) 2023 Haziran ayı sonu itibarıyla Türkiye geneli kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı.....38

Şekil 2.7 2011-2022 yılları arası Türkiye'nin (a) hidroelektrik enerjisi kurulu gücü, (b) hidroelektrik enerjisi kurulu gücünün toplam kurulu güce oranı, (c) güneş enerjisi kurulu gücü, (d) güneş enerjisi kurulu gücünün toplam kurulu güce oranı, (e) rüzgar enerjisi kurulu gücü, (f) rüzgar enerjisi kurulu gücünün toplam kurulu güce oranı. 39

Şekil 2.8 5 km x 5 km çözünürlüğünde deniz seviyesinde 80 m yukarıda Dünya'daki ortalama rüzgar hızları. 41

Şekil 2.9 100 m x 100 m çözünürlüğünde deniz seviyesinden 100 m yukarıda Türkiye'deki ortalama rüzgar hızları.....41

Şekil 2.10 Hollanda'da kullanılan yel değirmenleri.....42

Şekil 2.11 Yatay eksenli rüzgar türbinleri (sol), dikey eksenli rüzgar türbinleri (sağ).....44

Şekil 2.12 Kara ve deniz üstü rüzgar türbinleri. 45

Şekil 2.13 Yakın kıyı deniz üstü rüzgar türbinleri temel çeşitleri. 46

Şekil 2.14 Yüzer rüzgar türbini çeşitleri.....47

Şekil 2.15 Yüzer rüzgar türbinleri stabilite üçgeni.....48

Şekil 2.16 2MW kapasiteli yarı batık tipinde yüzer rüzgar türbini Agucadoura, Portekiz 48

Şekil 2.17 2006-2021 yılları arası dünyadaki deniz üstü rüzgar türbini kurulu güçleri. 49

Şekil 3.1 Dalga Baseni..... 50

Şekil 3.2 Dalga baseni genel görünüm 51

Şekil 3.3 EtherCat dalga prob sistemi 52

Şekil 3.4 Dalga probu 52

Şekil 3.5 Dalga problarının basen içinde konumlandırılması..... 52

Şekil 3.6 1:50 ölçekli model yüzer rüzgâr türbini görünümü..... 53

Şekil 3.7 1:50 ölçekli yüzer rüzgâr türbini 53

Şekil 3.8 Model rüzgâr türbini planı..... 54

Şekil 3.9 Model rüzgâr türbini kesiti 54

Şekil 3.10 UM7 sensörü: (a) genel görünüm, (b) UM7 yönlendirme sensörü 55

Şekil 3.11 9DOF Razor IMU sensörü 56

Şekil 3.12 Raspberry Pi Panel Bilgisayar..... 56

Şekil 3.13 Kamera sistemi 57

Şekil 3.14 6 pervaneli rüzgar üretim sistemi genel görünüm 57

Şekil 3.15 Drone parçaları; (a) Sunnysky X4108S 380kv fırçasız motor, (b) 1355 karbon fiber pervane, (c) 40A, 6S fırçasız motor sürücü, (d) 6 kanal 2.4ghz kumanda. 58

Şekil 3.16 Load cell sistemi; (a) Load cell, (b) veri toplama sistemi, (c) veri toplama sistemi ve bilgisayar..... 59

Şekil 3.17 Load cell kalibrasyon grafikleri (a) load cell 1, (b) load cell 2, (c) load cell 3, (d) load cell 4. 59

Şekil 3.18 Yüzer türbinin bağlanma şeması. 60

Şekil 3.19 Drone rüzgar üretim sistemi 63

Şekil 3.20 Dronun 3 farklı devirdeki itme kuvveti (1.test)..... 63

Şekil 3.21 Dronun 3 farklı devirdeki itme kuvveti (2.test)..... 64

Şekil 3.22 Drone hız dağılımı..... 65

Şekil 3.23 D275 yükleme durumu için modele çelik levhaların yerleştirilmesi ... 66

Şekil 3.24 D165 yükleme durumu serbest salınım grafikleri: (a) baş-kıç vurma serbest salınım grafiği, (b) dalıp-çıkma serbest salınım grafiği..... 68

Şekil 3.25 D275 yükleme durumu serbest salınım grafikleri: (a) baş-kıç vurma serbest salınım grafiği, (b) dalıp-çıkma serbest salınım grafiği..... 68

Şekil 3.26 D435 yükleme durumu serbest salınım grafikleri: (a) baş-kıç vurma serbest salınım grafiği, (b) dalıp-çıkma serbest salınım grafiği..... 68

Şekil 3.27 Model üzerine etkiyen kuvvetler ve etkime yerleri; (a) statik durum, (b) meyilli durum. 70

Şekil 3.28 Meyil deneyi 71

Şekil 3.29 Meyil deneyinde kullanılan aletler. 74

Şekil 3.30 Ağırlık merkezinden asılan 66.66 kg deplasman ağırlığındaki model. 76

Şekil 3.31 Markerlar; (a) simetrik, (b) asimetrik. 79

Şekil 3.32 Kırpılmış görüntü. 82

Şekil 3.33 Görüntü filtreleme aşamaları. 84

Şekil 3.34 D275 yükleme durumu W1 dalgası (1 yıl yineleme periyotlu tasarım dalga koşulu). 86

Şekil 3.35 D275 yükleme durumu modelin baş-kıç vurma serbest salınımı. 86

Şekil 4.1 W8R1 (H= 0.08 m, T=0.8 s; Prototip: H=4 m T=5.66 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-300 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 93

Şekil 4.2 W8R1 (H= 0.08 m, T=0.8 s; Prototip: H=4 m T=5.66 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 0-90 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 94

Şekil 4.3 W8R1 (H= 0.08 m, T=0.8 s; Prototip: H=4 m T=5.66 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 95

Şekil 4.4 W8R1 (H= 0.08 m, T=0.8 s; Prototip: H=4 m T=5.66 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-90 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 96

Şekil 4.5 W15R3 (H= 0.15 m, T=1.55 s; Prototip: H=7.5 m T=10.69 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-300 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 99

Şekil 4.6 W15R3 (H= 0.15 m, T=1.55 s; Prototip: H=7.5 m T=10.69 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 0-90 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 100

Şekil 4.7 W15R3 (H= 0.15 m, T=1.55 s; Prototip: H=7.5 m T=10.69 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 101

Şekil 4.8 (H= 0.15 m, T=1.55 s; Prototip: H=7.5 m T=10.69 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-90 sarasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 102

Şekil 4.9 275 mm su çekimli modelin tasarım rüzgarı etkisinde yaptığı: (a) baş-kıç vurma hareketi, (b) ileri-geri öteleme hareketi, (c) 1. halatın kuvveti zaman serisi. 104

Şekil 4.10 W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4.03 m, T_p=8.18 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 107

Şekil 4.11 W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4.03 m, T_p=8.18 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) genlik spektrumu, (c) güç spektral yoğunluğu. 108

Şekil 4.12 W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4.03 m, T_p=8.18 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 109

Şekil 4.13 W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4.03 m, T_p=8.18 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-600 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 110

Şekil 4.14 W1+WIND (Hs= 0.08 m, Tp=1.15 s; Prototip: Hs= 4 m, Tp=8.13 s) düzensiz dalga ve rüzgar kombinasyonu durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-300 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 113

Şekil 4.15 W1+WIND (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4 m, T_p=8.13 s) düzensiz dalga ve rüzgar kombinasyonu durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) genlik spektrumu, (c) güç spektral yoğunluğu. 114

Şekil 4.16 W1+WIND (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4 m, T_p=8.13 s) düzensiz dalga ve rüzgar kombinasyonu durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 115

Şekil 4.17 W1+WIND (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4 m, T_p=8.13 s) düzensiz dalga ve rüzgar kombinasyonu durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 116

Şekil 4.18 W2 (Hs= 0.15 m, Tp=1.55 s; Prototip: Hs= 7.48 m, Tp=10.98 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 119

Şekil 4.19 W2 (Hs= 0.15 m, Tp=1.55 s; Prototip: Hs= 7.48 m, Tp=10.98 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri geri öteleme hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) genlik spektrumu, (c) güç spektral yoğunluğu. 120

Şekil 4.20 W2 (Hs= 0.15 m, Tp=1.55 s; Prototip: Hs= 7.48 m, Tp=10.98 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 121

Şekil 4.21 W2 (Hs= 0.15 m, Tp=1.55 s; Prototip: Hs= 7.48 m, Tp=10.98 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-600 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 122

Şekil 4.22 W3 (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s; Prototip: H_s= 9.09 m, T_p=12.05 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 125

Şekil 4.23 W3 (Hs= 0.18 m, Tp=1.70 s; Prototip: Hs= 9.09 m, Tp=12.05 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) genlik spektrumu, (c) güç spektral yoğunluğu. 126

Şekil 4.24 W3 (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s; Prototip: H_s= 9.09 m, T_p=12.05 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 127

Şekil 4.25 W3 (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s; Prototip: H_s= 9.09 m, T_p=12.05 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu. 128

Şekil 4.26 (a) Dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu, (b) baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu. 130

Şekil 4.27 (a) Baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu, (b) ileri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (c) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu. 131

Şekil 4.28 (a) İleri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (b) baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu,(c) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu. 131

Şekil 4.29 (a) İleri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (b) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu, (c) baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu.....133

Şekil 4.30 Hedeflenen ve ölçülen beyaz gürültü dalgası spektrumu [9]. 133

Şekil 4.31 (a) İleri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (b) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu, (c) baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu.....133

Şekil 4.32 (a) Baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu, (b) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu, (c) ileri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (d) 1. halat davranış genlik spektrumu. 136

Şekil 4.33 1. halat kuvvetinin maksimum değerleri. 137

Şekil 4.34 (a) Baş-kıç vurma testleri kutu grafiği, (b) ileri-geri öteleme testleri kutu grafiği. 138

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Literatür özeti tablosu. 28
Tablo 3.1 Yüzer rüzgar türbini modeli testi için belirlenen ölçek oranları. 61
Tablo 3.2 Prototoip ve model için dalga koşulları. 62
Tablo 3.3 Prototip ve model için rüzgar koşulları. 62
Tablo 3.4 Test 1 ve Test 2 sonuçları 64
Tablo 3.5 Yükleme durumları ve özellikleri 66
Tablo 3.6 Hesaplanan GM değerleri (D165). 72
Tablo 3.7 Hesaplanan GM değerleri (D275). 73
Tablo 3.8 Hesaplanan GM değerleri (D435). 74
Tablo 3.9 Meyil testi sonuçları. 75
Tablo 3.10 Meyil deneyi ve denge deneyi karşılaştırılması 77
Tablo 3.11 165 mm su çekimi için kütle ve atalet özellikleri 77
Tablo 3.12 275 mm su çekimi için kütle ve atalet özellikleri 77
Tablo 3.13 435 mm su çekimi için kütle ve atalet özellikleri 78
Tablo 3.14 Görüntü işleme Excel çıktısı. 85
Tablo 4.1 Düzenli dalga durumları 88
Tablo 4.2 Düzensiz tasarım dalgası koşulları 105
Tablo 4.3 RAO grafiklerinde kullanılan düzenli dalga testleri parametreleri 134

ÖZET

YARI BATIK AÇIK DENİZ YÜZER RÜZGAR TÜRBİN PLATFORMUNUN HİDRODİNAMİK DAVRANIŞI

Mehmet Utku ÖĞÜR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL

Yenilenebilir enerji son yıllarda önemini artırmaktadır. Çünkü gerek iklim değişikliği gerekse dünya kaynaklarının her geçen gün azalması bu tür enerji kaynaklarına yönelik çalışmaları önemli hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisi özellikle gelişmiş ülkelerde yatırımın en fazla yapıldığı enerji kaynakları arasında sayılmaktadır. Rüzgâr enerjisindeki verimliliğin artırılması amacıyla yatırımlar özellikle rüzgâr enerjisinden daha fazla faydalanmak ve çevresel etkilerini azaltabilmek için kıyı ve açık deniz alanlarında planlanmaktadır. Ancak kıyı alanlarında kurulu sabit temelli rüzgar türbin teknolojisi 60 m'den daha derin sularda ekonomik olmamaktadır. Bu nedenle daha derin açık denizlerde yüzer türbin uygulamaları son yıllarda yapılmaya başlanmıştır. Ancak bu alandaki tartışmalar ve araştırmalar halen devam etmektedir. Açık denizdeki yüzer türbinler kıyı alanlarındaki sabit temelli türbinlerden daha maliyetli olmaktadırlar. Bu maliyeti düşürebilmek için açık denizdeki yüksek rüzgar potansiyelinden daha fazla yararlanabilmek amacıyla daha büyük türbinler inşa edilmektedir. Bundan dolayı bu türbinleri taşıyan yüzer platform tasarımları günümüzde önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmada, açık deniz koşullarında planlanabilecek yeni tip bir yarı batık yüzer

rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır. Özgün tasarım yüzer rüzgar türbin platformu; üç adet altında silindir olan kesik koni şeklindeki şamandıradan oluşmaktadır. Bu üç şamandıranın ortasına kule yerleştirilmiştir ve tüm bileşenler birbirine çapraz elemanlarla bağlanmıştır. Bu tasarımın 1:50 ölçekli fiziksel modeli oluşturulmuş ve Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrodinamik Araştırma Laboratuvarı'nda mevcut dalga baseninde deneysel testleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Froude ölçek kanunu kullanılmıştır. Platforma balast eklenerek modelin su çekimi arttırılmıştır. Bir balastsız ve iki adet farklı ek balasta sahip toplamda üç adet farklı su çekiminde model oluşturulmuştur. Tüm testler farklı su çekimine sahip üç model için de yapılmıştır. İlk önce serbest salınım testleri yapılmıştır. Sonrasında farklı periyottaki ve dalga yüksekliğindeki düzenli dalga testleri yapılarak modelin karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Son olarak sırf dalga ve dalga-rüzgar kombinasyonunda tasarım ve ekstrem koşullardaki düzensiz dalga testleri yapılmıştır. Testler sırasında modelin altı serbestlikteki hareketinin verisi ve modeli zemine bağlayan üç adet gevşek bağlı halatta oluşan kuvvet verisi alınmıştır. Alınan veriler çeşitli yöntemlerle işlenmiş ve analiz edilmiştir. Testler kendi içinde ve farklı su çekimine sahip diğer modellerle karşılaştırılmıştır. Model ölçeğinde 275 mm su çekimine sahip modelde optimum sonuçlar görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbinleri, yenilenebilir enerji, rüzgar iklimi, dalga iklimi, 3B model.

ABSTRACT

HYDRODYNAMICS RESPONSE OF SEMI-SUBMERSIBLE FLOATING WIND TURBINE

Mehmet Utku ÖĞÜR

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL

Renewable energy has been increasing its importance in recent years. Because both climate change and the ever-decreasing world resources have made studies on such energy resources important. Among the renewable energy sources, wind energy is the energy source where the most investment is made, especially in developed countries. In order to increase the efficiency of wind energy, investments are planned especially in coastal and offshore areas to benefit more from wind energy and reduce its environmental impacts. However, fixed bottom wind turbine technology installed in coastal areas is not economical in waters deeper than 60 m. For this reason, floating turbine applications in deeper open seas have begun to be made in recent years. However, discussions and research in this field still continue. Floating turbines offshore are more costly than fixed bottom turbines in coastal areas. In order to reduce this cost, larger turbines are being built to benefit more from the high wind potential offshore. For this reason, floating platform designs carrying these turbines have become an important research topic today. In this study, a new type of semi-submersible floating wind turbine that can be planned in open sea conditions was designed. Novel design floating wind turbine platform; It consists of three truncated cone-shaped buoys with a cylinder underneath. The

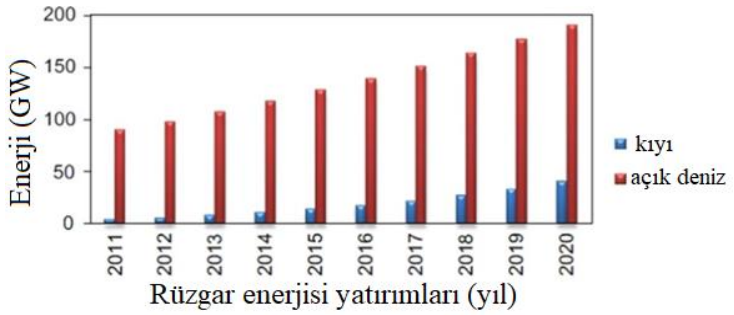
tower is placed in the middle of these three buoys and all components are connected to each other with cross members. A 1:50 scale physical model of this design was created and experimental tests were carried out in the existing wave basin at Yıldız Technical University "Hydrodynamics Research Laboratory". Froude scale law was used in the experiments. By adding ballast to the platform, the water draft of the model was increased. A total of three models were created at different drafts, one without ballast and two with different additional ballast. All tests were carried out for three models with different drafts. First, free decay tests were performed. Afterwards, the characteristic features of the model were determined by performing regular wave tests at different periods and wave heights. Finally, irregular wave tests were carried out in only wave and wave-wind combination design and extreme conditions. During the tests, data on the six degree of freedom movement of the model and the force data on three catenary tied ropes connecting the model to the ground were taken. The received data was processed and analyzed by various methods. The tests were compared within each other and with other models with different drafts. At model scale, optimum results were seen in the model with 275 mm draft.

Keywords: Offshore Floating Wind Turbines, renenewable energy, wind climate, wave climate, 3D model.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

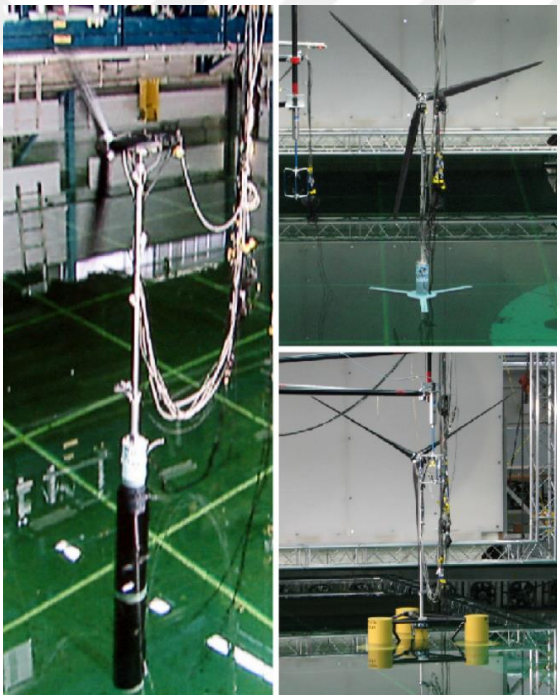
Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları üzerine çalışmalar artmıştır. Rüzgar enerjisi yenilebilir enerji kaynakları arasında en popüler olanıdır ve son yıllarda özellikle açık deniz koşullarında rüzgar enerji türbinleri ön plana çıkmıştır Wu vd. (2019) açık deniz türbinlerinin temel tasarımı üzerine bugüne kadar çalışmaları özetlemiştir. Bu çalışmada sığ su koşullarından derin su koşullarına kadar olan temel sistemleri sınıflandırılmış ve özellikleri verilmiştir. Çalışmada açık deniz türbinlerinin temel sistemlerinin son yıllarda en önemli araştırma konularından biri olduğu anlatılmış ve gelişime açık olduğu belirtilmiştir. 1:50 ölçekli bir açık deniz türbin modeli kullanılarak sakin su, düzensiz dalga, rüzgar dalga ve akıntı kombinasyonu altında testler yapılmıştır. Testlerin sonucunda modelin doğal periyodu, sönüm, hareketin davranış genlik operatörleri ve bağlantılardaki kuvvetler belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece sonraki çalışmalar için esaslar oluşturulmuştur. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi açık deniz türbin yatırımı küresel olarak hızlı bir artış göstermektedir [1].



Şekil 1.1 Açık deniz ve kıyı rüzgar enerjisi yatırımları [1]

Goupee vd. (2014) farklı türdeki yüzen rüzgar türbinlerin karakteristik davranışlarını belirleyebilmek için National Renewable Energy Lab'ın (NREL) 5 MW gücündeki referans rüzgar türbinini esnek kule ile; gergi ayaklı, yarı-batık ve spar tipindeki yüzer rüzgar türbini platformlarına monte ederek dalga baseninde 1:50 ölçekli deneyler gerçekleştirmiştir (Şekil 1.2). Basit serbest salınım

testlerinden, düzensiz deniz ve dinamik rüzgar koşullarının bulunduğu komplike testler gerçekleştirilmiştir. Sadece düzensiz dalga etkisinde en küçük ileri-geri öteleme tepkisi spar tipi platformda görülürken en küçük baş-kıç vurma tepkisi ise gergi ayaklı platformda görülmüştür. Yarı-batık platforma sahip türbinin ise bu iki serbestlikteki tepkisinin spar ve gergi ayaklı platformun arasında kaldığı belirtilmiştir. Deney koşullarına rüzgar da eklendiğinde gergi ayaklı sistemin baş-kıç vurma tepkisi artarken spar tipi sistemin ileri-geri öteleme tepkisi azalmıştır. Yarı-batık sistemin ise bu her iki serbestlikte tepkileri azalmıştır. Bağlama halatlarındaki ve gergi ayaklardaki oluşan kuvvet tepkileri karşılaştırıldığında ise gergi ayakta oluşan kuvvetlerin büyük olduğu, spar ve yarı-batık tipindeki türbinlerin bağlama halatlarındaki en büyük kuvvet tepkilerinin ise ileri-geri öteleme doğal frekansında görüldüğü belirtilmiştir [2].

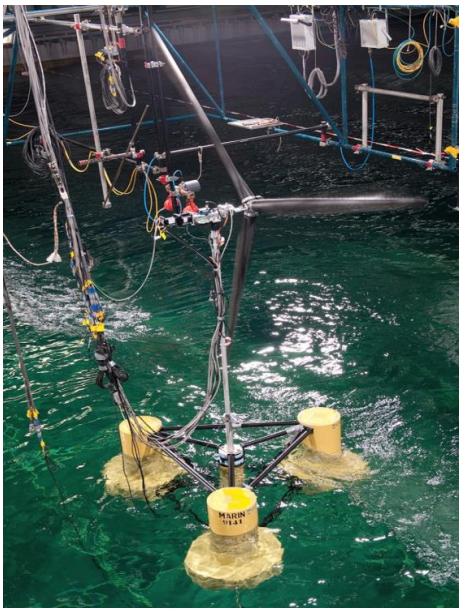


Şekil 1.2 Deneysel çalışmada kullanılan rüzgar türbini modelleri. Soldan sağa saat yönünde; spar, gergi ayaklı platform (TLP), yarı batık platform [2]

Eskilsson vd. (2013) 3 adet katener halatla bağlı yüzen silindirin sayısal model çalışması yapılarak deneysel veriler doğrulamıştır. Sayısal modelin serbest salınım testleri ve farklı periyotlardaki düzenli dalgalar altında testleri yapılmış, sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. HAD çözücüsü olarak OpenFOAM kullanılmıştır. OpenFOAM ile entegre çalışan sonlu elemanlar metodu olan MooDy

kodu ile halatlar modellenmiştir. Yüzen silindirin farklı periyotlardaki düzenli dalga altındaki baş-kıç vurma, ileri-geri öteleme, dalıp-çıkma hareketlerinin, halat kuvvetlerinin ve serbest salınımlarının sayısal çıktıları ile deney verileri karşılaştırılmıştır. Sayısal modelin serbest salınım periyotları, verilen dalgalar altındaki hareketleri ve halatlardaki kuvvetler deneysel veriler ile çok iyi eşleşmiştir. Yalnız rezonans bölgesinde modelin baş-kıç vurma tepkisi düşük tahmin edilmiştir [3].

Robertson vd. (2017) OC5 Projesi Faz II'de yarı batık yüzen rüzgar türbini sisteminin DeepCwind konsorsiyumu tarafından yapılan birbirinden bağımsız farklı sayısal modellerin, Hollanda'daki Maritime Research Institute (MARIN) açık deniz dalga baseninde sistemin 1:50 ölçekli fiziksel modelinin test verisi ile doğrulaması yapılmıştır [4]. Daha öncesinde OC5 projesinin 1. fazında rüzgar türbini olmadan yalnız silindir üzerindeki hidrodinamik yükler test edilmiştir. Faz 1a'da askıda yüzen rijit bir silindir incelenmiştir [5]. Faz 1b'de ise eğimli bir zemine sabitlenmiş elastik bir silindir test edilmiştir [6]. Projenin II. Fazında ise daha önce OC4 Projesi Faz II'de olduğu gibi üzerinde rüzgar türbini olan daha karmaşık bir açık deniz yüzen rüzgar sistemi incelenmiştir [7]. Aslında OC4 projesinde de benzer sistem test edilmiştir fakat o çalışmada fiziksel model ile doğrulama yapılmamış yalnız farklı simülasyonlar karşılaştırılmıştır. Konsorsiyum daha önce 2011 yılında 1:50 ölçekli yüzen rüzgar türbini testleri yapmıştır. Fakat testler sırasında, geometrik olarak ölçeklendirilmiş rüzgar türbininin düşük Reynolds sayısında doğadaki rüzgar şartlarında beklenen performansı göstermediği fark edilmiştir. Bundan dolayı daha iyi ölçeklendirilmiş itme ve tork yükleri üreten yeni bir türbin üretilmiştir. Bu yeni türbin yarı batık yüzen sistemin üzerine monte edilmiştir. 2011 yılında ve ardından 2013 yılında iki kez test edilmiştir. OC5 projesinin II. fazında ise tekrar yapılan bu testler incelenmiştir. Konsorsiyumun 21 üyesi tarafından birbirinden bağımsız aerodinamik, hidrodinamik modelleme ve bağlantı halatlarının modellemesi yapılmıştır. FAST v6, FAST v8, HAWC2, 3DFloat, OrcaFlex gibi farklı yazılımlar kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.3 MARIN açık deniz dalga basenindeki DeepCwind yarı batık rüzgar türbini modeli

Bruinsma vd. (2018) İki farklı sayısal model oluşturmuştur. İlk olarak iki boyutlu dikey silindirin serbest salınımı teorik ve deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Sonrasında ise OC5 yüzer türbin sayısal modeli gevşek halatlar ile bağlı iken serbest salınımı ve düzenli dalga altındaki hareketleri OC5 deneysel verisi ile doğrulanmıştır. Dalga tankının sayısal modellenmesi için OpenFOAM aracı olan interDyMFoam kullanılmıştır. Dalga üretimi ve sönümlemesi için waves2Foam aracı kullanılmıştır. Farklı çözünürlükte sayısal çözüm ağı kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Hem iki boyutlu dikey silindir hem de OC5 yüzer türbin sayısal modelin sonuçları deneysel sonuçlara çok iyi uymuştur [8].

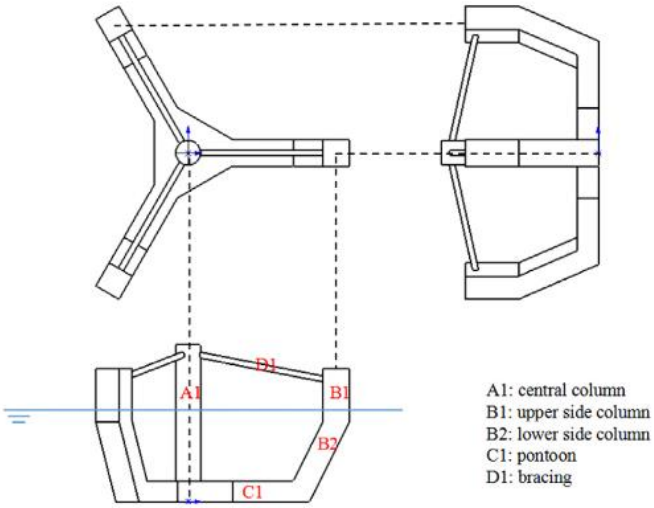
Zhao vd. (2018) tarafından tension-leg tipi yüzer rüzgar türbinleri üzerine yapılan deneysel çalışmada açık deniz rüzgar türbinlerinin en büyük rüzgar enerji potansiyeline sahip olduğu anlatılmıştır. 1:50 ölçekli gergi ayaklı yüzen rüzgar türbini modelini (Windstar TLP system) test edilmiştir. Rüzgar, dalga ve akıntı yüklerinin kombinasyonu altında sistemin dinamik davranışını ve genel performansını değerlendirilmiştir. Testler sakin su, white noise dalgası ve dalga, rüzgar, akıntı kombinasyonunun olduğu üç farklı durumda gerçekleştirilmiştir. Testlerin sonucunda modelin doğal periyodu, sönüm, hareketin davranış genlik spektrumu ve tendon gerilmeleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar

incelendiğinde tasarım koşullarında ileri-geri gitme ve baş-kıç vurma hareketi belirgin olarak rotorun itme kuvvetinden kaynaklanmıştır. 50 yıllık ekstrem koşulların olduğu durumda ise ileri-geri gitme ve baş-kıç vurma hareketini dalga ve akıntı yükü kontrol etmiştir. Yüklerin kombinasyonu durumunda ileri-geri gitme ve baş-kıç vurma hareketlerinin genliğinin değişkenliği yalnız dalga etkimesi durumundaki genliğinin değişkenliğinden daha küçük çıkmıştır. Bu durum rüzgar ve akıntı kuvvetlerinin sistemi daha stabil duruma getirdiğini göstermiştir [9].

Zhao vd. (2019) Sayısal model kullanılarak yüzen rüzgar türbininin dinamik davranışı incelemiştir. Sabit platform, yüzen yarı batık platform ve NREL'in 5 MW gücündeki yüzer açık deniz rüzgar türbininin dalga-rüzgar etkileşimi incelenmiştir. Sayısal model HAD yazılımı kullanılarak yapılmıştır. İki farklı potansiyel akım teorisi aracı EDF (Électricitéde France) ve FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence) kullanılarak sonuçlar elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sayısal model HAD yazılımı kullanılarak yapılmıştır [10].

Cao vd. (2020) ise Güney Çin Denizi'nde gelecekte yapılabilecek olası rüzgar türbini uygulamaları için elverişli bir yüzer rüzgar türbini tasarımı yapmayı hedeflemişlerdir. Şekil 1.3'te görülen SPIC (Semi-submersible platform with Partially Inclined Columns) adını verdikleri özgün bir yüzer platform tasarımı yapmaya çalışmışlar ve 1:64 ölçekli modelin testlerini Shanghai Jiao Tong Üniversitesi'nin açık deniz baseninde gerçekleştirmişlerdir. SPIC platformlu rüzgar türbini sistemi 60 m geçiş su derinliği için tasarlanmıştır. Deney ortamı ve parametreleri Güney Çin Denizi'ne sınır Guangdong Bölgesi'nin kıyısındaki uygulama alanının çevresel koşulları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Dalga, rüzgar ve akıntı yüklerinin kombinasyonları ile tasarım ve ekstrem koşullar test edilmiştir. Yapının altı serbestlik derecisindeki doğal frekansları, dalga frekans aralığından uzakta kalmıştır. Bu sayede yapıda dalga etkisinde oluşabilecek rezonansın önüne geçilmiştir. İleri-geri öteleme hareketinin davranış spektrumunda, sadece ileri-geri öteleme hareketinin doğal frekansında pik değer görülürken, baş-kıç vurma hareketinin davranış spektrumunda, baş-kıç vurma hareketi ve ileri-geri öteleme hareketinin doğal frekansında pik değerler görülmüştür. Bağlama halatlarında oluşan gerilmeler doğrudan ileri-geri gitme hareketinden etkilenmiştir. Dalga-rüzgar-akıntı kombinasyonunun olduğu durumda ortalama en yüksek ileri-geri öteleme hareketi oluşurken, bu hareketin en büyük

genliği rüzgar-dalga kombinasyonunda oluşmuştur. En büyük baş-kıç vurma hareketi ve kule taban eğilme momenti tasarım rüzgar-dalga kombinasyonunda görülmüştür [11].



Şekil 1.4 SPIC platformunun gösterimi [11]

Pols vd. (2021) tarafından yüzen salınımlı su kolonu (FOWC: Floating Oscillating Water Column) tipindeki dalga enerji dönüştürücüsünün potansiyel teoriyi temel alan sayısal yazılım (ANSYS AQWA) ile modellenmesini yapmışlardır. FOWC sisteminin düzenli ve düzensiz dalgalar altındaki hareketleri sayısal model ile tahmin edilmiş ve 1:36 ölçekli fiziksel model ile yapılan deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırarak sayısal model doğrulanmıştır. Buna ek olarak fiziksel modelin sürüklenmemesi için dört adet gevşek halat ile zemine bağlanmış, çeşitli düzensiz deniz durumlarında ve farklı dalga yaklaşım açılarında modelin hidrodinamik performansı araştırılmıştır. Gevşek bağlama halatlarının modelin baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma yönündeki hareketine etkisinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiş ve bağlantı sistemi sayısal olarak modellenmemiştir. Bunun yerine sayısal analizde modelin yanal yöndeki hareketi kısıtlanmıştır. Potansiyel akım teorisinin sıfır viskozite kabulü bu araştırma için uygun olmadığından dolayı modelin hareketlerindeki yanlış tahmini azaltmak için simülasyona ek sönüm kuvveti eklenmiştir. Viskozite etkisi ile sönümün genellikle lineer olmadığı ve frekansa bağlı olduğu, çalışmada belirtilmiş ancak kullanılan yazılımdaki kısıtlamadan dolayı her bir serbestlik derecesi için frekanstan bağımsız olan sabit bir sönüm katsayısı eklenmiştir. Her bir halata bağlanan load cell ile halatların

gerilmeleri, tasarım dalgası ve ekstrem dalga koşulları altında ölçülmüş, her bir dalga koşulunda dalganın geliş yönünün 0°, 45°, 90°, 135° ve 180° olması durumu için ayrı ayrı testler yapılmıştır. Ayrıca 135° dalga geliş yönünde en çok zorlanan halatın (Şekil 1.10'da 4. halat) kopma durumu canlandırılmıştır. Test sırasında halat bağlantısı çözülmüş ve diğer halatlardaki gerilme değişimi ve modelin yaptığı hareketlerdeki değişiklikler tasarım ve ekstrem dalga koşulları için incelenmiştir [12].

Wang vd. (2022) OC6 deneysel çalışmasında doğrulanması için farklı çalışmacılar farklı HAD yazılımları kullanmıştır. OC6 DeepCwind yarı batık yüzen rüzgar türbininin serbest salınımındaki sönüm katsayılarının HAD yazılımları ile ne ölçüde tahmin edilebildiği tartışılmıştır. Farklı katılımcılar tarafından STTAR-CCM+, OpenFOAM, ReFRESCO HAD yazılımları kullanılmıştır. Morphing ve Overser (taşan) ağ kullanılmıştır. Doğrusal ve karasel sönüm katsayıları ve eşdeğer sönüm oranı tahmin edilmiştir. Doğrusal ve karasel sönüm katsayılarının tahminlerinde belirsizlikler olurken, eşdeğer sönüm oranı daha düşük belirsizlikle tahmin edilmiştir. Sönüm hareketi deneysel ve HAD sonuçları ile genel olarak iyi eşleşmiştir. Serbest salınım ve sönüm grafiklerinde oluşan küçük farkların muhtemelen HAD yazılımında dikkate alınmayan bağlama halat düzeneğinde oluşan sürtünmeden kaynaklandığı belirtilmiştir [13].

Tablo 1.1 Literatür özeti tablosu.

Yazarlar	Çalışma	Metod	Sonuçlar
(Palm vd., 2016) [3]	3 adet katener halatla bağlı yüzen silindir. Sayısal model ve deneysel çalışma. Serbest salınım testleri ve farklı periyotlardaki düzenli dalga testleri.	OpenFOAM + MooDy kodu, Bağlama halatlarının kuvvetleri, 6 serbestlikte modelin hareketleri.	Modelin hareketleri ve halat kuvvetleri sayısal model ile iyi tahmin edilmiştir. Yalnız rezonans bölgesinde modelin baş-kıç vurma tepkisi düşük tahmin edilmiştir.
(Groupie vd., 2014) [2]	Gergi ayaklı platform (TLP), spar ve yarı batık platform + NREL'in 5-MW gücündekii rüzgar türbini Serbest salınım testleri, düzensiz dalga testleri, dinamik rüzgar testleri.	Bağlama halatlarının kuvvetleri, 6 serbestlikte modelin hareketleri, Rotorun torku ve yer değiştirmesi, Yapının bazı önemli noktaları.	Yarı batık sistemin hareketi her iki serbestlik yönünde de rüzgar kuvveti ile sönümlenmiştir. Bağlantılardaki en büyük gerilme TLP sisteminde

Tablo 1.1 Literatür özeti tablosu (Devamı).

(Robertson vd., 2017) [4]	Yarı batık yüzen rüzgar türbini sistemi Birbirinden bağımsız 21 farklı sayısal model. Serbest salınım testleri, düzensiz dalga testleri, dinamik rüzgar testleri.	Rotor torku ve pozisyonu, kulenin üstündeki ve tabanındaki kuvvetler ve momentler, bağlama kablolarının gerilmeleri, altı serbestlik dereceli yüzen platformun hareketi, motor bölgesi, kule ve platformdaki bazı önemli noktaların ivmeleri ölçülmüştür.	Lineer olmayan dalga kuvvetleri üreten dalga modelleri sistemde direnç kuvveti oluşturmuştur.
(Bruinsma vd., 2018) [8]	İki boyutlu dikey silindir OC5 yüzer türbin Serbest salınım ve düzenli dalga testleri	OpenFOAM + interDyMFoam + waves2Foam . Farklı çözünürlükte sayısal çözüm ağı	Hem iki boyutlu dikey silindir hem de OC5 yüzer türbin sayısal modelin sonuçları deneysel sonuçlara çok iyi uymuştur.
(Zhao vd., 2018) [9]	Gergi ayaklı yüzen rüzgar türbini (TLP) White noise dalgası ve dalga, rüzgar, akıntı kombinasyonunu	Kulenin üst ucunun altı serbestlik derecesindeki kuvvetleri, motor yerinin yer değiştirme ivmesi, türbin dönme hızı, platformun yer değiştirme ivmesi, platformun altı serbestlik derecesindeki hareketi ve bağlama tendonlarının kuvetleri	Tasarım koşullarında ileri-geri gitme ve baş-kıç vurma hareketi belirgin olarak rotorun itme kuvvetinden (rüzgar) kaynaklı. Yüksek frekansta baş-kıç vurma hareketinin rezonans etkisi ortaya çıkmış ve yüksek frekanstaki tendon gerilmelerinin, platformun baş-kıç vurma hareketinden önemli derecede etkilendiği görülmüştür.
(Zhou vd., 2019) [10]	Sabit platform, yüzen yarı batık platform + NREL'in 5 MW türbin dalga-rüzgar etkileşimi	Potansiyel akım teorisi aracı EDF (Électricitéde France) ve FAST (NRELFatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence) Sisteminin hareketi, hidrodinamik ve bağlama yükleri	Dalga dikliği arttıkça lineer olmama durumu artmış ve farklı yazılımlar arasında tutarsızlık görülmüştür.
(Cao vd., 2020) [11]	SPIC (Semi-submersible platform with Partially Inclined Columns) + DTU'nun 10 MW türbin Dalga, rüzgar ve akıntı yüklerinin kombinasyonları Tasarım ve ekstrem koşullar	Rotor torku ve pozisyonu, kulenin üstündeki ve tabanındaki kuvvetler ve momentler, bağlama kablolarının gerilmeleri, altı serbestlik dereceli yüzen platformun hareketi, motor bölgesi, kule ve platformdaki bazı önemli noktaların ivmeleri ölçülmüştür.	En büyük baş-kıç vurma hareketi rüzgar-dalga kombinasyonunda görülmüştür. Bağlama kablolarında oluşan gerilmeler doğrudan ileri-geri gitme hareketinden etkilenmiştir.
(Pols vd., 2021) [12]	Yüzen salınımlı su kolonu (Floating Oscillating Water Column) dalga enerji dönüştürücüsü Çeşitli deniz durumlarında ve dalga yaklaşım açılarında modelin hidrodinamik performansı araştırılmıştır.	Tasarım dalgası ve ekstrem dalga koşulları altında halatların gerilmeleri ölçülmüştür.	Dalganın geliş yönündeki halatlarda en yüksek gerilmelerin olduğu görülmüştür. Dalga yönünün baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketlerini az etkilediği, yan öteleme, yalpalama ve dervişleme hareketlerini daha çok etkilediği görülmüştür.
(Wang vd., 2022) [13]	OC6 DeepCwind yarı batık yüzen rüzgar türbini	STTAR-CCM+, OpenFOAM, ReFRESCO HAD yazılımları Morphing ve Overser (taşan) ağ Doğrusal ve karasel sönüm katsayıları ve eşdeğer sönüm oranı	Doğrusal ve karasel sönüm katsayılarının tahminlerinde belirsizlikler olurken, eşdeğer sönüm oranı daha düşük belirsizlikle tahmin edilmiştir. Sönüm hareketi deneysel ve HAD sonuçları ile genel olarak iyi eşleşmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Son yıllarda, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi hızla artmaktadır. İklim değişikliği ve dünya kaynaklarının azalması gibi faktörler, enerji sektöründe

yenilikçi çözümlere olan ihtiyacı vurgulamaktadır. Bu bağlamda, rüzgar enerjisi yatırımları ön plana çıkmaktadır. Özellikle açık denizlerde konumlandırılan rüzgar türbinleri, kıyıdaki türbinlere kıyasla bir dizi avantaja sahiptir. Açık denizlerdeki rüzgar türbinleri, güçlü ve sürekli bir enerji kaynağına erişim sağlar. Kıyı bölgelerine göre daha yüksek rüzgar hızları, daha yüksek kapasiteli türbinlerin kullanılmasını ve daha fazla enerji üretim potansiyelini mümkün kılar. Bunun yanı sıra, açık denizlerde türbinlerin inşa edilmesi için daha geniş bir alan bulunması, daha büyük boyutlardaki türbinlerin kurulabilmesine olanak tanır. Açık denizlerde rüzgar türbinlerinin konumlandırılması, kıyı bölgelerindeki yapılar ve yerleşimlerin etkisinden kaçınmayı sağlar. İnsan yerleşimleri ve doğal alanlar üzerindeki olumsuz etkiyi en aza indirir. Bu da sürdürülebilir enerji üretimiyle çevresel etkileri dengeler.

Projelerin konumlarına bağlı olarak maliyetlerde değişiklikler görülmekte olup, günümüzde açık deniz rüzgar enerjisi yatırımlarının kıyı alanlarındaki yatırımlardan daha maliyetli olduğu bilinmektedir. Ancak, açık denizde daha yüksek rüzgar potansiyeli olması ve teknolojinin ilerlemesi, maliyetleri azaltmaktadır. Yüzer tip platformlar, istenilen derinlikte kurulabilir ve temel tasarımı ile zemin problemlerinden etkilenmemektedir, bu da onları daha kullanışlı kılmaktadır. Bu nedenle, günümüzde ve gelecekte yüzer platformlar daha fazla tercih edilmekte ve bu alandaki araştırmalar artmaktadır.

Ülkemizde açık deniz alanlarının bulunması, rüzgar enerjisi yatırımları için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu bağlamda, yüzer platformların geliştirilmesi ve bu alandaki araştırmaların önemi giderek artmaktadır.

Bu çalışmada, açık deniz koşullarında planlanabilecek yeni tip bir yarı batık yüzer rüzgar türbininin rüzgâr, dalga ve rüzgar-dalga birlikte olan etkisinde hidrodinamik davranışının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında açık deniz yüzer rüzgar türbinlerinin rüzgar ve dalga yükleri altındaki davranışı detaylı bir şekilde araştırılmış ve en uygun yüzer platform geometrisi belirlenerek tasarım ve ekstrem koşullarda bağlantılara gelen kuvvetler analiz edilmiştir.

Açık deniz rüzgar türbinlerinin tasarım aşamasında, rüzgar enerji potansiyelinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, rüzgar ölçümleri ve bölgesel rüzgar iklimini modelleme çalışmaları gibi yöntemlere başvurulmalıdır.

Literatürde yapılmış birçok çalışma, özellikle batı Karadeniz'de rüzgar ve dalga enerji potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir [14], [15], [16]. Bu çalışmada Batı Karadeniz'deki rüzgar ve dalga enerjisinin yeterli olduğu ortaya koyularak tasarım parametreleri buna göre belirlenmiştir. Belirlenen tasarım parametreleri doğrultusunda 1:50 ölçekli yarı batık kesik koni tipinde özgün tasarım yüzer rüzgar türbini platformu üç boyutlu fiziksel model tasarımı yapılmış, detaylı deneysel çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi "Hidrodinamik Araştırma Laboratuvarında" mevcut dalga baseninde gerçekleştirilmiştir.

2
YENİLENEBİLİR ENERJİ ve YÜZER RÜZGAR TÜRBİNLERİ

2.1 Enerji ve İklim Değişikliği

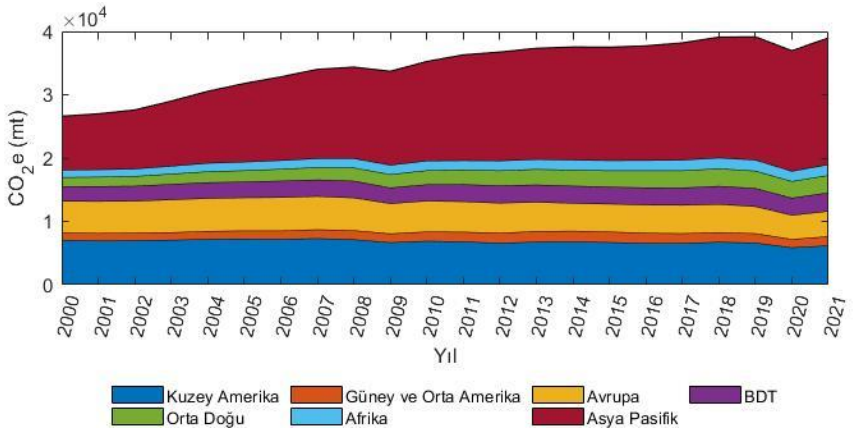
Geçmişten günümüze toplumlar basit ihtiyaçlarını karşılayabilmek için enerjiye ihtiyaç duymuşlardır. Gelişmiş ve refah seviyesi yüksek bir uygarlık olmanın temelinde yüksek enerji üretimi ve bunun efektif bir biçimde dağıtılıp kullanılması yatmaktadır. Teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve nüfus artışı enerjiye duyulan talebi hızla arttırmıştır. Bu talebi karşılayabilmek için 18. yüzyıldan beri medeniyetler arası fosil kökenli enerji kaynakları üzerinde yoğunlaşan bir rekabet söz konusudur. Ancak yapılan araştırmalar yenilenemez bir enerji kaynağı olan fosil kaynakların yakın gelecekte rezervlerinin tükeneceğini öngörmektedir. Dolayısıyla enerji üretiminin sürdürülebilirliği için yenilenebilir enerji gelişmiş medeniyetler için hayati önem taşımaktadır.

Ayrıca fosil enerji kaynaklarının üretimi, çevrimi ve tüketimi sırasında salınan gazlardan dolayı görülen sera etkisinin neden olduğu küresel ısınma ve iklim değişikliği gelecek nesillerin yaşamını tehdit etmektedir. İklim değişikliğinin etkilerinden gelecek nesilleri korumak için fosil kaynaklar yerine çevreye duyarlı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı zorunludur. Fosil yakıtların yanması, endüstriyel üretim, taşıtlarda kullanılan yakıtlar sera gazının oluşmasını sağlayan en büyük etkenlerdendir. Sera gazını oluşturan gazların başında karbondioksit (CO_2) gelse de metan (CH_4), nitroz oksit (N_2O) gibi gazlar da sera etkisi oluşturmaktadır. Karbondioksit harici gazların oluşturduğu küresel ısınma potansiyelinin (global warming potential, GWP), karbondioksitin oluşturduğu küresel ısınma potansiyeli ile oranlanması sonucu bu gazların emisyonu karbondioksit eşdeğeri (carbon dioxide-equivalents, CO_2e) olarak ifade edilir Şekil 2.1'de 2016 yılında global karbondioksit eşdeğer sera gazı emisyonunun gaz türlerine göre oranı verilmiştir [17]. Şekle göre karbondioksit gazı %74.4 oran ile sera gazlarının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. İkinci olarak metan gazı sera gazlarının %17.3'ünü sonrasında Nitroz Oksit gazı %6.2'sini ve kalan %2.1'ini ise

diğer gazlar oluşturur. Şekil 2.2'de 2000-2021 yılları arasında Kuzey Amerika, Güney ve Orta Amerika, Avrupa, BDT (Bağımsız Devletler Topluluğu: Azerbaycan, Belarus, Ermenistan, Kazakistan, Kırgızistan, Moldova, Özbekistan, Rusya ve Tacikistan), Orta Doğu, Afrika, Asya Pasifik bölgelerinin CO_2e emisyonu mt (milyon ton) olarak verilmiştir [18]. Globalde 2000-2021 yılları arası CO_2e emisyonunun önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu artışın büyük kısmını Asya Pasifik ülkeleri oluşturmaktadır. 2021 yılındaki Asya Pasifik ülkelerinin CO_2e emisyon miktarı global emisyon miktarının yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Bunun en büyük nedeni, dünyanın nüfusu en yüksek ilk iki ülkesi olan Çin ve Hindistan'ın da içinde bulunduğu Asya Pasifik Bölgesi'nin dünyadaki nüfusun %60'ını oluşturmasıdır. Gelişmiş devletlerde yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımlarla ve endüstride doğaya verilen zararı azaltan yöntemler kullanılması ile 2000 sonralarında CO_2e emisyonu azalmaya başlamıştır. Bu da Kuzey Amerika ve özellikle Avrupa'nın 2005-2006 yıllarından beri CO_2e emisyonunun azaldığını göstermektedir. Avrupa ülkelerinin içinde yer alan Türkiye'nin CO_2e emisyonu ise maalesef 1990 yılından beri istikrarlı bir şekilde artmaya devam etmektedir (ulaşılan veri kayıtları 1990 yılından başlamaktadır). Güney ve Orta Amerika ülkelerinde CO_2e emisyonu son birkaç yıldır azalışa geçmiştir. Diğer Orta Doğu ve Afrika ülkelerinde ise artmaya devam etmektedir yalnız son birkaç yıldır artış hızı azalmıştır.

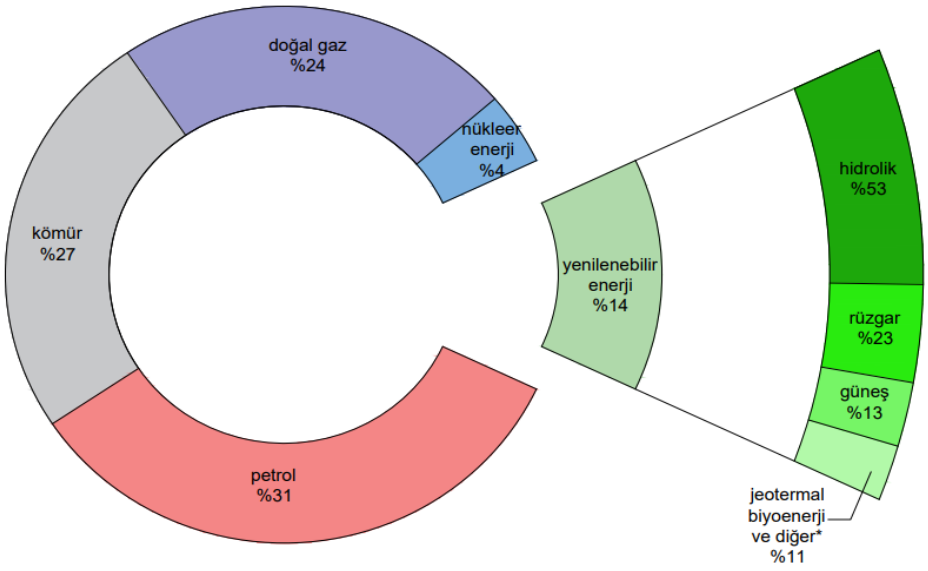


Şekil 2.1 2016 yılı global karbondioksit eşdeğer (CO_2e) sera gazı emisyonunun gaz türlerine göre oranı [17].



Şekil 2.2 2000-2021 yılları arası dünya geneli bölgelere göre karbondioksit eşdeğeri (CO_2e) emisyonu [mt] [18].

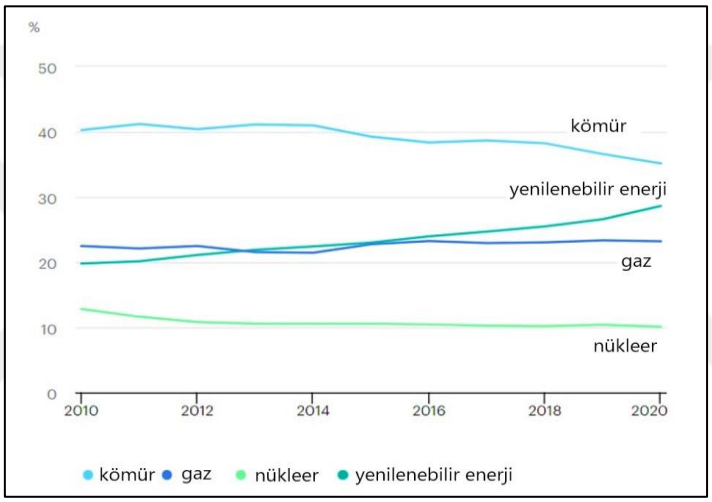
Günümüzde gelişmiş medeniyetler bile halen daha enerji kaynağı olarak büyük çoğunlukla fosil kaynaklı ve çekirdek kaynaklı yenilenemez enerji kaynaklarını kullanmaktadırlar. British Petroleum'un yayınladığı "Dünya Enerjisinin İstatiksel Olarak İncelenmesi 2022" raporuna göre 2021 yılında birincil enerji olarak tüketilen yakıtın yaklaşık %82'sini fosil yakıtlar, %4'ünü nükleer yakıt ve %14'ünü ise yenilenebilir yakıtlar oluşturmuştur (Şekil 2.3), [19].



Şekil 2.3 2021 yılında dünya genelinde kullanılan birincil enerji kaynakları oranı [19].

Sosyal ve ekonomik gelişmelerin devamlılığı için sürdürülebilir ve çevresel etkileri düşük enerji kaynaklarına yönelim gereklidir. Bu doğrultuda son yıllarda

yenilenebilir enerji sektörüne ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Dünyadaki en az 30 ülke halihazırda enerji arzlarının %20'sinden fazlasını sağlayan yenilenebilir enerjiye sahiptir [20]. Elektrik üretimi için kullanılan kaynakların oranlarının 2010-2020 yılları arasında globalde değişimi Şekil 2.4'te verilmiştir. Şekildeki grafikten yapılan çıkarıma göre elektrik üretimi için yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımının, özellikle son yıllar olmak üzere, dünya genelinde artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Ülkemizde ve dünya genelinde elektrik üretimi için kullanılan yakıtların başında CO2e emisyonu yüksek ve sınırlı rezervi olan kömür bulunsa da her geçen yıl elektrik üretimi için kullanılan kaynaklardaki kömür oranı düşmektedir [21].

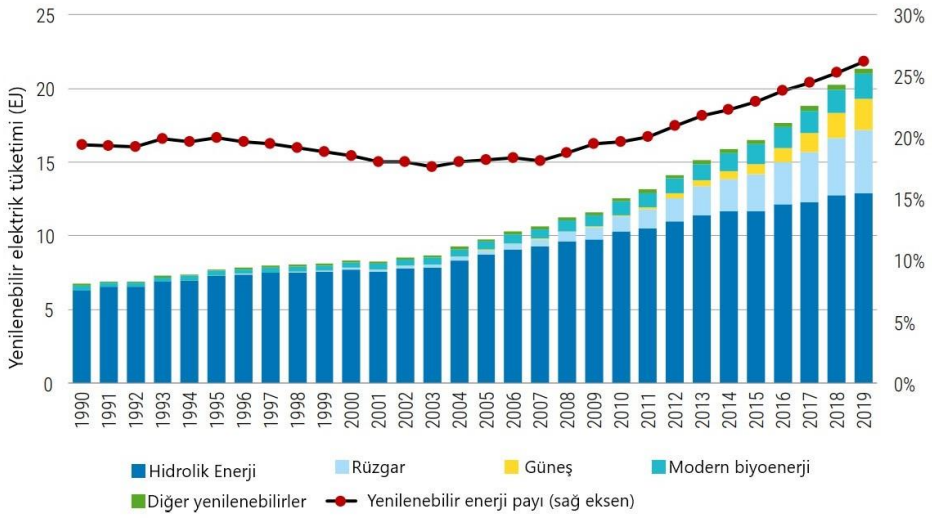


Şekil 2.4 2010-2020 yılları arasında dünya genelinde elektrik üretimi için kullanılan kaynakların oranı [21].

2.2 Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerji kaynağı doğal süreçlerden elde edilen ve sürekli olarak yenilenen enerji kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en büyük özellikleri; karbondioksit emisyonunu azaltarak çevrenin korunmasına yardımcı olması, sınırlı bir rezervi olmadığından dolayı sürdürülebilir olması ve yerli kaynaklar oldukları için enerjide dışa bağımlılığın azalmasına katkı sağlamasıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları; biyoenerji, güneş enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, okyanus enerjisi, rüzgâr enerjisi olarak çeşitlendirilmektedir.

Tarihin derinliklerinden itibaren, suyun akışıyla çalışan değirmenler ve rüzgarın gücüyle dönen yel değirmenleri gibi doğal kaynaklar sayesinde mekanik enerji ve güneş ışınlarıyla ısı enerjisi elde edilmekteydi. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, HES (Hidroelektrik Santral), RES (Rüzgar Enerji Santrali) ve güneş pilleri aracılığı ile bu yenilenebilir doğal kaynaklardan elektrik enerjisi üretilmeye başlanmıştır. Şekil 2.5'te 1990-2021 yılları arası dünya geneli yenilenebilir enerjiden üretilen elektriğin farklı kaynaklara göre kullanımı eksa joule olarak verilmiştir [22]. Ayrıca grafiğin sağ ekseni ise dünya geneli tüketilen elektriğin yenilenebilir enerji ile üretilme oranını göstermektedir. Grafiğe göre tüketimi, dolayısı ile üretimi en yüksek yenilenebilir enerji hidrolik enerjidir. 1990'lı yıllarda kullanılan elektriğin %15'inden fazlası yenilenebilir enerji ile üretilmiştir. Bu yenilenebilir enerjinin de %95'inden fazlası hidrolik enerji ile sağlanmıştır. Teknolojinin gelişmesi ile rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi ile elektrik üretimi ekonomik olmaya başlamıştır. Dolayısı ile 2000 yıllarından sonra rüzgar ve güneş enerjisine yapılan yatırımlar artmıştır.



Şekil 2.5 1990-2019 yılları arası dünya geneli yenilenebilir enerjiden üretilen elektriğin yenilenebilir enerji çeşitlerine göre tüketim miktarı (sol eksen) [EJ], dünya geneli elektrik tüketiminin yenilenebilir enerjideki payı (sağ eksen) [22].

Ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynaklarının başında hidrolik enerji gelmektedir. Şekil 2.6 (a)'da verilen grafikte ülkemizde 2022 yılında üretilen elektriğin kaynaklarına göre oranı verilmiştir [23]. Hidrolik enerji ile üretilen elektriğin oranı kömür ve doğalgazdan sonra gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde ise birinci sıradadır. Sonrasında ise sırasıyla rüzgar ve güneş enerjisi gelmektedir. Şekil 2.6 (b)'de ise 2023 yılı Haziran ayı sonu itibarıyla

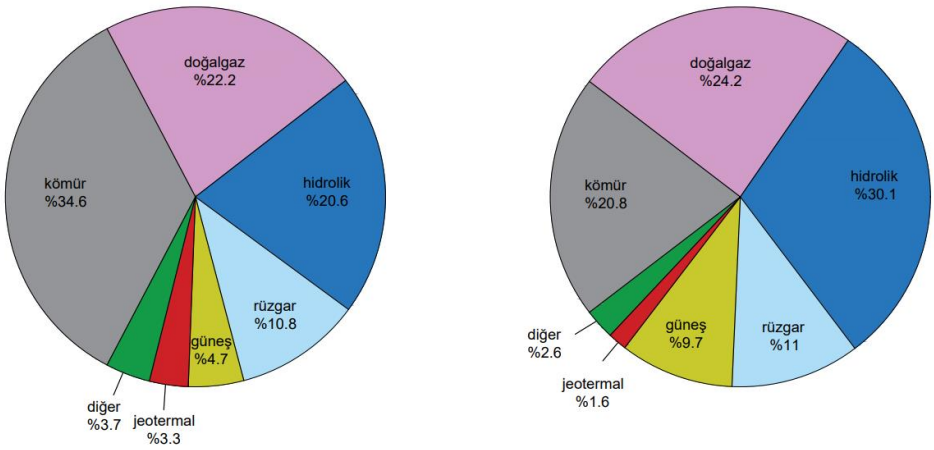
ülkemizdeki enerji tesislerinin kaynaklarına göre kurulu güçlerinin oranı verilmiştir [23]. Toplam 104904 MW kurulu gücün %30.1'i ile hidroelektrik santralleri en fazla kulu güce sahiptir. Ülkemizdeki HES kurulu gücü, RES kurulu gücü ve GES kurulu gücünün toplamından daha fazladır.

Sürdürülebilirlik kavramı en yalın hali ile; başka canlıların hayatını bugün ve gelecekte tehlikeye sokmadan üretim yapmak olarak tanımlanmaktadır. Küresel ısınmanın etkisini azaltmak amacıyla sürdürülebilir hidroelektrik enerjisi gereklidir. Hidroelektrik enerji, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir parçasıdır ve düşük karbon salımıyla enerji üretimine katkıda bulunur. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının her zaman sürdürülebilir olmadığına dikkat etmek önemlidir. Özellikle HES söz konusu olduğunda, inşaat ve işletme aşamalarında çevre ve insan sağlığına yönelik ciddi ve geri dönüşü zor etkileri ortaya çıkabilir.

Hidroelektrik yatırımlarının çevresel ve sosyoekonomik zararları, enerji üretimi faydalarını aşarsa, sürdürülebilirlikten bahsetmek zorlaşır. Özellikle suyun toplandığı nehir havzalarının ekolojik denge ve işleyişini korumak, hidroelektrik projelerinin planlanması ve uygulanmasında öncelikli hale gelmelidir. Aynı zamanda, hidroelektrik projelerinin nehir havzalarına olan etkilerini tam olarak anlamak ve değerlendirmek için detaylı araştırmalar ve analizler yapılmalıdır.

Aynı dere üzerine pek çok ardışık HES kurulumu yapılması, sadece enerji sağlamakla kalmayıp aynı zamanda ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği açısından da olumsuz etkiler doğurabilecek uygulamalara yol açabilir. Bu tür yoğun HES projeleri, suyun akışını ve sediment taşınımını etkileyerek nehir ekosistemlerini bozabilir. Bu nedenle, hidroelektrik projelerinin sürdürülebilirliği gözeterek planlanması, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve ekosistem sağlığının korunması için gereklidir.

Ülkemizde mevcut hidroelektrik planları ve projeleri genellikle sürdürülebilirlik prensiplerine uymaktan uzaktır. Bu durum, enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla yapılan yatırımların çevresel ve sosyal etkilerinin yeterince değerlendirilmediğini gösterir. Gelecekteki hidroelektrik projelerinin planlanması ve uygulanmasında daha katılımcı ve bilimsel bir yaklaşım benimsenmeli, ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği ve toplumsal faydalar gözetilmelidir.

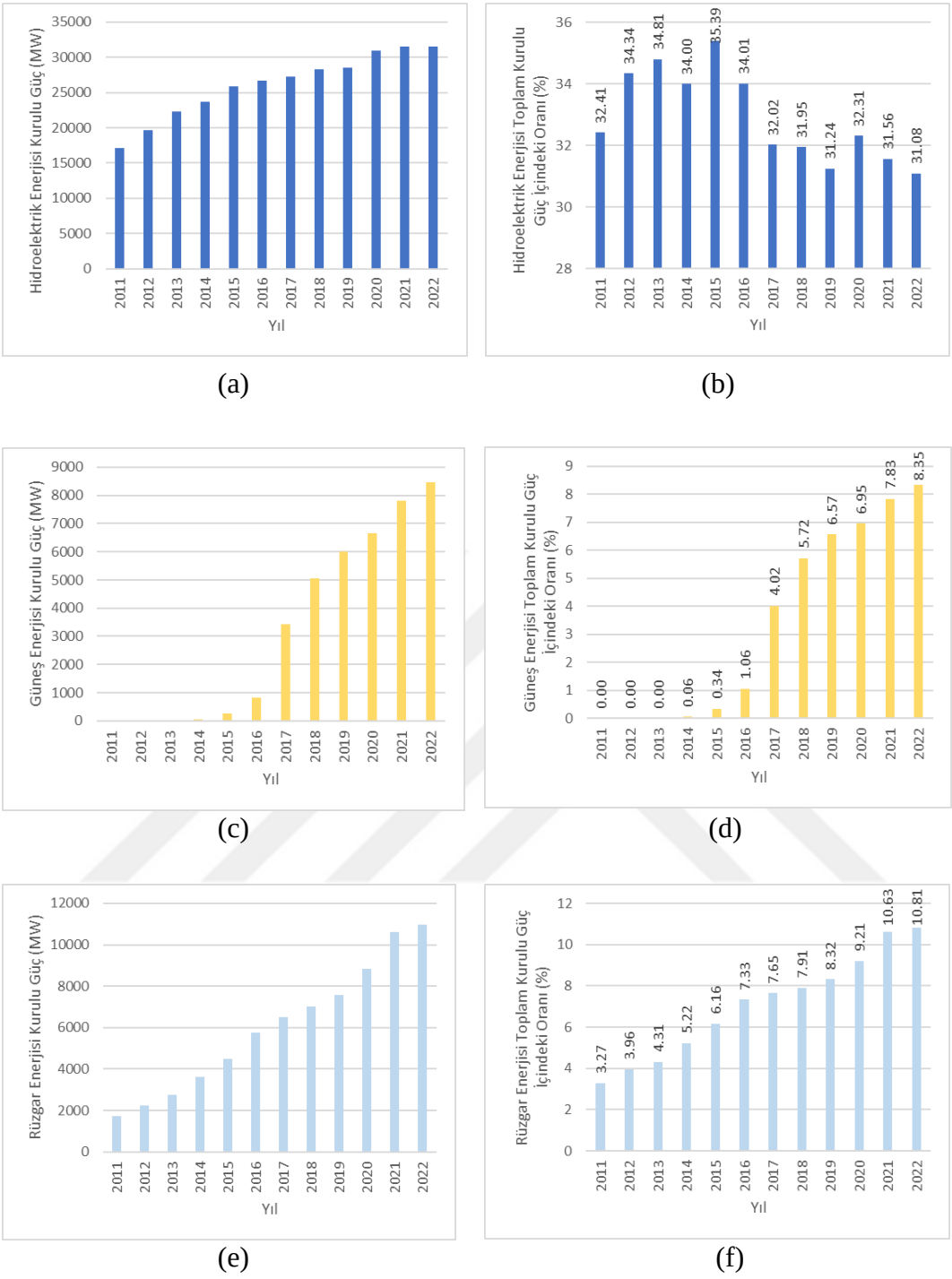


(a) (b)

Şekil 2.6 (a) 2022 yılı Türkiye geneli üretilen elektriğin kaynaklara göre oranı, (b) 2023 Haziran ayı sonu itibarıyla Türkiye geneli kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı [23].

Teknolojinin ilerlemesiyle ekonomik hale gelen rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi gibi çevre dostu alternatif enerji kaynaklarına yatırım yapılması, yalnızca sürdürülebilirlikten uzak HES projelerinin doğaya ve insan yaşamına verdiği zararları azaltmakla kalmaz, aynı zamanda enerji üretiminde tek bir kaynağa bağımlılığın riskini azaltmasında rol oynar. Bu alternatif kaynaklar, çevresel etkileri en aza indirme çabasının yanı sıra enerji portföyünde çeşitlilik sağlayarak Türkiye'nin sürdürülebilir enerji dönüşümüne önemli bir ivme kazandırabilir.

Türkiye'nin 2011-2022 yılları arası hidrolik enerji, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi kümülatif kurulu güçleri ve toplam kurulu güçteki oranları Şekil 2.7'de verilmiştir [23]. Şekle göre yenilebilir enerji kaynakları arasında kurulu gücü en yüksek olan hidrolik enerjisinin kurulu gücünün toplam kurulu güce oranı zamanla düşüş eğilimindedir. Bunun nedeni olarak rüzgar enerjisine ve özellikle son 7-8 yıldır güneş enerjisine yapılan yatırımlar gösterilebilir. Bu bağlamda Türkiye'de yenilenebilir enerjide daha çeşitli ve dengeli yatırımlar yapıldığı söylenebilir.



Şekil 2.7 2011-2022 yılları arası Türkiye'nin (a) hidroelektrik enerjisi kurulu gücü, (b) hidroelektrik enerjisi kurulu gücünün toplam kurulu güce oranı, (c) güneş enerjisi kurulu gücü, (d) güneş enerjisi kurulu gücünün toplam kurulu güce oranı, (e) rüzgar enerjisi kurulu gücü, (f) rüzgar enerjisi kurulu gücünün toplam kurulu güce oranı [23].

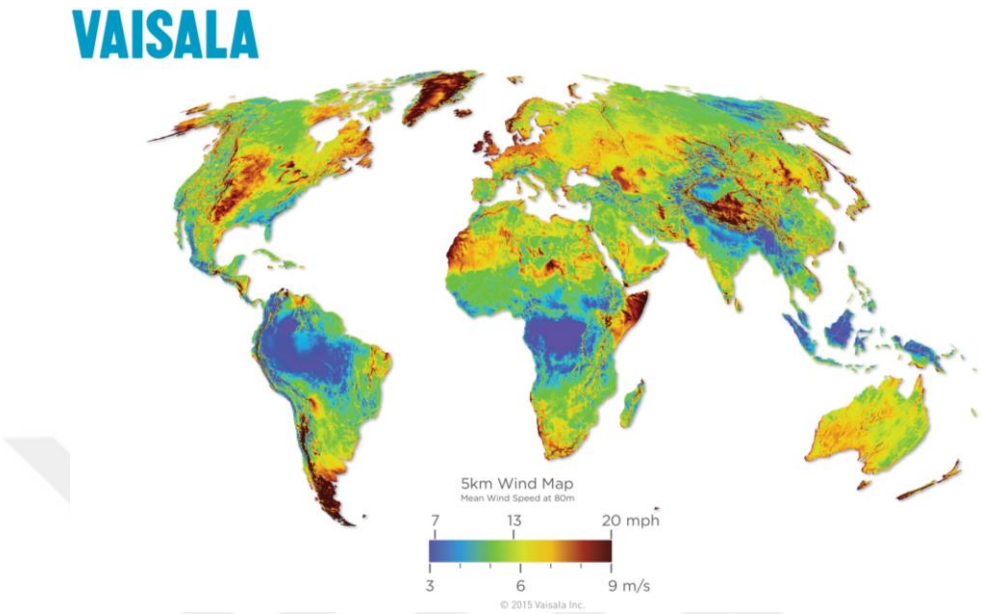
2.3 Rüzgar Enerjisi

Güneş ışınlarının Dünya'yı ısıtması, atmosferde farklı sıcaklık bölgelerinin oluşmasına neden olur. Bu farklı sıcaklık bölgeleri de yerküre üzerinde farklı basınç noktalarının meydana gelmesine yol açar. Yüksek sıcaklık, hava moleküllerinin daha hızlı hareket etmesine ve genleşmesine neden olarak alçak basınç bölgelerinin oluşmasına yol açar. Benzer şekilde, düşük sıcaklık yüksek basınç bölgelerini meydana getirir. Bu basınç farkları, doğa tarafından dengelenmeye çalışılan bir olaydır ve havanın hareketine neden olur. Havanın yüksek basınç bölgelerinden alçak basınç bölgelerine doğru hareket etmesine rüzgar denir. Havanın bu hareketi basınç farkını dengeleme eğilimindedir. Rüzgar oluşumu sırasında Coriolis etkisi de devreye girer. Dünya'nın dönme hareketi nedeniyle kuzey yarımkürede rüzgar estiği yönün sağına doğru, güney yarımkürede ise soluna doğru eğilim gösterir. Bu şekilde oluşan rüzgarlar, enerjinin taşınmasını sağlar ve bu enerji, dolaylı bir şekilde güneşin enerjisine dayanır. Yani rüzgar enerjisi, güneşin yüzeydeki ısınma etkisiyle oluşan basınç farkları sonucunda ortaya çıkar. Bu enerji kaynağı, çevre dostu ve sürdürülebilir bir seçenek sunar. Rüzgar enerjisi; elektrik üretimi, mekanik enerji yaratma ve su pompalama gibi çeşitli alanlarda kullanılır. Rüzgar tribünleri, yel değirmenleri ve rüzgar pompaları gibi teknolojiler sayesinde elde edilen enerji, evlerde, çiftliklerde ve endüstriyel alanlarda kullanılır. Özellikle rüzgar enerjisi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve karbondioksit salımını düşürme çabalarına önemli bir katkı sağlar. Bu nedenle, rüzgar enerjisi, doğal süreçlerden elde edilen temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak, sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır.

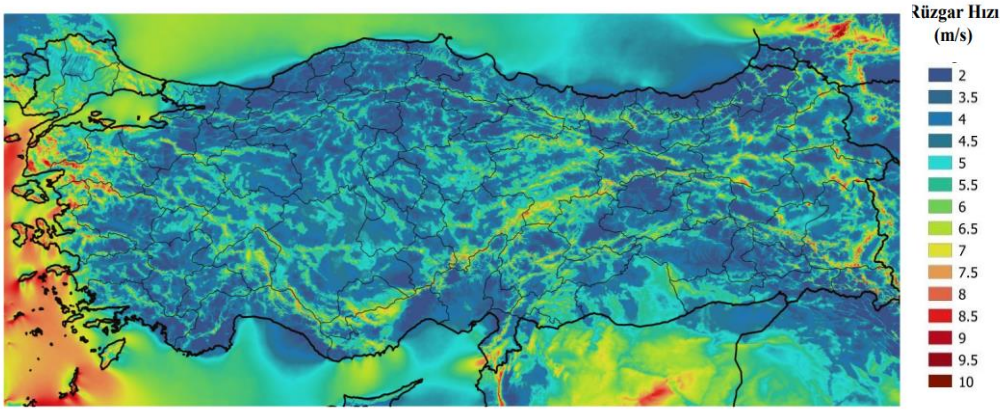
Dünyanın birçok yerinde rüzgar enerjisinden rüzgar türbinleri aracılığı ile faydalanılmaktadır. Sekil 2.8'de 5 km x 5 km ölçekli rüzgar haritası verilmiştir [24]. Latin Amerika ve Afrika'da rüzgar enerjisi potansiyelinin sınırlı olduğu görülmektedir. Batı Avrupa, Arjantin, Çin'in batısında ise yüksek rüzgar enerjisi potansiyelinin olduğu söylenebilir. Ayrıca Somali'de de yüksek rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi potansiyeli vardır fakat bu potansiyel yeterince değerlendirilememektedir.

Türkiye'deki deniz seviyesinden 100 m yükseklikteki ve 100 m x 100 m çözünürlükteki rüzgar hızları Şekil 2.9'da verilmiştir [23]. Türkiye'deki en yüksek

rüzgar hızlarının Ege Denizi'nde sonrasında ise Marmara Denizi'nde, Batı Karadeniz ve Batı Akdeniz'de görüldüğü söylenebilir. Buradan en yüksek rüzgar hızlarının karalardan ziyade denizlerde olduğu çıkarımı yapılabilir.



Şekil 2.8 5 km x 5 km çözünürlüğünde deniz seviyesinde 80 m yukarıda Dünya'daki ortalama rüzgar hızları [24].



Şekil 2.9 100 m x 100 m çözünürlüğünde deniz seviyesinden 100 m yukarıda Türkiye'deki ortalama rüzgar hızları [23].

2.4 Rüzgar Türbinleri

İnsanlar tarih boyunca rüzgarın enerjisini kullanmışlardır. Tarihsel kayıtlara göre, en eski rüzgar gücüyle çalışan makine olan yel değirmeninin bundan yaklaşık 3000 yıl önce İskenderiye yakınlarında yapıldığı düşünülmektedir. Bu erken dönem

makineleri, insanların enerji kaynaklarına olan ilgisini ve yaratıcılığını yansıtan önemli örneklerdir.

Yel değirmenleri, rüzgar enerjisinin pratik uygulamalarından biridir ve tarihsel olarak çeşitli bölgelerde kullanılmıştır. Türkler tarafından ilk defa 640 yılına doğru imal edilen yel değirmenleri, haçlı seferleri sırasında Avrupa'ya taşınmış ve burada da tanınmıştır. Özellikle 1105 yılında Fransa'da tanınmaya başlanmış ve 1143 yılında İngiltere'de ilk yel değirmeni inşa edilmiştir. Bu dönemlerde yel değirmenleri, tahıl öğütme, su pompalama gibi temel ihtiyaçları karşılamak için kullanılmıştır. Rüzgar enerjisinin tarihsel seyri, farklı kültürlerin ve toplumların enerjiye olan ihtiyacını nasıl karşılamaya çalıştığını gösterir. 19. yüzyılın sonlarına gelindiğinde, Almanya'da rüzgar türbinlerinin görünmeye başlaması, endüstriyel dönemde rüzgar enerjisinin nasıl bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Hollanda ise rüzgar enerjisinin tarih boyunca en etkili şekilde kullanıldığı bölgelerden biridir. Hollanda'nın su yönetimi ve toprak kazanımı için kullanılan rüzgar türbinleri, 18. yüzyılın başlarından itibaren kullanılmış ve bu teknolojiyle suların tahliye edilmesi ve arazilerin kurutulması sağlanmıştır (Şekil 2.10). Sonuç olarak, rüzgar enerjisinin tarihi, insanlığın enerji elde etme yolculuğunda geçirdiği evreleri ve farklı dönemlerdeki ihtiyaçları yansıtan önemli bir perspektif sunmaktadır. Bu tarihî örnekler, rüzgar enerjisinin potansiyelinin aslında uzun bir geçmişe dayandığını ve günümüzdeki modern uygulamalarının temellerini attığını göstermektedir [25].



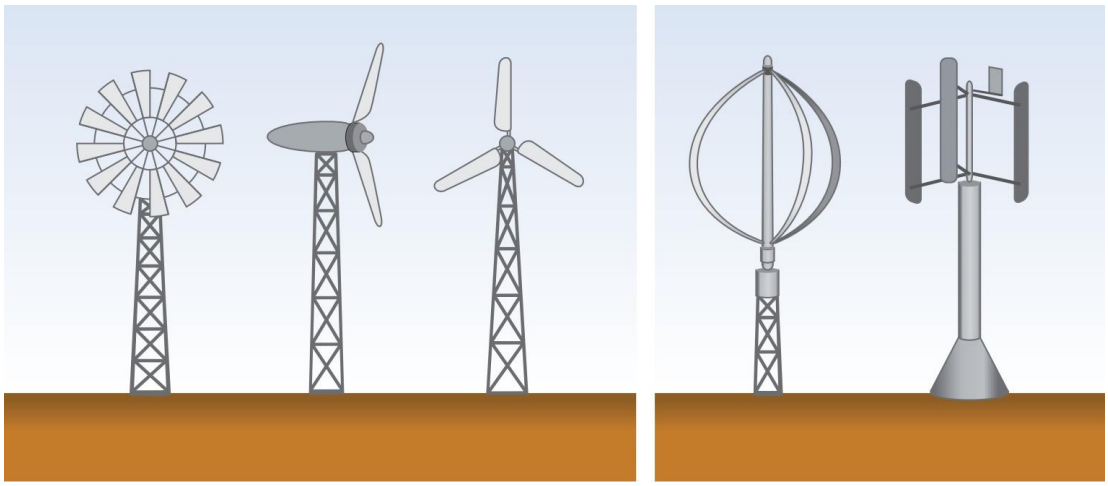
Şekil 2.10 Hollanda'da kullanılan yel değirmenleri

Ancak bu yel değirmenleri, günümüzdeki yüksek verimlilik ve teknolojik gelişmelere kıyasla daha sınırlı bir etkinliğe sahipti. Teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte, rüzgar enerjisinin potansiyeli yeniden keşfedildi ve modern rüzgar türbinleri tasarlanmaya başlandı. Elektrik üretebilen rüzgar türbinleri, özellikle 19. yüzyılın sonlarından itibaren geliştirilmeye başlandı. 1887 yılında İskoç mühendis James Blyth, bir evin aydınlatması için rüzgar enerjisini kullanarak bir jeneratör üretti [26]. Ancak ilk gerçekleştirilen ticari örnek, 1941 yılında Vermont'ta kurulan ve 1.25 megawatt gücünde olan Smith-Putnam Rüzgar Elektrik Santrali oldu [27].

1960'lı yıllardan itibaren rüzgar enerjisiyle elektrik üretimi konusunda daha fazla çalışma yapılmıştır. Bu dönemde rüzgar türbinlerinin tasarımı ve verimliliği önemli ölçüde geliştirilmiştir. 1970 ve 1980'li yıllarda dönme yönü rüzgar yönüne paralel olan yatay eksenli (horizontal axis) ve dönme yönü rüzgar yönüne dik olan dikey eksenli (vertical axis) rüzgar türbinleri incelenmiştir (Sekil 2.11). Çalışmaların sonucunda yatay eksenli rüzgar türbinleri pervane sayıları ve rüzgarın geldiği yöne doğru yerleştirilme şekilleri (öne rüzgar ve arkaya rüzgar) farklı olsa da genel olarak kabul gören tasarım olmuştur. Daha sonraki süreçlerde rüzgar türbini tasarımı büyük çoğunlukla üç pervaneli ve öne rüzgar (rüzgarın geldiği yönde pervanenin rotorun önünde kaldığı tasarım) odaklı şekilde baskın olmuştur. Rüzgar türbinleri güç açısından da farklılık gösterir. Küçük ölçekli ev tipi türbinlerden büyük rüzgar çiftliklerinde kullanılan devasa türbinlere kadar geniş bir yelpazede üretim yapılmaktadır. Küçük türbinler genellikle evlerde veya çiftliklerde ihtiyaç olan enerjiyi karşılamak için kullanılırken, büyük türbinler genellikle enerji şebekesine katkı sağlamak amacıyla kurulur. Bugünün modern rüzgar türbinleri, enerji üretiminde önemli bir rol oynamak üzere 2 megawatt'tan 18 megawatt'a kadar güç üretebilmektedir.

1980'lerden itibaren rüzgar enerjisi, birçok ülkenin enerji politikalarında önemli bir yere sahiptir. Gelişen tasarım ve teknoloji sayesinde rüzgar enerjisi daha geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Rüzgar türbinleri, açık denizlerden çöllere kadar geniş bir yelpazede temiz ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle rüzgar enerjisi, geçmişten günümüze insanlığın enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir adım olarak kabul edilmektedir.

Türkiye'de rüzgar enerjisi alanındaki ilk bilimsel çalışmalar, 1960'lı yıllarda Ankara Üniversitesi, 1970'lerde ise Ege Üniversitesi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde rüzgar enerjisinin potansiyeli ve kullanımıyla ilgili temel araştırmalar yapılmıştır. Ancak rüzgar enerjisinin ticari anlamda değerlendirilmesi ve yaygınlaştırılması daha sonraki yıllarda gerçekleştirilmiştir. 1981 yılından sonra ise Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), rüzgar enerjisi konusunda önemli çalışmalar yürümüştür ve 1989 yılında bu kuruluş bünyesinde Rüzgar Enerjisi Şube Müdürlüğü kurulmuştur. Bu adım, rüzgar enerjisinin Türkiye'deki potansiyelinin fark edildiğinin ve enerji üretimindeki rolünün önemsendiğinin bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Bu süreçte, Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelini daha ayrıntılı şekilde belirlemek amacıyla çalışmalar başlatılmıştır. 1992 yılında, Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (AREB) Türkiye Şubesi açılmıştır ve bu sayede Türkiye, uluslararası arenada rüzgar enerjisi alanındaki gelişmeleri takip etme ve işbirliği yapma fırsatı bulmuştur. Aynı şekilde, 1993 yılında Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından rüzgar enerjisi potansiyelinin daha detaylı bir şekilde belirlenmesi için çalışmalara başlanmış ve 43 meteoroloji istasyonunun rüzgar değerleri, topografik veriler ve diğer parametrelerle birleştirilerek Türkiye Rüzgar Atlası oluşturulmuştur (Şekil 2.9), [28].

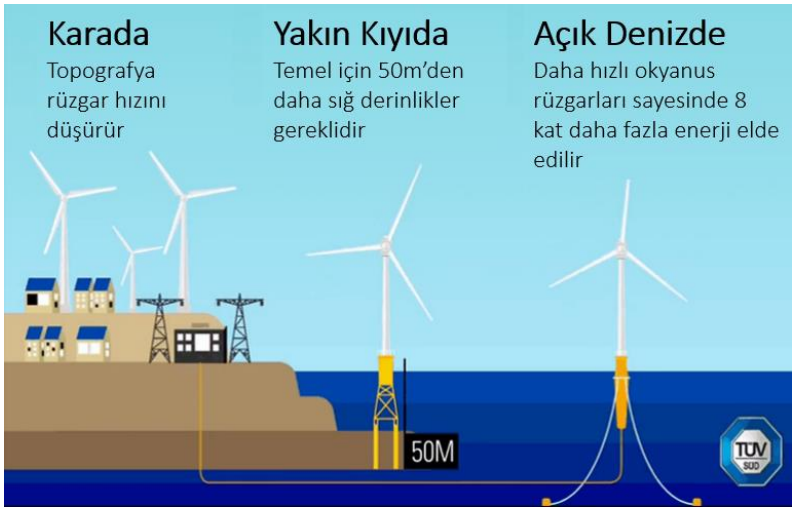


Şekil 2.11 Yatay eksenli rüzgar türbinleri (sol), dikey eksenli rüzgar türbinleri (sağ).

Günümüzde rüzgar türbinlerinin kullanım yerine göre iki farklı türü vardır. Bu türler, karadaki rüzgar türbinleri (onshore wind turbines) ve deniz üstü rüzgar türbinleri (offshore wind turbines) olarak adlandırılır. Deniz üstü rüzgar türbinleri, karadaki türbinlere kıyasla daha yeni bir teknoloji olup, bir dizi avantaja sahiptir.

Karadaki rüzgar türbinlerinin kurulum yerleri, yerleşim bölgelerindeki yapılar ve topografyanın etkisi nedeniyle sınırlı ve düzensiz rüzgar hızlarına sahiptir. Oysaki açık denizde, kararlı ve daha yüksek rüzgar potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 2.12). Bu da deniz üstü rüzgar türbinlerinin daha verimli bir şekilde enerji üretmesine olanak sağlar. Açık denizdeki geniş alanlar, daha büyük boyutlardaki türbinlerin kurulumunu mümkün kılarak enerji üretim kapasitesini artırır. Açık denizde türbinlerin konumlandırılması, kıyı bölgelerindeki yapılar ve yerleşimlerin etkisinden kaçınmayı sağlar. Bu da hem insan yerleşimleri hem de doğal alanlar üzerindeki olumsuz etkiyi minimize eder. Sürdürülebilir enerji üretimi ile çevresel etkiler arasında bir denge kurulmasını sağlar.

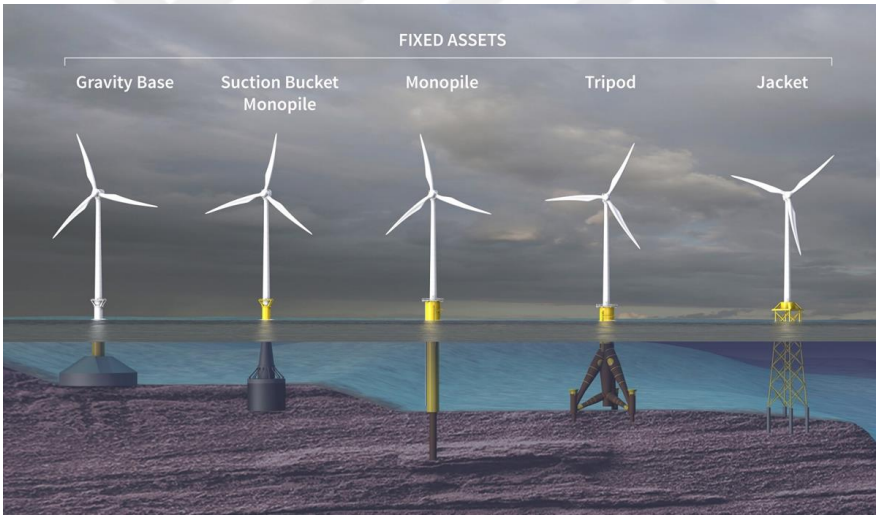
Denizlerdeki rüzgar enerjisi potansiyelinin maksimize edilmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir adım olarak kabul edilir. Bu yöntem, rüzgar enerjisinin çevresel etkilerini azaltarak, temiz ve yenilenebilir enerji kaynağının kullanımını teşvik eder. Aynı zamanda enerji üretim kapasitesini artırarak, gelecekteki enerji ihtiyaçlarının karşılanmasına katkıda bulunur.



Şekil 2.12 Kara ve deniz üstü rüzgar türbinleri.

2.5 Yüzer Rüzgar Türbinleri

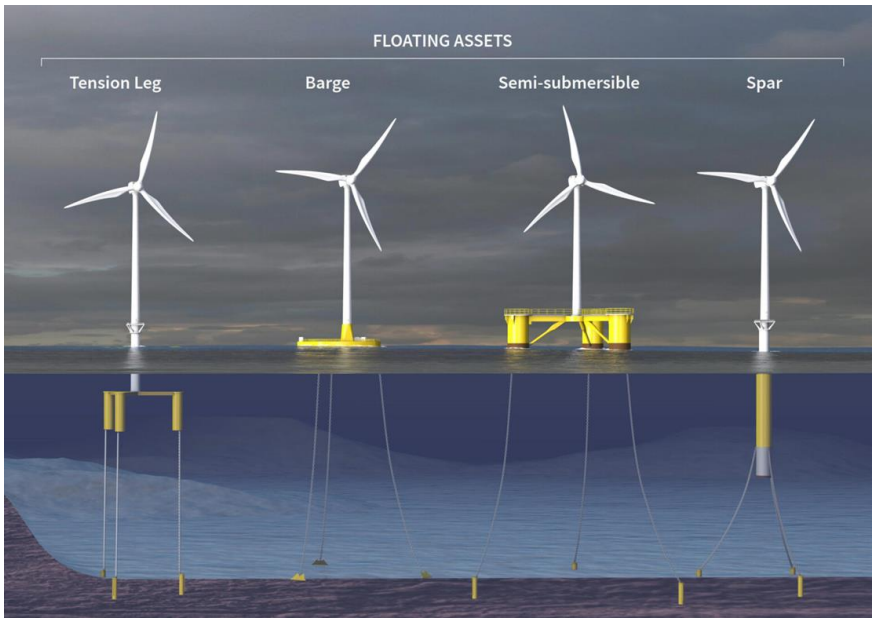
Deniz üstü rüzgar türbinleri de kendi içinde ikiye ayrılır. Deniz üstünde imal edilen ilk rüzgar türbinleri yakın kıyılarda, sonraki örneklerine görece sığ sularda kurulan sabit temelli tipindeki deniz üstü rüzgar türbinidir. Bu sabit temelli deniz üstü rüzgar türbinleri uygulama bölgesinin çevresel şartlarına göre Şekil 2.13'te görülen farklı temel tiplerine sahiptir. Diğeri ise son 10-15 yıldır popüler olan açık deniz yüzer rüzgar türbinidir. Açık denizdeki rüzgar potansiyelinin daha yüksek olmasından dolayı bu bölgelere kurulacak rüzgar türbini arayışı önemlidir. Açık denizde su derinlikleri fazla olduğu için bu bölgelere sabit temelli rüzgar türbininin inşa edilmesi ekonomik olmamaktadır. Açık denizlerdeki yüksek rüzgar potansiyelinden ve geniş alanlardan faydalanabilmek için yüzer platform üstüne inşa edilmiş rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.13 Yakın kıyı deniz üstü rüzgar türbinleri temel çeşitleri [29].

Açık deniz yüzer rüzgar türbinleri (Floating offshore wind turbine: FOWT) platformları stabilite sağlama mekanizmalarına göre üç farklı ve bir hibrit olmak üzere dört tipe ayrılır (Şekil 2.14). Şekil 2.15'teki stabilite üçgeninde de görüldüğü gibi SPAR (Single Point Anchorage) tipi platforma sahip rüzgar türbini stabilitesini derin balast ile sağlamaktadır. SPAR tipi şamandıra tek bir uzun silindirden oluşur ve su kesim alanı çok düşüktür. Silindirin taban kısmına eklenen balast sayesinde ağırlık merkezi aşağı çekilerek baş-kıç vurma, yalpa gibi hareketlere karşı stabilite sağlanır. Gevşek veya gergin halatla bağlanarak platformun ötelenmesi önlenir. 70-

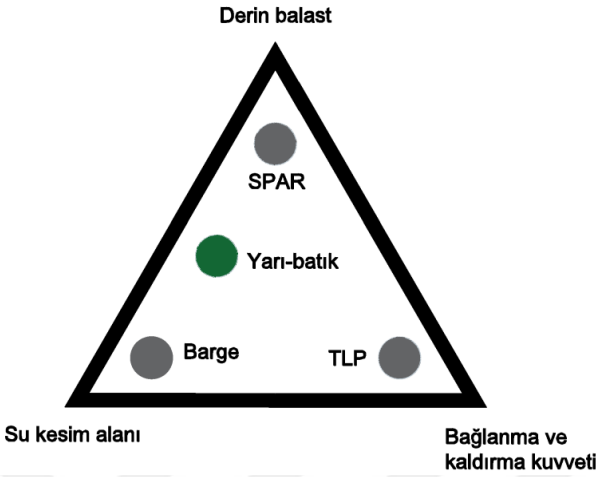
90 m aralığında su çekimine sahiptir ve 100 m'den daha yüksek derinlikler için uygundur. Barge (mavna) tipi rüzgar türbini ise stabilitesini su kesim alanı yani kaldırma kuvveti ile sağlar. Genellikle 10-15 m aralığında su çekimine sahiptir ve 30 m ve daha derinlerde kurulur. Deniz tabanına gevşek halatlar ile bağlanır. TLP (Tension Leg Platform) ise stabilitesinin büyük kısmı genellikle bağlanma kuvvetinden yani deniz tabanına bağlandığı gergin halatlar ile sağlar. TLP büyük bir batık hacme sahiptir ve şamandıra üzerinde yüksek derecede kaldırma kuvveti vardır. Bağlı olduğu gergin tendon ile stabilitesini sağlamaktadır. Diğer platforma göre daha rijit bir yapıya sahiptir. Gergin tendonlar sayesinde dönme ve öteleme hareketlerinin büyük bir kısmı engellenir. Dolayısı ile tendonlarda çok fazla yük binmektedir. Derinliğe bağlı olarak tendon uzunlukları artmaktadır bu da türbinin kurulum maliyetini yükseltmektedir. 50 m'den daha yüksek derinliklerde uygulanabilir ve 20-35 m su çekimine sahiptir. Semi-submersible (yarı batık) tipindeki rüzgar türbini ise hibrit bir türdür. SPAR ile karşılaştırdığında draftı düşüktür. Stabilitesini birbirine ponton veya borular ile bağlanan geniş kolonların su kesimi ile sağar. Esnek halatlar ile deniz tabanına bağlıdır. 40 m'den daha yüksek derinliklerde kullanılır ve 15-25 m drafta sahiptir. En çok kullanılan yüzer rüzgar türbini tipidir.



Şekil 2.14 Yüzer rüzgar türbini çeşitleri [29].

İlk yüzen rüzgar türbini uygulaması 2007 yılında yapılmıştır. İlk büyük kapasiteli uygulama Simens tarafından 2009 yılında Kuzey Denizi'nde gerçekleştirilmiştir.

2011 yılında ise Portekiz'in 5 km açıklarında şekil 2.15'te görülen ikinci büyük kapasiteli ve dünyanın ilk yarı-batık tipindeki 2 MW kapasiteli yüzen rüzgar türbini kurulumu yapılmıştır.

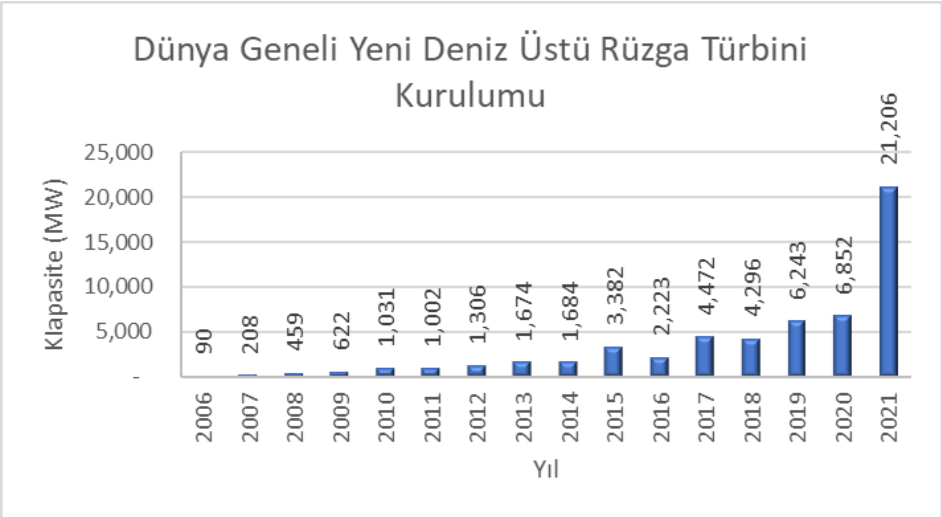


Şekil 2.15 Yüzer rüzgar türbinleri stabilite üçgeni [30].



Şekil 2.16 2MW kapasiteli yarı batık tipinde yüzer rüzgar türbini Agucadoura, Portekiz

Dünya geneli özellikle son yıllarda yüzen rüzgar türbini yatırımlarına ilgi yüksektir. Şekil 2.17'de 2006-2021 yılları arası Dünya deniz üstü rüzgar türbinleri kurulu gücü MW olarak verilmiştir. Grafiği göre rüzgar üstü rüzgar türbinlerinin kurulu gücünün ivmeli bir şekilde arttığı görülmüştür. Özellikle 2020-2021 yılarında kurulu güç 7 kat artarak bir sıçrama yapmıştır [31].

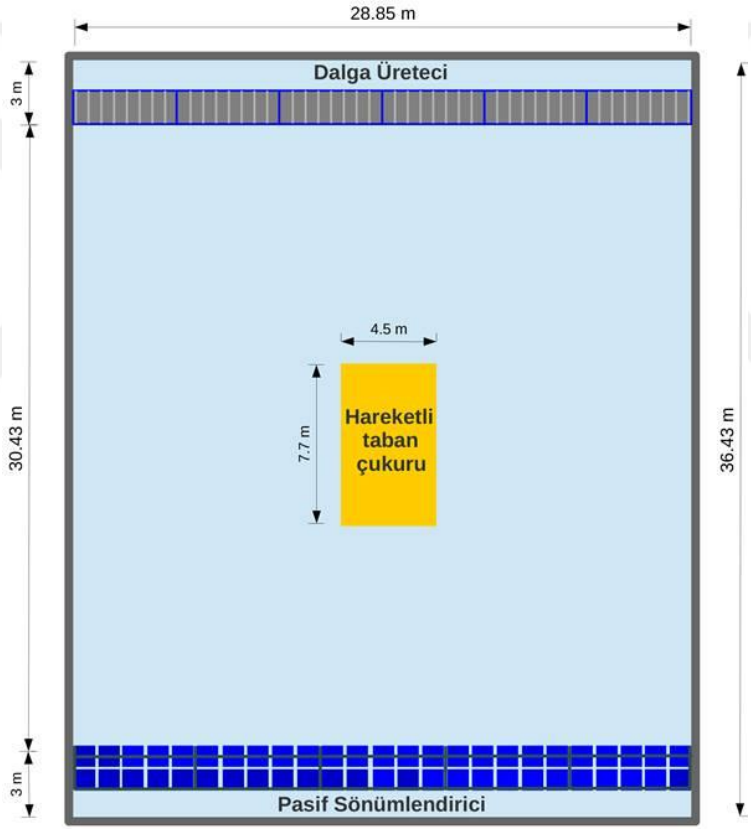


Şekil 2.17 2006-2021 yılları arası dünyadaki deniz üstü rüzgar türbini kurulu güçleri [31].

3
DENEY SİSTEMİ

3.1 Dalga Baseni

Deneyler Yıldız Teknik Üniversitesi "Hidrodinamik Araştırma Laboratuvarında" kurulu bulunan 30.43m uzunluğunda 28.85m genişliğinde ve 2.20m derinliğindeki dalga baseninde (Şekil 3.1 ve 3.2) de yapılmıştır.



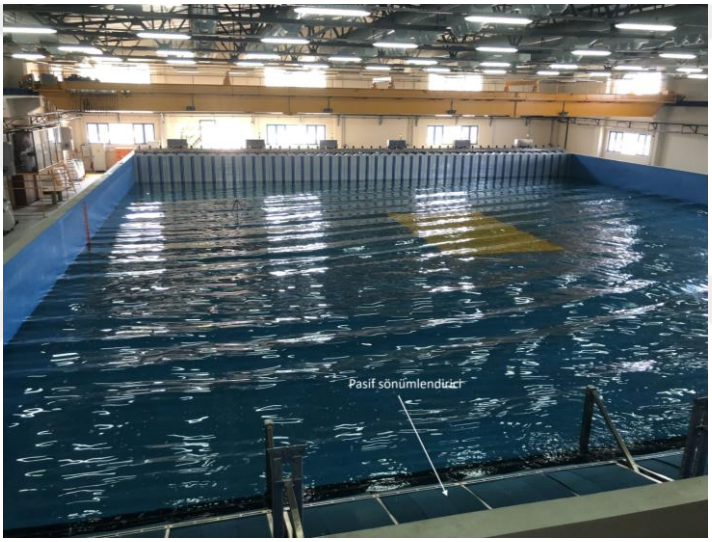
Şekil 3.1 Dalga Baseni

Dalga baseni, çok yönlü dalga üretebilen HR Wallingford tarafından tasarımı yapılan 48 pedallı piston tipi dalga üreteci ile donatılmıştır. Dalga üreteci düzenli, düzensiz uzun ve kısa kretli (yönsel) dalga üretebilecek niteliktedir. Dalga üreteci yansıyan dalga enerjisini sönümlendirmek için aktif yansıma sönümlendirme özelliğine sahiptir. Piston tipi düzenli/düzensiz yönsel dalga üretecinin toplam

uzunluğu 28.80 m dir, ve her biri 4.8 m uzunluğunda olan 6 adet modüler ünite bulunmaktadır. Her bir dalga üreteci modülün de 8 adet 60 cm genişlikli palet yer almaktadır (maksimum stroke:3.35 m).

Aktif yansıma sönümlendirme fonksiyonunun yanı sıra su derinliğine göre ayarlanabilir pasif sönümlendirici de bulunmaktadır. Derinliğe göre ayarlanabilen parabolik tipte pasif dalga sönümlendirme sistemi dalga üretecinin karşı kıyısında yer almaktadır.

Dalga üreteci JONSWAP, Pierson-Moskowitz, Bretschneider, ITTC, Darbyshire kıyı ve açık deniz, Neumann, BTTP, Pink tipi spektrumlar üretilebilme kabiliyetine sahiptir.

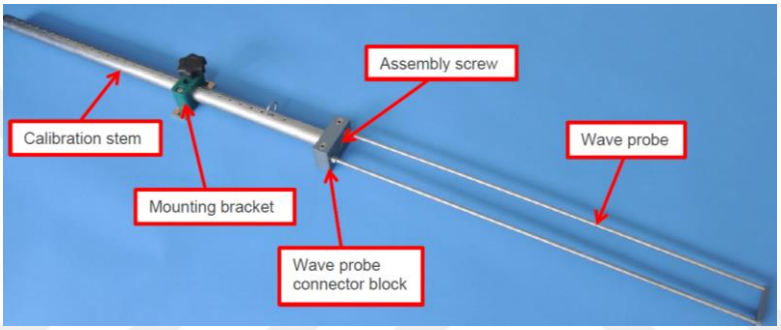


Şekil 3.2 Dalga baseni genel görünüm

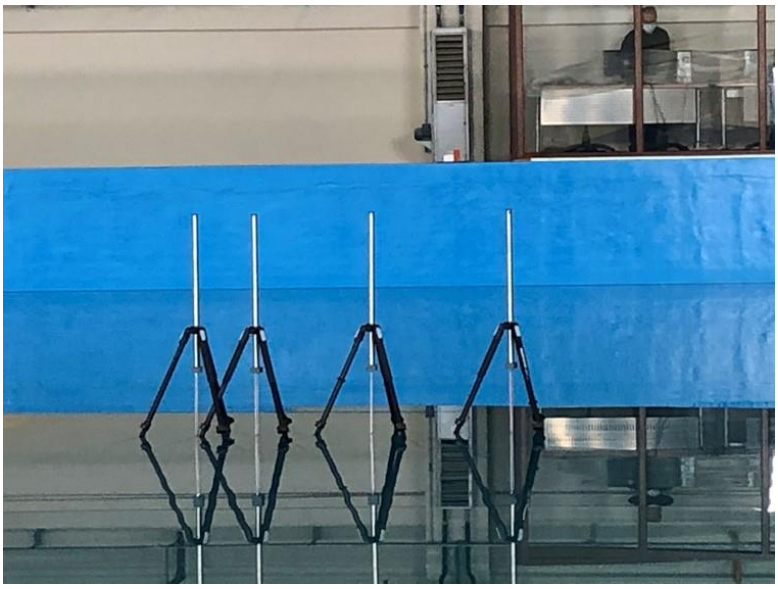
Dalga ölçümleri HR Wallingford AAK2150-RT024-R01-00 model EtherCat wave prob sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.3 ve 3.4). Dalga probları tripoda yerleştirilerek basen içine konumlandırılmıştır (Şekil 3.5). Ölçülen dalga HR DAQ yazılımı ile analiz edilmiştir.



Şekil 3.3 EtherCat dalga prob sistemi



Şekil 3.4 Dalga probu



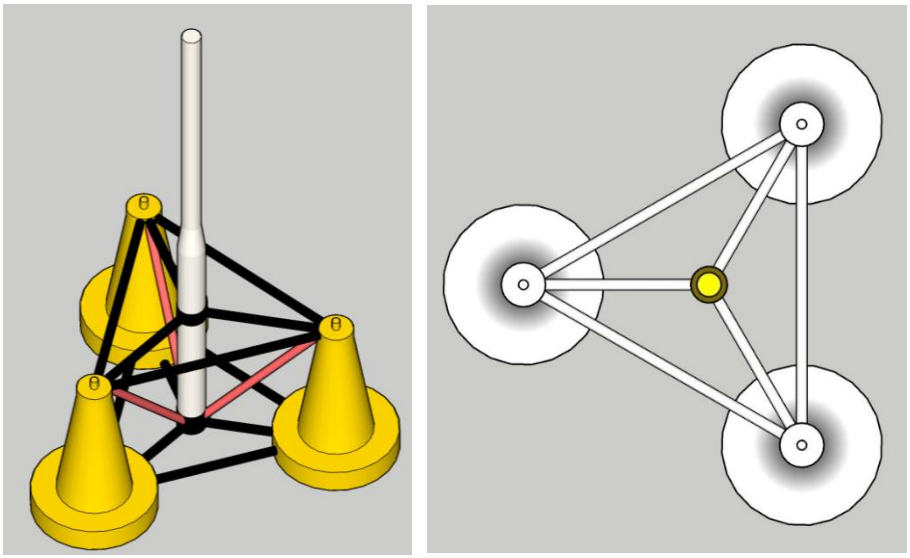
Şekil 3.5 Dalga problarının basen içinde konumlandırılması

3.2 Model Yüzer Rüzgar Türbini

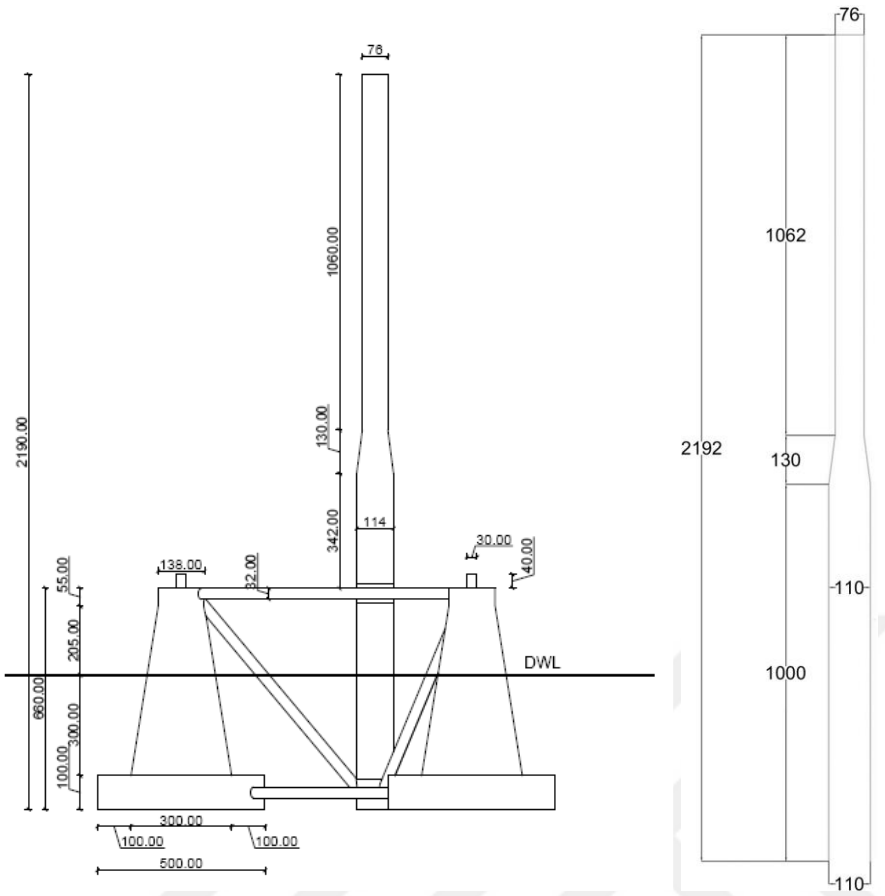
Şekil 3.6'da görülen yüzer rüzgar türbin modeli yarı batık (semi-submersible) ve tabana üç noktadan bağlanan bir tip dir. Model ölçeği 1:50 seçilmiştir. Model boyutları Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9'da gösterilmiştir.



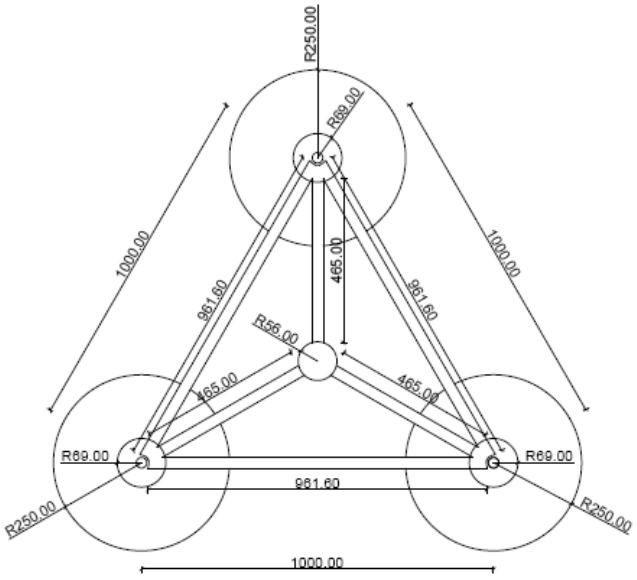
Şekil 3.6 1:50 ölçekli model yüzer rüzgâr türbini görünümü



Şekil 3.7 1:50 ölçekli yüzer rüzgâr türbini



Şekil 3.8 Model rüzgâr türbini planı



Şekil 3.9 Model rüzgâr türbini kesiti

3.3 Ölçüm Sistemleri

Dalga baseninde yüzer platformun altı serbestlik derecesi ve bağlama halatlarına gelen kuvvetler ölçülmüştür. Ölçüm işlemlerinde kullanılan istemler;

1-IMU (inertial measurement unit); Yüzer modelin dönüklük modlarının (yaw, pitch ve roll) ölçülmesini sağlamaktadır.

2-Kamera; Yüzer modelin lineer hareketleri (surge, sway ve heave) ölçülmüştür.

3-Load Cell (3 adet); Yüzer modelin bağlantı sistemlerine gelen kuvvetler ölçülmüştür.

4-Data loggers (IMC brand); Veri toplama sistemi, load cell'lerden gelen verileri analiz etmektedir.

5-Dalga Probu; Üretilen dalgaların ölçümünü sağlamaktadır.

6-Rüzgar üreteci; Yüzer platformun üzerine etkili rüzgar kuvvetinin sağlayan sistemdir.

3.3.1 IMU

IMU sistemi bileşenleri temin edilerek, 500Hz e kadar seçilebilen aralıklarla roll, pitch ve yaw açıklarının belirleneceği ve kaydedileceği sistem proje araştırmacıları tarafından oluşturulmuştur. Bu amaçla Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de verilen UM7 sensörü ile Razor 9DOF IMU sensörleri kullanılmıştır.



(a) (b)

Şekil 3.10 UM7 sensörü: (a) genel görünüm, (b) UM7 yönlendirme sensörü



Şekil 3.11 9DOF Razor IMU sensörü

Şekil 3.10 ve Şekil 11'de verilen sensörlerde 3 eksenli ivme ölçer, 3 eksenli manyetometre ve 3 eksenli jiroskop alıcıları bulunmaktadır. Bunlarda alınan verilere uygulanan Kalman Filtreleme ile Euler açılarına (roll, pitch, yaw) dönüştürülmesi için, Rapberry Pi panel bilgisayarı kullanılmıştır (Şekil 3.12).



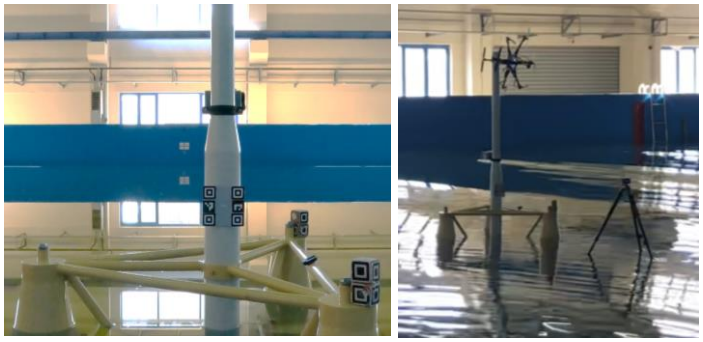
Şekil 3.12 Raspberry Pi Panel Bilgisayar

Raspberry Pi bilgisayar üzerinde sensörlerden alınan verilerden Euler açılarının hesaplanması ve kaydedilmesi için Python programlama dilinde bir program hazırlanmıştır. Ayrıca sistemin doğrudan elektrik şebekesinden bağlantı ihtiyacını ortadan kaldırmak için harici bir power bank ile desteklenmesi, bu sayede herhangi bir kablo bağlantısına gerek olmadan kesintisiz çalışması sağlanmıştır. IMU sistemi ile yüzer modelin 500 Hz kayıt aralığına kadar dönüklüklerinin belirlenmesi ve kaydedilmesi sağlanabilmektedir.

3.3.2 Kamera

Yüzer modelin doğrusal hareket modlarının belirlenmesi için ayrıca görüntü işleme algoritmaları da kullanılmıştır. Üzerinde makerlar olan levha modele monte edilmiş ve modelin karşısına üzerine kamera monte edilmiş tripod yerleştirilmiştir (Şekil 3.13). Deneyler sırasında video kayıtları alınmıştır. Daha sonra alınan bu kayıtlar görüntü işleme yöntemi ile analiz edilmiş, modelin doğrusal hareket modları

belirlenmiştir. Görüntü işleme için kullanılan yöntem Bölüm 3.6'da detaylı olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.13 Kamera sistemi

3.3.3 Rüzgar Üretim Sistemi

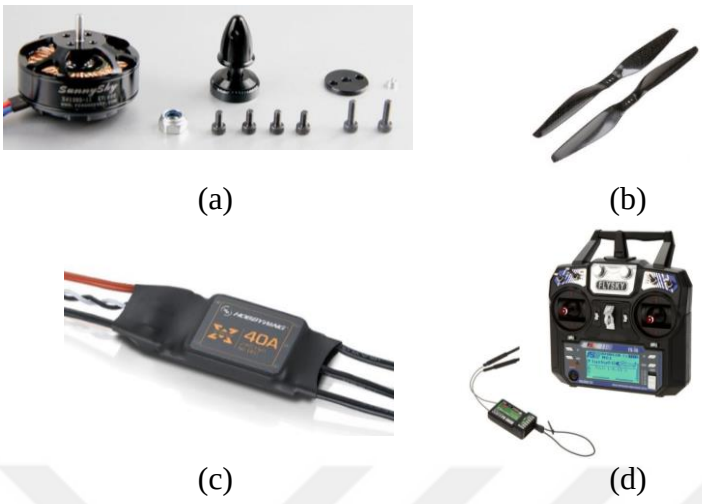
Yüzer platform üzerinde etkili rüzgar kuvvetinin sağlanması amacıyla bir drone modeli üretilmiştir. Üretilen drone modeli ile yüzer platform üzerinde uzaktan kumanda ile planlanan rüzgar kuvvetlerinin üretilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla 6 pervaneli bir drone gövdesi kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 6 pervaneli rüzgar üretim sistemi genel görünüm

Yüzer platformun boyutları ve ağırlığı dikkate alındığında, platform üzerinde etkili olabilecek rüzgar kuvvetlerinin ancak 6 pervaneli bir drone modeli ile üretilebileceği belirlenmiştir. Şekil 3.15'te verilen gövde ile yeterli gücü sağlayacak 6 adet fırçasız motor kullanılmıştır. Yeterli kuvveti sağlaması için 6 adet Sunnysky X4108S 380kv fırçasız motor, 1355 karbon fiber pervane, 40A, 6S fırçasız motor kullanılmıştır. Yeterli kuvveti sağlaması için 6 adet Sunnysky X4108S 380kv fırçasız motor (Şekil 3.15), 1355 karbon fiber pervane (Şekil 3.16), 40A, 6S fırçasız motor sürücü (Şekil 3.17), 6 kanal 2.4ghz kumanda (Şekil 3.18) ve lipo batarya, uçuş kontrol kartı gibi diğer ekipmanlar kullanılmıştır.

Drone modeli yüzer platform üzerine monte edilerek platform üzerinde gerekli rüzgar kuvvetlerinin istenilen yönde ve şiddette üretilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.15 Drone parçaları; (a) Sunnysky X4108S 380kv fırçasız motor, (b) 1355 karbon fiber pervane, (c) 40A, 6S fırçasız motor sürücü, (d) 6 kanal 2.4ghz kumanda.

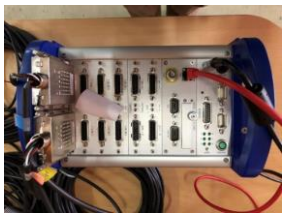
3.3.4 Load Cell

Load cell yüzer şamandıranın havuz tabanına olan bağlantı sitemine gelen kuvvetlerin ölçülmesi için kullanılmıştır (Şekil 3.16). Üç ayaklı yarı batık şamandırada her şamandıra tabana bağlanmıştır (Şekil 3.18). 120° açıyla yerleştirilen bağlantıların her birinde bir load cell bağlanmıştır. Load cell'den gelen sinyaller laboratuvarda mevcut data logger'a aktarılmıştır. Data logger ise bilgisayara bağlanmış ve veriler değerlendirilmiştir.

Load cell sistemi öncelikle bilinen ağırlıklar kullanılarak kalibre edilmiştir. Biri yedek olmak üzere dört ayrı load cell kullanılmıştır. Kalibrasyon grafikleri Şekil 3.17'de verilmiştir, Şekillerden görüldüğü gibi ölçümler yeterince uyumludur.



(a)

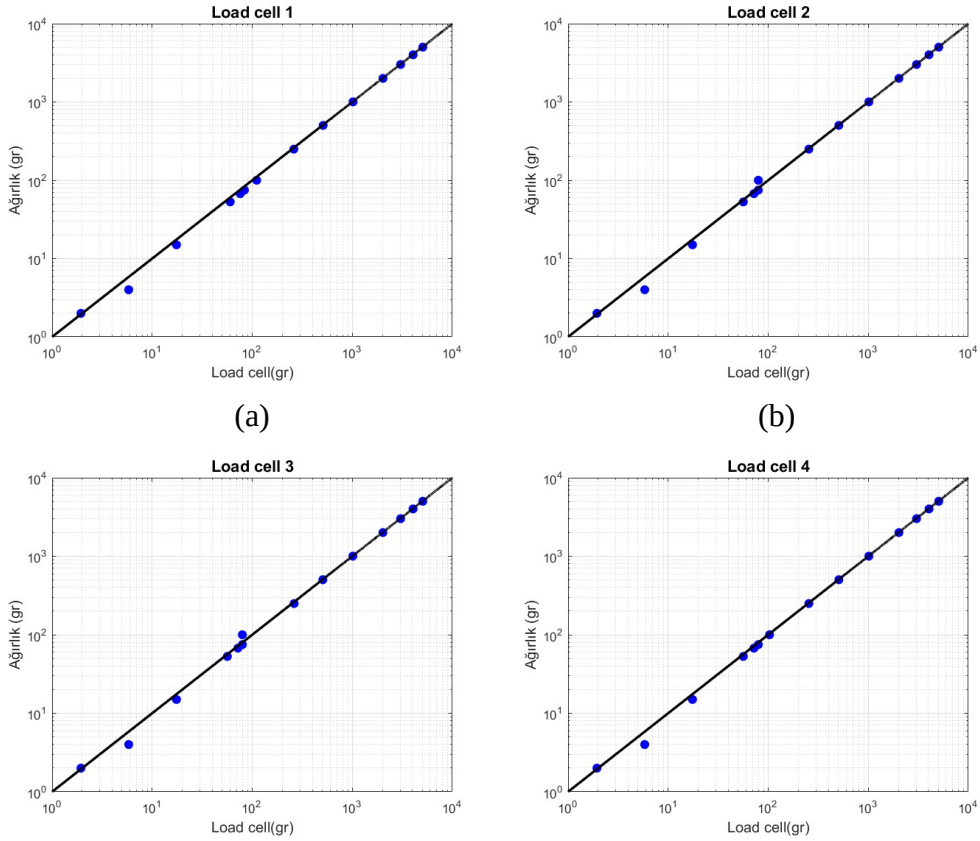


(b)



(c)

Şekil 3.16 Load cell sistemi; (a) Load cell, (b) veri toplama sistemi, (c) veri toplama sistemi ve bilgisayar.

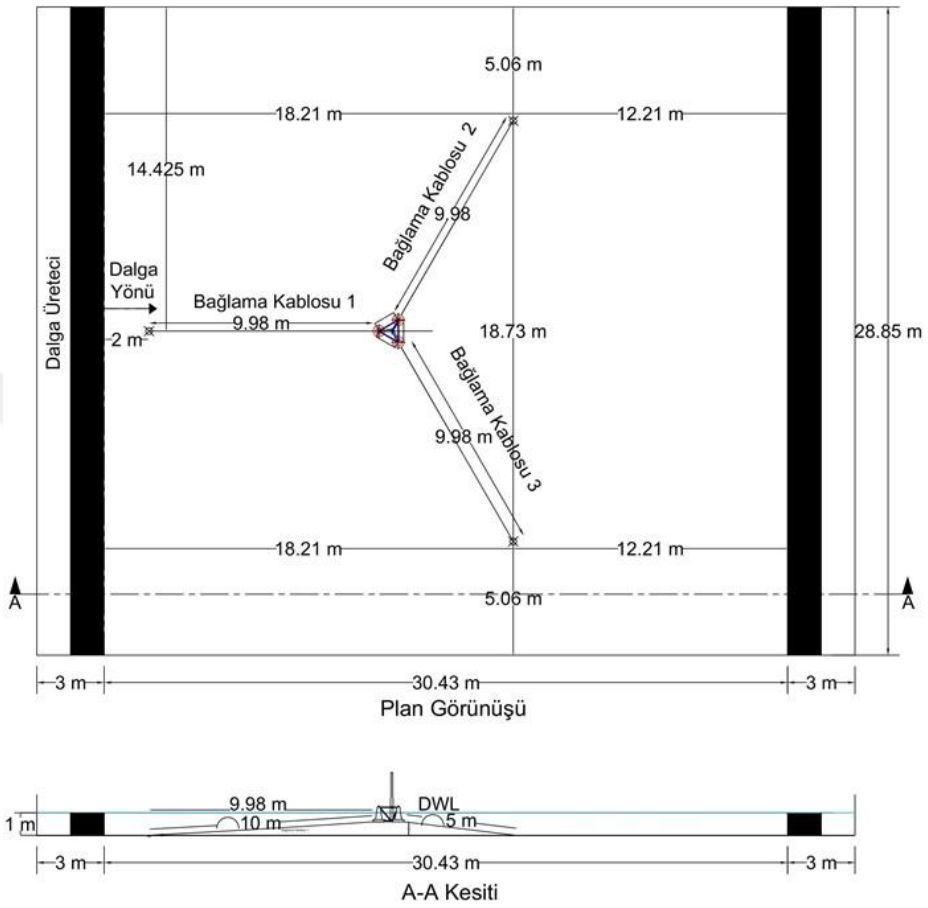


(a) (b)

(c) (d)

Şekil 3.17 Load cell kalibrasyon grafikleri (a) load cell 1, (b) load cell 2, (c) load cell 3, (d) load cell 4.

Load cell sistemi yüzer türbinin üç ayrı noktasından simetrik biçimde 120° açı yapacak biçimde paslanmaz bağlantı sistemi ile havuz tabanına sabitlenmiştir. Yerleşim planı Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18 Yüzer türbinin bağlanma şeması.

3.4 Fiziksel Model ve Deney Koşulları

Çalışmada izlenecek yöntem aşağıda sıralanmıştır;

1-Sırf dalga halinde şamandıranın stabil yüzme durumu; İşlek vd. (2022) tarafından 40 yıllık rüzgar verisi analiz edilerek gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen dalga iklimi kullanılarak, Batı Karadeniz'e ait ortalama belirgin dalga yüksekliği, maksimum dalga yüksekliği (farklı yineleme dönemleri için; 1, 10, 20 ve 50 yıl) için türbinin yüzme durumunda yaptığı hareketler ölçülecektir [15].

2-Sırf rüzgar halinde şamandıranın stabil yüzme durumu; İşlek vd. (2020) 40 yıllık rüzgar veri analiz edilerek gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen ortalama ve farklı yineleme dönemlerine ait ekstrem rüzgar koşulları modellenerek şamandıranın sakin su koşullarındaki yapacağı hareketler ölçülecektir [14].

3-Rüzgar ve dalga koşulları birlikte şamandıranın yüzme durumu; Birinci ve ikinci adımlardaki rüzgar ve dalga koşullarının kombinasyonu modellenerek şamandıranın yapacağı hareketler ölçülecektir.

Çalışmada Froude ölçek kanunu kullanılmıştır. Model ölçeği 1:50'dir. Tüm deneyler prototipte 50 m derinliğe karşılık gelen 1 m model su derinliğinde gerçekleştirilecektir. Ölçek oranları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Yüzer rüzgar türbini modeli testi için belirlenen ölçek oranları.

Parametre	**Birim(s)**	**Ölçek Oranı**
Uzunluk (ör. yer değiştirme, dalga yüksekliği ve boyu)	L	λ
Alan	L^2	λ^2
Hacim	L^3	λ^3
Özgül kütle	M/L^3	1
Kütle	M	λ^3
Zaman (ör. dalga periyodu)	T	$\lambda^{0.5}$
Frekans (ör. rotor dönme hızı, yapısal)	T^{-1}	$\lambda^{-0.5}$
Hız (ör. rüzgar hızı, dalga yayılma hızı)	LT^{-1}	$\lambda^{0.5}$
İvme	LT^{-2}	1
Kuvvet (ör. rüzgar, dalga, yapısal)	MLT^{-2}	λ^3
Moment (ör. yapısal, rotor dönme momenti)	ML^2T^{-2}	λ^4
Güç	ML^2T^{-3}	$\lambda^{3.5}$
Gerilme	$ML^{-1}T^{-2}$	λ
Kütle Eylemsizlik (Atalet) Momenti	ML^2	λ^5
Alan Eylemsizlik (Atalaet) Momenti	L^4	λ^4

Islek (2020) tarafından (30° E; 41.6° N) proje alanında belirlenen rüzgar ve dalga uzun dönem dalga istatistiği verileri kullanılarak, model ölçeğine Froude benzeşimi

kullanılarak geçilmiş ve deneylerde kullanılacak rüzgar ve dalga koşulları Tablo 3.2 ve 3.3'de verilmiştir [14], [15].

Tablo 3.2 Prototoip ve model için dalga koşulları.

Durum	Prototip				Model			
	H_{m0} (m)	L_m (m)	T_m (s)	T_p (s)	$H_{m0,\,m}$ (m)	L_m (m)	T_m (s)	T_p (s)
1 (ort)	1.039	20.6	3.63	4.54	0.02	0.41	0.51	0.64
2 (1 yıl)	4.03	66.82	6.55	8.18	0.08	1.33	0.92	1.15
3 (10 yıl)	7.48	120.13	8.78	10.98	0.15	2.40	1.24	1.55
4 (50 yıl)	8.63	137.9	9.40	11.75	0.17	2.76	1.32	1.65
5 (100 yıl)	9.09	145.01	9.64	12.05	0.18	2.90	1.36	1.70

Tablo 3.3 Prototip ve model için rüzgar koşulları.

Durum	Prototip	Model
	V_m (m/s)	V_m (m/s)
1 (ort)	5.629	0.8
2 (1 yıl)	16.28	2.30
3 (10 yıl)	22.30	3.1
4 (50 yıl)	24.73	3.49
5 (100 yıl)	25.78	3.63

3.5 Rüzgar Türbini Model Özellikleri

Öncelikle, yarı batık yüzer rüzgar türbinin doğal periyodu, sönüm katsayısı ve serbest salınım durumlarındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla Hidrodinamik Araştırma Laboratuvarında bulunan dalga baseninde 1.0m su derinliğinde deneyler yapılmıştır. Deneyler yüzer sistem boş durumda (Şamandıra, Drone, IMU cihazı ve loadceller ile birlikte su çekimi, D=16.5cm), ve iki farklı su çekimi olmak üzere (D= 27.5 cm ve 43.5cm) olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere göre en uygun yüzme durumu da ön görülmüştür. Ayrıca, rüzgar koşullarını oluşturan drone'un özelliklerini belirlemek ve ortalama rüzgar hızını belirlemek amacıyla deneylerde yapılmıştır.

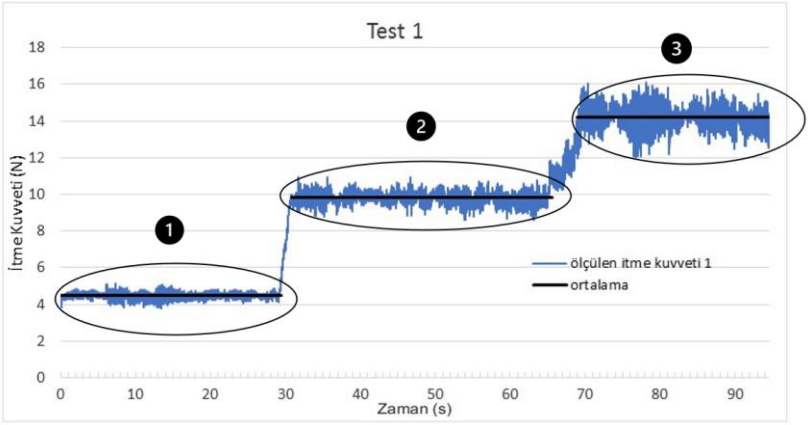
3.5.1 Rüzgar Hızı ve Drone Özellikleri

Altı pervaneli drone (Şekil 3.19) farklı devirlerde çalışması halinde oluşturduğu itme kuvvetini ve oluşturduğu rüzgar hızını bulabilmek amacıyla deney gerçekleştirilmiştir.

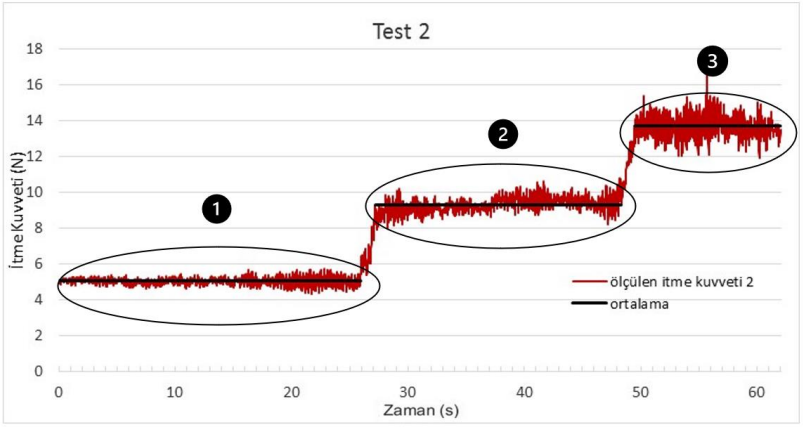
Drone uyguladığı itme kuvvetinin belirlenmesi amacıyla loadcell kullanılmıştır. Drone üç farklı devirde çalıştırılmış ve iki kez okuma yapılmıştır. Yapılan bu iki okuma Test-1 ve Test-2 olarak isimlendirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de Test-1 ve Test-2'den okunan drone'un itme kuvveti ve zaman grafiği gösterilmiştir. Grafikler üzerinde dronun üç farklı devirde çalışması halinde okunan kuvvet verileri yavaştan hızlıya doğru 1, 2 ve 3 olarak gruplandırılmıştır. Grafik üzerinde her bir devir için ortalama değer eğrisi çizdirilmiştir.



Şekil 3.19 Drone rüzgar üretim sistemi



Şekil 3.20 Dronun 3 farklı devirdeki itme kuvveti (1.test)



Şekil 3.21 Dronun 3 farklı devirdeki itme kuvveti (2.test)

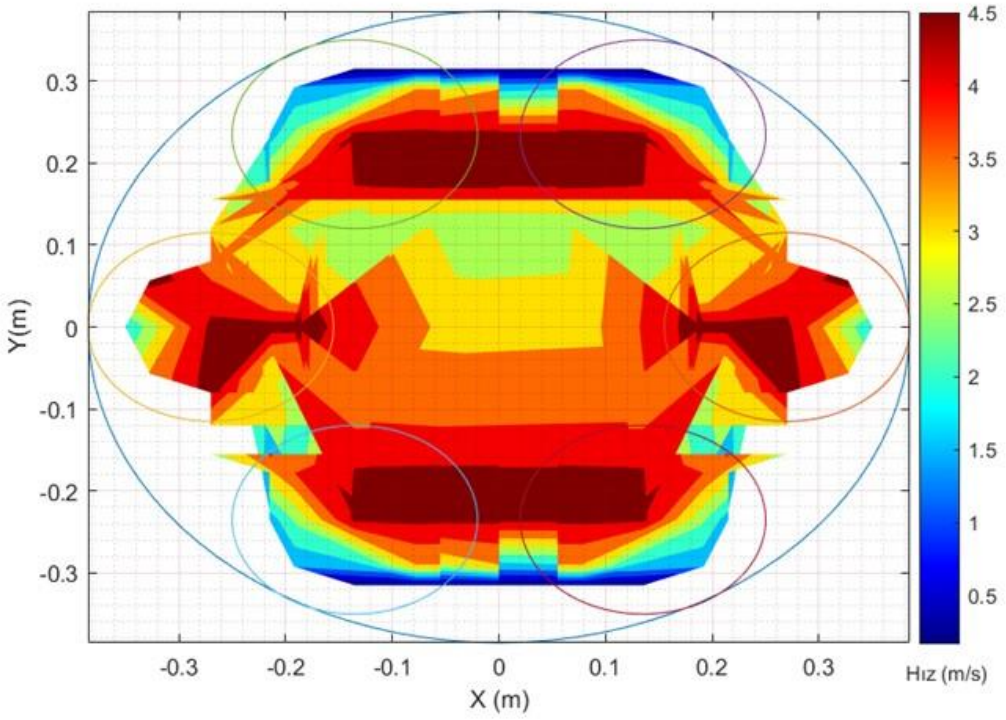
Test-1 ve Test-2 için üç farklı devirde alınan verilerin ortalaması, standart sapması ve varyasyon (değişim) katsayısı hesaplanmıştır (Tablo 3.4). Devir 1 hızında Test-2'de Test-1'e göre %11 daha fazla, devir 2 hızında Test-1'de Test-2'ye göre %5 daha fazla, devir 3 hızında ise Test-1'de Test-2'ye göre %4 daha fazla ortalama kuvvet okunmuştur. Varyasyon katsayısı her iki testte ve her üç devirde %5'in altında çıkmıştır.

Varyasyon katsayısı: $\mathrm{CV} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100$ (boyutsuz)

Tablo 3.4 Test 1 ve Test 2 sonuçları

	Test 1			**Test 2**			Test 1 ve Test2 ortalama kuvvet (N)
	ortalama kuvvet μ (N)	standart sapma σ (N)	varyasyon katsayısı (%)	ortalama kuvvet μ (N)	standart sapma σ (N)	varyasyon katsayısı (%)	
Devir 1	4.46	0.21	4.61	5.02	0.22	4.36	**4.74**
Devir 2	9.80	0.39	3.95	9.27	0.43	4.65	**9.54**
Devir 3	14.18	0.68	4.80	13.66	0.64	4.71	**13.92**

Rüzgar hızını belirlemek amacıyla Hotwire anemometre kullanılmıştır, çalıştırılan drone yarattığı hız noktasal olarak belirlenmiş ve daha sonra ortalama hız hesaplanmıştır. Drone hız dağılımı Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Hız dağılımı incelendiğinde drone 1. Devirinde alansal hız dağılımı 0.5 ile 4.5 m/s arasında değişmektedir. MATLAB yazılımı yardımıyla kesitsel ortalama hız 2.66 m/s olarak belirlenmiştir, rüzgar hızı model koşullarında 1 yıl aşılma olasılığına karşı gelmektedir (2.30m/s), prototip koşullarında 16.28 m/s değerine karşılık gelmektedir. Bu değer aralığı model koşulları ile uyumlu kabul edilmiştir.



Şekil 3.22 Drone hız dağılımı

3.5.2 Serbest Salınım Testleri

Bu raporda, yüzer tip rüzgar türbini platformuna ait, üç farklı yükleme durumunda, platformun dalıp çıkma, baş kıç vurma ve yalpa hareketleri ile ilintili hidrodinamik davranışları tartışılmıştır. Üç farklı yükleme durumunda modelin su çekimi ve ağırlığı Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Yükleme durumları ve özellikleri

Yükleme Durumları	Su Çekimi (mm)	Ağırlık (kg)
D165	165	70.45
D275	275	90
D435	435	113.5

D165 yükleme durumu yüzer platform tasarımının kendi ağırlığıyla yüzme stabilitesini sağladığı su çekimi olan 165 mm su çekimine ve 70.45 kg ağırlığa sahiptir.

D275 yükleme durumunda ise model şamandıralarının tabanına 3 adet çelik kare levha yerleştirilerek su çekimi artırılmıştır. Bu yükleme durumunda model 90 kg ağırlığa ve 275 mm su çekimine sahiptir. Modele yerleştirilen çelik levhalar Şekil 3.23'te belirtilmiştir.

D435 yükleme durumunda ise model şamandıralarının tabanına 3 adet silindirik levha yerleştirilerek su çekimi artırılmıştır. Bu yükleme durumunda model 113.5 kg ağırlığa ve 435 mm su çekimine sahiptir.



Şekil 3.23 D275 yükleme durumu için modele çelik levhaların yerleştirilmesi

Yarı batık açık deniz rüzgâr türbini tasarımının, yalpa, dalıp çıkma ve baş kıç vurma hareketlerinin doğal periyotları ve sönüm katsayıları serbest salınım testleri uygulanarak belirlenmiştir. Serbest salınım testleri esasında başlangıçta denge konumunda stabil ve bağlı bir şekilde duran yüzer yapıya, başlangıç rotasyonları (yalpa, baş-kıç vurma) veya doğrusal hareketi (dalıp-çıkma) verilerek yapı serbest

bırakılmıştır. Yapının yalpa ve baş-kıç vurma hareketlerinin denge konumuna gelişini gösteren salınımları, IMU (inertial measurement unit) ölçüm sistemi kullanılarak zaman serisi bulunmuştur. Yapının dalıp çıkma hareketinin denge konumuna gelişini gösteren salınımlarının zaman serisi ise yüksek çözünürlüklü bir kamera ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Ölçülen bu salınımların, sönümlü serbest titreşen sistemlerin hareket denklemine uyduğu kabul edilerek, yüzer yapının belirtilen hareketlerdeki sönümlü ve sönümsüz doğal frekansları ve sönüm katsayıları belirlenmiştir.

$$x(t) = Xe^{-\xi\omega_0 t}\cos\left(\left(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}\right)t - \varphi\right) \tag{3.1}$$

Serbest titreşen sistemlerin hareket denkleminde x kullanılan kıyas düzlemini, X hareketin genliğini, ξ sönüm katsayısını ω_0 doğal frekansı ve φ faz açısını göstermektedir.

ξ Sönüm katsayısı (Denklem 3.2) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemde δ logaritmik azalmayı ifade etmektedir.

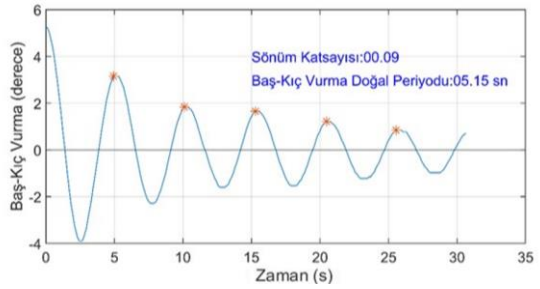
$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \tag{3.2}$$

Denklem 3.3'te belirtilen logaritmik azalma ise ilk üç pozitif pik değer kullanılarak (n=3) hesaplanmıştır.

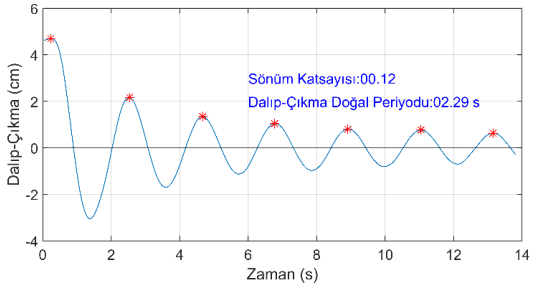
$$\delta = \frac{1}{n}\ln\frac{x(t)}{x(t+nT)} \tag{3.3}$$

k

Yapılan baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma serbest salınım testlerinin grafikleri verilmiştir. Şekil 4.24'te D165 yükleme durumu için verilen serbest salınım grafiklerinde baş-kıç vurma doğal periyodunun 5.15 s ve dalıp çıkma doğal periyodunun ise 2.29 s olduğu görülmektedir. Şekil 4.25'te D275 yükleme durumu için verilen serbest salınım grafiklerinde baş-kıç vurma doğal periyodunun 7.22 s ve dalıp çıkma doğal periyodunun ise 2.38 s olduğu görülmektedir. Şekil 4.26'da D435 yükleme durumu için verilen serbest salınım grafiklerinde baş-kıç vurma doğal periyodunun 8.72 s ve dalıp çıkma doğal periyodunun ise 3.17 s olduğu görülmektedir.

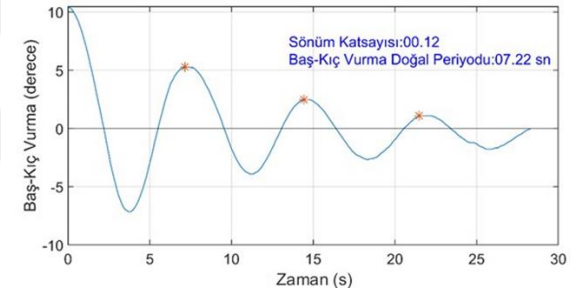


(a)

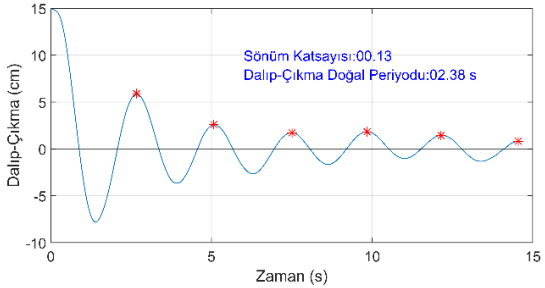


(b)

Şekil 3.24 D165 yükleme durumu serbest salınım grafikleri: (a) baş-kıç vurma serbest salınım grafiği, (b) dalıp-çıkma serbest salınım grafiği.

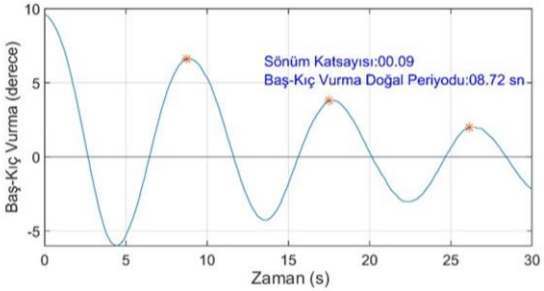


(a)

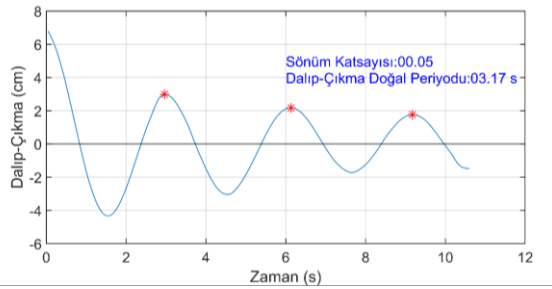


(b)

Şekil 3.25 D275 yükleme durumu serbest salınım grafikleri: (a) baş-kıç vurma serbest salınım grafiği, (b) dalıp-çıkma serbest salınım grafiği.



(a)



(b)

Şekil 3.26 D435 yükleme durumu serbest salınım grafikleri: (a) baş-kıç vurma serbest salınım grafiği, (b) dalıp-çıkma serbest salınım grafiği.

3.5.3 Meyil Deneyi

Sakin su yüzeyi üzerinde hareketsiz duran bir cisme iki temel kuvvet yukarıdan aşağı yönlenmiş ağırlık kuvveti (W) ile aşağıdan yukarı yönlenmiş sephiye (kaldırma), deplasman (Δ) kuvvetleridir. Cismin istenen su hattında dengede olabilmesi için bu su hattındaki sephiye kuvveti ile toplam ağırlık birbirine eşit ve zıt yönlü olmalıdır.

Modelin herhangi bir dış kuvvet etkisi altında (dalga, rüzgar, akıntı) ağırlık merkezinin konumunun değişmesi durumunda ağırlık ve sephiye merkezleri arasındaki uzaklıktan dolayı bir moment oluşacaktır. Bu momentin etkisiyle sephiye merkezi ağırlık merkezinin yeni konumu ile aynı düşey doğruya gelecek şekilde model meyil veya trim yapacaktır. Oluşan moment modeli orijinal durumuna geri getirmeye çalışıyorsa ağırlık ve deplasman kuvvetleri arasında pozitif GZ moment kolu oluşacaktır [Şekil 3.43 (b)].

DWL: Tasarım su seviyesi.

CL: Modelin orta simetri ekseni.

K: Modelin orta simetri ekseni ile taban hattının kesişim noktası.

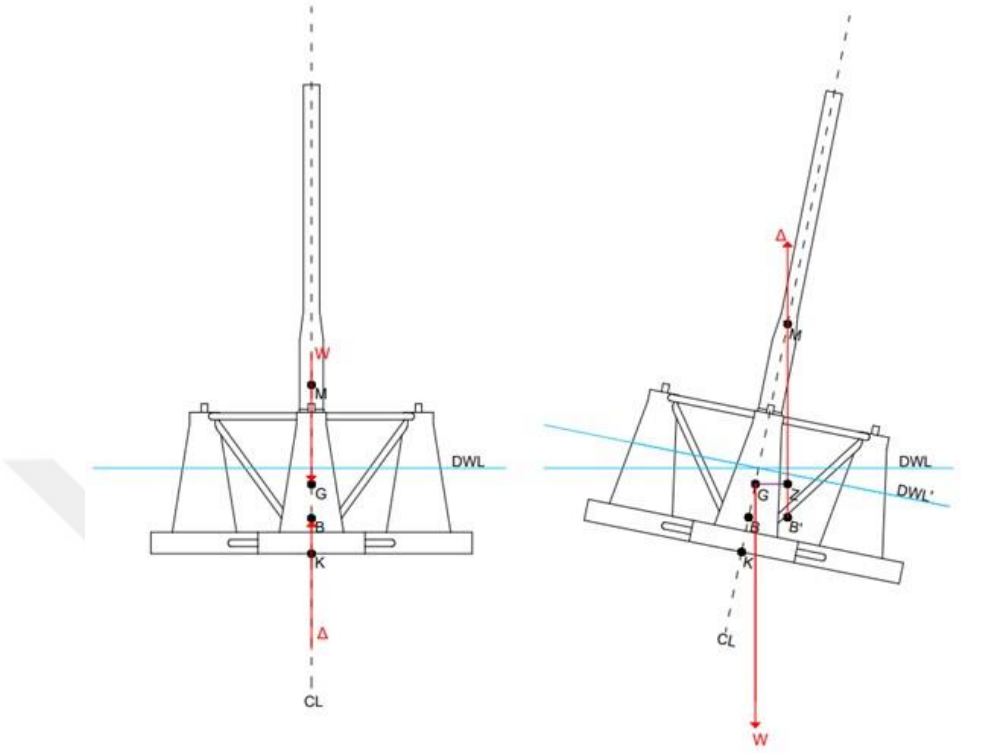
B: Karina merkezi. İngilizce Center of Buoyancy olarak bilinir. Bazı kaynak kitaplarda sephiye merkezi olarak da geçer. Yüzen cismin su altında kalan hacminin (karina) geometrik ortası olarak kabul edilir.

G: Modelin ağırlık merkezi.

M: Şekil 1.'de görüldüğü gibi B' noktasından geçen kuvvet çizgisinin modelin merkez hattını (CL) kestiği nokta metasentır (Metacentre) noktasıdır.

Modelin stabilite karakterlerini belirlemek için, modelin ağırlık merkezinin düşey konumu KG bilinmelidir. Meyil deneyinin amacı metasantır yüksekliği GM ve ağırlık merkezinin düşey konumunu (KG) hesaplamaktır. Modelin formu ve ağırlık merkezinin düşey konumu stabiliteyi etkileyen iki etmendir. Bunlar genel olarak form stabilitesi ve ağırlık stabilitesi diye adlandırılırlar. Tüm ağırlıkların kaide hattına göre alınan momentleri toplamını, ağırlıkların toplamına bölerek modelin ağırlık merkezinin düşey konumu KG bulunur. Bu hesaplama sırasında çok sayıda elemanın ağırlıkları ve ağırlık merkezinin düşey konumları yaklaşık olarak

alındığından, bulunan KG değeri hassas değildir. Meyil deneyi ile GM değeri hassas olarak hesaplanır.



(a) (b)

Şekil 3.27 Model üzerine etkiyen kuvvetler ve etkime yerleri; (a) statik durum, (b) meyilli durum.

KG değerini 3 farklı su çekiminde hesaplamak için aşağıdaki adımlar sırasıyla izlenmiştir:

1. KB uzunluğu Rhino programı kullanılarak modelin 3 boyutlu çizimi üzerinden bulunmuştur.

2. BM değeri ise; $BM = \frac{I}{\nabla}$ denklemi ile hesaplanmıştır. (3.4)

I : şamandıranın su kesiminin ataleti.

∇ : deplasman hacmi.

3. $KM = KB + BM$ denklemi ile KM değeri hesaplanır. (3.5)

4. GM değeri, meyil açısının bağlısı olarak:

$GM = \frac{w \cdot d}{\Delta \cdot \tan \Phi}$ denklemi ile bulunur. (3.6)

w : meyil ağırlığı

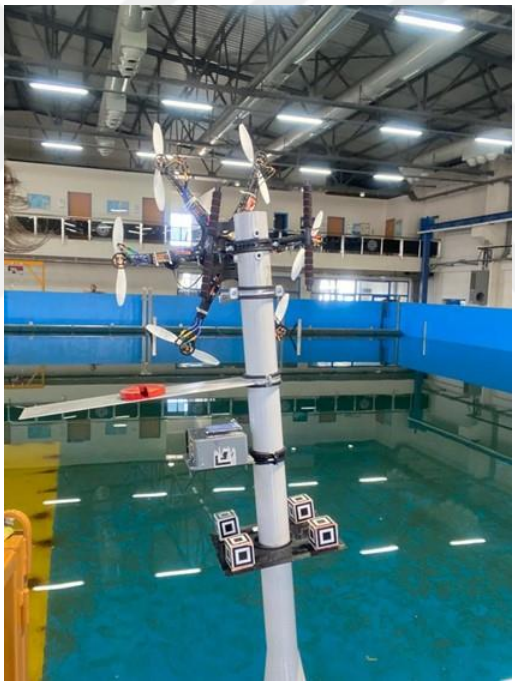
d : ağırlığın yatay hareket miktarı

Δ : modelin deplasmanı

Φ : meyil açısı

5. Model ağırlık merkezinin düşey konumu KG ise:

$\mathrm{KG} = \mathrm{KM} - \mathrm{GM}$ denklemi ile bulunur. (3.7)



Şekil 3.28 Meyil deneyi

3.5.3.1 D165 Yükleme Durumu Meyil Testi

Deney sırasında modele moment kolu uzunluğu 93 mm olan 1 kg ağırlığında metal plaka monte edilmiştir. Modele eklenen bu ağırlık sayesinde model meyil yapmıştır. Modelin yapmış olduğu meyil açısı ise modele monte edilmiş IMU sensörü ile ölçülmüştür. Deney modelin 165 mm su çekiminde 70.45 kg deplasman kuvveti için yapılmıştır.

IMU ile ölçülen meyil açısı, meyil ağırlığı ve momenti, modelin deplasmanı Denklem 3.6'da yerine yazılmış ve GM değeri hesaplanmış, Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6 Hesaplanan GM değerleri (D165).

Ağırlık (kg)	Moment Kolu (mm)	Meyil Açısı	GM (m)
1	93	1.5	0.04812

Yapılan testin sonucunda modelin 165 mm su çekimi durumunda GM 0.04812 m olarak hesaplanmıştır. KB uzunluğu ise modelin geometrisinden 0.06 m olarak hesaplanmıştır.

BM değeri ise Denklem 3.4 kullanılarak;

Şamandıranın 165 mm su çekimindeki durumunda su kesiminin ataleti (0.03449 m^4) hesaplanmış ve modelin deplasman hacmine (0.07045 m^3) bölünmüştür.

$\mathrm{BM} = \frac{0.03449}{0.07045} = 0.4897$ m olarak hesaplanmıştır.

$\mathrm{KM} = \mathrm{KB} + \mathrm{BM} = 0.06 + 0.4897 = 0.5497$ m

$\mathrm{KG} = \mathrm{KM} - \mathrm{GM} = 0.5497 - 0.04812 = \mathbf{0.5015}$ m KG değeri hesaplanmıştır.

3.5.3.2 D275 Yükleme Durumu Meyil Testi

Deney sırasında modele moment kolu uzunluğu 188 mm olan 0.6 kg ağırlığında 300 mm uzunluğunda bir plaka ve plakanın ucuna moment kolu uzunluğu 293 mm olan 0.5, 0.75, 1 kg ağırlığındaki metal ağırlıklar monte edilerek 4 farklı test yapılmıştır. Modele eklenen bu ağırlık sayesinde model meyil yapmıştır. Modelin yapmış olduğu meyil açısı ise modele monte edilmiş IMU sensörü ile ölçülmüştür. Deney modelin 275 mm su çekiminde 90 kg deplasman kuvvetinde yapılmıştır.

Deney farklı şekillerde 4 defa tekrarlanmıştır. IMU ile ölçülen meyil açısı, meyil ağırlığı ve momenti, modelin deplasmanı Denklem 3.6'da yerine yazılmış ve GM değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Sonuçlar Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7 Hesaplanan GM değerleri (D275).

	Ağırlık ve Konumu	Meyil Açısı	GM (m)
Test 1	yalnız plaka	1	0.07133
Test 2	plaka+0.5kg(uç)	3.69	0.04467
Test 3	plaka+0.75kg(uç)	5.13	0.04116
Test 4	plaka+1kg(uç)	8.44	0.01924
Ortalama GM (m)			0.04410

Yapılan 4 testin sonucunda modelin 275 mm su çekimindeki durumunda GM 0.04410 m olarak hesaplanmıştır. KB uzunluğu ise modelin geometrisinden 0.088 m olarak hesaplanmıştır.

BM değeri ise Denklem 3.4 kullanılarak;

Şamandıranın 275 mm su çekimindeki durumunda su kesiminin ataleti (0.02551 m^4) hesaplanmış ve modelin deplasman hacmine (0.09 m^3) bölünmüştür.

$$\mathrm{BM} = \frac{0.02551}{0.09} = 0.28344 \text{ m olarak hesaplanmıştır.}$$

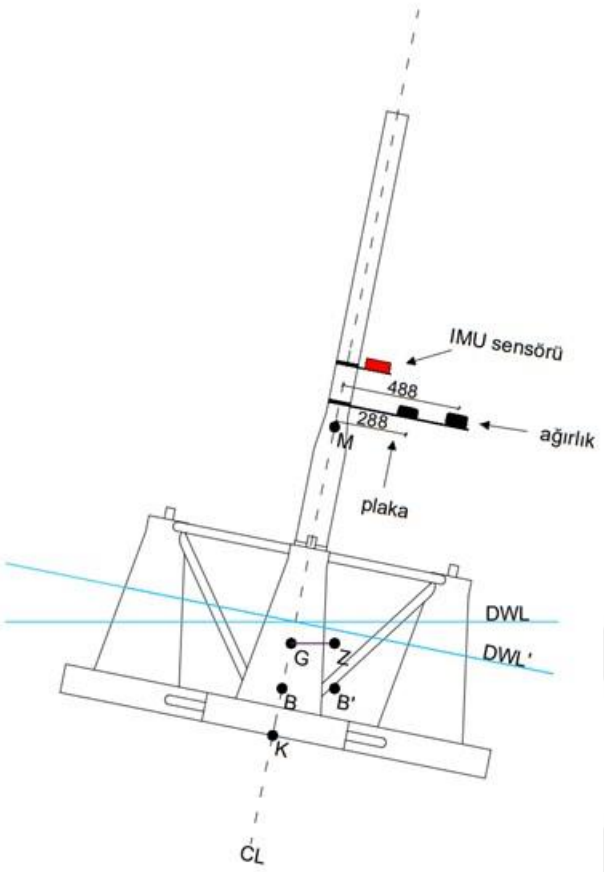
$$\mathrm{KM} = \mathrm{KB} + \mathrm{BM} = 0.088 + 0.28344 = 0.37144 \text{ m}$$

$$\mathrm{KG} = \mathrm{KM} - \mathrm{GM} = 0.37144 - 0.0441 = \mathbf{0.3273\ m} \text{ KG değeri hesaplanmıştır.}$$

3.5.3.3 D435 Yükleme Durumu Meyil Testi

Deney sırasında modele moment kolu uzunluğu 288 mm olan 1 kg ağırlığında 500 mm uzunluğunda bir plaka ve plakanın ortasına veya ucuna moment kolu uzunluğu 288 ve 488 mm olan 0.5 kg ağırlığındaki metal ağırlık Şekil 3.29'daki gibi monte edilmiştir. Modele eklenen bu ağırlık sayesinde model meyil yapmıştır. Modelin yapmış olduğu meyil açısı ise modele monte edilmiş IMU sensörü ile ölçülmüştür. Deney modelin 435 mm su çekiminde 113.5 kg deplasman kuvveti için yapılmıştır.

Deney farklı şekillerde 5 kez tekrarlanmıştır. IMU ile ölçülen meyil açısı, meyil ağırlığı ve momenti, modelin deplasmanı Denklem 3.6'da yerine yazılmış ve GM değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Sonuçlar Tablo 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.29 Meyil deneyinde kullanılan aletler.

Tablo 3.8 Hesaplanan GM değerleri (D435).

	Ağırlık ve Konumu	Meyil Açısı	GM (m)
Test 1	yalnız plaka	3.81	0.03839
Test 2	plaka+0.5kg(orta)	6.19	0.03520
Test 3	plaka+0.5kg(orta)	6.02	0.03620
Test 4	plaka+0.5kg(uç)	7.75	0.03501
Test 5	plaka+0.5kg(uç)	7	0.03880
Ortalama GM (m)			0.03672

Yapılan 5 testin sonucunda modelin 435 mm su çekimi durumunda GM 0.03672 m olarak hesaplanmıştır. KB uzunluğu ise modelin geometrisinden 0.1354 m olarak hesaplanmıştır.

BM değeri ise Denklem 3.4 kullanılarak;

Şamandıranın 435 mm su çekimindeki durumunda su kesiminin ataleti (0.01476 m^4) hesaplanmış ve modelin deplasman hacmine (0.1135 m^3) bölünmüştür.

$$\mathrm{BM} = \frac{0.01476}{0.1135} = 0.1301 \text{ m olarak hesaplanmıştır.}$$

$$\mathrm{KM} = \mathrm{KB} + \mathrm{BM} = 0.1354 + 0.1301 = 0.2655 \text{ m}$$

$$\mathrm{KG} = \mathrm{KM} - \mathrm{GM} = 0.2655 - 0.03672 = \mathbf{0.2295\ m}\ \text{KG değeri hesaplanmıştır.}$$

Meyil testi sonucu modelin 3 farklı yükleme durumundaki GM uzunlukları bulunmuştur. Hesaplanan KM uzunluğundan (Denklem 3.5) meyil testi ile bulunan GM uzunluğu çıkartılarak KG uzunluğu yani modelin düşeydeki ağırlık merkezinin konumu bulunmuştur (Denklem 3.7). Bulunan sonuçlar aşağıdaki Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

Tablo 3.9'daki sonuçlar incelendiğinde modelin su çekimi (veya deplasman kuvveti) arttıkça GM'nin azaldığı bu durumda yapının başlangıç stabilitesinin azaldığı görülmektedir, bunun nedeni yapının konik geometriye sahip olmasıdır. Ancak GM'nin negatif olmaması yapının yeterli stabilitede olduğunu göstermektedir. Bu sonuç yapının "denizcilik stabilitesini" göstermemektedir, bu durum model deneylerinin sonuçlarından sonra belli olacaktır.

Tablo 3.9 Meyil testi sonuçları

Yükeleme Durumu	Su Çekimi (mm)	Deplasman Kuvveti (kg)	GM (m)	KM (m)	KG (m)
D165	165	70.45	0.04812	0.5497	0.5015
D275	275	90	0.0441	0.3714	0.3273
D435	435	113.5	0.03672	0.2655	0.2295

3.5.4 Denge Deneyi

Meyil deneyi ile yapıların testlerin tutarsız sonuçlarından (Tablo 3.9) dolayı meyil deneyinin güvenilirliği düşük bulunmuştur. Modelin daha kesin verilere dayanan KG değerini bulabilmek için, modelin yatayda ağırlık merkezine karşılık gelen denge merkezi bulunmaya çalışılmıştır. Bunun için üzerinden ek yük bulunmayan 66.66 kg deplasman ağırlığında 165 mm su çekimindeki model yatayda dengede

kalacak şekilde halat yardımı ile vince asılmıştır (Şekil 3.30). Modelin ağırlık merkezi G noktası halatın ortası kabul edilmiştir. Bu noktanın modelin tabanına olan uzaklığı KG=0.34 m olarak ölçülmüştür. Modelin üzerindeki IMU sensörü, drone gibi cisimlerin ağırlıkları eklendiğinde 70.45 kg ağırlığına gelen modelin gerçek KG değeri 0.389 m olmuştur. 19.55 kg ek yüke sahip 90 kg deplasman ağırlığında 275 mm su çekimindeki model için KG değeri 0.287 m, 43.05 kg ek yüke sahip 113.5 kg deplasman ağırlığında 435 mm su çekimindeki model için ise KG değeri 0.216 m olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.30 Ağırlık merkezinden asılan 66.66 kg deplasman ağırlığındaki model.

Bu yöntem ile üç farklı deplasman ağırlığındaki model için bulunan KG değerleri kesin değerler olarak kabul edilmiştir. Kesinliğinden yeterince emin olunamayan meyil testi ile yapılan değerler Tablo 3.15'de karşılaştırılmıştır. En fazla hata yaklaşık %30 D165 yükleme durumunda görülmüştür. Su çekimi arttıkça hatanın azaldığı görülmüştür. D435 yükleme durumunda hata oranının yaklaşık %6 olduğu görülmüştür.

Tablo 3.10 Meyil deneyi ve denge deneyi karşılaştırılması

Yükleme Durumu	Su Çekimi (mm)	Deplasman Ağırlığı (kg)	Ek Yük (kg)	KG (m)	
				Meyil	Denge
D165	165	70.45	0	0.502	**0.389**
D275	275	90	19.55	0.327	**0.287**
D435	435	113.5	43.05	0.23	**0.216**

3.5.5 Model Özellikleri

Yüzer rüzgar türbin modelinin farklı su çekimlerinde yapılan serbest salınım, meyil ve denge deneyler sonucunda modelin özellikleri Tablo 3.16, 3.17 ve 3.18'da verilmiştir.

Tablo 3.11 165 mm su çekimi için kütle ve atalet özellikleri

Özellik	Birim	Model	Prototip
Kütle	kg	70.45	8.75E+06
Yerçekimi İvmesi	m/s^2	9.81	9.81
Serbest su yüzeyine göre düşey ağırlık merkezi	m	0.224	11.9
X eksenindeki kütle atalet momenti (Ixx)	$kg.m^2$	23.48	7.34E+09
Y eksenindeki kütle atalet momenti (Iyy)	$kg.m^2$	23.48	7.34E+09
Z eksenindeki kütle atalet momenti (Izz)	$kg.m^2$	23.48	7.34E+09
Baş-Kıç Vurma Doğal Periyodu	s	5.15	36.42
Dalıp-Çıkma doğal Periyodu	s	2.09	14.74
İleri-Geri Gitme Doğal Periyodu	s	8.69	61.45

Tablo 3.12 275 mm su çekimi için kütle ve atalet özellikleri

Özellik	Birim	Model	Prototip
Kütle	kg	90	1.13E+07
Yerçekimi İvmesi	m/s2	9.81	9.81
Serbest su yüzeyine göre düşey ağırlık merkezi	m	0.0483	2.415
X eksenindeki kütle atalet momenti (Ixx)	kg.m2	30	9.38E+09
Y eksenindeki kütle atalet momenti (Iyy)	kg.m2	30	9.38E+09
Z eksenindeki kütle atalet momenti (Izz)	kg.m2	30	9.38E+09
Baş-Kıç Vurma Doğal Periyodu	s	7.23	51.12
Dalıp-Çıkma doğal Periyodu	s	2.39	16.9
İleri-Geri Gitme Doğal Periyodu	s	16.67	117.88

Tablo 3.13 435 mm su çekimi için kütle ve atalet özellikleri

Özellik	Birim	Model	Prototip
Kütle	kg	113.5	1.42E+07
Yerçekimi İvmesi	m/s2	9.81	9.81
Serbest su yüzeyine göre düşey ağırlık merkezi	m	-0.219	-10.65
X eksenindeki kütle atalet momenti (Ixx)	kg.m2	37.8	1.18E+10
Y eksenindeki kütle atalet momenti (Iyy)	kg.m2	37.8	1.18E+10
Z eksenindeki kütle atalet momenti (Izz)	kg.m2	37.8	1.18E+10
Baş-Kıç Vurma Doğal Periyodu	s	8.77	62.01
Dalıp-Çıkma doğal Periyodu	s	3.09	21.85
İleri-Geri Gitme Doğal Periyodu	s	33.33	235.68

3.6 Ölçümlerin Sayısallaştırılması

Rüzgar türbinin serbest hareketleri IMU ve kamera kayıtları ile belirlenmiştir. Kamera kayıtları görüntü işleme tekniği ile sayısallaştırılmıştır. Bu amaçla python dilinde hazırlanan bir yazılım kullanılmıştır. Hazırlanan yazılımın doğruluğu IMU ölçümleri ile test edilmiştir.

Görüntü işleme:

Görüntü işleme aşamasında Python yazılımı kullanarak, daha sonra bahsedilecek Simetrik ve Asimetrik Markerlar için iki adet araç geliştirilmiştir. Bu bölümde görüntü işleme aşamasında markerların sınıflandırılması, kullanılan yazılım dilleri ve kütüphaneleri, görüntü işleme aşamasında ana yöntem ve optimizasyon aşamaları hakkında bilgiler verilmiştir.

Markerlar:

Deneyler sırasında kullanılmak üzere iki çeşit marker grubu vardır. Şekil 3.31'de görüldüğü gibi bunlardan biri simetrik marker, diğeri ikisi ise asimetrik markerlardır. Bu markerları simetrik ve asimetrik olarak iki guruba ayrılmasının sebebi, simetrik markerin görüntü işleme aşamasında elde edebileceğimiz konum noktası verisi asimetrik markerdan daha az olmasıdır. Bunun sebebi asimetrik marker salınım sırasında herhangi bir açı değişiminde bilgisayarın farklılıkları

kullanarak noktaları tekrardan belirleyebilmesine olanak tanırken, simetrik markerda sadece merkezi yakalayarak bu işlemi yürütmek zorunludur.

Bir diğer ayrım ise kullanılan yazılımın ve kütüphanelerin simetrik ve asimetrik markerlar için farklılık göstermesidir. Simetrik markerlarda, görüntüdeki tüm karelerin merkezlerinin konumları elde edip sıralanacaktır ve en çok tekrar eden konumların kullanılan simetrik marker olduğunu kabul ederek verileri elde edilecektir. Asimetrik markerlarda ArUco markerlar kullanıldığı için kendi kütüphanesinin fonksiyonlarını kullanarak daha basit bir şekilde konumlar elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.31 Markerlar; (a) simetrik, (b) asimetrik.

Açıların ve konumların belirlenmesinde sadece iki marker yeterlidir fakat görüntü çerçevesi iki boyutlu olduğundan kalibre edilmemiş kayıtlarda ikiden fazla marker kullanımı, değerlerin doğruluk oranlarını arttıracaktır. Yapılan deney kayıtlarında simetrik markerlardan 4 adet kullanılmıştır ve 4 adet nokta verisi elde edilmiştir. Asimetrik markerlarda ise 2 adet kullanılmış ve 8 adet nokta verisi elde edilmiştir.

Her iki markerin kullanılması durumunda, geliştirilen iki yazılım aracından da veriler çekilebilmiştir.

OpenCV kütüphanesinin Simetrik Markerlarda Kullanılması:

OpenCV, bilgisayar görüsü ve makine öğrenimi için açık kaynaklı bir yazılım kütüphanesidir. OpenCV'nin tam açılımı Open-Source Computer Vision Library'dir. Bilgisayar görüsü uygulamaları için ortak bir altyapı sağlamak ve tüketici ürünlerinde makine algısının kullanımını hızlandırmak amacıyla oluşturulmuştur. BSD lisanslı bir yazılım olan OpenCV, şirketlerin kodu kullanması ve değiştirmesi konusunda kolaylık sağlamaktadır.

OpenCV kullanarak, yüzleri tanımlama ve tanıma, nesneleri tanımlama, videolardaki insan hareketlerini sınıflandırma, kamera hareketlerini takip etme, hareketli nesneleri takip etme, 3D nesne modellerini çıkarma, stereo kameralardan 3D nokta bulutları oluşturma, görüntüleri birleştirerek yüksek çözünürlüklü bir sahne oluşturma gibi karmaşık görevleri kolayca gerçekleştirmek mümkündür.

OpenCV kütüphanesini pip kullanarak yüklemek için aşağıdaki kod komutu komut istemine (cmd) yazılmalıdır:

-pip install opencv-python

Ancak, aruco marker OpenCV kütüphanesi için topluluk tarafından geliştirilmiş bir ek kütüphanedir ve OpenCV kütüphanesiyle birlikte yüklemek isterseniz, aşağıdaki kod kullanılmalıdır. Eğer önceden opencv-python kütüphanesi yüklü ise, öncelikle kaldırılması gerekmektedir:

OpenCV kütüphanesini kaldırmak için:

-pip uninstall opencv-contrib-python

OpenCV kütüphanesini yüklemek için:

-pip install opencv-contrib-python

OpenCV kütüphanesinin Asimetrik Markerlarda (ArUco Marker) Kullanılması

Fiducial marker, görüntü işleme ve bilgisayarlı görü alanında kullanılan bir terimdir. Fiducial markerlar, kamera veya sensörlerin konumunu ve yönelimini

belirlemek için kullanılan tanınabilir işaretlerdir. ArUco markerlar, kamera poz tahmini için kullanılabilen ikili kare fiducial markerlardır. Onların ana avantajı, tespitlerinin sağlam, hızlı ve basit olmasıdır. ArUco modülü, bu tür markerların tespitini ve poz tahmini ile kamera kalibrasyonu için kullanılan araçları içermaktedir. Ayrıca, ArUco işlevleri, ArUco markerlarıyla geleneksel satranç tahtalarını birleştirerek kolay ve çok yönlü köşe tespiti sağlar. Modül ayrıca ArUco köşelerini tespit etmek ve poz tahmini ile kamera kalibrasyonu için kullanmak için fonksiyonları içermektedir.

Poz tahmini, robot navigasyonunda, artırılmış gerçeklikte ve birçok diğer bilgisayar görü uygulamasında büyük öneme sahiptir. Bu süreç, gerçek dünyadaki noktalarla 2D görüntü projeksiyonları arasındaki karşılıkları bulmaya dayanır. Bu genellikle zorlu bir adımdır ve bu nedenle sentetik veya fiducial marker kullanımı yaygındır.

En popüler yaklaşımlardan biri, ikili kare fiducial markerların kullanılmasıdır. Ana avantajlarından biri, tek bir markerın yeterli karşılıklar (dört köşe) sağlaması ve bu sayede kamera pozunun tahmin edilebilmesidir. Ayrıca, içsel ikili kodlamaları onları özellikle sağlam yapar ve hata tespiti ve düzeltme tekniklerinin uygulanmasına olanak sağlar.

ArUco kütüphanesinin kendi özellikleri olan birçok farklı marker türü vardır. Her bir markerın etrafında siyah bir sınır bulunur ve içinde 4x4, 5x5, 6x6 ve 7x7 boyutlarında antisimetrik ve 1000 farklı marker içeren bir sözlük bulunur. Deneylerde sırasıyla ID 1 ve ID 2 (Şekil 3.31 b) ArUco markerları kullanılmıştır.

Görüntü İşleme Aracının Geliştirilmesi:

Video kaydında, Çerçeveler VideoCapture() ve read() metodları kullanılarak bir değişkene atanmıştır ve ardından bu kareye çeşitli görüntü manipülasyonları uygulanmıştır. İlk olarak, işlem yükünü azaltmak ve daha doğru çıktılar elde etmek için görüntünün gereksiz kısımları sol ve üst kenarlardan 2/9 oranında, sağ ve alt kenarlardan ise 1/9 oranında kırpılmıştır. Uygulanan işlemin örneği Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.32 Kırpılmış görüntü.

Canny kenar tespiti yöntemi, kenarları tespit etmek için bir dizi işlem gerçekleştirir. Bu işlemler, görüntünün gri tonlamalı hale getirilmesinden sonra kullanılır. ”gray” adlı değişkene gri filtre atanır. Burada “cv” OpenCV kütüphanesini, “cvtColor” renk değişimi için kullanılan metod, “cropped” kırpılmış kareyi ve “cv.COLOR_BGR2GRAY” renk değişim tipini temsil etmektedir:

-gray = cv.cvtColor(cropped, cv.COLOR_BGR2GRAY)

Gri filtre, görüntüyü tek kanallı gri tonlamalı bir hale dönüştürerek işlem yükünü azaltır ve daha net kenar tespitini mümkün kılar. Ayrıca, kenar tespiti yönteminde daha net ve doğru sonuçlar elde etmek için Gaussian filtresinin kullanılması önerilir. “blur ” adlı değişkene uygulanan bulanıklık atanır. Burada “GaussianBlur” bulanıklık için kullanılan metod,” cv.BORDER_DEFAULT” bulanıklık tipi ve “(3,3)” ise bulanıklık derecesini temsil etmektedir.

-blur = cv.GaussianBlur(gray, (3,3), cv.BORDER_DEFAULT)

Gaussian Blur, bulanıklık yöntemleri arasında en uygun seçenek olarak bulunmuştur. Median bulanıklık veya bilateral bulanıklık gibi diğer bulanıklık seçenekleriyle karşılaştırıldığında, Gaussian Blur'un bazı farklılıkları vardır:

- Gaussian Blur, diğer yöntemlere göre daha yumuşak bir etki bırakır, bu da kenarların daha az belirgin hale gelmesi anlamına gelir.
- Diğer bulanıklık yöntemleri, düzensiz gürültü kaynaklarına sahip görüntüler için özellikle kullanışlı olan gürültüyü azaltmada daha etkilidir.

- Gaussian Blur, hızlı bir yöntemdir ve diğer yöntemlere kıyasla daha az hesaplama gerektirir. Bu nedenle, gerçek zamanlı uygulamalar için daha kullanışlıdır.

Canny kenar tespiti, görüntüdeki keskin geçiş bölgelerini (kenarlar) belirlemek için bir dizi işlem uygular. Canny kenar tespiti, birçok avantaja sahiptir. İlk olarak, düşük gürültüye ve doğal kenarlara karşı dayanıklıdır. Ayrıca, yüksek doğruluk sağlar ve yalancı kenarları minimize etmek için optimize edilmiştir. Kenar tespiti için gerekli parametrelerin ayarlanması kolaydır ve genellikle iyi sonuçlar verir. ”canny” adlı değişkene, kenar tespit sonucu oluşan kare atanır. “125” histeresis eşikleme yönteminde kullanılan alt eşik değerini, “300” histeresis eşikleme yönteminde kullanılan üst eşik değerini temsil eder.

-canny = cv.Canny(gray, 125, 300)

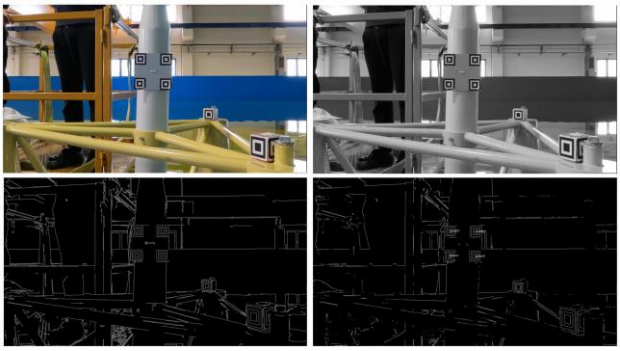
Ardından, “dilate” kullanılarak kenar tespit aşaması tamamlanır. Belirli bir yapılandırma elemanını kullanarak, işlev kaynak görüntüyü genişletir. Bu yapılandırma elemanı, piksel komşuluğunun şeklini belirler ve maksimum değerin alındığı alanı tanımlar. ”dilate” adlı değişkene, genşişletilme sonucu oluşan kare atanır. Burada “kernel” genişletme için kullanılan yapılandırma elemanını, “iterations” genişletmenin uygulandığı sayıyı tanımlar.

-dilate = cv.dilate(canny,kernel,iterations=1)

Tespit edilen kenarlar kare şekline çevrilir ve bu karelerin merkezleri hesaplanır. Daha sonra elde edilen karelerin merkezleri hesaplanır ve bir liste değişkenine aktarılır. Beklendiği üzere Simetrik Marker daha fazla çakışan merkez noktalara sahip olacaktır fakat görüntü kalitesinin düşüklüğü veya arka plandaki karmaşıklık bunu engelleyip istenmeyen noktaların yakalanmasına sebep olabilir.

Verimliliği arttırmak adına birçok sınırlama getirilmiştir. İlk öncelikle elde edilen karelerin belirli bir alanın üzerinde olmasını sağlanarak su yüzeyindeki parlamalardan oluşan karmaşıklığın önüne geçilmiştir. Markerların arasındaki mesafelere kısıtlama getirilmiş ve bu da simetrik markerlarda 4 noktanın birlikte çalışması sağlanmıştır. Daha sonra markerların konumları gerçek zamanlı kayıt altına alınmış ve simetrik markerların 4 noktasından birinde kayma olduğunda diğer 3 nokta ile kayan nokta düzeltilmiştir.

Elde edilen, Simetrik Marker'in merkezi olan, 4 nokta belirli bir sıra içerisinde kayıt altına alınmıştır ve Excel dosyası olarak dışarı aktarılmıştır. Şekil 3.33'de bu aşamaların çıktıları mevcuttur.



Şekil 3.33 Görüntü filtreleme aşamaları.

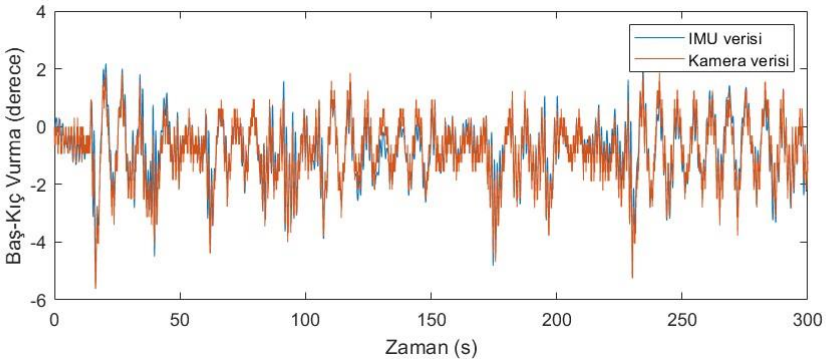
Kaydedilen video kaydında saniyede kaç çerçevenin olduğu belirlenmiştir ve çerçeveler arasındaki zaman farkı hesaplanmıştır. Simetrik işaretleyici için nokta 1 ve nokta 2 arasındaki açı ile nokta 3 ve nokta 4 arasındaki açı olmak üzere iki farklı açı değeri hesaplanmıştır. Bu açılar arasındaki ortalama değer alınarak sonuç açı değeri hesaplanmıştır. ArUco işaretleyici için ise simetrik olmadığı için her bir işaretleyicinin dört köşesi için veri elde edildi ve her bir işaretleyici için hesaplanan açıların ortalaması alınmıştır. Çerçeveler arasındaki değişim ve birikimli değişim, hem piksel hem de santimetre cinsinden Tablo 3.13'e eklenmiştir. İki işaretleyici arasındaki mesafenin 8.8 cm olduğu bilindiğinden, piksel değerlerini santimetre değerlerine dönüştürmek için her çerçeve için bir piksel-santimetre (pxtocm) dönüşüm katsayısı oluşturulmuştur. Eksik veya hatalı çerçevelerde, önceki ve sonraki çerçeveler incelenerek lineer interpolasyon yapılmıştır.

Simetrik Marker ve Asimetrik Marker için iki farklı yöntemden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, görsel işleme yöntemiyle elde edilen sonuçlar arasında yüksek bir benzerlik olduğunu doğrulamaktadır. Bu durum, sistemin hem Simetrik Marker hem de Asimetrik Marker için başarılı bir şekilde çalışabileceğini doğrulamaktadır.

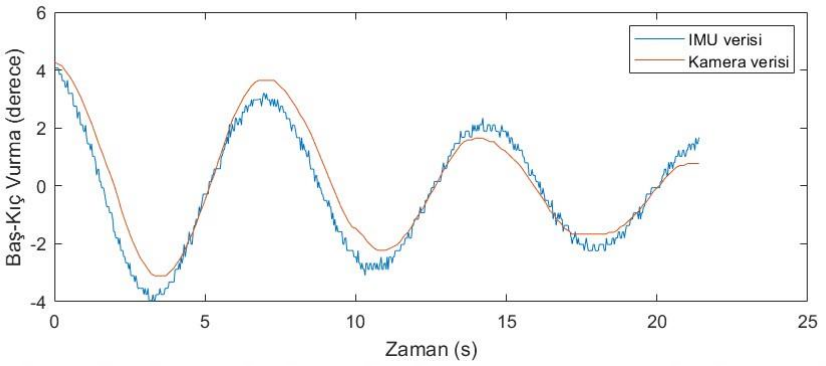
Tablo 3.14 Görüntü işleme Excel çıktısı.

Time (sec)	Avarage Angle	dx_px	dy_px	Lx_px	Ly_px	dx_cm	dy_cm	Lx_cm	Ly_cm	pxtocm
0.06673333	5.512261461	0	0	0	0	0	0	0	0	0.060863593
0.1001	5.494568339	0	0.25	0	0.25	0	0.015112	0	0.015112	0.060447203
0.13346667	5.688599141	-0.75	0	-0.75	0.25	-0.04534	0	-0.04534	0.015112	0.060447203
0.16683333	5.494568339	-0.25	0	-1	0.25	-0.01511	0	-0.06045	0.015112	0.060447203
0.2002	5.494568339	0	0	-1	0.25	0	0	-0.06045	0.015112	0.060447203
0.23356667	5.494568339	0	0	-1	0.25	0	0	-0.06045	0.015112	0.060447203
0.26693333	5.494568339	0	0	-1	0.25	0	0	-0.06045	0.015112	0.060447203
0.3003	5.688599141	-0.25	0	-1.25	0.25	-0.01511	0	-0.07556	0.015112	0.060447203
0.33366667	5.494568339	-0.75	0	-2	0.25	-0.04534	0	-0.12089	0.015112	0.060447203
0.36703333	5.494568339	0	0	-2	0.25	0	0	-0.12089	0.015112	0.060447203
0.4004	5.494568339	0	1	-2	1.25	0	0.060447	-0.12089	0.075559	0.060447203
0.43376667	5.688599141	-0.25	-0.5	-2.25	0.75	-0.01511	-0.03022	-0.13601	0.045335	0.060447203
0.46713333	5.688599141	-1	0	-3.25	0.75	-0.06045	0	-0.19645	0.045335	0.060447203
0.5005	5.688599141	0	0	-3.25	0.75	0	0	-0.19645	0.045335	0.060447203
0.53386667	5.882342338	-0.25	0	-3.5	0.75	-0.01511	0	-0.21157	0.045335	0.060447203
0.56723333	5.882342338	0	0	-3.5	0.75	0	0	-0.21157	0.045335	0.060447203
0.6006	5.882342338	0	0	-3.5	0.75	0	0	-0.21157	0.045335	0.060447203
0.63396667	5.706292262	-0.25	-0.25	-3.75	0.5	-0.01522	-0.01522	-0.22824	0.030432	0.060863593
0.66733333	5.706292262	0	0	-3.75	0.5	0	0	-0.22824	0.030432	0.060863593
0.7007	5.706292262	-0.5	0	-4.25	0.5	-0.03043	0	-0.25867	0.030432	0.060863593
0.73406667	5.884472168	-0.25	0.25	-4.5	0.75	-0.0151	0.015102	-0.27184	0.045307	0.060408736
0.76743333	5.884472168	0	0	-4.5	0.75	0	0	-0.27184	0.045307	0.060408736
0.8008	5.884472168	0	0	-4.5	0.75	0	0	-0.27184	0.045307	0.060408736
0.83416667	5.884472168	0	0	-4.5	0.75	0	0	-0.27184	0.045307	0.060408736
0.86753333	5.884472168	0	0	-4.5	0.75	0	0	-0.27184	0.045307	0.060408736
0.9009	5.667493783	-0.75	0.25	-5.25	1	-0.04534	0.015112	-0.31735	0.060447	0.060447203
0.93426667	5.903501888	-0.25	-0.5	-5.5	0.5	-0.01521	-0.03041	-0.33453	0.030412	0.060824327
0.96763333	5.903501888	0	0	-5.5	0.5	0	0	-0.33453	0.030412	0.060824327
1.001	5.903501888	0	0	-5.5	0.5	0	0	-0.33453	0.030412	0.060824327
1.03436667	5.709992128	-0.75	0.5	-6.25	1	-0.04534	0.030224	-0.3778	0.060447	0.060447203

Bu çalışmada, IMU kayıtları ile simetrik ve asimetrik araçlardan elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılarak sonuçların doğruluğu incelenmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda, her iki sonucun da birbirleriyle yüksek oranda benzeştiği tespit edilmiştir. Bu durum, hem simetrik hem de asimetrik markerlerin deneysel sistemlerde kullanılmasının uygun olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, sistemin güvenilirliğini ve doğruluk seviyesini desteklemektedir. Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'de görüldüğü gibi yazılım sonuçları ile IMU ölçüm sonuçları yeterince uyumlu bulunmuştur.



Şekil 3.34 D275 yükleme durumu W1 dalgası (1 yıl yineleme periyotlu tasarım dalga koşulu).



Şekil 3.35 D275 yükleme durumu modelin baş-kıç vurma serbest salınımı.

4
DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, Bölüm 3'de tasarımı verilen konik yarı batık yüzer rüzgar türbininin dalga baseninde rüzgar, dalga ve rüzgar-dalga üç boyutlu denge durumunu; öncelikle sırf düzenli dalga koşullarında (Tablo 3.5) dalga periyodunun etkisi belirlenecek ve ikinci aşamada tasarım rüzgar ve düzensiz dalga koşullarında (Tablo 3.2 ve 3.3) elde edilen deney sonuçları tartışılacaktır.

4.1 Düzenli Dalga Durumu

Tablo 3.5'te verilen ve Tablo 4.1'de görülen yükleme koşullarındaki 12 adet düzenli dalga durumu tartışılmıştır. Düzenli dalga testleri modelin 165 mm, 275 mm ve 435 mm'deki üç farklı su çekiminde gerçekleştirilmiştir. Dalganın geldiği yönde modele bağlı ön halat ve yandan bağlı iki halat ile toplam üç halatta oluşan kuvvet, baş-kıç vurma, yalpa, ileri-geri öteleme ve dalıp-çıkma serbestlik yönündeki modelin hareketleri incelenmiştir. Yapılan tüm düzenli dalga testlerinin kayıt uzunluğu 5 dakikadır. Ancak sakin deniz durumundan dalgalı duruma geçiş süresindeki süreksizliklerden dolayı alınan kaydın ilk 2 dakikası kesilmiştir. İncelenen modelin hareketlerinin ve halat kuvvetlerinin dalga altındaki zaman serisi ve Fourier Dönüşümü kullanılarak genlik spektrumu ve spektral yoğunluk grafikleri çizdirilmiştir.

Fourier Dönüşümü, bir sinyalin frekans bileşenlerini belirlemek için kullanılan matematiksel bir yöntemdir. Bir sinyalin zaman etki alanından frekans etki alanına taşınmasına olanak tanır. Bu yöntem, sinyali farklı frekanstaki harmoniklerin toplamı olarak görür ve sinyale en çok katkıda bulunan dalga boylarını belirler.

Tablo 4.1 Düzenli dalga durumları

	Model			Prototip		
Durum	H (m)	T(s)	f (Hz)	H (m)	T(s)	f (Hz)
W8R1	0.08	0.8	1.25	4	5.66	0.18
W8R2	0.08	0.92	1.09	4	6.51	0.15
W8R2D15*	0.08	0.92	1.09	4	6.51	0.15
W8R3	0.08	1.1	0.91	4	7.78	0.13
W8R4	0.08	1.18	0.85	4	8.34	0.12
W8R5	0.08	1.35	0.74	4	9.55	0.1
W8R5D15*	0.08	1.35	0.74	4	9.55	0.1
W15R1	0.15	1.1	0.91	7.5	7.78	0.13
W15R2	0.15	1.24	0.81	7.5	8.77	0.11
W15R3	0.15	1.55	0.65	7.5	10.96	0.09
W15R4	0.15	1.71	0.58	7.5	12.09	0.08
W15R5	0.15	2	0.5	7.5	14.14	0.07

* Modele doğru 15º açı ile gelen dalga

Zamana bağlı bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt \tag{4.1}$$

Burada;

ω: açısal frekansı,

t: zamanı,

$F(\omega)$: açısal frekansa bağlı, frekans alanındaki sinyali gösteren fonksiyonu göstermektedir.

Genelde $\omega = 2\pi f$ formülü kullanılarak açısal frekans hertz cinsinden frekansa dönüştürülür. Bu dönüşüm sonucu Fourier dönüşümü aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-2\pi i f t}dt \tag{4.2}$$

Fourier dönüşümü n^2 karmaşıklığına sahiptir. Fourier dönüşümü işlemi sırasında sinyal verisinin her bir noktası için diğer verileri de içeren matris oluşturulur. Oluşturulan bu matrisin boyutu, sinyaldeki veri sayısına eşittir. Bu matris ile her bir veri noktasının diğer veri noktaları ile korelasyonu hesaplanır. Bu hesaplama sinyaldeki tüm veriler için yapılır ve bu hesaplama n^2 işlem adımı gerektirir. Bu yöntem uzun verilere sahip sinyallere uygulandığında çok uzun işlem süresi gerektirmektedir. Bu çalışmadaki verilerin uzunluğundan dolayı bir bilgisayar algoritması olan Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) yöntemi kullanılmıştır. FFT algoritması Fourier dönüşümünden farklı olarak sinyal verilerini alt dönüşümlere ayırır ve daha sonra bu alt dönüşümlerin birleştirilmesiyle sinyalin frekans bileşenlerini hesaplar. FFT n.log(n) karmaşıklığına sahiptir dolayısı ile Fourier dönüşümüne göre daha hızlı ve verimlidir.

Modelin hareketlerinin ve modele bağlı halatlarda oluşan kuvvetlerin sinyalleri uzun süreli yani çok fazla veriye sahip olduğu için FFT analizi sonucunda elde edilen spektrum çalkantılı olmaktadır. FFT'nin daha doğru bir şekilde hesaplanması, oluşturulan spektrumun daha anlaşılabilir ve yüksek çözünürlüklü olması için pencereleme yöntemi kullanılmıştır. Sinyal belirli zaman aralığındaki parçalara ayrılmış, her bir parçada Chebyshev penceresi kullanılmıştır. Pencereleme sonrası sinyalin gücünde azalma olduğu için pencerelenmiş sinyal, azalma oranı ile genişletilerek pencereleme öncesindeki gücü ile aynı güce getirilmiştir. Sonrasında her bir parçaya FFT uygulanmış ve ortalaması alınmıştır.

Bu bölümde, yapılan düzenli dalga testlerinden yalnız iki tanesi (W8R1 ve W8R5) modelin 275 mm su çekimindeki durumunda incelenmiştir. Bu iki farklı düzenli dalgaya ek olarak sırf rüzgar, sırf dalga ve dalga rüzgar kombinasyon testlerinin sonuçları tartışılmıştır. Modelin baş-kıç vurma, ileri-geri öteleme, dalıp-çıkma

hareketleri ve 1. halatın (ön halat) kuvveti incelenmiştir. Bu bölümde verilmeyen Tablo 4.1'deki diğer düzenli dalga durumları ve Tablo 4.2'deki tasarım ve ekstrem dalga durumları etkisinde yan halatların (2 ve 3) kuvvetinin zaman serisi, yalpa hareketinin zaman serisi, genlik spektrumları ve güç spektral yoğunluğu grafikleri modelin 165 mm, 275 mm ve 435 mm su çekimi durumları için Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyonu Birimi raporu olarak yayınlanan Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbinlerinin Hidrodinamik Davranışının Araştırılması adlı raporda verilmiştir [32].

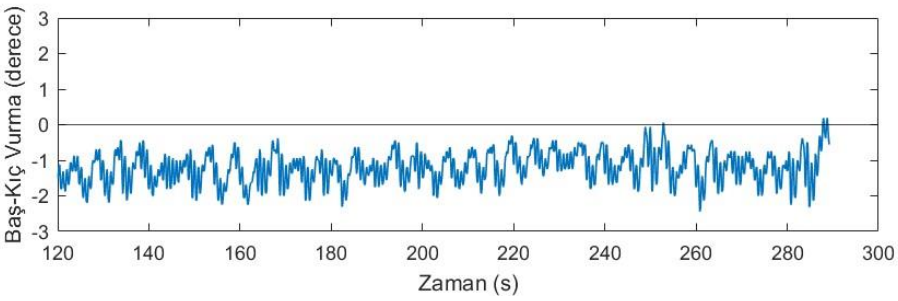
4.1.1 D275 Yükleme Durumu W8R1 Dalgası

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan düzenli dalga testlerinden en küçük periyotlu ve dalga dikliği en yüksek olan W8R1 dalgası (H=0.08 m, T=0.8 s) etkisinde modelin yapmış olduğu baş-kıç vurma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.1 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.1'de ayrıca 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu gösterilmiştir. Modele gelen dalga düzenli olduğu halde hareketin zaman serisi incelendiğinde lineer olmayan etkileşimlerin olduğu görülmektedir. Benzer sonuç Zhao vd. (2019) tarafından da gözlemlenmiştir ve araştırmacılar farklı dalga dikliklerindeki düzenli dalgalar altında yüzer rüzgar türbininin hareketini, hidrodinamiğini ve bağlama halatlarının kuvvetini incelediği çalışmada dalga dikliğinin arttığında modelin davranışındaki ve hidrodinamik yüklerdeki lineer olmama durumunun belirginleştiği sonucuna varmışlardır. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında pik frekansın gönderilen dalga frekansı (1.25 Hz) ile örtüştüğü görülmüştür. Bundan sonra modelin yaptığı en önemli baş-kıç vurma hareketi ise modelin baş-kıç vurma doğal frekansı ile uyumlu olmasıdır. Hareketin zaman serisine bakıldığında baş-kıç vurma hareketinin minimum -2.44° olduğu görülmektedir. Baş-kıç vurma salınımı -1.2° etrafında salınmakta ve 0 derecenin altında kalmaktadır. Model dalga etkisi ile negatif yöne doğru dönmekte fakat gönderilen dalganın periyodu küçük olduğu için başlangıç konumuna geri gelemeden tekrar dalga etkisinden dolayı negatif yöne doğru dönme hareketi yapmaktadır.

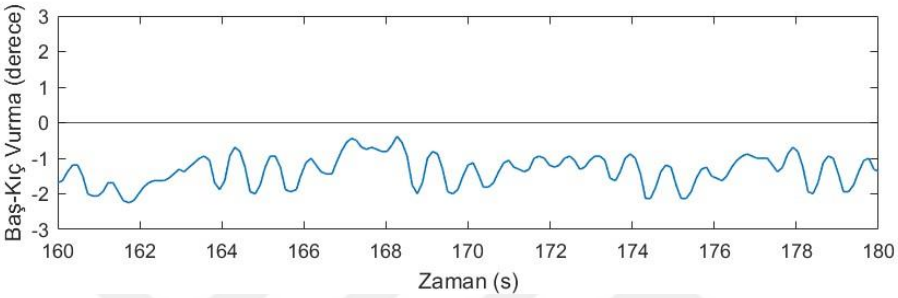
Modelin 275 mm su çekiminde W8R1 dalgası (H=0.08 m, T=0.8 s) etkisinde yapmış olduğu ileri-geri öteleme hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.2 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.2'de ayrıca 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Modele gelen dalga düzenli olduğu halde hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin en fazla 3 cm ötelendiği ve zaman serisinde modele gönderilen düzenli dalganın oluşturduğu salınıma ek olarak daha büyük genlikte ve periyotta bir salınımın da olduğu görülmektedir. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansı olan 1.25 Hz'de en büyük pik değeri görülmektedir. Üçüncü pik frekans ileri-geri öteleme doğal frekansında, ikinci pik frekans ise ileri-geri öteleme doğal frekansının iki katında görülmüştür. Ayrıca hareketin zaman serisine bakıldığında ileri-geri öteleme hareketinin pozitif yönde (dalganın gittiği yön) artış trendinde olduğu görülmektedir. Bu da modelin bu yönde sürüklendiğini göstermektedir. Modele bağlı olan halatlar gevşek bağlandığı (catenary form) için model bir miktar sürüklenmektedir.

Modelin 275 mm su çekimi durumunda W8R1 dalgası (H=0.08 m, T=0.8 s) etkisinde modelin ön tarafına (dalganın geldiği yön) bağlı 1. halatta oluşan kuvvetin grafiği Şekil 4.3 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.3'te ayrıca 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Yine modele gelen dalga tek genlikli ve frekanslı düzenli bir dalga olduğu halde kuvvetin zaman serisi incelendiğinde Şekil 4.3 (b)'de de görülen halat kuvvetinin daha büyük periyotlu bir dalga davranışı yaptığı görülmektedir. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında pik frekansın gönderilen dalga frekansı (1.25 Hz) ile örtüştüğü görülmüştür. İkinci pik ise modelin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın bir değerde görülmüştür. Ayrıca halat kuvvetinin spektrumunda gönderilen düzenli dalganın frekansının katlarında da pikler görülmektedir. Şekil 4.3 (a)'da halat kuvvetinin artış trendinde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak modele gelen dalga kuvvetinin zamanla modeli halatın bağlı olduğu yönün tersine (dalganın gittiği yön) doğru sürüklemesidir. Bu sürükleme etkisi Şekil 4.2 (a)'da modelin ileri-geri öteleme hareketinin zaman serisinde görülmektedir. İleri-geri öteleme zaman serisindeki pozitif yönde artış trendi, modelin dalganın gittiği yöne doğru sürüklendiğini göstermektedir.

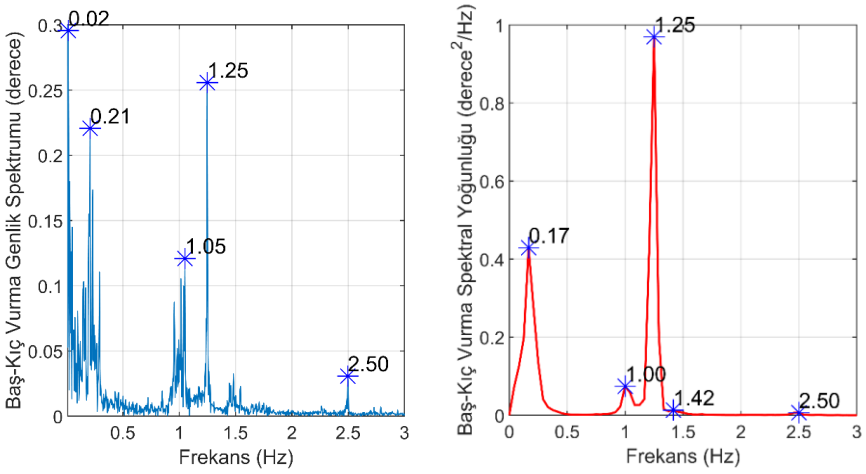
Modelin 275 mm su çekiminde W8R1 dalgası (H=0.08 m, T=0.8 s) etkisinde yapmış olduğu dalıp-çıkma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.4 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.4'te ayrıca 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Modele gelen dalga düzenli olduğu halde hareketin zaman serisi incelendiğinde modele gönderilen düzenli dalganın oluşturduğu salınıma ek olarak daha büyük genlikte ve periyotta bir salınımın da olduğu görülmektedir. Modelin maksimum ve minimum dalıp-çıkma hareketi yaklaşık 0.77 cm ile -0.85 cm olarak ölçülmüştür. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansı olan 1.25 Hz'de en büyük pik değeri görülmektedir. İkinci en büyük frekans ise 0.42 Hz olan modelin dalıp-çıkma doğal frekansında görülmüştür.



(a)

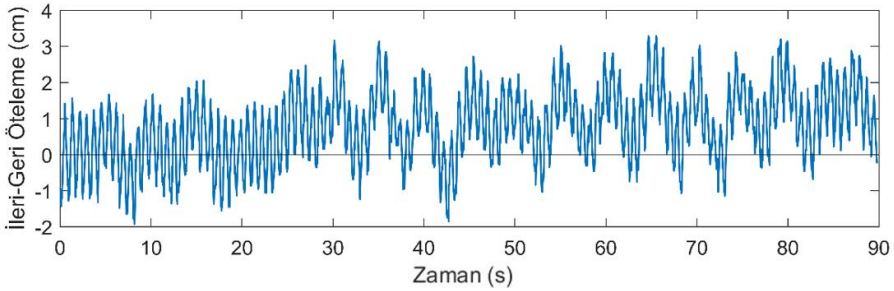


(b)

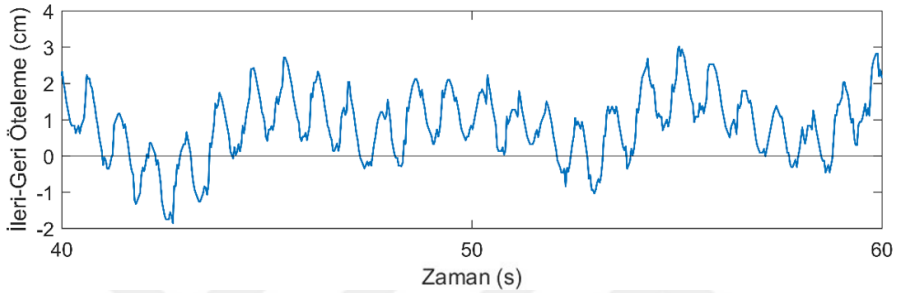


(c) (d)

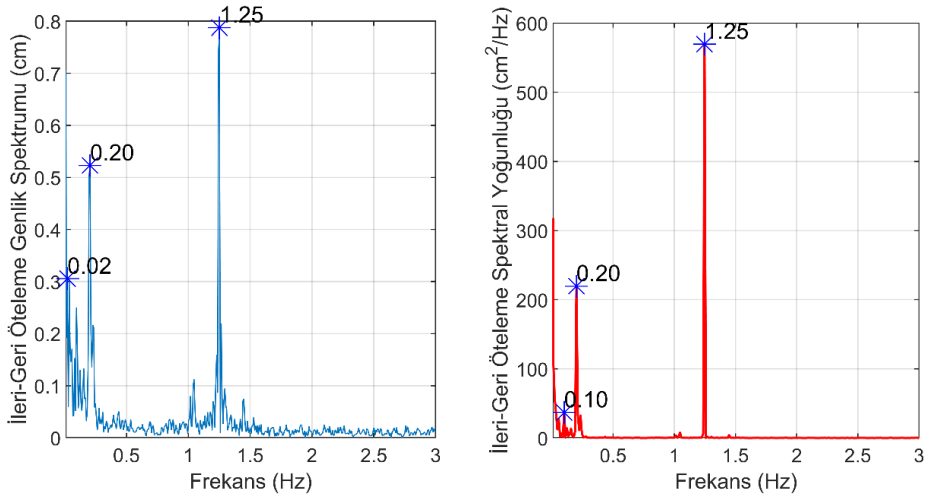
Şekil 4.1 W8R1 (H= 0.08 m, T=0.8 s; Prototip: H=4 m T=5.66 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-300 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



(a)

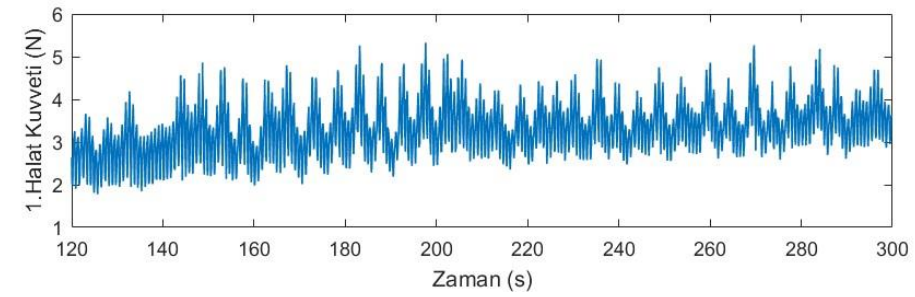


(b)

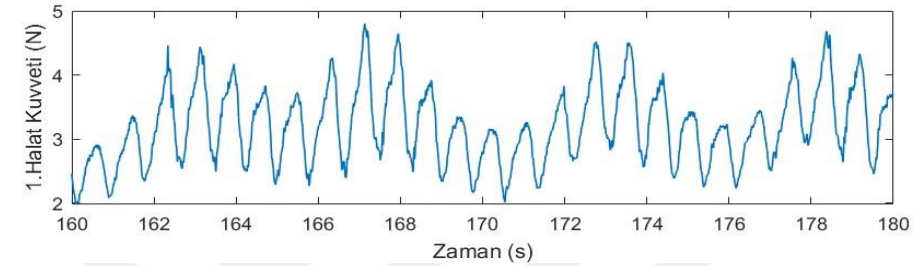


(c) (d)

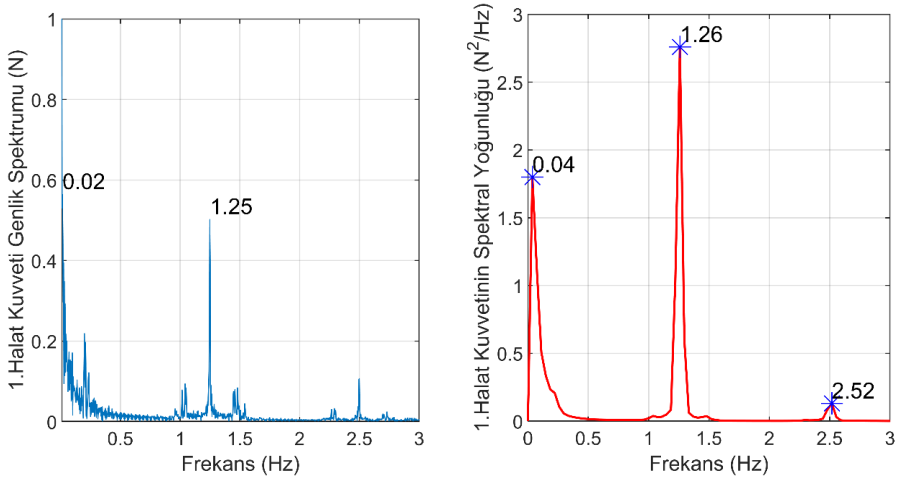
Şekil 4.2 W8R1 (H= 0.08 m, T=0.8 s; Prototip: H=4 m T=5.66 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 0-90 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



(a)

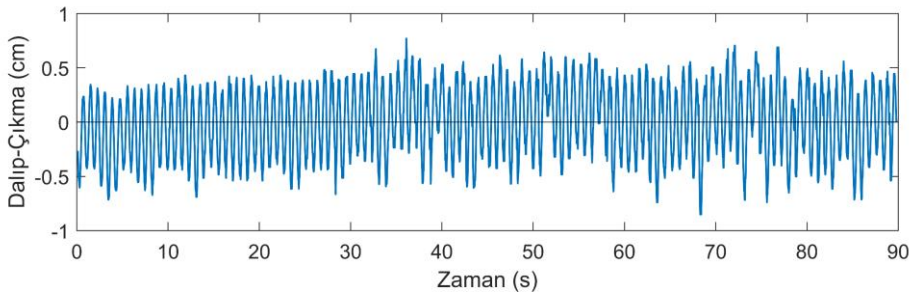


(b)

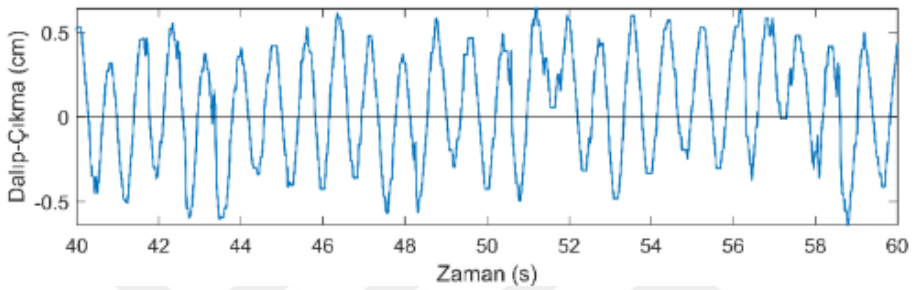


(c) (d)

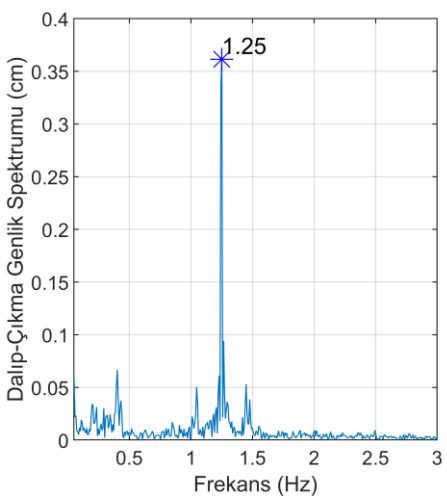
Şekil 4.3 W8R1 (H= 0.08 m, T=0.8 s; Prototip: H=4 m T=5.66 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



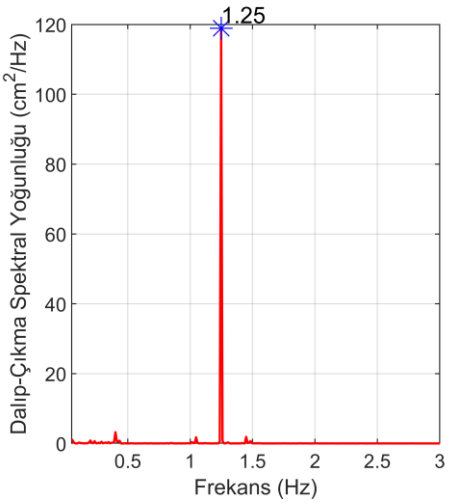
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.4 W8R1 (H= 0.08 m, T=0.8 s; Prototip: H=4 m T=5.66 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-90 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.

4.1.2 D275 Yükleme Durumu W15R3 Dalgası

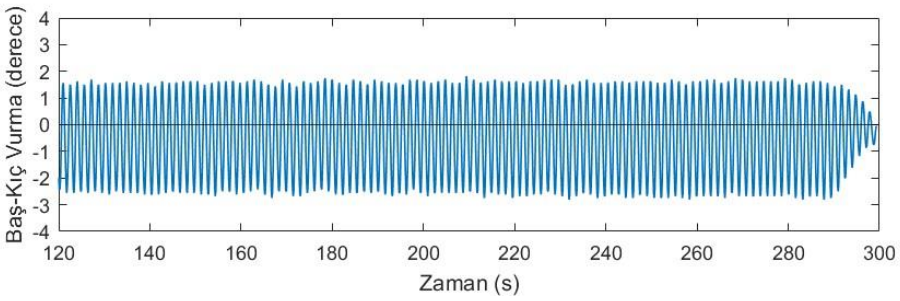
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan düzenli dalga testlerinden W15R3 dalgası (H=0.15 m, T=1.55 s) etkisinde modelin yapmış olduğu baş-kıç vurma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.5 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.5'te ayrıca 160-180 saniye arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu gösterilmiştir. Modele gelen düzenli dalga sonucu modelin baş-kıç vurma hareketi de düzenlidir. W8R1 dalgasına göre dalga periyodu ve yüksekliği daha büyük olan bu dalga altında modelin yaptığı baş-kıç vurma salınımının ortalaması W8R1 dalgasına göre 0°'ye daha yakındır. Salınım -0.48° etrafında olmaktadır. Hareketin genlik spektrum grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansında pik görülmektedir ve bu pik noktasındaki genlik değeri yaklaşık 2° dir. W15R3 dalgası W8R1 dalgasından daha büyük olduğundan, dalganın modele uyguladığı kuvvet de daha büyük olmuştur dolayısıyla bu dalgadan dolayı oluşan baş-kıç vurma hareketinin genliği daha büyük ölçülmüştür. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansı olan yaklaşık 0.65 Hz'de tek pik değeri görülmektedir.

Modelin 275 mm su çekiminde W15R3 dalgası (H= 0.15 m, T=1.55 s) altında yapmış olduğu ileri-geri öteleme hareketinin grafiği Şekil 4.6 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.6'da ayrıca 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Modele gelen düzenli dalga sonucu modelin ileri-geri öteleme hareketinin de düzenli olduğu görülmüştür. W8R1 dalgası sonucu oluşan ileri-geri öteleme hareketi ile kıyaslandığında; hareketin daha düzenli olduğu ve genliğinin daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca W8R1 dalgasında görülen pozitif yöndeki artış trendi görülmemiştir. Bu durumda modelin W15R3 dalgası altında sürüklenmediğini yaklaşık 0 cm etrafında salınım yaptığı söylenebilir. Hareketin genlik spektrum grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansında (0.64 Hz) yaklaşık 4.4 cm değerinde pik görülmektedir. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansı olan 0.64 Hz'de tek pik değeri görülmektedir.

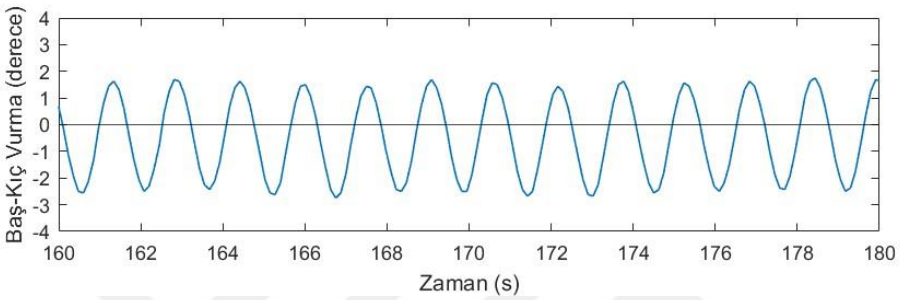
Modelin 275 mm su çekimi durumunda W15R3 dalgası (H= 0.15 m, T=1.55 s) etkisinde modelin ön tarafına (dalganın geldiği yön) bağlı 1. halatta oluşan kuvvetin grafiği Şekil 4.7 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.7'de ayrıca 160-180 s arasındaki

kuvvetin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Modele gelen dalga düzenli olduğundan dolayı halat kuvvetinin zaman serisi de düzenli olmuştur. Şekil 4.6 (a)'da görülen ileri-geri öteleme hareketinin zaman serisinde herhangi bir artış trendi olmamış ve model sürüklenmemiştir ve ayrıca halatta sürüklenme kaynaklı ekstra bir kuvvet de oluşmamıştır. Bundan dolayı modelin ön tarafına bağlanan W15R3 dalgası etkisindeki halatta, W8R1 dalgası etkisinde oluşan halat kuvvetine göre daha küçük bir kuvvet oluştuğu görülmektedir. Spektrumlarda ise en büyük pik değer W15R3 dalgasının frekansında görülmüştür. Sırası ile diğer pik değerler dalga frekansının 2, 3 ve 4 katında oluşmuştur. Halat gerilmelerinde pik değerin katlarında da pikler görülmektedir.

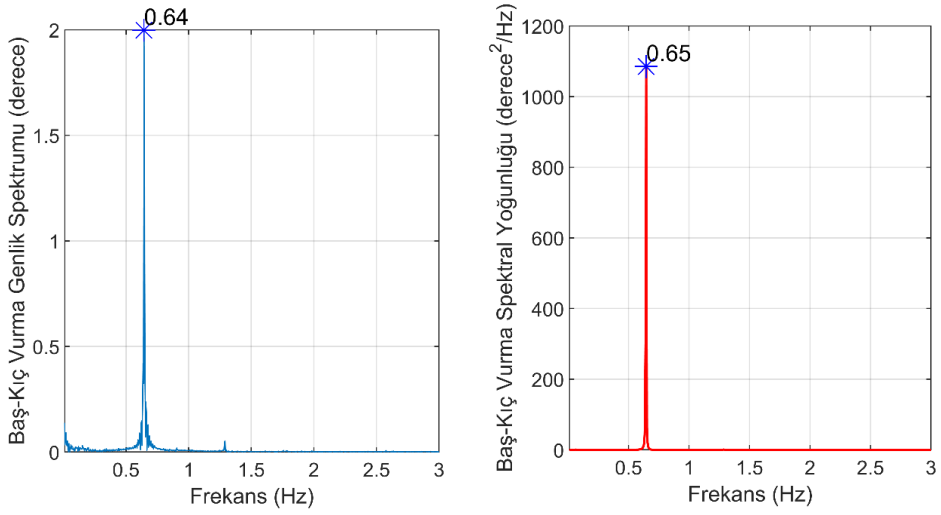
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan düzenli dalga testlerinden W15R3 dalgası (H=0.15 m, T=1.55 s) etkisinde modelin yapmış olduğu dalıp-çıkma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.8 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.8'de ayrıca 40-60 saniye arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu gösterilmiştir. Modele gelen düzenli dalga sonucu modelin dalıp-çıkma hareketi de düzenlidir. Salınım yaklaşık -2.5 – 2.5 cm bandında olmaktadır. Hareketin genlik spektrum grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansında pik görülmektedir ve bu pik noktasındaki genlik değeri yaklaşık 2.5 cm' dir. W15R3 dalgası W8R1 dalgasından daha büyük olduğundan, dalganın modele uyguladığı kuvvet de daha büyük olmuştur dolayısıyla bu dalgadan dolayı oluşan dalıp-çıkma hareketinin genliği yaklaşık 3 kat daha büyük ölçülmüştür. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansı olan yaklaşık 0.64 Hz'de tek pik değeri görülmektedir.



(a)

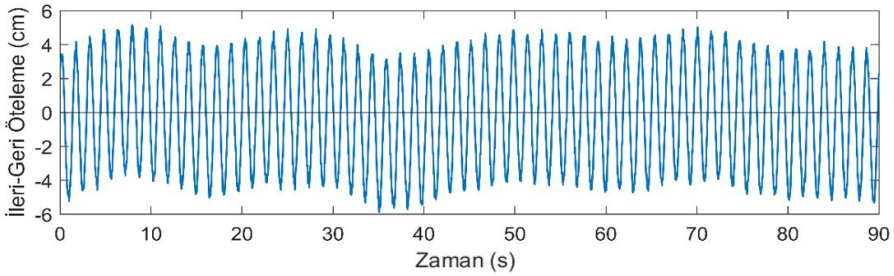


(b)

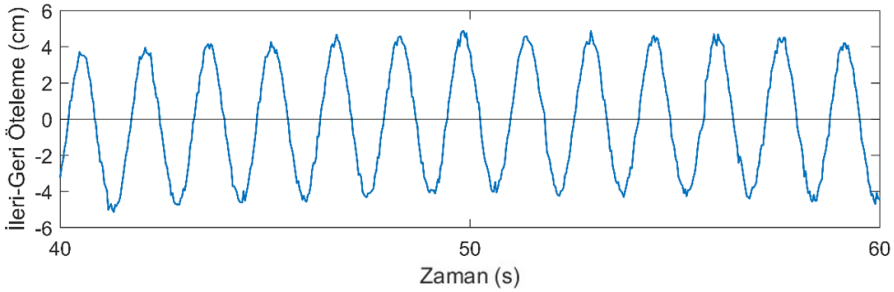


(c) (d)

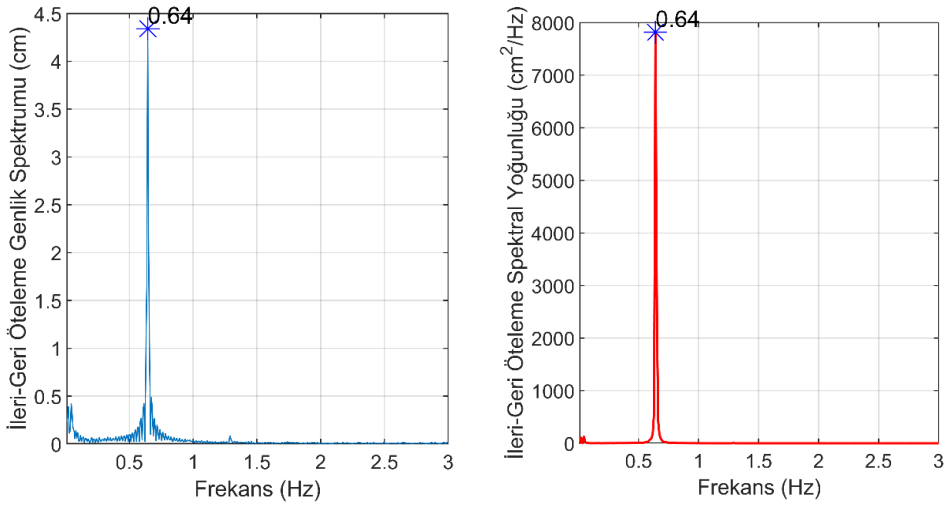
Şekil 4.5 W15R3 (H= 0.15 m, T=1.55 s; Prototip: H=7.5 m T=10.69 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-300 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



(a)

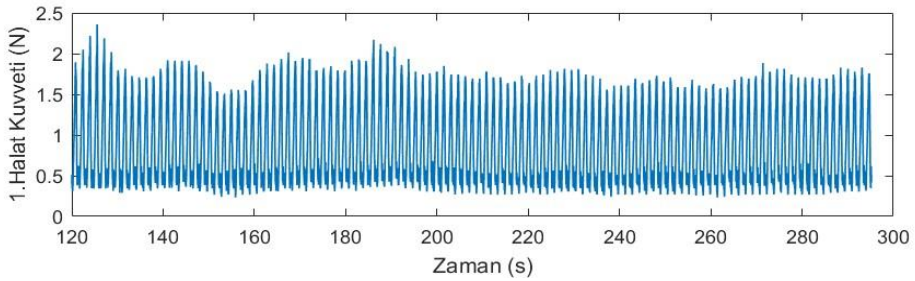


(b)

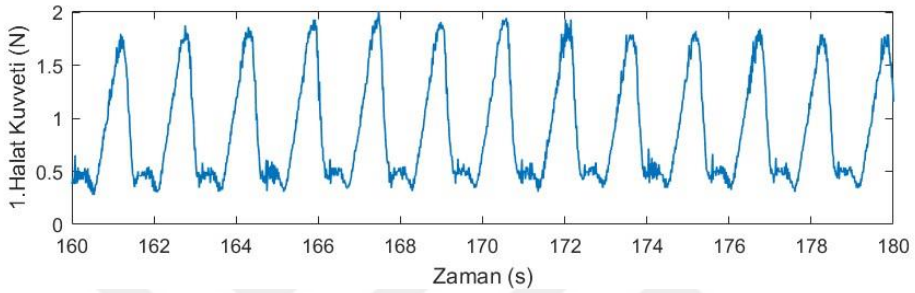


(c) (d)

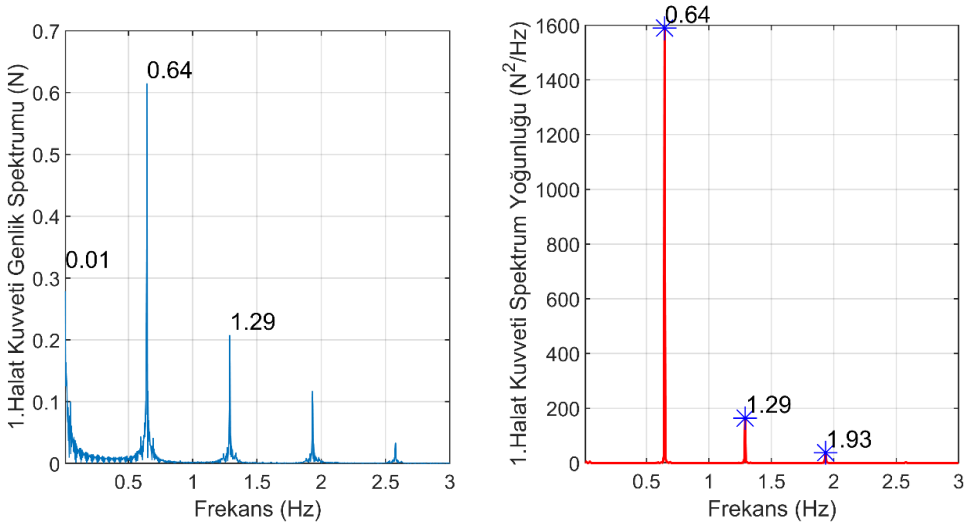
Şekil 4.6 W15R3 (H= 0.15 m, T=1.55 s; Prototip: H=7.5 m T=10.69 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 0-90 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



(a)

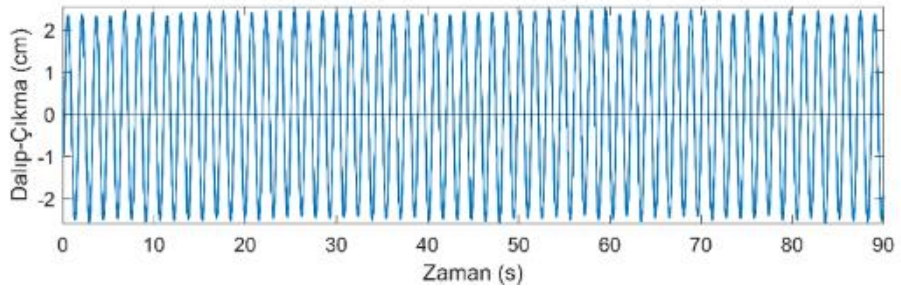


(b)

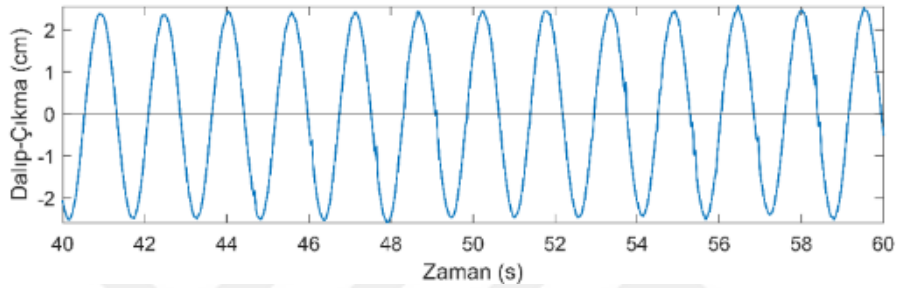


(c) (d)

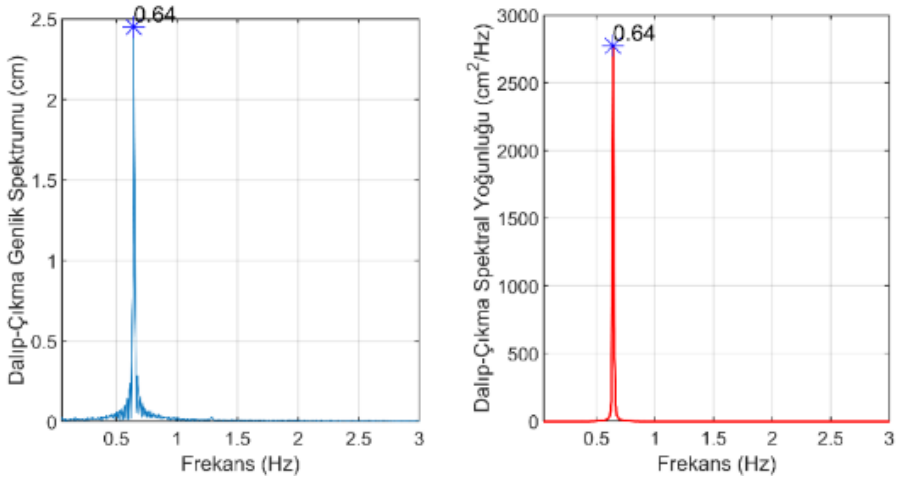
Şekil 4.7 W15R3 (H= 0.15 m, T=1.55 s; Prototip: H=7.5 m T=10.69 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



(a)



(b)



(c) (d)

Şekil 4.8 (H= 0.15 m, T=1.55 s; Prototip: H=7.5 m T=10.69 s) düzenli dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-90 sarasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.

4.2 Bir Yıl Yineleme Periyodu için Ortalama (Operasyonel) Tasarım Durumu

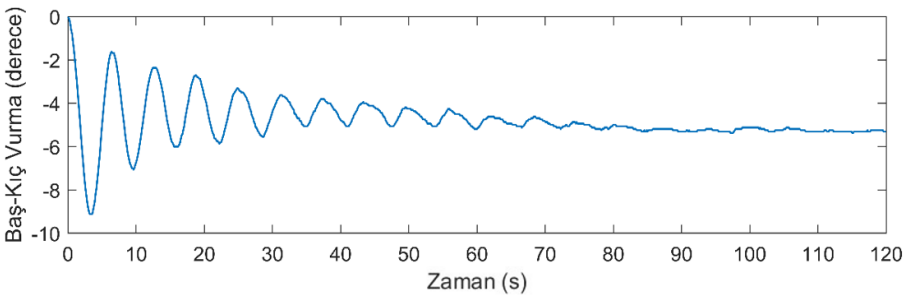
4.2.1 Sırf Rüzgar Durumu

Model üzerinde rüzgarın oluşturduğu itme kuvvetini oluşturan drone sabit hızda üç farklı devirde çalıştırılmıştır. Droneun bu farklı devirlerde çalışması sonucu oluşturduğu itme kuvveti Bölüm 3 Tablo 3.6'da verilmiştir. Tasarım rüzgarı olarak dronun en yavaş çalıştığı 1. devirdeki rüzgar alınmıştır. Bu rüzgarın oluşturduğu itme kuvveti ortalama 4.74 N ölçülmüştür (bkz. Bölüm 3).

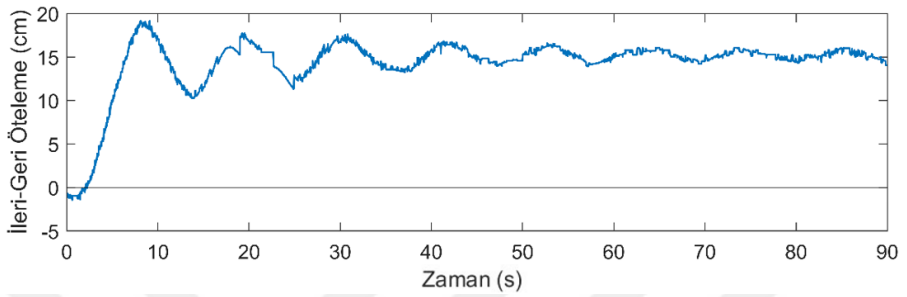
Şekil 4.9 (a)'da modelin 275 mm su çekiminde tasarım rüzgarı (1.devir) etkisinde modelin yaptığı baş-kıç vurma hareketinin grafiği verilmiştir. Drone ilk çalıştığında statik haldeki model -9.12° dönmüştür. Sonrasında ise modelin yapmış olduğu salınımın genliği giderek azalmıştır. 90 s'den sonra modelin yaptığı baş-kıç vurma hareketinin açısı yaklaşık -5.3°'de sabitlenmiştir.

Şekil 4.9 (b)'de modelin 275 mm su çekiminde tasarım rüzgarı (1.devir) etkisinde modelin yaptığı ileri-geri öteleme hareketinin grafiği verilmiştir. Drone ilk çalıştığında statik haldeki model 19.15 cm sürüklenmiştir. Halatların gerilmesi sonucu model başlangıç konumuna doğru geri sürüklenerek bir salınım oluşturmuştur. Sonrasında ise modelin yapmış olduğu salınımın genliği giderek azalmış ve yaklaşık 0 cm olmuştur. Salınımın genliği 0 cm olduğunda model dalganın gittiği yöne doğru 15.58 cm sürüklenerek pozisyonunu korumuştur.

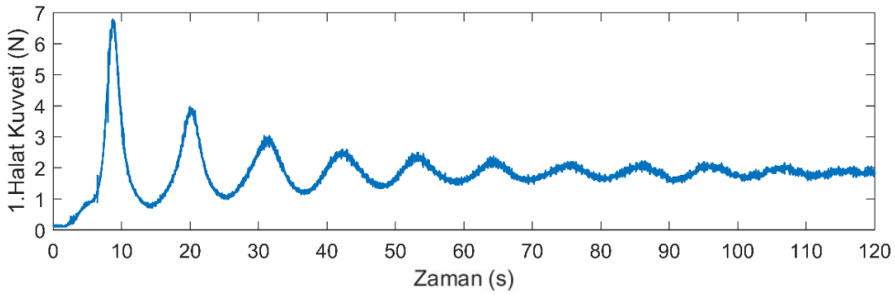
Şekil 4.9 (c)'de tasarım rüzgarı etkisinde modelin ön tarafına (dalganın geldiği yön) bağlı 1. halatta oluşan kuvvetin grafiği verilmiştir. Drone ilk çalıştığında statik haldeki modelin ön halatındaki maksimum kuvvet 6.79 N olmuştur. Bu kuvvet dronun oluşturduğu itme kuvvetinden (4.74 N) yaklaşık olarak %40 daha büyüktür. Sonrasında ise modelin yapmış olduğu salınımın genliği giderek azalmıştır. Salınımın genliği 0 N olduğunda halattaki gerilme sabit 1.58 N olmuştur. Yani halatta statik kuvvetin dronun yarattığı itme kuvvetinden yaklaşık olarak %65 daha az olduğu görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9 275 mm su çekimli modelin tasarım rüzgarı etkisinde yaptığı: (a) baş-kıç vurma hareketi, (b) ileri-geri öteleme hareketi, (c) 1. halatın kuvveti zaman serisi.

4.2.2 Sırf Dalga Durumu

Üç farklı düzensiz dalga durumu incelenmiştir. Tablo 2'de görülen tasarım dalgaları Batı Karadeniz Bölgesi'nde yapılan çalışmada belirlenen sırasıyla yineleme periyotları R_p=1, R_p=10 ve R_p=100 yıl olan dalgalardır. Düzensiz dalga testleri modelin 165 mm, 275 mm ve 435 mm'deki üç farklı su çekiminde gerçekleştirilmiştir. Dalganın geldiği yönde modele bağlı ön halat ve yandan bağlı iki halat ile toplam üç halatta oluşan kuvvet, baş-kıç vurma, yalpa, ileri-geri öteleme ve dalıp-çıkma serbestlik yönündeki modelin hareketleri incelenmiştir. Yapılan tüm düzensiz dalga testlerinin uzunluğu 10 dakikadır. Ancak, sakin deniz durumundan

dalgalı duruma geçiş süresindeki süreksizlikten (yani dalganın üremeye başladığı ve türbine ulaştığı süre) dolayı yapılan hesaplarda alınan kaydın ilk 2 dakikası kesilmiştir. Operasyonel koşullardaki tasarım dalgası olarak yineleme periyodu 1 yıl olan W1 dalgası kabul edilmiştir. Bu bölümde de W1 dalgası modelin 275 mm su çekimi durumunda incelenmiş, W1 dalgasından dolayı oluşan modelin hareketlerinin ve halat kuvvetlerinin dalga altındaki zaman serisi ve Fourier Dönüşümü kullanılarak genlik spektrumu ve spektral yoğunluk grafikleri çizdirilmiştir.

Tablo 4.2 Düzensiz tasarım dalgası koşulları

		Model			Prototip		
Yineleme Periyodu (R_p Yıl)	Durum	H_s (m)	T_p(s)	f_p (Hz)	H_s (m)	T_p (s)	f_p (Hz)
1	W1	0.08	1.15	0.87	4.03	8.18	0.12
50	W2	0.15	1.55	0.65	7.48	10.98	0.09
100	W3	0.18	1.70	0.59	9.09	12.05	0.08

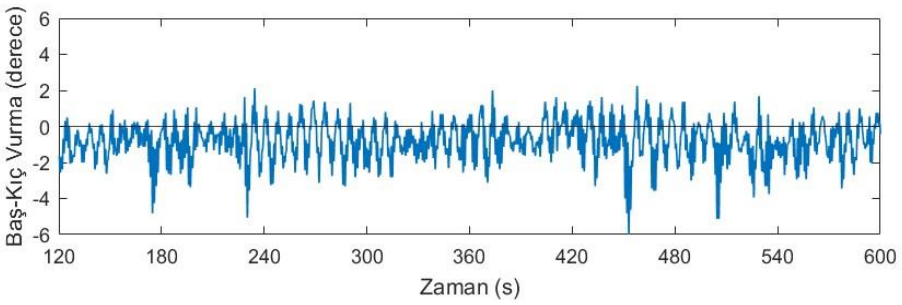
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=1 yıl yineleme periyodundaki W1 dalgası (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s) etkisinde modelin yapmış olduğu baş-kıç vurma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.10 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.10'da ayrıca 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisine bakıldığında baş-kıç vurma hareketinin minimum -6.07° olduğu görülmektedir. Ortalama salınım 0° altında kalmaktadır (-0.81°). Genlik spektrum grafiğinde, baş-kıç vurma serbest salınım frekansı olan 0.14 Hz'de en büyük pik değer görülmüştür, bu durum modelin doğal frekans bandındadır. İkici pik nokta ise W1 dalgasının pik frekans değerine yakın bir frekansta belirlenmiştir. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında da aynı durum söz konusudur.

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=1 yıl yineleme periyodundaki W1 dalgası (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s) etkisinde modelin yapmış olduğu ileri geri öteleme hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.11 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.11'de ayrıca

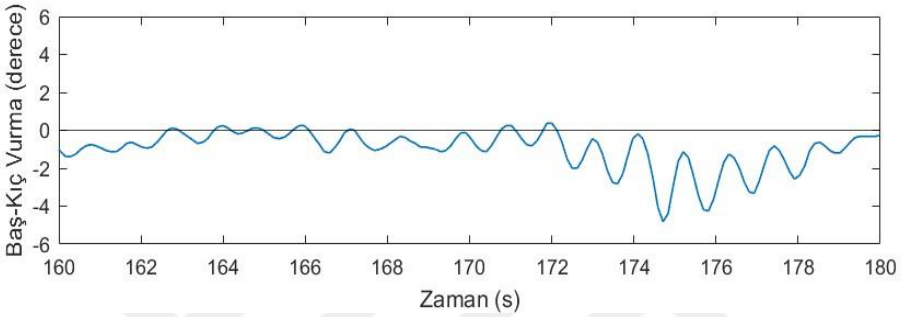
genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin en fazla 24.29 cm ötelendiği, -2.84-24.29 cm arasında ve 9.27 cm ortalama etrafında salınım yaptığı görülmüştür. Hareketin genlik spektrumuna ve güç spektral yoğunluğuna bakıldığında en yüksek pik değerin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın bir frekansta olduğu görülmüştür. İkinci büyük pik değer ise gönderilen dalganın pik frekans bandında belirlenmiştir.

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=1 yıl yineleme periyodundaki W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s) altında modelin ön tarafına (dalganın geldiği yön) bağlı 1. halatta oluşan kuvvetin grafiği Şekil 4.12 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.12'de ayrıca 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Kuvvetin zaman serisi incelendiğinde halat kuvvetinin birkaç kere pik yaptığı görülmektedir. Bu piklerden en büyüğü 22.18 N kuvvetindedir. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında en büyük pik değerin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın olduğu, ikinci pik değerin ise gönderilen dalganın pik frekans bandında olduğu görülmektedir. Üçüncü pik noktası ise gönderilen dalganın pik frekansının 1.5 katında görülmüştür.

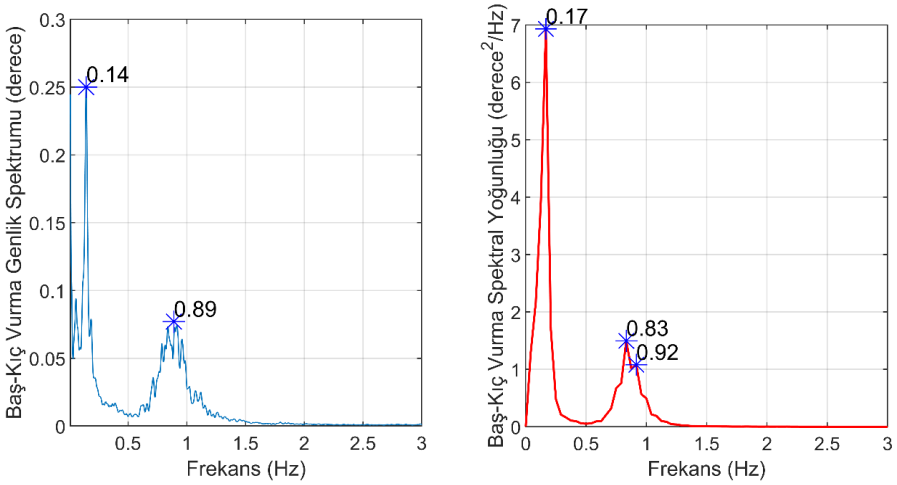
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=1 yıl yineleme periyodundaki W1 dalgası (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s) etkisinde modelin yapmış olduğu dalıp-çıkma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.13 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.13'te ayrıca 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin en fazla 1.73 cm battığı ve -1.73-1.7 cm arasında dalıp-çıkma hareketi yaptığı görülmüştür. Hareketin genlik spektrumuna ve güç spektral yoğunluğuna bakıldığında en yüksek pik değerin modelin dalıp-çıkma doğal frekansı olan 0.41 Hz frekansında olduğu görülmüştür. İkinci büyük pik değer ise daha geniş bir bantta olup gönderilen dalganın pik frekans bandında belirlenmiştir.



(a)

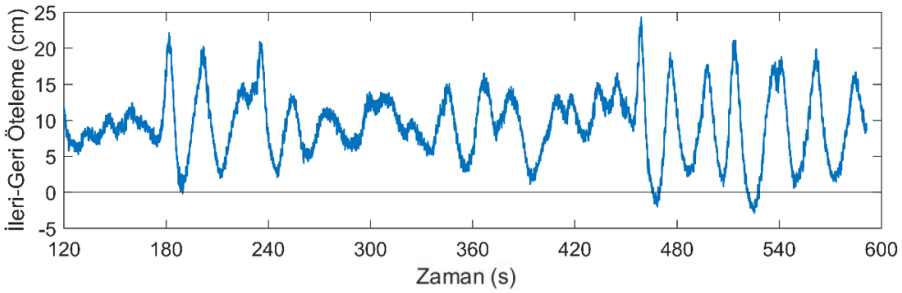


(b)

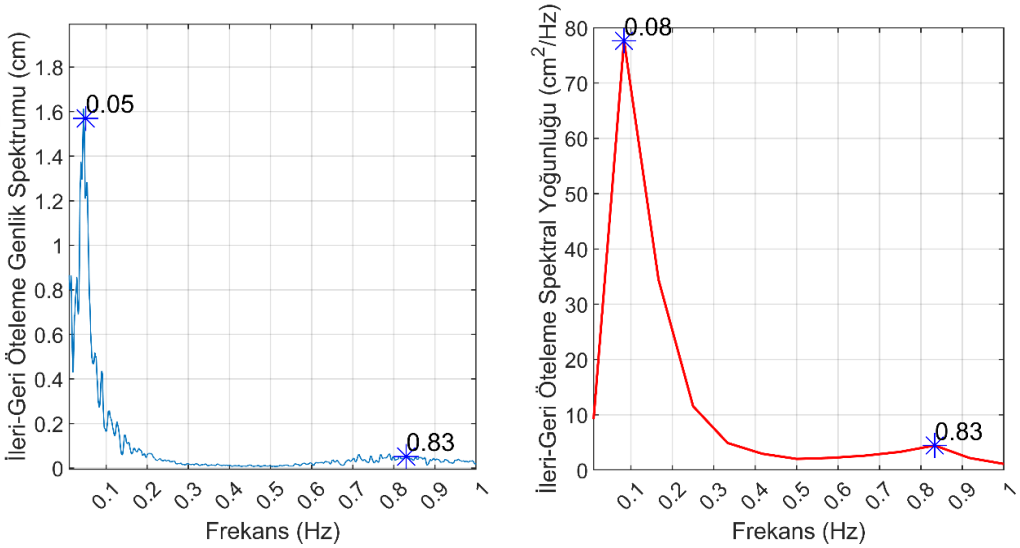


(c) (d)

Şekil 4.10 W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4.03 m, T_p=8.18 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.

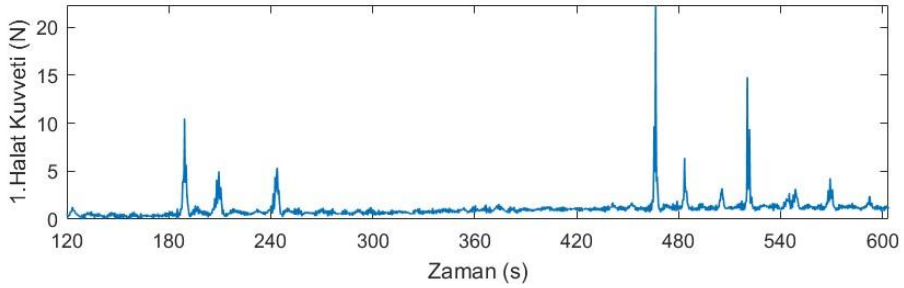


(a)

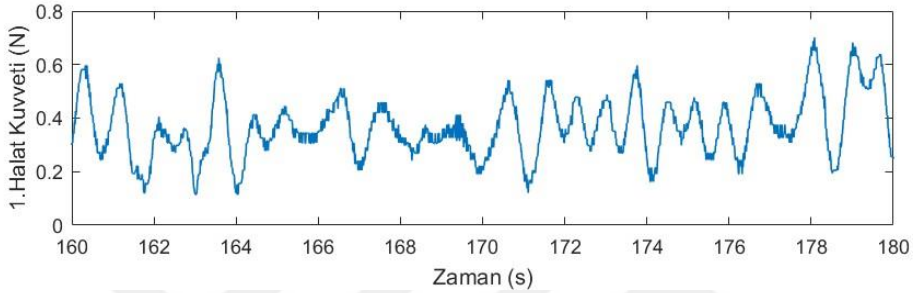


(b) (c)

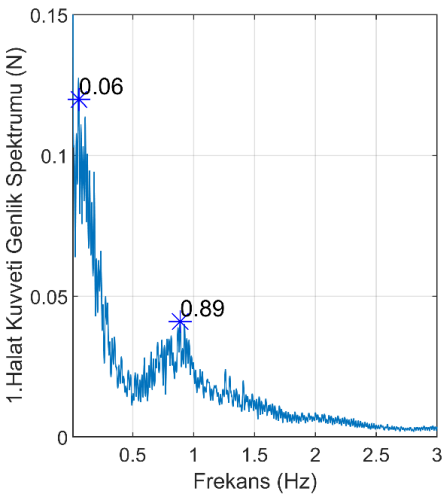
Şekil 4.11 W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4.03 m, T_p=8.18 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) genlik spektrumu, (c) güç spektral yoğunluğu.



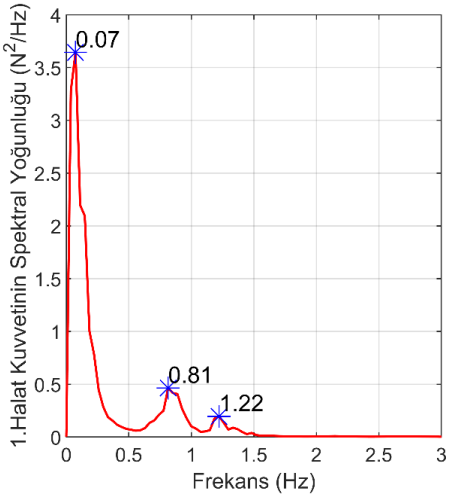
(a)



(b)

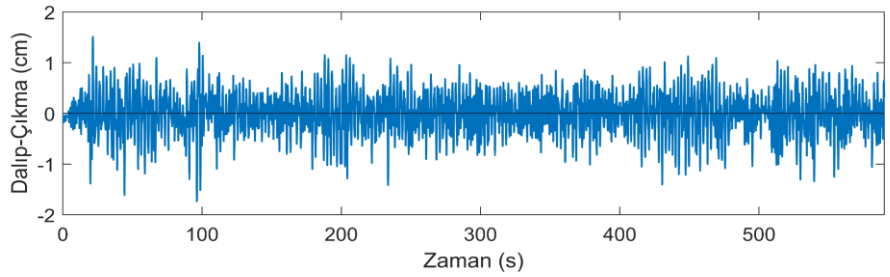


(c)

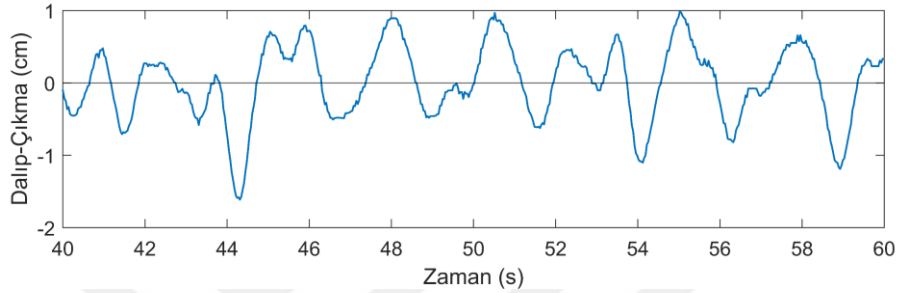


(d)

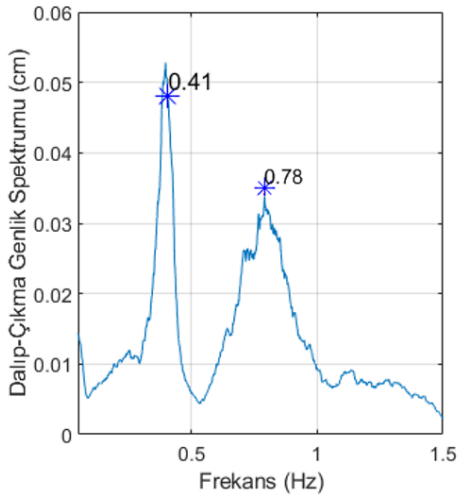
Şekil 4.12 W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4.03 m, T_p=8.18 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



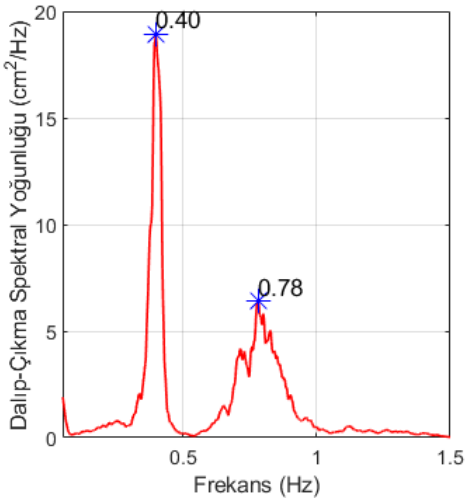
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.13 W1 (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4.03 m, T_p=8.18 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-600 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.

4.2.3 Rüzgar ve Dalganın Birlikte Olduğu Durum

Bölüm 4.2.1'de verilen tasarım rüzgarı ile Bölüm 4.2.2'de verilen tasarım dalgasının birlikte olması durumu incelenmiştir.

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=1 yıl yineleme periyodundaki W1 dalgası (H=0.08 m, T=1.15 s) ve 1. devirde droneun ürettiği 4.74 N itme kuvvetine sahip rüzgar kombinasyonu altında modelin yapmış olduğu baş-kıç vurma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.14 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.14'te ayrıca 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu gösterilmiştir. Hareketin zaman serisine bakıldığında model sırf W1 dalgasının olduğu durumdan daha büyük derecede baş-kıç vurma hareketi yapmıştır. Sırf dalganın olduğu durumda modelin yapmış olduğu en büyük baş-kıç vurma hareketi -6° olduğunda, dalga ve rüzgar kombinasyonunda modelin yapmış olduğu en büyük baş-kıç vurma hareketinin derecesi %50 artarak -9° kadar çıkmıştır. Spektrumlarda en büyük pik değeri 0.15 Hz frekansında, baş-kıç vurma doğal frekansına yakın bir değerde görülmüştür. İkici pik nokta ise W1 dalgasının pik frekans değerine yakın bir frekansta belirgin olmuştur. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında da aynı durum söz konusudur.

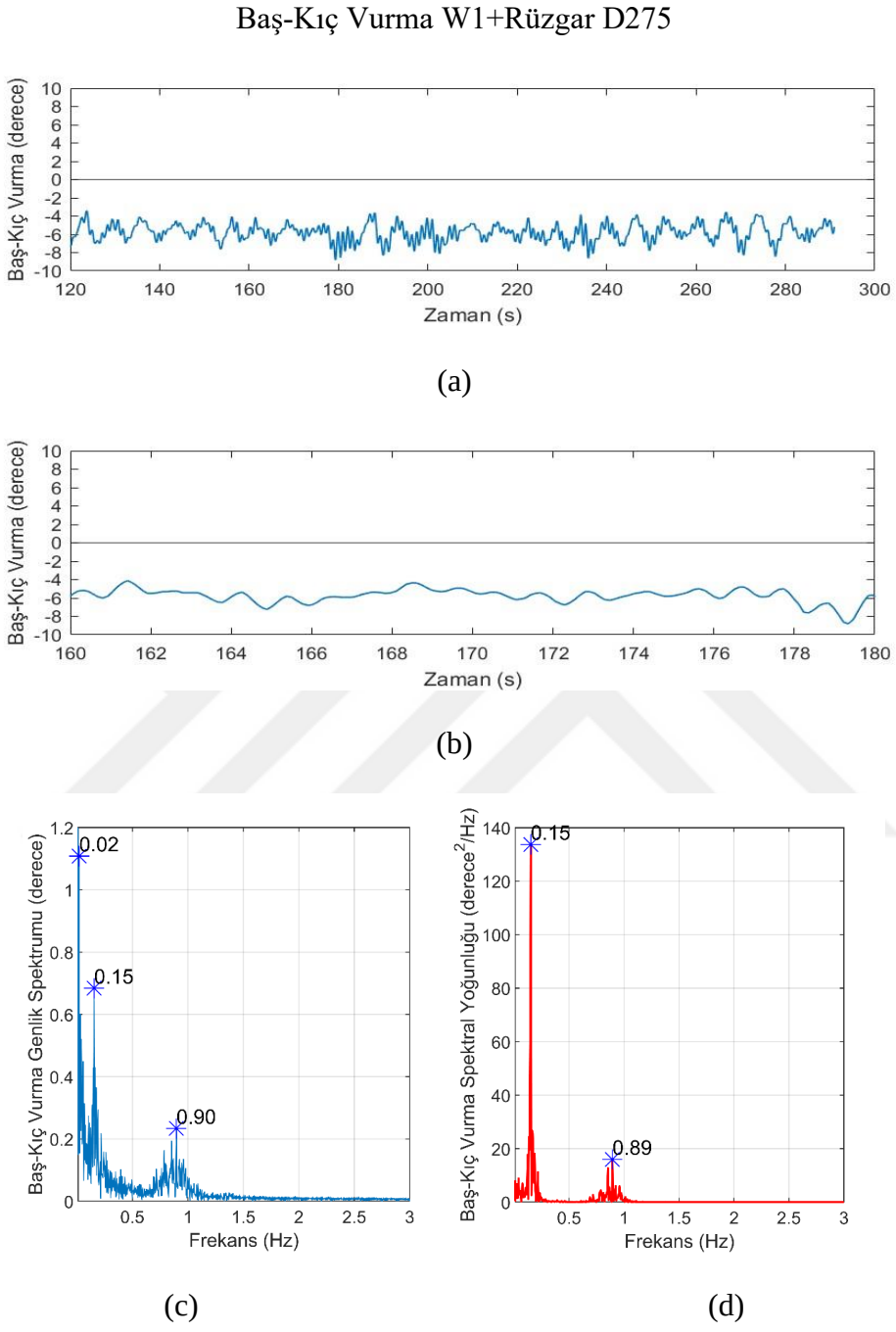
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=1 yıl yineleme periyodundaki W1 dalgası (H=0.08 m, T=1.15 s) ve 1. devirde droneun ürettiği 4.74 N itme kuvvetine sahip rüzgar kombinasyonu altında yapmış olduğu ileri-geri öteleme hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.15 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.15'te ayrıca genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin en fazla 23.47 cm ötelendiği ve 15 cm etrafında salınım yaptığı görülmektedir. Sırf W1 dalgasının olduğu durum ile karşılaştırıldığında en büyük öteleme W1 durumundaki en büyük ötelemeden 1.5 cm daha azdır. Asıl önemli fark, ileri-geri öteleme hareketinin genliği dalga-rüzgar kombinasyonunda (W1+ rüzgar) sırf W1 dalgasının genliğinden 4 kat daha küçüktür. İki durumda da modelin yaptığı en büyük ötelenme uzunluğu hemen hemen aynı kalırken, dalga-rüzgar kombinasyonunda model ileri-geri öteleme serbestlik yönünde daha sakin davranmıştır. Yani model dalga-rüzgar kombinasyonunda başlangıç konumundan daha uzakta ileri-geri ötelenme salınımı yaparken sırf dalga durumunda başlangıç konumuna daha yakın bir bölgede ileri-geri ötelenme salınımı yapmıştır. Sonuç

olarak rüzgarın oluşturduğu itme kuvveti bir yandan ileri-geri öteleme salınımın genliği azaltırken diğer yandan rüzgarın estiği yönde modeli sürüklemiştir. Hareketin genlik spektrumuna ve güç spektral yoğunluğuna bakıldığında en yüksek pik değerin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın bir frekansta olduğu görülmüştür. İkinci büyük pik değer ise gönderilen dalganın pik frekans bandında belirlenmiştir.

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=1 yıl yineleme periyodundaki W1 dalgası (H=0.08 m, T=1.15 s) ve 1. devirde droneun ürettiği 4.74 N itme kuvvetine sahip rüzgar kombinasyonu altında modelin ön tarafına (dalganın geldiği yön) bağlı 1. halatta oluşan kuvvetin grafiği Şekil 4.16 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.16'da ayrıca 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Kuvvetin zaman serisi sırf W1 dalgasının olduğu durum ile karşılaştırıldığında en büyük halat kuvvetinin dalga-rüzgar kombinasyonlu durumda daha küçük olduğu görülmüştür. Ancak sırf W1 dalgasının olduğu durumdaki halat kuvvetinin ortalaması, dalga-rüzgar kombinasyonunun olduğu durumdan daha küçüktür. Sırf W1 dalgasının olduğu durumda 22.18 N kuvvetinde en büyük halat kuvveti oluşmuştur. Dalga-rüzgar kombinasyon durumunda ise 10 N'dan daha büyük halat kuvvetleri oluşmamıştır. Spektral yoğunluk grafiğine ve genlik spektrum grafiğine bakıldığında en büyük pik değerin 0.09 Hz frekansında olduğu görülmektedir. Bu frekans değeri modelin ileri-geri öteleme serbestliğindeki doğal periyodu olan 0.11 Hz frekansına yakındır. İkinci büyük pik frekans ise 0.85 Hz frekansında gönderilen dalganın pik frekansı değerine yakın olduğu görülmüştür.

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=1 yıl yineleme periyodundaki W1 dalgası (H=0.08 m, T=1.15 s) ve 1. devirde droneun ürettiği 4.74 N itme kuvvetine sahip rüzgar kombinasyonu altında yapmış olduğu dalıp-çıkma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.17 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.17'de ayrıca 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin -1.73 - 1.72 cm aralığında dalıp-çıkma hareketi yaptığı görülmüştür. Sırf W1 dalgasının olduğu durum ile karşılaştırıldığında büyük bir fark görülmemiştir. Hareketin genlik spektrumuna ve güç spektral yoğunluğuna bakıldığında en yüksek pik değeri dalıp-çıkma doğal

frekansında görülmüştür. İkinci büyük pik değer ise gönderilen dalganın pik frekans bandında belirlenmiştir.



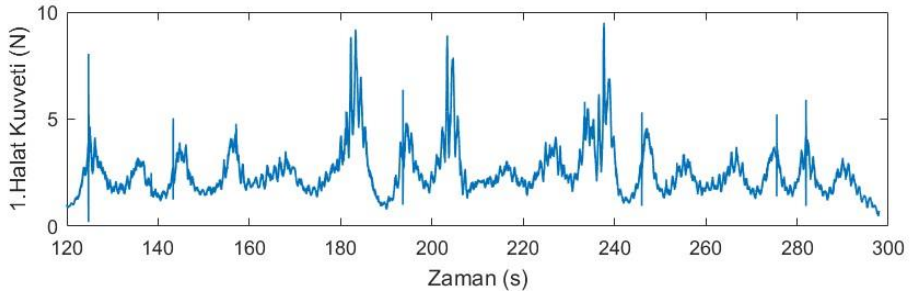
Şekil 4.14 W1+WIND (Hs= 0.08 m, Tp=1.15 s; Prototip: Hs= 4 m, Tp=8.13 s) düzensiz dalga ve rüzgar kombinasyonu durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-300 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.

(a)

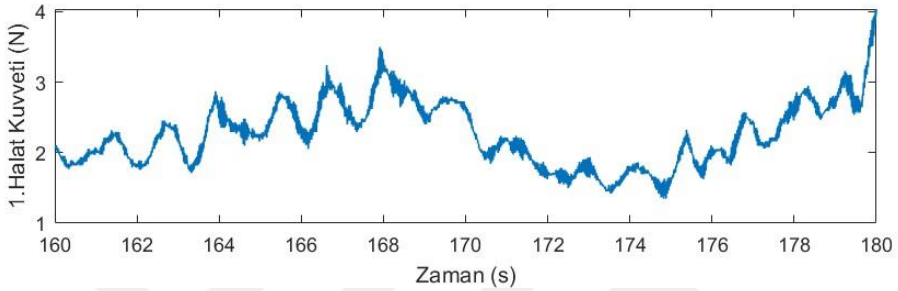
(b) (c)

Şekil 4.15 W1+WIND (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4 m, T_p=8.13 s) düzensiz dalga ve rüzgar kombinasyonu durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) genlik spektrumu, (c) güç spektral yoğunluğu.

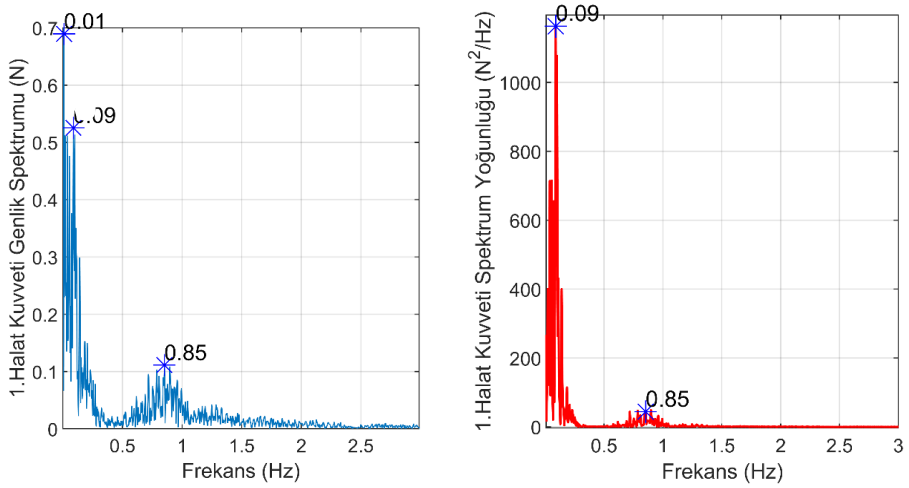
1.Halat Kuvveti W1+Rüzgar D275



(a)

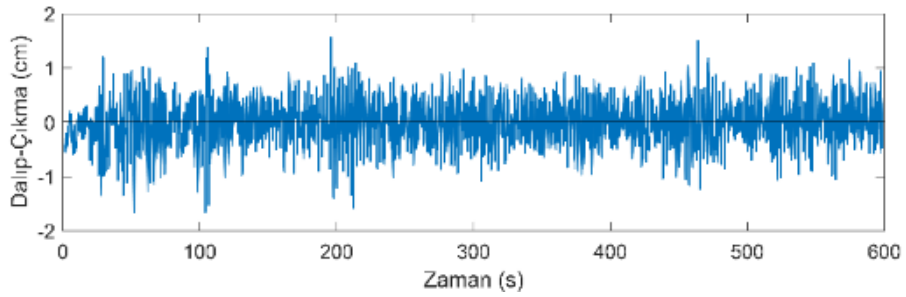


(b)

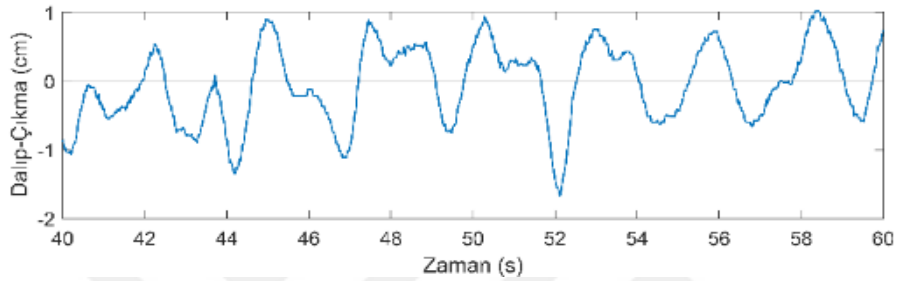


(c) (d)

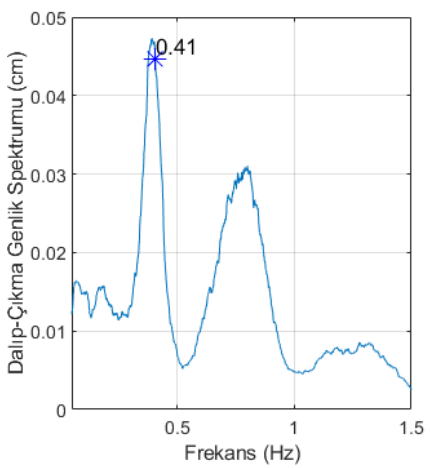
Şekil 4.16 W1+WIND (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4 m, T_p=8.13 s) düzensiz dalga ve rüzgar kombinasyonu durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



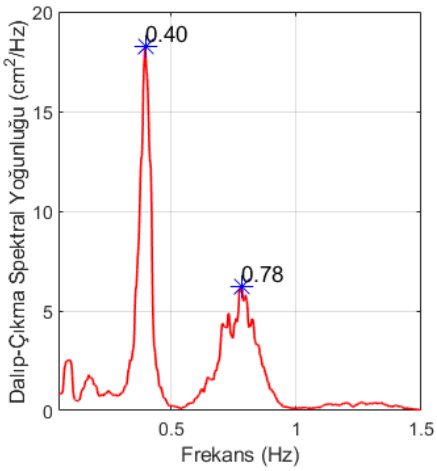
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.17 W1+WIND (H_s= 0.08 m, T_p=1.15 s; Prototip: H_s= 4 m, T_p=8.13 s) düzensiz dalga ve rüzgar kombinasyonu durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.

4.3 Ekstrem Tasarım Koşulları

Bu tasarım koşulunda yüzer rüzgar türbinin yineleme periyodu R_p=50 ve R_p=100 yıl olan ekstrem dalga durumundaki davranışı tartışılacaktır (Tablo 4.2).

4.3.1 D275 Yükleme Durumu W2 Dalgası

İkinci olarak modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=50 yıl yineleme periyodundaki W2 dalgası (H_s= 0.15 m, T_p=1.55 s) etkisinde modelin yapmış olduğu baş-kıç vurma hareketinin, ileri-geri öteleme hareketinin, dalıp-çıkma hareketinin ve 1. halatta oluşan kuvvetin davranışı incelenmiştir.

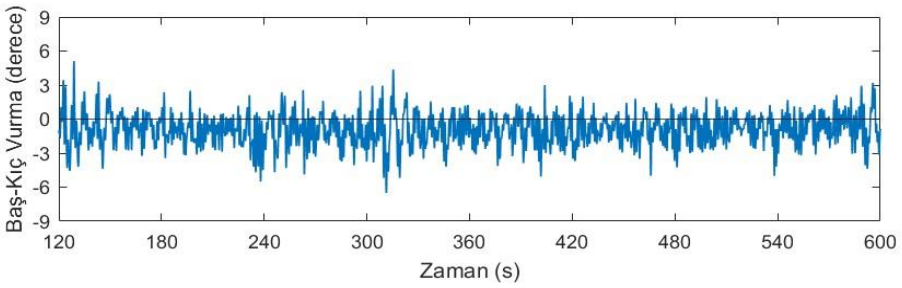
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=50 yıl yineleme periyodundaki W2 dalgası (H_s= 0.15 m, T_p=1.55 s) etkisinde modelin yapmış olduğu baş-kıç vurma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.18 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.18'de ayrıca 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu gösterilmiştir. Hareketin zaman serisine bakıldığında baş-kıç vurma hareketinin minimum -6.5° olduğu görülmektedir. Ortalama salınım da 0° altında kalmaktadır (-0.79°). Genlik spektrum grafiğinde, baş-kıç vurma serbest salınım frekansına (0.14 Hz) yakın bir değerde, 0.13 Hz'de en büyük pik değer görülmüştür. İkici pik nokta ise W1 dalgasının pik frekans değerine yakın bir frekansta görülmüştür. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında da aynı durum söz konusudur.

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=50 yıl yineleme periyodundaki W2 dalgası (H_s= 0.15 m, T_p=1.55 s) etkisinde modelin yapmış olduğu ileri geri öteleme hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.19 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.19'da ayrıca genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin en fazla 18.37 cm ötelendiği, -3.14-18.37 cm arasında ve 6.2 cm ortalama etrafında salınım yaptığı görülmüştür. Hareketin genlik spektrumuna ve güç spektral yoğunluğuna bakıldığında en yüksek pik değerin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın olduğu görülmektedir. İkinci büyük pik değer ise gönderilen dalganın pik frekansına yakın bir frekansta görülmüştür. W1 dalgası ile kıyaslandığında modelin daha az ötelendiğini, ortalama ötelemenin modelin başlangıç konumuna daha yakın olduğu görülmüştür. W1 dalgası daha küçük

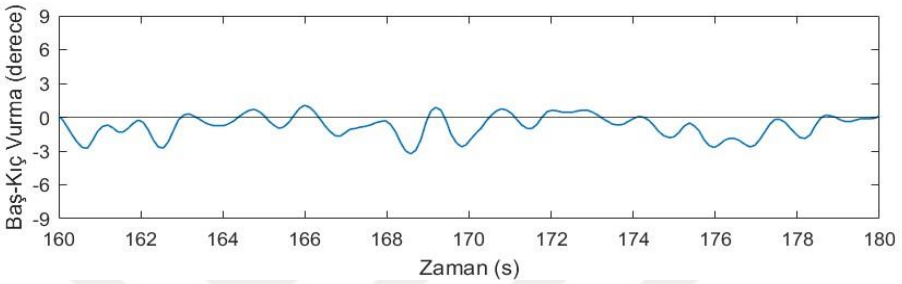
olduğu halde öteleme miktarının W2 dalgasından fazla olmasının nedeni olarak W1 dalgasının periyodunun daha küçük olması söylenebilir.

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=50 yıl yineleme periyodundaki W2 dalgası (H_s= 0.15 m, T_p=1.55 s) etkisinde modelin ön tarafına (dalganın geldiği yön) bağlı 1. halatta oluşan kuvvetin grafiği Şekil 4.20 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.20'de 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Kuvvetin zaman serisi incelendiğinde halat kuvvetinin birden fazla pik yaptığı görülmektedir. Pik değerlerinin %50'den biraz azı 10 N'un üzerindedir. Geriye kalan pik değerleri 3-10 N arasında değişmektedir. Bu piklerden en büyüğü 31.23 N kuvvetindedir. Bu en büyük pik değeri W1 dalgası etkisinde oluşan pik değerden yaklaşık %40 daha fazladır. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında en büyük pik değerin 0.06 Hz frekansında, ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın olduğu görülmektedir. İkinci büyük pik frekans ise gönderilen dalganın pik frekansı değerine yakındır. Üçüncü ve dördüncü pik noktaları ise gönderilen dalganın pik frekansının yaklaşık 2 ve 3 katında görülmüştür.

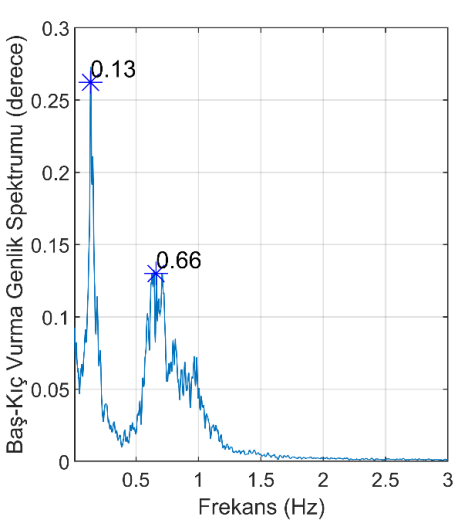
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=50 yıl yineleme periyodundaki W2 dalgası (H_s= 0.15 m, T_p=1.55 s) etkisinde modelin yapmış olduğu dalıp-çıkma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.21 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.21'de ayrıca 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin -4.12 – 3.95 cm arasında dalıp-çıkma hareketi yaptığı görülmektedir. Hareketin genlik spektrumuna ve güç spektral yoğunluğuna bakıldığında en yüksek pik değer gönderilen dalganın pik frekansına yakın bir frekansta görülmüştür. İkinci büyük pik değer ise dalıp-çıkma doğal frekansına yakın olduğu görülmektedir. W1 dalgası ile kıyaslandığında dalıp-çıkma hareketinin W2 dalgası altındaki genliğinin daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca en büyük pik W1 durumunda modelin dalıp-çıkma doğal frekansında görülürken W2 durumunda modelin dalıp-çıkma doğal frekansı ikinci pikte görülmüştür. Yani W1 durumunda modelin dalıp-çıkma hareketi bu serbestlikteki modelin doğal frekansından daha çok etkilenmiştir.



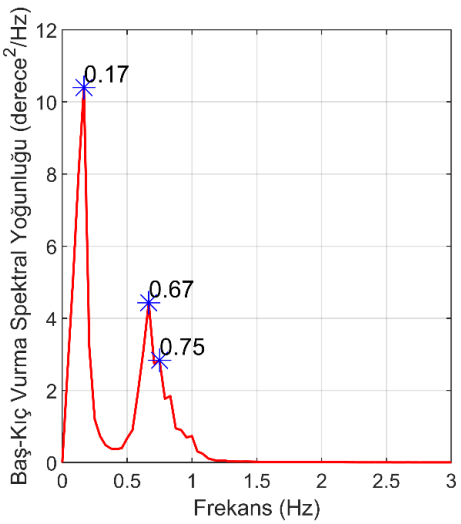
(a)



(b)

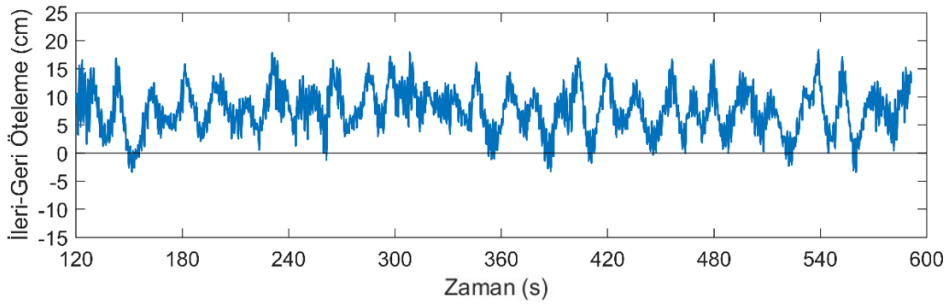


(c)

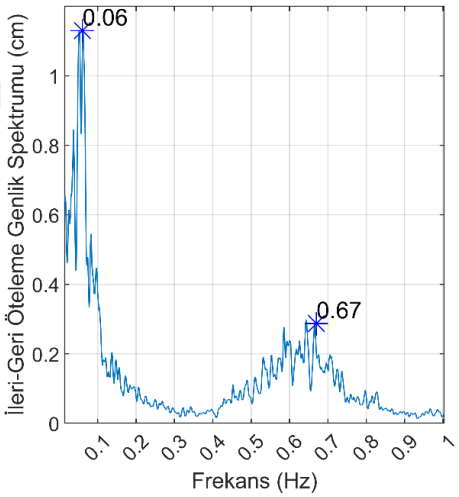


(d)

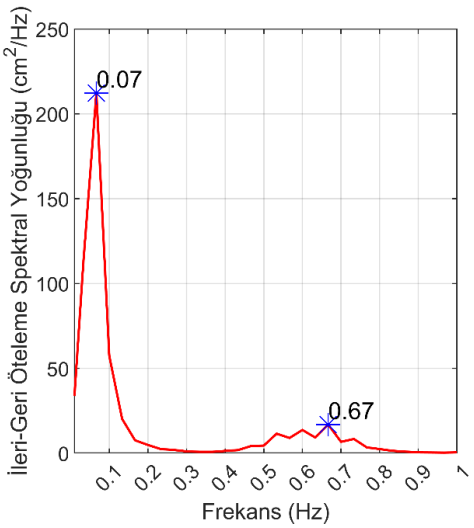
Şekil 4.18 W2 (Hs= 0.15 m, Tp=1.55 s; Prototip: Hs= 7.48 m, Tp=10.98 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



(a)

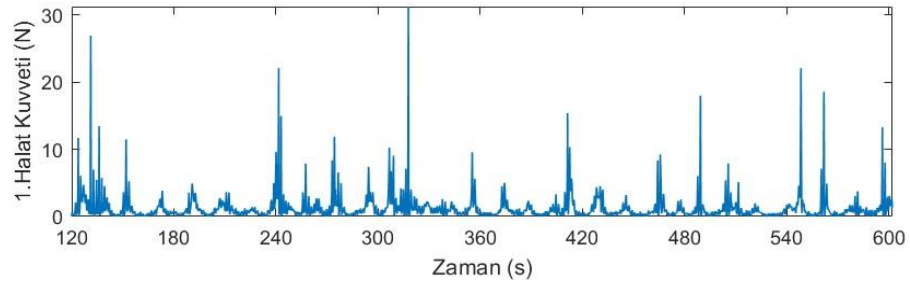


(b)

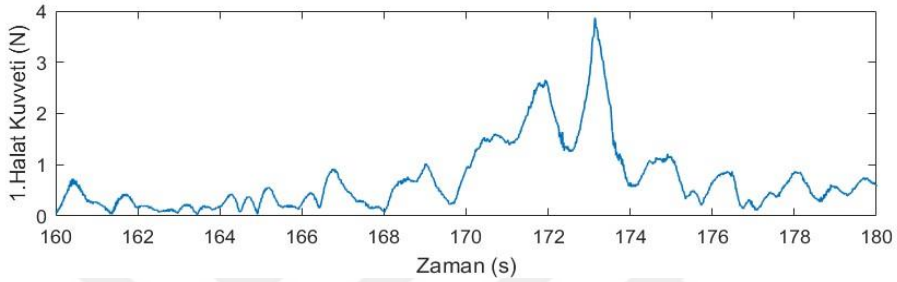


(c)

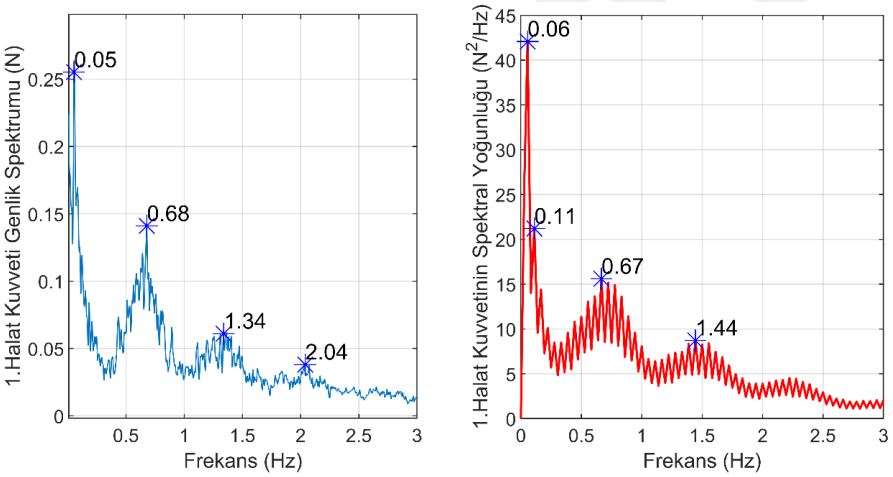
Şekil 4.19 W2 (Hs= 0.15 m, Tp=1.55 s; Prototip: Hs= 7.48 m, Tp=10.98 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri geri öteleme hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) genlik spektrumu, (c) güç spektral yoğunluğu.



(a)

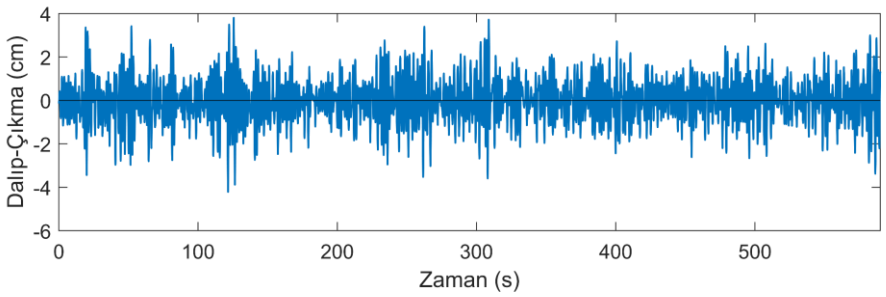


(b)

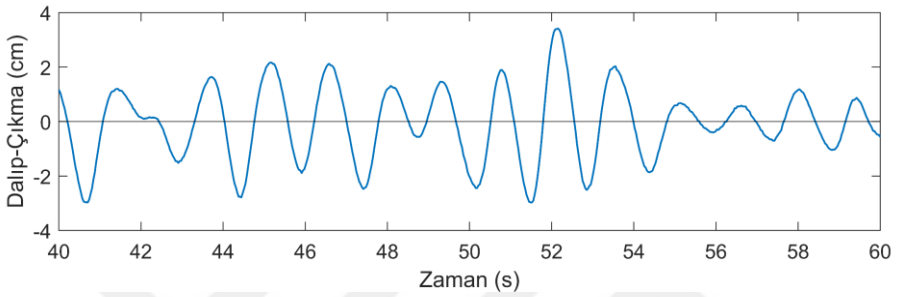


(c) (d)

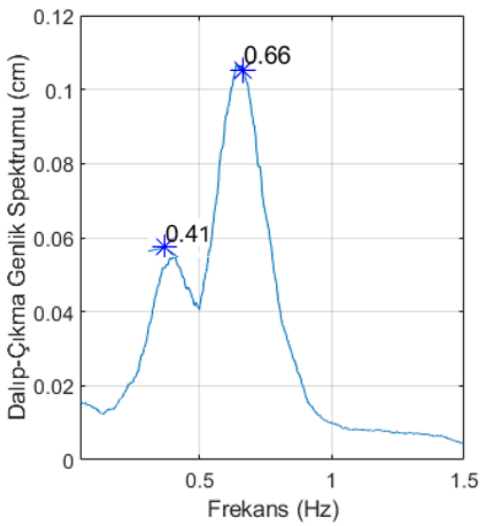
Şekil 4.20 W2 (Hs= 0.15 m, Tp=1.55 s; Prototip: Hs= 7.48 m, Tp=10.98 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



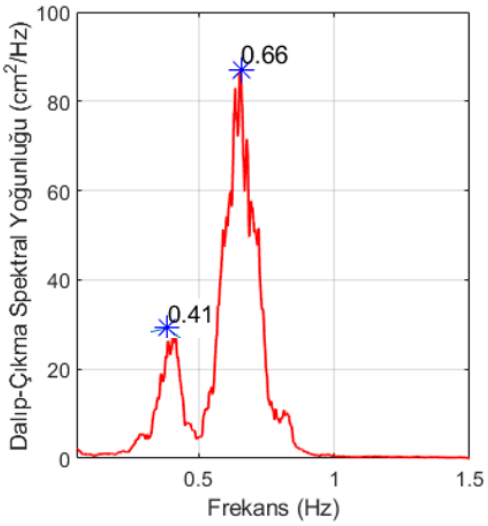
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.21 W2 (Hs= 0.15 m, Tp=1.55 s; Prototip: Hs= 7.48 m, Tp=10.98 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin dalıp-çıkma hareketi: (a) 0-600 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 40-60 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.

4.3.2 D275 Yükleme Durumu W3 Dalgası

İkinci olarak modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=100 yıl yineleme periyodundaki W3 dalgası (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s) etkisinde modelin yapmış olduğu baş-kıç vurma hareketinin, ileri-geri öteleme hareketinin ve 1. halatta oluşan kuvvetin grafiği verilmiştir.

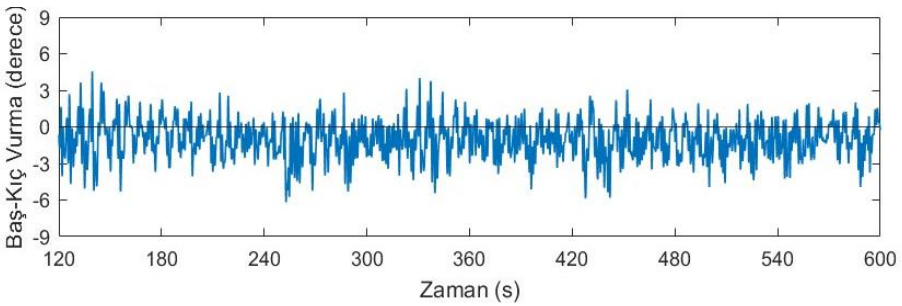
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=100 yıl yineleme periyodundaki W3 dalgası (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s) etkisinde modelin yapmış olduğu baş-kıç vurma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.22 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.22'de ayrıca 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu gösterilmiştir. Hareketin zaman serisine bakıldığında baş-kıç vurma hareketinin minimum -6.19° olduğu görülmektedir. Ortalama salınım da 0° altında kalmaktadır (-1.02°). Genlik spektrum grafiğinde, baş-kıç vurma serbest salınım frekansında 0.14 Hz'de en büyük pik değer görülmüştür. İkici pik nokta ise W3 dalgasının pik frekans değerine yakın bir frekansta görülmüştür.

Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=100 yıl yineleme periyodundaki W3 dalgası (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s) etkisinde modelin yapmış olduğu ileri-geri öteleme hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.23 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.23'te ayrıca genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin en fazla 20.47 cm ötelendiği, -6.32 ile 20.47 cm arasında ve 8.29 cm ortalama etrafında salınım yaptığı görülmüştür. Hareketin genlik spektrumuna ve güç spektral yoğunluğuna bakıldığında en yüksek pik değerin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın olduğu görülmektedir. İkinci büyük pik değer ise gönderilen dalganın pik frekansına yakın bir frekansta görülmüştür. W2 dalgası ile kıyaslandığında modelin ötelenme miktarı yaklaşık aynıdır. W1 dalgası ile kıyaslandığında ise modelin daha az ötelendiğini, ortalama ötelemenin modelin başlangıç konumuna daha yakın olduğu görülmüştür. W1 dalgası daha küçük olduğu halde öteleme miktarının W3 dalgasından fazla olmasının nedeni olarak W1 dalgasının periyodunun daha küçük olması gösterilebilir.

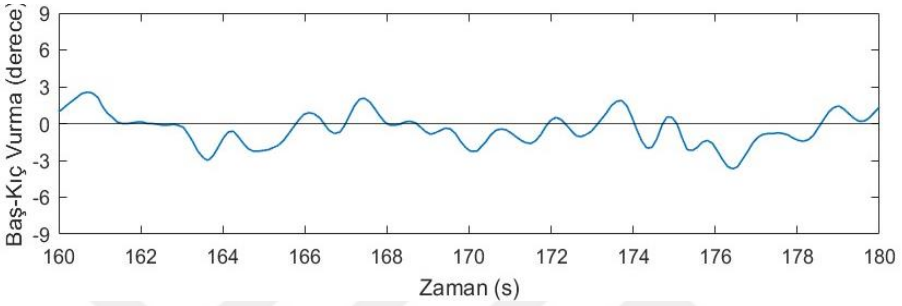
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=100 yıl yineleme periyodundaki W3 dalgası (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s) etkisinde modelin ön tarafına (dalganın geldiği yön) bağlı 1. halatta oluşan kuvvetin grafiği Şekil 4.24 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.24'te

ayrıca 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Kuvvetin zaman serisi incelendiğinde halat kuvvetinin birçok kere pik yaptığı görülmektedir. Zaman serisinin geri kalan değerleri bu pik değerler ile kıyaslandığında çok küçük kalmaktadırlar. Pik değerlerinin yaklaşık %36'sı 20 N'un üzerindedir. Geriye kalan pik değerleri 3-20 N arasında değişmektedir. Bu piklerden en büyüğü 75.33 N kuvvetindedir. Bu en büyük pik değeri W1 dalgası altında oluşan pik değerden yaklaşık %240, W2 dalgası altında oluşan değerden yaklaşık %140 daha fazladır. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında en büyük pik değerin 0.06 Hz frekansında, ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın olduğu görülmektedir. İkinci büyük pik frekans ise gönderilen dalganın pik frekansı değerine yakındır. Diğer pik değerler ise gönderilen dalganın pik frekansının yaklaşık 2 ve 3 katında görülmüştür.

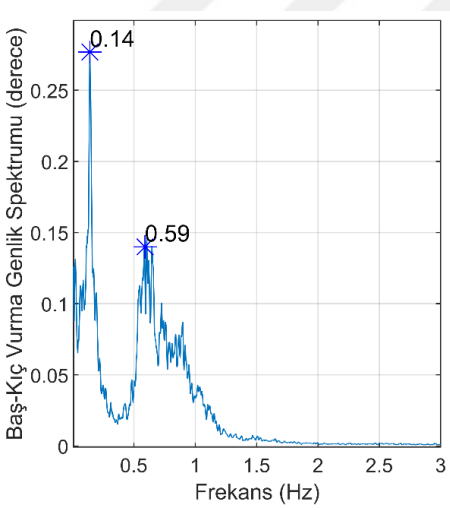
Modelin 275 mm su çekiminde yapılan R_p=100 yıl yineleme periyodundaki W3 dalgası (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s) etkisinde modelin yapmış olduğu dalıp-çıkma hareketinin zamanla değişimi Şekil 4.25 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.25'te ayrıca 40-60 s arasındaki hareketin zaman serisi, genlik spektrumu, güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Hareketin zaman serisi incelendiğinde modelin -5 – 5.2 cm arasında dalıp-çıkma hareketi yaptığı görülmektedir. Hareketin genlik spektrumuna ve güç spektral yoğunluğuna bakıldığında en yüksek pik değer gönderilen dalganın pik frekansına yakın bir frekansta gönderilen dalga spektrumunun frekans bandında görülmüştür. İkinci büyük pik değer ise 0.41 Hz olan dalıp-çıkma doğal frekansında görüşmüştür. W2 dalgası ile kıyaslandığında dalıp-çıkma hareketinin W3 dalgası altındaki genliğinin yaklaşık %79 daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca en büyük pik W1 ve W1+Wind durumunda modelin dalıp-çıkma doğal frekansında görülürken W2 ve W3 durumunda modelin dalıp-çıkma doğal frekansı ikinci pikte görülmüştür. Yani W2 ve W3 durumunda modelin yapmış olduğu dalıp-çıkma hareketi modelin dalıp-çıkma serbestliğindeki doğal frekansından daha az etkilenmiştir.



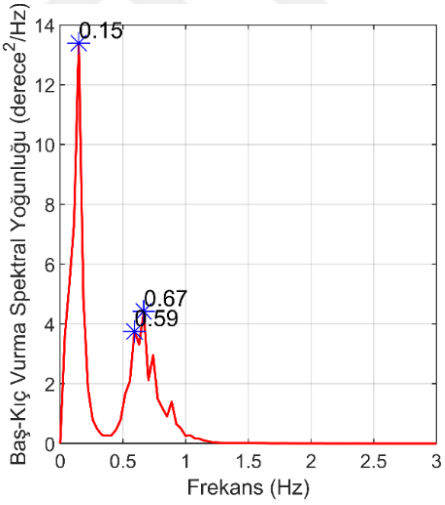
(a)



(b)

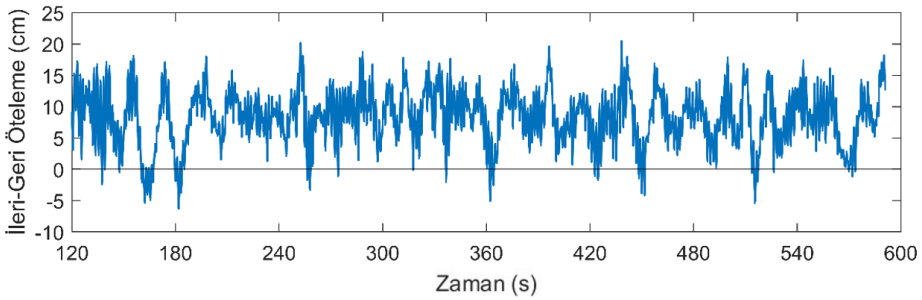


(c)

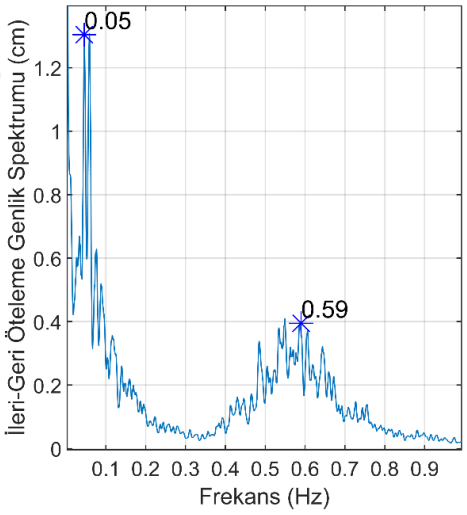


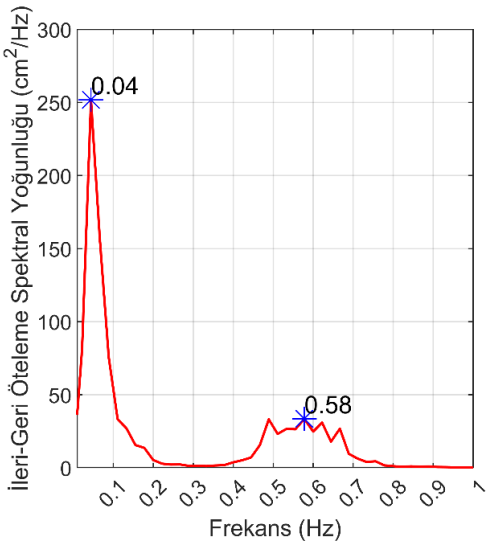
(d)

Şekil 4.22 W3 (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s; Prototip: H_s= 9.09 m, T_p=12.05 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin baş-kıç vurma hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki hareketin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



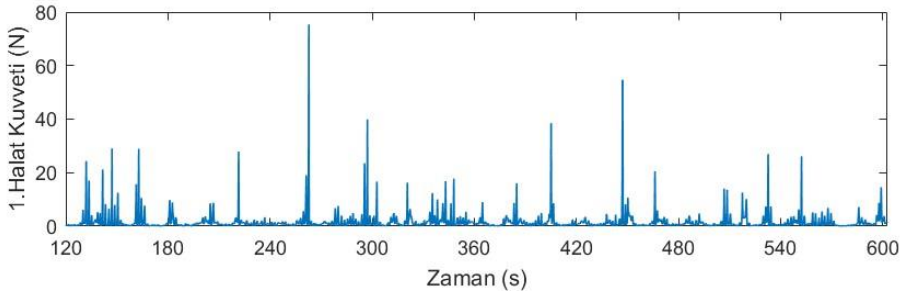
(a)



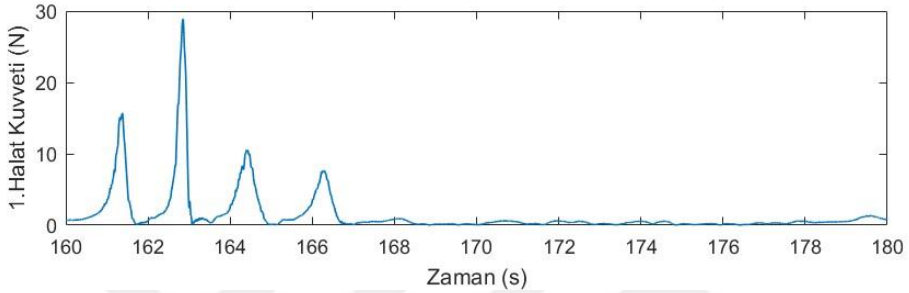


(b) (c)

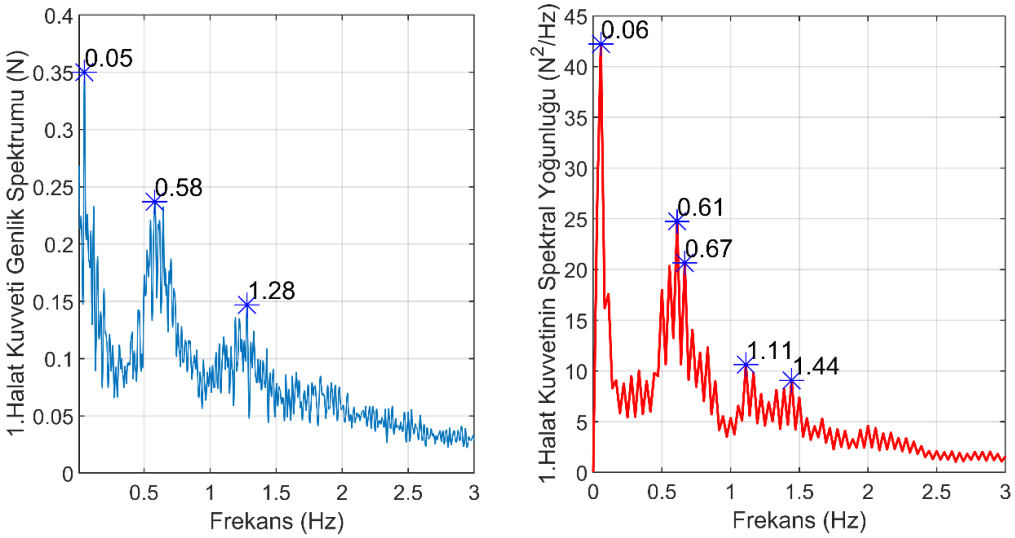
Şekil 4.23 W3 (Hs= 0.18 m, Tp=1.70 s; Prototip: Hs= 9.09 m, Tp=12.05 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin ileri-geri öteleme hareketi: (a) 120-600 s arasındaki hareketin zaman serisi, (b) genlik spektrumu, (c) güç spektral yoğunluğu.



(a)

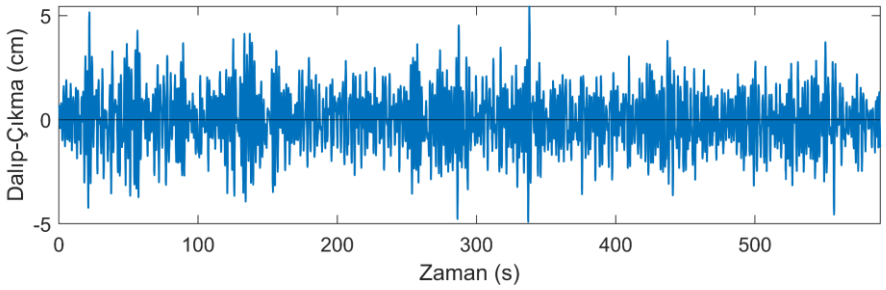


(b)

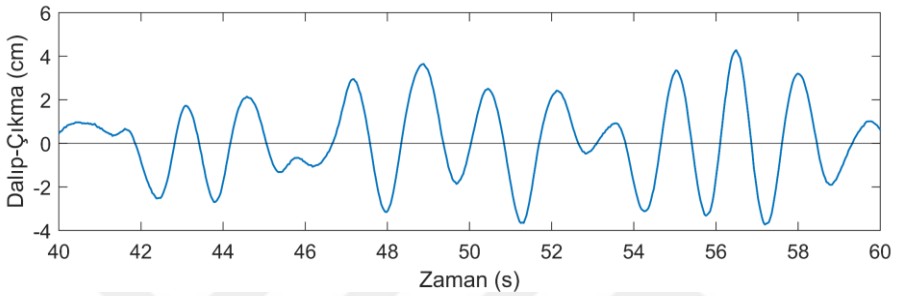


(c) (d)

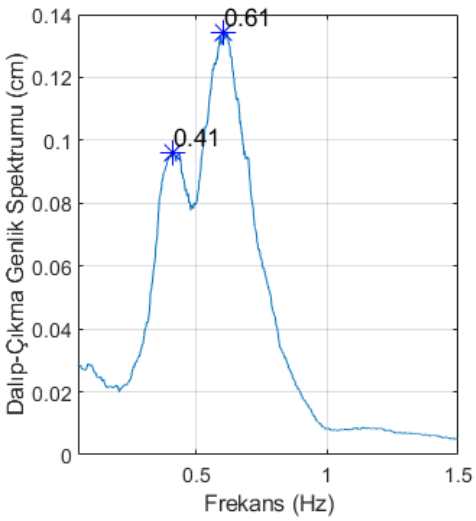
Şekil 4.24 W3 (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s; Prototip: H_s= 9.09 m, T_p=12.05 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.



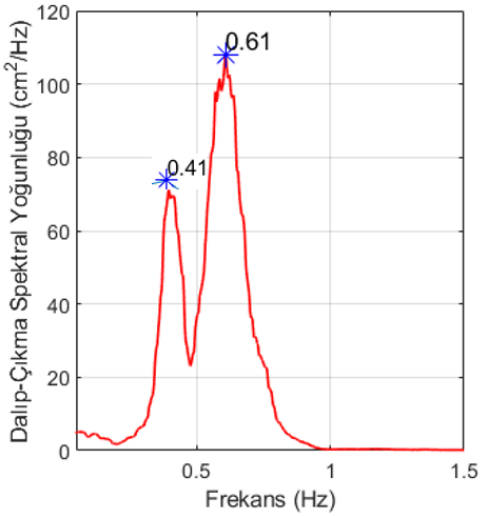
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.25 W3 (H_s= 0.18 m, T_p=1.70 s; Prototip: H_s= 9.09 m, T_p=12.05 s) düzensiz dalga durumunda 275 mm su çekimli modelin 1. halat kuvveti: (a) 120-300 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (b) 160-180 s arasındaki kuvvetin zaman serisi, (c) genlik spektrumu, (d) güç spektral yoğunluğu.

4.4 Davranış Genlik Spektrumu

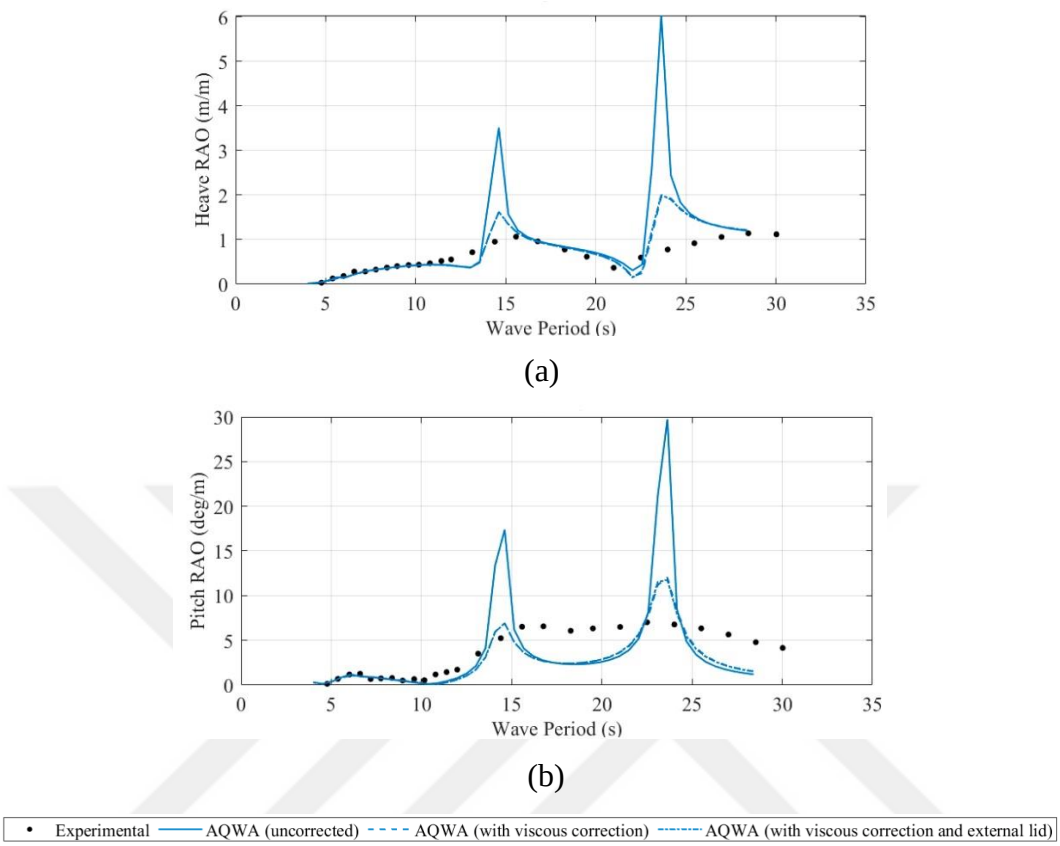
Davranış Genlik Spektrumu (Response Amplitude Operator, RAO) genellikle gemilerin ve diğer yüzen yapıların deniz ortamındaki olası davranışlarına karar vermede kullanılmaktadır. RAO oluşturularak yapının güvenlik sınırları belirlenir ve gerekirse tasarımda değişiklikler yapılarak daha güvenli tasarım elde edilir. RAO girdiler ile çıktılar arası ilişkiyi veren transfer fonksiyonlarının ilgilenilen frekans aralığında oluşturulması ile elde edilen spektrumdur. Basitçe çıktıların girdilere oranlanması olarak ifade edilebilir (denklem 3). RAO, dalga baseninde fiziksel model ile yapılan testlerle veya Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computional Fluid Dynamics, CFD) bilgisayar programları ile elde edilir.

$$\mathrm{RAO}_{\text{transfer fonksiyonu}}(f) = \frac{\text{Çıktı}}{\text{Girdi}} = \frac{\text{Hareketin Genliği } (f)}{\text{Dalga Genliği}} \qquad (\mathbf{3})$$

Literatürde yüzen yapılar ile ilgili çalışmalarda farklı yöntemler kullanılarak RAO grafikleri oluşturulmuştur. Bu çalışmalardan bazılarının RAO grafikleri ve kullandıkları yöntemler incelenmiştir.

Pols vd. (2021) 1:36 ölçekli dalga enerjisi dönüştürücüsü modelinin dalga baseninde düzenli dalga testleri ile modelin farklı salınım halleri için RAO grafiklerini oluşturmuştur (Şekil 4.26). Farklı periyottaki düzenli dalga deneyleri ile oluşturulan RAO ve ANSYS AQWA ile sayısal olarak oluşturulan RAO karşılaştırılmıştır. Sayısal modelde ileri-geri öteleme hareketi kısıtlanmış ve yalnız baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma serbestliğindeki RAO oluşturulmuştur. Düzenli dalga deneyleri ile oluşturulan RAO grafiğinde, basende üretilen 3 s (prototipte 18 s) ve altı periyotlu düzenli dalgaların modele gelen yalnız ilk 10 adedinin etkisinde görülen modelin ortalama davranış genliği kullanılmıştır. 3 s üzeri periyotlu düzenli dalgalarda basende hesaplanan yansıma yüksek olduğu için gönderilen düzenli dalganın ilk 10 piki kullanılamamış bundan dolayı daha az dalga kullanılarak ortalama davranış genliği hesaplanmıştır. Dalıp-çıkma hareketinin deneysel ve sayısal RAO'ları arasında 5-20 s arasında iyi ilişki çıkmıştır. Baş-kıç vurma

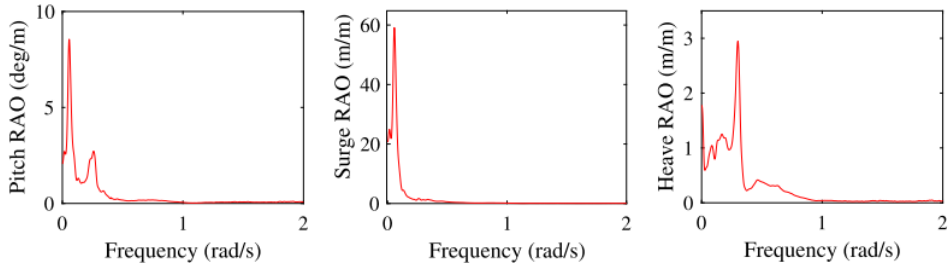
hareketinde ise sayısal model RAO verisi 10 s dalga periyodundan daha düşük dalga testleri ile belirlenen RAO değerleri ile uyumlu çıkmıştır [12].



Şekil 4.26 (a) Dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu, (b) baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu [12].

Cao vd. (2020) 1:64 ölçekli özgün tasarımlı yarı-batık yüzer rüzgar türbini platformunun dinamik davranışının araştırılması için dalga baseninde deneysel çalışmalar yapmıştır. Yapılan deneylerle modelin farklı serbestlikleri için RAO grafikleri oluşturulmuştur. Prototipte 5 m dalga yüksekliği ve 5-20 s dalga periyot aralığına denk gelen 1:64 ölçekli beyaz gürültü (white noise) dalgası dalga baseninde üretilmiş, bu dalganın etkisinde, yapının farklı serbestliklerdeki davranışları kaydedilmiş ve RAO grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.27'de gösterilen ileri-geri öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin RAO grafikleri verilmiştir. İleri-geri öteleme ve baş-kıç vurma grafiklerinde dalga frekans bandında pik davranış görülmemiştir. Yalnız dalıp-çıkma doğal frekansı, dalga frekans aralığında kaldığı için dalıp-çıkma grafiğinde bu aralıkta pik değer

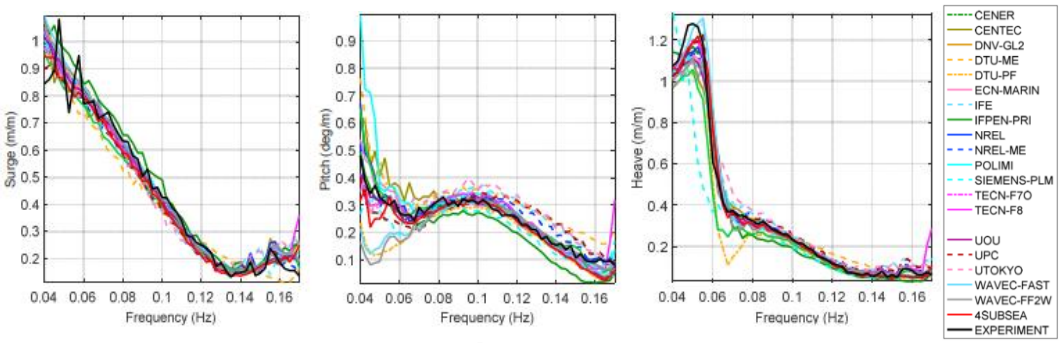
görülmüştür. Ayrıca baş-kıç vurma grafiğinde ileri-geri öteleme doğal frekansında pik değer görülmüştür [11].



(a) (b) (c)

Şekil 4.27 (a) Baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu, (b) ileri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (c) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu [11]

Robertson vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen OC5 Projesi Faz II'de, yarı batık yüzen rüzgar türbini sisteminin doğrulaması için DeepCwind konsorsiyumu tarafından farklı sayısal modeller kullanılmıştır. Bu modeller, Hollanda'daki Maritime Research Institute (MARIN) açık deniz dalga tankında, sistemin 1:50 ölçekli fiziksel modeli üzerinde gerçekleştirilen testlerin verileri ile karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır. Prototip dalga yüksekliği 10.5 m ve dalga periyot aralığı 6-26 s olan beyaz gürültü dalgası ile konsorsiyumun üyeleri tarafından farklı sayısal modeller kullanılarak RAO grafikleri oluşturulmuş ve fiziksel deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.28), [4]

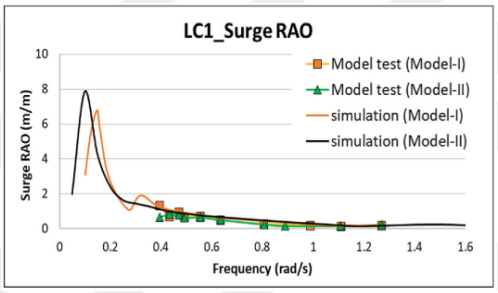


(a) (b) (c)

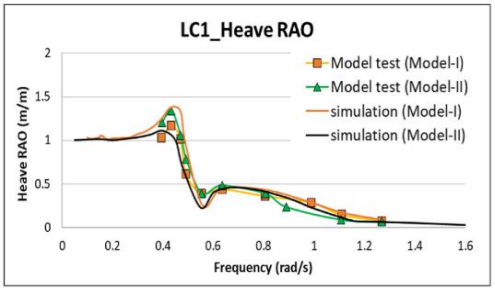
Şekil 4.28 (a) İleri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (b) baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu,(c) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu [4].

Kim ve Shin (2020) yüzen yarı-batık rüzgar türbini tasarımının sayısal modelini 1:40 ölçekli fiziksel model testleri ile doğrulamıştır. Yaptıkları tasarımı yenileyerek sayısal model ve fiziksel model testlerini tekrar hem kendi içinde hem de ilk

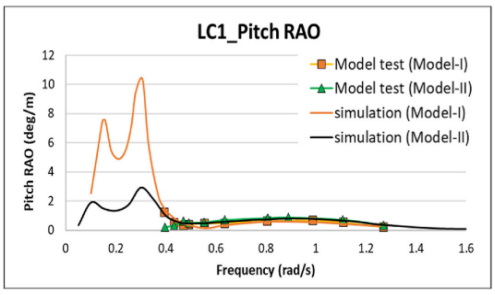
yaptıkları tasarım ile karşılaştırmışlardır (Model-I ve Model-II). Ekstrem dalgalar altında yarı-batık platformun üst şamandırasına dalga kuvveti geldiği için modelin hava payı artırılmıştır. İkinci olarak baş-kıç vurma serbestliğindeki RAO grafiğinde baş-kıç vurma doğal frekansının bulunduğu bölgedeki küçük frekanslarda çok büyük davranış görüldüğü için modelin kule yüksekliği kısaltılmıştır. Yapılan bu değişikliklerden sonra Model-II dedikleri bu yeni modelin farklı serbestliklerdeki RAO grafikleri bir önceki modelin (Model-I) hem deney verileri ile oluşturulan hem de FAST ile yapılan simülasyon sonucu oluşturulan RAO'su ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.29). Deneylerde model ölçeğinde 0.78-2.52 s periyot aralığında 0.04 m yüksekliğinde 10 adet düzenli dalga kullanılmıştır. Modelde yapılan değişiklikler sonrası Şekil 4.29 (c)'de baş-kıç vurma davranışının düşük frekanslarda azaldığı görülmüştür [33].



(a)



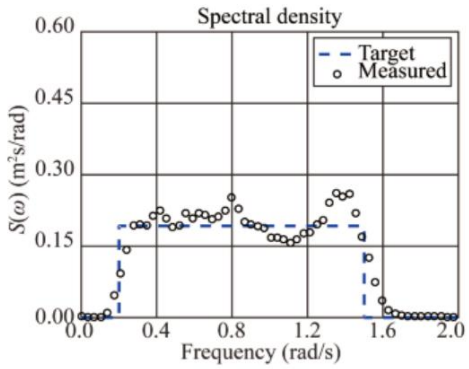
(b)



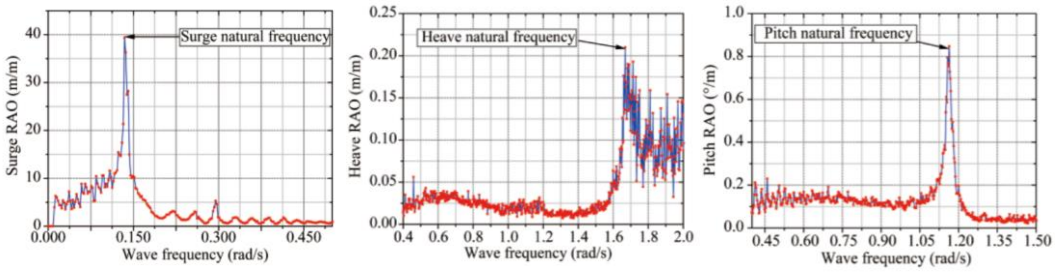
(c)

Şekil 4.29 (a) İleri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (b) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu, (c) baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu [33].

Zhao vd. (2018) 1:50 ölçekli özgün tasarıma sahip gergi ayaklı yüzen rüzgar türbini modelini (Windstar TLP system) deneysel olarak test etmiştir. Yapılan testler ile sistemin dinamik davranışı ve genel performansı değerlendirilmiştir. Dalga baseninde oluşturulan 5-25 s (model ölçeğinde 0.707-3.54 s) periyot aralığında ve 2 m (model ölçeğinde 0.04 m) yüksekliğindeki beyaz gürültü dalgası (Şekil 4.30) ile yapılan test ile farklı serbestliklerdeki RAO grafikleri deneysel olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.31). Her bir serbestlikteki RAO grafiklerinde pik davranışının ilgili serbestliğin doğal frekansında görüldüğü belirtilmiştir [9].



Şekil 4.30 Hedeflenen ve ölçülen beyaz gürültü dalgası spektrumu [9].



(a) (b) (c)

Şekil 4.31 (a) İleri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (b) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu, (c) baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu [9].

Bu çalışmada dalga baseninde yapılan farklı dalga yüksekliğinde ve periyodundaki düzenli dalga testleri ile RAO grafikleri oluşturulmuştur. Tüm grafikler model ölçeği olan 1:50 ölçekte verilmiştir. Yapılan düzenli dalga testlerinin parametreleri hem model hem de prototip ölçeğinde Tablo 4.3'te verilmiştir. Yapılan 9 adet

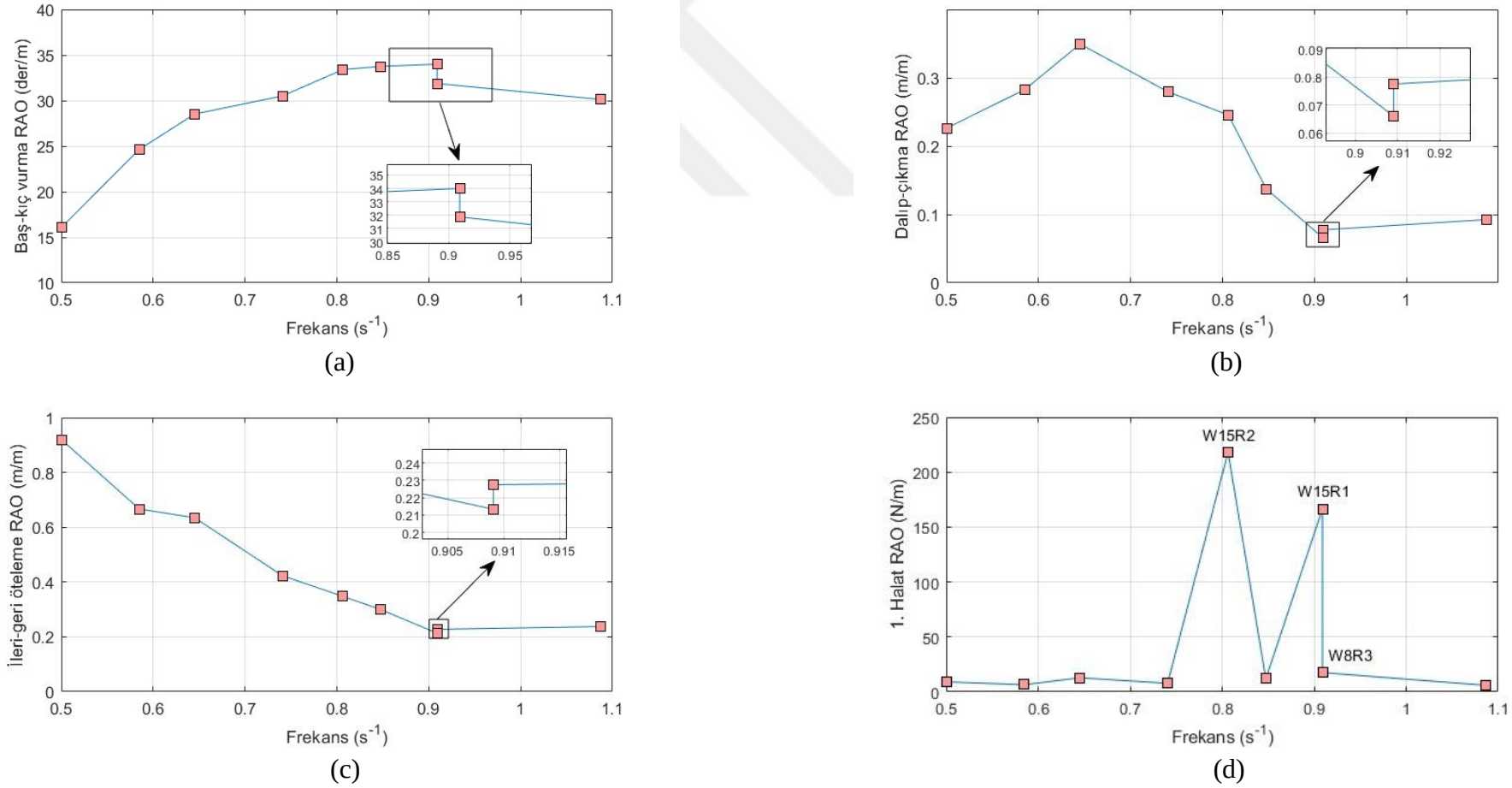
düzenli dalga testinden 4 tanesinde model ölçeğinde dalga yüksekliği 0.08 m'dir. Diğer 5 dalganın model ölçeğinde yüksekliği ise 0.15 m'dir. Yalnız, W8R3 ve W15R1 testlerinde kullanılan dalgaların yükseklikleri birbirinden farklı ve periyotları aynı seçilmiştir. Diğer dalgaların periyotları ise birbirinden farklıdır. Bu aynı periyotta farklı dalga yüksekliğinde seçilen dalgalar (W8R3 ve W15R1) ile hesaplanan RAO değerinin aynı olması gerekir. Chakrabarti (1987) eğer sistem lineerse aynı periyotta ve farklı yükseklikteki iki düzenli dalga ile bulunan RAO değerlerinin aynı olması gerektiğini belirtmiştir [34].

Tablo 4.3 RAO grafiklerinde kullanılan düzenli dalga testleri parametreleri

Testler	Dalga yüksekliği (m)		Dalga periyodu (s)		Dalga frekansı (s^{-1})	
	Prototip	Model	Prototip	Model	Prototip	Model
W8R2	4	0.08	6.51	0.92	0.15	1.09
W8R3	4	0.08	7.78	1.1	0.13	0.91
W8R4	4	0.08	8.34	1.18	0.12	0.85
W8R5	4	0.08	9.55	1.35	0.10	0.74
W15R1	7.5	0.15	7.78	1.1	0.13	0.91
W15R2	7.5	0.15	8.77	1.24	0.11	0.81
W15R3	7.5	0.15	10.96	1.55	0.09	0.65
W15R4	7.5	0.15	12.09	1.71	0.08	0.58
W15R5	7.5	0.15	14.14	2	0.07	0.50

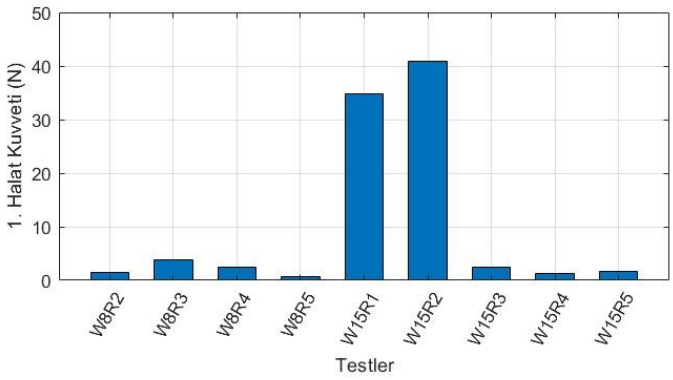
Şekil 4.32'de baş-kıç vurma, dalıp-çıkma, ileri-geri öteleme serbestliklerindeki hareketlerin ve 1. halat kuvvetinin RAO grafikleri verilmiştir. 0.91 Hz frekansında iki farklı yükseklikteki dalga testi (W8R3 ve W15R1) ile hesaplanan RAO değerleri birbirinden; baş-kıç vurma için %6.25, dalıp-çıkma için %11.11, ileri-geri öteleme için ise yine %6.23 farklı çıkmıştır. Fakat halat kuvvetinin RAO grafiğinde bu fark %149.17 olmaktadır. Ayrıca halat kuvvetinin RAO grafiğinde W15R2 testinde de W15R1'de olduğu gibi çok yüksek pik değer görülmüştür. Bu iki dalga durumunda görülen yüksek pik değerler Şekil 4.33'te verilen farklı dalga durumlarında 1. halatta oluşan maksimum halat kuvvetlerinin bu iki dalga durumunda diğerlerine göre çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun nedeni olarak bu testlerdeki baş-kıç vurma ve ileri geri öteleme hareketinin dalganın ilerlediği yöne

doğru eksantrik ve büyük olduğunu gösterebiliriz. Bu yöndeki baş-kıç vurma ve ileri-geri öteleme hareketi normalde katener formda çalışması gereken halatların gerilmesini sağlayarak halatlar üzerine gelen kuvveti artırmaktadır.

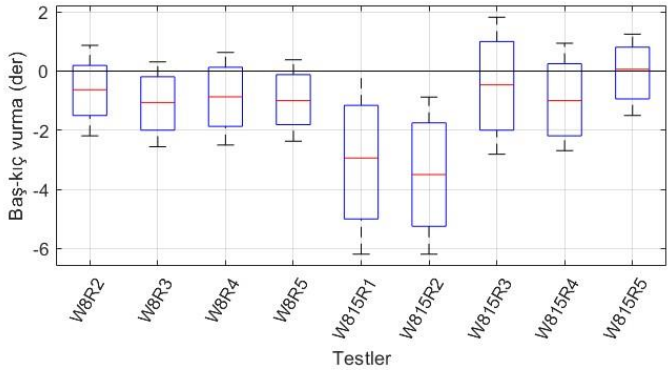


Şekil 4.32 (a) Baş-kıç vurma davranış genlik spektrumu, (b) dalıp-çıkma davranış genlik spektrumu, (c) ileri-geri öteleme davranış genlik spektrumu, (d) 1. halat davranış genlik spektrumu.

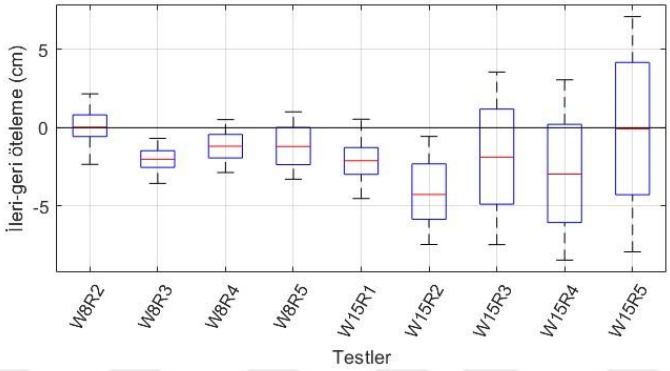
Şekil 4.33'te RAO için kullanılan dalga testlerinin baş-kıç vurma ve ileri-geri öteleme hareketlerinin kutu grafikleri verilmiştir. Bu grafikte en alt ve üst çizgiler minimum ve maksimum değerleri, mavi renkteki kutunun alt ve üst kenarı alt çeyrek (birinci çeyrek) ve üst çeyrek (üçüncü çeyrek) değerlerini, kırmızı çizgi ise medyan yani salınımın ortalamasını göstermektedir. Pozitif yön dalganın geldiği, negatif yön ise dalganın gittiği yönü göstermektedir. İleri-geri öteleme kutu grafiğinde genel olarak 0.15 m yüksekliğindeki dalgaların minimum değerlerinin 0.08 yüksekliğindeki dalgalardan mutlak değer olarak daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 4.32 (d)'deki halat kuvvetinin RAO grafiğinde görülen W15R1 ve W15R2 testlerindeki yüksek pik değerler Şekil 4.33 (a)'daki baş-kıç vurma hareketinin kutu grafiğinde de görülmüştür. Bu testlerde görülen yüksek halat kuvvetlerinin oluşmasına büyük ve negatif yöndeki eksantrik baş-kıç vurma hareketinin neden olduğunu söyleyebiliriz.



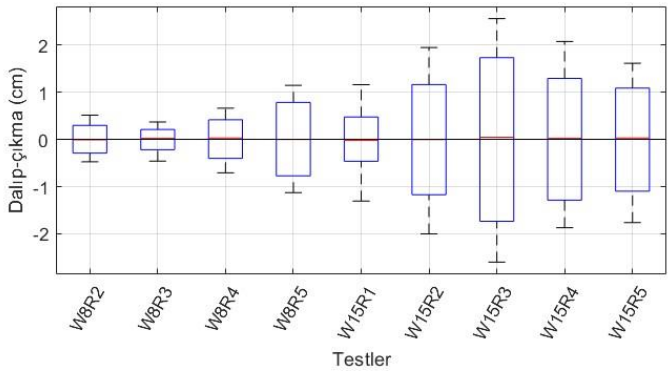
Şekil 4.33 1. halat kuvvetinin maksimum değerleri.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.34 (a) Baş-kıç vurma testleri kutu grafiği, (b) ileri-geri öteleme testleri kutu grafiği.

5
SONUÇ ve ÖNERİ

Yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisinin son yıllarda en verimli olarak değerlendirildiği açık deniz yüzebilir yarı batık rüzgar türbini bu çalışmada deneysel olarak ele alınmıştır. Dikkate alınan rüzgar türbini özgün bir şekle sahiptir. Konik üç kolona sahip olan yarı batık rüzgar türbin modelinin (K-YBRT) rüzgar, dalga ve rüzgar dalga birlikte olan çevresel etken altındaki hidrodinamik davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla, çevresel etkiler ülkemizin potansiyel rüzgar ve dalga parametre ve enerjisi sayısal olarak modellenerek belirlenmiştir. Belirlenen rüzgar ve dalga parametreleri 1/50 model ölçeğinde hesaplanarak deney koşulları elde edilmiştir. Daha sonra aynı ölçekte tasarlanan rüzgar türbinin hidrodinamik özellikleri ve dalga - rüzgar etkisindeki etkisi modellenmiştir. Deneysel çalışmalarda 108 test çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda en stabil su çekimindeki rüzgar türbinin davranışı için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1-Yapılan rüzgar ve dalga sayısal modelleme çalışmaları sonucunda, en stabil ve yüksek rüzgar hızı ile dalga parametreleri güney batı (İstanbul kıyılarının kuzeyi) konumu bulunmuştur (30° E; 41.6° N). Model parametreleri için bir yıl yineleme periyodu operasyonel ve 50 yıl ile 100 yıl yineleme periyodu ise ekstrem koşullar olarak seçilmiştir. Proje alanında belirlenen rüzgar ve dalga uzun dönem dalga istatistiği verileri kullanılarak, model ölçeğine Froude benzeşimi kullanılarak geçilmiş ve deneylerde kullanılacak rüzgar ve dalga koşulları elde edilmiştir.

2- K-YBRT model özellikleri için öncelikle yapılan serbest salınım testleri sonucunda; Farklı su çekimlerinde yapılan baş-kıç vurma serbest düşüş testleri sonucunda, yüzer açık deniz rüzgar platformu tasarımının baş-kıç vurma doğal periyotlarının ve sönüm katsayılarının yapının su çekimi arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Ölçeklendirilmiş yapının üç farklı su çekimi durumunda da doğal periyotları, uygulama alanlarında oluşabilecek dalga periyotlarından çok daha fazla ölçülmüştür. Dolayısıyla yapının uygulama alanında rezonans tehlikesinin olmadığı belirlenmiştir.

Daha sonra yapılan meyil testlerinden; Modelin su çekimi (veya deplasman kuvveti) arttıkça GM'nin azaldığı bu durumda yapının başlangıç stabilitesinin azaldığı görülmektedir, bunun nedeni yapının konik geometriye sahip olması olarak değerlendirilmiştir. Ancak GM'nin negatif olmaması yapının yeterli stabilitede olduğunu göstermektedir. En stabil K-YBRT modeli için su çekimi 275mm olarak belirlenmiştir.

3- Modele gelen dalga düzenli olduğu halde hareketin zaman serisi incelendiğinde büyük frekanslı dalga etkisinde (1.25 Hz) lineer olmayan etkileşimlerin olduğu görülmüştür. Bu frekansta, modelin yaptığı en önemli baş-kıç vurma hareketinin modelin baş-kıç vurma doğal frekansı ile uyumlu olmaktadır.

İleri-geri öteleme hareketin, modele gönderilen düzenli dalganın oluşturduğu salınıma ek olarak daha büyük genlikte ve periyotta bir salınımın da olduğu belirlenmiştir. Spektral yoğunluk grafiğine bakıldığında gönderilen dalganın frekansı olan 1.25 Hz'de en büyük pik değerin oluştuğu görülmüştür. Üçüncü pik frekans ileri-geri öteleme doğal frekansında, ikinci pik frekans ise ileri-geri öteleme doğal frekansının iki katında ortaya çıkmıştır. Ayrıca hareketin zaman serisine bakıldığında ileri-geri öteleme hareketinin pozitif yönde (dalganın gittiği yön) artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bu da modelin dalganın ilerleme yönünde sürüklendiğini göstermektedir. Modele bağlı olan halatlar gevşek bağlandığı için model halatların müsaade ettiği sınıra kadar sürüklenmektedir. Halatlardaki kuvvetin dalga frekansı ile uyumlu değiştiği ölçülmüştür.

Daha küçük frekanslı dalga etkisinde, model lineer davranış göstermeye başlamıştır. Ancak büyük dalga yüksekliklerinde halatlara da daha büyük kuvvetler gelmektedir. Küçük frekanslarda, baş-kıç vurma hareketinin gönderilen dalganın frekansında tek pik oluşmuştur. Ayrıca, ileri-geri öteleme hareketinde büyük frekanslı dalgaların tersine küçük frekansta sürüklenme eğilimi gözlemlenmemiştir. Yine ileri-geri öteleme hareketinde gönderilen dalganın frekansında tek pik oluşmuştur. Bu durumda, halatta sürüklenmeden kaynaklı ekstra bir kuvvet de oluşmamıştır. Halat kuvvetinin pik frekansları, dalga frekansının 1, 2, 3 ve 4 katında oluşmuştur.

4-Sırf rüzgâr halinde gerek baş-kıç gerekse ileri-geri öteleme hareketleri, rüzgar etkisiyle başlayarak gittikçe sönümlenen karakterdedir. Halat gelen kuvvet başlangıçta rüzgar kaynağının oluşturduğu kuvvetten yaklaşık olarak %40 daha büyüktür. Sonrasında ise

modelin yapmış olduğu salınımın genliği giderek azalmış ve %65 daha küçük değer almıştır.

5- Operasyonel sırf düzensiz dalga durumunda (bir yıl yineleme tasarım dalgası için), baş-kıç vurma hareketinin çok küçük frekansta bir pike daha sonraki pikin ise dalga frekansıyla örtüştüğü görülmüştür. Bu dalga etkisinde ileri-geri öteleme hareketinde, en yüksek pik frekans değerinin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın bir frekansta olduğu görülmüştür. İkinci büyük pik frekans değeri ise gönderilen dalganın pik frekans bandında belirlenmiştir. Halat gelen kuvvetin zamanla değişimi incelendiğinde, halat kuvvetinin birkaç kere pik yaptığı görülmektedir. Ancak zaman serisinin geri kalan değerleri bu pik değerler ile kıyaslandığında çok küçük kalmaktadırlar. Kuvvetin en büyük pik frekans değerinin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın olduğu, ikinci pik değerin ise gönderilen dalganın pik frekans bandında olduğu görülmüştür. Üçüncü pik noktası ise gönderilen dalganın pik frekansının 1.5 katında olduğu belirlenmiştir.

6- Rüzgar ve dalganın birlikte operasyonel koşullardaki model üzerindeki etkisi incelendiğinde; Baş-kıç hareketinin sırf dalga durumuna göre daha büyük olduğu belirlenmiştir. Baş-kıç hareketinin en büyük pik frekans değerinin, baş-kıç vurma doğal frekansına yakın bir değerde görülmüştür. İkici pik frekans ise W1 dalgasının pik frekans değerine yakın bir frekansta görülmüştür. İler-geri öteleme hareketin en yüksek pik frekans değerinin ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın bir frekansta olduğu görülmüştür. İkinci büyük pik değer ise gönderilen dalganın pik frekans ise bandında belirlenmiştir. Halat kuvvetinin zaman serisi sırf dalga durumu ile karşılaştırıldığında en büyük halat kuvvetinin dalga-rüzgar kombinasyonlu durumda daha küçük olduğu görülmüştür. Kuvvetin en büyük pik frekans değeri modelin ileri-geri öteleme serbestliğindeki doğal periyoduna yakındır. İkinci büyük pik frekans ise gönderilen dalganın pik frekansı değerine yakın oluşmuştur yani dalga frekansı hakimdir.

7- Ekstrem dalga halinde, yani 50 ve 100 yıl yineleme periyoduna sahip tasarım dalgalarının model üzerinde etkili olduğu durumda; baş-kıç vurma serbest salınım frekansına yakın bir değerde, en büyük pik frekans değeri belirlenmiştir. İkici pik frekans ise dalganın pik frekans değerine yakın bir frekansta görülmüştür. İleri-geri öteleme hareketinin en yüksek pik frekansının ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın olduğu görülmüştür. İkinci büyük pik frekansı ise gönderilen dalganın pik frekansına yakın bir frekansta olduğu belirlenmiştir. Halat kuvvetin zaman serisi incelendiğinde kuvvetin

birçok kere pik yaptığı görülmektedir. Ancak zaman serisinin geri kalan değerleri başlangıçtaki pik değerler ile kıyaslandığında çok küçük kalmaktadırlar. Halat kuvvetinin en büyük pik frekansının ve ikinci frekansın, ileri-geri öteleme doğal frekansına yakın olduğu görülmüştür. Üçüncü büyük pik frekans ise gönderilen dalganın pik frekansı değerine yakındır. Dördüncü ve beşinci pik noktaları ise gönderilen dalganın pik frekansının yaklaşık 2 ve 3 katında görülmüştür.

8- Üç halatla bağlı olan yarı batık rüzgâr türbininin en büyük halat kuvveti dalganın geldiği doğrultudaki halatta ortaya çıkmaktadır.

9-Düzenli ve düzensiz dalga koşullarında yüzer türbinin davranışı karşılaştırmalı değerlendirilmiştir. Düzenli dalga durumunda türbin davranış ve halat kuvvetindeki davranışların dalga frekansların en büyük pik frekansların oluştuğu, buna karşın düzensiz dalga etkisinde ise, en büyük frekansların türbinin doğal frekansları ile uyumlu olduğu ve ikinci pik frekansların ise dalganın frekans bandında belirdiği görülmüştür.

10- Sırf rüzgar etkisinde ve rüzgar dalga birlikte etkimesi durumunda halat kuvvetlerindeki değişim daha yumuşak olmasına karşın sırf dalga etkisinde kuvvet pikleri belirginleşmiştir.

11- Büyük frekanslı dalgaların etkisinde türbin dalganın ilerleme doğrultusunda daha fazla ötelenmeye çalışmasına karşın bu davranış dalga periyodu küçüldükçe azalmıştır.

KAYNAKÇA

[1] X. Wu *vd.*, "Foundations of offshore wind turbines: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 104, ss. 379-393, Nis. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.01.012.

[2] A. J. Goupee, B. J. Koo, R. W. Kimball, K. F. Lambrakos, ve H. J. Dagher, "Experimental comparison of three floating wind turbine concepts", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, c. 136, sy 2, Mar. 2014, doi: 10.1115/1.4025804/375202.

[3] C. Eskilsson, G. Moura Paredes, L. Bergdahl, J. Palm, ve R. Roberto Frias, "CFD study of a moored floating cylinder: Comparison with experimental data", *researchgate.net*, 2013, Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Claes-Eskilsson/publication/270876542_CFD_study_of_a_moored_floating_cylinder_Comparison_with_experimental_data/links/5e6370ce299bf1744f65eb54/CFD-study-of-a-moored-floating-cylinder-Comparison-with-experimental-data.pdf

[4] A. N. Robertson *vd.*, "OC5 Project Phase II: Validation of Global Loads of the DeepCwind Floating Semisubmersible Wind Turbine", *Energy Procedia*, c. 137, ss. 38-57, 2017, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.10.333.

[5] P. A. Robertson *vd.*, "OC5 Project Phase I: Validation of Hydrodynamic Loading on a Fixed Cylinder: Preprint", 2015, Erişim: 16 Temmuz 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.nrel.gov/publications.

[6] A. N. Robertson *vd.*, "OC5 Project Phase Ib: Validation of Hydrodynamic Loading on a Fixed, Flexible Cylinder for Offshore Wind Applications", *Energy Procedia*, c. 94, ss. 82-101, Eyl. 2016, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2016.09.201.

[7] A. Robertson *vd.*, "Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4", Eyl. 2014, doi: 10.2172/1155123.

[8] N. Bruinsma, B. T. Paulsen, ve N. G. Jacobsen, “Validation and application of a fully nonlinear numerical wave tank for simulating floating offshore wind turbines”, 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.054.

[9] Y. S. Zhao, X. H. She, Y. P. He, J. M. Yang, T. Peng, ve Y. F. Kou, “Experimental study on new multi-column tension-leg-type floating wind turbine”, *China Ocean Eng*, c. 32, sy 2, ss. 123-131, 2018, doi: 10.1007/s13344-018-0014-0.

[10] Y. Zhou *vd.*, “Numerical Modelling of Dynamic Responses of a Floating Offshore Wind Turbine Subject to Focused Waves”, *Energies 2019, Vol. 12, Page 3482*, c. 12, sy 18, s. 3482, Eyl. 2019, doi: 10.3390/EN12183482.

[11] Q. Cao, L. Xiao, Z. Cheng, M. Liu, ve B. Wen, “Operational and extreme responses of a new concept of 10MW semi-submersible wind turbine in intermediate water depth: An experimental study”, *Ocean Engineering*, c. 217, Ara. 2020, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2020.108003.

[12] A. Pols, E. Gubesch, N. Abdussamie, I. Penesis, ve C. Chin, “Mooring analysis of a floating owc wave energy converter”, *J Mar Sci Eng*, c. 9, sy 2, ss. 1-22, Şub. 2021, doi: 10.3390/jmse9020228.

[13] L. Wang *vd.*, “OC6 Phase Ia: CFD Simulations of the Free-Decay Motion of the DeepCwind Semisubmersible”, *Energies 2022, Vol. 15, Page 389*, c. 15, sy 1, s. 389, Oca. 2022, doi: 10.3390/EN15010389.

[14] F. Islek, Y. Yuksel, ve C. Sahin, “Evaluation of regional climate models and future wind characteristics in the Black Sea”, *International Journal of Climatology*, c. 42, sy 3, ss. 1877-1901, Mar. 2022, doi: 10.1002/JOC.7341.

[15] F. Islek, Y. Yuksel, ve C. Sahin, “Evaluation of regional climate models and future wave characteristics in an enclosed sea: A case study of the Black Sea”, *Ocean Engineering*, c. 262, s. 112220, Eki. 2022, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.112220.

[16] F. Islek ve Y. Yuksel, “Evaluation of future wind power potential and their projected changes in the Black Sea and possible stable locations for wind farms”, *Ocean Engineering*, c. 266, s. 112832, Ara. 2022, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.112832.

[17] “Greenhouse gas emissions - Our World in Data”. Erişim: 27 Temmuz 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions

[18] “bp energy statistics 2022 excel - Google Search”. Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.google.com/search?q=bp+energy+statistics+2022+excel&sca_esv=602165150&sxsrf=ACQVn0_4xeLRxg1B47ZFUElzj_K6V0Uc5A%3A1706457466918&ei=enm2ZYXFN8aDxc8PrtK8gAg&oq=bp+energy+data+excel+2022&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiGWJwIGVuZXJneSBkYXRhIGV4Y2VsIDIwMjIqAggAMgYQABgWGB4yCxAAGIAEGIoFGIYDMgsQABiABBiKBRiGA0jqGlCWBli2EnABeAGQAQCYAbEBoAHPAqoBAzAuMrgBAcgBAPgBAcICChAAGEcY1gQYsAPCAgQQIxgn4gMEGAAgQYgGAZAGCA&sclient=gws-wiz-serp

[19] bp, “Statistical Review of World Energy 2022”.

[20] E. Martinot, “Renewables. Global futures report 2013”, 2013, Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/22399829

[21] “Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020 – Analysis - IEA”. Erişim: 28 Temmuz 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020

[22] F. ’Birol, F. ’Camera, S. ’Schweinfest, D. ’Papahanasiou, M. ’Neira, ve G. E. ’Azula, “Tracking SDG 7: The Energy Progress Report”, Washington DC, 2022.

[23] “Elektrik - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı”. Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik

[24] “Vaisala Inc, 2015. Vaisala global wind speed map. - Google Search”. Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.google.com/search?q=Vaisala+Inc%2C+2015.+Vaisala+global+wind+speed+map.&oq=Vaisala+Inc%2C+2015.+Vaisala+global+wind+speed+map.&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIKCAEQABiABBiiBNIBCTExMzBqMGoxNagCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8

[25] G. Yavuzcan, “Türkiye rüzgar enerjisi ve Türkiye’de kullanılan rüzgar türbinleri üzerinde bir araştırma”, Ankara, 1961.

[26] “Blyth, James (1839–1906), electrical engineer and university teacher | Oxford Dictionary of National Biography”. Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.oxforddnb.com/display/10.1093/ref:odnb/9780198614128.001.0001/odnb-9780198614128-e-100957

[27] P. W. Carlin, A. S. Laxson, ve E. B. Muljadi, “The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology”, *Wind Energy*, c. 6, sy 2, ss. 129-159, 2003, doi: 10.1002/WE.77.

[28] E. KAPLUHAN, “RÜZGAR ENERJİSİ UYGULAMALARINA BİR ÖRNEK: SİNCİK (ADIYAMAN) RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ”, *Journal of International Social Research*, c. 10, sy 50, ss. 305-322, Haz. 2017, doi: 10.17719/JISR.2017.1663.

[29] “Home - Acteon”. Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://acteon.com/

[30] S. Butterfield, W. Musial, J. Jonkman, ve P. Sclavounos, “Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines”, 2005, Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.osti.gov/bridge

[31] “GWEC GLOBAL OFFSHORE WIND REPORT 2022”, Erişim: 28 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.gwec.net

[32] Y. Yüksel, “Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbinlerinin Hidrodinamik Davranışının Araştırılması”, İstanbul, 2023.

[33] J. Kim ve H. Shin, “Validation of a 750 kW semi-submersible floating offshore wind turbine numerical model with model test data, part II: Model-II”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, c. 12, ss. 213-225, Oca. 2020, doi: 10.1016/J.IJNAOE.2019.07.004.

[34] S. K. Chakrabarti, *Hydrodynamics of offshore structures*. WIT press, 1987.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Öğür vd. "Yüzer Yarı Batık Rüzgar Türbini Platformunun Hidrodinamik Davranışı Üzerine Bir Araştırma" 10. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İzmir, 2023. 354-360.