



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DUBA (MAVNA) TİPİ AÇIK DENİZ RÜZGAR
TÜRBİNİ KULLANARAK RÜZGAR
POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

HAMZA OZAN ŞİRİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalını

07-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Hamza Ozan ŞİRİN

Tarih:05.07.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DUBA (MAVNA) TİPİ AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNİ KULLANARAK RÜZGAR POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

Hamza Ozan ŞİRİN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdullah Engin ÖZÇELİK

2024, 56 Sayfa

Jüri

Kullandığımız fosil enerji kaynaklarının azalmaya başlamasıyla, enerji fiyatlarının yükselmesiyle birlikte ve bu kaynakların çevreye verdiği zararın artması sebebiyle, insanların 20 yıldır alternatif enerji kaynakları keşfetmesine sebep olmuştur. Atmosfere bırakılan karbondioksit ve metan gazının miktarını azaltmak için alternatif enerji (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, vb...) arayışına yönelme amaçlanmıştır. Rüzgâr tarafından elektriksel güç üreten makinelere 'Rüzgâr türbini' denilmektedir. Rüzgâr türbinleri, karaya kurulan rüzgâr türbinleri (onshore) ve açık denize kurulan rüzgâr türbinleri (offshore) olmak üzere iki tip uygulaması vardır. Günümüzde diğer ülkeler (İsveç, İngiltere) ve Avrupa'da çalışır durumda 12 MW offshore rüzgâr türbini bulunmaktadır. Bu kurulu gücü Avrupa gelecek yıllarda 180MW'a çıkarmayı hedeflemektedir. Büyümenin sebebi ise açık denizlerde rüzgâr hızlarının yüksek ve devamlı olmasıdır, karadaki rüzgâr türbinlerine göre bu veriler açık deniz rüzgâr türbinlerinde daha iyidir. Günümüze kadar yapılan açık deniz rüzgâr türbini çalışmalarının genellikle yakın sahil konumlarında deniz tabanına monte edilerek yapıldığı görülmektedir. Bu rüzgâr türbinleri bazı problemlere (görüntü kirliliği, gürültü, gemi trafiği ve radarları etkileme gibi) neden olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı son zamanlarda yürütülen rüzgâr türbini çalışmalarının yakın sahil konumundan daha uzaklara ve derin deniz konumlarına taşıma amaçlanarak yüzer platform sistemli açık deniz rüzgâr türbinleri üzerinde çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Deniz üstü rüzgâr türbinleri 4 çeşide ayrılmaktadır. Bunlar kazık tipi, ağırlık tipi, vakumlu kova keson tipi ve yüzer tipi temellerdir. Bu temeller kendi içlerinde farklı temel tipleri olarak uygulanmaktadır. Bu tez çalışmamızda duba(mavna) tipi yüzer platform temelli rüzgâr türbinin Solidworks programı ile modellenmesi yapılmıştır. Yapılan rüzgâr türbini modeli için en uygun kurulum yeri belirlenmiş ve Rayleigh ve Weibull eğrileri kullanılarak tasarım maliyeti ve kurulum hesabı yapılmıştır. Seçilen bölge için hesaplamalar yapılarak uygun olan türbin modeli seçilmiştir. Tasarımı yapılan modelin Solidworks Flow Simulation programında etrafındaki hava akışı analizi yapılarak rüzgâr türbinlerinin temel üzerindeki konumları belirlenmek istenmiştir. Uygun konumlar için statik analizler yapılarak statik gerinim, statik yer değiştirme, von mises stresi değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar ve öneriler kısmında analizi yapılan tasarım için türbin sayılarına göre avantaj ve dezavantaj tablosu hazırlanarak enerji verimliliği ve üretimi için uygun olan model önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Onshore, Offshore, Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri, Yüzer Tipi, Duba(Mavna) Tipi, Rayleigh, Weibull, Solidworks Flow Simulation

ABSTRACT

MS/Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF WIND POTENTIAL USING A BARGE TYPE OFFSHORE WIND TURBINE

Hamza Ozan ŞİRİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Abdullah Engin ÖZÇELİK

Year, 56 Pages

Jury

As the fossil energy resources we use have started to decrease, along with the increase in energy prices and the increase in the damage caused by these resources to the environment, people have been exploring alternative energy sources for 20 years. It is aimed to focus on the search for alternative energy (solar energy, wind energy, etc.) in order to reduce the amount of carbon dioxide and methane gas released into the atmosphere. Machines that produce electrical power by wind are called 'Wind turbines'. There are two types of applications for wind turbines: onshore wind turbines and offshore wind turbines. Today, there are 12 MW offshore wind turbines in operation in other countries (Sweden, England) and Europe. Europe aims to increase this installed capacity to 180MW in the coming years. The reason for the growth is that wind speeds in the open seas are high and continuous, and these data are better in offshore wind turbines compared to onshore wind turbines. It is seen that offshore wind turbine studies carried out to date have generally been carried out by mounting them on the seabed in close coastal locations. These wind turbines cause some problems (such as visual pollution, noise, ship traffic and affecting radars). For these reasons, it is seen that recent wind turbine studies have been carried out on offshore wind turbines with floating platform systems, with the aim of moving them from the near-shore location to further and deep sea locations. Offshore wind turbines are divided into four types. These are pile type, gravity type, vacuum bucket caisson type and floating type foundations. These foundations are applied as different foundation types within themselves.

In this thesis, the modeling of a pontoon (barge) type floating platform based wind turbine was done with the Solidworks program. The most suitable installation location for the wind turbine model was determined and design cost and installation calculations were made using Rayleigh and Weibull curves. Calculations were made for the selected region and the appropriate turbine model was selected. The air flow analysis around the designed model was performed in the Solidworks Flow Simulation program to determine the positions of the wind turbines on the foundation. Static analyses were performed for the appropriate locations and static strain, static displacement, and von Mises stress values were obtained. In the results and suggestions section, an advantage and disadvantage table was prepared according to the number of turbines for the analyzed design and a suitable model was suggested for energy efficiency and production.

Keywords: Onshore, Offshore, Offshore Wind Turbines, Floating Type, Barge(Barch), Rayleigh, Weibull, Solidworks Flow Simulation

ÖNSÖZ

Araştırmamın her aşamasında bana yardımcı olan değerli tez danışmanın Prof. Dr. Abdullah Engin Özçelik'e, bu tez çalışmamda desteklerinden dolayı Wımac Vınç Mühendislik Tic. Ltd. Şti.,'ya, araştırma konumdaki desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Demirci'ye, eğitim öğretim hayatım boyunca desteklerini eksik etmeyen aileme ve yüksek lisans eğitimim boyunca beni cesaretlendiren ve moral veren sevgili eşim Şeyda Şirin'e sonsuz şükranlarımı sunar ve teşekkür ederim.

Hamza Ozan ŞİRİN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.2. RÜZGAR ENERJİSİ	2
1.3. RÜZGAR TÜRBİNİ GENEL BİLGİ VE TİPLERİ	3
1.3.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri	4
1.3.2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri	5
1.4. DENİZ ÜSTÜ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ	6
1.5. TEMEL ÇEŞİTLERİ	8
1.5.1. Kazıklı Temeller	9
1.5.2. Ağırlık Tipi Temeller	12
1.5.3. Vakumlu Kova Keson Tipi Temeller	13
1.5.4. Yüzer Tipi Temeller	14
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN BİLEŞENLERİ	21
3.2. DENİZ ÜSTÜ RÜZGÂR TÜRBİNİ SEÇİMİ	22
3.3. TEMEL RÜZGÂR ENERJİSİ DENKLEMLERİ	23
3.3.1. Deniz Üstü Rüzgâr Türbinlerinin Çevresel Etkileri	23
3.3.2. Rüzgâr Türbinini Etkileyen Sabit Aerodinamik Etkiler	24
3.3.3. Aerodinamik	26
3.4. TEMEL DENKLEMLER	27
3.4.1. Kütleinin Korunum Denklemi	28
3.4.2. Momentum Korunum Denklemleri	28
3.4.3. Newton Tipi Sıkıştırılmaz Akışkanlar İçin Süreklilik ve Navier Stokes Denklemleri	28
3.5. TÜRBÜLANS MODELİ	29
3.5.1. K- ϵ MODELİ	29
3.5.2. K- ω MODELİ	29
3.6. SOLIDWORKS FLOW SIMULATION MODÜLÜ	29
3.7. RÜZGÂR TÜRBİNİ MAALİYET VE ÜRETİM HESABI	30
3.7.1. Rayleigh ve Weubill Dağılım Eğrileri	31
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	32
4.1. RÜZGAR VERİLERİ	32

4.1.1. Hesaplamalar	32
4.1.2. Rüzgâr Sınıfı	33
4.1.3. Rüzgâr Türbini Konumu Seçimi	34
4.2. RAYLEIGH VE WEUBILL DAĞILIM EĞRİLERİ	35
4.2.1. Rayleigh Eğrisi	35
4.2.2. Weibull Eğrisi	37
4.2.3. Rayleigh ve Weibull Eğrileri	38
4.3. TÜRBİN SEÇİMİ	39
4.3.1. Teknik Özellikler	39
4.3.2. Yıllık Üretim Miktarları ve Kapasite Faktörleri	40
4.4. TÜRBİN MALİYETİ	42
4.5. RÜZGAR TÜRBİNİ PLATFORM TASARIMI	43
4.5.1. Duba Tipi Temel Yapısı Tasarımı	44
4.6. RÜZGÂR TÜRBİNİ TEKNİK BİLGİ	45
4.7. DUBA TİPİ TEMEL MESH VE AKIŞ ANALİZİ	46
4.8. DUBA TİPİ YÜZER PLATFORMUN SOLIDWORKS SİMULATION İLE ANALİZİ STATİK ANALİZİ	47
4.8.1. Statik Gerinim	47
4.8.2. Statik Yer Değiştirme	48
4.8.3. Von Mises Stresi	49
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
5.1 ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A	:Türbin Süpürme Alanı :Rayleigh Eğrisi
c	Parametresi
C_D	:Sürüklenme Katsayısı
C_L	:Kaldırma Katsayısı
C_m	:Yunuslama Katsayısı
C_p	:Basınç Katsayısı
E_k	:Kinetik Enerji :Olasılık Yoğunluk
$f(V)$	Fonksiyonu :Weibull Eğrisi
k	Parametresi
m	:Kütle
$\dot{m}$	:Debi (kg/sn)
P_{avg}	:Ortalama Güç Yoğunluğu
P_t	:Rüzgar Gücü
v	:Rüzgar Hızı
V_{avg}	:Ortalama Rüzgar Hızı
λ	:Kanat Uç Hız Oranı

Kısaltmalar	Açıklama
BBEM	:Basit Birim Enerji Maliyeti
BGEÖ	:Basit Geri Ödeme Süresi
HAD	:Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
İBM	:İşletme ve Bakım Maliyeti
İYM	:İlk Yatırım Maliyeti
MW	:Mega Watt
NREL	:National Renewable Energy Laboratory
TGM	:Tasfiye ve Geri Dönüşüm Maliyeti
YTE	:Yazılım Teknolojileri Araştırma Enstitüsü

ŞEKİLLER VE ÇİZELGELER

Şekiller

Şekil 1.1. Güneş ve Rüzgârın Elektrik Üretimindeki Payı (DEKTMK, 2018)	2
Şekil 1.2. Rüzgâr Türbini Sınıflandırılması (Elibüyük ve Üçgül, 2014).....	4
Şekil 1.3. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini(Şahin ve Yavrucuk, 2017).....	4
Şekil 1.4. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (a) Darrieus Tipi (b) Savonius Tipi (Uysal, 2008).....	6
Şekil 1.5. 40 MW Gücündeki Middelgrunden Rüzgâr Çiftliği, Danimarka (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)	6
Şekil 1.6. Deniz Üstü Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Temel Tipleri (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)	9
Şekil 1.7. Tekil Kazıklı Temellin Deniz Tabanındaki Yapısı (Kutlu, 2011).....	10
Şekil 1.8. Grup Kazıklı Temeller (Kutlu, 2011).....	11
Şekil 1.9'da jacket(kafes) kazıklı temel yapısı görülmektedir.	11
Şekil 1.9. Jacket(Kafes) Kazıklı Temeller (Kutlu, 2011)	12
Şekil 1.11'de Horns Rev D.Ü.R. çiftliğinde kullanılan vakumlu kova keson temel yapısı görülmektedir.....	13
Şekil 1.11. Horns Rev D.Ü.R. Çiftliğinde Kullanılan Vakumlu Kova Keson Temeller (Kutlu, 2011).....	14
Şekil 1.12. Duba Tipi Yüzer Platform Temelleri (Alkan, 2013)	15
Şekil 1.13. Gergi ayaklı tipi yüzer platform temeli yapısı görülmektedir.	15
Şekil 1.13. Gergi Ayaklı Tipi Yüzer Platform Temeli (Alkan, 2013).....	15
Şekil 1.14. Safralı (Balast) Tipi Yüzer Platform Temeli (Yanya, 2020).....	16
Şekil 3. 1. Rüzgâr Türbini Bileşenleri(Can, 2020)	21
Şekil 3. 2. Yüzer Platformların Avantaj ve Dezavantajları (Alkan, 2013).....	22
Şekil 3. 3. Duba Tipi Yüzer Platforma Uygulanan Çevresel Kuvvetler.....	23
Şekil 3. 4. Rüzgâr Türbinine Etki Eden Kuvvetler, Sabitleyiciler ve Dalga Etkiler (Dong, 2022).....	24
Şekil 3. 5. Duba Tipi Yüzer Rüzgâr Türbini Üzerine Etki Eden Kuvvetler	26
Şekil 4.1.Bozcaada saat/yıllık, rüzgâr hızı değerleri histogram eğrisi (Bozcada, 2023)	32
Şekil 4.2. Küresel Rüzgâr Atlası Türkiye ve Kıyılarındaki Rüzgâr Hızları	35
Şekil 4.3.Farklı c Değerleri İçin Rayleigh Eğrileri ve Histogram Grafiği.....	36
Şekil 4.4.Farklı k Değerleri İçin Weibull Eğrileri ve Histogram Grafiği	37
Şekil 4.5.Rüzgâr hız verilerimiz için en uygun c ve k değerleri.....	38
Şekil 4.6.Seçilen 3 Rüzgâr Türbini	39
Şekil 4.7.Duba Tipi Temel Bilgileri	44
Şekil 4.8.Rüzgâr Türbini Bilgileri	45
Şekil 4.9.Duba Tipi Temel Akış Analizi	46
Şekil 4.11.Duba Tipi Temel Statik Gerinim	47
Şekil 4.12. Duba Tipi Temel Statik Yer Değiştirme.....	48
Şekil 4.13. Duba Tipi Temel Von Mises Stresi	49

Şekil 5. 1. Duba Tipi Temel Rüzgâr Türbini Sayısına ve Temel Yapısına Göre Karşılaştırma Tablosu	50
--	----

Çizelgeler

Çizelge 1. 1. Açık Deniz Rüzgâr Enerjisinin Dünya Üzerindeki Mevcut Durumu (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)	2
Çizelge 1. 2. Uygun Yer Seçiminde Yaygın Olarak Kullanılan Kriterler (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021).....	8
Çizelge 4.1.Rüzgâr Hızı ve Saat Değerlerine Hesaplamalar	33
Çizelge 4.2.Rüzgâr Sınıfı Teknik Verileri	34
Çizelge 4.3.Rüzgâr Enerjisi Yoğunluğu Sınıfları	34
Çizelge 4.4.C3 Değeri İçin Saat ve Yıllık Üretim Değerleri	36
Çizelge 4.5. K1 Değeri İçin Saat ve Yıllık Üretim Değerleri	38
Çizelge 4.6.Seçilen Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Özellikleri	40
Çizelge 4.7.Yıllık Üretim Miktarları	41
Çizelge 4.8.Kapasite Faktörleri	41
Çizelge 4.9.Net Bugünkü Değer ve İç karlılık Oranı	42
Çizelge 4.10.Rüzgâr Türbini Maliyet ve Enerji Miktarı.....	43

1. GİRİŞ

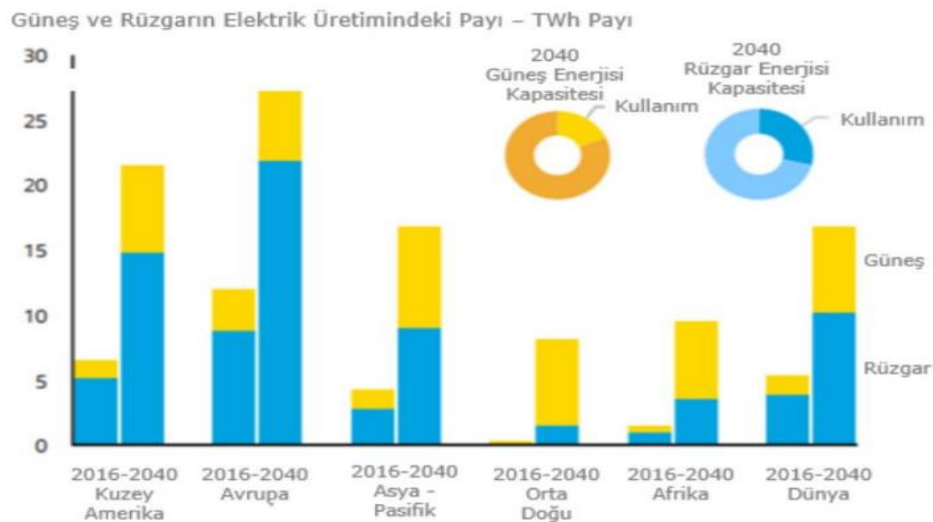
Kullandığımız fosil enerji kaynaklarının azalmaya başlamasıyla, enerji fiyatlarının yükselmesiyle birlikte ve bu kaynakların çevreye verdiği zararın artması sebebiyle, insanların 20 yıldır alternatif enerji kaynakları keşfetmesine sebep olmuştur. Dünyadaki sera gazlarının üçte ikisini fosil yakıtlı kaynaklar oluşturmaktadır. Dünyaya yansıyan güneş ışınları sera gazları tarafından tutulmaktadır ve dünyanın küresel ısınmasına sebep olmaktadır. Dünyada bu olayın ciddiyetini fark eden devletler Kyoto protokolü ve Paris iklim anlaşmasını imzalamıştır. Yapılan bu anlaşmalarla atmosfere bırakılan karbondioksit ve metan gazının miktarını azaltmak için alternatif enerji (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, vb...) arayışına yönelme amaçlanmıştır (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021). Rüzgâr tarafından elektriksel güç üreten makinelere 'Rüzgâr türbini' denilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin çalışma mantığı kanatlardaki basınç farklılığından yararlanılarak kanatlar hareket ettirilir ve bu hareket jeneratöre iletilir. Jeneratörde oluşan manyetikleşmeden yararlanılarak elektriksel güç üretilmektedir. Üretilen elektriksel güç belirli işlemlerden geçerek şebeke voltajına yükseltilir ve bu elektrik kablolar vasıtasıyla şebekeye gönderilir (Kutlu, 2011). Rüzgâr türbinleri, karaya kurulan rüzgâr türbinleri (onshore) ve açık denize kurulan rüzgâr türbinleri (offshore) olmak üzere iki tip uygulaması vardır (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021). Rüzgâr santrallerinin dünyadaki toplam kurulu gücünün, 2020 yılı itibarıyla yaklaşık 743 GW seviyesine geldiği tahmin edilmektedir (Kütükcü ve Yalılı, 2022). Kurulu kapasitenin %5'lik kısmının ise deniz üstü rüzgâr türbinleri, %95'inin karasal rüzgâr türbinleri oluşturduğu hesaplanmaktadır. Deniz üstü rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisi alanında küçük bir paya sahiptir ve gelişim aşamasındadır. Mevcut kurulu deniz üstü rüzgâr türbinlerinin büyük bir kısmı Almanya, İngiltere, Danimarka, Çin, Belçika ve Hollanda'da bulunmaktadır (Çiğdem ve ark., 2021). Çizelge 1.1'de açık deniz rüzgâr enerjisinin dünya üzerindeki mevcut durumu görülmektedir.

Çizelge 1.1. Açık Deniz Rüzgâr Enerjisinin Dünya Üzerindeki Mevcut Durumu
(Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)

Ülkeler	Toplam Kurulu Güç
Birleşik Krallık	9723
Almanya	7493
Belçika	1556
Danimarka	1703
Hollanda	1118
Diğer Avrupa Ülkeleri	310
Çin	6838
Kore Cumhuriyeti	292
Diğer Asya Ülkeleri	30
Amerika	30

1.2. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgâr enerjisi sayesinde üretilen elektriğe ‘rüzgâr ile elektriksel güç üretimi’ adı verilmektedir. Rüzgâr türbinleri rüzgâr kaynaklı elektrik üreten makinelerdir. Rüzgâr türbinleri elektriksel güçlerini jeneratöre bağlanmış kanatların basınç farkı sayesinde hareket etmesiyle, jeneratörün bu hareket ile manyetizmaya bağlı elektrik üretmesi ile oluşur. Üretilen elektrik gücü bazı yöntemler sayesinde (transformatör) şebekeye aktarılabilir veya depolanma işlemi yapılabilir. Depolama işlemi elektroliz yöntemi ile suda bulunan hidrojenin ayrılması depolanır. Depolanan hidrojen yandığı zaman oksijen ile birleştirilerek su buharı elde edilir. Depolama uygulamasının en büyük avantajı deniz üstü rüzgâr türbinleri için kablolama maliyeti ve uygulamasını karşı bir çözüm yolu olmaktadır (Kutlu, 2011). Şekil 1.1’de 2016-2040 yılları arası tahmini güneş ve rüzgârın elektrik üretimindeki payı görülmektedir.



Şekil 1.1.Güneş ve Rüzgârın Elektrik Üretimindeki Payı (DEKTMK, 2018)

Rüzgâr enerjisi kullanımının avantajları:

- Yenilenebilir olmayan enerji kaynakları için sürdürülebilir bir alternatif enerji kaynağıdır.
- Çevre dostu ve temiz enerji kaynağıdır. 2025 yılına kadar kullanılması durumunda %10'luk elektrik enerjisi sağlaması sayesinde CO₂ emisyonunda yılda 1,41 GT azalma olması planlanmaktadır.
- Elektrik enerjisi doğal olarak elde edilmektedir. Bu sayede ülkelerin enerji konusunda dışa bağımlılığı ve enerji taşıma ve transfer maliyetleri ortadan kalkmaktadır.
- Rüzgâr enerji çiftlikleri işletme maliyet ücretleri en az olan enerji üretim sistemlerindendir. 20-30 yıl ömürleri ve bakım süreçleri bulunmakta bu durum geri ödeme için olanak sağlamaktadır. Kurulumları kısa sürede yapılabilmektedir.
- Rüzgâr türbinleri, rüzgâr potansiyeli olan her bölgeye kurulabilmekte ve devamlı güç elde edilmesini sağlamaktadır.
- Rüzgâr türbinleri kuruldukları bölgede zirai faaliyetlere zarar vermemektedir. Sesiz çalışmaları sayesinde (400 m uzaklıktan 37db olarak duyulmakta) insanları ve çevreyi rahatsız etmemektedir (Can, 2020).

1.3. RÜZGAR TÜRBİNİ GENEL BİLGİ VE TİPLERİ

Rüzgâr türbini, kanatları sayesinde rüzgârdan elde ettiği kinetik enerjiyi ilk başta mekanik enerjiye dönüştürür sonrasında jeneratör sayesinde elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgâr türbinleri parçaları pervaneler, kule, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik elemanlardan oluşurlar. Rüzgârdan elde edilen kinetik enerji rotorlar ile mekanik enerjiye dönüştürülür. Oluşan mekanik enerji jeneratöre rotordaki milin devir hareketi sayesinde hız kazanmasıyla iletilir. Mekanik enerji jeneratörler sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülür elde edilen elektrik enerjisi akülerde depolanır veya direk olarak sisteme aktarılır. Depolanma işlemi açık deniz rüzgâr türbinlerinde farklı şekillerde olabilir. Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine, dişli özelliklerine, kanat sayılarına, devirlerine, rüzgâr etkisine, kurulum bölgelerine ve güçlerine göre sınıflandırılmaktadır (Elibüyük ve Üçgül, 2014). Şekil 1.2'de rüzgâr türbini sınıflandırılması hakkında bilgiler görülmektedir.



Şekil 1.2. Rüzgâr Türbini Sınıflandırılması (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

1.3.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

En yüksek enerjiyi elde etmek için yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin rotorları, rüzgâra karşı dik bir konumda konumlandırılmalıdır (Üzüm, 2015). Bu rüzgâr türbinleri rüzgârı ön taraftan alan ve arka taraftan alan olarak tasarlanmaktadır. En yaygın kullanılan rüzgârı ön taraftan alan türbinlerdir. Bu türbin yapıları kılavuz kuyruğu sayesinde rotoru rüzgârın hızı ve yönüne göre yönlendirmektedir. Rotorun yönleneşi sayesinde kanatlarda oluşan kaldırma kuvveti ile rotor dönmeye başlar ve elektrik üretimi gerçekleşir (Tümerdem, 2002). Şekil 1.3'te yatay eksenli rüzgâr türbini şekli görülmektedir.



Şekil 1.3. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini(Şahin ve Yavrucuk, 2017)

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde, kanatlar rüzgâr yönüne dik konumdadır, dönme eksenini ise rüzgâr yönüne paralel bir konumdadır. Yatay eksenli rüzgâr türbininde

kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı biçimde dönmektedir (Gülsoy, 2018). Türbinlerden elde edilen verim %45 oranındadır. Bu türbinler çoğu zaman 20-30 metre yükseklikte konumlandırılmalıdır. Rüzgar hızının, rotor kanadından oluşan uç hıza bölünmesiyle elde edilen değer (λ) kanat uç hız oranı olarak adlandırılır (Yanya, 2020).

$\lambda = 1-5$ Çok kanatlı rotor,

$\lambda = 6-8$ Üç kanatlı rotor,

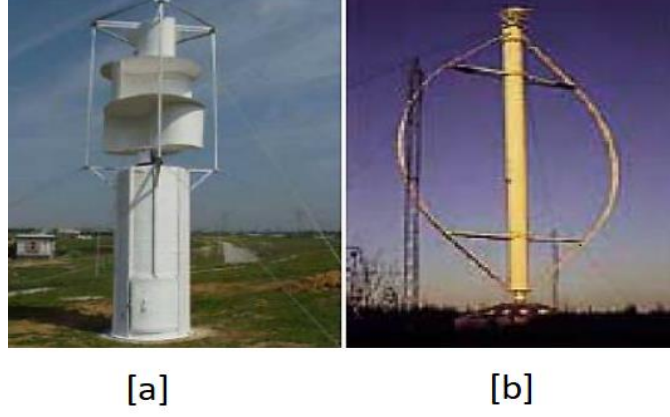
$\lambda = 9-15$ İki kanatlı rotor,

$\lambda > 15$ Tek kanatlı rotor kullanılır (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

1.3.2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri, rüzgârın gelişine göre dik olarak tasarlanmıştır ve türbin üzerindeki mil dikey eksenlidir. En temel bilinen türleri Savonius tipi ve Darrieus tipi olarak bilinen türleridir. Darrieus tipi rüzgâr türbininde düşey biçimde konumlandırılmış iki adet kanat bulunmaktadır. Kanatlar türbin üzerine mil üzerinde bir elips oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Kanatlarda dönme hareketi dışbükey ve içbükey yüzeyleri arasındaki çekme gücü sayesinde oluşan farktan dolayı oluşur. Bu tip rüzgâr türbininde bir devirde iki defa en yüksek tork oluşur. Rüzgârın yönünü değiştirmesi ile yatay eksenli rüzgâr türbinleri çok yönlü olmaları sayesinde dönerler. Rüzgârı her açıdan kabul edip kullanmış olurlar. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin güç katsayısı 0,15'den küçüktür. Bu sebeple enerji üretiminde çok tercih edilmezler (Karadağ, 2009).

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde mil üzerinde oluşan ilk hareket güvenli değildir ve verimleri dikey eksenli türbinlere göre düşüktür. Bu türbinlerde dişli kutusu toprak seviyesine kurulabildiği için kuleye ihtiyaç duyulmaz. Kule olmadığı için daha düşük rüzgâr hızlarında çalışma durumunda kalmaktadırlar. Tasarlanmalarının en büyük amacı düşük rüzgâr hızlarında çalışabilmeleridir. Kanat sayıları çoğaldıkça malzeme ağırlığı da artmaktadır ve bundan dolayı yüksek rüzgâr hızlarında verim sağlamamaktadırlar. Bu türbinlerde 5 metre rotor çapı olmaktadır ve 0,5 kW güç üretilmektedir. Bu türbinleri yüzeye bağlayabilmek için çelik halatlar kullanılır (Nurbay ve Çınar, 2005). Şekil 1.4'te dikey eksenli rüzgâr türbinleri tipleri görülmektedir.



Şekil 1.4. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (a) Darrieus Tipi (b) Savonius Tipi (Uysal, 2008)

1.4. DENİZ ÜSTÜ RÜZGÂR TÜRİNLERİ

Deniz üstü rüzgâr türbini çiftliklerinin 1991’de kıyıdan 2 km uzaklıkta ve 4 m su derinliğinde Danimarka’nın Vindeby kasabasında (rotor çapı 35 m olan her biri 450 kW rüzgâr türbini ve 11 adet olarak) yapılmış ve bu sektör özellikle Danimarka, Almanya, Hollanda gibi Avrupa ülkelerinde, özellikle Kuzey Denizi’nde yapılan çiftlikler ile büyümüşdür ve büyümeye devam etmektedir (Huvaj ve ark., 2019). Şu anda diğer ülkeler (İsveç, İngiltere) ve Avrupa’da çalışır durumda 12 MW offshore rüzgâr türbini bulunmaktadır (Taner, 2014). Bu kurulu gücü Avrupa gelecek yıllarda 180MW’a çıkarmayı hedeflemektedir. Avrupa da rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 2030 yılında 1/4’ünü offshore rüzgâr türbinlerinden olması planlanmaktadır (Keçici ve Özer, 2022). Büyümenin sebebi ise açık denizlerde rüzgâr hızlarının yüksek ve devamlı olmasıdır, karadaki rüzgâr türbinlerine göre bu veriler açık deniz rüzgâr türbinlerinde daha iyidir (Huvaj ve ark., 2019). Şekil 1.5’te Danimarka’daki 40MW gücündeki middelgrunden rüzgâr çiftliği görülmektedir.



Şekil 1.5. 40 MW Gücündeki Middelgrunden Rüzgâr Çiftliği, Danimarka (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)

Karadaki türbinlere kıyasla, açık deniz rüzgâr türbinleri ‘1,5-2’ kat daha maliyetli yüksek olan projelerdir. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin 20 yıl kadar ekonomik ömürleri olmaktadır. Maliyetlerini en düşük seviyede tutabilmek ve ekonomik ömürleri süresince en yüksek verim alabilmek için uygun yer seçimi açık deniz rüzgâr türbinleri açısından çok büyük bir öneme sahiptir. National Renewable Energy Laboratory (NREL) kuruluşunun 2018 yılında yayınlamış olduğu rüzgâr türbinleri maliyet raporuna göre %37,1’lik kısmını oluşturan temel, kurulum ve altyapı ve %34’lük kısmını oluşturan bakım onarım çalışmaları gibi maaliyet bilgileri uygun yer seçimiyle bağlantılı etkenlerdir (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021).

Günümüze kadar yapılan açık deniz rüzgâr türbini çalışmalarının genellikle yakın sahil konumlarında deniz tabanına monte edilerek yapıldığı görülmektedir (Kocatürk ve Ünsan, 2015). Bu rüzgâr türbinleri bazı problemler (görüntü kirliliği, gürültü, gemi trafiği ve radarları etkileme gibi) sorunlara neden olmaktadır (CANPOLAT, 2013). Bu sebeplerden dolayı son zamanlarda yürütülen rüzgâr türbini çalışmalarının yakın sahil konumundan daha uzaklara ve derin deniz konumlarına taşıma amaçlanarak yüzer platform sistemli açık deniz rüzgâr türbinleri üzerinde çalışmalar yapıldığı görülmektedir (Amani ve ark., 2022). Açık deniz rüzgâr türbinlerinde karaya göre daha yüksek rüzgâr hızı değerlerine ulaşılmaktadır bunun sebebi ise açık denizlerde, karaya göre rüzgarların daha düşük bir türbülansa sahip olmasıdır. Bu yüksek rüzgâr hızları bize daha fazla elektrik üretimini sağlamaktadır. Rüzgâr hızıyla, üretilen güç doğru orantılı olarak arttığı için karadan biraz uzaklaştığımızda ve açık denizlere gitmeye başladığımızda elektrik üretiminde yüksek bir artış imkânı sağlanmaktadır. Bir örnek vermek gerekirse aynı rüzgâr türbini ile rüzgâr hızının ortalama 27 km/h olduğu bir konumdan rüzgâr hızının ortalama 21 km/h olan bir konuma göre %60 daha fazla elektrik üretimi elde etmek mümkündür. Açık deniz konumunda rüzgâr türbini konumlandırmanın bize rüzgâr gücünden elektrik üretiminde hız faktörünün ne ölçüde önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir (Alkan, 2013).

Deniz üstü yüzer rüzgâr türbinlerinin avantajları şu şekilde sıralanmaktadır. (Sclavounos 2010):

1. Hızla büyüyen, çevre dostu, tükenmeyen, ücretsiz, yararlı ölçek ve uygun maliyetli enerji kaynağı rüzgâr (Yanya, 2020),
2. Deniz üstü rüzgar türbinlerinin daha yüksek ve daha güçlü rüzgâr hızlarına sahip olması (Yanya, 2020),

3. Deniz üstü rüzgar türbinleri dünyadaki kıyı alanlarında enerji talebinin %75'i kadar (Yanya, 2020),
 4. Deniz üstünde %50 rüzgâr hız küpü ile gücün artması (Yanya, 2020),
 5. Düşük deniz üstü rüzgâr türbülansı, 25-30 yıl, daha uzun çiftlik ömrü (Yanya, 2020),
 6. Deniz altı HDVC veya AC kablolarıyla rüzgar türbinlerinin elektrik şebekesine bağlantısı (Yanya, 2020),
 7. Güvenli ve Maliyet Etkili TLP, Spar ve Hibrit Rüzgâr Türbini floatörlerinin geliştirilmesi için temel petrol endüstrisi deneyimi sağlaması (Yanya, 2020).
- Çizelge 1.2'de uygun yer seçiminde yaygın olarak kullanılan kriterler görülmektedir.

Çizelge 1.3. Uygun Yer Seçiminde Yaygın Olarak Kullanılan Kriterler (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)

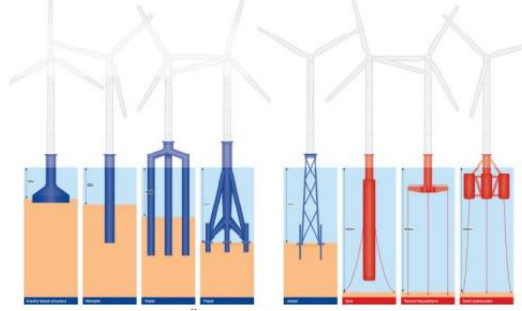
KRİTERLER	KRİTERLERİN GRUBU
Rüzgar Hızı	Mekansal, Teknik, Ekonomik
Yıllık Enerji Miktarı	Ekonomik
Elektrik Dağıtım Sistemleri	Ekonomik, Mekansal
Kıyıdan Uzaklık	Ekonomik, Mekansal
Deniz Tabanı Koşulları	Ekonomik, Mekansal
Deniz Derinlik Koşulları	Ekonomik, Mekansal
Çevresel Etmenler	Çevresel
Yatırım Maliyeti	Ekonomik
Yasak Alanlar	Mekansal, Çevresel

1.5. TEMEL ÇEŞİTLERİ

Deniz üstü rüzgâr türbinlerinin tasarımında çeşitli temel tiplerinin ele alınması söz konusudur. Büyük ölçüde su derinliği ile değişen bu temel tipleri basitçe dört gruba ayrılabilir (Kutlu, 2011).

- 1-Kazıklı temeller (tekil kazıklı, grup kazıklı, jacket (kafesli sistemli kazıklı temel))
- 2-Ağırlık tipi temeller
- 3-Vakumlu kova keson tip temeller
- 4-Yüzer tip temeller

Temel tipi seçimi yaparken dikkat edilmesi gereken hususlar su derinliği, türbin çeşitleri, arazi koşulları, dalga yüksekliği, rüzgâr hızı vb. etkenlerdir (Huvaj ve ark., 2019). Şekil 1.6’da deniz üstü rüzgâr türbinlerinde kullanılan temel tipleri görülmektedir.



Şekil 1.6. Deniz Üstü Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Temel Tipleri (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021)

1.5.1. Kazıklı Temeller

1.5.1.1 Tekil Kazıklı Temeller

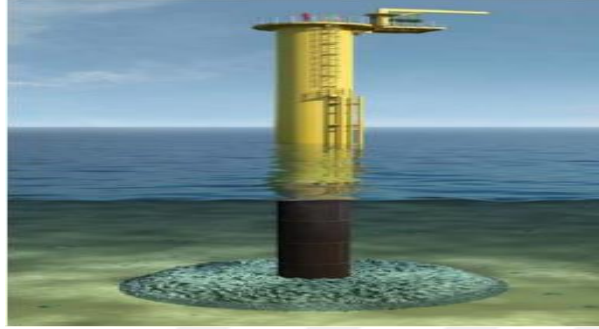
Deniz üstü rüzgâr türbinleri içerisinde, günümüzde en yaygın olarak kullanılan tekil kazıklı temel tipidir. Boruların zemine çakılması veya zemine bazı yöntemler ile (foraj) yerleştirilmesi sonucu türbin ana gövdesinin kazığa montaj edilerek bağlanması ile yapılır (AHMED, 2022). Zemine çakılan veya foraj edilen borular büyük çap ve et kalınlıklarına sahiptir (Kutlu, 2011). Bu tip tekil kazıklı temel metodu rüzgâr türbinlerinin 5 ile 30 metre derinliğine kurulum fırsatı sağlamaktadır (Buljac ve ark., 2022). Kurulum yapılan deniz tabanı yumuşak bir yapıda zemine sahipse, kazıklar deniz tabanından 25-35 metre aşağıya çamur seviyesini geçerek çakılmalıdır, bu durumda ek maliyetler çıkarmaktadır. Tekil kazıklı temellerin deniz tabanına çakılması ve montajı özel vinçli gemiler sayesinde yapılmaktadır (Alkan, 2013).

Özellikleri

- Çelikten inşa edilmekte (Alkan, 2013),
- Kapasitesi 3.6 MW’ta kadar olan türbinler için uygun (Alkan, 2013),
- Tekil kazıklı temeller sığ sularda en yaygın olarak kullanılan temel tipidir maksimum 25 metre su derinliğine kadar uygulanmaktadır (Huvaj ve ark., 2019),

- Tekil kazıklı temeller diğer kazıklı temellere oranla inşası daha kolay ve kurulumu daha ekonomiktir (Huvaj ve ark., 2019),
- Tekil kazıklı temellerin dikimi için sınırlı zemin alanı gereklidir ve inşaatı için deniz tabanında asgari hazırlık gerekmektedir (Huvaj ve ark., 2019).

Şekil 1.7’de tekil kazıklı temellin deniz tabanındaki yapısı görülmektedir.



Şekil 1.7. Tekil Kazıklı Temellin Deniz Tabanındaki Yapısı (Kutlu, 2011)

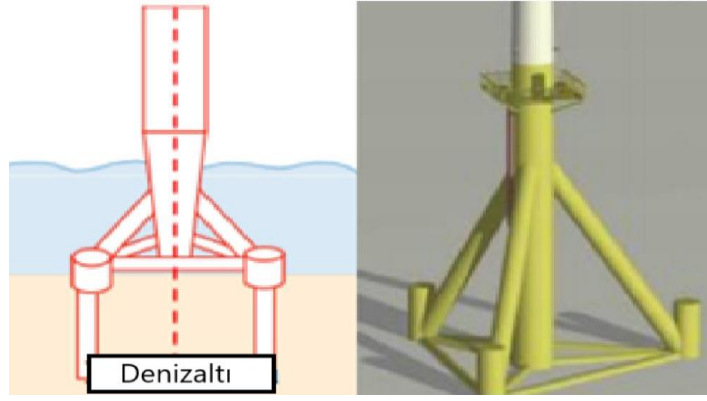
1.5.1.2. Grup Kazıklı Temeller

Tekil kazık temellerin uygulanmasının, uygun olmadığı daha düşük çaplı ve et kalınlıklı grup kazıklı temellerin uygulanmasının daha uygun olacağı deniz tabanlarında iyi bir alternatif oluşturmaktadır (Shaha ve ark., 2021). Grup kazıklı temeller genellikle üçlü veya dörtlü kazıklardan veya daha fazla kazıklı yapıdan oluşabilirler (Kutlu, 2011). Genellikle 25-30 metre su derinliklerinde grup kazıklı temeller tercih edilmektedir. Üç ayaklı temellerin daha çok kullanılmasının sebebi ise ekstrem dalga durumları ve deniz geçiş bölgelerinde iyi bir özelliğe sahip olmasıdır (Huvaj ve ark., 2019).

Özellikleri

- Yapıları ağır çeliktir (Alkan, 2013),
- Maksimum 35 m su derinliğinde uygulanabilmektedir (Alkan, 2013),
- 5MW’ta kadar kapasitedeki türbinler için uygun (Alkan, 2013),
- Şu ana kadar az uygulanmıştır (Alkan, 2013).

Şekil 1.8’de grup kazıklı temellerin uygulama ve teknik resim detayı görülmektedir.



Şekil 1.8. Grup Kazıklı Temeller (Kutlu, 2011)

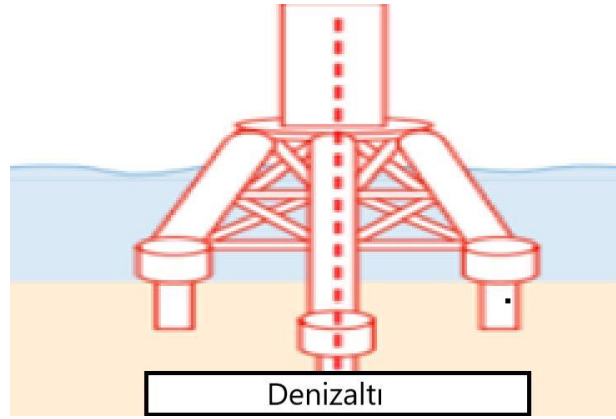
1.5.1.3. Jacket (Kafes) Sistemli Kazıklı Temeller

Deniz tabanı seviyesine çakılan kazıkların üzerine kafes sistemi oturtulur. Deniz tabanının kazıklara oturtulan yerde bir kaynak işçiliği çıkmaması için kazıkların içine soketlenerek kafes sisteminin kazıklara bağlantısı sağlanmaktadır. Kafes sistemli kazık temelleri diğer kazıklı temellere göre daha rijit bir yapıya sahip olduğu için çevre koşullarına karşı (güçlü dalga, büyük su derinlikleri, rüzgar hareketleri vb...) diğer temellere göre yüksek performans gösterir (Akdağ, 2019). Önemli avantajları arasında karada hazırlanıp, gemilerle denizdeki kurulum alanına getirilmesi ve montaj edilmesi vardır (Kutlu, 2011). Dezavantajı ise karmaşık ve fazla sayıda kullanılan malzeme yapısından dolayı maliyetinin pahalı olmasıdır (Huvaj ve ark., 2019).

Özellikleri

- Yapıları örgü çeliktir (Alkan, 2013),
- Maksimum 45 m su derinliğinde uygulanabilmektedir (Alkan, 2013),
- 5MW'ta kadar kapasitedeki türbinler için uygun (Alkan, 2013),
- Şu ana kadar az uygulanmıştır (Alkan, 2013).

Şekil 1.9'da jacket(kafes) kazıklı temel yapısı görülmektedir.



Şekil 1.10. Jacket(Kafes) Kazıklı Temeller (Kutlu, 2011)

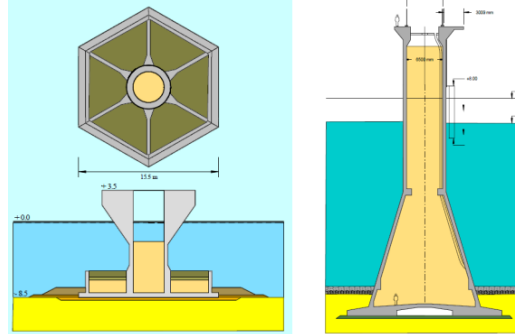
1.5.2. Ağırlık Tipi Temeller

Ağırlık tipli temeller üzerlerine gelen yüklere kendi ağırlıklarının karşı koydukları direnç sayesinde karşılarlar. Genellikle dairesel bir yapıya sahip olmasına rağmen kalıp işçiliğine basite indirmek için kare kesitlide olabilmektedirler. Yaygın olarak ağırlık tipli temellerde betonarme malzeme kullanılmaktadır. Bu tip temeller bazı durumlarda çelik keson içine balast malzeme doldurularak da yapılabilir (Kutlu, 2011). Kendi ağırlığı sayesinde dalga yükleri ve rüzgâra karşı direnç gösterebilmektedir. Taşıma gücünden dolayı, ağırlık tipli temeller genellikle 0-25 metre su derinliklerinde zeminlere uygulanmaktadır. Ağırlık tipli temellerin üretilmesi tekli kazıklı temellere göre daha ucuz maliyete sahip olmaktadır. Bu tip temellerin daha ağır olması sebebiyle kurulum sırasında daha büyük gemiler kullanıldığı ve temellerin büyük olduğu için deniz tabanı hazırlıklarının yapılması sebebiyle, ağırlık tipli temellerin kurulumu daha yüksek maliyete sahiptir. Avantajlı kısmı ise montaja ihtiyaç duyulmadan kurulumunun yapılmasıdır (Huvaj ve ark., 2019).

Özellikleri

- Genellikle sığ sularda tercih edilmektedir (Çiğdem ve ark., 2021),
- Betonarme veya balast malzemeyle doldurulmuş çelik kesonları kullanılarak hazırlanırlar (Çiğdem ve ark., 2021),
- Bu temeller için deniz tabanında hazırlık yapılması gerekmektedir (Çiğdem ve ark., 2021),
- Rüzgâr ve dalga kaynaklı yüklere öz ağırlığı ile karşılık vermektedir (Çiğdem ve ark., 2021).

Şekil 1.10’da Nysted deniz üstü rüzgâr çiftliğinde kullanılan ağırlık tipi temel yapısı görülmektedir.



Şekil 1.10. Nysted Deniz Üstü Rüzgâr Çiftliğinde Kullanılan Temel Görünüşleri (Kutlu, 2011)

1.5.3. Vakumlu Kova Keson Tipi Temeller

Temel tipi olarak hem ağırlıklı temellere hem de kazıklı temellere benzemektedir. İki temel tipinin karışımı olarak da düşünebiliriz. Bu temel tipini diğer temellerden ayıran en önemli özelliği ise kurulum şeklidir. Düşük su derinliklerinde (<5 metre) ortalama çapları 2-4 metre iken daha yüksek su derinliklerinde (>5 metre) ortalama çapları 12-15 metreye kadar çıkabilmektedir (Kutlu, 2011). Bu tip temellerin tasarımında tekli kova tipi temellerin devrilme momenti yüksek olarak görülmektedir. Kova keson tipi temellerin özel bir kurulum yöntemi bulunmaktadır. Kovanın altındaki açık olan kısmı deniz tabanına oturtturulur ve kovanın içindeki su dışarı basılarak, bastırıcı güç elde edilir ve kova deniz zemininin içine bastırılır (Huvaj ve ark., 2019).

Özellikleri

- Yüksek su derinliklerinde de kullanılabilmesi (Huvaj ve ark., 2019),
- Basit üretimi ve kolay taşınabilir olması,
- Ucuz kurulumu olması ve düşük maliyeti olması (Huvaj ve ark., 2019),
- Kova yanları sayesinde yanal dayanımının yüksek olmasıdır (Huvaj ve ark., 2019).

Şekil 1.11’de Horns Rev D.Ü.R. çiftliğinde kullanılan vakumlu kova keson temel yapısı görülmektedir.



Şekil 1.12. Horns Rev D.Ü.R. Çiftliğinde Kullanılan Vakumlu Kova Keson Temeller
(Kutlu, 2011)

1.5.4. Yüzer Tipi Temeller

1.5.4.1. Duba (Mavna) Tipi Yüzer Platform Temelleri

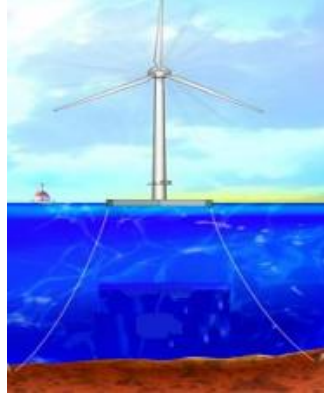
Duba tipi rüzgâr türbini dengesini su düzlemi alanı boyunca sağılar ve katener çizgilerle genellikle demirlenir. Platform sığ taslak bir yapıya sahiptir. Bu taslağı oluşturabilmek için bir miktar balastlamaya ihtiyaç duyulabilir. İstasyonu tutmak için palamar halatları kullanılır. Platformu, bağlama halatı olmadan kurulum yerine götürmek ve rüzgâr türbinin monte etmek daha kolay olmaktadır (Yanya, 2020). Stabilite hareketlerini geniş bir alana sahip olan platform hacimleri ile sağlamaktadırlar (Alkan, 2013). Mavna tipi yüzer rüzgâr türbini, büyük yapısı sayesinde birçok rüzgâr türbini bir arada taşıyacak yapıya sahiptir. Demirleme işlemi katener çapa zincirleri ile yapılmaktadır. Mavna tipi yüzer rüzgâr türbinleri, büyük yük gemilerinin yaptığı dalgalara karşı duyarlı bir yapıya sahip olduğu için korunaklı koylar, limanlar ve lagün gibi sakin denizlere kurulmalıdır. Mavna tipi yüzer rüzgâr türbinleri imalat, tasarım ve kurulumunun basit olması sebebiyle tercih edilir. Durgun dalga çarpmalarına karşı, dengeli hareket sağlaması için deniz suyuyla dengelenir. Sürüklenmeyi önlemek için platform belirli köşelerinden katenerler ile demirlenir (Yanya, 2020).

Stabilite yüzdürme hareketi sebebiyle, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) ve MIT, mavna tipi yüzer rüzgâr türbini tasarımı, üretimi ve kurulumunda beraber iş birliği yapmıştır (Yanya, 2020).

Özellikleri

- Geniş su düzlemi alanı sayesinde yüzdürme ve stabilite sağlanmaktadır (Yanya, 2020),
- Geleneksel bağlama hatları kullanılmaktadır (Yanya, 2020),
- Basit, ucuz platform (Yanya, 2020),
- Operasyon için uygun güverte (Yanya, 2020),
- Kurulumu kolay, sığ su kapasitesi, sakin denizlere uygun (Yanya, 2020).

Şekil 1.12’de Duba tipi yüzer platform temeli yapısı görülmektedir.

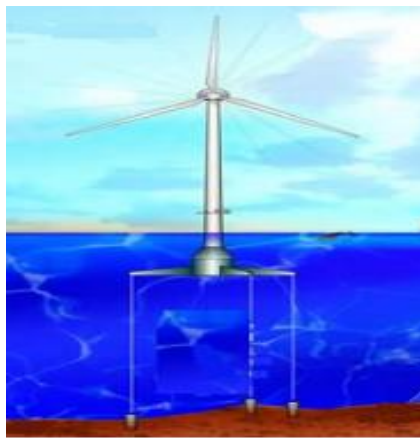


Şekil 1.13. Duba Tipi Yüzer Platform Temelleri (Alkan, 2013)

1.5.4.2. Gergi Ayaklı Tipi Yüzer Platform Temelleri

Bu platformlarda stabilite hareket demirleme sistemleri sayesinde yapılmaktadır. Gergi ayaklı yüzer platform sistemleri gerdirilmiş halat sistemleri sayesinde düşey konuma sahip olarak sabit hale getirilmektedir (Alkan, 2013). Bu platformlar, serbest halde hareket eden bir offshore platform yapısına sahiptir. Yüzer deniz platformlarının tersine, bu hareketlere uyumlu platformlar dış etkenlere karşılık verir. Bağlanılan halatlarla bu hareketler kontrol edilmektedir. Gergi ayaklı yüzer platformlar yatay açıda salınıma ve dalgalanmaya uyumludur. Dikeyde açıda ise sabit bir yapıya sahiptir. Yüzdürme özelliği bu platformu diğer platformlardan ayırmaktadır. Yapısındaki çeliğin boyunun belirli bir derinliğe uzanmasından dolayı su derinliğinin artmasıyla platform maliyeti artmamaktadır (Yanya, 2020).

Şekil 1.14. Gergi ayaklı tipi yüzer platform temeli yapısı görülmektedir.

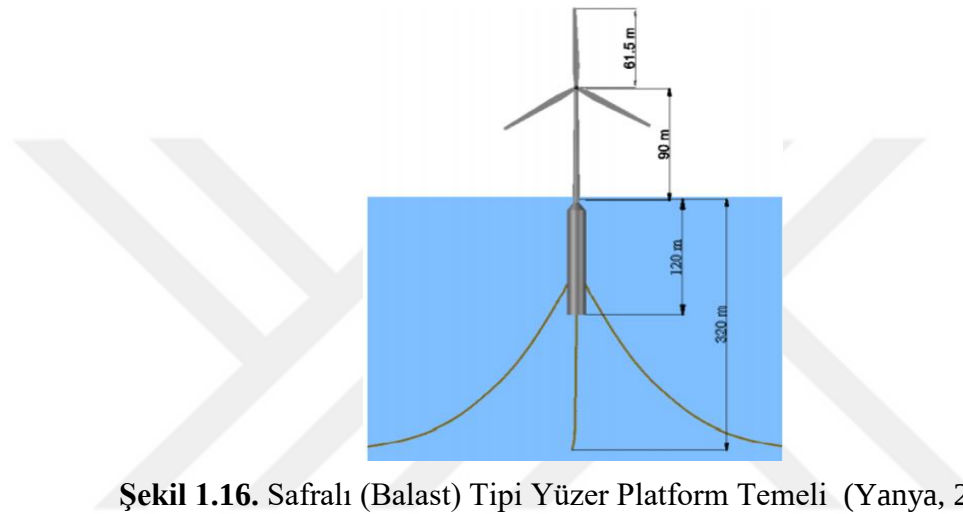


Şekil 1.15. Gergi Ayaklı Tipi Yüzer Platform Temeli (Alkan, 2013)

1.5.4.3. Safralı (Balast) Tipi Yüzer Platform Temelleri

Safralı tipi yüzer platform sistemleri stabilitelerini hareketlerini merkezi konumuna konumlandırılmış sephiye tankları ve içerisine koyulmuş ağırlıklar ile sağlamaktadırlar. İçerisine doldurulan ağırlıklar bu yapının deniz tabanına doğru çökmesine sebep olduğu bazı dinamik hareketlerinde kısıtlama sağlamaktadır. Safralı yüzer açık deniz rüzgâr türbinleri suyun içerisinde kararlı bir dengede kalmaktadırlar (Alkan, 2013). Yapısı nedeniyle küçük ağır hareketlerle karakterize edilir (Yanya, 2020).

Şekil 1.14'te Safralı (balast) tipi yüzer platform temeli yapısı görülmektedir.



Şekil 1.16. Safralı (Balast) Tipi Yüzer Platform Temeli (Yanya, 2020)

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Alkan (2013) yaptığı bu çalışmada açık denizde konumlandırılabilen 5 MW'lık bir rüzgâr türbini için gevşek katener (zincirli) demirleme sistemi ile gergi ayak demirleme sistemleri karşılaştırılmıştır. Farklı demirleme sistemlerinde yüzer açık deniz rüzgâr türbini platformunun hareket miktarları ve halat gerilmeleri zamana dayalı olarak karşılaştırılmıştır. Analizler 4m, 6m ve 10m dalga yüksekliklerinde gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalar hidrodinamik olarak matematiksel ve yüzer platform sistemli açık deniz rüzgâr türbinine ait demirleme sisteminin hidrodinamik analizi için Orcaflex bilgisayar programı kullanılmıştır. Gergi ayaklı platform tipinin açık deniz rüzgâr türbini için uygun bir platform tipi olduğu belirlenmiştir (Alkan, 2013).

Gedik (2018) yaptığı bu çalışmada yatay eksenli rüzgâr türbini için yeniden kanat tasarımı ve malzeme seçimi yapılmıştır. Çalışmanın amacı ithal rüzgâr türbinleri tasarlanırken tasarlandıkları ülkenin rüzgâr verileri elle alınmıştır, bizim ülkemizde bu tasarımlar kullanılınca TL/kwh olarak verim düşmüştür. Yapılan tasarımla maliyet ve elektrik

Üretim verimi artırılmak istenmiştir. Malzeme olarak yüksek mukavemete sahip olduğu için S cam fiberi seçilmiştir. İlk kanat geometrisini elde etmek için KEM modeli kullanılmıştır, sonrasında 3 boyutlu bir tasarım programıyla kanadın modellemesi tamamlanmıştır. Tasarlanılan kanat için aerodinamik yükler (akış analizi, şekil değiştirme dağılımı, titreşim) HAD analizi yapılmıştır. Proje sonucunda elde edilen kanadın verileri bu kanadın Türkiye’deki MW st pazarda yer alabileceğini, performans vb. verilerinin buna uygun olduğunu belirtmektedir (Gedik, 2018).

Tüysüz (2019) yaptığı bu çalışmada Kocaeli/Darıca ve Gebze yerleşkelerinde bulunan rüzgâr enerjisi gözlem istasyonlarının 2016 yılı içerisindeki bir saatlik aralıkla ölçtüğü rüzgâr hızı, yn, sıcaklığı ve basıncı elde edilmiş bu veriler kullanılarak weillull dağılımı ile ortalama rüzgâr hızı ve yıllık üretim bulunmuştur. Bu değerlere göre (Enercon, Vestas, Leitwind, Nordex) gibi rüzgâr türbini firmalarını ürettiği türbinlerden uygun olan türbini seçilerek ekonomik analizler ve amortisman süresi hesaplanmıştır (Tüysüz, 2019).

Yanya (2020) yaptığı bu çalışmada genel deniz üstü rüzgâr türbinlerinin dışına çıkılarak, zemine sabit türbini değil yüzer spar tipi rüzgâr türbini üzerinde çalışılmıştır. Hywind spar tipi rüzgâr türbini Solidworks programı ile bire bir ölçeklendirilmiş tasarımı yapılmış ve Ansys ortamında farklı dalga ve rüzgâr hızları kullanılarak türbini üzerinde oluşan kuvvetler incelenmiştir. Türbini için hız dağılımları, basınç dağılımları, statik olarak türbinde oluşan gerilme değerleri, oluşan deformasyon, kesme değerleri bulunmuştur. Bu değerler dalga simülasyonu yapılarak da bulunmuştur. Rüzgâr türbini dalgalara ve rüzgâr hızına karşı vereceği tepkiyi bulmak için Ansys ortamında deprem simülasyonu yapılmıştır. Ülkemizde ise elde edilen değerlerin bulunması ve gerekli incelemelerin yapılması için 40 metreden derin sularda belirli rüzgâr hızlarında uzun süreli dalga testlerinin yapılması gereklidir. Tez kapsamında bulunan maksimum ve minimum kuvvetlerin uygulandığı yerler bulunmuştur (Yanya, 2020).

Aktaş (2020) yaptığı bu çalışmada TÜBİTAK’ta projesi yapılan spar tipi rüzgâr türbini fiziksel deneyleri laboratuvar ortamında bir kanal oluşturularak, bu kanal üzerinde türbine doğadaki gibi düzensiz dalgalar gönderilerek incelenmiştir. Ayrıca ANSYS programında bu simülasyonlar yapılarak platform tepkileri ölçülmüştür. Bu alışmalar 1:40 leği kullanılarak yapılmıştır. YTE Hidrolik Laboratuvarı dalga kanalında ikinci dereceden düzenli ve düzensiz dalgalar üretilmiş, kullanılan metodlar doğrulanmış ve fiziksel model deneyleri için gerekli hazırlıklar tamamlanmıştır (Aktaş, 2020).

Canoğlu (2022) yaptığı bu çalışmada yaşam alanlarına yakın yerlerde ve hatta kent merkezlerinde kolaylıkla kullanılabilen (DERT) tipi rüzgâr türbini kanat tasarımı için bir çalışma yapılmıştır. Yapılan tasarımlar için ağ yapısı oluşturulmuştur, sınır şartları belirlenmiştir ve türbülans modeli seçilmiştir. Lenz tipi kanat profili ve tasarlanılan kanat profili farklı uç hız oranları ve hücum açılarında (0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18°) karşılaştırılmış ve hangisinin daha verimli olduğuna HAD programı sayesinde bakılmıştır. Elde edilen sonuçlar iki kanat profili içinde avantaj ve dezavantajlarıyla açıklanmıştır. Yazılacak otomasyon yazılımı ile farklı kanat tipleri ve değişken hücum açısı seçenekleri uç hız oranına göre değişken olabilir ve türbinden elde edilecek güç ve verim her uç hız oranında en iyi seviyede sağlanabilir (Canoğlu, 2022).

Keçici ve Özer (2022) yaptıkları bu çalışmada Avrupa'da çalışır durumda 12 MW offshore rüzgâr türbini bulunmaktadır. Bu kurulu gücü Avrupa gelecek yıllarda 180MW'a çıkarmayı hedeflemektedir. Avrupa da rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 2030 yılında 1/4'ünü offshore rüzgâr türbinlerinden olması planlanmaktadır. Bu makalede Monopile tipi açık deniz rüzgâr türbininin CATIA programı ile tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımın HyperWorks programında analizleri yapılmıştır. Bu tasarımda dış çalışma platformu kuleye uygulanmış ve deniz seviyesinin üstünde dalga mesafesine göre kuleye uygulanmıştır. Güncel verilerde (dünya üzerinde kurulu açık deniz rüzgâr türbinleri, kurulu güç kapasitesi, çeşitleri ve gelecekte kurulması planlanan rüzgâr türbini kapasiteleri) bahsedilmiştir. Yapılan tasarımla kule nakliye ve kurulum maaliyeti düşürülmüştür (Keçici ve Özer, 2022).

Tortumluoğlu ve Doğan (2021) yaptıkları bu makalede 2014-2019 yılları arasında WAsP Climate Analyst 3.1 programı kullanılarak saatlik olarak rüzgâr verileri analiz edilmiş ve bölgelerin (Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale ve Ayvacık) ortalama rüzgâr iklimleri elde edilmiştir. Ege kıyılarında farklı bölgeler için yasak sahalar, rüzgâr hızı, rüzgâr potansiyeli, montaj ve bakım için deniz ulaşımı ve elektrik kablolarının kurulum kolaylığı gibi faktörlere bakılarak uygun bölgeler belirlenmiştir. Gökçeada rüzgâr atlası incelendiğinde ortalama rüzgâr hızı açık deniz de 4 m/sn den yüksek olduğu için Gökçeada açıkları rüzgâr hızı açısından uygun bulunmuştur. Gökçeada'nın türbin yerleşimi yapılmıştır (Tortumluoğlu ve Doğan, 2021).

Huvaj, Caceoğlu ve ark. (2019) yaptıkları bu makalede deniz üstü rüzgâr türbinleri çeşitlerinden (kıyıda ve açık deniz) bahsedilmiştir. Tekil kazıklı temeller, grup kazıklı temeller, kafes sistemli kazıklı temeller, ağırlık temeller, vakumlu kova keson tipi temeller, yüzer tipi temeller olmak üzere temel tiplerinin yapıları ve özellikleri

açıklanmıştır. Deniz tabanları için zemin etüdü yapılmış ve hangi tip temel seçmemizin uygun olacağı araştırılmıştır. Denizlerdeki rüzgâr potansiyelinin belirlenmeli, belirlenen yerlerde ölçümler yapılarak deniz rüzgâr potansiyel atlası çıkarılmalıdır. Ayrıca Türkiye bir deprem bölgesi olduğu için deniz tabanı saha araştırma şartnamesi uluslararası şartnameye göre hazırlanmalıdır (Huvaj ve ark., 2019).

Kutlu (2011) yaptığı bu çalışmada SAP 200 programı ile tekli kazıklı ve grup kazıklı rüzgâr türbinleri tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımlar için matematiksel hesaplamalar rüzgâr kuvvetleri, dalga yükleri, deprem yükleri hesaplanarak excel programı kullanılarak grafik haline getirilmiştir. Deniz üstü rüzgâr türbinlerinin temel tasarımında dikkat edilmesi gereken iki önemli farklılık oyulma ve yorulma durumlarıdır hesaplamalar ve tasarım yapılırken bu hususlara dikkat edilmelidir. Bu tasarımlarda depremin rüzgâr türbinleri üzerindeki etkisi incelenmiştir (Kutlu, 2011).

Aygen (2019) yaptığı bu çalışmada rüzgâr türbini kanadı üzerine farklı açılarla (90 derece, 30 derece, 45 derece ve 60 derecelik) yerleştirilen türbülátörlerin etkisi ANSYS programı sayesinde, türbülanslı akışlar için geçerli olan k-epsilon modeli ile farklı hızlarda (5 metre/saniye, 10 metre/saniye ve 15 metre/saniye) incelenerek kanattaki hız ve basınç dağılımları bulunmuştur. En yüksek basınç farkı 60 derece türbülátörlü kanatta meydana gelirken, en düşük basınç farkı 90 derece türbülátörlü kanatta meydana gelmiştir. Ayrıca farklı hızlarda yapılan çalışmalarda hız arttıkça basınç farkının azaldığı tespit edilmiştir (AYGEN, 2019).

Otlu (2012) yaptığı bu çalışmada deniz üstü rüzgâr türbinleri için ekonomik, teknik ve çevresel faktörlere bakılmış ve rüzgâr türbini çeşitlerinden bahsedilmiştir. Türkiye’de ve diğer Avrupa ülkelerinde enerji tüketiminden, yenilenebilir enerji kaynaklarından, kurulu rüzgâr türbinlerinden ve gelecekteki planlanan durumundan bahsedilmiştir. Bu türbin çeşitlerinin hangi bölge için daha mantıklı olduğu incelenmiştir. Gelecekte ülkemizde deniz üzeri rüzgâr türbinleri Kuzey Ege, Bandırma ve İskenderun açıklarında görmemizin mümkün olduğu ve bu bölgelerdeki yoğun rüzgâr enerjisinden yararlanılarak mantıklı bir yatırım haline geleceği tavsiye edilmiştir (Otlu, 2012).

Şentürk ve Elif (2020) yaptıkları bu çalışmada rüzgâr türbinini oluşturan temel parçalardan bahsedilmiştir. Bozcaada’da kurulu olan 44 metre kule yüksekliğine sahip türbinler için kurulum sırasında ve sonrasında türbinin yaşam döngüsü için gerekli olan envanterlerin hangileri olduğu açıklanmıştır. 43,7 metre rotor çapına sahip 17 adet rüzgâr türbini Bozcaada da kuruludur. Ayrıca deniz üstü rüzgâr türbini için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar için Vestas V112-3MW türbin modeli uygun görülmüştür.

Vestas türbin modeli için belirli rüzgâr hızlarında yıllık tahmini enerji üretimi hesaplanmıştır. İlk yatırım maaliyeti (iym), işletme ve bakım maaliyeti (ibm), tasfiye ve ger dönüşüm maaliyetleri (tgm) gibi maaliyet hesapları hakkında bilgi verilmiştir (Şentürk ve Elif, 2020).

Hong ve ark. (2022) yaptıkları bu çalışmada seyyar şekilde gezen bir gemi üzerinde spar tipi temel yapısına sahip bir gemi ile rüzgâr türbinlerinin kurulum, montaj ve bakım işleri hızlandırılmak istenmektedir. Bu işler yapılırken geminin sabit kalma işlemi palamar halatları ile sağlanmaktadır. Gemi üzerine kurulmuş rüzgâr türbinin stabilize kalmasını sağlayan kuleler ile çalışma yapılmaktadır. Sistem üzerine gelen yükleri ve halatlarda oluşan kuvvetler hesaplanmıştır (Hong ve ark., 2022).

Tran ve Lee (2022) yaptıkları bu çalışmada Güney Kore'deki derin su sahaları kafes sistemi temel yapısına sahip 3 MW'lık bir rüzgâr türbini için 8 farklı tipte kafes yapısı oluşturulmuştur. Rüzgâr yükleri ve dalga yükleri hesaplanarak en uygun kafes yapısını seçimi sağlanılmıştır. Farklı ölçülerde yapılan kafes yapıları 14, 25 ve 40 metre su derinliklerinde analiz edilmiş ve 25 ve 40 metre için uygun olduğu görülmüştür. Güney Kore için tasarlanan 8 kafes sisteminden ikisi önerilmiştir (Tran ve Lee, 2022).

Tosun (2017) yaptığı bu çalışmada rüzgâr türbinin parçalarından ve temel yapılarından bahsedilmiştir. Rüzgâr türbinlerinde geçmişte ve günümüzde kullanılan jeneratör yapısı anlatılmıştır. M.Torres TWT 1.65-82 Türbini weibull ve rayleigh eğrileri kullanılarak yıllık enerji üretimi hesaplanmıştır. UIUC Havacılık ve Uzay Mühendisliği Departmanı verilerine göre AH79-100 C kanat modeli dizayn edilmiştir ve bu tasarım Solidworks programı ile analiz edilmiştir. Akış analiz sonuçları ve basınç dağılımları elde edilmiştir. İstenilen değere ulaşıldığı için prototip üretimi yapılmıştır (Tosun, 2017).

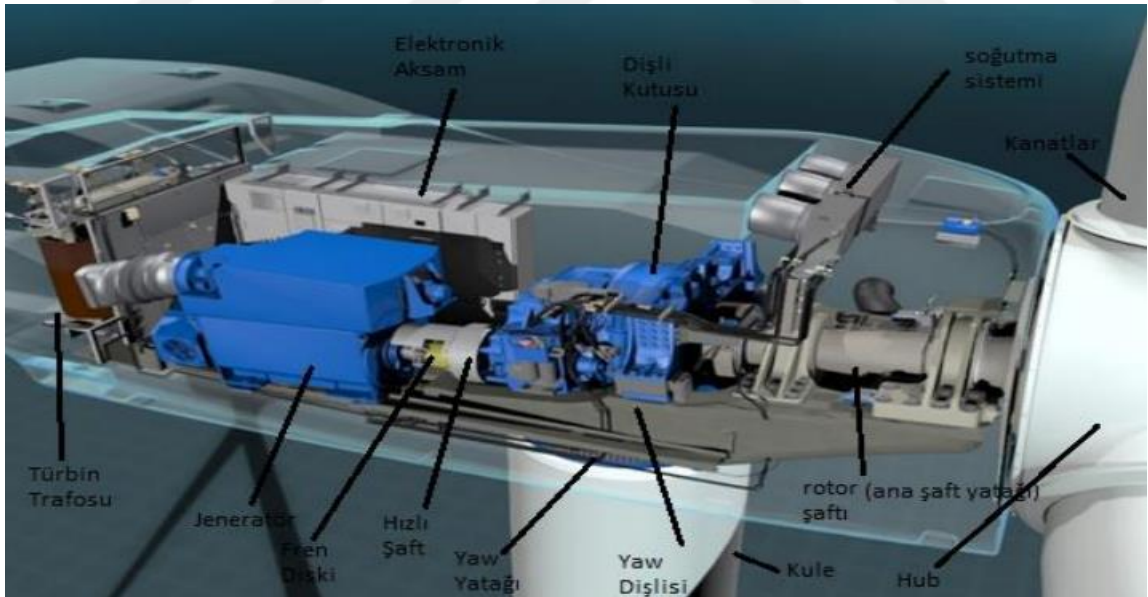
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Rüzgâr türbinin ana bileşenleri, deniz üstü rüzgâr türbin seçimi için avantaj ve dezavantajların sıralanması ve uygun olan temel yapısı seçimi yapılması, temel rüzgâr enerjisi denklemleri (rüzgâr gücü, rüzgâr debisi, sürüklenme katsayısı, kaldırma katsayısı, basınç katsayısı, navier-stokes denklemleri), türbin ve temel yapısı için analiz yaparken kullanacağımız türbülans modelleri anlatılmış, maliyet hesapları ve rüzgâr hız verilerinin nasıl elde edilmesi bu bölümde anlatılmıştır.

3.1. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN BİLEŞENLERİ

Rüzgâr türbinlerinin yapısında, kulenin en üstünde olan bölüm yaw dişlileri, jeneratör, yaw yatağı, ana şaft yatağı, ana şaft, soğutma sistemi, elektronik aksan, hidrolik sistem, fren diski gibi bazı donanımların bulunduğu gövdedir (Erol, 2020). Bu gövdenin asıl amacı türbinlerin başta donanımlarının yerleştirilmesi ve rüzgârın hareketinin akıcı bir hale getirilerek daha iyi aerodinamik sonuçlar elde edilmesidir (Keleş, 2013). Gövde kısmına ulaşım kulelere konumlandırılmış taşıma asansörleri sayesinde yapılmaktadır (Durak ve Özer, 2008).

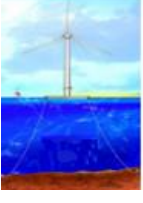
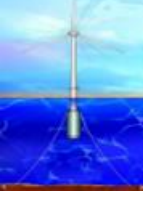
Şekil 3.1’te rüzgâr türbini bileşenleri görülmektedir.



Şekil 3.1. Rüzgâr Türbini Bileşenleri(Can, 2020)

3.2. DENİZ ÜSTÜ RÜZGÂR TÜRBİNİ SEÇİMİ

Şekil 3.2’de yüzer platformların sistemlerinin avantaj ve dezavantajları kıyaslama tablosu görülmektedir.

Yüzer Platform Sistemlerinin Kıyaslanması	Mavna (Barch) Tipi	Yarı-Batık Tipi	Sparşamandıra (Balast) Tipi	Gergi Ayak Tipi
+ (artı): Bilinen avantaj - (eksi): Bilinen dezavantaj				
Tasarım araçları ve yöntemleri	-	-	-	+
Sephiye tankı maaliyeti ve karmaşıklığı	-	-	-	+
Halat maaliyeti ve karmaşıklığı	+	+	+	-
Demir maaliyeti ve karmaşıklığı	+	+	+	-
Kurulum kolaylığı ve maaliyeti	+	+	-	-
Denizde inşaat kolaylığı	+	+	+	-
Devreden çıkarma ve bakım	+	+	+	-
Korozyona karşı direnç	-	-	+	+
Derinlikten bağımsızlık	+	-	-	-
Zemin koşullarına bağımlılık/hassasiyet	+	+	+	-
Minimum ayak izi	-	-	-	+
Dalgalara duyarlılık	-	+	+	+
Türbinin toplam ağırlığını taşımak	+	+	-	-
Kulenin tepesindeki hareket	-	-	-	+
Rüzgâr türbininin stabilite kontrolü	-	-	-	+
Maksimum yan yatma açısı	-	-	-	+

Şekil 3.3. Yüzer Platformların Avantaj ve Dezavantajları (Alkan, 2013)

Duba tipi yüzer platform temelleri geniş bir temel alanına sahip olduğu için deniz üzerinde kolay bir şekilde yüzdürülerek hareket ettirilebilir ve stabilite hareketleri geniş temel alanları sayesinde sağlanmaktadır. Bu platformların kurulumu kolay olmakta ve platform üzerine birden çok rüzgâr tribünü kurulduğu için basit ve ucuz maliyete sahip

olmaktadırlar. Bakım onarım çalışmalarında geniş bir yüzeye sahip oldukları için uygun güverte çalışma alanı mevcuttur.

Gergi ayaklı tipi yüzer platformu temelleri zemine bağlanmış çok sayıda halat sayesinde stabilite hareketlerini sağlamaktadırlar. Temel yapısının karışık olmasından dolayı ve halat sayının fazla olmasından dolayı maliyetleri yüksektir. Temel yapısındaki halatlar sayesinde dalgalara karşı hassasiyeti yüksektir ve kuruldukları yerden taşınması diğer platformlara göre daha zordur. Platform üzerinde uygun çalışma alanı olmadığı için bakım onarımı zordur.

Safralı (Balast) Tipi Yüzer Platform Temelleri merkezi konuma konumlandırılmış sephiye tankları içerisine konulmuş ağırlıkları ile stabilite hareketlerini sağlamaktadırlar. Sephiye tankları maliyeti ve ağırlıkları yüzünden bu temellerin taşınması ve maliyeti yüksektir. Dalgalara karşı temel yapısındaki sephiye tankı sayesinde hassasiyetleri yüksektir. Bu temellerin bakım ve onarım işlemleri gergi ayakları temellere göre daha kolaydır.

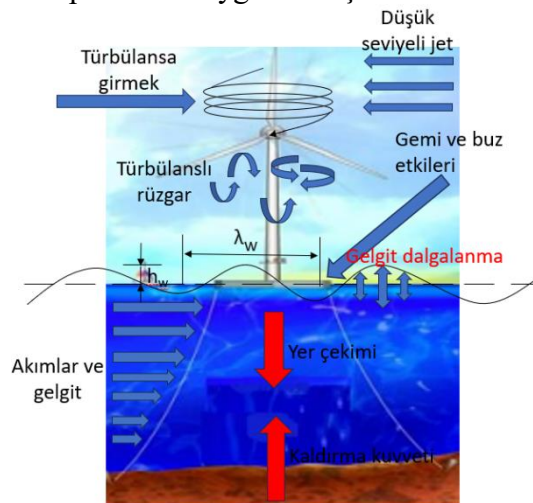
Bu sonuçlar ve değerlendirmelere göre uygun temel tipi maliyet ve kurulum kolaylığından duba tipi yüzer temel olarak belirlenmiştir.

3.3. TEMEL RÜZGÂR ENERJİSİ DENKLEMLERİ

Rüzgâr türbinleri rüzgârdan elde edilen kinetik enerjiyi önce türbin kanadında dönme kinetik enerjisine çevirir, sonra bu dönmeden elde edilen enerji jeneratöre iletilerek elektrik enerjisi sağlanması amaçlanır.

3.3.1. Deniz Üstü Rüzgâr Türbinlerinin Çevresel Etkileri

Şekil 3.3'te Duba tipi yüzer platforma uygulanan çevresel kuvvetler görülmektedir.

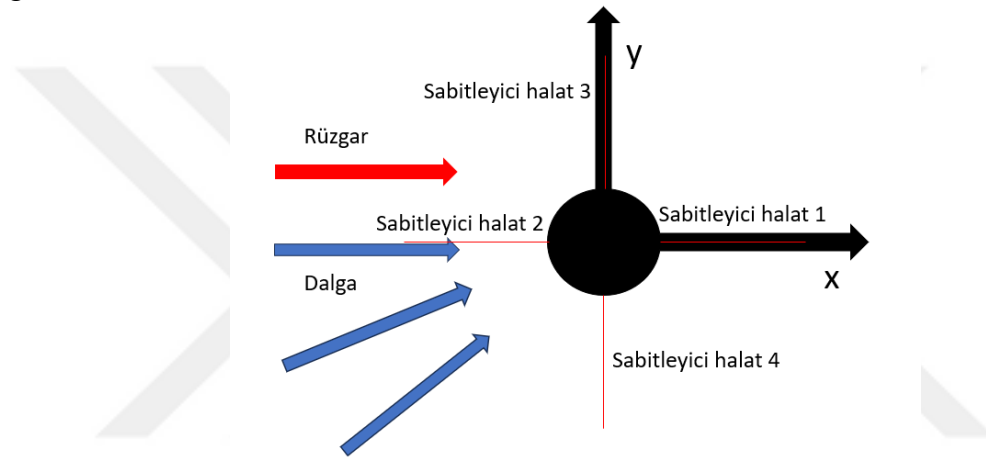


Şekil 3. 4. Duba Tipi Yüzer Platforma Uygulanan Çevresel Kuvvetler

Duba tipi yüzer rüzgâr türbinlerinin, uygulandığı bölgede karşılaştığı çevresel yükleri belirlemek büyük bir öneme sahiptir. Bu yükler genel olarak aerodinamik ve hidrodinamik etkilerin karışımı olarak karşımıza çıkacaktır. Farklı ortamların etkilerini incelerken dikkate alınması gereken faktörler iki kategoriye ayrılır, normal çalışma koşulları ve normal olmayan çalışma koşullarıdır. Bu koşullar rüzgâr türbinleri üzerinde çevresel etkilere sahiptir (Yanya, 2020).

3.3.2. Rüzgâr Türbinini Etkileyen Sabit Aerodinamik Etkiler

Şekil 3. 5'te rüzgâr türbinine etki eden kuvvetler, sabitleyiciler ve dalga etkileri görülmektedir.



Şekil 3. 6. Rüzgâr Türbinine Etki Eden Kuvvetler, Sabitleyiciler ve Dalga Etkiler (Dong ve Viré, 2022)

Rüzgâr türbini çok fazla etken sonucu aerodinamik olarak etkilenen bir yapıdır. Deniz üstü rüzgâr türbinlerinde aerodinamik olarak karmaşıklık çoğalmaktadır bunun sebebi ise türbinin suyun altında kalan kısmı aerodinamik etki olarak büyük bir öneme sahip olmasıdır (Karimirad ve Moan, 2011).

Rüzgâr enerjisi kuvveti, belirli bir hıza ve kütleye sahip hava parçacıklarının karşısına çıkan cisme uyguladıkları kuvvettir. Bundan dolayı kinetik enerji formüllerinin temellerine dayanır. Bu formül şu şekildedir,

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Bu formülde E_K rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiyi, m hava parçacıklarının kütlesini (kg), v ise rüzgâr hızını (m/sn) gösterir.

Rüzgâr enerjisinin birim zamandaki bileşeni, yani teorik rüzgâr gücü, ise hareket eden hava debisi ile ilişkilidir.

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Bu formülde $\dot{m}$ rüzgâr debisini (kg/sn) gösterir. Rüzgâr debisi, hava moleküllerinin yoğunluğu ve hava hareketinin kesitini oluşturan türbin pervanesi alanı biçiminden aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\dot{m} = A \cdot v \cdot \rho \quad (3.3)$$

A türbin süpürme alanını belirtmekte olup belirlenmesi,

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.4)$$

Formülü ile türbin kanadı çapı D kullanılarak yapılabilir. Teorik rüzgâr gücü, türbin kanat çapının karesi ile orantılıdır, bu sebeple geçtiğimiz yıllarda gelişen yapısal teknolojiler ile türbin kanat çapları sürekli olarak artırılmıştır.

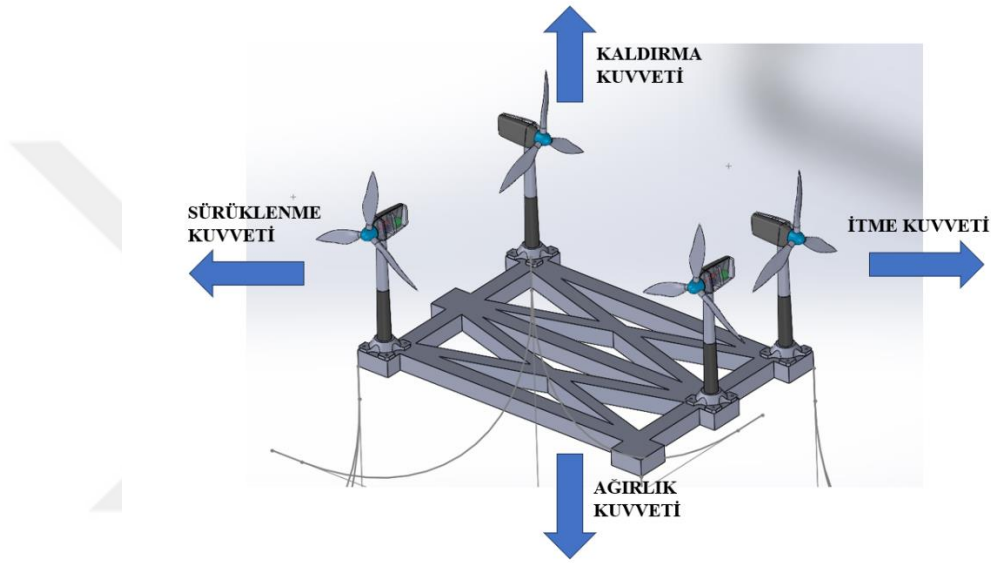
Rüzgâr debisinin teorik rüzgâr gücü formülünde yerine konulması sonucunda

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Rüzgâr teorik gücü türbin kanat alanı, hava yoğunluğu ve rüzgâr hızına bağlı olarak elde edilir. Rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olarak değişmektedir.

3.3.3. Aerodinamik

Hava içerisinde araçların hareketlerini inceleyen bir bilim dalı olan aerodinamik, bu tez kapsamında deniz üstü rüzgâr türbini üzerine etki eden kuvvetleri incelemek için kullanılmıştır. Hava içerisinde hareket eden herhangi bir cisim aerodinamik kuvvetler altındadır. Aerodinamik altında bulunan cisimlere toplamda dört farklı kuvvet etmektedir. Bu kuvvetler sırasıyla kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, ağırlık kuvveti ve itme kuvvetidir. Şekil 3.5'te duba tipi yüzer rüzgâr türbini üzerine etki eden kuvvetler görülmektedir.



Şekil 3. 7. Duba Tipi Yüzer Rüzgâr Türbini Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Ağırlık kuvveti ($W=mg$) dünya üzerinde her şey bir ağırlığa sahiptir. Ağırlık kuvveti, yer çekim kuvvetinin büyüklüğü ve cismin kütlesinin çarpımı ile oluşmaktadır ve birimi Newton' dur.

Kaldırma kuvveti, bir cismin havalanmasını sağlayan kuvvettir, yani ağırlık kuvvetine karşı koyan bileşendir. Kaldırma kuvveti ne zaman ağırlık kuvvetini yenerse cisim uçmaya başlar. Örneğin bir sıcak hava balonu içinde bulunan hava dışardaki havadan daha hafif olduğu için balon yükselir.

Sürüklenme kuvveti, hareket etmeye çalışan cismimize karşı koyan kuvvettir. Akışkanın yoğunluğuna bağlı olarak değişim gösterir. Örneğin suyun içinde yürümek hava içinde yürümekten zordur. Bir cismin şeklide aynı şekilde sürüklenme durumunu etkiler. Yumuşak köşeli cisimlerin sürüklenmeye daha az duyarlı olduğu bilinmektedir. Hava ile direk temasta bulunan yüzey alanı, büyüdükçe sürüklenme kuvveti de yükselme göstermektedir.

İtme kuvveti, sürüklenme kuvvetin tersi, yani bir cismin hareketini sağlayan kuvvettir. Bu da diğer kuvvetler gibi hareket sağlayabilmesi için karşı koyan kuvvetten daha yüksek olması demektir.

Duba tipi yüzer rüzgâr türbini üzerine etki eden sürüklenme, kaldırma, yunuslama ve basınç kuvvetleri bu katsayılarla belirlenir;

$$\text{Sürüklenme katsayısı} \quad C_D = \frac{D}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V^2 A} \quad (3.6)$$

$$\text{Kaldırma katsayısı} \quad C_L = \frac{L}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V^2 A} \quad (3.7)$$

$$\text{Yunuslama katsayısı} \quad C_M = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V^2 A^2} \quad (3.8)$$

$$\text{Basınç katsayısı} \quad C_p = \frac{\Delta P}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V^2} \quad (3.9)$$

3.4. TEMEL DENKLEMLER

Bu tezde analiz için kullanılan Solidworks Simulation yazılımı ile, analizi yapılmak istenen duba tipi temel için akış analizi ve statik analiz problemlerini, kütle ve momentum korunumu kanunlarının matematiksel ifadesi olan ve akışı en iyi şekilde tanımlayan Süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerini çözümleyerek sayısal olarak incelemek için kullanılmıştır. Süreklilik Denklemi kütle korunumunu ifade ederken, momentum denklemi, Newton'un ikinci yasası uyarınca akışkan parçacığı üzerindeki kuvvetleri ve momentumdaki değişim hızının akışkana etki eden toplam kuvvete eşit olduğunu gösteren momentum korunumunu ifade etmektedir. Isı transferi veya sıkıştırılabilirlik içeren akışlar için termodinamiğin birinci yasası olarak bilinen enerjinin korunumu ilkesine göre akışkan parçacığında meydana gelen enerji değişimini çözümleyip

enerjideki değişim hızının akışkana aktarılan ısı ve işin toplamına eşit olduğunu gösteren enerji denklemi de ek olarak çözdürölür.

3.4.1. Kütlenin Korunum Denklemi

Hacimdeki Kütte Değişim Oranı=Giren Akış Kütlesi-Çıkan Akış Kütlesi

(Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılmaz akışlar için de geçerlidir).

3.4.2. Momentum Korunum Denklemleri

Newton'un ikincisi yasası, $F = m \times a$ vektörel büyüklük olduğundan kontrol hacmi üç adet bileşenine göre düzenlendiğinde üç diferansiyel formda denklem elde edilir.

3.4.3. Newton Tipi Sıkıştırılmaz Akışkanlar İçin Süreklilik ve Navier Stokes Denklemleri

Kartezyen Koordinatlarda:

$$\text{Süreklilik:} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.10)$$

Navier-Stokes:

$$\text{X-Bileşeni:} \quad p\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + p g x \quad (3.11)$$

$$\text{Y-Bileşeni:} \quad p\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + p g y \quad (3.12)$$

$$\text{Z-Bileşeni:} \quad p\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + p g z \quad (3.13)$$

3.5. TÜRBÜLANS MODELİ

Türbülans modeli seçilirken model için, modelin şekli ve kesin sonuç doğrultusunda bir türbülans modeli seçilir. En çok $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ modelleri kullanılır. Cidara uzak noktalarda $k-\epsilon$, yakın noktalarda $k-\omega$ modeli ile daha iyi sonuçlar alınabilir.

3.5.1. K- ϵ MODELİ

En yaygın kullanılan türbülans modellerinden biridir. Bu türbülans modeli iki farklı denklem kullanarak problemlerin hesabını gerçekleştirmektedir. Standart $k-\epsilon$ model, türbülans kinetik enerjisi ve dağılımı nedeniyle genel taşınım denklemine dayanan bir modeldir.

3.5.2. K- ω MODELİ

Bir diğer iki farklı denklem kullanarak çözüme ulaşan türbülans modeli $k-\omega$ modelidir. $k-\epsilon$ modeli gibi bu tarz uygulamalarda kullanılan en yaygın denklemlerdendir. İlki transport değişkeni türbülans kinetik enerjisiyi kullanmakta, diğeri özel enerji dağılım denklemdir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} = Pk - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x} ((v + \sigma v) \frac{\partial k}{\partial x}) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U \frac{\partial \omega}{\partial x} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x} \left((v + \sigma v) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + 2(1 - F) \sigma \omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad (3.15)$$

3.6. SOLIDWORKS FLOW SIMULATION MODÜLÜ

Solidworks flow simulation yazılımı mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan etkileşimini simüle etmekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının simüle edilmesine olanak sağlayan flow simulation, ürünlerin henüz prototipleri üretilmeden sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlar. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu simülasyonlar neticesinde yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır. SOLIDWORKS ile bu çalışma kapsamında SOLIDWORKS'ün FLOW SIMULATION modülü kullanılmıştır. Bu tez çalışmamızda (9000 0137 0535 1690 RXT6 KG3G) lisans kodlu Solidworks programı kullanılmıştır.

3.7. RÜZGÂR TÜRBİNİ MAALİYET VE ÜRETİM HESABI

Ortalama rüzgâr hızını ve ortalama güç yoğunluğunu hesaplamak için kullanılan denklemler:

$$V_{avg} = \Sigma_i(V_i r) \quad (3.16)$$

$$(V^3)_{avg} = \frac{\Sigma_i(V_i^3 h)}{\Sigma hours} = \Sigma_i(V_i^3 r) \quad (3.17)$$

$$\frac{P_{avg}}{A} = \frac{1}{2} \rho (V^3)_{avg} \quad (3.18)$$

$h=V_i$ hızında yıllık esme süresi

$r= V_i$ hızında esme oranı ($r=h/8760$)

V_{avg} = ortalama rüzgar hızı

P_{avg} = ortalama güç yoğunluğu

Basit geri ödeme süresi hesaplanırken kullanılan denklem (Çokyaşar ve Beji, 2019);

$$BGÖ = \frac{C}{SG} \quad (3.19)$$

C =Yatırım maliyeti

SG =Senelik net gelir

Basit birim enerji maliyeti (Çokyaşar ve Beji, 2019);

$$BBEM = \frac{\text{Toplam Maliyet}}{\text{Toplam Üretilen Enerji Miktarı}} = \frac{M_t}{P_t} = \frac{TL(\$,\text{€})}{kWh(MWh, Wh)} \quad (3.20)$$

$$\frac{M_t}{P_t} = \frac{\text{Türbin maliteyi} + \text{Temel, iletim hattı ve kurulum maliyeti} + \text{İşletme ve bakım maliyeti}}{\text{Toplam üretilen enerji miktarı}} \quad (3.21)$$

3.7.1. Rayleigh ve Weubill Dağılım Eğrileri

Ortalama hız değerleri bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin ön izlemesini verir. Rüzgâr gücü olasılık yoğunluk fonksiyonları elde edilebilecek enerjiyi belirlemek için gereklidir. Rüzgârın belirli bir süre içerisinde esmesi ve herhangi bir zamanda hızın gözlemlenme ihtimalini verir. Gerçek rüzgâr verisi dağılımına uygunlukları nedeniyle iki formda dağılım vardır: Rayleigh ve Weibull dağılımları.

Rayleigh, sık rüzgâr ölçümlerinin yapılmadığı ve basitleştirilmiş bir dağılımdır. Yalnızca ortalama rüzgâr hızı bilinmektedir. K parametresi yaklaşık 2 civarında olduğu için 2'ye eşittir. En gerçekçi çalışmalardır ve c parametresi bir ölçek parametresidir (Arıkan ve ark., 2015).

$f(V)$ =Olasılık yoğunluk fonksiyonu
 $k=2$ (Değer 2'ken Rayleigh dağılımı)

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (3.22)$$

Weibull Dağılımı en çok kullanılan ve en iyi sonuç dağılımını veren ve gerçek verilerle en çok uyum sağlayan dağılımdır. C parametresi rüzgârın estiği alanda ne kadar rüzgârlı olduğunu gösterir. C parametresi kullanılarak k parametreleri ile weibull rüzgâr dağılımı belirlenir (Kurban ve ark., 2007).

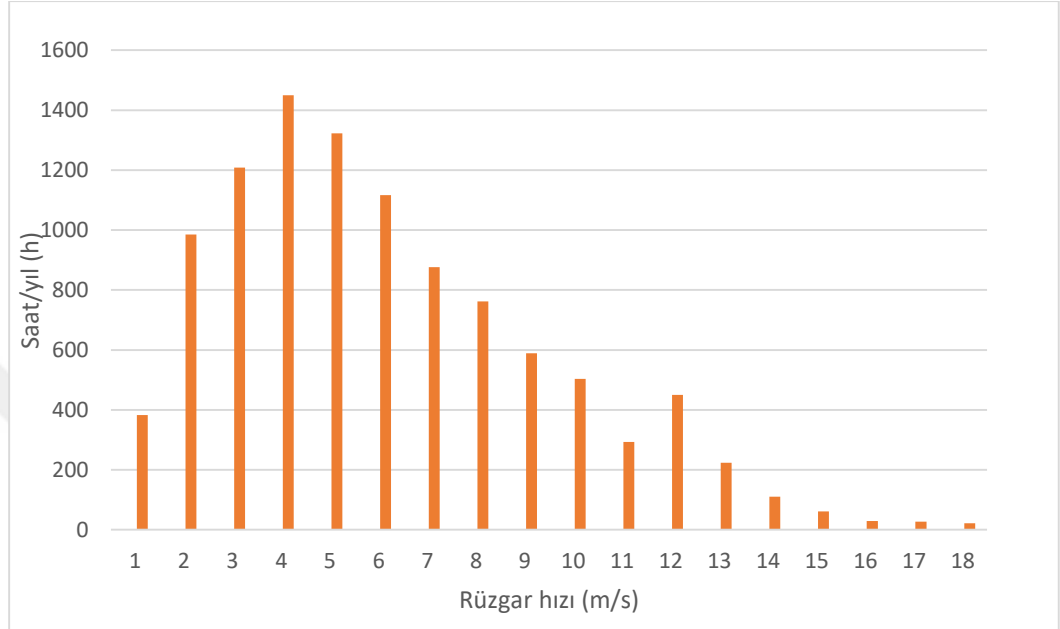
$f(V)$ =Olasılık yoğunluk fonksiyonu
 k ve c değişkendir

$$f(V) = \frac{2V}{c^2} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^2 \right] \quad (3.23)$$

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. RÜZGAR VERİLERİ

İlk olarak rüzgâr hızı-saat ve rüzgâr hızı-yüzdesinin iki histogram grafiğini elde ettik. Şekil 4.1’te veriler görülmektedir. Bozcaada rüzgâr verilerini kullanıyoruz. Grafiğin x ekseninde rüzgâr hızı (m/s) değerleri, y ekseninde yüzde saat (h) değerleri vardır.



Şekil 4.1.Bozcaada saat/yıllık, rüzgâr hızı değerleri histogram eğrisi (Bozcada, 2023)

4.1.1. Hesaplamalar

Ortalama rüzgâr hızını ve ortalama güç yoğunluğunu hesaplamak için kullanılan denklemler:

$$V_{avg} = \Sigma_i(V_i r) \quad (4.1)$$

$$(V^3)_{avg} = \frac{\Sigma_i(V_i^3 h)}{\Sigma hours} = \Sigma_i(V_i^3 r) \quad (4.2)$$

$$\frac{P_{avg}}{A} = \frac{1}{2} \rho (V^3)_{avg} \quad (4.3)$$

$h=V_i$ hızında yıllık esme süresi

$r= V_i$ hızında esme oranı ($r=h/8760$)

V_{avg} = ortalama rüzgar hızı

P_{avg} = ortalama güç yoğunluğu

Çizelge 4.1.Rüzgâr Hızı ve Saat Değerlerine Hesaplamalar

Rüzgar hızı (m/s)	Saat/yıl (h)	$h/8760$ (r)	$V_i \cdot r$	V_i^3	$V_i^3 \cdot r$
0	15	0,04372146	0	0	0
1	383	0,11244292	0,112443	1	0,112443
2	985	0,13789954	0,275799	8	1,103196
3	1208	0,16552511	0,496575	27	4,469178
4	1450	0,1510274	0,60411	64	9,665753
5	1323	0,12739726	0,636986	125	15,92466
6	1116	0,1	0,6	216	21,6
7	876	0,0869863	0,608904	343	29,8363
8	762	0,06723744	0,5379	512	34,42557
9	589	0,05742009	0,516781	729	41,85925
10	503	0,0344749	0,334475	1000	33,44749
11	293	0,05136986	0,565068	1331	68,37329
12	450	0,02557078	0,306849	1728	44,1863
13	224	0,01255708	0,163242	2197	27,5879
14	110	0,00696347	0,097489	2744	19,10776
15	61	0,0033105	0,049658	3375	11,17295
16	29	0,00308219	0,049315	4096	12,62466
17	27	0,00251142	0,042694	4913	12,33858
18	22	0,00045662	0,008219	5832	2,663014

4.1.2. Rüzgâr Sınıfı

Çizelge 4.1’de ortalama rüzgâr hızı değerinin 6,006507 m/s olarak hesapladık. Havanın yoğunluğunu 1.225 kg/m³ aldık. Buna göre aşağıdaki değerler elde edildi:

$$V(\text{ort}) = 6,006507 \text{ m/s}$$

$$P/A = 239,1802 \text{ W/m}^2$$

$$V^3(\text{ort}) = 390,4983 \text{ m/s}$$

Çizelge 4.2.Rüzgâr Sınıfı Teknik Verileri

FARKLI YÜKSEKLİKLER		10m Üstü		30m Üstü		50m Üstü	
#	Sınıfları	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
1	En düşük	0-4.4	0-100	0-5.1	0-160	0-5.4	0-200
2	Düşük	4.4-5.1	100-150	5.1-5.9	160-240	5.4-6.2	200-300
3	Orta	5.1-5.6	150-200	5.9-6.5	240-320	6.2-6.9	300-380
4	İyi	5.6-6.0	200-250	6.5-7	320-400	6.9-7.4	390-510
5	Yüksek	6.0-6.4	250-300	7-7.4	400-480	7.4-7.8	510-600
6			300-400		480-640		
7	Yüksek	>7.0	>400	8.2-11	1600	>8.6	>800

Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile rüzgâr sınıfını 4 numara (İyi) olarak bulduk, verilerimizin 10-30 metre arası kule yüksekliği için uygun olduğunu anlaşılmıştır.

Çizelge 4.3.Rüzgâr Enerjisi Yoğunluğu Sınıfları

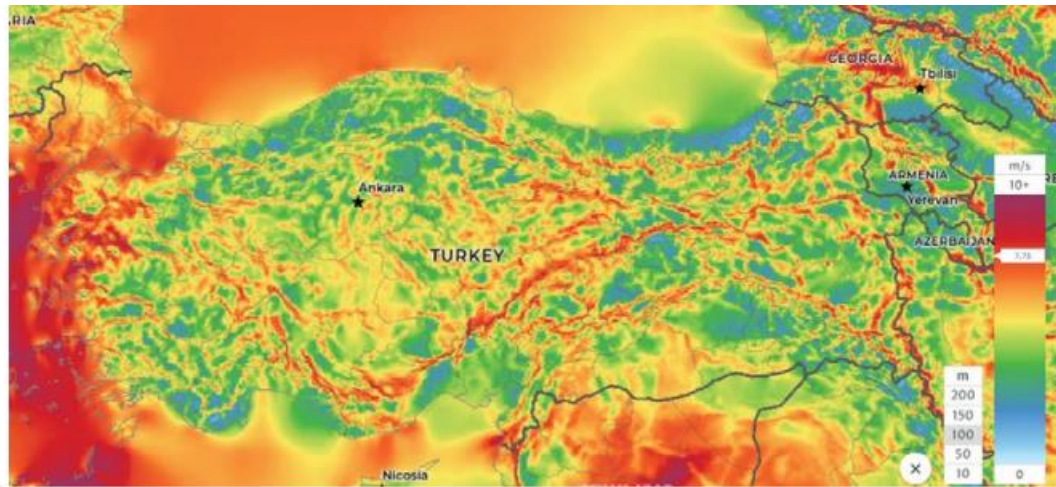
Rüzgâr Enerjisi Sınıfı	30 m (98 ft)		50 m (164 ft)	
	Rüzgâr Enerjisi Yoğunluğu (W/m ²)	Rüzgâr Hızı m/s (mph)	Rüzgâr Enerjisi Yoğunluğu (W/m ²)	Rüzgâr Hızı m/s (mph)
1	≤160	≤5.1 (11.4)	≤200	≤5.6(12.5)
2	≤240	≤5.9(13.2)	≤300	≤6.4(14.3)
3	<320	<6.5 (14.6)	<400	<7.0(15.7)
4	≤400	≤7.0(15.7)	≤500	≤7.5 (16.8)
5	≤480	≤7.4 (16.6)	≤600	≤8.0(17.9)
6	≤640	≤8.2(18.3)	≤800	≤8.8(19.7)
7	<1600	<11.0(24.7)	<2000	<11.9(26.6)

Ortalama rüzgâr hızı ve ortalama rüzgâr gücü verileri ile çizelge 4.2 ve çizelge 4.3’te rüzgâr sınıfı 4 olarak bulunmuştur. İki tablo sayesinde rüzgâr sınıfı sağlaması yapılmış ve 30 metre yükseklikte sınıfımız iyi olarak bulunmuştur.

4.1.3. Rüzgâr Türbini Konumu Seçimi

Şekil 4.2’de Danimarka Teknik Üniversitesinin oluşturduğu küresel rüzgâr atlası incelendiğinde 100 m yükseklik için Ege Bölgesi açıklarının ortalama 6-8 m/s rüzgâr hızına sahip olması ve verilerimizin bu değerlere uygunluğu ile bölgenin rüzgâr türbinin

kurulumu için uygun konum olduğunu göstermektedir (Yılmaz, 2021). Şekil 4.2’de küresel rüzgâr atlasında Türkiye ve kıyılarındaki rüzgâr hızları görülmektedir.



Şekil 4.2. Küresel Rüzgâr Atlası Türkiye ve Kıyılarındaki Rüzgâr Hızları
(100 m) (Yılmaz ve ark., 2021)

4.2. RAYLEIGH VE WEUBILL DAĞILIM EĞRİLERİ

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde, rüzgâr türbini parametrelerinin yanında, türbin kurulum alanındaki rüzgâr hız dağılımı da önemli rol oynamaktadır. Rüzgâr gücünden elde edilebilecek enerjiyi belirlemek için olasılık yoğunluk fonksiyonlarına ihtiyaç vardır. Rüzgâr enerjisi potansiyeli araştırmasında Rayleigh ve Weibull dağılımları kullanılmıştır.

4.2.1. Rayleigh Eğrisi

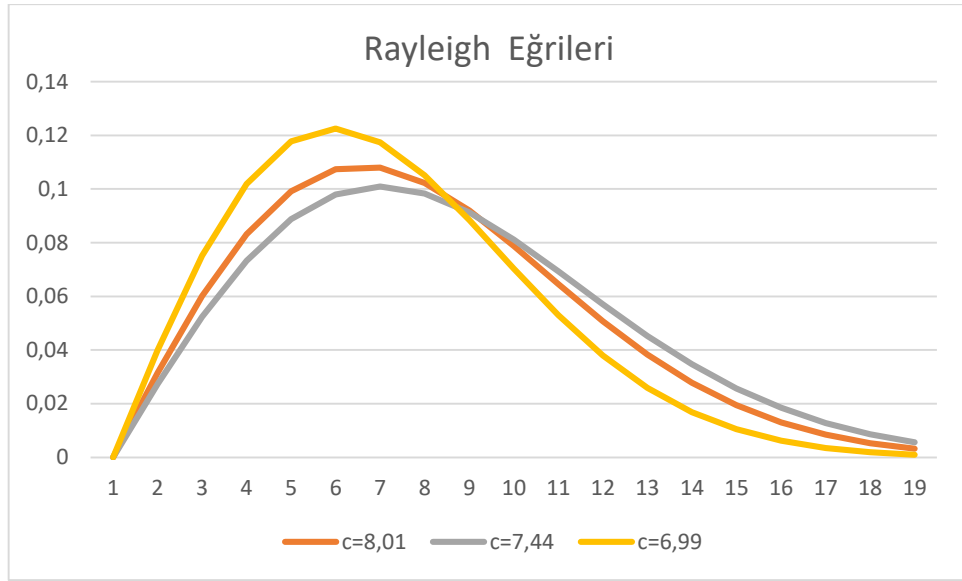
Bozcaada konumu için bulunan rüzgâr verilerine uygun olacak şekilde 3 farklı ölçek parametresi (c) kullanılmıştır. Bunlar:

c1=8,01

c2=7,44

c3=6,99

şeklinde dir. Bu değ erler ile çiz ilen rayleigh eğ rilerine ait grafikler elde edilmiştir. Elde edilen eğ riler histogram grafiğ i ile birlikte gösterilmiştir. Ayrıca saat ve yıllık üretim değ erleri de hesaplanmıştır.



Şekil 4.3.Farklı c Değerleri İçin Rayleigh Eğrileri ve Histogram Grafiği

Şekil 4.3'te bulunan c değerlerinden bizim rüzgâr hızı verilerimize göre en uygun olan değer $c_3(6,99)$ bulunmaktadır. Bu değerle çizelge 4.7'deki saatlik ve yıllık üretim değerleri elde edilmektedir.

Çizelge 4. 4'te c_3 değeri için saat ve yıllık üretim değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.4. c_3 Değeri İçin Saat ve Yıllık Üretim Değerleri

Rüzgâr hızı (m/s)	$2 \cdot V$	c^2	$f(v)$	$f(v)^2$	$f(v)^3$	Saat/yıl (h)	Yıllık üretim
0	0	62,41	0	0	0	383	0
1	2	62,41	0,031537	0,027301	0,03999178	985	276,262023
2	4	62,41	0,060113	0,052382	0,07523351	1208	526,592884
3	6	62,41	0,083228	0,073319	0,10190296	1450	729,075633
4	8	62,41	0,099196	0,088731	0,11778323	1323	868,960817
5	10	62,41	0,107344	0,097924	0,12252511	1116	940,332868
6	12	62,41	0,107997	0,100913	0,11746586	876	946,055919
7	14	62,41	0,102305	0,098345	0,10510841	762	896,189966
8	16	62,41	0,091941	0,091323	0,0884468	589	805,398915
9	18	62,41	0,07877	0,081198	0,07033331	503	690,025457
10	20	62,41	0,064551	0,069357	0,05302964	293	565,466252
11	22	62,41	0,050718	0,05705	0,03800013	450	444,289447
12	24	62,41	0,038274	0,045268	0,02592514	224	335,276965
13	26	62,41	0,027778	0,034696	0,01686182	110	243,331042
14	28	62,41	0,019409	0,025714	0,01046608	61	170,018597
15	30	62,41	0,013066	0,018442	0,00620463	29	114,460704
16	32	62,41	0,008481	0,012808	0,0035155	27	74,2958297
17	34	62,41	0,005311	0,008619	0,00190472	22	46,5216608
18	36	62,41	0,003209	0,005622	0,00098729	4	28,1140339

4.2.2. Weibull Eğrisi

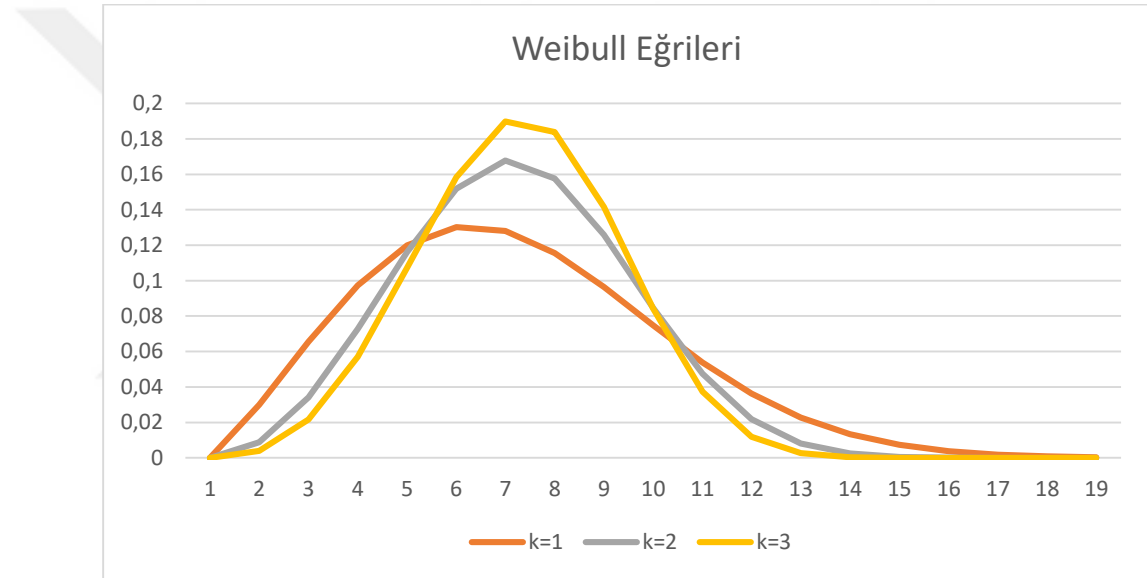
Bozcaada konumu için bulunan rüzgâr verilerine uygun olacak şekilde farklı ölçek parametresi (c) ve şekil parametreleri (k) kullanılmıştır. Bunlar:

$$c1=6,99 \quad k1=1$$

$$c2=6,99 \quad k2=2$$

$$c3=6,99 \quad k3=3$$

şeklindedir. Bu değerler ile çizilen weibull eğrilerine ait grafikler elde edilmiştir. Elde edilen eğriler histogram grafiği ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.4.Farklı k Değerleri İçin Weibull Eğrileri ve Histogram Grafiği

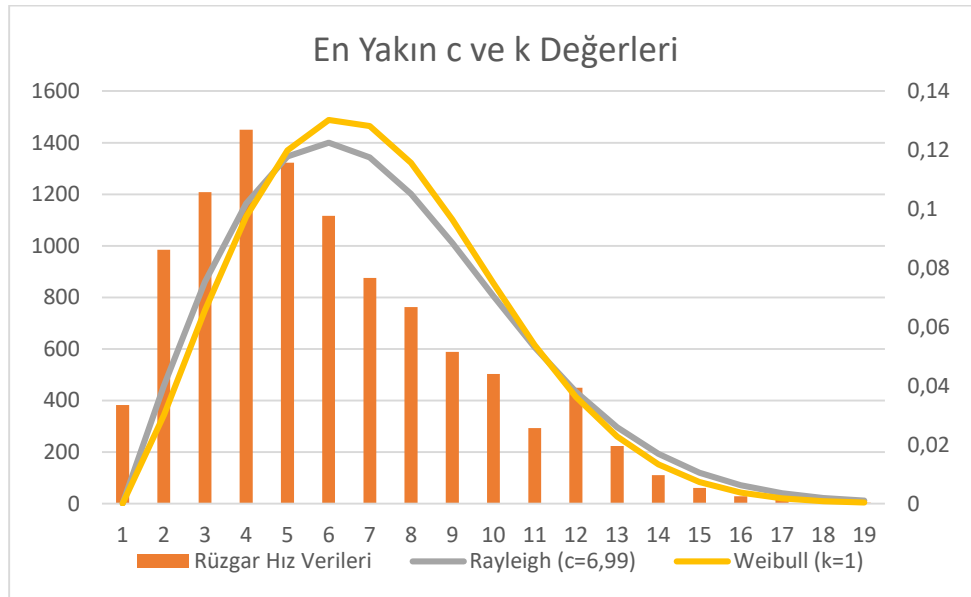
Şekil 4.4'te bulunan K değerlerinden bizim rüzgâr hızı verilerimize göre en uygun olan değer k1(6,99) bulunmaktadır. Bu değerle çizelge 4.5'teki saatlik ve yıllık üretim değerleri elde edilmektedir.

Çizelge 4.5. K1 Değeri İçin Saat ve Yıllık Üretim Değerleri

Rüzgâr hızı (m/s)	f(v)	f(v)2	f(v)3	Saat/yıl (h)	Yıllık üretim
0	0	0	0	383	0
1	0,030005525	0,00872089	0,003853	985	262,848395
2	0,065591524	0,03417888	0,021547	1208	574,581748
3	0,097368471	0,07275841	0,057102	1450	852,947802
4	0,119918014	0,11612148	0,107181	1323	1050,4818
5	0,130260445	0,15187859	0,158448	1116	1141,0815
6	0,128115591	0,16774055	0,189845	876	1122,29257
7	0,115619253	0,15766262	0,18394	762	1012,82466
8	0,096453988	0,12581453	0,141551	589	844,936937
9	0,074709511	0,08458203	0,08418	503	654,45532
10	0,053871213	0,04738735	0,0374	293	471,911825
11	0,036222161	0,02184476	0,011943	450	317,306129
12	0,022733033	0,00817066	0,002627	224	199,141371
13	0,013324442	0,00244315	0,00038	110	116,72211
14	0,007295704	0,00057508	3,45E-05	61	63,9103674
15	0,003732015	0,00010488	1,87E-06	29	32,6924525
16	0,001783398	1,4583E-05	5,7E-08	27	15,6225665
17	0,000795993	1,5208E-06	9,29E-10	22	6,97289941
18	0,000331759	1,1698E-07	7,64E-12	4	2,90620985

4.2.3. Rayleigh ve Weibull Eğrileri

En uygun c ve k değerleri bulunmuştur. Bu değerler c=6,99 ve k=1 olarak elde edilmiş ve en uygun histogram grafiği şekil 4.5'te oluşturulmuştur.

**Şekil 4.5. Rüzgâr hız verilerimiz için en uygun c ve k değerleri**

4.3. TÜRBİN SEÇİMİ

Trbın seçimi yapılırken teknik verileri tablo olarak karşılaştırılmıştır. Yıllık retim miktarları ve kapasite faktörleri hesaplanarak en uygun trbın tezimiz için seçilmiştir.

4.3.1. Teknik zellikler

2000 kW nominal gte 3 farklı rüzgâr türbini seçimi yapılmıştır.

Vestas V90	Gamesa G90/2000	Enercon E82/2300
		

şekil 4.6.Seçilen 3 Rüzgâr Türbini

şekil 4.6'daki rüzgâr trbınlerine ait teknik özellikler izelge 4.6'da gözükmektedir.

Çizelge 4.6.Seçilen Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Özellikleri

	Vestas V90	Gamesa G90/2000	Enercon E82/2300
Nominal Güç	2000 kW	2000 kW	2000 kW
Devreye Girme Rüzgâr Hızı	4 m/s	2,5 m/s	2 m/s
Devreden Çıkma Rüzgâr Hızı	25 m/s	25 m/s	25 m/s
Nominal Güce Ulaştığı Rüzgâr Hızı	13 m/s	12 m/s	14 m/s
Rüzgâr Bölgesi	-	-	III
Rüzgâr Sınıfı	-	-	IIa
Çap	90 m	90 m	82 m
Süpürme alanı	6,362 m ²	6,362 m ²	5281m ²
Kanat Sayısı	3	3	3
Güç Yoğunluğu 1	314,4 W/m ²	314,4 W/m ²	435,5 W/m ²
Güç Yoğunluğu 2	3,2 m ² /kW	3,2 m ² /kW	3,3 m ² /kW
Dişli Kutusu	Var	Var	Yok
Jeneratör Sayısı	1	1	1
Şebeke Frekansı	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Kule Yüksekliği	80/95/105 m	80/95/105 m	78/85/98/108/138 m

4.3.2. Yıllık Üretim Miktarları ve Kapasite Faktörleri

Aşağıdaki çizelge 4.7’de Vestas V90, Gamesa G90, Enercon E82 rüzgâr türbinleri için yıllık üretim miktarları Bozcada rüzgâr verilerine göre elde edilmiştir.

Çizelge 4.7.Yıllık Üretim Miktarları

Rüzgar hızı (m/s)	Saat/yıl (h)	Vestas V90 P(Kw)	Gamesa G90 P(kW)	Enercon E82 P(kW)	Vestas yıllık üretim miktarı	Gamesa yıllık üretim miktarı	Enercon yıllık üretim miktarı
0	70	0	0	0	0	0	0
1	170	0	0	0	0	0	0
2	376	0	0	0	0	0	0
3	460	0	27	25	0	12420	11500
4	560	93	77	82	52080	43120	45920
5	1130	211,3	170	174	238769	192100	196620
6	1252	390,9	312	321	489406,8	390624	401892
7	1180	601,1	545	532	709298	643100	627760
8	885	884,5	888	815	782782,5	785880	721275
9	770	1247,1	1249	1180	960267	961730	908600
10	660	1594,3	1600	1580	1052238	1056000	1042800
11	450	1861,2	1901	1890	837540	855450	850500
12	195	1993,3	2000	2100	388693,5	390000	409500
13	140	2007	2000	2240	280980	280000	313600
14	120	2007,3	2000	2300	240876	240000	276000
15	92	2007	2000	2300	184644	184000	211600
16	85	2006,7	2000	2300	170569,5	170000	195500
17	75	2007	2000	2300	150525	150000	172500
18	45	2007	2000	2300	90315	90000	103500

Çizelge 4.7’de elde edilen yıllık üretim miktarları ile kapasite faktörü tablo 4.8’de elde edilmiş ve uygun olan Vestas V90 tercih edilmiştir.

Çizelge 4.8.Kapasite Faktörleri

	Vestas V90	Gamesa G90	Enercon E82
Kapasite Faktörü	0,3821	0,3729	0,3272

4.4. TÜRBİN MALİYETİ

$BGÖ=(C/SG) \Rightarrow$ Burada C yatırım maliyeti (TL), SG ise senelik net gelirdir.

Yukarıdaki formüle göre Basit Geri Ödeme Süresini hesapladığımızda **3,93 yıl** yani 4 yıla yakın bir değer elde ettik.

Çizelge 4.9.Net Bugünkü Değer ve İç karlılık Oranı

Rüzgar hızı (m/s)	Net bugünkü değer	İç karlılık oranı
0	1060000	1060000
1	1009523,81	876177,8806
2	961451,2472	724233,659
3	915667,8544	598639,1627
4	872064,6233	494824,8989
5	830537,7365	409013,803
6	790988,3204	338083,818
7	753322,2099	279454,3048
8	717449,7238	230992,1515
9	683285,4512	190934,1639
10	650748,0488	157822,9161
11	619760,0464	130453,7247
12	590247,6633	107830,8189
13	562140,6317	89131,11163
14	535372,0302	73674,25329
15	509878,124	60897,8784
16	485598,2133	50337,14532
17	462474,4889	41607,82387
18	440451,8942	34392,31598

Çizelge 4.9'a göre net bugünkü değer ve iç karlılık oranını hesapladık. (İç karlılık oranı için i: 0.2098 bulunmuştur.)

Çizelge 4.10.Rüzgâr Türbini Maliyet ve Enerji Miktarı (30 NİSAN 1\$=32.38₺)

Ortalama birim enerji maliyeti	3273,2521\$
Yıllık ödeme	21912,4327\$
Yıllık işletme ve bakım masrafı	30883,2612\$
Yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı	6694392 kWh
Basit Birim Enerji Maliyeti	0,00701 \$/kWh

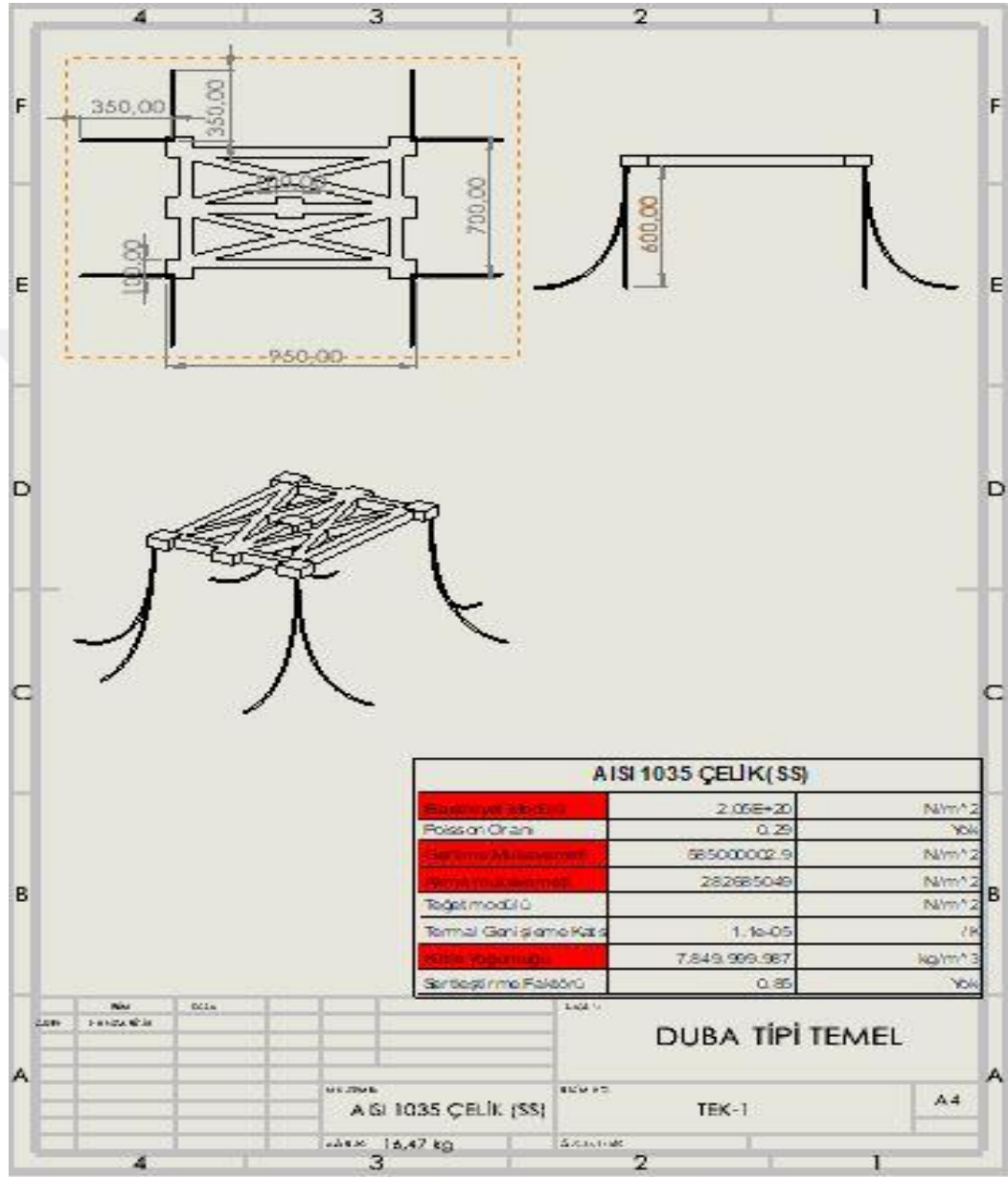
Vestas V90 rüzgâr türbini için ortalama birim enerji maliyeti, yıllık ödeme, yıllık işletme ve bakım masrafı, yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı, basit birim enerji maliyeti değerleri Çizelge 4.10’da elde edilmiş ve kurulacak rüzgâr türbinin uygun olduğu görülmüştür. Çizelge 4.10’da bulunan değerler analiz sonuçlarına göre türbin sayısı oranında hesaplanmalıdır.

4.5. RÜZGAR TÜRBİNİ PLATFORM TASARIMI

Solidworks programı ile duba tipi temel tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarım üzerine maksimum 5 adet rüzgâr tribünü montajı yapmaya imkân sağlamaktadır. 4 veya 5 adet rüzgâr tribünü montajı için platform üzerindeki en uygun konumlar belirlenmiştir. Türbin sayısının çokluğuna göre yıllık üretim miktarı, kapasite faktörü, üretilen elektrik enerjisi miktarı değişmekte olup tribün sayısının çok olması sayesinde daha fazla kar elde edilmektedir. Analiz sonuçlarında rüzgâr türbinin verimliliğine göre türbin sayısına karar verilecektir.

4.5.1. Duba Tipi Temel Yapısı Tasarımı

Temel yapısı için 950mm genişliğinde, 700mm uzunluğunda ve 50mm eninde ölçülerinde tasarım yapılmış ve malzeme olarak demir tercih edilmiştir. Temel'in 4 tarafında zemine stabilite hareketi sağlanabilmesi için palamar halat bağlantısı yapılmıştır.

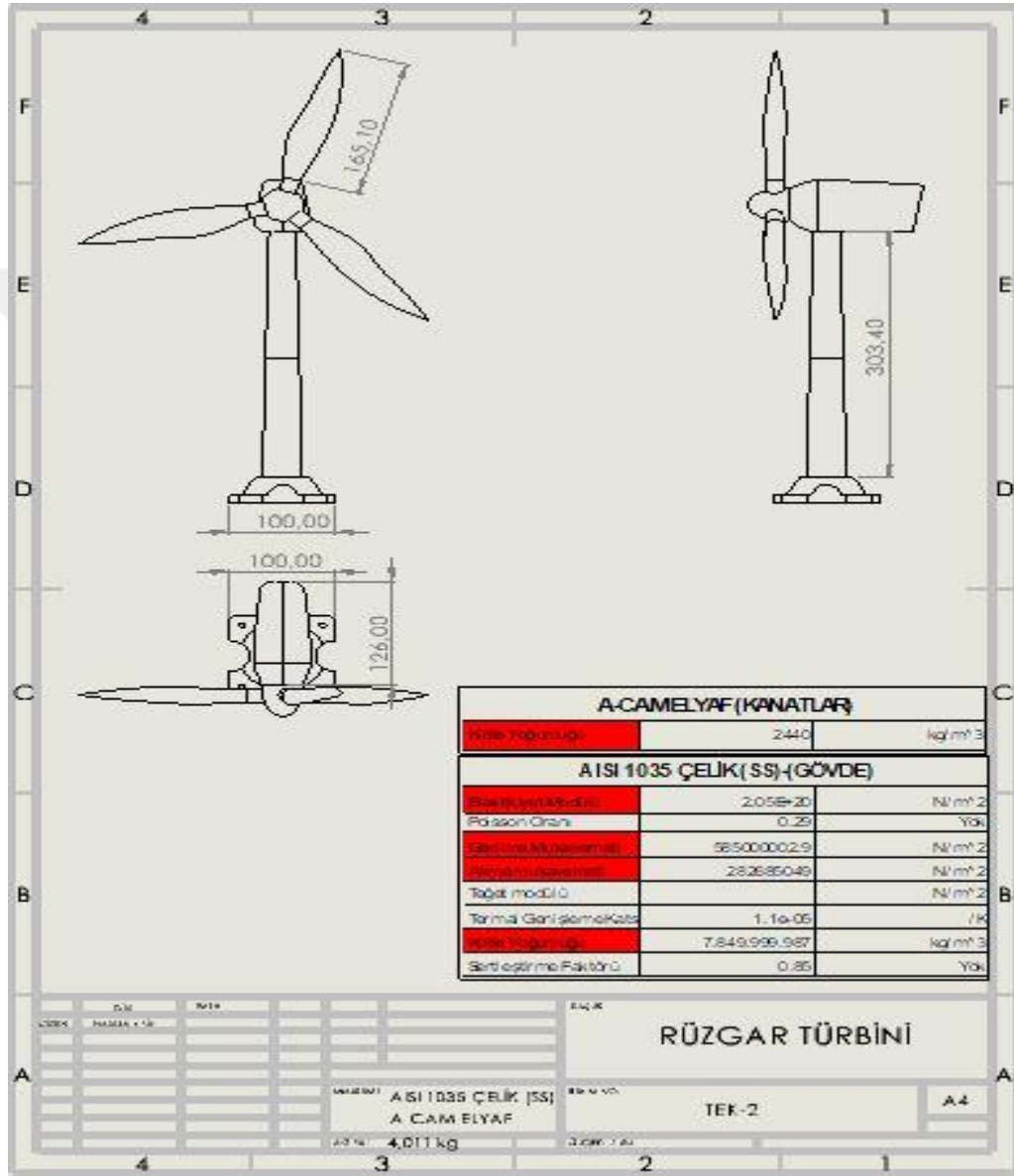


Şekil 4.7.Duba Tipi Temel Bilgileri

Şekil 4.7'de temel yapısı hakkında ve malzeme bilgisi hakkında bilgi verilmiştir. Malzeme seçiminde bizim için önemli olan kriterler elastisite modülü, kütle yoğunluğu, gerilme mukavemeti ve akma mukavemeti önemlidir. Temel yapısının rüzgâr türbini

yüklerine ve dalga kuvvetine karşı stabilite hareketini sağlamak için bu kriterler öneme sahiptir.

4.6. RÜZGÂR TÜRBİNİ TEKNİK BİLGİ



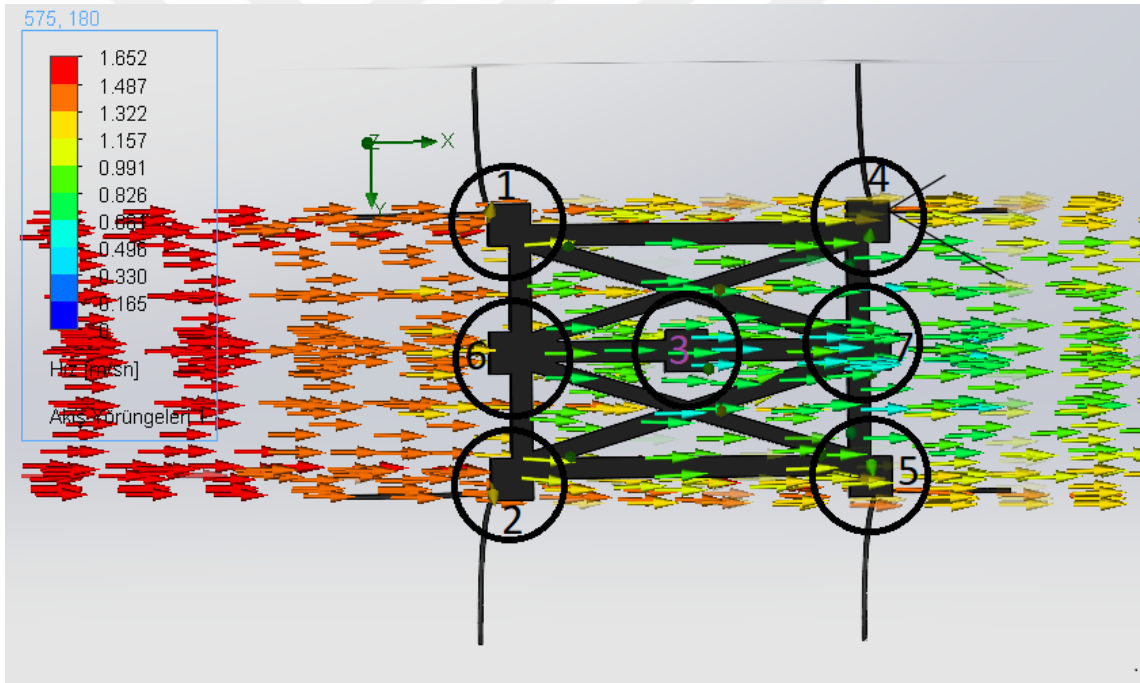
Şekil 4.8.Rüzgâr Türbini Bilgileri

Şekil 4.8'de rüzgâr türbini hakkında ve malzeme bilgisi hakkında bilgi verilmiştir. Rüzgâr türbini 303,4mm kule yüksekliği, 165,10mm kanat uzunluğu ölçülerinde tasarım yapılmış

ve malzeme olarak kanatlarda a-cam elyaf, gövde 1035 çelik tercih edilmiştir. Malzeme seçiminde bizim için önemli olan kriterler elastisite modülü, poisson oranı, kütle yoğunluğu, gerilme mukavemeti, akma mukavemeti, termal iletkenlik ve özgül ısı önemlidir. Bu kriterler rüzgâr türbinin yerleştirilmesi, bölge seçilmesi ve üretim miktarları için öneme sahiptir.

4.7. DUBA TİPİ TEMEL MESH VE AKIŞ ANALİZİ

Rüzgâr türbini montaj yerleri belirlenmesi için duba tipi temel üzerinde akış analiz analizi yapılmış ve temel üzerindeki rüzgâr türbini montaj edilebilecek 7 adet konum için rüzgâr hızı akış verileri elde edilmiştir. Bu konumlardan uygun olan veriler için montaj yeri seçimi yapılmıştır.



Şekil 4.9. Duba Tipi Temel Akış Analizi

Şekil 4.9’da X ve Y eksenlerinde akış hareketi verilerek dalga simülasyonu yapılması amaçlanmıştır. Rüzgâr akış hızı giriş verisi 1.652 m/sn için 1 numaralı konumda çok düşüş olmadığı görülmüştür. 2 numaralı konum için 1 numaralı konuma göre rüzgâr akış hızının çıkışta biraz daha düştüğü görülmüştür 3 numaralı konumda rüzgâr akış hızının 1 ve 2 numaralı konumlara göre daha düşük orta seviyelerde olduğu bulunmuştur. 4 ve 5

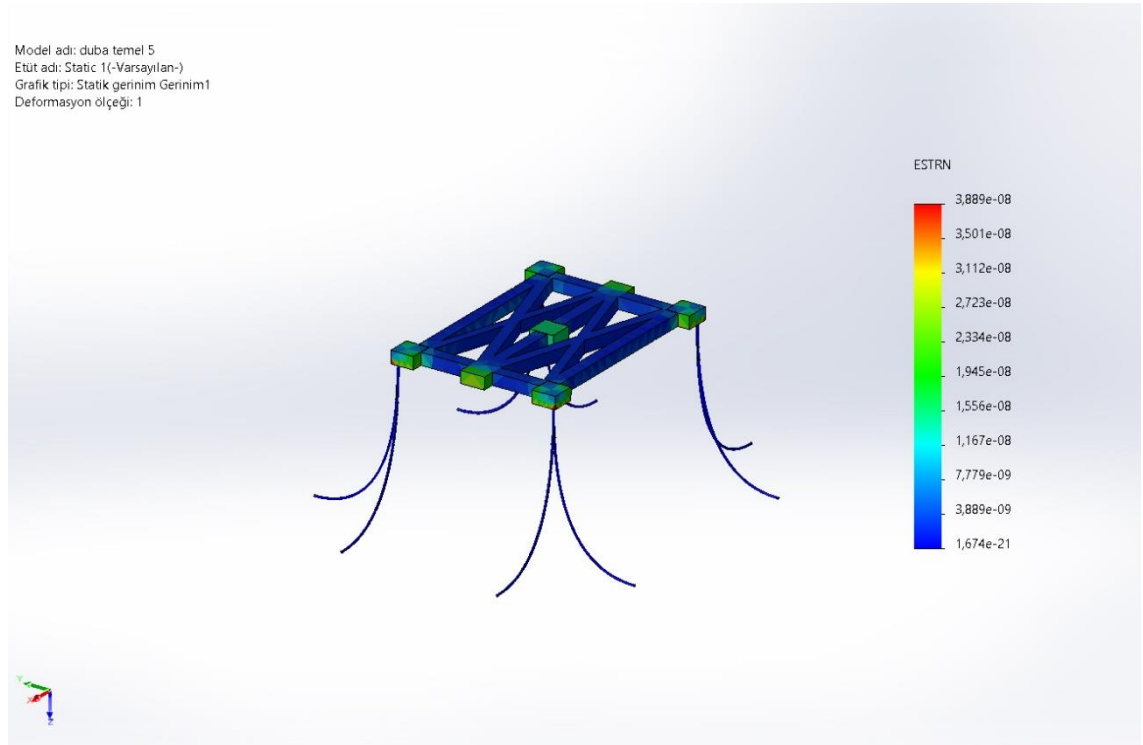
numaralı konumlarda 1 ve 2 numaralı konumlara göre rüzgâr hızının yavaşladığı görülmüştür. Rüzgâr türbinin montajı için 1,2,3,4 ve 5 numaralı konumlar tercih edilmiştir 3 numaralı konumun ön ve arka tarafındaki 6 ve 7 numaralı konumların montaj alanları rüzgâr türbinlerinin kanatlarının çarpıması, montaj ve bakım onarım zorluğu için tercih edilmemiştir.

Solidworks programı ile Duba Tipi Temel üzerine Vestas V90 rüzgâr türbini montaj edilerek tasarımı yapılmıştır.

4.8. DUBA TİPİ YÜZER PLATFORMUN SOLİDWORKS SİMÜLATION İLE ANALİZİ STATİK ANALİZİ

Montajı ve mesh işlemi tamamlanmış temel için simulation modülü ile statik gerinim, statik yer değiştirme ve von mises stresi değerleri elde edilmiştir. Montaj yapılmak istenen türbinlerin temel üzerindeki konumun uygunluğu kontrol edilmiştir.

4.8.1. Statik Gerinim

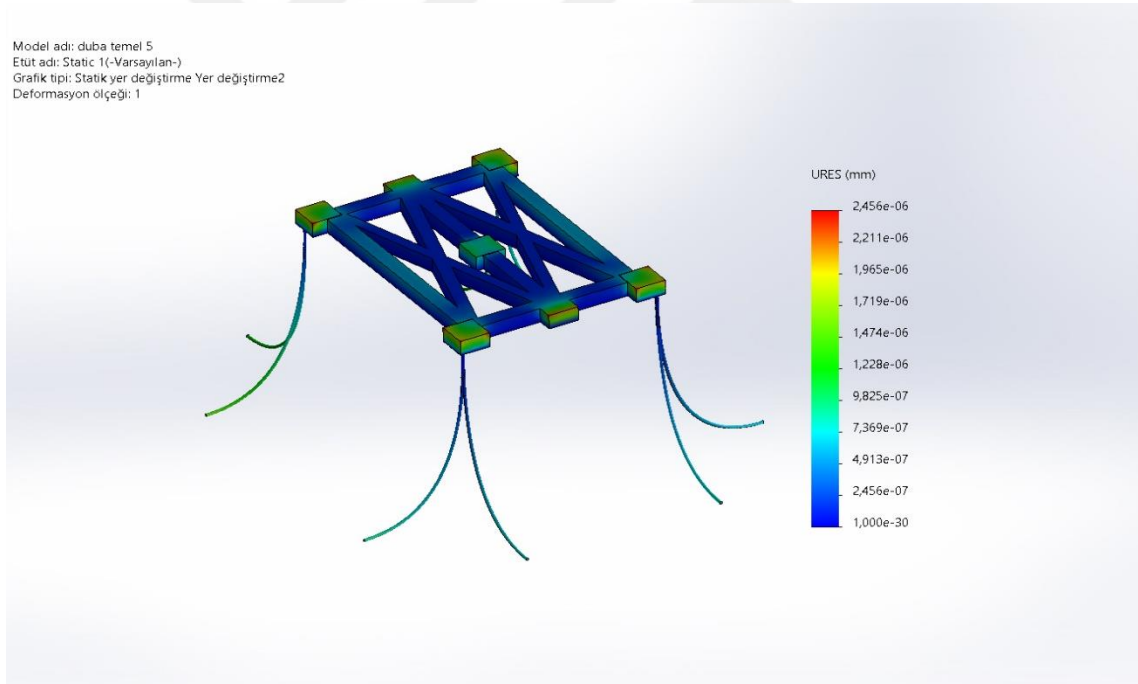


Şekil 4.10.Duba Tipi Temel Statik Gerinim

Şekil 4.11'de rüzgâr türbini montajına uygun 5 noktadan türbinlerin uyguladığı kuvvet, temelin kendi ağırlık kuvveti, akıntı yükü (29,42 N) ve dalga kuvveti (7 N) uygulanarak statik gerinim değeri temel üzerindeki belirli noktalar için elde edilmiştir. Duba tipi temelin köşe noktalarında statik gerinim kat sayısı yükselmektedir. Platformun halatla birleştiği nokta en kritik nokta olmaktadır. Temelin merkezi noktası en düşük statik gerinimi elde ettiğimiz nokta olmaktadır. Köşe noktalardaki rüzgâr türbinlerinin tek taraflı koyulması temelin dengesini bozabilmektedir.

4.8.2. Statik Yer Değiştirme

Rüzgâr türbinlerinde üretilen elektrik enerji miktarını belirleyen önemli kriterlerden birisi rüzgâr türbini kanatlarındaki hız verileri ve kanatlara temas eden rüzgâr miktarıdır. Rüzgâr türbinin kurulum konumu kanatlardaki hız için öneme sahiptir.

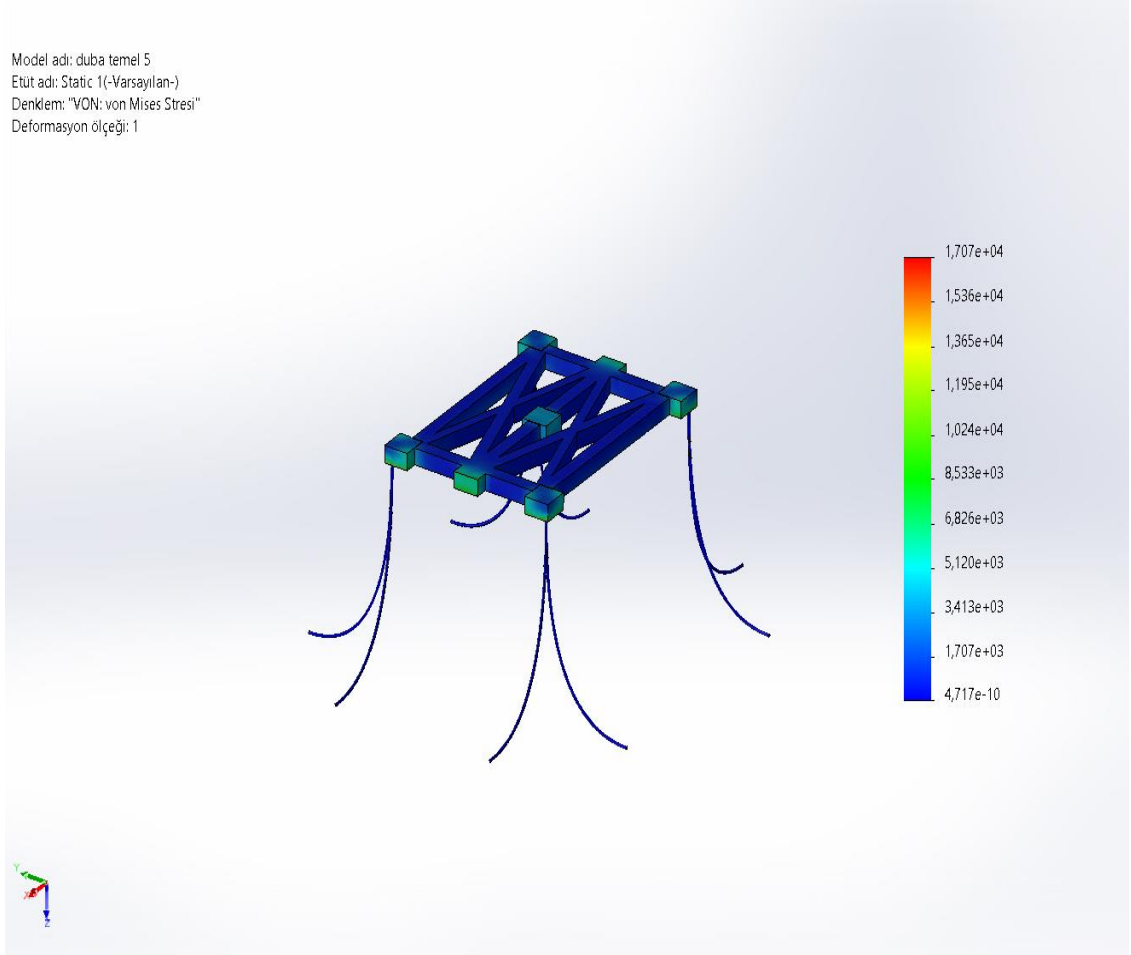


Şekil 4.11. Duba Tipi Temel Statik Yer Değiştirme

4.12'de rüzgâr türbini montajına uygun 5 noktadan türbinlerin uyguladığı kuvvet, temelin kendi ağırlık kuvveti, akıntı yükü (29,42 N) ve dalga kuvveti (7 N) uygulanarak statik yer değiştirme temel üzerindeki belirli noktalar için elde edilmiştir. Köşe noktalarda ve ara konumlarda rüzgâr türbinin dışa bakan köşelerinde statik yer değiştirme katsayısı kritik,

yüksek değerlere ulaşmaktadır. Merkezdeki montaj yeri için katsayı beklenen değerlerdedir.

4.8.3. Von Mises Stresi



Şekil 4.12. Duba Tipi Temel Von Mises Stresi

Şekil 4.13'te uygulanan kuvvetlere ve çevre şartlarına rağmen duba tipi temel büyük bir şekil değişimi gerçekleştirilmemiştir. Ara noktadaki konumlar için von mises stresi istenilen değerlerde elde edilmiştir. Türbinlerin montaj yerlerinin köşe ve orta noktalar için uygun olduğu anlaşılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

	5'Lİ RÜZGARTÜRBİNİ	4'Lİ RÜZGARTÜRBİNİ
Dalgalara duyarlılık	+	-
Denizde inşaat kolaylığı	-	+
Demir maaliyeti ve karmaşıklığı	+	-
Maksimum yan yatma açısı	+	-
Tasarım araçları ve yöntemleri	+	-
Türbinin toplam ağırlığını taşımak	-	+
Devreden çıkarma ve bakım	-	+
Kurulum kolaylığı ve maaliyeti	-	+
Yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı	+	-
Basit Geri Ödeme Süresi	+	-

Şekil 5. 1. Duba Tipi Temel Rüzgâr Türbini Sayısına ve Temel Yapısına Göre Karşılaştırma Tablosu

Şekil 5.1 'de duba tipi temel üzerine kurulmuş olan 5'li ve 4'lü rüzgâr türbinlerinin mukayese tablosu vardır. Karşılaştırma tablosu üzerindeki veriler analiz sonuçlarına göre elde edilmiştir. Her iki türbin tasarımı içinde dalgalara karşı duyarlılık temel üzerinde yükün artmasıyla artmıştır. 5'li rüzgâr türbininde dalgalara karşı duyarlılık temel yapısı ve üzerindeki yük sayesinde daha iyi elde edilmiştir. Denizde inşaat zorluğu rüzgâr türbini sayısının fazla olmasından dolayı 5'li rüzgâr türbininde daha zor olmaktadır ama geri ödeme ve üretilen enerji miktarının artmasından dolayı bu 5'li rüzgâr türbini platformu tercih edilebilir. 4'lü rüzgâr türbini tasarım temelinin orta noktasında rüzgâr türbini olmamasından dolayı dengeye almak zorlaşmaktadır. Bu durum da temeli dengeye almak için daha fazla katener çapa zinciri kullanılmaktadır, halat karmaşıklığı ve montaj zorluğu çıkmaktadır. Maksimum yan yatma açısı yük ve dengesinin daha iyi olduğu için 5'li rüzgâr türbininde daha avantajlıdır. Dengeye alınması kolay olduğu için 5'li rüzgâr türbinli temelde tasarım araçları ve yöntemleri daha avantajlı olmaktadır. 4'lü rüzgâr türbininde açı ve denge ayarları yapmak tasarım konusunda dezavantaj sağlamaktadır.

Seçilen malzeme türbin yapısına bağlı olarak türbinin toplam ağırlığını taşıma konusunda 4'l rüzgâr türbinini daha avantajlıdır. Elde ettiğimiz sonuçlara göre seçtiğimiz malzeme ve tasarım sayesinde 5'li rüzgâr türbinini taşıma konusunda herhangi bir sıkıntıyla karşılaşılmamaktadır. Devreden ıkarma ve bakım konusunda harcanan zaman ve eleman olarak 5'li rüzgâr türbinini dezavantajlıdır ama elde edilen verim konusunda bu dengeyi sağlamaktadır. 5'li rüzgâr türbinini benzer tasarım ve malzeme yapısındaki temel sayesinde 4'l rüzgâr türbininden ekonomik olarak temel kısmında benzer maliyetleri sağlamaktadır. Türbin sayısının fazla olması maliyeti artırmaktır. Bu konu içinde hesaplamalarımızdaki basit geri ödeme süresine bakılınca 5'li rüzgâr türbinin daha avantajlı olduğu anlaşılmaktadır. Rüzgâr türbinleri için elde ettiğimiz elektrik enerjisi üretim miktarlarını incelediğimizde türbin sayısının fazla ve analiz sonuçlarında konum olarak rüzgârdan daha fazla verim elde ettiği için 5'rüzgâr türbinini yıllık enerjisi üretim miktarı daha fazla olmaktadır. Kurulum ve maliyet olarak 4'l rüzgâr türbinini avantaja sahiptir ama basit geri ödeme süresi ve karlılık oranı hesaba katıldığı zaman 5'li rüzgâr türbinini tercih edilmektedir. Yaptığımız çalışmaya göre oluşturduğumuz ve yorumladığımız karşılaştırma tablosuna göre enerji verimliliği ve ekonomik kar için 5'li rüzgâr türbinin uygun olduğu görülmektedir.

5.1 ÖNERİLER

Yapılan çalışmaların incelenmesi ve elde edilen analiz sonuçlarına göre deniz üstü rüzgâr türbinleri uygulamaları için önemli olan verilere göre uygun yere kurulması ve elde edilen enerjinin türbin maliyetindeki kr zarar oranında dengeyi sağlamasıdır. Türbinler işletmeye alındıktan sonra bakım onarım faaliyetlerini kıyıya yakınlık açısından büyük bir öneme sahip olduğu anlaşılmıştır. Temel zerindeki türbinlerin artması sayesinde elde edilen enerji miktarının çoğaldığı anlaşılmıştır. Konum olarak türbinlerin yakın yerlere kurulmasının dalgalara karşı hassasiyeti sağladığı ve enerji taşıma işlemini dahada kolaylaştığı düşünülmektedir. Bundan sonraki yapılan çalışmalarda bu konulara dikkat edilmesi nerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Amani, S, (2022), Design of Monopiles for Offshore and Nearshore Wind Turbines in Seismically Liquefiable Soils: Methodology and Validation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 157(2022).
- [2]. Ahmed, M, (2022), “Applicability and Reliability of Finite Element Method in Monopile Offshore Wind Turbine Design”, *Civil engineering*, Karabük.
- [3]. Aktaş, K, (2020), “Wave Generation and Analysis in the Laboratory Wave Channel to Conduct Experiments on the Numerically Modeled Spar Type Floating Wind Turbine”, *Izmir Institute of Technology*, (Turkey).
- [4]. Alkan, S. (2013), “Bir Açık Deniz Rüzgar Türbini İçin Yüzer Platform Sistemi Tasarımı ve Demirleme Sisteminin Hidrodinamik Analizi”, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın.
- [5]. Aygen, U, (2019), “ Rüzgâr Türbini Kanatlarında Türbülator Kullanımının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Analizi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- [6]. Canoğlu, M, (2022), “Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Analizi”, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- [7]. Canpolat, Ş, (2013), “Rüzgar Enerjisi ve Isparta Şartlarında Prototip Bir Rüzgar Türbini Tasarımı”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- [8]. Gedik, O, (2018), “Sonlu Elemanlar Yöntemi ile 1.2 Mw’lık Rüzgâr Türbini Kanadının Aerodinamik ve Malzeme Optimizasyon”, *Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usuller Programı*, İstanbul.
- [9]. Huvaj, N, Caceoğlu, E, & Baidol, Y, (2019), Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri: Temel Tipi Seçimi ve Deniz Tabanı Zemin Araştırmaları, 5. *İzmir Rüzgâr Sempozyumu*, 197-210.

- [10]. Keçici, T, Özer, İ, (2022), Dünya Çapında Offshore Rüzgar Türbinleri ve Yeniden Tasarlanmış Bir Offshore Rüzgar Türbini, *Aintelia Science Notes*.
- [11]. Keleş, D, ve ark., (2013), Bir Rüzgar Türbini Tasarımı ve Geliştirilmesi, *Sakarya University Journal of Science*, 17(2), 207-216.
- [12]. Kurban, M, Kantar, D, & Hoccoğlu, F, (2007), Weibull Dağılımı Kullanılarak Rüzgar Hız ve Güç Yöğunluklarının İstatistiksel Analizi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 205-218.
- [13]. Kutlu, Y, (2011), “Deniz Üstü Rüzgar Türbini Temel Tasarımı ve Türkiye’de Kazıklı Bir Uygulaması”, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [14]. Otlu, O, (2012), “Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santrallerinin Teknik ve Ekonomik Analizi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [15]. Shaha, K, ve ark., (2021), Platform Motion Minimization Using Model Predictive Control of a Floating Offshore Wind Turbin, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 11 (100295).
- [16]. Şentürk, A, ve Oğuz, E, (2020), Karasal ve Deniz Üstü Rüzgâr Çiftliklerinin Ekonomik Ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi, *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 28(217), 5-32.
- [17]. Tran, T, ve Lee, D, (2022), Development of Jacket Substructure Systems Supporting 3mw Offshore Wind Turbine for Deep Water Sites in South Korea, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14.
- [18]. Tortumluoğlu, M, ve Doğan, M, (2021), Açık Deniz Rüzgar Türbinleri İçin Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 25-41.
- [19]. Tosun, O, (2017), “Bilgisayar Destekli 1 Kw’lık Rüzgâr Türbini Tasarımı ve Prototip Üretimi”, *İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- [20]. Tüysüz, F, (2019), “Kocaeli/Darica Bölgesinin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi ve Bölge İçin Seçilen Bir Rüzgar Türbininin Ekonomik Analizi”, *Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- [21]. Yanya, M, (2020), “Spar Tipi Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbini (S-Fowt) Modellenmesi ve Verimlerinin Cfd Ortamında Karşılaştırmalı Analizi”, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- [22]. Yılmaz, M, Tortumluoğlu, M, & Doğan, M, (2021), Açık Deniz Rüzgâr Türbini Tasarımı İçin Bir Yaklaşım ve Ülkemiz Bozcaada Sahillerinde Örnek Uygulaması, *İzmir Rüzgâr Sempozyumu*.
- [23]. Elibüyük, U, ve Üçgöl, İ, (2014), Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Yekarum e-Dergi*, 2(3): 1-14.
- [24]. Tümerdem, O, (2002), Rüzgâr Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye’nin Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli. “Yüksek Lisans Tezi.” *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [25]. Şahin, M, ve Yavrucuk, İ, (2017), Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Kısmi ve Tam Yük Bölgeleri için Kontrolcü Tasarımı. *Yeksem*, 12.
- [26]. Nurbay, N, ve Çınar, A, (2005), Rüzgâr türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılması, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, S: 19-21.
- [27]. Karadağ, İ, (2009), Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgâr Enerjisinin Önemi ve Rüzgâr Türbini Tasarımı, “Yüksek Lisans Tezi.” *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [28]. Uysal, A, (2008), Rüzgâr Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. “Yüksek Lisans Tezi.” *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [29]. Durak, M, ve Özer, S, (2008), Rüzgar enerjisi teori ve uygulama, *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği*.

- [30]. Karimirad, M, ve Moan, T, (2011), Extreme dynamic structural response analysis of catenary moored spar wind turbine in harsh environmental conditions, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
- [31]. Arıkan, Y., Arslan, O. P. ve Çam, E., 2015, The analysis of wind data with rayleigh distribution and optimum turbine and cost analysis in Elmadag, Turkey, *Istanbul University-Journal of Electrical and Electronics Engineering*.
- [32]. Bozcada, 2023, Denizlerimizde Rüzgar Durumu, <https://www.mgm.gov.tr/>, <https://www.havaforum.com/denizlerimizde-ruzgar-durumu>.
- [33]. Buljac, A., Kozmar, H., Yang, W. ve Kareem, A., 2022, Concurrent wind, wave and current loads on a monopile supported offshore wind turbine, *Engineering structures*, 255, 113950.
- [34]. Hong, S., Zhang, H., Skjerve, T. ve Henning, K., 2022, Effect of fender system on the dynamic response of onsite installation of floating offshore wind turbines, *Ocean Engineering*, 259.
- [35]. Üzümlü, K., 2015, Yeni nesil teknoloji kullanarak küçük güçlü rüzgar türbini tasarımı ve bilgisayar destekli analizi, *Balıkesir Üniversitesi*.
- [36]. Gülsoy, Y., 2018, Kanal içerisinde rüzgar türbini tasarımı ve had analizi ile kanal profilinin türbin performansına etkilerinin incelenmesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*.
- [37]. Erol, S., 2020, Scaled down modelling of a horizontal wind turbine for a floating wind turbine research, *Izmir Institute of Technology (Turkey)*.
- [38]. Can, s., 2020, Rüzgar Türbinleri Kullanılarak Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarının Zaman Serileri İle Analizi Ve Uygulaması, *İskenderun Teknik Üniversitesi*.
- [39]. Taner, A. C., 2014, İngiltere Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) Kökenli Açık Deniz (Offshore) ve Kıyılara Yakın Kara Rüzgâr Elektrik Santrali (RES) Çiftlikleri (Onshore Wind Farms) Güç Üretimleri Profili, *FMO Yayınları*.
- [40]. Kütükcü, G. ve Yahılı, M., 2022, Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santrali Projelerinde Ülke Uygulamalarının İncelenmesi ve Türkiye İçin Öneriler, *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 4 (1), 1-21.

- [41]. Kocatürk, A. S. ve Ünsan, Y., 2015, Rüzgâr Enerji Santrallerinin Tarihsel Gelişimi Ve Açık Deniz Rüzgâr Enerji Santrallerinin Tipleri, *GİDB Dergi* (02), 3-16.
- [42]. Akdağ, C. T., 2019, Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Türbinleri Grup Kazıklı Jacket Temel Sistemi Yük Taşıma Kapasitesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21 (62), 345-355.
- [43]. Çiğdem, D., Emre, Y., Sena, S. ve Zümray, Ş., 2021, Deniz Üstü (Off-Shore) Rüzgâr Santralleri Bilgilendirme Notu, *TSKB*.
- [44]. Çokyaşar, E. ve Beji, S., 2019, Açık Deniz Rüzgâr Çiftliklerinin Mali Açıdan İncelenmesi, *Gemi ve Deniz Teknolojisi* (216), 6-16.
- [45]. Dong, J. ve Viré, A., 2022, The aerodynamics of floating offshore wind turbines in different working states during surge motion, *Renewable Energy*, 195, 1125-1136.