

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DÜNYA ÇAPINDA OFFSHORE RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE YENİDEN
TASARLANMIŞ BİR OFFSHORE RÜZGAR TÜRBİNİ**

Turgut KEÇİCİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

MAYIS 2022

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DÜNYA ÇAPINDA OFFSHORE RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE YENİDEN
TASARLANMIŞ BİR OFFSHORE RÜZGAR TÜRBİNİ**

Turgut KEÇİCİ

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi İlyas ÖZER

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

MAYIS 2022

ONAY

Turgut Keçici tarafından hazırlanan “**Dünya Çapında Offshore Rüzgar Türbinleri Ve Yeniden Tasarlanmış Bir Offshore Rüzgar Türbini**” adlı tez çalışması 29/06/2022 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi İlyas Özer

(Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Cemil Közkurt

(Üye)

Dr. Öğr. Üyesi Mithat Şimşek

(Üye)

İmza

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Dünya Çapında Offshore Rüzgar Türbinleri Ve Yeniden Tasarlanmış Bir Offshore Rüzgar Türbini**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim.16/05/2022

Turgut KEÇİCİ

ÖNSÖZ

Teknolojik gelişmeler, nüfus artışı, dışa bağımlılığın azaltılmak istenmesi, enerji fiyatlarındaki artış ve yenilenemez enerji kaynaklarının hızla tüketilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi hızla arttırmıştır. Rüzgar enerjisi günümüzde önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu nedenle kara üzerine ve deniz üzerine kurulu rüzgar türbinlerine olan talep artmıştır. Rüzgar türbinleri alanında yaşanan teknolojik gelişmeler neticesinde daha verimle ve yatırım maliyeti daha düşük rüzgar türbinleri teknolojisi sürekli olarak gelişmektedir.

Deniz üstüne kurulu rüzgar türbinleri kara üzerine kurulu rüzgar türbinlerine kıyasla daha verimli ve daha maliyetli yapılardır. Deniz üstüne kurulu rüzgar türbinlerinin maliyetlerinin yüksek olmasına neden olan ana başlıklardan biri ise nakliye masraflarıdır. Açık denizde yapılan deniz üstü rüzgar türbini kurulumu çok maliyetli bir masraf kalemidir. Bu tez çalışmasında deniz üstüne kurulu klasik monopile tipi tek kazıklı rüzgar türbini tasarımı ve analizi yeniden yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde yapılan çalışma tasarımın sadeleştirilmesi, nakliye masraflarında iyileştirilme sağlandığı ve tasarımda kullanılan yapıların maliyetlerinin iyileştirildiği anlaşılmıştır.

Bu tez çalışması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden başlayarak son aşamaya kadar her konuda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi İlyas ÖZER'e şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasında büyük emekleri olan GESBEY A.Ş. ve GRI Renewable Industries şirketinde çalışan tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜNYA ÇAPINDA OFFSHORE RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE YENİDEN TASARLANMIŞ BİR OFFSHORE RÜZGAR TÜRBİNİ

Turgut KEÇİCİ

**Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlyas ÖZER
Mayıs 2022, 67 sayfa**

Rüzgar, binlerce yıldır insanlık için bir enerji kaynağı olmuştur. Geçmişte rüzgar enerjisi daha çok tarım alanında kullanılmıştır. Elektriğin keşfedilmesi ile birlikte insanoğlu elektrik üretebilecek yeni enerji kaynakları bulmaya çalışmıştır. Avrupa’da daha çok tarım alanında kullanılan rüzgar türbinlerinin elektrik üretmek için kullanılabileceğinin anlaşılmasından sonra rüzgar enerjisi elektrik üretmek için kullanılmaya başlamıştır. Günümüzün ve gelecek için önemli bir mühendislik sorunu alternatif enerji kaynakları bulmak ve geliştirmektir. Rüzgar enerjisi ise düşük karbon emisyonlu bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Son yıllarda kara üzerine kurulu rüzgar türbinleri ile birlikte açık deniz üzerine kurulu deniz üstü rüzgar türbinlerinin sayısı artmaktadır. Açık deniz üzerinde bulunan rüzgar, düşük karbonlu bir toplum bağlamında enerji endüstrisi için büyük potansiyel değere sahip temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Açık deniz rüzgar türbinlerinin temelleri, açık deniz rüzgar türbini tasarımındaki ana zorluklardan birini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, dünya üzerinde kurulu açık deniz rüzgar türbinleri ve kurulu güç kapasitesini, açık deniz rüzgar türbinlerinin çeşitlerini, gelecekte kurulması planlanan deniz üstü rüzgar türbini kapasitesini ve 3 boyutlu tasarımı yapılmış bir deniz üstü rüzgar türbinin statik analizi yapılacaktır. Monopile tipi (Tek Kazıklı) bir 3 boyutlu deniz üstü rüzgar türbini tasarımı

yapılmıştır. Bu çalışmada tek kazıklı rüzgar türbinlerinde bulunan geçiş parçası klasik tasarımlarının aksine üretilebilirlik, maliyet, montaj süreleri ve ulaşım konuları dikkate alınarak yeniden tasarlanmıştır. Bu sayede klasik tasarımlarda yaşanan, geçiş parçasının tek parça olarak nakliyesinin ve kurulumunun getirdiği dezavantajlar ortadan kaldırılmaktadır. Önerilen tasarım üzerinde yapılan analizlerde 1687 ton statik yük altında maksimum 180 Mpa stress değeri ve maksimum 3.1 mm yer değiştirme görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri, Monopile, Offshore, Rüzgar Türbinleri, Transition Piece.



ABSTRACT

M.Sc. THESIS

OFFSHORE WIND TURBINES WORLDWIDE AND A REDESIGNED OFFSHORE WIND TURBINE

Turgut KEÇİCİ

**Bandırma Onyedi Eylül University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechatronics Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İlyas ÖZER

MAY 2022, 67 pages

Wind has been an energy source for humanity for thousands of years. In the past, wind energy was mostly used in agriculture. With the discovery of electricity, mankind has tried to find new energy sources that can produce electricity. After it was understood that wind turbines, which are mostly used in agriculture in Europe, could be used to generate electricity, wind energy began to be used to generate electricity. An important engineering problem for today and the future is to find and develop alternative energy sources. Wind energy is a renewable energy source with low carbon emissions. In recent years, the number of offshore wind turbines installed on the open sea has been increasing together with the wind turbines installed on land. Located offshore, wind is a clean, renewable energy source with great potential value for the energy industry in the context of a low-carbon society. The fundamentals of offshore wind turbines pose one of the main challenges in offshore wind turbine design.

In this study, offshore wind turbines installed in the world and their installed power capacity, types of offshore wind turbines, offshore wind turbine capacity planned to be installed in the future and a static analysis of an offshore wind turbine with a 3D design will be made. A monopile type 3D offshore wind turbine was designed. In this study, the transition piece in

monopile type wind turbines has been redesigned considering manufacturability, cost, assembly times and transportation issues, contrary to their classical designs. In this way, the disadvantages of transporting and installing the transition piece as a single piece, which are experienced in classical designs, are eliminated. In the analyzes made on the proposed design, a maximum stress value of 180 Mpa and a maximum displacement of 3.1 mm were observed under a static load of 1687 tons.

Keywords: Monopile, Offshore, Offshore Wind Türbines, Transition Piece, Wind Türbines



İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	III
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
TABLO LİSTESİ.....	XI
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	XII
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	4
2.1 MATERYAL	4
2.2 YÖNTEM.....	4
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN TARİHİ	6
4. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	7
5. RÜZGAR ENERJİSİ HESABI.....	10
5.1 BETZ YASASI: CP DEĞERİ.....	11
6. RÜZGAR TÜRBİNİN NACEL BÖLÜMÜNÜN HAREKETİ VE KONTROLÜ	11
6.1 BİR TÜRBİN İÇİN GÜÇ EĞRİLERİ	13
7. DENİZÜSTÜ (OFFSHORE) RÜZGAR TÜRBİNLERİ	15
8. DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ TEMEL TİPLERİ.....	19
8.1 GRAVİTY-BASED TEMEL TİPİ	21
8.2 MONOPİLE TEMEL TİPİ.....	22
8.3 TRIPOD TEMEL TİPİ	23
8.4 JACKET (LATTICE STRUCTURE) TEMEL TİPİ	24
8.5 SUCTION BUCKET TEMEL TİPİ.....	24
8.6 FLOATING (YÜZER) TEMEL TİPİ.....	25
8.6.1 Floating Tipi Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	26

8.6.1.1	Ballast (Spar Floater) Tipi Yüzer Rüzgar Türbini.....	27
8.6.1.2	Mooring Lines (Tension Leg Platform) Tipi Yüzer Rüzgar Türbini.....	27
8.6.1.3	Buoyancy (Semi-Submersible) Tipi Yüzer Rüzgar Türbini	27
8.7	GELECEKTE KURULMASI PLANLANAN TEMLER	27
9.	BİR RÜZGAR ÇİFTLİĞİNİN GENEL DÜZENLEMESİ	28
10.	DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KURULUM AŞAMALARI	30
11.	DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNİ TEKNOLOJİSİNDEKİ GELİŞMELER.....	31
11.1	DÜNYA ÜZERİNDE KURULU DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNİ KAPASİTESİ	31
11.2	DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE 2050 YILINA KADAR BEKLENEN GELİŞMELER.....	34
11.2.1	Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri Maliyet Azaltmaları ve Kapasite Faktörü İyileştirmeleri.....	35
11.2.2	Gelecek Nesil Rüzgar Türbinleri.....	38
12.	TRANSİTİON PİECE OLMADAN TEK KAZIKLI MONOPİLE TİPİ RÜZGAR TÜRBİNİ	39
12.1	TEK KAZIKLI MONOPİLE TİPİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN ÖNCEKİ TEKNİKLER	39
12.2	GELİŞTİRİLEN TASARIMIN AMACI	41
12.3	GELİŞTİRİLEN YENİLİĞİN TASARIM AŞAMALARI	41
12.3.1	Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section) Tasarımı	41
12.3.2	Dış Çalışma Platformu (External Working Platform) Tasarımı	43
12.3.3	İç Kafes Platformu (Internal Cage Platform) Tasarımı	46
12.4	GELİŞTİRİLEN YENİLİĞİN STATİK ANALİZ AŞAMALARI	51
12.4.1	Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section) Analizi.....	51
12.4.2	Dış Çalışma Platformu (External Working Platform) Analizi.....	54
12.4.3	İç Kafes Platformu (Internal Cage Platform) Analizi.....	57
12.5	GELİŞTİRİLEN YENİLİĞİN SONUÇLARI.....	61

13. KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	67



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3-1: Poul La Cour'un 1891'deki ilk elektrik üreten rüzgar türbini. [a]	6
Şekil 4-1: RNA (Rotor-Nacel düzeneği) ve kule. [16]	8
Şekil 4-2: Bir deniz üstü rüzgar türbini yapısının bileşenleri. [16]	8
Şekil 4-3: Farklı bileşenleri gösteren bir rüzgar türbininin şeması. [16]	9
Şekil 5-1: Rotorun süpürdüğü alanın gösterimi. [16]	10
Şekil 6-1: Aerodinamik hesaplamalar için basit rüzgar türbini modeli; (a) tilt; (b) yaw; and (c) pitch. [16]	12
Şekil 6-2: Bir rüzgar türbininin güç eğrisi ve dönme hızı. [16]	13
Şekil 6-3: 6.2 MW'lık bir türbin için güç eğrisi. [16]	14
Şekil 7-1: 1982'den beri rüzgar endüstrisi tarafından elde edilen önemli kilometre taşlarına genel bakış. [19]	16
Şekil 7-2: Açık deniz rüzgar enerjisi dağıtımı, 2050 yılına kadar 1000 GW'lık toplam kurulu güç kapasitesine kademeli olarak artacaktır. [20]	18
Şekil 8-1: Monopile (Tek kazıklı) tipi bir deniz üstü rüzgar türbini. [16]	19
Şekil 8-2: (a) Suction-Bucket caisson (b) Gravity based (c) Monopile; (d) Tripod on bucket-suction caisson; (e) Jacket-Lattice structure; (f) Tension Leg Platform (g) Spar Buoy Floating tipi temel çeşitleri. [16]	20
Şekil 8-3: Ağırlık temelli bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]	22
Şekil 8-4: Tek kazıklı bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]	23
Şekil 8-5: Tripod tipi bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]	23
Şekil 8-6: Jacket tipi bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]	24
Şekil 8-7: Suction Bucket tipi bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]	25
Şekil 8-8: Floating tipi deniz üstü rüzgar türbinleri. [29]	26
Şekil 9-1: Bir rüzgar çiftliğine genel bakış. [16]	29
Şekil 9-2: Bir açık deniz trafo merkezi ile rüzgar çiftliği. [16]	29
Şekil 9-3: Horns Rev rüzgar çiftliğinin düzeni. [16]	30
Şekil 11-1: 2016-2020 yılları arasında devreye alınan kara ve deniz üzeri rüzgar türbinleri. [18]	32
Şekil 11-2: 2020 yılında devreye alınan deniz üstü rüzgar türbinlerinin ülkelere göre dağılımı. [18]	33
Şekil 11-3: 2020 yılına kadar devreye alınmış deniz üstü rüzgar türbinlerinin ülkelere göre dağılımı. [18]	34

Şekil 11-4: 2050 yılında dünya üzerinde tahmin edilen kurulu açık deniz rüzgar tesis kapasiteleri. [20]	35
Şekil 11-5: Açık deniz rüzgar türbinleri için küresel ağırlıklı ortalama kurulum maliyetleri. [20]	36
Şekil 11-6: 2010-2050 yılları arasında açık deniz rüzgar türbinleri küresel ağırlıklı ortalama kapasite faktörü. [20]	38
Şekil 11-7: Açık deniz rüzgar türbinlerinin yıllara göre tahmini ortalama boyutu. [20]	39
Şekil 12-1: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section).	43
Şekil 12-2: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen dış çalışma platformunun (External Working Platform) kare ve dikdörtgen kutu profillerden oluşan yapısı.	45
Şekil 12-3: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform).	46
Şekil 12-4: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen iç kafes platformunun (Internal Cage Platform) kare ve dikdörtgen kutu profillerden oluşan yapısı.	47
Şekil 12-5: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform).	48
Şekil 12-6: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) önden görünüşü.	49
Şekil 12-7: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) arkadan görünüşü.	50
Şekil 12-8: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section).	51
Şekil 12-9: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) detaylı görüntüsü.	52
Şekil 12-10: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) Von Mises stress değerleri	53
Şekil 12-11: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) yer değiştirme (Displacement) değerleri.	54
Şekil 12-12: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform).	55
Şekil 12-13: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) detaylı görüntüsü.	55

Şekil 12-14: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) Von Mises stress değerleri.....	56
Şekil 12-15: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) yer değiştirme (Displacement) değerleri.....	57
Şekil 12-16: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform).	58
Şekil 12-17: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform) detaylı görüntüsü.	59
Şekil 12-18: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform) Von Mises stress değerleri.	60
Şekil 12-19: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform) yer değiştirme (Displacement) değerleri.....	61
Şekil 12-20: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen tek kazık tipi transition piece yerine kule alt bölümü (Tower Transition Section) modülü içeren bir deniz üstü (offshore) rüzgar türbini.....	62

TABLO LİSTESİ

Tablo 6-1: Farklı rüzgar türbinlerinin tipik rotor ve nacel ağırlığı. [16].....	14
Tablo 8-1: Kurulu deniz üstü rüzgar türbinleri örnekleri. [24].....	21
Tablo 12-1: Kule alt bölümü plaka teknik özellikleri.	42
Tablo 12-2: Kule alt bölümü flanş teknik özellikleri.....	42
Tablo 12-3: Kule alt bölümü kapı teknik özellikleri.	42



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
P	: Rüzgar Enerjisi
C_p	: Güç Katsayısı
ρ	: Havanın yoğunluğu
A	: Rotorun süpürdüğü alan
U	: Rüzgar hızı
π	: Pi sayısı
D	: Rotor çapı
r	: Rotor yarıçapı
θ_{yaw}	: Yalpa açısı
θ_{pitch}	: Gerçek adım açısı
θ_p	: Gerçek adım açısı
θ_{koni}	: Koni açısı

Kisaltmalar	Açıklama
3D	: Üç boyutlu uzay
Mpa	: Megapaskal
mm	: Milimetre
MW	: Megawatt
km	: Kilometre
m	: Metre
RT	: Rüzgar Türbinleri
OWT	: Deniz üstü rüzgar türbini
LCOE	: Seviyelendirilmiş enerji maliyeti
TWh	: Terawatt saat
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
EN	: Avrupa Normu

BS EN	: İngiliz ve Avrupa Standart Spesifikasyonları
ISO	: Uluslararası Standartlar Örgütü
ISO TC	: Uluslararası Standartlar Örgütü Teknik Komisyonu
TS	: Türkçe Standart
kW	: Kilowatt
RNA	: Rotor Nacel düzeneği
RPM	: Dakikadaki Devir Sayısı
max	: Maksimum
PTO	: Güç Aktarma Kutusu
tilt	: Eğim
yaw	: yalpalamak
pitch	: Adım
1P	: Rüzgar türbinin rotor frekans aralığı
s	: Saniye
h	: saat
MWh	: megawatt-saat
EWEA	: Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği
WWEA	: Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği
GW	: Gigawatt
CAGR	: Yıllık bileşik büyüme oranı
TLP	: Gergi ayaklı platform
TRL	: Teknolojiye hazırlık seviyeleri
MHI	: Mitsubishi Heavy Industries
CAPEX	: Sermaye gideri
OPEX	: İşletme gideri

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun varlığından itibaren farklı amaçlarda kullanılan rüzgar enerjisi günümüzde önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Geçmiş dönemlerde yelkenli teknelerde, eski değirmenlerde mısır ve buğday öğütmekte kullanılan rüzgar enerjisi günümüzde elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerin gelişmesinde önemli bir yapıtaşı olan yel değirmenleri elektriğin keşfedilmesi ile birlikte eski kullanım alanlarının aksine elektrik enerjisi elde edebilmek için kullanılabileceği anlaşılmıştır. Yel değirmenlerinin ilk kullanım alanı mısır ve buğday öğütmek için kullanılmıştır. Daha sonra yel değirmenleri tarım arazilerinin sulanması amacıyla kullanılmaya başlamıştır.

Yel değirmenleri elektrik üretimi için kullanılabileceğinin anlaşılmasından sonra fosil yakıtların ucuzluğu nedeni ile çok tercih edilmemiştir. Daha sonra 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi nedeni ile tekrardan düşünölmeye başlamıştır. Daha sonra yaşanan teknolojik gelişmeler ile birlikte rüzgar türbinleri ekonomi, enerji ve çevre ekolojisi açısından önemli bir elektrik enerjisi üretim ürünü haline gelmiştir. Sanayi devrimi ile birlikte fabrikaların seri üretimi geçmesi, rüzgar türbini üretimini de etkilemiş ve rüzgar türbini üretim maliyetlerini düşürmeye başlamıştır.

Rüzgarın fizik davranışı büyük zamansal ve mekansal değişkenlik gösterir. Meteorolojide rüzgar, itici gücü dünya yüzeyinin düzensiz ısınması ve soğuması olan hareket halindeki havadır. Havanın yeryüzüne paralel yatay hareketi, en sık değişen rüzgarın hem yön hem de büyüklükte bir ölçüsüdür. Sonuç olarak, hem rüzgar yönü hem de hızındaki rastgele değişiklik nedeniyle rüzgar tahmini çok zordur. Bu değişkenlik, rüzgar enerjisine bir başka ölçü önemi katmaktadır. Rüzgar enerjisi, enerji teknolojisi için benzersiz özelliklere sahiptir. [1]

Fosil yakıtların aksine yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektrik üretimi son yıllarda dünya üzerinde artmıştır. Düşük karbon emisyonlu enerji üretiminin önemsemesi ve devletlerin de elektrik üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için özel teşvik paketlerinin oluşturması rüzgar türbini sektörünün gelişmesine pozitif bir fayda sağlamıştır. Yaşanan teknolojik gelişmeler rüzgar türbinlerinin daha verimli bir hale gelmesine katkı sağlamıştır. Teknolojinin gelişmeye devam etmesi ile birlikte rüzgar türbinleri daha verimli ve daha az maliyetle üretilmeye devam edilecektir. Yaşanan teknolojik gelişmeler ile birlikte rüzgar türbinlerinin deniz üzerine de kurulabileceği anlaşılmıştır.

Günümüzde rüzgar türbinleri kara üzerine kurulu ve deniz üzerine kurulu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Deniz üzerine kurulu rüzgar türbinlerini sayısının artmasında deniz üzerinde esen rüzgarın kara üzerinde esen rüzgardan daha güçlü ve verimli olmasından kaynaklanmaktadır.

Deniz üstü rüzgar türbinleri ilk olarak kıyıda 10km uzaklıkta ve derinliği ise 10m'yi geçmeyecek şekilde kurulmaya başlanmıştır. Dünyada kurulan ilk deniz üstü rüzgar türbini çiftliği, Danimarka'da Lolland adası yakınlarında kurulan 5 MW gücünde Vindeby rüzgar çiftliğidir. Diğer ülkeler İngiltere ve İsveç ile birlikte Avrupa'da şu anda 12MW'lı offshore santrali çalışır durumdadır. Ve Avrupa bu kurulu gücünü 180MW'a çıkarmayı hedeflemektedir. 2030 yılında ise Avrupa da rüzgar enerjisi kurulu gücünün %25'ini deniz üstü rüzgar türbinlerinin oluşturacağı beklenmektedir. [2]

Günümüzde birçok açık deniz rüzgar türbini (OWT) teknolojisi, 2010 ve 2018 yılları arasında yüksek teknoloji hazırlık seviyesine ulaştı ve açık deniz rüzgar projelerinin seviyelendirilmiş enerji maliyetinde (LCOE) %20'lik önemli bir düşüş gözlemlendi. Böyle bir düşüş, daha büyük rotor çapı, deniz üstü rüzgar türbinleri kümeleme etkisi ve gelişmiş rüzgar türbini teknolojisi ve kurulum teknolojisi gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. [3]

Tüm dünyada ekonominin ve kentleşmenin hızla gelişmesi nedeniyle elektrik enerjisine olan talep önemli ölçüde artış göstermektedir. 2016 yılı sonunda, dünya genelinde toplam elektrik üretimi 24.353 TWh'dır, 1973 yılı için ise elektrik üretimi 6131 TWh'dır. 2016 yılında üretilen elektrik 1973 yılında üretilen elektriğin yaklaşık 4 katıdır. [4] Dünya elektrik tüketiminin 2030 yılına kadar 31.657 TWh'ye yükseleceği tahmin edilmektedir. [5] 2050 yılına kadar dünya elektrik ihtiyacının %20'sinden fazlasının rüzgar enerjisi ile karşılanacağı tahmin edilmektedir. [6] 2030 yılına kadar AB, rüzgar enerjisi pazarına yaklaşık 20 milyar Euro yatırım yapacak ve bunun %60'ı açık deniz rüzgar pazarına yönelik olacak. [7] Rüzgar enerjisinin ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı, ekonomik büyümeyi teşvik edecek, iş fırsatı yaratacak, ulusal güvenliği artıracak, tüketicileri küresel yakıt piyasalarıyla ilişkili fiyat artışlarından veya arz kıtlığından koruyacak ve sera etkisine neden olan gezegeni ısıtan kirleticiyi önemli ölçüde azaltacaktır. [5]

Dünyada fosil yakıt sınırlıdır ancak elektrik enerjisinin çoğu fosil yakıttan elde edilmiştir ve gelecekte dünya yakıt kriziyle karşı karşıya kalacaktır. [8] Bu nedenle, gelecekteki krizle başa çıkmak için rüzgar, güneş, biomass, hydro vb. gibi yenilenebilir enerji ile elektrik enerjisi üretimini incelemek gerekiyor. [9] Rüzgar enerjisi yerli, yurt dışından bağımsız, doğal ve sonsuzdur, gelecekte aynı miktarda elde edilir, asit yağmuru veya atmosferik ısınmaya neden olmaz, CO2 salınımı yapmaz, doğaya ve insan sağlığına zarar vermez, fosil yakıt tasarrufu sağlar, radyoaktif etki yapmaz, hızlı teknolojik gelişme ve döviz kazandıran bir kaynaktır. [10-11]

Megawatt (MW) başına yatırım açısından, açık deniz rüzgar türbinleri, kara üzerindeki rüzgar türbinlerinden hala %50 daha pahalıdır. Tipik olarak, açık deniz rüzgar türbinleri, karadaki benzerlerine göre %20 daha pahalıdır. Kuleler ve temeller ise %350 daha maliyetlidir. [12]

Temellerin tasarımı ve kurulumu, mühendislere açık deniz rüzgar endüstrisinin gelişimi için çözümü kritik öneme sahip zorlu problemler sunar. [13] Açık deniz rüzgar çiftliklerinin temelleri, türbin destek yapısından kaynaklanan eksenel kuvvet ve aşırı deniz durumlarından gelen döngüsel yükler dahil olmak üzere karmaşık bir yük kombinasyonuna tabidir. Bu tür temeller, bir projenin tipik tasarım ömrü olan 25 yıl boyunca meydana gelen çok sayıda rüzgar ve değişen yön, genlik ve frekanstaki hidrodinamik yük çevrimlerine dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. [1]

Rüzgar ve diğer yenilenebilir kaynaklara yönelik genel eğilimler, 20. yüzyılın enerji krizlerinden sonra arttı. [14] Açık deniz rüzgar türbinleri endüstrisinin devam eden büyümesi ve açık deniz rüzgar türbinleri için temel teknolojisinin nispeten sınırlı gelişimi göz önüne alındığında, bu çalışma açık deniz rüzgar türbini temellerinden biri olan tek kazıklı rüzgar türbinin yeniden tasarımı ve analizi yapılarak klasik tasarımın aksine farklı bir yaklaşım ile daha ekonomik, kolay montaj edilebilen basit bir tek kazıklı deniz üstü rüzgar türbini modellemektir. Bu çalışmanın açık deniz rüzgar türbini temellerinin gelecekteki araştırma ve geliştirmesi için fayda sağlaması düşünülmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 MATERYAL

Bu çalışmada tek kazıklı bir deniz üstü rüzgar türbinleri hakkında detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu literatür araştırmasında deniz üstü rüzgar türbinlerinin incelenmesi, Offshore rüzgar türbinlerinin tarihçesi, deniz üstü rüzgar türbinlerinin temel yapıları ve çeşitleri ve gelecekte kurulması planlanan deniz üstü rüzgar türbinlerinin tasarımları ve teknolojik gelişmeleri incelenmiştir. Literatür araştırması yapılırken deniz üstü rüzgar türbinleri üzerine yerli ve yabancı bilimsel makaleler ve dergiler araştırılmıştır. Bir deniz üstü rüzgar türbini tasarımı için gerekli teknik bilgiler için bu kaynaklardan faydalanılmıştır. Bilimsel makalelerin araştırılmasında ScienceDirect, The Royal Society Publishing, Research Gate, Global Wind Energy Council ve Wind Europe gibi sitelerden faydalanılmıştır. Genel olarak konu hakkında bilimsel makaleler araştırılmış, tasarım için gerekli teknik bilgiler toplanmış ve bir deniz üstü rüzgar türbini tasarımı bu verilere dayanarak modellenmiş ve analizi yapılmıştır. Tasarımı yapılan model klasik tek kazıklı rüzgar türbinlerinin dezavantajları incelenerek geliştirilmiştir. Rüzgar türbini tasarımı için gerekli matematiksel değerler Excel programı kullanılarak belirlenmiştir. Tasarım 3 Boyutlu modelleme programı CATIA'da modellenmiştir. Modellenen tasarım HyperWorks programında analizi gerçekleştirilmiştir.

2.2 YÖNTEM

Yabancı kaynaklar kullanılarak yapılan araştırmalardan elde edilen veriler excel programında toplanmıştır ve incelenmiştir. Rüzgar türbini için gerekli kısıtlamalar ve düzenlemeler uluslararası standartlarda belirlenmiştir. Bu uluslararası standartlar IEC 61400 (Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements), BS EN 50308 (Wind turbines. Protective measures. Requirements for design, operation and maintenance), ISO 19900 (General requirements for offshore structures), ISO/TC 67/SC 7 (Offshore structures), ISO 12494 (Atmospheric icing of structures) ve TS EN ISO 14122 (Safety of machinery) gibi standartlardan oluşmaktadır. Deniz üstü rüzgar türbini tasarımı yapılırken bu belirtilen standartlara uygun olarak modelleme yapılmıştır. Offshore rüzgar türbinleri boyutları üreticiden üreticiye değişiklik gösterebilmektedir. Yapılan rüzgar türbini tasarımında General Electric firmasının ürettiği 12MW Haliade-X direct-drive Offshore rüzgar türbininin toplam ağırlığı dikkate alınarak modelleme

yapılmıştır. Bu rüzgar türbini 220 metre rotor açıklığına sahiptir. Her biri 107 metre olan bir kanatın ağırlığı yaklaşık olarak 55 tondur. Nacel ağırlığı ise yaklaşık olarak 600 tondur. Toplam nacel, kanatlar ve Hub'ın ağırlığı ise yaklaşık olarak 850 tondur. Toplam 3 bölümden oluşan kule ağırlığı ise 837 ton ağırlığındadır. General Electric firmasının bu Offshore rüzgar türbini bir prototip olarak üretilip Rotterdam limanı Hollanda'da kullanıma alınmıştır. Tez kapsamında modellenen tasarımın modellenmesi ve statik analiz şartları General Electric firmasının Haliade-X Offshore rüzgar türbini göz önüne alınarak tamamlanmıştır. Rüzgar türbinlerinde en önemli masraf kalemlerinden biri ise kullanılan çelik plakalardır. Elde edilen veriler excel programında detaylı bir şekilde incelenmiş ve tasarımda kullanılacak malzemelerin kalınlıkları optimize edilerek belirlenmiştir. Excel programında toplanan veriler CATIA 3 boyutlu tasarım programında modellenmiştir. Tasarımı yapılan modele HyperWorks programında analiz yapılmıştır. Deniz üstü rüzgar türbinlerinde bulunan dış çalışma platformları yukarıda belirtilen standartlara uygun olarak CATIA programında modellenmiştir. Tasarım yapılırken dış çalışma platformunun deniz seviyesinden yüksekliği önemli ve tasarımı etkileyen bir faktördür. Bu tasarım çalışmasında kulenin kurulacağı bölgede maksimum 12 metre dalga yüksekliği kabul edilerek Tower Transition Piece ve dış çalışma platformu modellenmiştir. Transition Piece içinde bulunan kabinler ve iç platformlar için bir kafes yapı tasarımı yapılmıştır. Bu kafes yapının tasarımı uluslararası standartlara uygun olarak yapılmıştır. Dış çalışma platformu ve modelin içerisinde bulunan kafes yapının tasarımı CATIA programında analizi ise HyperWorks programında yapılmıştır.

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN TARİHİ

Rüzgâr türbini, rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren yapıdır. Yapılan yatırımlara ve çalışmalara bakıldığında özellikle Avrupa kıtasının deniz üstü rüzgar türbini uygulamalarında başı çektiği açıkça görülmektedir. Danimarka 1890 yılında ilk kez rüzgar enerjisinden elektrik üreten ülke olarak tarihteki yerini almıştır. 1991 senesinde 11 adet 450 kW gücünde toplamda 5 MW güç üreten Vindeby adında ilk deniz üstü rüzgar çiftliğini kurmuştur. 25 yıldan fazla hizmet verdikten sonra, sahibi ve işletmecisi DONG Energy, yakın zamanda hizmetten çıkarmaya karar verdi. Bu süreçte deneme amaçlı farklı projelerle devam edilmiştir. 160 MW ve 165 MW gücünde iki büyük proje olan Horns Rev 1 ve Nysted adında deniz üstü rüzgar çiftlikleri 2002 ve 2003 yıllarında kurulmuş ve devreye alınmıştır. [15] Bu olay bize açık deniz rüzgar enerjisinin henüz kısa bir geçmişi olan genç bir alan olduğunu hatırlatıyor. Bununla birlikte, açık deniz rüzgar enerjisi son yıllarda şaşırtıcı bir gelişme kaydetmiştir. Asya-Pasifik bölgesindeki ilk açık deniz rüzgar çiftliği Şanghay yakınlarında bulunmaktadır ve 102 MW kurulu üretim kapasitesine sahiptir. [13]



Şekil 3-1: Poul La Cour'un 1891'deki ilk elektrik üreten rüzgar türbini. [a]

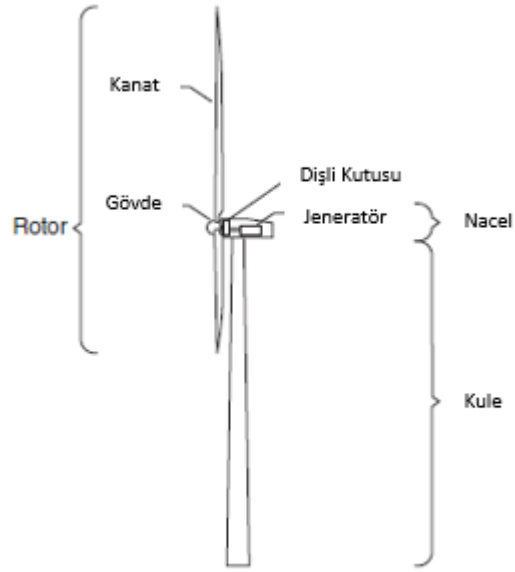
4. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Dünyada her geçen gün artan enerji talebi, fosil yakıtların hızla tükenmesi ve ömürlerinin sınırlı olması, yenilenemeyen bu enerji kaynaklarının sadece belirli ülkelerde bulunması ve yüksek karbon emisyonu oluşturması gibi çeşitli nedenlerle Diğer gelişmiş ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için alternatif olarak doğal ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya başlamışlardır. Farklı yöntemler ve yeni arayışlar bulmaya başlamışlardır. Bunlardan en önemlilerinden biri de son yirmi yılda hızla artan deniz üstü rüzgar türbinleri (offshore) ve buna bağlı olarak sürekli gelişen teknolojilerdir. Günümüzde rüzgar türbinleri kara üzerine kurulu (Onshore) ve deniz üzerine kurulu (Offshore) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Günümüzde dünya üzerinde sürekli olarak artan enerji talebi karşılamak için deniz üstü rüzgar türbinlerini başta Avrupa kıtası olmak üzere dünya üzerinde giderek yaygınlaşan bir yenilenebilir enerji kaynağı haline getirmektedir.

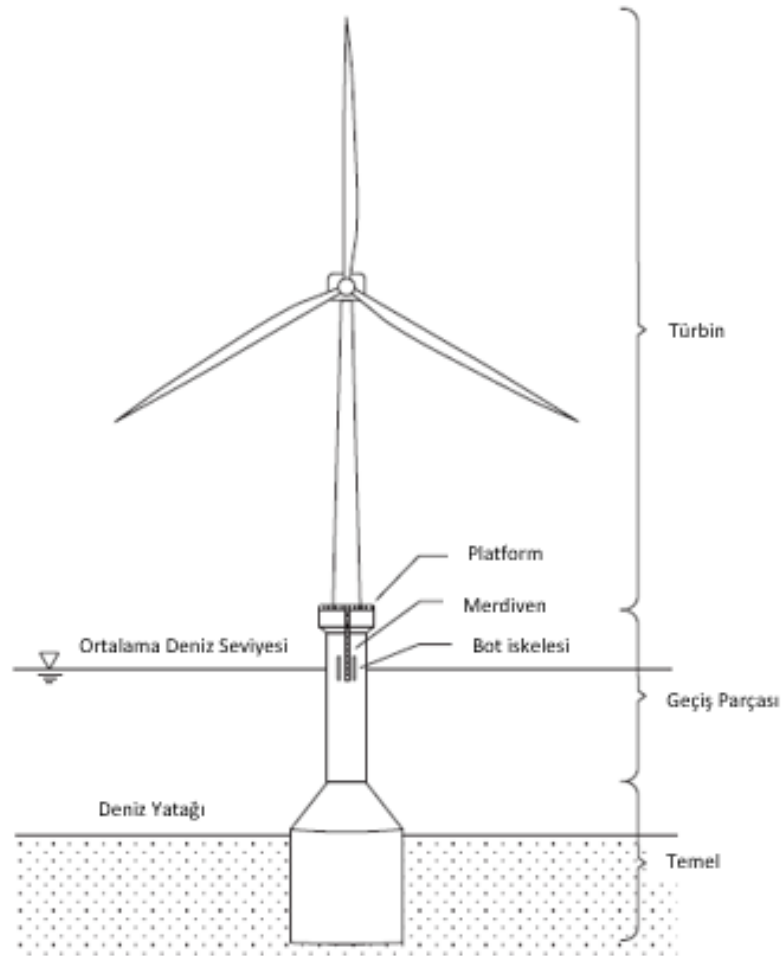
Rüzgar türbini, rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yapılarıdır. Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, kanatlar, nacel, hub, dişli kutusu (Gear Box), Jeneratör ve elektrik-elektronik yapılardan oluşur. Rüzgar türbinleri, yatay veya dikey eksenli çok çeşitli boyutlarda üretilmektedir. Yenilenebilir enerjinin giderek daha önemli bir kaynağı haline geliyorlar olması ve dünya üzerinde birçok ülkede yükselen enerji maliyetlerini düşürmek ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için kullanılmaktadır.

Rüzgar enerjisi söz konusu olduğunda, denizin karadan daha verimli olması nedeniyle denizlerde ve okyanuslarda açık deniz rüzgar türbinleri kurulmaya başlanmıştır. Bir dizi büyük araştırma projesinin ardından, 1990'ların başında İsveç, Danimarka ve Hollanda'da açık deniz gösteri rüzgar türbinleri kuruldu. 1990'ların sonunda, rüzgar türbinleri çok megawattlı makinelere dönüşmüştü.

Rüzgar türbinlerinin veya rüzgar enerjisi dönüştürücülerinin çoğu, tipik olarak yatay olarak monte edilmiş bir jeneratörü çalıştıran üç kanatlı bir türbin ile karakterize edilen genel bir düzenlemeye uygundur. Bir rüzgar türbininin genel terminolojisi ve bileşenleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Bir deniz üstü rüzgar türbininin genel terminolojisi ve bileşenleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



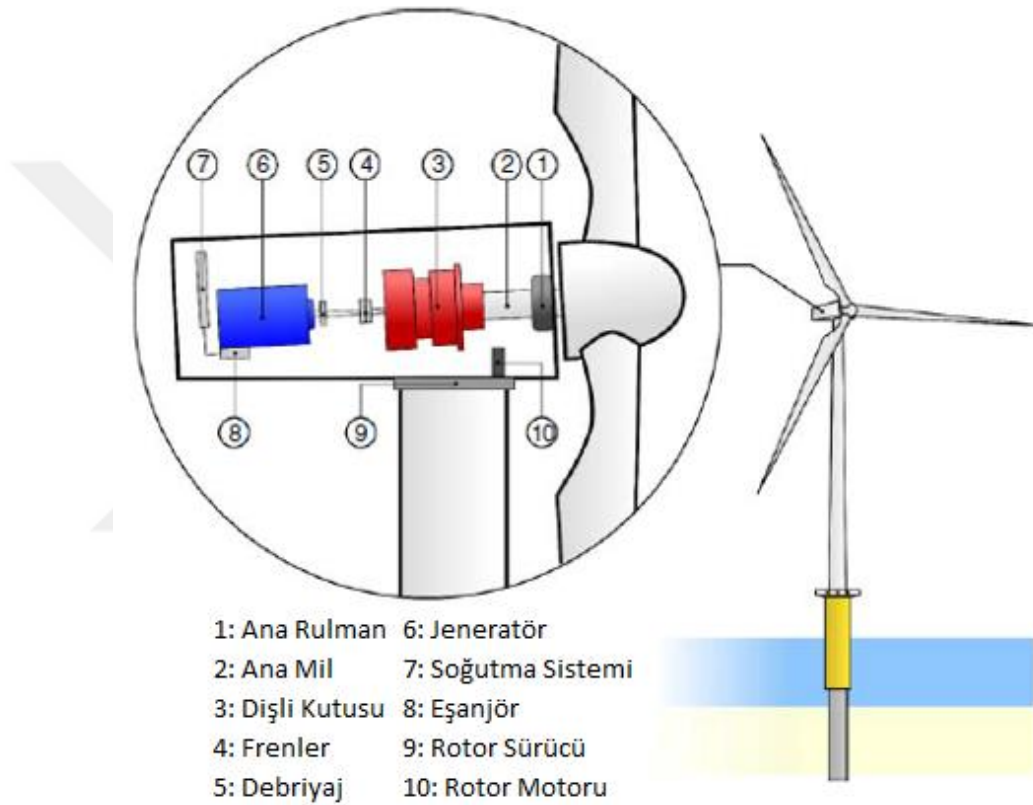
Şekil 4-1: RNA (Rotor-Nacelle düzeneği) ve kule. [16]



Şekil 4-2: Bir deniz üstü rüzgar türbini yapısının bileşenleri. [16]

Bir deniz üstü rüzgar türbini Türbin, Transition Piece (Geçiş Parçası) ve Foundation'dan oluşur. Türbin kısmı Kanatlar, Hub ve Kuleden oluşmaktadır. Transition Piece bölümünde ise platform, Ladder, Boat Landing ve çelik yapıdan oluşmaktadır. Foundation bölümü deniz üstü rüzgar türbinin tipinin belirleyen farklı yapılardan oluşabilir.

Bir rüzgar türbinin çalışma prensibi çok basittir: Esasen, akan rüzgarın kinetik enerjisi, türbinde dönme kinetik enerjisine ve daha sonra bir jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Şekil 4.3, Tipik bir türbin için Nacel'in içindeki bileşenleri gösterir.



Şekil 4-3: Farklı bileşenleri gösteren bir rüzgar türbininin şeması. [16]

Nacel, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, kulenin tepesine monte edilmiştir ve türbinlere bağlı olarak farklı şekil ve boyutlara sahip olabilir. Nacel, yüksek hızlı şaft tarafından tahrik edilen jeneratörü içerir. genellikle bir dişli kutusu ile düşük hızlı mile bağlanır. Düşük devirli mil, nacelden dışarı çıkar ve üzerine rotor göbeği yerleştirilir. Kanatlar rotor göbeğine bağlıdır. Düşük hızlı şaft türbin kanatlarıyla birlikte döner ve tipik hız dakikada yaklaşık 20 devirdir (20 RPM). Tipik bir dişli kutusu yaklaşık 1: 100 hız oranına sahiptir ve yüksek hızlı şaft jeneratörü çalıştırır. Bir sahanın ekonomik uygulanabilirliği için, her bir türbinin beklenen güç ve enerji çıktısını tahmin etmek gereklidir.

5. RÜZGAR ENERJİSİ HESABI

Rüzgar enerjisi yakalama denklem kullanılarak tahmin edilebilir. Denklem (5.1): [16]

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3$$

(5.1)

C_p : Güç katsayısı,

ρ : Havanın yoğunluğu,

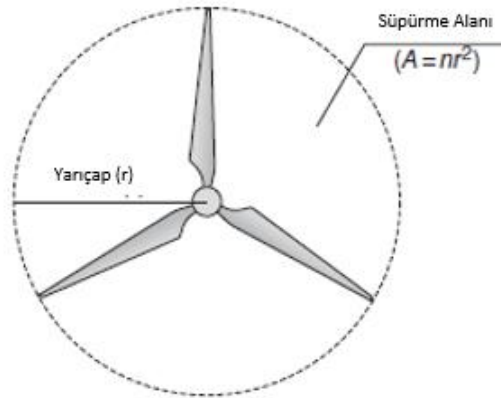
A : Rotorun süpürdüğü alan $A = \frac{\pi}{4} D^2$ (D rotor çapı olmak üzere),

U : Rüzgar hızı

Yukarıdaki denkleme dayanarak, belirli bir süpürme alanı ve belirli bir rüzgar hızı ve hava yoğunluğu için çıkış gücünü artırmanın iki olası yolu olduğu açıktır:

1. Güç katsayısı C_p 'nin artırılması
2. Rotor süpürme alanının genişletilmesi (büyük rotor çapına sahip rüzgar türbinlerinin tasarlanması) böylece A 'yı artırır.

Daha verimli bir kanat tasarımına yatırım yapmaktansa rotor çapını artırmanın daha uygun olduğu aşikar hale geliyor. Süpürme alanı, rotor çapının ikinci gücü ile orantılıdır. Bununla birlikte, rotor çapındaki bu artış, tasarımda birçok zorluk yaratan daha uzun kuleler ve daha büyük motor bölümü ve bileşenleri gerektirir.



Şekil 5-1: Rotorun süpürdüğü alanın gösterimi. [16]

Örnek olarak 8 MW'lık rüzgar türbininin 164 m - yani yaklaşık 82 m uzunluğunda kanatlı bir rotora sahip olduğu belirtilebilir.

5.1 BETZ YASASI: CP DEĞERİ

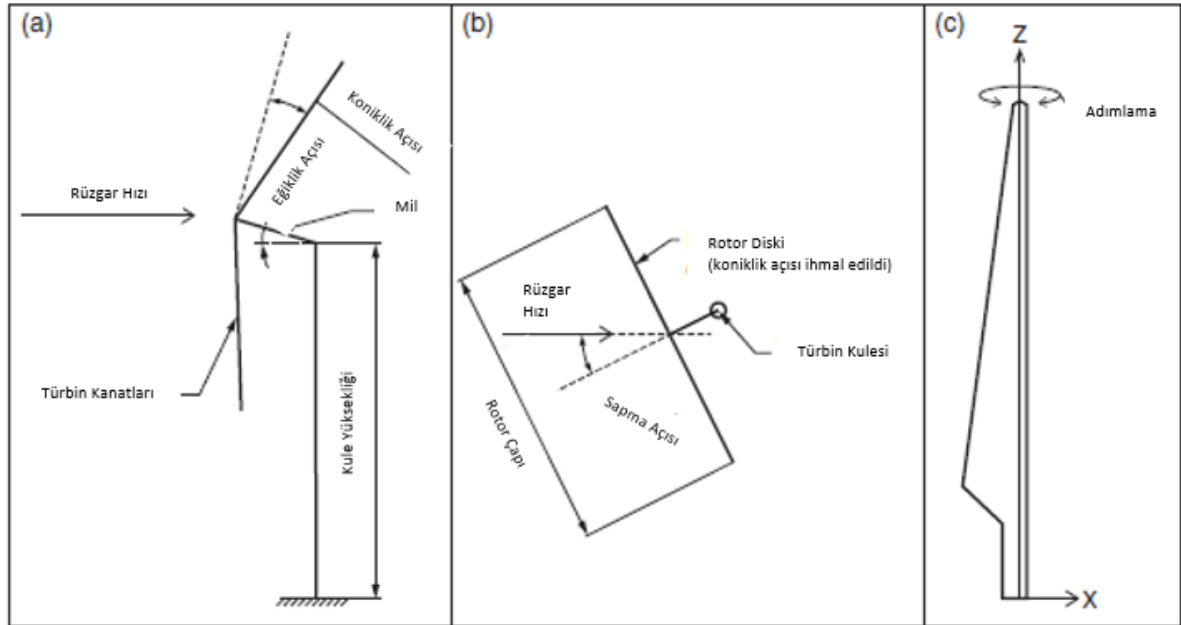
Betz'e (1919) dayanan Betz Limiti veya Betz yasası, hiçbir rüzgar türbininin bir rotoru döndürerek rüzgarın kinetik enerjisinin $16/27$ 'sinden (%59.3) fazlasını mekanik enerjiye dönüştüremeyeceğini ve dolayısıyla teorik maksimum güç katsayısı ($C_{p,max}$) 0,59'dur. Ancak rüzgar türbinleri bu maksimum limitte çalışamaz ve bu değer türbin tipine, kanat sayısına ve rotor hızına bağlıdır. En iyi tasarlanmış rüzgar türbinleri için C_p değeri 0.35–0.45 aralığındadır.

6. RÜZGAR TÜRBİNİN NACEL BÖLÜMÜNÜN HAREKETİ VE KONTROLÜ

Rüzgar hızları zamana göre değişir ve denklem (5.1) takip eder. Bunun elektrik üretiminde bir dalgalanmaya neden olacağı açıktır. Bu, elektrik şebekesine sağlanan güç için özel bir zorluk teşkil edebilir ve bu PTO (power take-off) sorunları olarak bilinir. Kontrol sistemi Nacel'de yer alır ve asıl amaç rotorun sabit bir hızda dönmesini sağlayarak sabit bir güce sahip olmaktır. Rüzgarın yönünün değişmesi, kararsız kanat aerodinamiği nedeniyle göbekteki yüklerin değişmesi gibi sorunlar da vardır. Nacel, rüzgar hızlarını ölçmek için bir anemometre içerir. Devreye giren rüzgar hızında (tipik olarak 4 m s^{-1}), rüzgar türbini güç üretmeye başlar. Belirli bir rüzgar hızında, nominal güce ve dönüş hızına ulaşılır. Tipik olarak, rüzgar türbinleri en yüksek verime 12 ile 16 ms^{-1} arasında tasarlanan rüzgar hızında ulaşır. Bu rüzgar hızında, güç çıkışı nominal kapasitesine ulaşır. Bu rüzgar hızının üzerinde, rotorun güç çıkışı, nominal kapasite ile sınırlıdır ve çeşitli yollarla gerçekleştirilir: durma regülasyonu (sabit dönüş hızı, yani RPM) veya eğim regülasyonu. Şekil 5.1, tilt, yaw ve pitch tanımlarıyla birlikte bir rüzgar türbini modelini şematik olarak göstermektedir. Yatay rüzgar hızı rotor düzlemine dik ise rüzgar türbini optimal konumdadır. Rüzgar hızının kule eksen düzlemi ve düşük hızlı shaft ile yaptığı açıya yalpa açısı (θ_{yaw}) denir. Türbin, rotorun rüzgara dik olması için kendisini en uygun yönde döndürmeye çalışan bir mekanizmaya sahiptir. Bu kontrol eylemi tilt olarak bilinir.

Bir rüzgar türbini güç üretirken genellikle sabit bir dönüş hızı gerekir. Bu, birçok yolla yapılabilir; en yaygınları pitch ve yaw kontrolüdür. Pitch kontrollü rüzgar türbinlerinde, kanatların kanat kökünden kanat ucuna uzanan eksen etrafındaki açısı olan eğim açısı değiştirilebilir. Sahadaki değişikliklerle, kanatların aerofoil profillerine hücum açısı değişir, bu da kaldırma kuvvetinde ve dolayısıyla dönüş hızında ve güç çıkışında bir değişikliğe neden olur. Bu kontrol eylemine pitch denir. Gerçek adım açısı θ_{pitch} veya θ_p ile gösterilir.

Türbin kanatları, düşük hızlı mile dik değildir; genellikle küçük bir koni açısı vardır (θ koni). Kanatların bu konisi, rüzgara karşı daha fazla stabilite sağlar ve ayrıca merkezkaç rahatlama adı verilen bir etkiye sahiptir. Bu, kanatların rüzgar yükü tarafından kanatlara doğru büküldüğü, ancak türbinin dönmesi merkezkaç yüküne neden olduğu anlamına gelir. [16]



Şekil 6-1: Aerodinamik hesaplamalar için basit rüzgar türbini modeli; (a) tilt; (b) yaw; and (c) pitch. [16]

Rüzgardan enerji elde edilmesi düşünüldüğünde, rüzgar türbinlerinin çalışmayacağı bir rüzgar hızı vardır. Bu kanatlara ve makinelere ciddi zarar vermemek için rüzgar türbininin kapatılması gereken bir rüzgar hızıdır. Bu seviyelerin arasında 1P aralığı olarak bilinen rüzgar türbininin çalışma aralığı yer alır. Bu aralığın büyük ölçüde türbinin boyutuna, düzenleme yöntemine (yaw or pitch regulated) ve rüzgar türbini kanatlarının parametrelerine bağlı olduğu belirtilmelidir. Tasarım aşamasında genellikle gerekli olan birkaç terimin tanımları aşağıdaki gibidir:

Start-up speed (Başlangıç hızı): Rotor ve kanat tertibatının dönmeye başladığı rüzgar hızı.

Cut-in speed (Devreye girme hızı): Rüzgar türbininin kullanılabilir güç üretmeye başladığı rüzgar hızı. Tipik olarak, 10-15 km h⁻¹ (2,8-4,1 m s⁻¹).

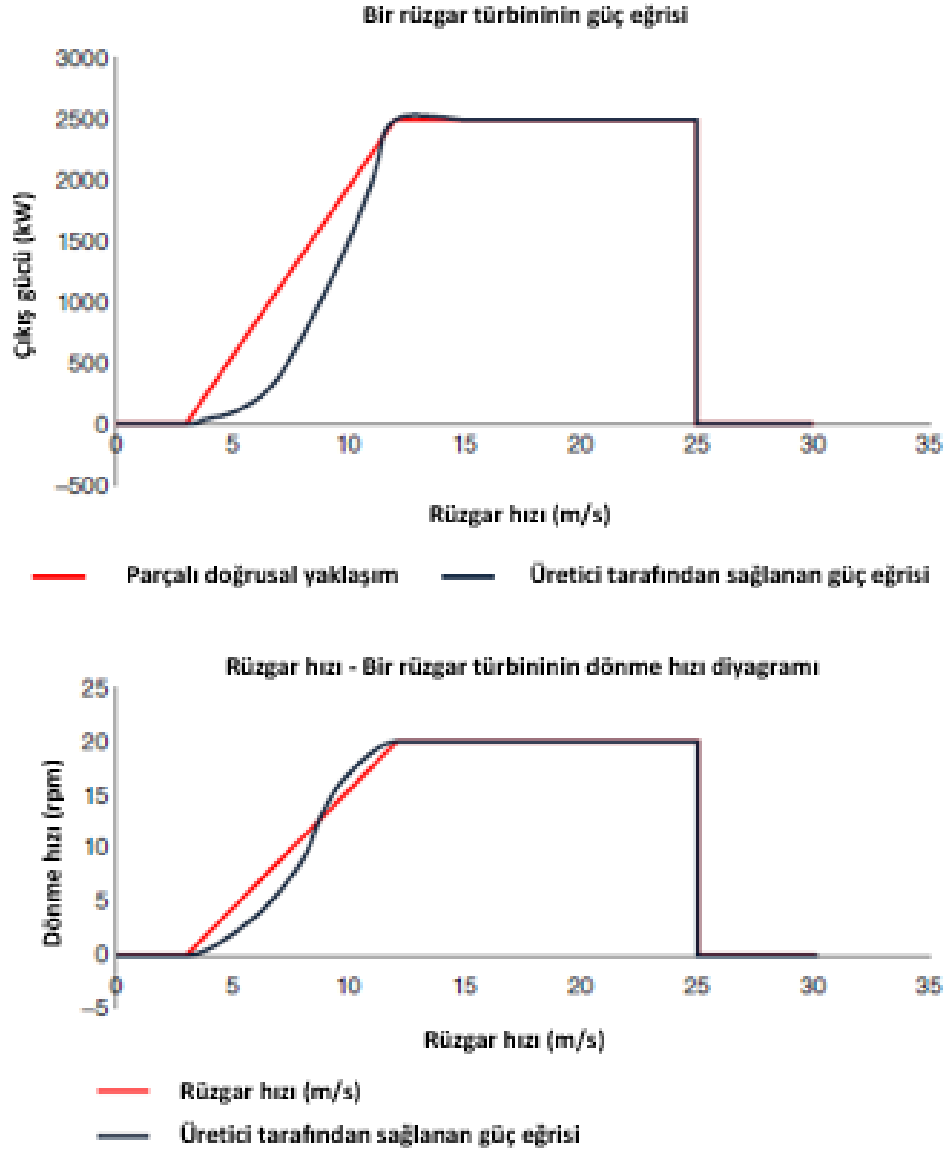
Rated speed (Nominal hız): Rüzgar türbininin nominal gücünü ürettiği minimum rüzgar hızı.

Cut-out speed (Kesinti hızı): Rüzgar türbininin güvenlik nedeniyle elektrik üretimini durdurduğu ve kapattığı rüzgar hızı.

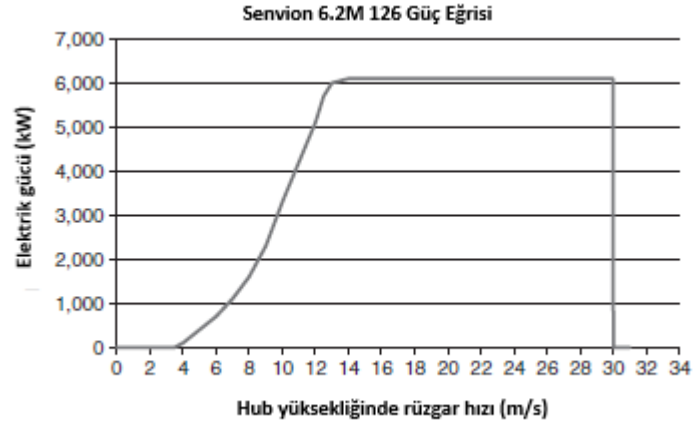
1P range: Bu, türbinin rotor frekans aralığıdır.

6.1 BİR TÜRBİN İÇİN GÜÇ EĞRİLERİ

Tipik rüzgar hızlarına bağlı olarak, rüzgar türbini üreticisi türbinleri için sözde güç eğrilerini sağlayabilir. Güç eğrisi, esasen rüzgar hızına göre çizilen türbinlerin güç üretimidir. Bir rüzgar türbini için güç eğrileri ve dönüş hızı eğrileri mevcuttur ve üretici tarafından sağlanır. Sırasıyla 2.5 ve 6.2 MW türbin için tipik örnekler Şekil 6.2–6.3'de verilmiştir.



Şekil 6-2: Bir rüzgar türbininin güç eğrisi ve dönme hızı. [16]



Şekil 6-3: 6.2 MW'lık bir türbin için güç eğrisi. [16]

Tablo 6-1: Farklı rüzgar türbinlerinin tipik rotor ve nacel ağırlığı. [16]

Türbin	Sinovel 3.0 MW (SL3000/113)	3.6 MW Siemens	4 MW Siemens	6 MW Siemens	8 MW Vestas
Rotor çapı	113 m	120 m	130 m	154 m	164 m
Nacel ağırlığı	120 t	140 t	140 t	360 t	390 t
Rotor ağırlığı	41.5 t	100 t	100 t	81 t	105 t

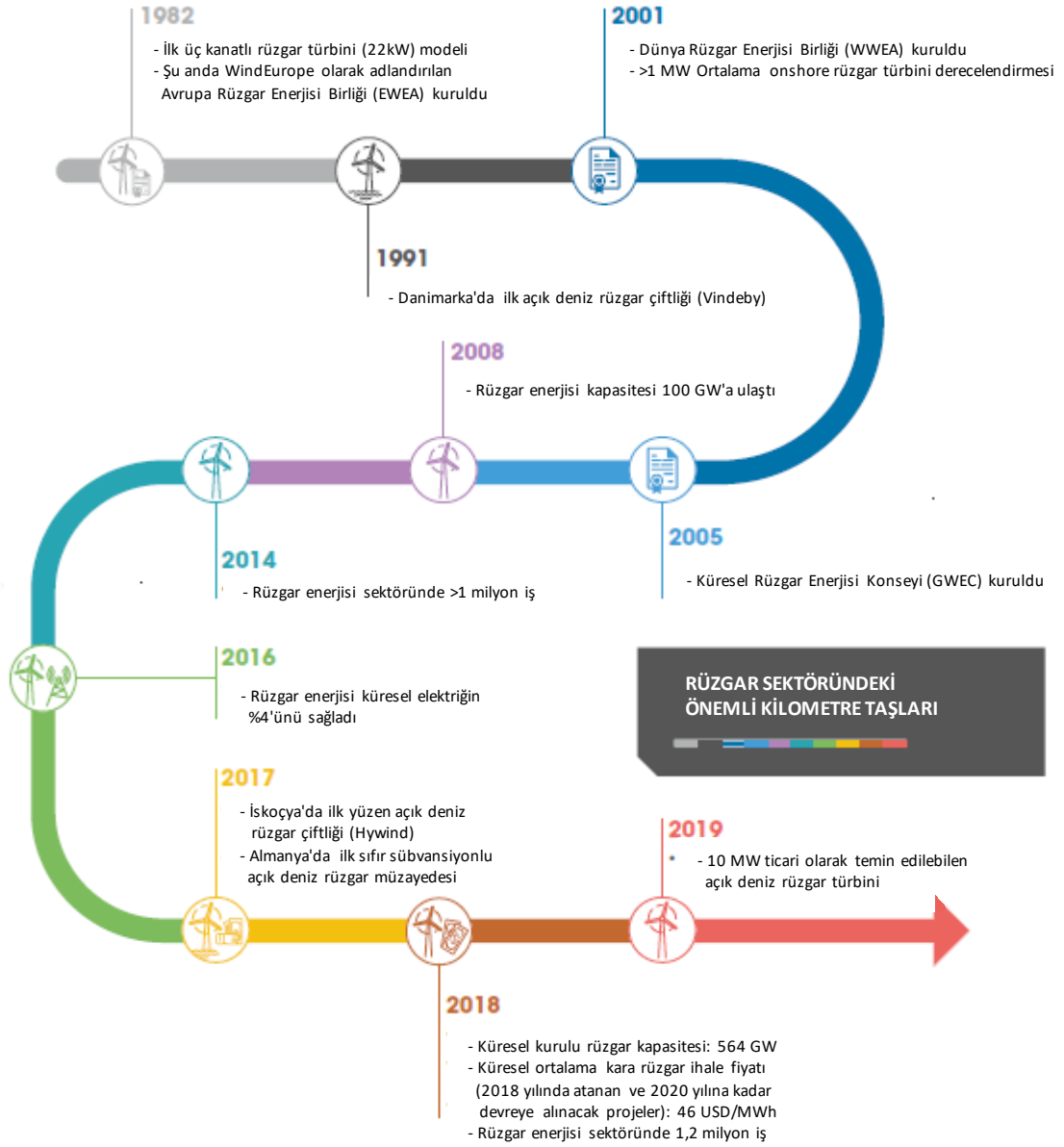
Sunulan değerler geliştirilmiş tasarımla değişebilir. Son zamanlarda, benzer kanat uzunluğuna sahip 8MW'lık rüzgar türbinleri 9,5 MW'a kadar ulaşmıştır.

7. DENİZÜSTÜ (OFFSHORE) RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Açık deniz-okyanus rüzgar gücü veya açık deniz rüzgar enerjisi, su üzerinde bulunan deniz üstü rüzgar çiftliklerinin kurulmasıdır. Deniz veya okyanusta bulunan rüzgar hızları karadaki rüzgar hızlarına kıyasla daha yüksektir. Bu nedenle deniz üstü rüzgar türbinleri kurulu kapasite başına karadakilerine kıyasla daha fazla elektrik üretmektedir. [17]

Denizcilik sektöründe “açık deniz” ifadesinden farklı olarak açık deniz rüzgar enerjisi, korunan kıyı alanları, fiyortlar, göller gibi derinliği fazla olmayan alanları ve aynı zamanda daha derin sulara sahip bölgeleri ifade etmektedir. Dünya üzerinde bulunan deniz üstü rüzgar çiftliklerinin çoğu nispeten derinliği fazla olmayan sularda sabit (Temeli deniz tabanına bağlı) rüzgar türbinleri bulunmaktadır. 2020 yılı daha derin sularda bulunan yüzer tipte rüzgar türbinlerinin geliştirme ve devreye alınmasının başlangıç aşamalarıydı. 2020 yılında toplam dünya üzerinde açık deniz rüzgar enerjisi kapasitesi 35,3 Gigawatt'tır. [18]

Offshore maliyetleri genel olarak karada bulunan rüzgar türbinlerinden daha maliyetli olmuştur ancak bu maliyetler 2019 senesinde 78 \$/MWh'a kadar azalmıştır. Avrupa'daki açık deniz rüzgar enerjisi, 2017 yılında geleneksel güç kaynaklarıyla fiyat olarak rekabetçi bir hale gelmiştir. Açık deniz rüzgar enerjisi üretimi, 2010'lu yıllarda yaklaşık olarak yüzde 30'un üzerinde büyümüştür. [19]



Şekil 7-1: 1982'den beri rüzgar endüstrisi tarafından elde edilen önemli kilometre taşlarına genel bakış. [19]

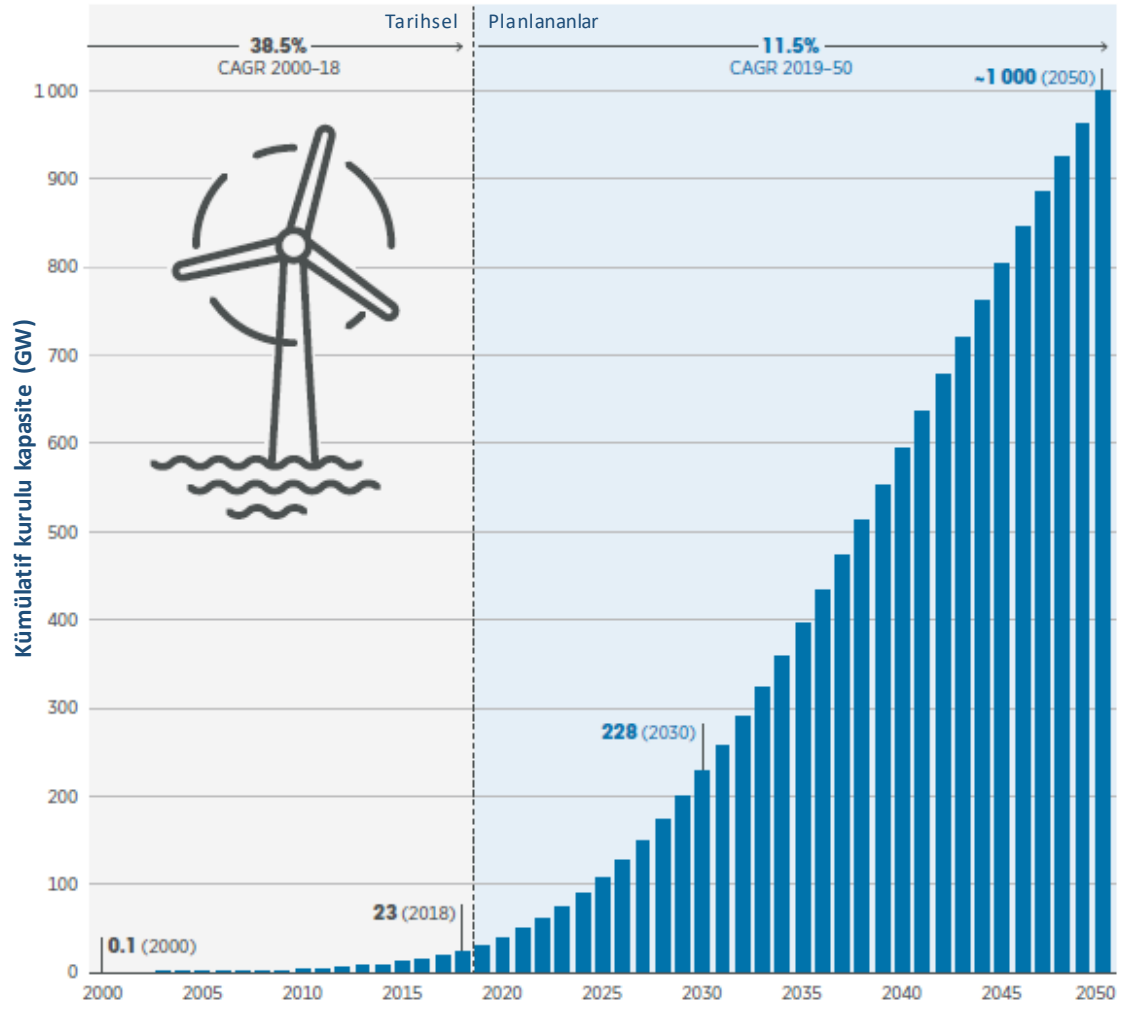
Açık deniz rüzgar teknolojisi, ülkelerin, dünyanın birçok yerinde yaygın olan yoğun nüfuslu kıyı bölgelerine yakın gigawatt ölçekli projeler gerçekleştirirken, denizde genellikle daha yüksek ve bazen daha yumuşak rüzgar kaynaklarından yararlanmalarına olanak tanır. Bu, açık deniz rüzgarını, birçok ülkenin enerji sektörünü karbondan arındırmak için mevcut düşük karbonlu teknolojiler portföyüne önemli bir katkı haline getiriyor. Açık deniz rüzgar enerjisi, hızlı teknoloji geliştirmeleri, tedarik zinciri verimlilikleri ve Avrupa'daki yakından bağlantılı pazarlardaki lojistik sinerjiler hızlı maliyet düşüşleri ve başlangıçlar gördükçe, son iki ila üç yılda gelişmekte olan yenilenebilir teknolojilerden biridir. Yeni pazarlarda önemli bir paya sahiptir. Politika desteği ve finansal teşvikler tarafından teşvik edilen açık deniz rüzgarı, karadaki rüzgar dağıtımlarının

karşılaştığı bazı zorluklara, özellikle iletim tıkanıklığı ve arazi kısıtlamaları ile ilgili olarak tamamlayıcı bir alternatif sağladığı için ivme kazanıyor, bu da bazı ülkelerde (Avrupa gibi) kara rüzgarı dağıtımını daha zor hale getiriyor.

Açık deniz pazarı, önümüzdeki otuz yılda önemli ölçüde büyüyecek ve toplam kurulu açık deniz rüzgar kapasitesi 2018'de sadece 23 GW'dan 2030'da 228 GW'a ve 2050'de 1000 GW'a yaklaşık on kat yükselecektir (Şekil 6.1). Açık deniz rüzgarı, 2050'de 6.044 GW olan toplam küresel kurulu rüzgar kapasitesinin yaklaşık %17'sini temsil edecektir. Bu, 2000 ve 2018 yılları arasındaki %38.5'lik tarihsel ortalamanın oldukça altında olan, önümüzdeki otuz yıl için ortalama %11,5'lik bir ortalama CAGR'yi yansıtmakta olup, yalnızca tarihsel hızı sürdürerek açık deniz rüzgar kurulumlarını ölçeklendirmenin fizibilitesini ve kolaylığını ima etmektedir. 2030 yılına kadar açık deniz rüzgar kapasitelerinde yaklaşık on kat büyüme, Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi'nin açık deniz rüzgar endüstrisinin 200 GW'ın üzerinde büyüyeceğini tahmin eden 2019 açık deniz rüzgar piyasası raporuyla oldukça uyumludur.

Şu anda, küresel kurulu açık deniz rüzgar kapasitesinin %90'ı Kuzey Denizi ve yakındaki Atlantik Okyanusu'nda devreye alınmakta ve işletilmektedir. 2018'de, çoğu Çin'de (toplamın %37'sine yakın) yoğunlaşan yaklaşık 4,5 GW'lık yeni açık deniz rüzgar kapasitesi eklendi ve kapasite artışının büyük kısmı Birleşik Krallık (%29) ve Almanya'da (%22) gerçekleşmiştir. Dağıtım, önümüzdeki yıllarda geliştirilecek projelerle Kuzey Amerika ve Okyanusya'ya genişletilecek şekilde ayarlanmıştır. Açık deniz rüzgar pazarlarının genişlemesi, birkaç gelişmekte olan pazarın denizaşırı dağıtım için hedefler belirlemesiyle önde gelenlerin ötesine geçiyor. [20]

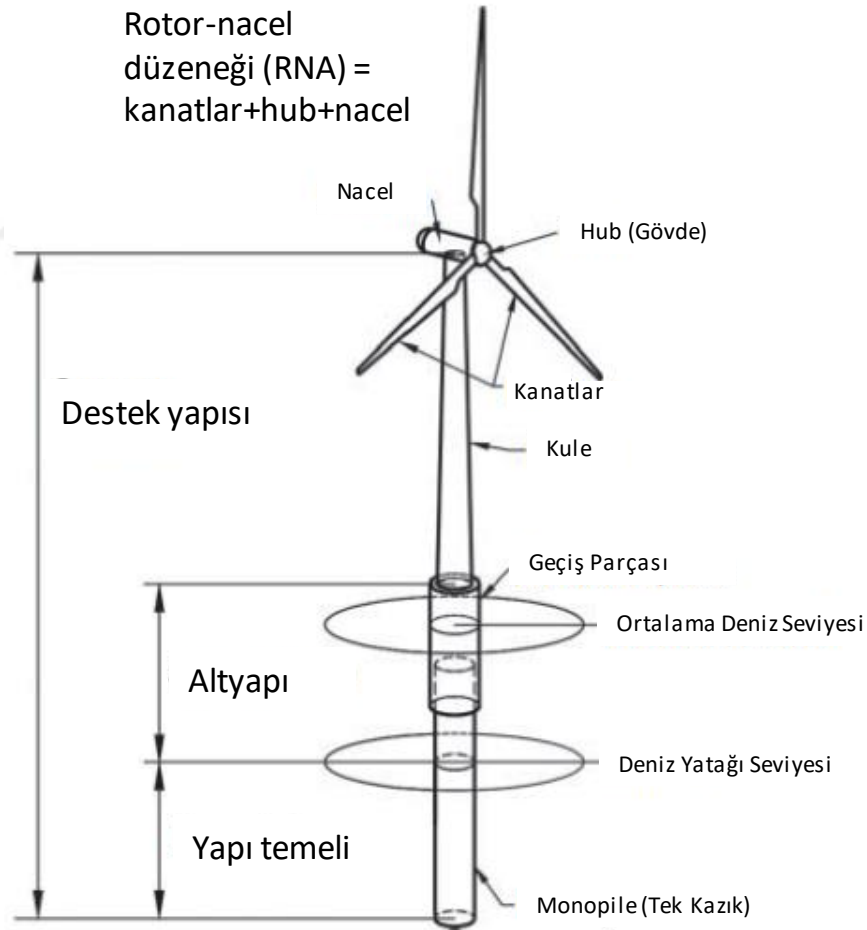
Açık deniz rüzgarı - Küresel



Şekil 7-2: Açık deniz rüzgar enerjisi dağıtımı, 2050 yılına kadar 1000 GW'lık toplam kurulu güç kapasitesine kademeli olarak artacaktır. [20]

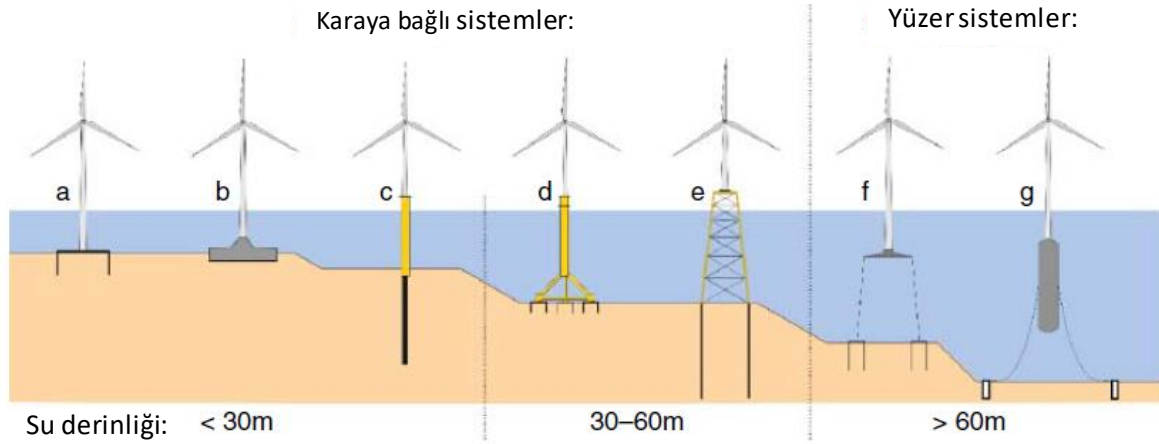
8. DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ TEMEL TİPLERİ

Temel tipleri, deniz üstü rüzgar türbinlerinde en önemli tasarım konusunu oluşturur ve genellikle bir projenin finansal uygulanabilirliğini belirler. Tipik olarak, tüm projenin %25-34'üne mal olmaktadır ve maliyetleri düşürmeye yönelik birçok girişimler mevcuttur. Belirli bir proje için temel seçilirken ve tasarlanırken birçok husus dikkate alınmalıdır. Bu hususlar genele olarak şunları içerir: kötü hava koşulunda kurulum kolaylığı, değişen deniz yatağı koşulları, gerekli gemiler ve ekipman dahil kurulum yönleri ve çevre (gürültü) ile ilgili yerel düzenlemeler. Şekil 8.1, zeminin derinliklerine yerleştirilmiş tek kazıklı (monopile olarak bilinen) geniş çaplı bir kolon üzerinde desteklenen bir rüzgar türbininin şematik bir diyagramını göstermektedir. Bu temel tipi sadeliği nedeniyle açık deniz rüzgar endüstrisinde şimdiye kadar en çok kullanılan temeldir.



Şekil 8-1: Monopile (Tek kazıklı) tipi bir deniz üstü rüzgar türbinini. [16]

Şekil 8.2, günümüzde farklı su derinlikleri için yaygın olarak kullanılan çeşitli temel tiplerini göstermektedir. Monopile (Tek Kazıklı) (Şekil 8.2c), gravity-based foundations (Şekil 8.2b) ve Bucket/suction caisson (Şekil 8.3a) şu anda su için kullanılmakta veya düşünülmektedir. yaklaşık 30 m derinliktedir. 30 ila 60 m arasındaki su derinliği için, jacket/lattice structure veya tripod on bucket/suction caisson üzerinde desteklenen deniz tabanı çerçeve yapıları kullanılır veya planlanır. Tipik olarak 60 m'den daha derin sular için yüzer bir sistem düşünülmektedir. Bununla birlikte, temellerin seçimi deniz tabanına, saha koşullarına, türbin ve yükleme özelliklerine ve ekonomiye bağlıdır. Temel tipi seçimi her zaman su derinliğine bağlı değildir.



Şekil 8-2: (a) Suction-Bucket caisson (b) Gravity based (c) Monopile; (d) Tripod on bucket-suction caisson; (e) Jacket-Lattice structure; (f) Tension Leg Platform (g) Spar Buoy Floating tipi temel çeşitleri. [16]

Deniz üstü rüzgar türbini temel tipleri iki tipte sınıflandırılabilir.

1. Yapının deniz tabanına sabitlendiği topraklanmış sistem veya sabit yapı. Topraklanmış sistem, geleneksel temel/geoteknik mühendisliği terminolojisinde iki türe ayrılabilir: sığ temel (yerçekimine dayalı çözümler ve emme kesonu) ve derin temel.
2. Sistemin yüzmesine izin verilen ve bir demirleme sistemi ile deniz tabanına demirlenen yüzer sistem. Yüzer sistemlerin, temellerin çok düşük bir deniz yatağı ayak izi bırakması, hizmetten çıkarılmasının kolay olması ve sistemin demirden ayrılıp limana yüzdürülebilmesi nedeniyle bakımının daha kolay olması anlamında belirli ekolojik avantajları vardır.

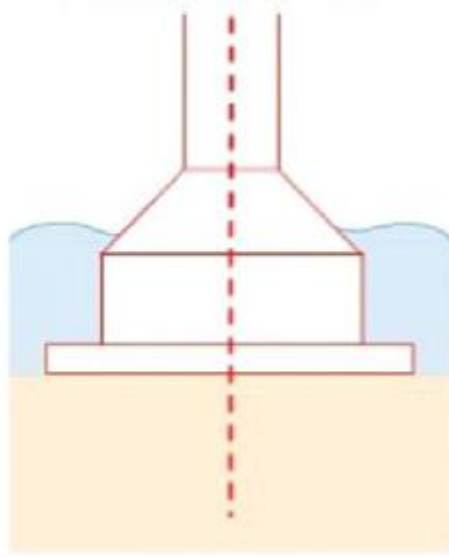
Tablo 8-1: Kurulu deniz üstü rüzgar türbinleri örnekleri. [24]

Örnek rüzgar çiftlikleri							
Rüzgar çiftliği	Tamamen devreye alındığı yıl	Ülke	Tipi	Su derinliği (m)	Türbin sayısı	Türbin Kapasitesi (MW)	Belirtilen proje maliyeti (milyon \$)
Horns Rev 1	2002	Danimarka	Monopile	6-14	80	2	330
Horns Rev 2	2010	Danimarka	Monopile	9-17	91	2.3	563.5
Horns Rev 3	2016	Danimarka	Monopile	10-21	49	8	1186
Lodon Army	2013	İngiltere	Monopile	0-25	175	3.6	2871
Dantysk	2015	Almanya	Monopile	21-31	80	3.6	1186
Anholt	2013	Danimarka	Monopile	15-19	111	3.6	1434
Vindeby	1991	Danimarka	Gravity	2-4	11	0.45	9.5
Tuno Knob	1995	Danimarka	Gravity	4-7	10	0.5	13
Thornton Bank phase 1	2009	Belçika	Gravity	18-28	6	5.075	181.5
Alpha Ventus	2010	Almanya	Tripod	27-30	12	7	296.6
Trianel Windpark Borkum 1	2015	Almanya	Tripod	28-33	40	5	1068
Global Tech 1	2015	Almanya	Tripod	38-41	80	5	2135
Beatrice	2016	İngiltere	Jacket	35-55	84	7	3084.6
Thornton Bank phase 2	2013	Belçika	Jacket	28-30	30	6.15	964
Thornton Bank phase 3	2013	Belçika	Jacket	12-26	18	6.15	578
HywindScotland Pilot Park	2016	İngiltere	Floating (Spar)	100-120	5	6	279.3
WindFloat Atlantic	2017	Portekiz	Floating (Semi-submersible)	85-100	3	8	148
Frederikshavn	2013	Danimarka	Monopile; Bucket	1-3	4	2.3	NA
Qidong	2010	Çin	Bucket	15	1	2.5	2
Xiangshui	2017	Çin	Bucket	10-20	2	3	4.5

8.1 GRAVİTY-BASED TEMEL TİPİ

Yerçekimi temelli temel, yükselme veya devrilmeyi, yani destek yapısı ile deniz tabanı arasında çekme yükünü önlemek üzere tasarlanmıştır. Bu, devrilme momentlerinin etkisi altında yapıyı stabilize etmek için yeterli ölü yük sağlanarak elde edilir. Destek yapısından ve üst yapıdan (kule + Nacelle) gelen ölü yükler yeterli değilse ek balast gerekli olacaktır. Balast kaya, demir cevheri veya betondan oluşur. Bu temellerin montajı genellikle eğimi önlemek için deniz tabanının hazırlanmasını gerektirir. Yerçekimi temelli yapılar çoğu durumda yerinde beton veya prekast beton birimlerle inşa edilir. Yerçekimi temelli konsept, taşıma ve kurulum yöntemine bağlı olarak iki tipte sınıflandırılabilir:

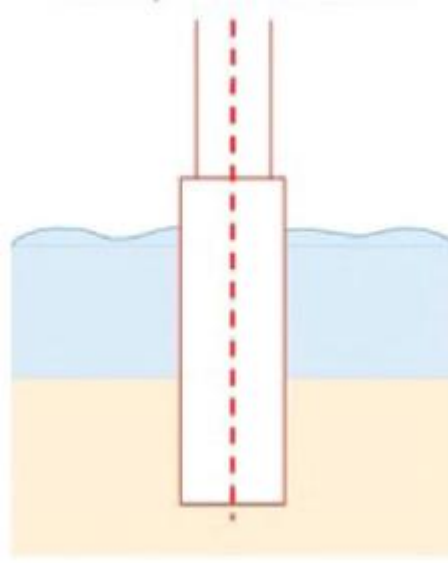
1. Vinçsiz çözüm, aynı zamanda 'yüzdürme ve batma' çözümü olarak da bilinir. Bu tür temeller yüzdürülerek (kendinden yüzer veya bir mekanizma ile) ve açık deniz sahasına çekilmektedir. Sahada, temel, deniz tabanına batmasına neden olacak şekilde balastla doldurulur. Bu, çok sert veya kayalık zemin koşullarına sahip sahalar için cazip bir çözüm olabilir. Bu işlem vinç gerektirmez ve bu nedenle vinçsiz bir çözüm olarak bilinir.
2. Vinç destekli çözüm. Bu tiplerde, temelin yüzme kapasitesi vardır ve bu nedenle sahaya bir gemide çekilir. Temel daha sonra vinçler kullanılarak deniz tabanına indirilir.



Şekil 8-3: Ağırlık temelli bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]

8.2 MONOPİLE TEMEL TİPİ

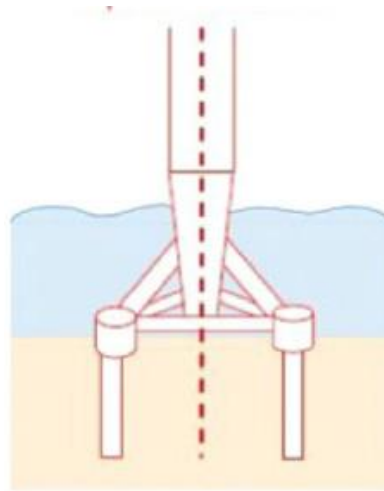
Tek kazıklı olarak bilinen tek büyük çaplı çelik boru kazıklar, açık deniz rüzgar türbinlerini desteklemek için en yaygın temel şeklidir. Şekil 8.4, tipik olarak 25-40 m penetrasyon derinliği ile deniz tabanına çakılan büyük bir çelik kazık (3-8 m çapında) olan tek kazıklı temel tipini göstermektedir. Genellikle geçiş parçası (Transition Piece) olarak adlandırılan bir çelik boru, çelik yığına bağlanır ve kule bu geçiş parçasına takılır. Geçiş parçasında, tekne iskeleleri ve türbine girmek için kullanılan merdivenleri bulundurmaz. Şu anda, bu tip temel 25-30 m'ye kadar olan su derinlikleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu temeller, bir buhar veya hidrolik tahrikli bir çekiç kullanılarak deniz tabanına güvenilir bir şekilde aktarılır/çakılır. Bu uygulama açık deniz petrol ve gaz endüstrisi nedeniyle standart hale getirilmiştir. Bu temellerin taşınması ve sürülmesi, büyük vinçler, çekiç takımı ve sondaj ekipmanı ile donatılması gereken yüzer gemilerin veya krikoların kullanılmasını gerektirir. Sahadaki zemin profili sert kil veya kaya içeriyorsa, sürme-delme-sürme prosedürlerinin benimsenmesi gerekebilir. Kazık çakma sonucu gürültü ve titreşimler meydana gelir. Geleneksel kazık çakmanın gürültü emisyonu, belirli yerlerde genellikle kabul edilebilir seviyeleri aşabilir. Bu gibi durumlarda vibro sürüş yöntemi uygundur. Bu nedenle, türbin (nacel ve rotor) her zaman kazık yapıldıktan sonra kurulur. Genellikle bir rüzgar türbinini desteklemek için bir grup küçük çaplı kazık kullanılabilir. Küçük çaplı yığınlar da bir ceket desteklemek için kullanılır, bu da kuleyi destekler.



Şekil 8-4: Tek kazıklı bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]

8.3 TRİPOD TEMEL TİPİ

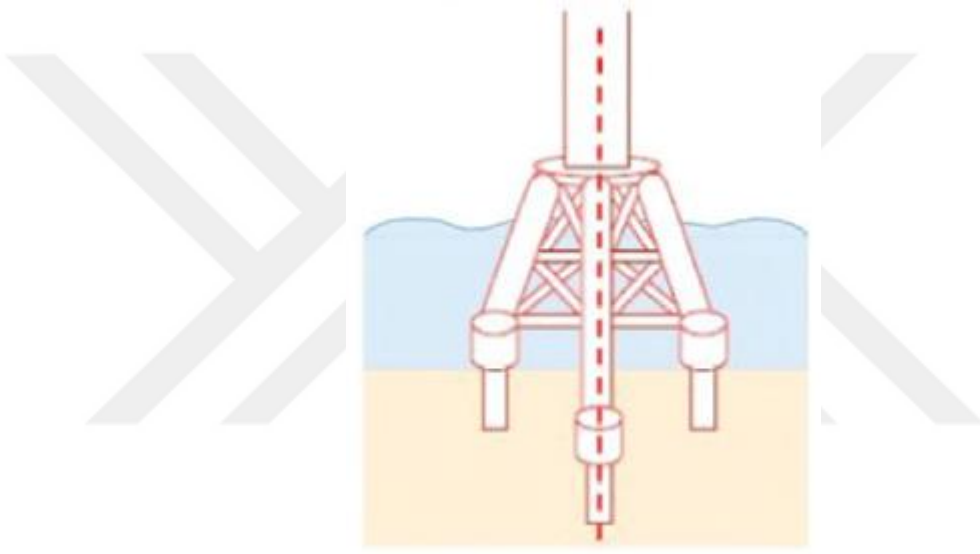
Tripod temeli (Şekil 8.5), tek kazıklı temelin genişletilmesidir, ancak 50 m'ye kadar daha büyük su derinliğine uyarlanmıştır [21]. Üç küçük ve daha hafif kazık deniz tabanına 10-20 m çakılır ve bunlar daha büyük çaplı merkezi bir çelik mil ile bağlanır [22,23]. Etek kazıkları daha büyük dirençler sağlar, böylece tüm yapının stabilitesi ve sertliği daha iyi hale gelir. Bununla birlikte, temel daha ağırdır ve aynı anda kurulması daha zordur, bu nedenle maliyet daha yüksektir. Örnek rüzgar çiftlikleri AlphaVentus, Trianel Windpark Borkum I ve Global Tech I verilebilir. (Tablo 8.1)



Şekil 8-5: Tripod tipi bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]

8.4 JACKET (LATTİCE STRUCTURE) TEMEL TİPİ

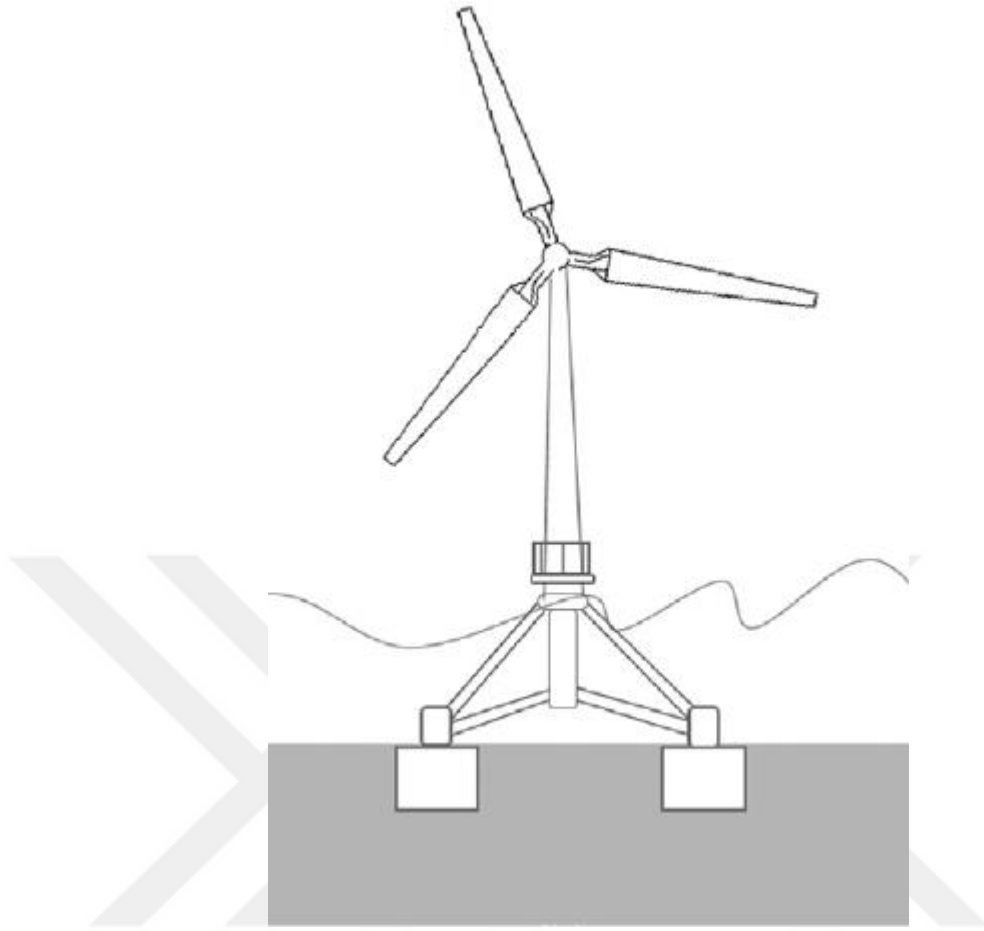
Jacket (kafes yapısı) temeli (Şekil 8.6), petrol ve gaz platformlarının konseptlerine göre tasarlanmış, deniz tabanına yerleştirilmiş üç veya dört boru şeklindeki çelik ayaklı kafes kirişten yapılmıştır. Jacket temel, 10-60 metrelik daha büyük bir su derinliğinde kullanılmaktadır ve hatta bazıları 80 metreye kadar uzatılabilir [21]. Bu tip temel için sınırlama, kurulum ve inşaat maliyetinin yüksek olmasıdır ve her zaman geçiş suyu alt yapıları olarak kullanılır. Beatrice, Thornton Bank evre II ve Thornton Bank evre III gibi bazı derin su rüzgar çiftlikleri jacket temel tipi kullanmıştır. (Tablo 8.1)



Şekil 8-6: Jacket tipi bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]

8.5 SUCTION BUCKET TEMEL TİPİ

Suction Bucket tipi rüzgar türbini temelleri (Şekil 8.7), direnç sağlamak için deniz tabanına ters çevrilmiş bir kova ekidir. Bu temel, bazı açık deniz platformlarının ankrajı olarak kullanılmıştır ve kavramsal olarak 5-60 m'lik daha geniş bir su derinliği aralığını daha düşük bir maliyetle kapsayabilen Deniz üstü rüzgar türbinleri için verimli bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Suction Bucket tipi rüzgar türbini temelinin faydaları bunlarla sınırlı olmamak üzere şunları içerir: hızlı ve düşük gürültülü kurulum, kolay hizmetten çıkarma, deniz yatağı hazırlığı gerektirmez ve daha büyük türbinlerin yanı sıra daha derin sulara uyarlanabilirlik. Deniz üstü rüzgar türbinleri için Suction Bucket temeli araştırması 2001'de kuruldu ve 2003'te Danimarka Frederikshavn'da bir prototip rüzgar türbini kuruldu. [24] (Tablo 8.1)

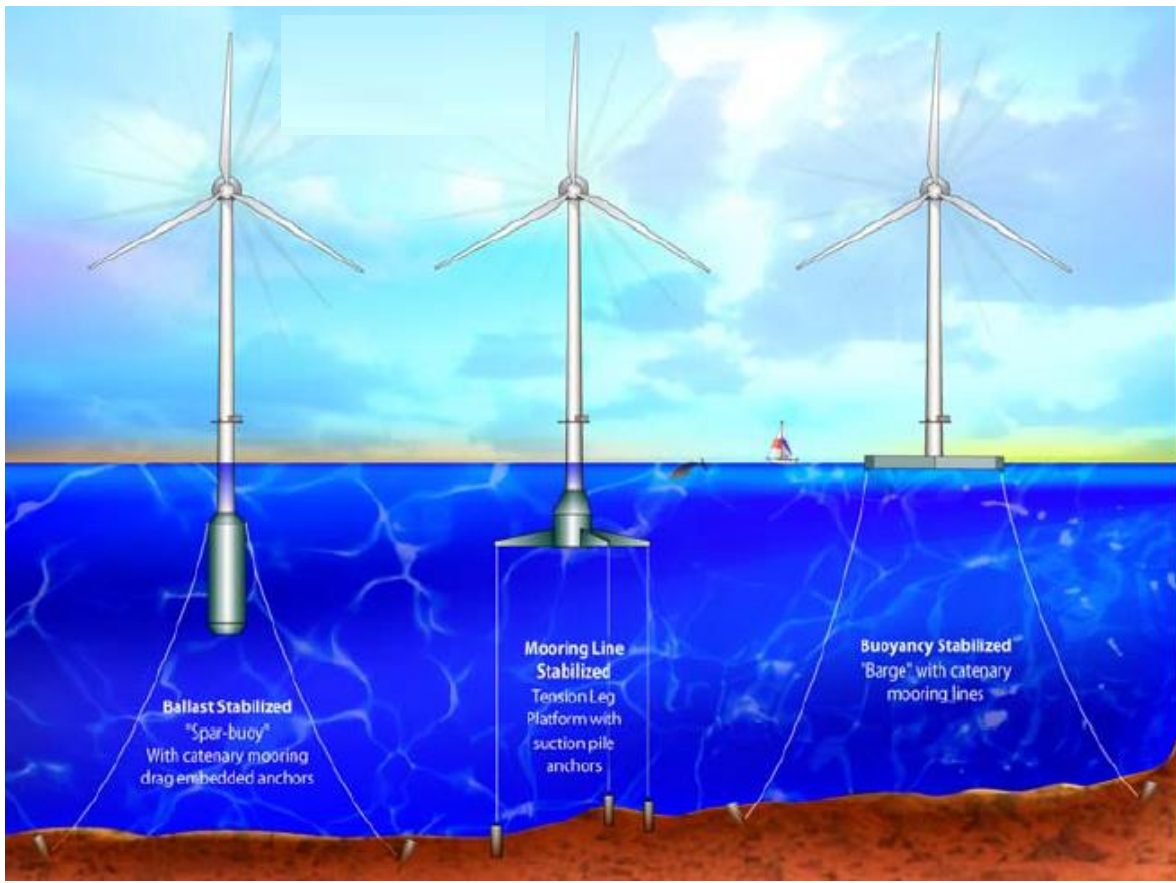


Şekil 8-7: Suction Bucket tipi bir deniz üstü rüzgar türbini. [13]

8.6 FLOATİNG (YÜZER) TEMEL TİPİ

Su derinliği, yüzen sistemlerin ekonomisinde kilit bir rol oynayacak ve öncelikle belirli bir yüzer konfigürasyonun sabit muadilinden daha ekonomik hale geldiği ekonomik kırılma noktasına karar verecektir. Yüzer sistemler, topoloji, dalga, deniz buzu ve deniz tabanı koşullarına bağlı olarak alttan sabit yapılara göre benzersiz avantajlara sahip olabilir. Çeşitli mühendislik çözümlerinin maliyeti/faydası sığ ve derin su uygulamaları için çok farklıdır. Bir açık deniz yüzer rüzgar platformu için farklı gereksinimler ve seri üretim ekonomik ilkelerini uygulama fırsatları, maliyetleri önemli ölçüde azaltacaktır. [25] Petrol ve gaz platformlarını yöneten aynı konuların çoğu, rüzgar platformlarının tasarımında da mevcut olacak, ancak her bir değişkenin önemi farklı ağırlıkta olacak. Açık deniz endüstrisindeki mevcut demirleme, tank ve balast seçeneklerinin çeşitliliği göz önüne alındığında, çok sayıda olası açık deniz rüzgar türbini platform konfigürasyon permütasyonları vardır.

Yüzer temel (Şekil 8.8), daha fazla açık denizde daha iyi rüzgar kaynaklarından yararlanmayı amaçlayan daha derin bir deniz altyapısıdır. Yüzer temel, yüzer bir platform ve deniz tabanına bağlanan bir çapa sisteminden oluşur [26,27]. Spar floater, tension leg platform ve semi-submersible, açık deniz yüzer temellerin ana türleridir ve bunlar petrol ve gaz endüstrisine dayanmaktadır. Yüzer temel esas olarak 50 metreden daha büyük olan çok daha derin bir su derinliğinde kullanılır; ancak açık deniz rüzgar endüstrisinde, özelliğinden dolayı en büyük su derinliği yaklaşık 100 m'dir [28]. Yüzer temelli (Spar tipi) ilk açık deniz rüzgar çiftliği “Hywind Scotland Pilot Park” Birleşik Krallık'ta tam olarak devreye alındı ve daha fazlası araştırılıyor. (Tablo 8.1)



Şekil 8-8: Floating tipi deniz üstü rüzgar türbinleri. [29]

8.6.1 Floating Tipi Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Tipik olarak, yüzen bir platformun genel mimarisi, nihai tasarımın boyutunu ve karakterini belirleyecek birçok başka kritik faktör olmasına rağmen, birinci dereceden bir statik kararlılık analizi ile belirlenecektir. Ancak, platform topolojisi oluşturulduktan sonra, kaba bir ekonomik

fizibilite analizi mümkün hale gelir. Bu nedenle, tüm platformları statik stabiliteyi sağlamak için kullanılan fiziksel ilke veya stratejiye dayalı olarak üç genel kategoriye ayıran bir sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir: [29]

8.6.1.1 Ballast (Spar Floater) Tipi Yüzer Rüzgar Türbini

Merkezi bir yüzdürme tankının altına asılan balast ağırlıklarını kullanarak denge sağlayan platformlar, bir doğrultma momenti ve pitch ve roll'a karşı yüksek atalet direnci ve genellikle kabarma hareketini dengelemek için yeterli taslak oluşturur. Spar-şamandıralar, stabiliteyi sağlamak için bu stratejiyi uygular. Şekil 8.8'in solunda gösterilene benzer spar-şamandıralar, stabiliteyi sağlamak için bu stratejiyi uygular. [25]

8.6.1.2 Mooring Lines (Tension Leg Platform) Tipi Yüzer Rüzgar Türbini

Demirleme halatı gerginliği için kullanım yoluyla stabilite sağlayan platformlardır. The tension leg platform (TLP), Şekil 8.8'in ortasında gösterilene benzer, doğrultma dengesi için demirleme halatı gerilimine dayanmaktadır. [25]

8.6.1.3 Buoyancy (Semi-Submersible) Tipi Yüzer Rüzgar Türbini

Doğrulama momenti için ağırlıklı su düzlemi alanından yararlanarak, dağıtılmış yüzdürme kullanarak stabilite sağlayan platformlardır. [30] Şekil 8.8'in sağında gösterilene benzer bir barge kullanılan prensiptir.

8.7 GELECEKTE KURULMASI PLANLANAN TEMLER

Temeller tipik olarak genel bir açık deniz rüzgar santrali projesinin %15-35'ine mal olur ve LCOE'yi azaltmak için sürekli olarak yeni yenilikçi temeller araştırılır. Bununla birlikte, herhangi bir yeni temel türü bir projede fiilen kullanılmadan önce kapsamlı bir teknoloji incelemesi yapılmalıdır. Genellikle projeyi riske atmamak için yapılır. Avrupa Komisyonu, bu kapsamlı teknoloji hazırlık seviyesi (Technology readiness level) numaralandırmasını 1'den 9'a kadar tanımlar; sürecin farklı aşamaları için Tablo 8.2'ye bakın. Yapılması gereken ilk çalışmalardan biri laboratuvar ortamında teknoloji doğrulamasıdır (THS 4). Bu vakıflar bağlamında, uzun vadeli

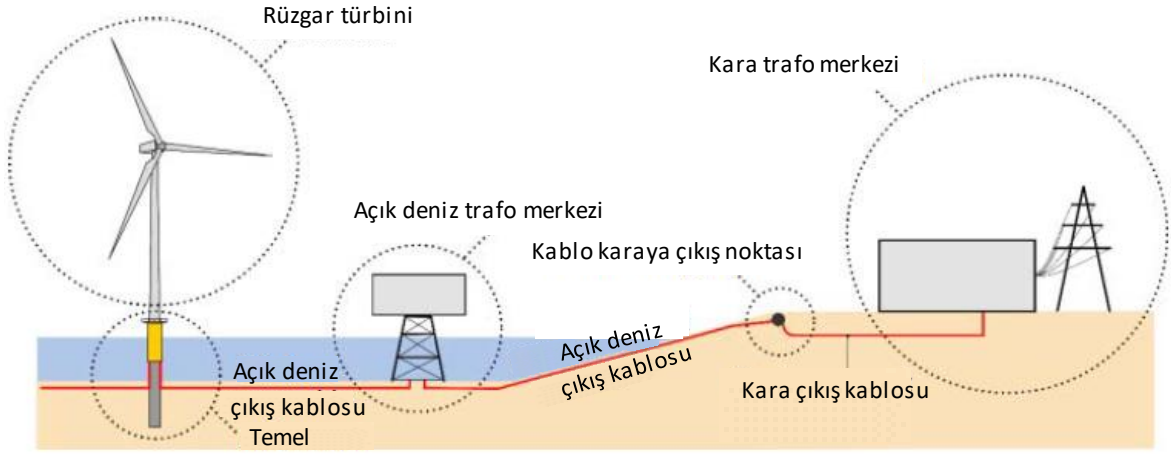
performans da dahil olmak üzere çeşitli performans kriterlerini doğrulamak için testler yapmak anlamına gelir. İlgili bir ortamda, yani açık deniz ortamında doğrulamanın çok pahalı ve operasyonel açıdan zor olduğu ve bu nedenle, yatırımın sonraki aşamalarını haklı çıkarmak için laboratuvar tabanlı değerlendirmenin sağlam olması gerektiği anlaşılmaktadır. [16]

Tablo 8-2: Avrupa Komisyonu tarafından belirlenen teknoloji hazırlık seviyeleri. [16]

Avrupa Komisyonu tarafından belirlenmiş THS seviyeleri
THS 1: Temel ilkeler gözlemlendi ve raporlandı
THS 2: Teknoloji konsepti veya uygulaması formüle edildi
THS 3: Analitik ve tecrübeye dayalı olarak, kritik işlev ve/veya özellik kanıtlandı
THS 4: Laboratuvar ortamında tezgâh üstü, bileşen ve alt bileşen doğrulaması yapıldı. Laboratuvar ortamında prototip elde edildi
THS 5: Laboratuvar prototipinin uygun çevresel ortamda doğrulaması yapıldı
THS 6: Sistem/alt sistem modeli ya da prototipi, uygun çevresel ortamda gösterildi
THS 7: Prototip operasyonel ortamda (gerçek ortam) gösterildi
THS 8: Sistem tamamlandı ve performans değerlendirmesi test ve gösterimle yapıldı (üretim hattına ilişkin hazırlıklar tamamlandı)
THS 9: Sistem ticarileşti

9. BİR RÜZGAR ÇİFTLİĞİNİN GENEL DÜZENLEMESİ

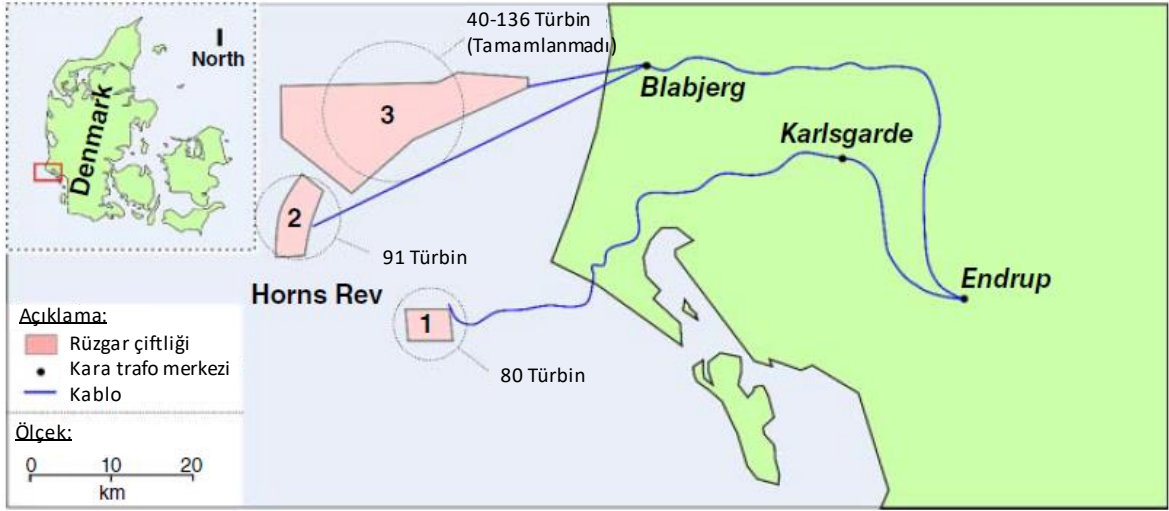
Şekil 9.1, tipik bir rüzgar çiftliğinin bileşenlerini göstermektedir. Bir rüzgar çiftliğindeki türbinler, türbinler arası kablolarla deniz üzerindeki elektrik toplama sistemine bağlanır daha sonra açık denizde toplandıktan sonra kablolar vasıtasıyla kara üzerindeki trafo merkezine bağlanır. Açık denizden kıyıya uzanan ihraç kabloları vardır. Şekil 9.2, birçok rüzgar türbini ve bir trafo merkezine sahip bir rüzgar çiftliğinin fotoğrafını göstermektedir. Şekil 9.3, Horns Rev rüzgar çiftliğinin planını göstermektedir. [16]



Şekil 9-1: Bir rüzgar çiftliğine genel bakış. [16]



Şekil 9-2: Bir açık deniz trafo merkezi ile rüzgar çiftliği. [16]



Şekil 9-3: Horns Rev rüzgar çiftliğinin düzeni. [16]

10.DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KURULUM AŞAMALARI

Deniz üstü rüzgar türbinleri yapımındaki aşamaları üç ana başlık halinde değerlendirebiliriz. Bunlar başlıklar sırasıyla aşağıdaki gibidir:

1- Deniz Üstü Rüzgar Türbini hazırlık evresi;

- Deniz-Okyanus üstü rüzgâr enerjisi potansiyeli ölçüm istasyonları
- Deniz-Okyanus tabanı derinlik bilgisi
- Deniz-Okyanus tabanının Jeoteknik yapısı
- Karaya olan mesafe
- Elektrik kablolarının karadaki şebekeye bağlantısı
- Deniz canlıları yaşam alanları
- Askeri bölgeler
- Sivil havacılık bölgeleri
- Balıkçılık faaliyetleri
- Deniz trafiği
- Bölgede bulunan boru ve kablo hatları
- Bölgedeki yerel izinlerin alınması
- Proje finansman hazırlığı.

2- Tedarik ve üretim evresi;

- Deniz üstü rüzgâr türbini tipinin belirlenmesi ve montaj aşamaları
- Rüzgar türbini temel tipi belirlenmesi

- Deniz-okyanus tabanı kablo montajı
- Deniz üstü elektrik dönüştürücü merkezi
- Deniz-okyanus yapı elemanları
- Malzemelerin nakliyesi ve montaj işlemleri için gerekli donanımlı personel ve donanımlar.

3- İşletme ve bakım evresi;

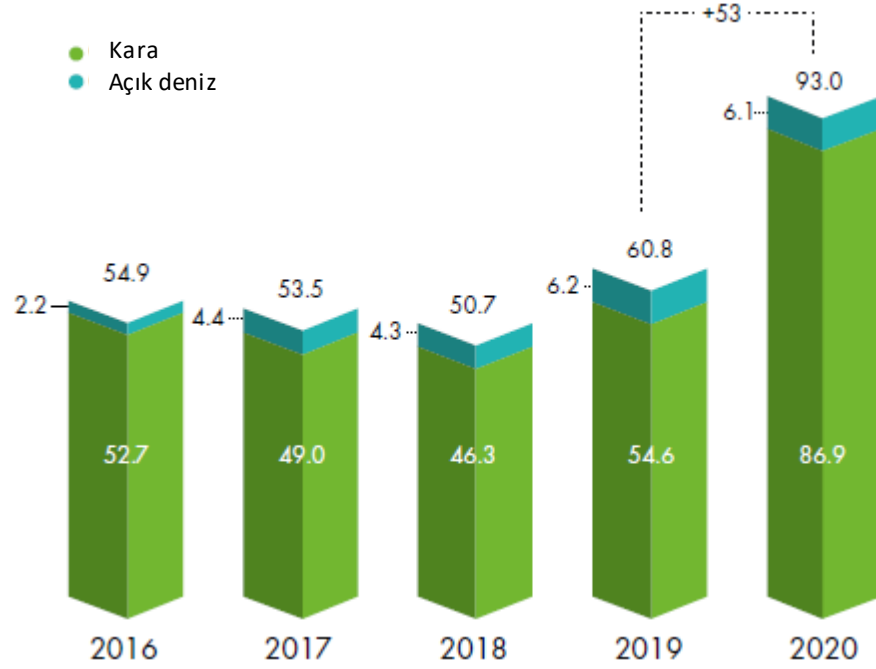
- Kurulacak olan bir kontrol merkezi, tahmini olarak üretilecek olan elektrik miktarını hava koşullarına göre tespit eder ve elektrik iletim sistemi bir personel vasıtasıyla şebekeye elektrik bağlantısını gerçekleştirir. Aynı zamanda kontrol merkezi deniz üstü rüzgar türbinlerini ve deniz üstü rüzgar çiftliğinin diğer yapılarının her birini kontrolünü sağlar.
- Deniz üstü rüzgar çiftliği bakımı gerçekleştiren bir firma, türbinlere bulunan yapıların bakım ve tamiratını gerçekleştirir. Deniz üstü rüzgar türbinlerine erişim helikopter veya gemi ile sağlanabilmektedir. Bazı deniz üstü rüzgar çiftliklerinde servis işlemleri için servis personelleri deniz üstünde kurulu olan yapılarda kalabilmektedir. [31,32,33]

11.DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNİ TEKNOLOJİSİNDEKİ GELİŞMELER

11.1 DÜNYA ÜZERİNDE KURULU DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNİ KAPASİTESİ

2020, küresel yeni rüzgar enerjisi kurulumlarının 90 GW'ı aştığı, 2019'a kıyasla %53'lük bir büyüme ve toplam kurulu kapasitesini ise geçen yıla göre %14'lük bir büyüme gerçekleştirerek 743 GW'a çıkardı. 2020 yılında kara üzerinde kurulu rüzgar türbinleri 86,9 GW, deniz üstü rüzgar türbinleri ise 6,1 GW artış göstermiştir. 2020 yılı kara üzerinde kurulan yeni rüzgar türbinleri için tarihin en yüksek, deniz üstü rüzgar türbinleri ise tarihinin ikinci en yüksek yılını gerçekleştirmiştir.

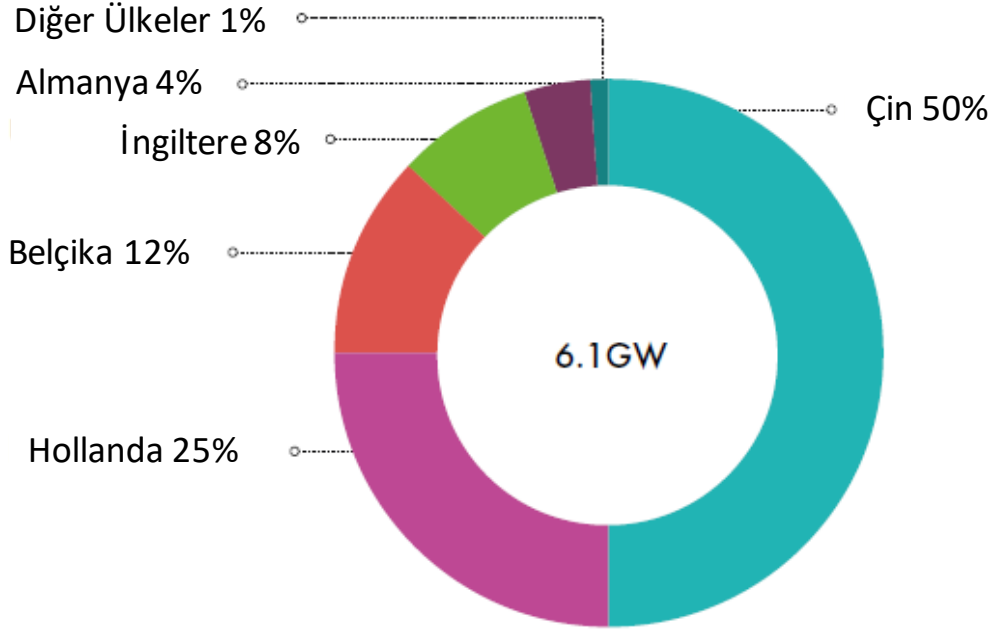
Yeni kurulumlar



Şekil 11-1: 2016-2020 yılları arasında devreye alınan kara ve deniz üzeri rüzgar türbinleri. [18]

2020 yılında kurulan deniz üstü rüzgar türbinlerinin ülkelere göre dağılımını incelediğimizde ise Çin'in 2020 yılında deniz üstü rüzgar türbini yatırımının 2020 yılında dünya üzerinde devreye alınan alının deniz üstü rüzgar türbinlerine oranının %50 olduğu anlaşılmaktadır. Hollanda ise %25 ile Çin'den sonra ikinci sıradadır. Belçika %12 ile üçüncü sırada, Birleşik Krallık %8, Almanya %4 ve geriye kalan diğer ülkelerin ise %1 oranında olduğu anlaşılmaktadır.

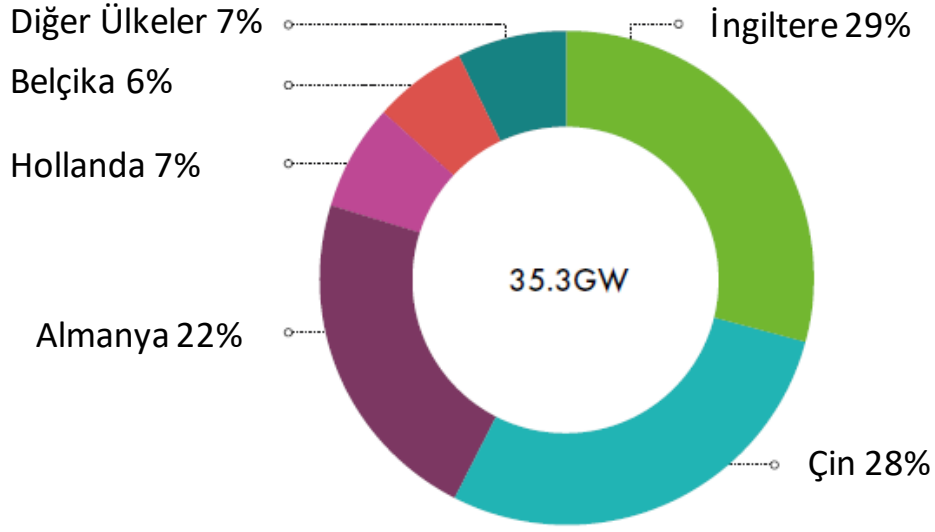
Açık denizde yeni kurulum (%)



Şekil 11-2: 2020 yılında devreye alınan deniz üstü rüzgar türbinlerinin ülkelere göre dağılımı. [18]

2020 yılı sonuna kadar toplam devreye alınmış deniz üstü rüzgar türbini oranları incelendiğinde ise %29 oranıyla Birleşik Krallık birinci sırada olduğu görülmektedir. Birleşik Krallıktan sonra %28 oranıyla Çin Birleşik Krallık'ı takip etmektedir. Almanya'nın oranı %22, Hollanda'nın oranı %7, Belçika'nın oranı %6 dünya üzerinde geriye kalan diğer ülkelerin oranı ise %7 olarak verilmektedir.

Açık denizde toplam kurulum (%)

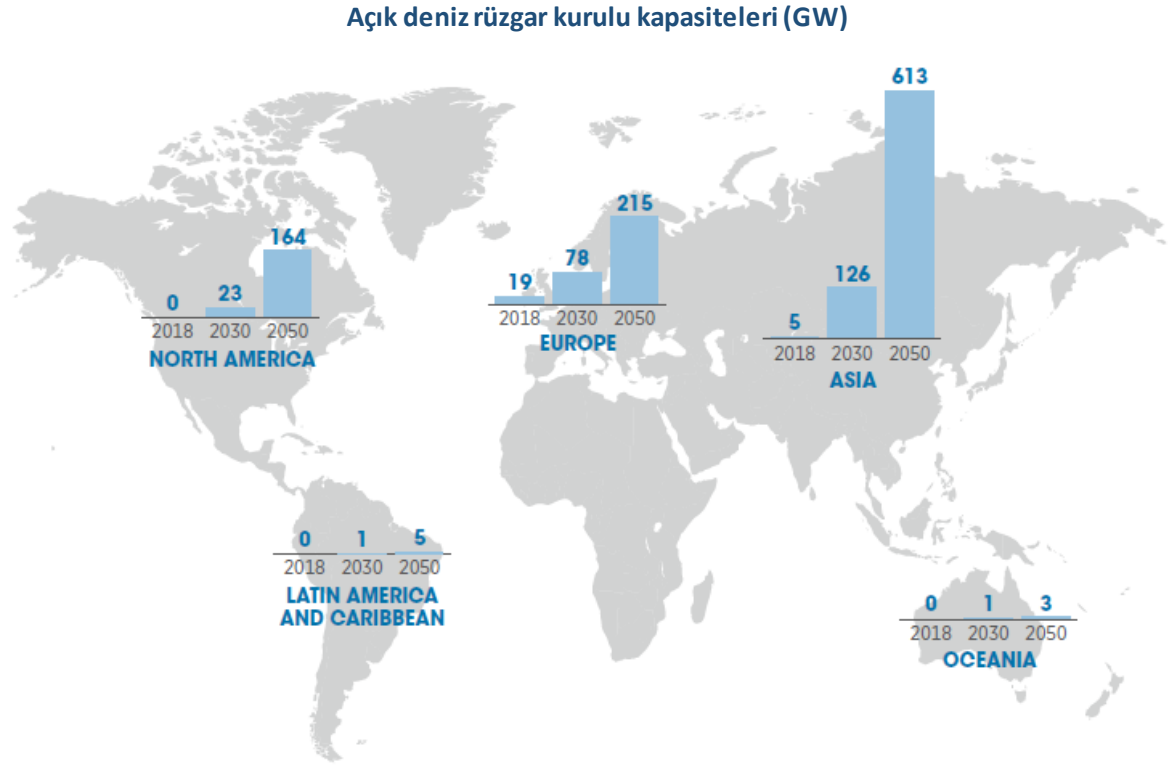


Şekil 11-3: 2020 yılına kadar devreye alınmış deniz üstü rüzgar türbinlerinin ülkelere göre dağılımı. [18]

11.2 DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE 2050 YILINA KADAR BEKLENEN GELİŞMELER

Açık deniz rüzgar teknolojisi, ülkelerin, dünyanın birçok yerinde yaygın olan yoğun nüfuslu kıyı bölgelerine yakın gigawatt ölçekli projeler gerçekleştirirken, denizde genellikle daha yüksek ve bazen daha yumuşak rüzgar kaynaklarından yararlanmalarına olanak tanır. Açık deniz rüzgar türbinleri pazarının, önümüzdeki otuz yılda önemli ölçüde büyümesi beklenmektedir. Toplam kurulu açık deniz rüzgar kapasitesi 2018'de sadece 23 GW'dan 2030'da 228 GW'a ve 2050'de 1000 GW'a yaklaşık on kat yükselmesi beklenmektedir. Şu anda, dünya üzerinde kurulu açık deniz rüzgar kapasitesinin %90'ı Kuzey Denizi ve yakınındaki Atlantik Okyanusu'nda devreye alınmakta ve işletilmektedir. İleriye dönük olarak, önümüzdeki otuz yıl içinde Asya sularında özellikle Çin, Hindistan, Çin, Kore Cumhuriyeti, Japonya, Endonezya, Filipinler ve Vietnam gibi ülkelerde kurulu deniz üstü rüzgar türbini kapasitesinde belirgin bir değişiklik olması beklenmektedir. Asya, 2030'a kadar 100 GW'ı ve 2050'ye kadar 600 GW'ı aşan toplam kapasiteye sahip küresel açık deniz rüzgar enerjisi kurulumları yapması planlanmaktadır. Çin'in şu andan itibaren yirmi yıldan daha kısa bir süre içerisinde Avrupa'yı geride bırakarak açık deniz rüzgar tesisleri bakımından ilk sırada olması beklenmektedir. Avrupa, 2018'de 19 GW'a kıyasla, toplam açık deniz rüzgar kapasitesi 2030'a kadar dört kat artarak 78 GW'a ve 2050'de 215 GW'a on bir kattan fazla arttırarak açık deniz rüzgar tesislerine on yıl kadar hakim olmaya devam etmesi tahmin

edilmektedir. Avrupa ve Kuzey Amerika, gelişmekte olan bir diğer açık deniz rüzgar pazarı olması tahmin edilmektedir. ABD'de, açık deniz rüzgar kurulu kapasitesi, bugün 1 GW'dan daha az iken, 2030'a kadar neredeyse 23 GW'a ve 2050'ye kadar 164 GW'a yükselmesi tahmin edilmektedir.



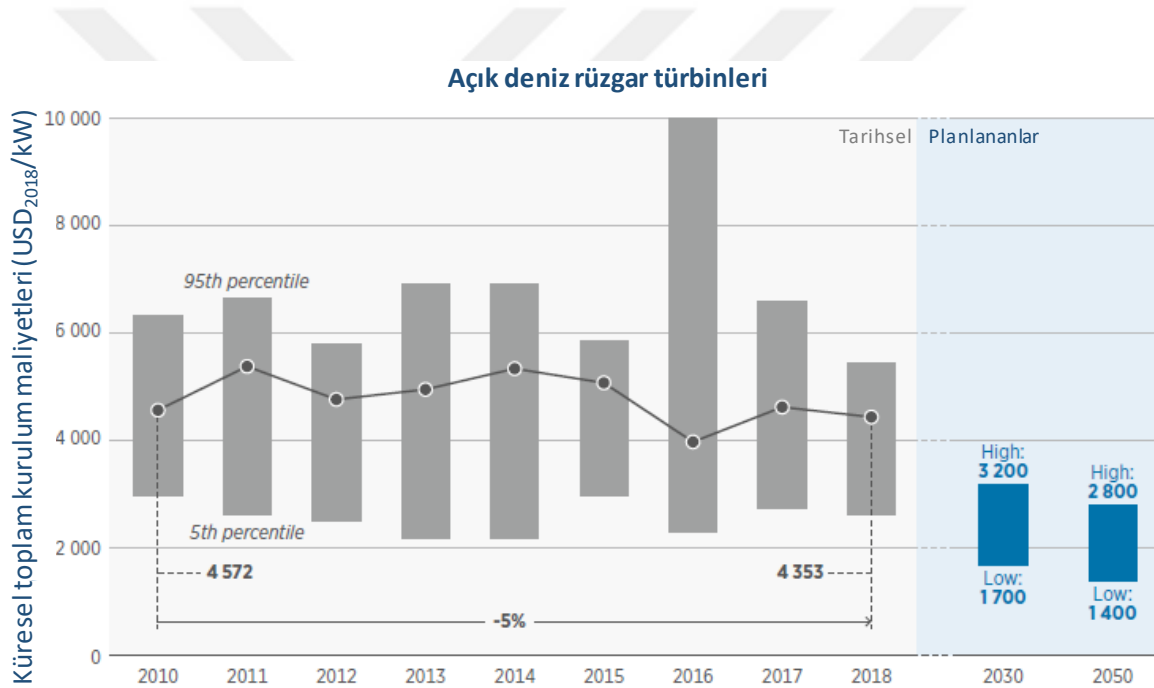
Şekil 11-4: 2050 yılında dünya üzerinde tahmin edilen kurulu açık deniz rüzgar tesis kapasiteleri. [20]

Önümüzdeki otuz yıl içinde yeni açık deniz rüzgar kurulumlarında önemli bir artış olması beklenmektedir. Yeni açık deniz rüzgar enerjisi kurulumlarındaki büyük artışa ek olarak, 2010'dan önce inşa edilmiş mevcut rüzgar türbinleri teknik ömürlerinin sonuna yaklaşacak olması ve gelişmiş teknolojik tasarımlarla değiştirilmeleri gerekecek olmasıdır. Kullanımdan kaldırılan kapasitelerin değiştirilmesi 2030'ların başında başlaması tahmin edilmekte ve 2040'tan itibaren kademeli olarak artması düşünülmektedir.

11.2.1 Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri Maliyet Azaltmaları ve Kapasite Faktörü İyileştirmeleri

Açık deniz rüzgar türbini teknolojisindeki ilerlemeler, rüzgar çiftliği geliştirme, İşletme ve Bakım, açık deniz rüzgar çiftliklerinden elektrik maliyetini düşürmeye yardımcı olmaktadır. Rekabet gücündeki bu iyileşmeye katkıda bulunan diğer faktörler arasında artan geliştirici

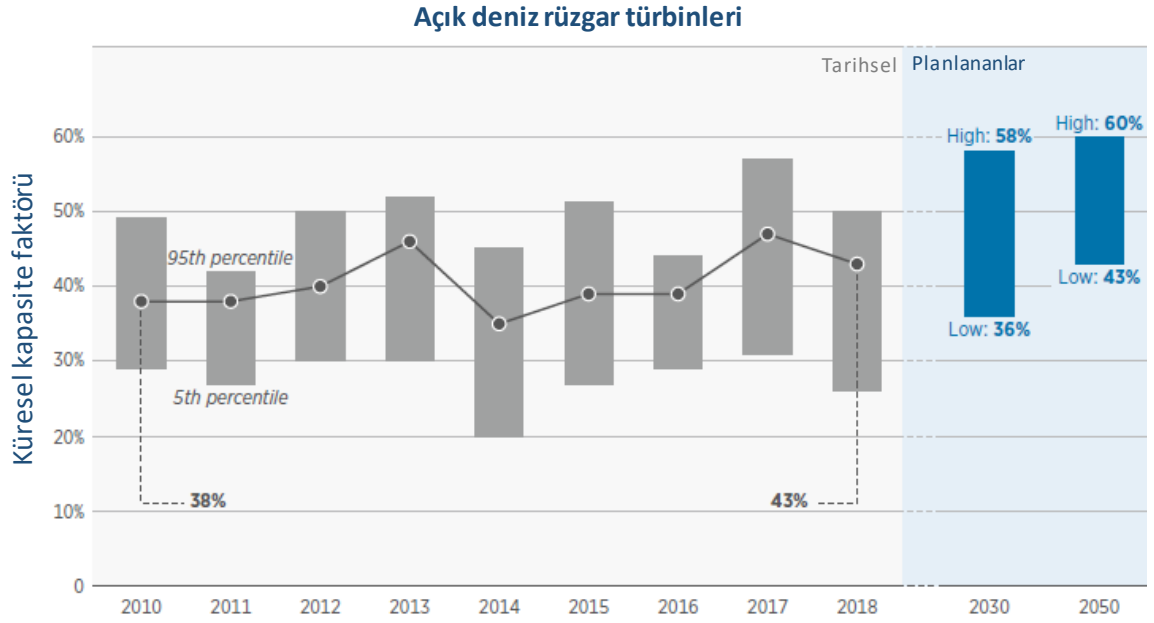
deneyimi (proje geliştirme maliyetlerini ve risklerini azalmak), artan endüstri olgunluğu (düşük sermaye maliyeti) ve değer zinciri boyunca ölçek ekonomileri yer almaktadır. 2000'li yılların başında açık deniz rüzgarı için toplam kurulu maliyetler, projeler kıyıya yakın sığ sulardan açık denizde daha derin sulara kaydırıldıkça temel, şebeke bağlantısı ve kurulum maliyetlerini yükseldiği anlaşılmaktadır. Özel açık deniz rüzgar türbini tasarımları geliştirildikçe bu maliyetler daha da arttığı gözlenmiştir. O zamandan beri toplam kurulum maliyetleri açık deniz rüzgarı için çığır açan yıllar olan 2015 ve 2016'da zirveye ulaştı ve günümüzde bu fiyatlar düştüğü gözlenmektedir. Diğer faktörlerin yanı sıra daha derin sulara ve kıyıdan daha uzak alanlara geçişle birlikte, açık deniz rüzgar çiftliklerinin toplam kurulum maliyetleri 2000 yılında ortalama 2500 ABD Doları/kW iken 2011–2014 itibariyle yaklaşık 5400 ABD Doları/kW'a yükselmiştir. 2018'de ise yaklaşık 4 350 USD/kW olduğu bilinmektedir.



Şekil 11-5: Açık deniz rüzgar türbinleri için küresel ağırlıklı ortalama kurulum maliyetleri. [20]

Diğer faktörlerin yanı sıra daha derin sulara ve kıyıdan daha uzaktaki alanlara geçişle birlikte, açık deniz rüzgar projeleri için küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti, önümüzdeki yıllarda 2030 yılına kadar 1700 ila 3200 USD/kW ve 2050 yılına kadar 1400 ila 2800 USD/kW'a düşmesi tahmin edilmektedir. Açık deniz rüzgar çiftlikleri için ana maliyet bileşenleri, türbinler (kuleler dahil), temeller, kıyıya şebeke bağlantısı ve kurulumdur. Türbin, açık deniz rüzgarı için toplam kurulum maliyetlerin %45'ini oluşturan en büyük maliyet bileşenini temsil etmektedir. Rüzgar türbini teknolojisindeki iyileştirme, maliyetleri daha da düşürmeye yardımcı

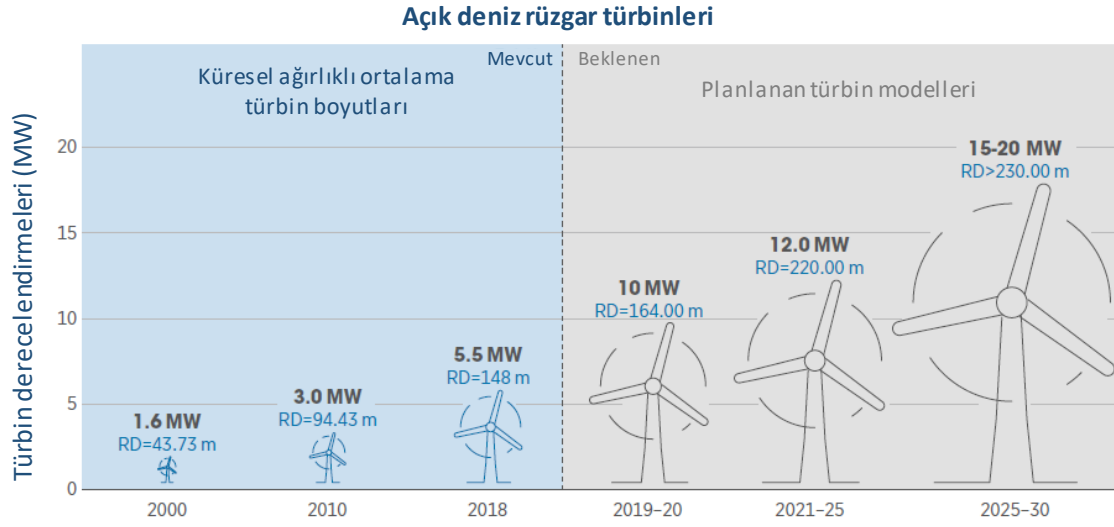
olmaktadır. 2018'deki toplam kurulum maliyetleri, 2010'da devreye alınanlardan %5 daha düşük olduğu bilinmektedir. Türbin boyutundaki büyüme, rüzgar çiftliği verimini artırmaya yardımcı olmaktadır. Daha büyük süpürme alanlarına sahip daha büyük türbinler, aynı alanda daha yüksek kapasite faktörleri sağlar. Açık deniz rüzgar çiftliklerinin küresel ağırlıklı ortalama kapasite faktörü, 2010 ortalaması olan %38'e kıyasla 2018'de %43 ilerleme kaydetti. Türbin tasarımlarındaki gelişmeler ve teknoloji trendleri dikkate alındığında, devreye alınacak yeni projeler için açık deniz rüzgar gücü kapasite faktörleri 2030'da %36 ila %58 ve 2050'de %43 ila %60 aralığında kalması tahmin edilmektedir. Açık deniz rüzgar çiftlikleri için maliyet düşüşleri, kapasite faktörlerini artıran teknolojik gelişmelerin yanı sıra toplam kurulum maliyetlerindeki, İşletme ve Bakım maliyetlerindeki ve proje riski azaldıkça sermaye maliyetindeki düşüşlerden de kaynaklanmaktadır. İşletme ve Bakım maliyetleri, İşletme ve Bakım stratejilerinin optimizasyonu, arıza oranlarının tahmine dayalı analizine dayalı önleyici bakım programları ve bireysel rüzgar çiftlikleri yerine açık deniz rüzgar bölgelerine hizmet vermede ölçek ekonomileri yoluyla azaltılmıştır. Genel olarak, 2018'de açık deniz rüzgarı için küresel ağırlıklı ortalama Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE), 2010'a göre %20'den daha düşük olan 0.127 ABD Doları/kWh idi. 2050 döneminde ise, açık deniz rüzgar üretiminin küresel ağırlıklı ortalama LCOE'si düşerek belirli bir aralığa ulaşması düşünülmektedir. LCOE değerleri deniz üstü rüzgar türbinleri için 2030 yılına kadar 0,05 ABD Doları ila 0,09 ABD Doları/ kWh ve 2050 yılına kadar 0,03 ABD Doları ila 0,07 ABD Doları/ kWh olması düşünülmektedir. Bu, ölçeklenebilirliği ve bu fiyatlarda büyük finansal destek olmaksızın doğrudan fosil yakıtla çalışan elektrikle rekabet edeceği gerçeği göz önüne alındığında, açık deniz rüzgarını özellikle çekici bir teklif haline getirmektedir.



Şekil 11-6: 2010-2050 yılları arasında açık deniz rüzgar türbinleri küresel ağırlıklı ortalama kapasite faktörü. [20]

11.2.2 Gelecek Nesil Rüzgar Türbinleri

Özellikle kanat, aktarma organları ve kontrol teknolojilerindeki gelişmeler, daha yüksek kapasite derecelerine sahip daha büyük, daha güvenilir türbinlerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Türbin boyutları son yıllarda hızla artmıştır. 2018 yılına kadar, ortalama 5.5 MW nominal kapasiteli ve yaklaşık 150 metre rotor çaplarına sahip açık deniz rüzgar türbinleri devreye alınmıştır. Avrupa'da 2018 yılında devreye alınan açık deniz rüzgar çiftlikleri, 3,5 MW ile 8,8 MW arasında kapasiteye sahip türbinler kullanılmıştır. MHI Vestas'ın 10 MW'a kadar kapasiteye sahip türbinleri ve 164 metre çapındaki kanatları 2018'den beri piyasada bulunmaktadır. General Electric tarafından geliştirilen 12 MW Haliade-X türbini, 107 metre uzunluğunda kanatlara sahip ve kanat çapları 200 metreyi aşmaktadır. Offshore endüstrisinde ayrıca 2030 yılına kadar 15 MW'lık daha da büyük türbinler için konseptler üzerinde çalışılmaktadır ve 2030 yılına kadar açık deniz uygulamaları için 20 MW'a kadar türbin beklenmektedir. Bu türbinlerin, MW'lık nominal kapasite başına göre daha yüksek sermaye maliyetlerine (CAPEX) sahip olması muhtemeldir ancak temeller ve kurulum için daha yüksek enerji üretimi ve MW başına daha düşük CAPEX yoluyla çok daha düşük bir enerji maliyetine izin vereceklerdir. Daha fazla geliştirilmiş güvenilirlik ve sürdürülebilirlik, hem işletme giderlerini (OPEX) azaltacak hem de enerji üretimini artırarak enerji maliyetini daha da azaltacaktır. Belirli bir nominal kapasiteye sahip bir rüzgar çiftliği için daha az türbinle, daha az bakım ziyareti gerekecek daha az temel olacak, bu da maliyet ve çevresel etkiyi azaltacaktır.



Şekil 11-7: Açık deniz rüzgar türbinlerinin yıllara göre tahmini ortalama boyutu. [20]

12.TRANSİTİON PİECE OLMADAN TEK KAZIKLI MONOPİLE TİPİ RÜZGAR TÜRBİNİ

Bu çalışmada Tek kazıklı tipi deniz üstü rüzgar türbinlerinde Transition Piece (Geçiş Parçası) modülü kullanılmadan bir tasarım yapılmıştır. Tasarımın genel amacı tek kazık kullanılarak deniz/okyanus üzerine kurulan rüzgâr türbinlerinde, tek kazık yapısının doğrudan kule gövdesine irtibatlanmasını sağlamak ile ilgilidir.

Tek kazık tipi rüzgar türbinleri temel olarak 6 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler deniz/okyanus tabanına çakılan temel tek kazık, tek kazık ile Kule modüllerini birbirine bağlayan Transition Piece (Geçiş Parçası), Kule, Nacel, Hub ve Kanatlardan oluşmaktadır. Bu 6 temel modül kendi içerisinde karmaşık, ağır ve büyük yapılardır. Her 6 modül farklı tedarikçilerde/fabrikalarda üretilmektedir. Genel olarak montaj 6 modülün montajını fabrikada, limanda veya sahada deniz/okyanus'ta gerçekleştirilmektedir.

12.1 TEK KAZIKLI MONOPİLE TİPİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN ÖNCEKİ TEKNİKLER

Rüzgâr türbinleri kara üzerinde özellikle şehir yaşamından uzak bölgelere kurulabildiği gibi deniz ya da okyanus üzerinde daha fazla rüzgâr alan bölgelerde daha büyük miktarda enerji üretebilmek amacı ile kullanılabilir. Özellikle rüzgâr türbini üretim ve kurulum

maliyetlerinin azalması sebebi ile offshore rüzgâr türbinlerinin kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır.

Offshore rüzgâr türbinlerinin karaya kurulan rüzgâr türbinlerine göre en büyük dezavantajı nakliyat ve su üzerine kurulum maliyetinin yüksek olmasıdır. Bilinen teknikte deniz üstü (offshore) rüzgâr türbinlerinin bir çeşidi olan tek kazıklı rüzgar türbinlerinde, doğrudan bir temel atılmadan kazık (pile) sistemi üzerine kulenin sabitlenmesi ile kurulmaktadır. Tek kazıklı (monopile) ya da birden fazla kazıklı sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle tek kazıklı sistemlerde, kazık deniz/okyanus temeline çakılmakta, bahsedilen kazığın üzerine geçiş parçası sabitlenmekte ve bahsedilen geçiş parçasının üzerine ise kule sabitlenmektedir. Bahsedilen geçiş parçası (transition piece), üzerinde rüzgâr türbininin sahip olduğu temel komponentleri barındırmakta, üzerinde en az bir adet kapı ve platform yer almaktadır. Kulenin doğrudan kazık üzerine montajlanması mümkün olmamakta ve ekstra komponentler için de türbin üzerinde alana ihtiyaç duyulmaktadır.

Bilinen teknikte geçiş parçası tek parça ve büyük bir bileşen olduğu için nakliyesinde ve kurulumunda birtakım sorunlar ile karşılaşmaktadır. Özellikle söz konusu parçanın nakliyesinin kolay olmaması sebebi ile limanlara yakın bölgelerde üretim gerçekleştirilmekte ve bu sebeple kule üreticisinden bağımsız olarak üretim gerçekleştirilmektedir. Müşteri kazığı, geçiş parçasını ve kuleyi farklı tedarikçilerden satın alabilmekte ve sonrasında kurulum için nakliye işlemlerinin gerçekleştirilmesi sağlanabilmektedir. Özellikle sistemi kompleksleştirmesi ve türbinin birbirinden farklı parçalardan oluşması, geçiş parçasının barındırdığı kaynaklı yapılar sebebi ile montaj süresinin uzamasına sebebiyet vermektedir.

Yukarıda anlatılan dezavantajlar sebebi ile özellikle offshore rüzgâr türbinlerinde, standart olarak kullanılan kazıkların (monopile) üzerine irtibatlanabilen kule yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Kuleyi oluşturan bölümlerden en altta yer alan kule parçası üzerinde yapılan yenilik ile geçiş parçasına ihtiyaç duyulmadan, bilinen teknikte kullanılan tek kazık yapısı üzerine türbin kurulumu yapılan yeni tasarım sayesinde mümkün olmaktadır. Bu yapı doğrudan kule üreticisi tarafından yapılabilmekte ve diğer kule parçaları ile birlikte nakliyesi sağlanabilmektedir. Sonuç olarak yukarıda bahsedilen tüm sorunlar, ilgili alanda bir yenilik yapmayı zorunlu hale getirmiştir. Yapılan tasarımda Transition Piece modülünde bulunan tüm yapılar Kulenin en alt bölümüne adapte edilmiştir. Kulenin en alt bölümünü ise Tower Transition Section olarak adlandırılmıştır.

12.2 GELİŞTİRİLEN TASARIMIN AMACI

Mevcut tasarım, yukarıda bahsedilen problemleri ortadan kaldırmak ve ilgili alanda teknik bir yenilik yapmak amacı ile ortaya koyulmaktadır. Tasarımın ana amacı geçiş parçasına ihtiyaç duyulmadan, kule gövdesinin doğrudan tek kazık üzerine irtibatlanmasını sağlayan kule gövde parçası yapısını ortaya koymaktır.

Tasarımın bir diğer amacı, tek kazık, geçiş parçası (transition piece), kule üreticisinden oluşan rüzgâr türbini temelini oluşturulmasını sağlayan tedarikçi sayısının azaltılmasını sağlamaktır.

Tasarımın bir diğer amacı geçiş parçası ihtiyacının ortadan kaldırılması ile lojistik maliyetlerin azaltılmasını sağlamaktır.

Tasarımın bir diğer amacı, lojistik sürelerin kısaltılmasını sağlamaktır.

Tasarımın bir diğer amacı fabrikada ve sahada montaj süresinin kısaltılmasını sağlamaktır.

12.3 GELİŞTİRİLEN YENİLİĞİN TASARIM AŞAMALARI

12.3.1 Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section) Tasarımı

Tasarıma başlamadan önce daha önce deniz üstü rüzgar türbinleri ve tek kazık tipi tek kazıklı rüzgar türbinleri hakkında yerli ve yabancı makaleler ve dergilerde detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Deniz üstü rüzgar türbinlerinin tasarımında modellenen modüllerin detaylı olarak gereksinimleri ortaya çıkarılmıştır. Aynı zamanda deniz üstü rüzgar türbinlerinin tasarımlarında uyulması gereken uluslararası standartlar göz önünde bulundurulmuştur. Yabancı firmalar tarafından üretilmiş Transition Piece (Geçiş Parçası) modülünün detaylı teknik resimleri incelenmiş ve modülün içerisinde/üzerinde bulunması gerekli olan parçalar belirlenmiştir. Tasarıma başlamadan önce General Electric firmasının ürettiği 12MW Haliade-X direct-drive Offshore rüzgar türbininin toplam ağırlığı dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Modellemeye başlamadan önce Transition Piece parçasının silindirik bölümünün dış çapı 6,5 metre olarak belirlenmiştir. Bu belirlenen dış çap müşterilerin gereksinimlerine göre değiştirilebilmektedir. Modelleme işlemine başlayabilmek için tek kazık'ın kulenin bölümleri ile birbirine montajını sağlayabilmek için Flanşların teknik ölçülerinin belirlenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda kulenin yapısını oluşturulan çelik plakaların kalınlıkları ve yükseklikleri belirlenmesi gerekmektedir. Flanş ve çelik plakalara ek olarak deniz üstü rüzgar türbininde bulunması gerekli olan bir adet çelik plakadan imal edilen kapı teknik özellikleri excel

programında belirlenmiştir. Bu malzemelerin teknik ölçüleri excel programında maksimum ağırlık ve yükseklik kısıtları göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Modellenecek kulenin bölümleri üretilebilirlik açısından maksimum ağırlık ve yüksek kısıtlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu modüllerin nakliyesi esnasında nakliye kısıtları dikkatlice incelenmelidir.

Oluşturulan Flanş, Kapı ve çelik plakaların teknik özellikleri aşağıdaki tablodaki gibidir:

Tablo 12-1: Kule alt bölümü plaka teknik özellikleri.

Bölümler	PLAKA	MALZEME	KALINLIK (mm)	ALT KENAR DIŞ ÇAP (mm)	ÜST KENAR DIŞ ÇAP (mm)	YÜKSEKLİK (mm)
Bölüm 1	PLAKA 1	S355	80	6500	6500	2980
	PLAKA 2	S355	80	6500	6500	2980
	PLAKA 3	S355	80	6500	6500	2200
	PLAKA 4	S355	80	6500	6500	2980
	PLAKA 5	S355	80	6500	6500	2720
	PLAKA 6	S355	80	6500	6500	2585

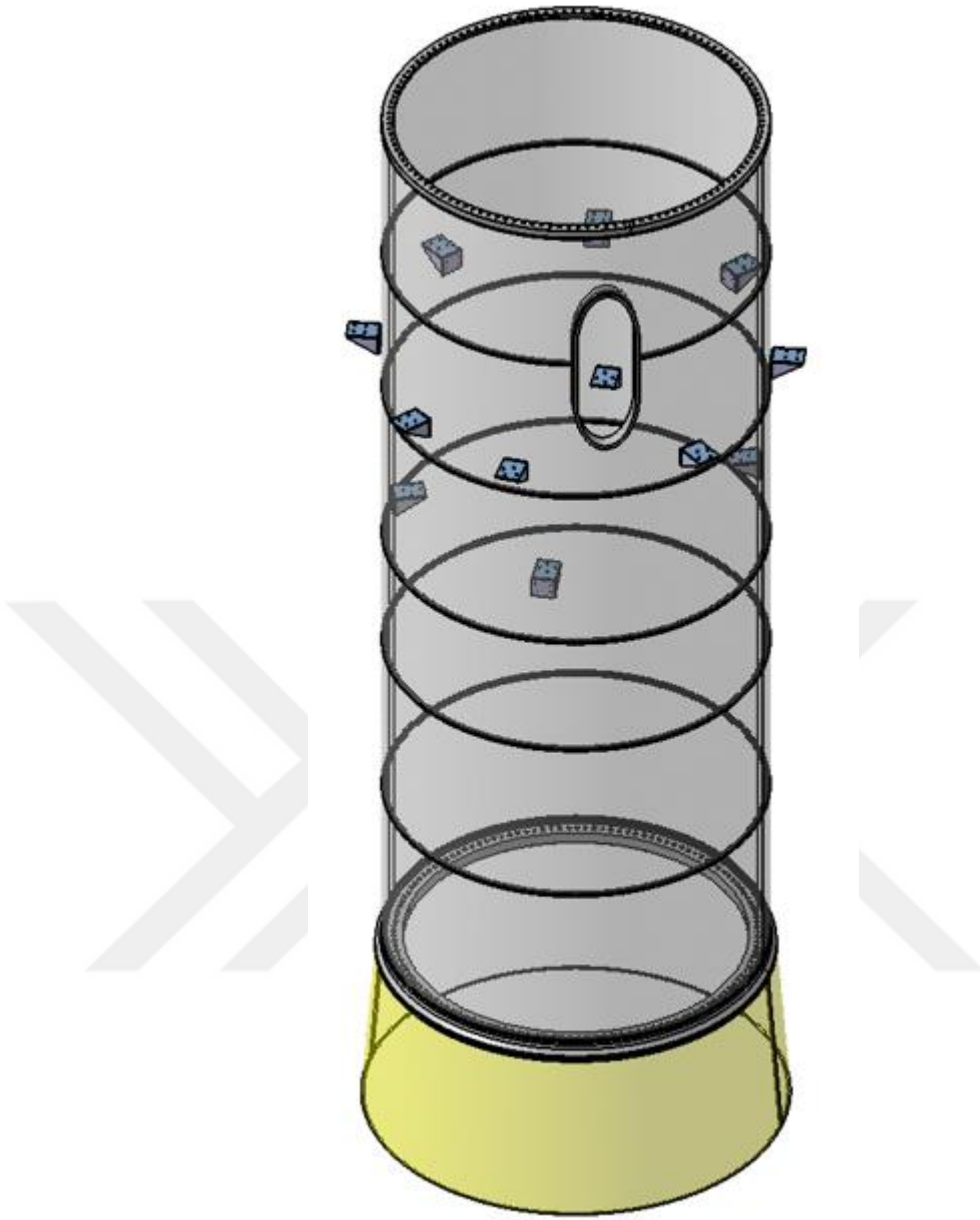
Tablo 12-2: Kule alt bölümü flanş teknik özellikleri.

		DIŞ ÇAP (mm)	İÇ ÇAP (mm)	DELİK ÇAPI (mm)	DELİK ADEĞİ	YÜKSEKLİK (mm)
Bölüm 1	ALT FLANŞ	6500	6100	59	100	300
	ÜST FLANŞ	6500	6200	59	100	285

Tablo 12-3: Kule alt bölümü kapı teknik özellikleri.

	UZUNLUK (mm)	GENİŞLİK (mm)	KALINLIK (mm)	YÜKSEKLİK (mm)
KULE KAPISI	3000	1500	60	400

Yukarıda verilen çelik plaka, kapı ve flanş teknik özellikleri CATIA 3 boyutlu tasarım programı kullanılarak kule alt bölümü modellenmiştir. Deniz üstü rüzgar türbinlerinde iç ve dış çalışma platformları bulunmaktadır. Bu platformları desteklemek için alt kule bölümüne kaynaklı braketlerin tasarımı yapılmıştır. Alt kule bölümü (Tower Transition Section) modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:

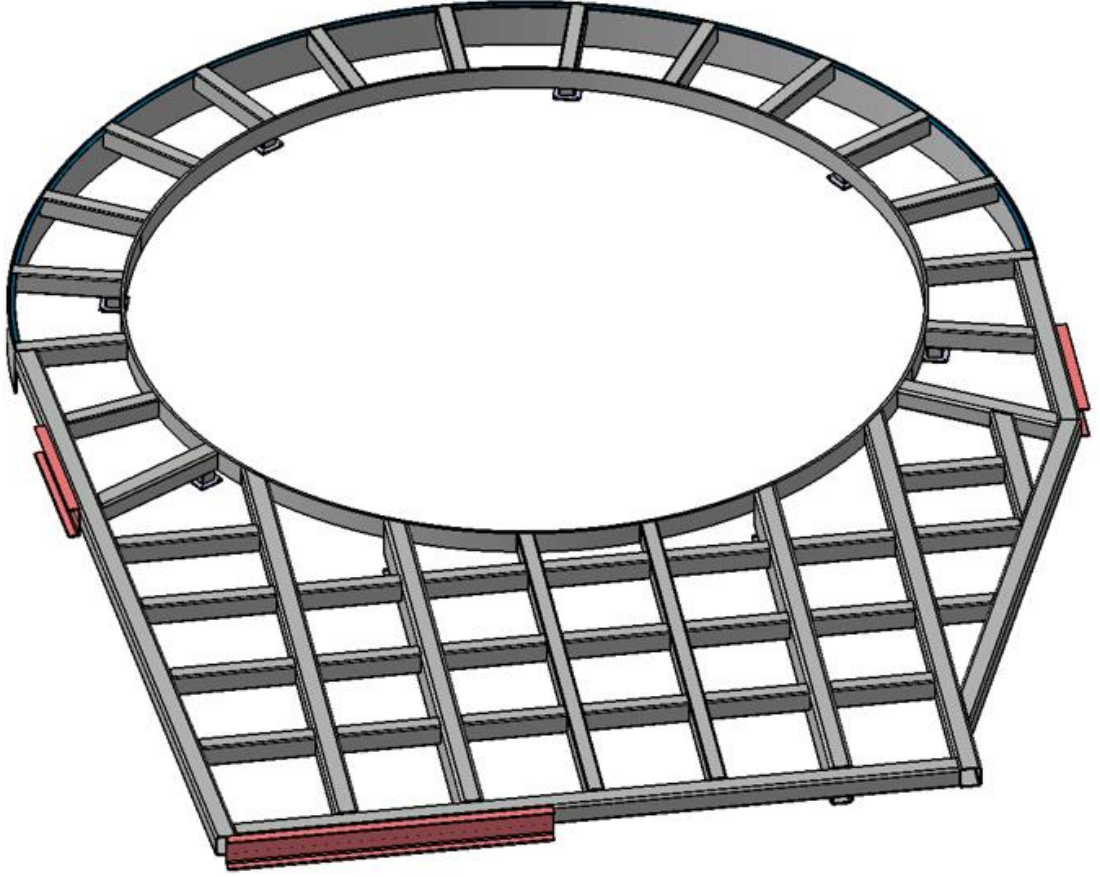


Şekil 12-1: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section).

12.3.2 Dış Çalışma Platformu (External Working Platform) Tasarımı

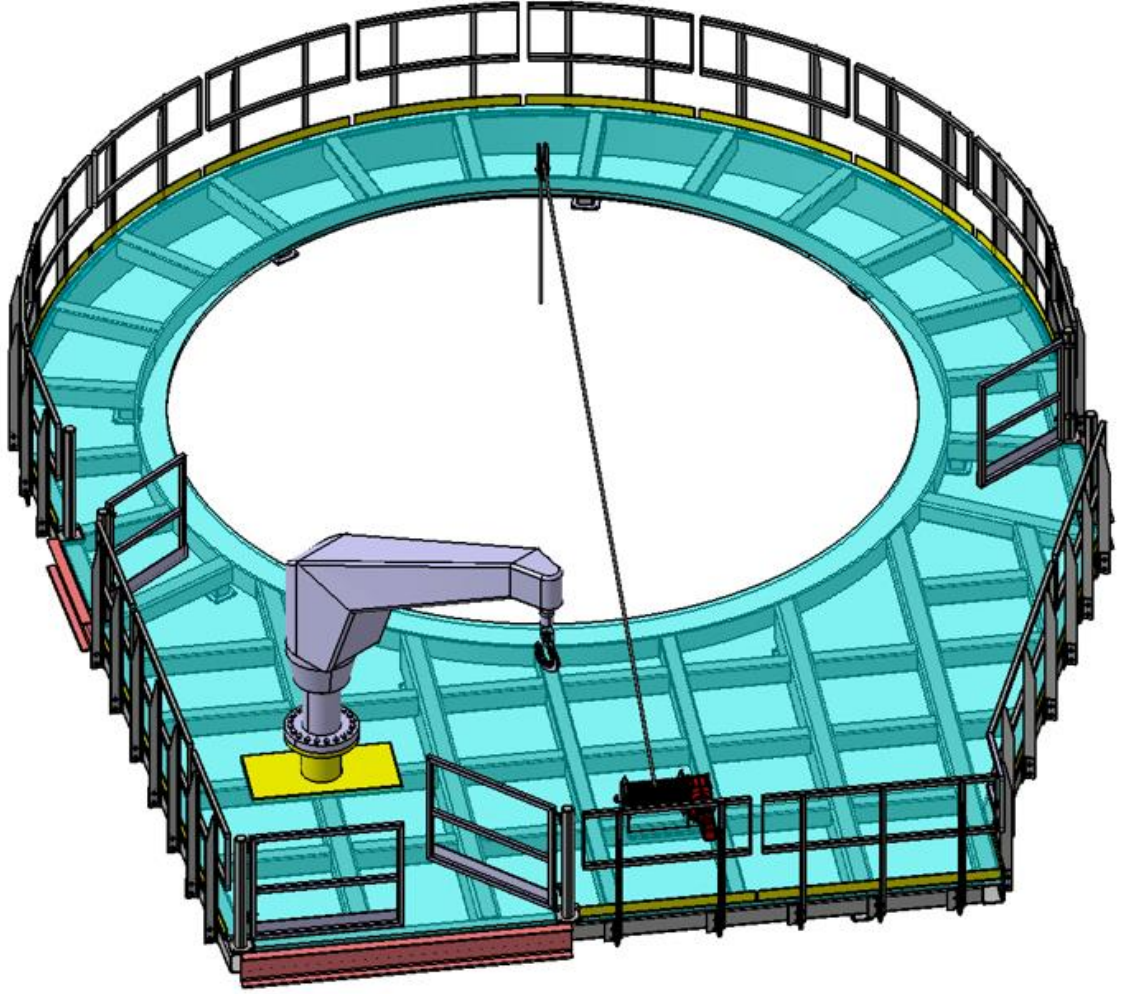
Deniz üstü (offshore) rüzgar türbinlerinde kurulum aşamasında, bakım, arazi ve kontrol işlemlerinin yapılabilmesi için deniz/okyanusta bulunan deniz üstü rüzgar türbinlerine ulaşım sağlanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle dış çalışma platformu (external working platform) olarak adlandırılan bir modülün bulunması gerekmektedir. Bu modül rüzgar türbini devreye alınması ve bakım işlemleri esnasında kuleye direk olarak ulaşım sağlanmasını sağlamaktadır. Bu yapının tasarımını yapılabilmek için ilk olarak kulenin dikileceği bölgede oluşabilecek maksimum dalga boyu hesaplanması gerekmektedir. Çünkü bu dalgaların yıllar içerisinde bu dış çalışma

platformuna zarar vermemesi gerekmektedir. Ayrıca bu yapıda korozyonun engellenmesi göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli bir konudur. Bu modül önceki tekniklerde/tasarımlarda transition piece bölümünde yer almaktadır. Yapılan yeni tasarımda bu modül kule alt bölümüne adapte edilmiştir. Kabul olarak alınan maksimum dalga yüksekliği 12 metre olarak alınmıştır. Yeni geliştirilen tasarımda kule kapısı ve dış çalışma platformu maksimum 12 metre dalga boyundan etkilenmeyecek şekilde modellenmiştir. Dış çalışma platformunda kule alt bölümünde bulunan kapıya direk olarak ulaşım sağlanabilmektedir. Bu yapı kule alt bölümüne kaynaklı braketlere cıvata-somun bağlantısı sayesinde sabitlenebilmektedir. Bu cıvatalar titreşimden dolayı gevşemeyen herhangi bir bakım işlemi gerektirmeyen (Maintenance Free Bolt Connection) tipi cıvatalardır. The HUCK BobTail tipi cıvatalar bakım gerektirmeyen cıvatalara bir örnektir. Eski teknikte bu yapı transition piece üreticisi tarafından transition piece modülüne direkt olarak kaynaklanmaktaydı. Geliştirilen tasarımda kule üreticisinin bu yapıyı üretmesine ve kule alt bölümüne bağlaması gerekmektedir. Dış çalışma platformu başka firmalar tarafından üretilebilmesi için parçalı yapılar şeklinde bölünerek tasarımı yapılmıştır. Bu parçalar istenirse limanda somun-cıvata bağlantısı sayesinde birbirine montajı gerçekleştirilebilir. Bu cıvata-somun bağlantısında da bakım gerektirmeyen cıvata tipi kullanılmıştır. Bir bütün haline gelen dış çalışma platformu istenirse limanda istenirse sahada kule alt bölümüne montajı gerçekleştirilebilmektedir. Geliştirilen yeni parçalı yapılar sayesinde bu parçaların imalatı kolaylaşmış ve nakliye kısıtları göz önünde alınarak tasarlandıkları için nakliye masraflarında iyileştirilme gerçekleştirilmiştir. Parçanın tasarımı yapılırken dikdörtgen ve kare kutu profiller kullanılmıştır. Temel tasarım kısıtları ise uluslararası açık deniz petrol ve gaz platform tasarımı standartları dikkate alınarak yapılmaktadır. Ayrıca dış çalışma platformunun boyutları ve gereksinimleri projeden projeye ve müşteriden müşteriye göre değişiklik göstermektedir. Yapılan dış çalışma platformu tasarımında 6,5 metre dış çapına sahip bir kule alt bölümüne göre tasarım yapılmıştır. Dış çalışma platformu (External Working Platform) kutu profillerinin modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 12-2: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen dış çalışma platformunun (External Working Platform) kare ve dikdörtgen kutu profillerden oluşan yapısı.

Dış çalışma platformunda bir adet sabit vinç ve bir adet deniz tabanında bulunan kabloları çekilebilmesi için gerekli bir adet mobil vinç olmak üzere iki adet vinç bulunmaktadır. Dış çalışma platformunda çalışan personeli korumak amacı ile yapıya korkulukların modelleri eklenmiştir. Korkulukların tasarım kısıtları uluslararası standartlar dikkate alınarak yapılmıştır. Dış çalışma platformunda ayrıca personelin gezinebilmesi için profillere monte edilmiş ızgaralar (Gratings) bulunmaktadır. Dış çalışma platformu (External Working Platform) üzerinde bulunan tüm yapıların modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:

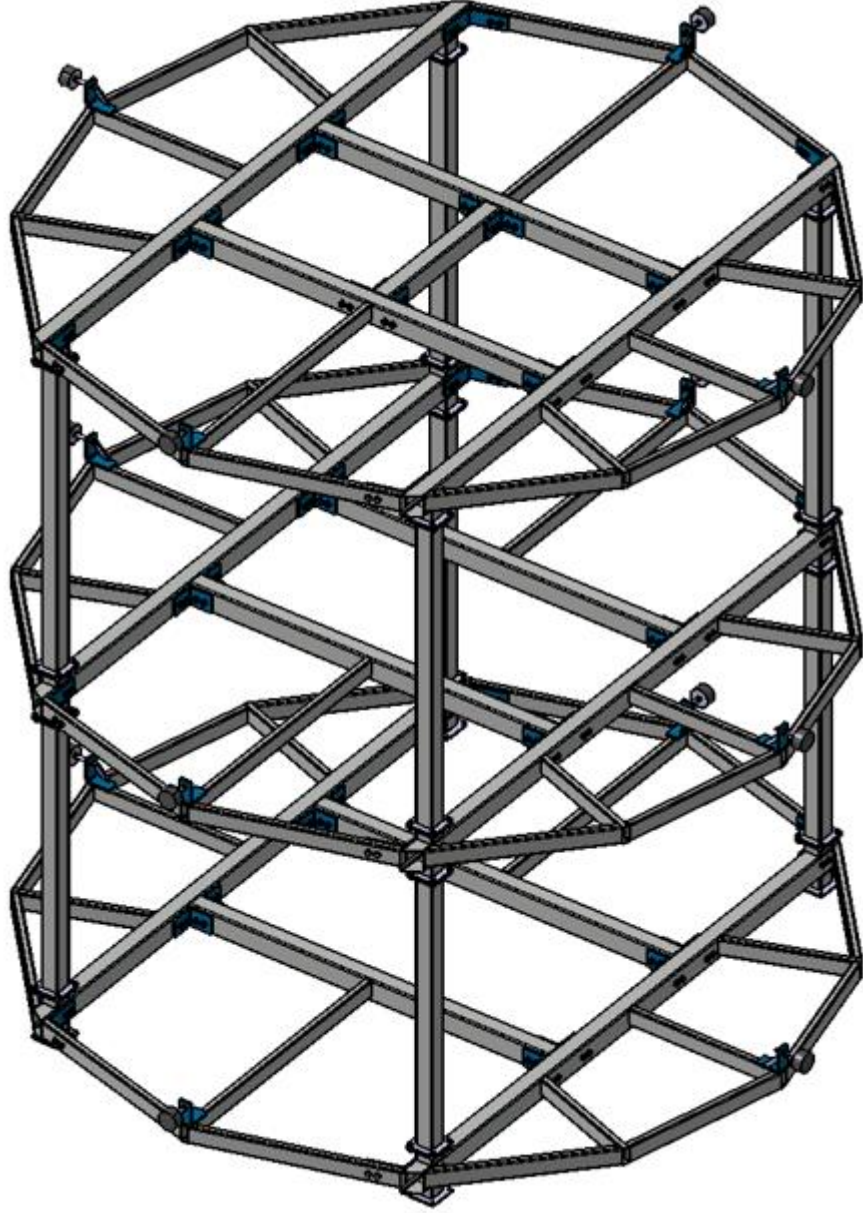


Şekil 12-3: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform).

12.3.3 İç Kafes Platformu (Internal Cage Platform) Tasarımı

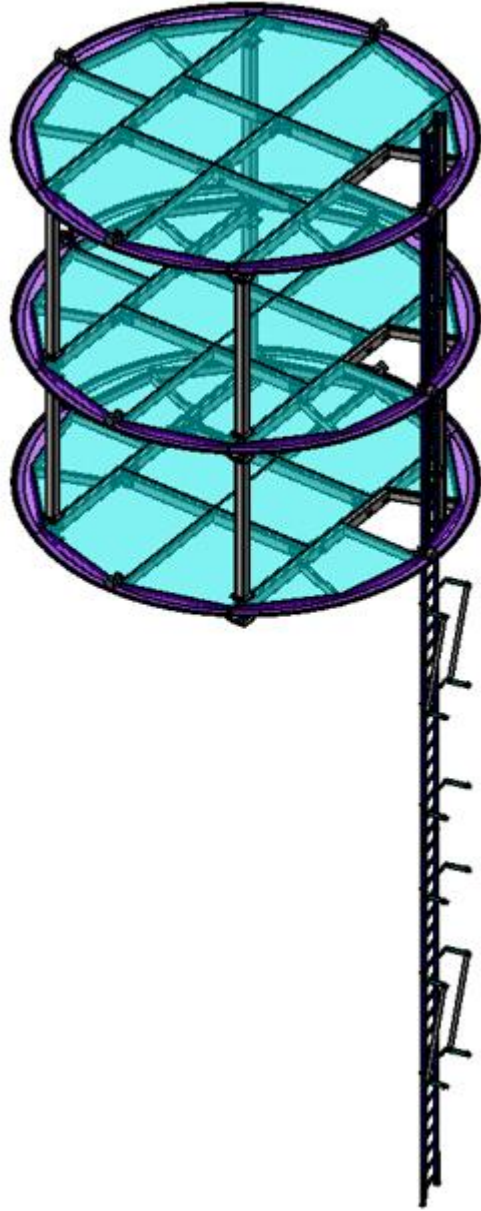
İç platformlar transition piece içinde bulunan yapıları taşınması, kule içerisinde tek kazık'a ve nacel bölümüne ulaşım sağlaması, kule bölümlerinin birbirine montajının sağlanması ve bakım işlemleri için gerekli bir yapıdır. Bu platformlar tek bir bütün olacak şekilde tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu yapıya iç kafes platformu adı verilmiştir. Tasarım aşamasında parçalar halinde modellenen kutu profiller nakliye şartları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu parçalar cıvata-somun bağlantısı kullanılarak birbirine montajı sağlanmaktadır. Bu bağlantı tipinde de bakım gerektirmeyen cıvatar kullanılmıştır. Bu parçalar daha küçük yapılar halinde modellendiği için üretimi kolaydır ve bir başka tedarikçi tarafından üretimi yapılabilmektedir. Üretimi gerçekleştirilen küçük yapılar kule üreticisinde, limanda veya sahada kule alt bölümünde bulunan braketlere cıvata-somun bağlantısı kullanılarak montajı gerçekleştirilebilmektedir. Bu

bağlantı tipinde de bakım gerektirmeyen cıvatar kullanılmıştır. İç kafes platformu (Internal Cage Platform) kutu profillerinin modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



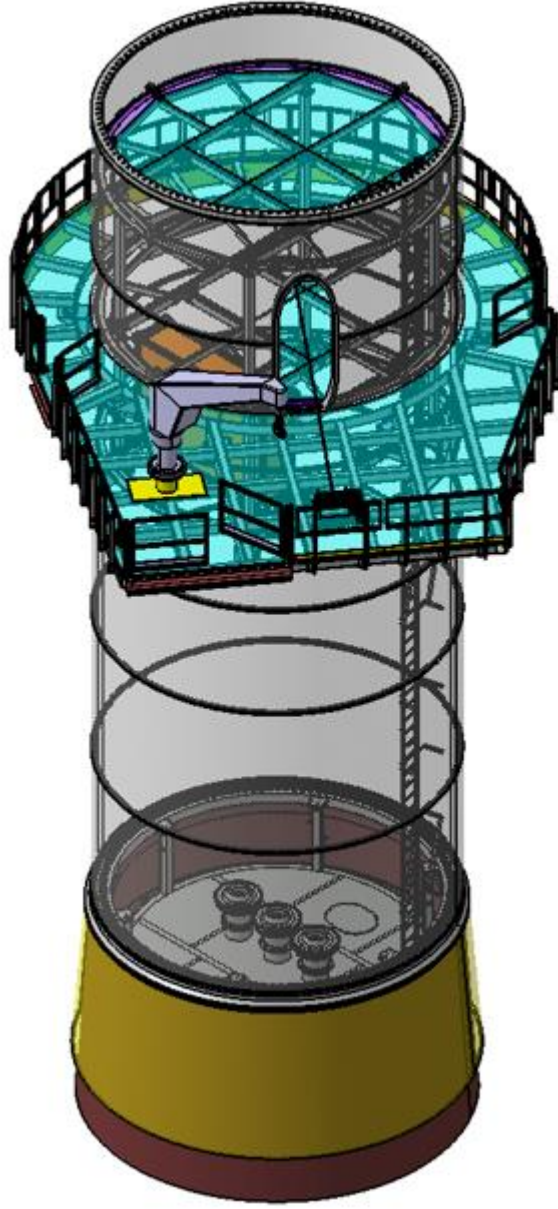
Şekil 12-4: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen iç kafes platformunun (Internal Cage Platform) kare ve dikdörtgen kutu profillerden oluşan yapısı.

Bu yapıda ızgaralar (Gratings), ulaşım merdiveni ve kabinler bulunmaktadır. İç kafes platformu (Internal Cage Platform) üzerinde bulunan tüm yapıların modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:

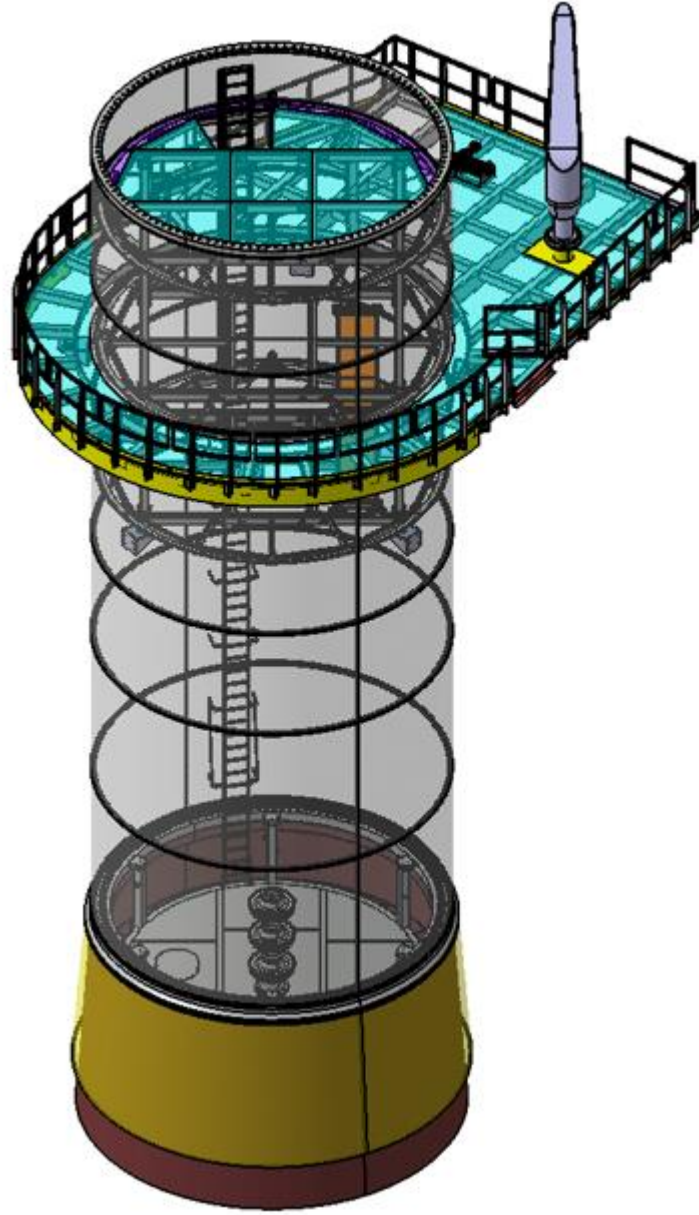


Şekil 12-5: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform).

Kule alt bölümü, Dış çalışma platformu (External Working Platform) ve İç kafes platformu (Internal Cage Platform) modülleri ayrı ayrı parçalar halinde modellenerek tek bir montaj altında birleştirilmiştir. Tüm yapıların modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 12-6: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) önden görünüşü.



Şekil 12-7: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) arkadan görünüşü.

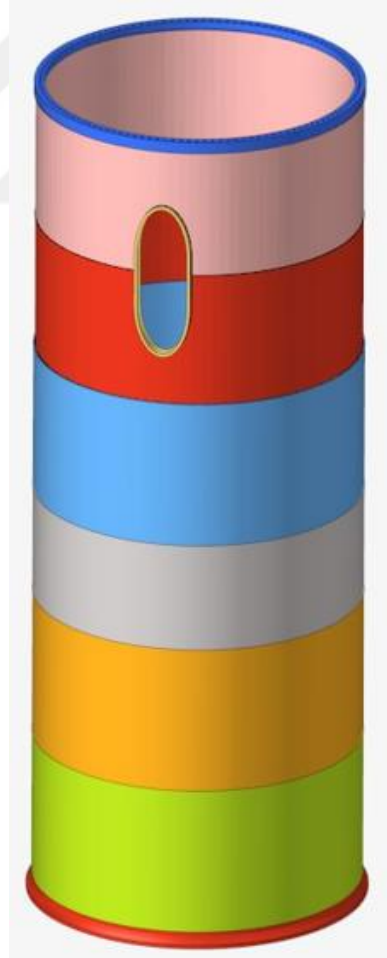
Kule alt bölümünde bulunan parçalar ve kule alt bölümü ile ilgili bölümler detaylandırılmış ve CATIA 3 Boyutlu tasarım programı kullanılarak modellenmiştir.

12.4 GELİŞTİRİLEN YENİLİĞİN STATİK ANALİZ AŞAMALARI

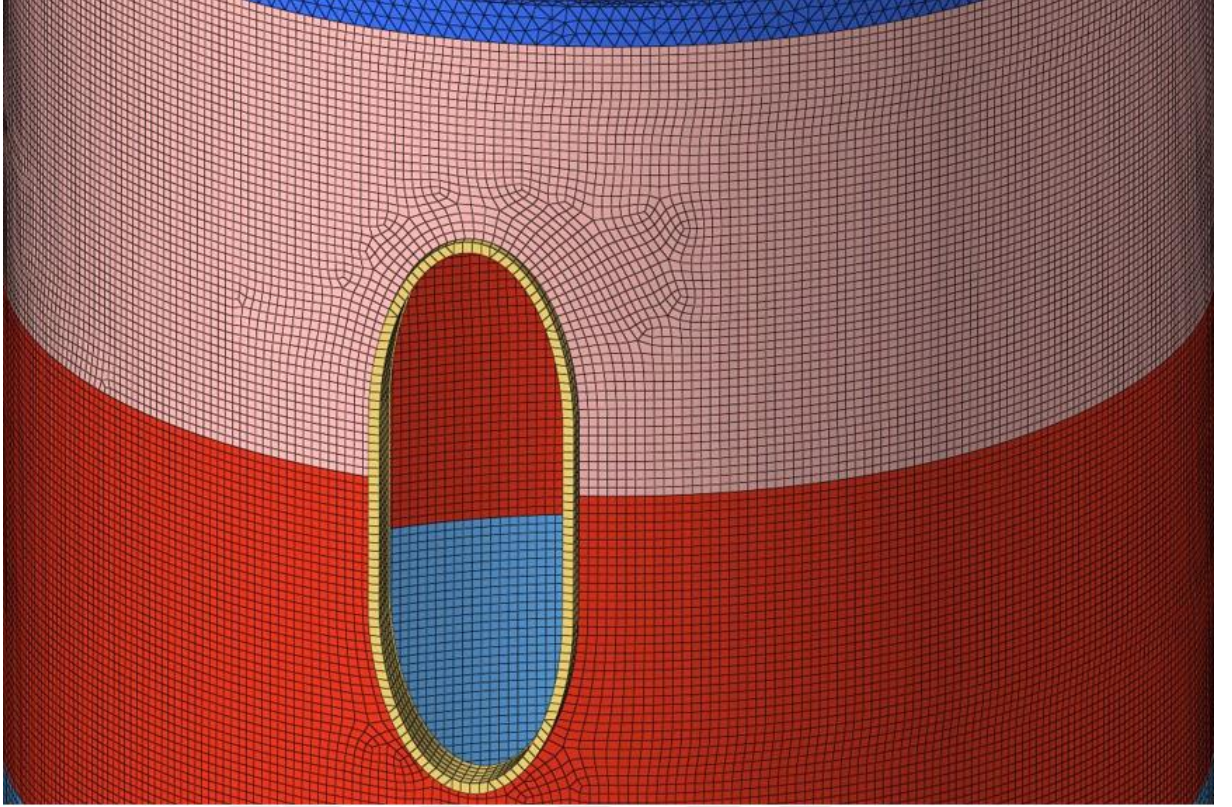
CATIA programında modellemesi tamamlanan kule alt bölümünün HyperWorks analiz programında statik analizi gerçekleştirilmiştir. Kule alt bölümü çelik plakalar, kapı ve flanşlar olarak düşünülerek, Dış çalışma platformu kutu profilleri bir bütün olarak, İç kafes platformu kutu profilleri bir bütün olarak düşünülerek ayrı ayrı statik analizi gerçekleştirilmiştir.

12.4.1 Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section) Analizi

Kule alt bölümü analizi HyperWorks programında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yapıya mesh atılmıştır. Çelik plaka ve kapıya dikdörtgen tipi meshler, Flanşlara ise üçgen tipi meshler tanımlanmıştır. Ortalama mesh boyutu ise 50 mm olarak belirlenmiştir. Yapının mesh işleminden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



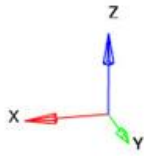
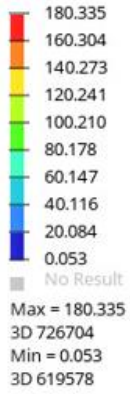
Şekil 12-8: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section).



Şekil 12-9: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) detaylı görüntüsü.

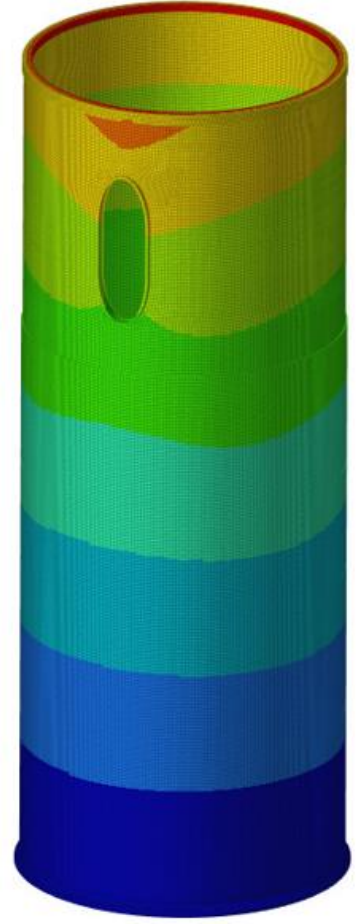
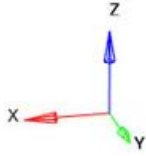
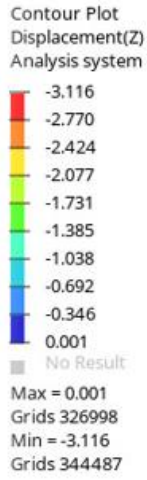
Mesh işleminden sonra yapılar arasında Freeze tipi kontak tanımlanmıştır. Tüm yapıların malzeme özelliği S355 olarak belirlenmiştir. Alt flanş alt yüzeyi tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. Üst Flanş üst yüzeyine 1687 ton statik yük uygulanmıştır. Yapının statik analiz sonuçlarının görüntüsü aşağıdaki gibidir:

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max)
Analysis system



Şekil 12-10: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) Von Mises stress değerleri .

Yapıda 1687 ton statik yük altında maksimum 180 Mpa stress değeri görülmüştür. Malzememizin akma dayanımını 355 Mpa olarak alındığında yapının 1,97 kat emniyetli olduğu anlaşılmaktadır.

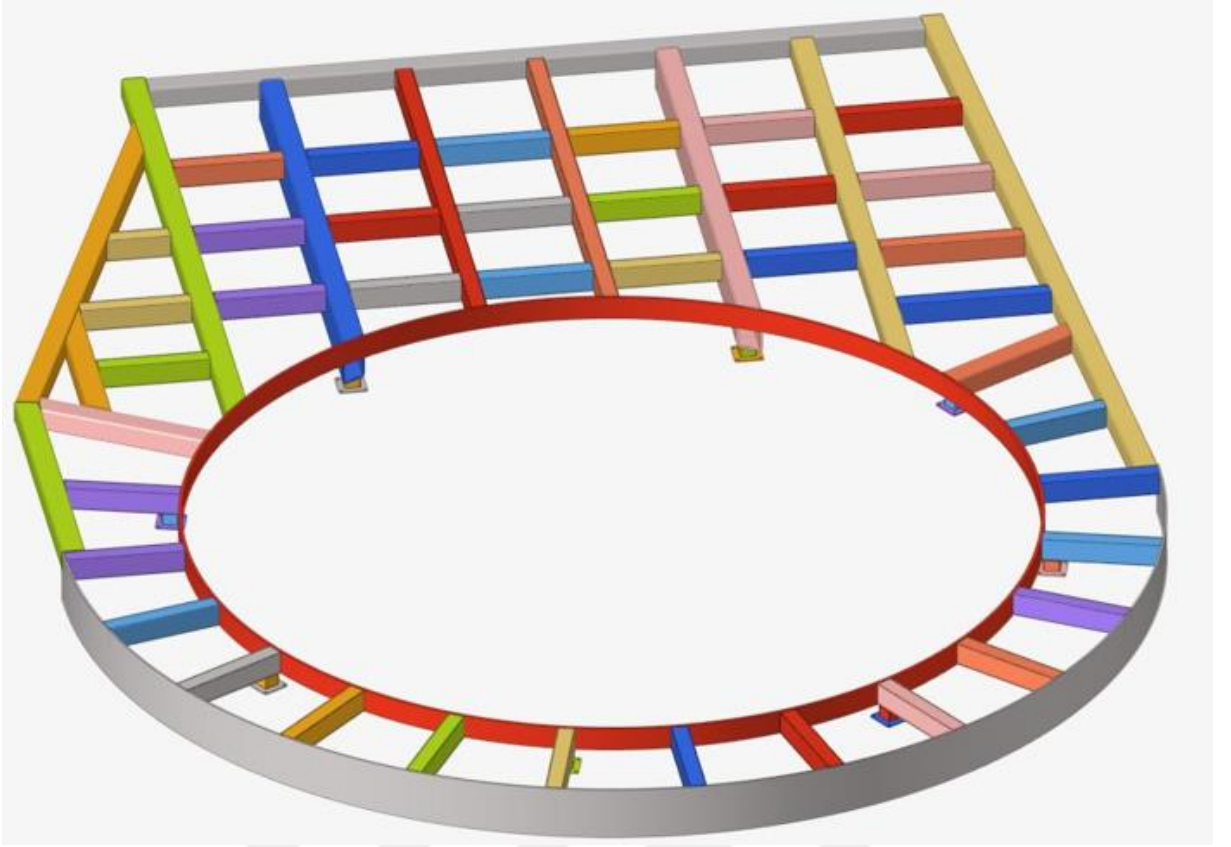


Şekil 12-11: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) yer değiştirme (Displacement) değerleri.

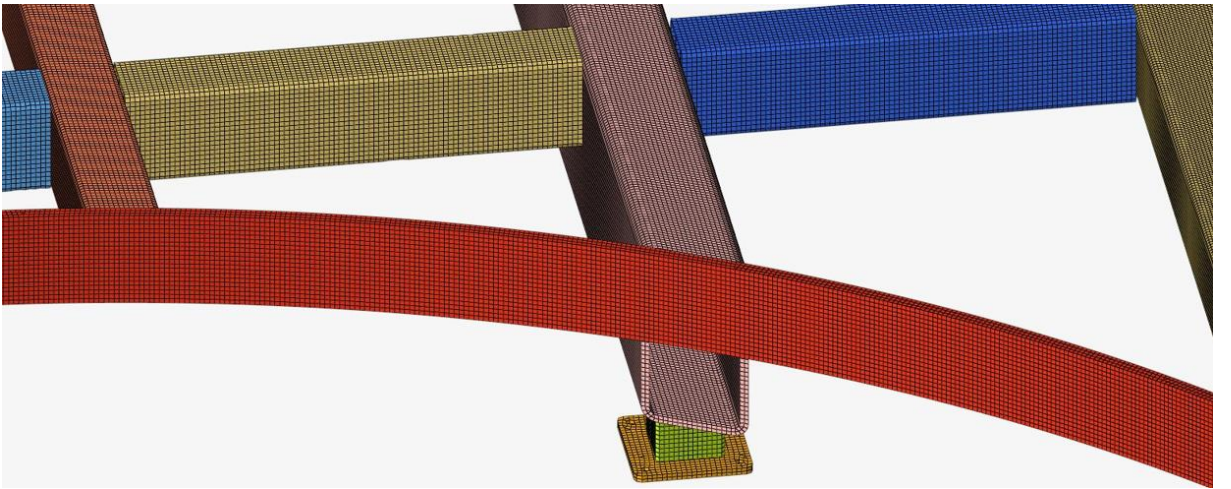
Yapıda 1687 ton statik yük altında maksimum 3,1 mm yer değiştirme görülmüştür.

12.4.2 Dış Çalışma Platformu (External Working Platform) Analizi

Dış çalışma platformu analizi HyperWorks programında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yapıya mesh atılmıştır. Kutu profiller dikdörtgen tipi mesh tanımlanmıştır. Ortalama mesh boyutu ise 10 mm olarak belirlenmiştir. Yapının mesh işleminden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



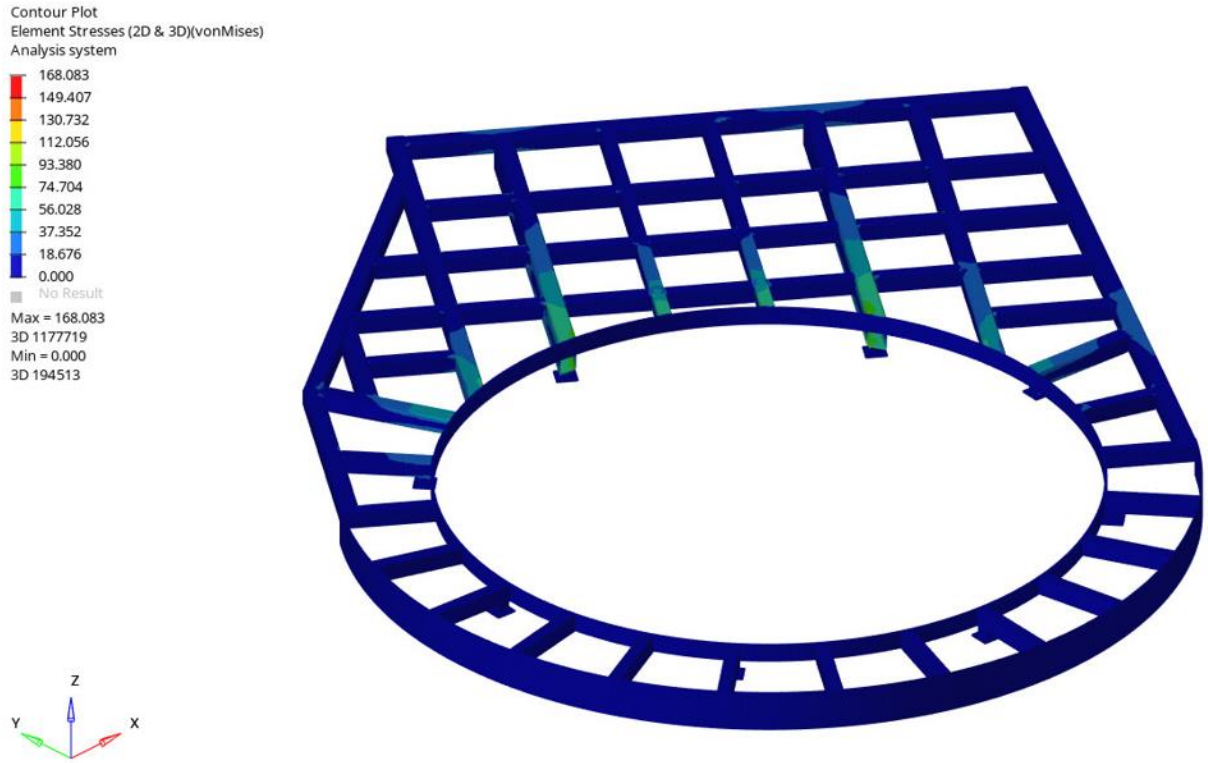
Şekil 12-12: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform).



Şekil 12-13: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) detaylı görüntüsü.

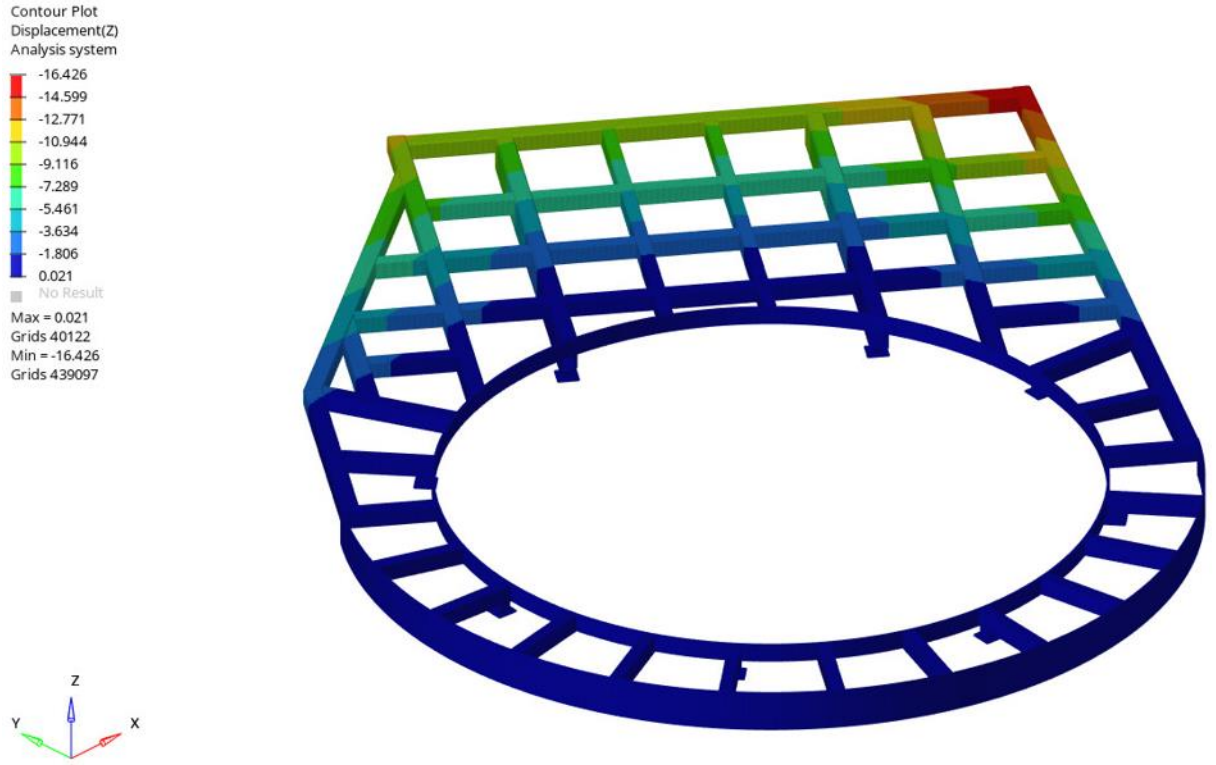
Mesh işleminden sonra yapılar arasında Freeze tipi kontak tanımlanmıştır. Tüm yapıların malzeme özelliği S355 olarak belirlenmiştir. Dış çalışma platformunun kule alt bölümünde bulunan braketlere temas eden yüzeyleri tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. Kutu

profillerin üst yüzeyine 20 ton yük uygulanmıştır. Yapının statik analiz sonuçlarının görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 12-14: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) Von Mises stress değerleri.

Yapıda 20 ton statik yük altında maksimum 168 Mpa stress değeri görülmüştür. Malzememizin akma dayanımını 355 Mpa olarak alındığında yapının 2,11 kat emniyetli olduğu anlaşılmaktadır.

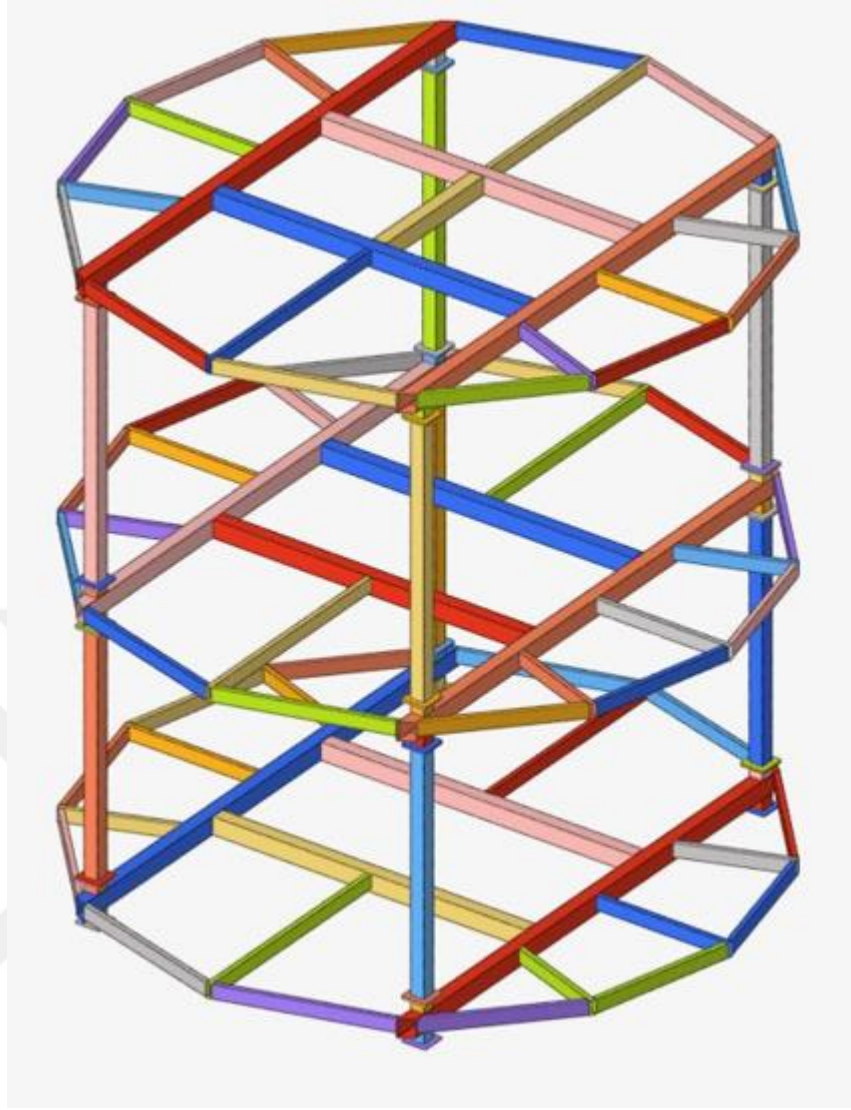


Şekil 12-15: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) yer değiştirme (Displacement) değerleri.

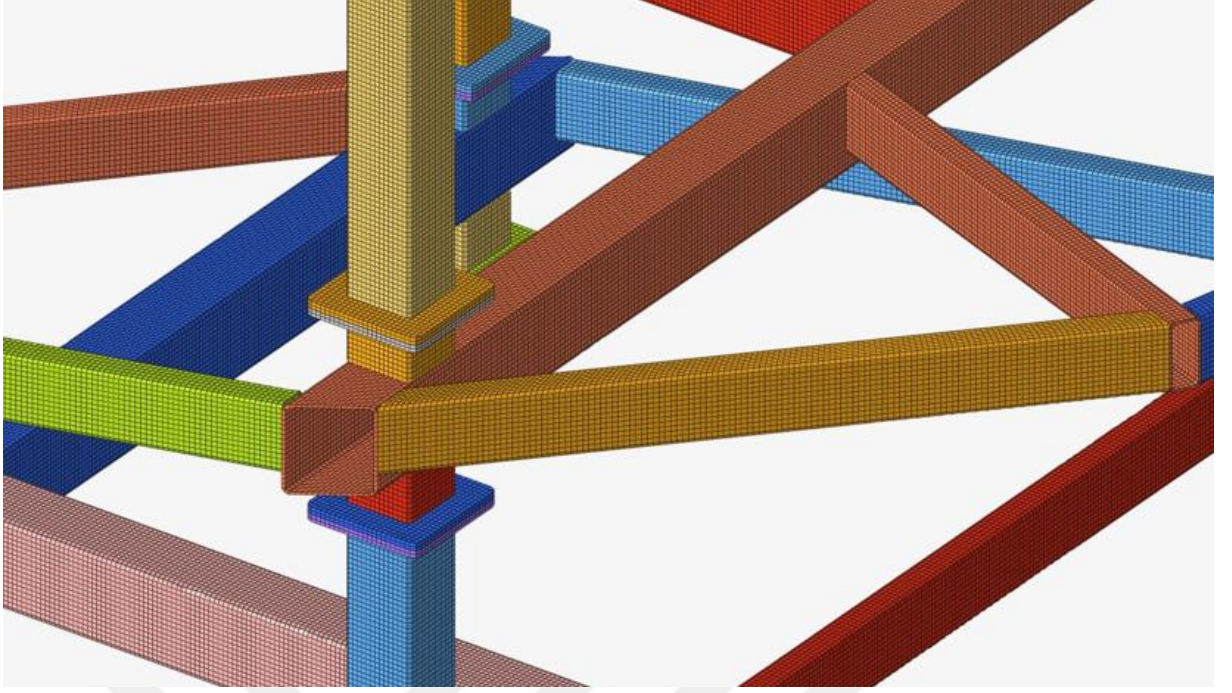
Yapıda 20 ton statik yük altında maksimum 16,4 mm yer değiştirme görülmüştür.

12.4.3 İç Kafes Platformu (Internal Cage Platform) Analizi

İç kafes platformu analizi HyperWorks programında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yapıya mesh atılmıştır. Kutu profiller dikdörtgen tipi mesh tanımlanmıştır. Ortalama mesh boyutu ise 10 mm olarak belirlenmiştir. Yapının mesh işleminden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:

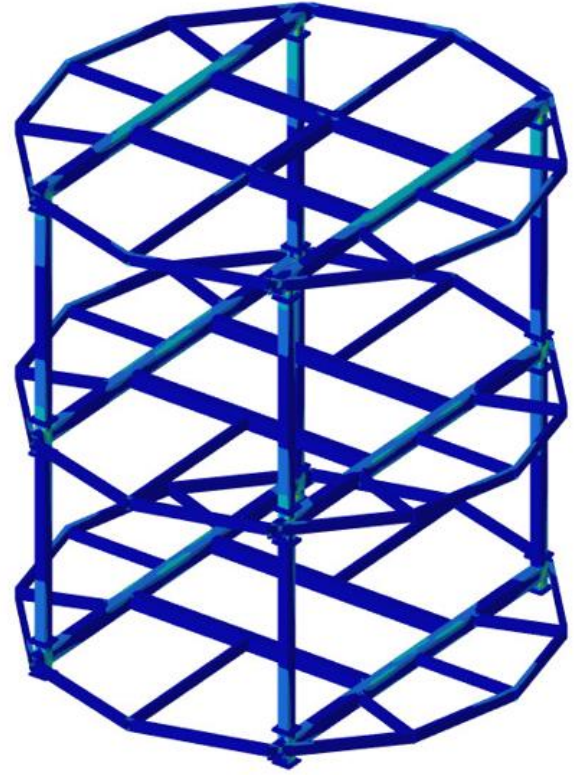
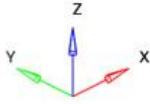
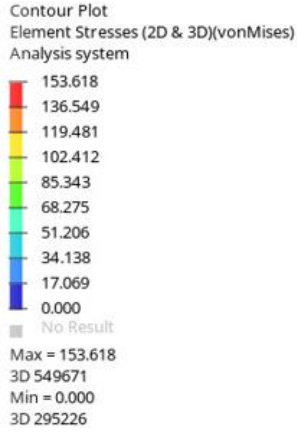


Şekil 12-16: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform).



Şekil 12-17: HyperWorks programında mesh işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform) detaylı görüntüsü.

Mesh işleminden sonra yapılar arasında Freeze tipi kontak tanımlanmıştır. Tüm yapıların malzeme özelliği S355 olarak belirlenmiştir. İç kafes platformunun kule alt bölümünün içerisinde bulunan braketlere temas eden yüzeyleri tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. 3 Farklı yükseklikte bulunan platformların her birine 5 ton, toplamda kutu profillerin üst yüzeyine 15 ton yük uygulanmıştır. Yapının statik analiz sonuçlarının görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 12-18: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform) Von Mises stress değerleri.

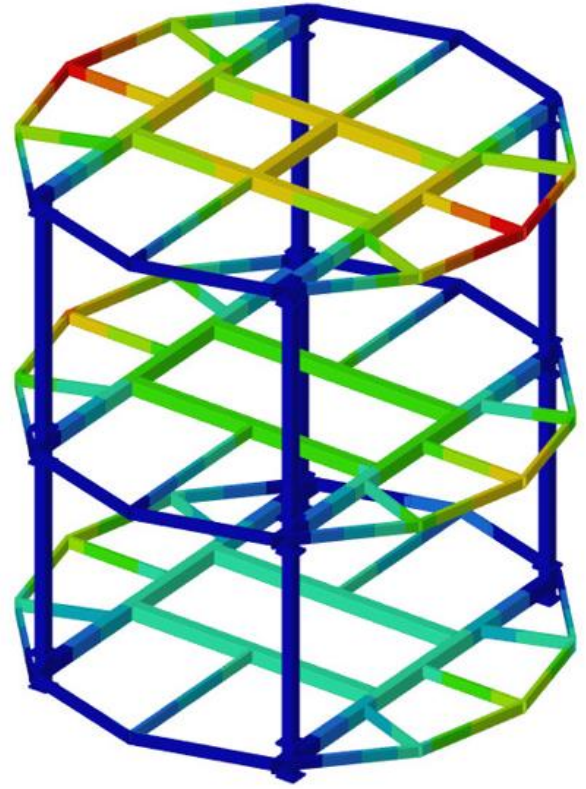
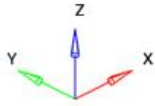
Yapıda 15 ton statik yük altında maksimum 153 Mpa stress değeri görülmüştür. Malzememizin akma dayanımını 355 Mpa olarak alındığında yapının 2,32 kat emniyetli olduğu anlaşılmaktadır.

Contour Plot
Displacement(Z)
Analysis system

-6.974
-6.160
-5.347
-4.534
-3.721
-2.908
-2.094
-1.281
-0.468
0.345

No Result

Max = 0.345
Grids 1073502
Min = -6.974
Grids 1229065

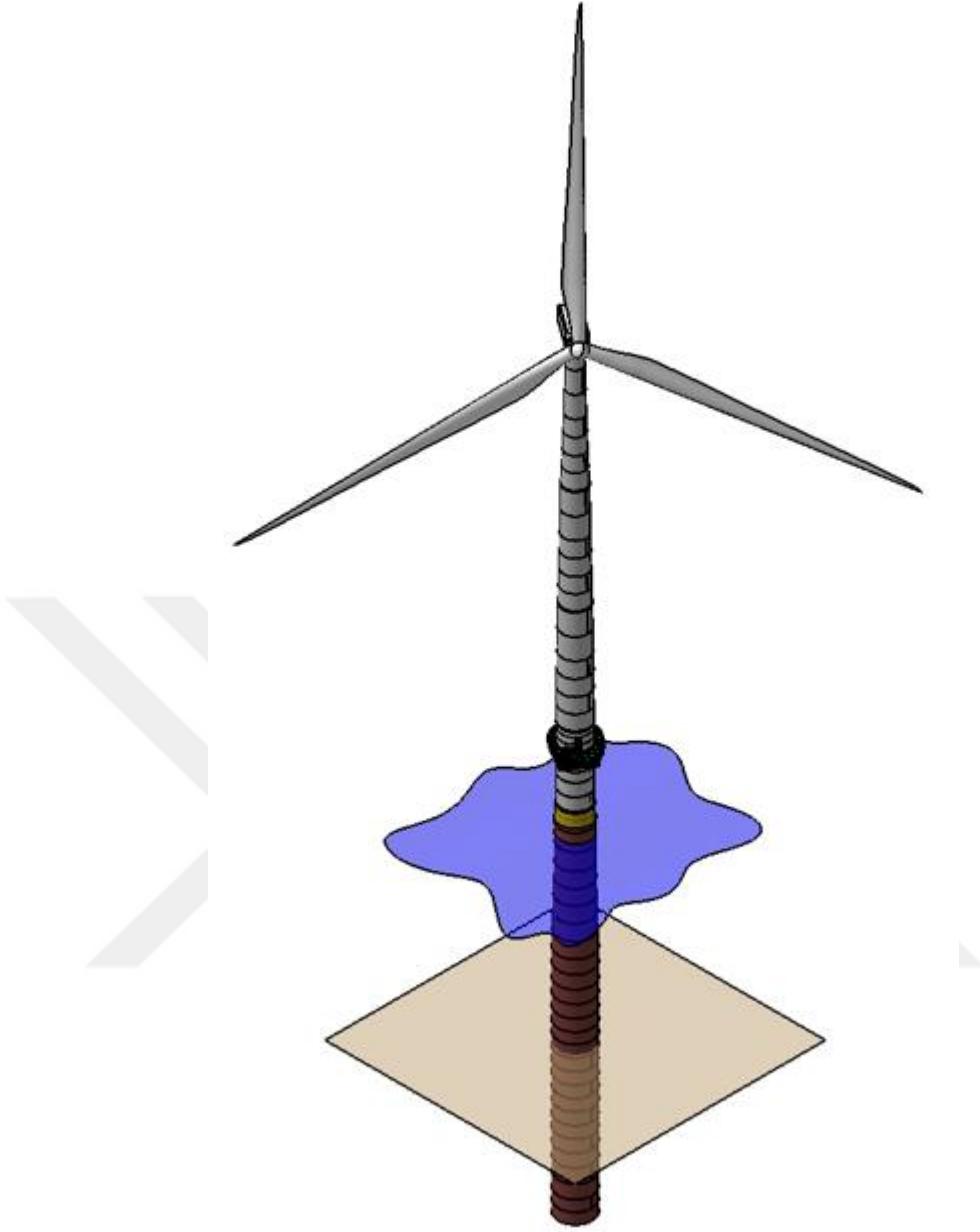


Şekil 12-19: HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform) yer değiştirme (Displacement) değerleri.

Yapıda 15 ton statik yük altında maksimum 6,9 mm yer değiştirme görülmüştür.

12.5 GELİŞTİRİLEN YENİLİĞİN SONUÇLARI

Tasarımı yapılan kule geçiş parçasını görselleştirebilmek adına tek kazıklı deniz üstü rüzgar türbinlerinde bulunan diğer parçalar (Tek kazık, Nacel, Kule ve Kanatlar) tam boyutlu olarak modellenmiştir. Tek kazık tipi bir rüzgar türbinin transition piece yerine kule alt bölümünün (Tower Transition Section) bulunduğu modelin görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 12-20: CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen tek kazık tipi transition piece yerine kule alt bölümü (Tower Transition Section) modülü içeren bir deniz üstü (offshore) rüzgar türbini.

Yukarıdaki şekilde bulunan kahverengi yüzey deniz/okyanus tabanını, mavi yüzey deniz/okyanus yüksekliğini temsil etmektedir.

Geliştirilen tasarım, kule üst bölümünde diğer kule parçalarının montajına imkân tanıyan üst bağlantı bölümü içermekte, kule alt bölümünün alt bölgesinin iç kısmında kule ile kazığın (monopile) birbirine irtibatlanmasına imkân tanıyan alt bağlantı bölümü içermektedir. Dış çalışma platformunun seviyesinde konumlanmış en az bir adet kapı bulunmaktadır. Bu kapıya erişim sağlamak üzere, kule parçasından bağımsız kuleye sabitlenebilen en az bir adet dış çalışma platformu içermektedir. Kulenin iç bölümüne erişim sağlamaya imkân tanıyan, kule alt

bölümünden bağımsız kulenin iç kısmına sabitlenebilen en az bir adet iç kafes platform içermesi ile karakterize edilen deniz/okyanus üzerinde kullanıma uygun, tek kazık rüzgâr türbinlerinde kullanıma uygun geçiş parçasına ihtiyaç duyulmadan kule montajına imkân tanıyan kule parçası ile ilgilidir.

Bu çalışmada, klasik tek kazıklı deniz üstü rüzgâr türbinlerinin bir tipi olan uygulamalarda, kazık ile kule arasında geçiş parçası kullanımına ihtiyaç duyulmadan, kulenin dış kısmında yer alan platformun ve iç kısmında yer alan iç platformun parçalar halinde nakliye edilerek sahada kule üzerine montajlanmasına imkân tanınmaktadır. Bu sayede geçiş parçasının tek parça olarak nakliyesinin ve kurulumunun getirdiği dezavantajlar ortadan kaldırılmaktadır.



13.KAYNAKLAR

- [1] Ahmet Duran Şahin, Progress and recent trends in wind energy, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 30, Issue 5, 2004, Pages 501-543.
- [2] TUSİAD, 1998, “21. yy. Girerken Türkiye’nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi” TUSİAD-T/98-12/239.
- [3] Zhiyu Jiang, Installation of offshore wind turbines: A technical review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 139, 2021.
- [4] International Energy Agency. Key world energy statistics; 2017.
- [5] Saidur R, Islam M, Rahim N, Solangi K. A review on global wind energy policy. Renew Sustain Energy Rev 2010;14:1744–62.
- [6] Tabassum A, Premalatha M, Abbasi T, Abbasi SA. Wind energy: increasing deployment, rising environmental concerns. Renew Sustain Energy Rev 2014;31:270–88.
- [7] EWEA. The economics of wind energy; 2009. (<http://www.ewea.org>).
- [8] IEA, The International Energy Agency (IEA): World energy outlook. Medium- Term Oil and Gas Market Reports. Website: <http://csis.org/event/iea-2009-medium-term-oil-and-gas-market-reports>.
- [9] Güler O . Wind energy status in electrical energy production of Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13(2):473–8.
- [10] Kaygusuz K. Wind power for a clean and sustainable energy future. Energy Sources Part B 2009;4:122–33.
- [11] Kaygusuz K. Developing wind energy in the European Union. Energy Sources Part B 2006;1:9–21.
- [12] Morthorst PE, Kitzing L. Economics of building and operating offshore wind farms; 2016.
- [13] Xiaoni Wu, Yu Hu, Ye Li, Jian Yang, Lei Duan, Tongguang Wang, Thomas Adcock, Zhiyu Jiang, Zhen Gao, Zhiliang Lin, Alistair Borthwick, Shijun Liao, Foundations of offshore wind turbines: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 104, 2019, Pages 379-393.
- [14] Sayigh, A. 1999. Renewable energy—The way forward. Applied Energy 64,15–30.
- [15] Şahin, Mustafa Ergin. “Açık Deniz Rüzgâr Sistemleri Üzerine Bir İnceleme Ve Danimarka Modeli (A Review Study on Offshore Wind Systems and the Danish Model).” Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering, 1.1 (2020): 54–67.
- [16] Bhattacharya, S. (2019). Design of foundations for offshore wind turbines.
- [17] Madsen & Krogsgaard. Offshore Wind Power 2010 Archived 30 June 2011 at the Wayback Machine BTM Consult, 22 November 2010. Retrieved: 22 November 2010.
- [18] "Global Wind Report 2021". Global Wind Energy Council. 24 March 2021. Retrieved 31 March 2021.
- [19] Lee, Andrew (2019). "Offshore wind power price plunges by a third in a year". Recharge Renewable energy news and articles.

- [20] IRENA (2019), Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [21] Pérez-Collazo C, Greaves D, Iglesias G. A review of combined wave and offshore wind energy. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;42:141–53.
- [22] Koh J, Ng E. Downwind offshore wind turbines: opportunities, trends and technical challenges. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:797–808.
- [23] Zhixin W, Chuanwen J, Qian A, Chengmin W. The key technology of offshore wind farm and its new development in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:216–22.
- [24] Xuefei Wang, Xiangwu Zeng, Jiale Li, Xu Yang, Haijun Wang, A review on recent advancements of substructures for offshore wind turbines, *Energy Conversion and Management*, Volume 158, 2018, Pages 103-119,
- [25] Musial, W.D.; Butterfield, C.P.; Boone, A. “Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines”, NREL/CP-500-34874, 23rd ASME Wind Energy Symposium Proceedings, Reno, Nevada, January 2004.
- [26] Kaiser MJ, Snyder B. Offshore wind energy installation and decommissioning cost estimation in the US outer continental shelf. Louisiana: Energy Research Group LLC; 2010.
- [27] Castro-Santos L, Diaz-Casas V. Sensitivity analysis of floating offshore wind farms. *Energy Convers Manage* 2015;101:271–7.
- [28] Devine-Wright P. Beyond NIMBYism: towards an integrated framework for understanding public perceptions of wind energy. *Wind Energy* 2005;8:125–39.
- [29] Butterfield, S.; Musial, W.; Jonkman, J. & Sclavounos, P. Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines, article, September 1, 2007; Golden, Colorado.
- [30] Newman, J.N, *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1977, ISBN 0-262-14026-8
- [31] Köroğlu, M.Ö., “Yüksek Gerilim Alternatif Akım ve Yüksek Gerilim Doğru Akım Şebeke Bağlantılı Denizüstü (Offshore) Rüzgar Santrallerinin Tasarım Esasları” Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, 119 sf., 2012.
- [32] Erisson, E., Halvarsson, P., Wensky, D., Hausler, M., “System Approach on Designing an Offshore Windpower Grid Connection”, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003.
- [33] Celik, Ali. (2011). Review of Turkey's current energy status: A case study for wind energy potential of Çanakkale province. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. 2743-2749.

URL

- [a] Wind-works. “Kudos for Gipe’s Wind Energy from the Poul la Cour Foundation”. Erişim: 5 Mart 2022. <http://www.wind->

works.org/cms/index.php?id=625&tx_ttnews%5Btt_news%5D=4566&cHash=e5ccae62114d941b4afeeba5f3e9e256



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı		
Doğum Yeri		
Doğum Tarihi		
Uyruğu		
Telefon		
E-Posta Adresi		
Web Adresi		

	Eğitim Bilgileri
	Lisans
Üniversite	
Fakülte	
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	

Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	

Makale ve Bildiriler