BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

DENİZ ÜSTÜ (OFFSHORE) RÜZGAR ENERJİSİ KAPASİTESİNİN ARAŞTIRILMASI VE SEÇİLECEK BÖLGE(LER) İLE BİRLİKTE MONOPİLE TEMELİNE SAHİP OLAN RÜZGAR TÜRBİNİNİN, ETKİ ETMESİ BEKLENEN YÜKLERE GÖRE OPTİMİZE EDİLMESİ

HAZIRLAYAN

ERÇİN TELATAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA- 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

DENİZ ÜSTÜ (OFFSHORE) RÜZGAR ENERJİSİ KAPASİTESİNİN ARAŞTIRILMASI VE SEÇİLECEK BÖLGE(LER) İLE BİRLİKTE MONOPİLE TEMELİNE SAHİP OLAN RÜZGAR TÜRBİNİNİN, ETKİ ETMESİ BEKLENEN YÜKLERE GÖRE OPTİMİZE EDİLMESİ

HAZIRLAYAN

ERÇİN TELATAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ EROL ÇUBUKÇU

ANKARA- 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Erçin TELATAR tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 21/08/2025

Tez Adı: Deniz Üstü (offshore) Rüzgar Enerjisi Kapasitesinin Araştırılması ve Seçilecek Bölge(ler) ile Birlikte Monopile Temeline Sahip Olan Rüzgar Türbininin, Etki Etmesi Beklenen Yüklere Göre Optimize Edilmesi.

Tez Jüri Üyeleri		**İmza**
Dr. Öğr. Üyesi Erol ÇUBUKÇU	Başkent Üniversitesi	.....
Doç. Dr. Özgür EROL	Başkent Üniversitesi	.....
Prof. Dr. Cemil KOCAR	Hacettepe Üniversitesi	.....

ONAY

Prof. Dr. Dilek ÇÖKELİLER SERDAROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: … / … / ……..

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORİJİNALLİK RAPORU

Tarih: 28 / 08 / 2025

Öğrencinin Adı, Soyadı : Erçin Telatar

Öğrencinin Numarası : 22310131

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Dr. Öğr. Üyesi Erol Çubukçu

Tez Başlığı : Deniz Üstü (Offshore) Rüzgar Enerjisi Kapasitesinin Araştırılması ve Seçilecek Bölge(ler) ile Birlikte Monopile Temeline Sahip Olan Rüzgar Türbininin, Etki Etmesi Beklenen Yüklere Göre Optimize Edilmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 80 sayfalık kısmına ilişkin, 28/ 08/ 2025 tarihinde tez danışmanım tarafından **turnitin** adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 7'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

"Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını" inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:…….

ONAY

Tarih: 28/08/2025

Öğrenci Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Erol Çubukçu

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tüm aşamalarında gösterdiği yakın ilgi ve değerli bilgileriyle yaptığı katkı için tez danışmanım Sayın hocam Dr. Erol ÇUBUKÇU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışma sürecinde destek olan sevgili annem ve babama, tüm öğrenim yaşamım boyunca gösterdikleri anlayış, ilgi ve destek için teşekkür ederim.

ÖZET

Erçin TELATAR

DENİZ ÜSTÜ (OFFSHORE) RÜZGAR ENERJİSİ KAPASİTESİNİN ARAŞTIRILMASI VE SEÇİLECEK BÖLGE(LER) İLE BİRLİKTE MONOPİLE TEMELİNE SAHİP OLAN RÜZGAR TÜRBİNİNİN, ETKİ ETMESİ BEKLENEN YÜKLERE GÖRE OPTİMİZE EDİLMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2025

Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda, rüzgar enerjisi hem sürdürülebilirliği hem de ekonomik potansiyeli açısından önemli bir enerji kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de deniz üstü rüzgar santrali kurulması planlanan bölgelerden biri olan Bandırma bölgesinde bir yıl boyunca elde edilen rüzgar verileri analiz edilmiştir. Rüzgar hızlarının olasılık dağılımını modellemek amacıyla Weibull dağılımı kullanılmış, dağılım parametreleri En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY) ile tahmin edilmiştir.

Elde edilen kümülatif dağılım fonksiyonu sayesinde, rüzgar türbininin elektrik üretimine başlayabileceği (cut-in) ve durabileceği (cut-out) rüzgar hızlarına ilişkin olasılıklar hesaplanmıştır. Buna göre, bölgede %70 olasılıkla türbinin çalışabileceği uygun rüzgar koşullarının sağlanacağı, %30 olasılıkla ise düşük rüzgar hızları nedeniyle üretimin durabileceği öngörülmüştür.

Bunun yanı sıra, deniz üstü rüzgar türbininin temeline etki eden dalga kuvvetlerinin belirlenmesi amacıyla Morison denklemi kullanılmış ve çeşitli dalga boyları ile temel çaplarına göre kuvvet analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler, 'ASHES' programı kullanılarak yapılan sayısal simülasyonlarda değerlendirilmiş; rüzgar ve dalga etkilerinin türbin yapısına olan etkileri hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçları, rüzgar ve dalga şiddeti arttıkça türbine etki eden kuvvetlerin belirgin şekilde yükseldiğini göstermiştir.

Sonuç olarak, Bandırma bölgesi özelinde elde edilen verilere dayalı analizler ve bölgede deniz üstü rüzgar türbininin kurulabilme ihtimaline yönelik teknik ve ekonomik veriler

sunulmaktadır. Elde edilen bulgular, ileride yapılacak detaylı fizibilite ve yapısal tasarım çalışmalarına temel teşkil edebilecek niteliktedir.

ANAHTAR KELİMELER: deniz üstü rüzgar türbini, Weibull dağılımı, Morison denklemi,

ABSTRACT

Erçin TELATAR

INVESTIGATION OF OFFSHORE WIND ENERGY CAPACITY AND OPTIMIZATION OF A WIND TURBINE WITH A MONOPILE FOUNDATION BASED ON EXPECTED LOADS IN THE SELECTED REGION(S)

Başkent University Institute of Science

Department of Mechanical Engineering

2025

The global demand for renewable energy sources has been increasing day by day. In this context, wind energy stands out as a significant energy source due to its sustainability and economic potential. In this study, wind data collected over the course of one year from the Bandırma region, one of the planned offshore wind farm sites in Turkey, was analyzed. In order to model the probability distribution of wind speeds, the Weibull distribution was employed, and its parameters were estimated using the Least Squares Method (LSM).

Using the obtained cumulative distribution function, the probabilities of wind speeds reaching the operational thresholds of a wind turbine — namely the cut-in and cut-out speeds — were calculated. The analysis indicates that the turbine is expected to operate under favorable wind conditions 70% of the time, while 30% of the time it may stop due to insufficient wind speeds.

Additionally, to determine the wave forces acting on the offshore wind turbine foundation, the Morison equation was applied. Force analyses were conducted for various wave heights and foundation diameters. The obtained data were evaluated through numerical simulations using the 'ASHES' software, where the effects of wind and wave loads on the turbine structure were assessed. The simulation results clearly show that as wind and wave intensity increase, the forces acting on the turbine structure significantly rise.

As a result, the analyses based on the data specific to the Bandırma region provide both technical and economic insights into the feasibility of installing an offshore wind turbine in the area. The findings serve as a solid foundation for future feasibility studies and structural design processes.

KEYWORDS: offshore wind farm, Weibull distribution, Morison equation

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR i
ÖZET iii
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vi
TABLOLAR LİSTESİ viii
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ xi
1. GİRİŞ 1
1.1.Tez Konusu ve Amacı 2
2. GENEL BİLGİLER 4
2.1. Rüzgar Enerjisi 4
2.1.1. Tarihsel gelişim 4
2.1.2. Rüzgar enerjisinin sınıflandırılması 8
2.1.3. Rüzgar enerjisinin kullanım alanları 10
2.2. Sürdürülebilir Kalkınmanın Enerji Kaynakları 10
2.2.1. İklim değişikliğine karşı rüzgar enerjisi 11
2.2.2. Sürdürülebilir kalkınma 11
3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAPASİTESİ 13
3.1. Dünyada Yenilenebilir Enerji Kapasitesi 13
3.1.1. Dünyada rüzgar enerjisi 15
3.2. Türkiye'de yenilenebilir enerji kapasitesi 20
3.2.1. Türkiye'de elektrik enerjisi üretim ve tüketimi 21
3.2.2. Türkiye'de yenilenebilir enerji 22
3.2.3. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi 24
3.2.4. Türkiye'de Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi 26
4. RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMİ 28
4.1. Rüzgar Türbini 28
4.1.1. Rüzgar Türbini Parçaları 28
4.1.2. Rüzgar Türbinlerinin Gelişimi 29
4.2. Rüzgar Türbini Tipleri 32
4.2.1. Rotor Mil Eksenine Göre Rüzgar Türbinleri 32
4.2.2. Rüzgarın Gelişine Göre Rüzgar Türbinleri 34
4.3. Deniz Üstü-Kara Rüzgar Santralleri Karşılaştırması 35

4.4. Deniz Üstü (Offshore) Rüzgar Türbini Tipleri 37
4.4.1. Tekil Kazıklı (Monopile) Deniz Üstü Rüzgar Türbini 38
4.5. Türkiye'de Deniz Üstü Rüzgar Santrali: Yer Seçimi 41
4.5.1. Sınırlamalar 41
5. TÜRKİYE İÇİN DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNİ OPTİMİZASYONU 45
5.1. Rüzgar Türbini Çalışma Prensipleri 45
5.1.1. Deniz Üstü (Offshore) Rüzgar Türbini 47
5.1.2. Rüzgar Türbini: Etki Eden Kuvvetler 47
5.2. Literatür Taraması 49
5.3. Türkiye İçin Deniz Üstü Rüzgar Türbini Simülasyon Çalışması 53
5.3.1. Simülasyon İçin Veri Toplama Süreci 53
5.3.2. Optimize Edilecek Örnek Türbin Seçimi 55
5.3.3. Simülasyonlar 58
5.3.4. Türbin temeline etki eden kuvvetler 59
5.3.5. Model Tahmini ve Analiz 64
5.3.6. Etki eden kuvvetlerin belirlenmesi: Simülasyon analizi 67
5.3.7. Temel boyutunun dayanıklılıkla ilişkisi 70
6. SONUÇ 74
KAYNAKLAR 76
EKLER
EK 1: Farklı Senaryolarda Rüzgar Kuvveti ve Moment Hesabı

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Enerji kullanımının tarihçesi……..….....…5

Tablo 3.1. Dünyada yenilenebilir enerji kapasitesi: 2024 yılı verileri…….....13

Tablo 3.2. Dünyada bölgesel yenilenebilir enerji kapasitesi: 2024 yılı verileri.....14

Tablo 3.3. Türkiye'de kurulu güç ve üretim kapasitesi miktarı (2023 sonu itibariyle).....23

Tablo 3.4. Marmara bölgesindeki illere göre elektrik kurulu gücü, tüketimi……27

Tablo 5.1. Farklı senaryolarda temele etki eden toplam kuvvetler…….....…71

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Deniz üstü rüzgar enerjisi gelişiminde önemli bazı tarihsel olaylar……6

Şekil 2.2. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması……..9

Şekil 2.3. 2000-2023 yılları arasında dünyada rüzgar ve güneş enerjisi üretimi…....…11

Şekil 3.1. 2024 Yılı Enerji Kaynaklarına Göre Yenilenebilir Enerji Kapasitesi…..……13

Şekil 3.2. Deniz üstü rüzgar çiftliği örneği…….……...….……15

Şekil 3.3. Dünyada kara ve deniz üstü rüzgar kaynaklı elektrik enerjisi kapasitesi..…..16

Şekil 3.4. Dünya ve Avrupa rüzgar enerjisi üretimi GW…….……17

Şekil 3.5. Dünya ve Avrupa deniz üstü rüzgar enerjisi GW…….……18

Şekil 3.6. Horn Sea projesi bölgeleri, Horn Sea 3 deniz üstü rüzgar çiftliği…..…….20

Şekil 3.7. Türkiye'de net elektrik tüketimi GWh…….……21

Şekil 3.8. Türkiye'de elektrik santralleri kurulu gücü MW……..…22

Şekil 3.9. Türkiye'de 2000-2024 arasında toplam enerji üretimi içinde yenilenebilir enerjinin oranı……..……...22

Şekil 3.10. Türkiye'de 2000 yılı enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi……..…..24

Şekil 3.11. Türkiye'de 2023 yılı enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi……..…..24

Şekil 3.12. Türkiye'de rüzgar enerjisi GW……..……...25

Şekil 4.1. Rüzgar enerjisi sistemi…….……28

Şekil 4.2. Tvindkraft türbini…….……30

Şekil 4.3. Rüzgar türbini ölçekleri…….……..31

Şekil 4.4. Rüzgar türbini gelişimi…….....……32

Şekil 4.5. Deniz üstü yatay eksenli rüzgar türbinleri……...……33

Şekil 4.6. Dikey eksenli rüzgar türbini ana parçaları…….…..….34

Şekil 4.7. (a) Rüzgarı önden alan türbin, (b) Rüzgarı arkadan alan türbin……..……35

Şekil 4.8. Rüzgar türbini temel türleri……..……....38

Şekil 4.9. Resmi Gazete 'de yayınlanmış deniz üstü RES kurulum alanları……....42

Şekil 4.10. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli……..……..43

Şekil 4.11. Marmara bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli……..……..43

Şekil 5.1. Rüzgar türbin sisteminde güç dönüşüm aşamaları…….…….45

Şekil 5.2. Rüzgar türbini güç eğrisi…….…….……46

Şekil 5.3. Deniz üstü rüzgar enerjisi santrali…….…….……..47

Şekil 5.4. Ambarlı ölçüm istasyonu konumu…….……..54

Şekil 5.5. Bandırma bölgesi rüzgar hızı verisi…….……54

Şekil 5.6 DTU-10 MW rüzgar türbini…….……56

Şekil 5.7. ASHES programında simülasyonlar için türbinin ve koşulların hazırlanması..59

Şekil 5.8. Rüzgar türbininde kuvvetlerin ölçüleceği tekil kazıklı temel……...60

Şekil 5.9. Ölçülen ve tahmin edilen birikimli dağılım fonksiyonları…….…….…66

Şekil 5.10. Türbinin temeline etki eden sürükleme (kırmızı)
ve atalet kuvveti (yeşil)……..…….....67

Şekil 5.11. Rotorda oluşan itme kuvveti……..…….. 68

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

R	Yarıçap
RES	Rüzgar enerji santrali
RPM	Dakikada devir sayısı
α	Rüzgar yükseklik katsayısı
A	Alan
C_P	Güç faktörü
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
ρ	Yoğunluk
c	Weibull fonksiyonunda ölçek parametresi
k	Weibull fonksiyonunda biçim parametresi
C_m	Atalet kuvveti katsayısı
C_d	Sürükleme kuvveti katsayısı
F_T	Toplam kuvvet
M	Eğilme momenti
I	Atalet momenti
V_{ref}	Referans yükseklikteki hız
$V_{göbek}$	Göbek yüksekliğindeki rüzgar hızı
$Z_{göbek}$	Göbek yüksekliği
Z_{ref}	Referans yüksekliği
N_G	Jeneratör verimi,
N_D	Dişli kutusu verimi
N_C	Kuplaj verimi
V’	Akış ivmesi
V	Akış hızı
A	Referans alanıdır
Vol,	Kuvvetin etki ettiği yerin hacmi
Z	Dayanıklılık momenti
σ	Eğilme gerilmesi

1. GİRİŞ

Toplumsal refahın yükseltilmesi üretilen mal ve hizmet miktar ve çeşitliliğinin artmasıyla ilişkili olduğu kadar, bunların gündelik yaşamda kullanılır hale gelmeleri için insanlara ulaştırılmasıyla da ilgilidir. Mal ve hizmet üretimi ile dağıtımı açısından temel girdi enerjidir ve en önemli enerji biçimi elektrik enerjisidir.

Dünya ekonomilerinde artan şehirleşme ve sanayileşme eğilimleriyle birlikte artan nüfus ve sanayi üretimi, enerjiye duyulan gereksinimi, dolayısıyla elektrik talebini artırmıştır. Elektrik enerjisi üretiminin halen yaklaşık %80'lik kısmı fosil yakıtlardan elde edilmektedir, ancak 19.yy'ın ortalarından başlayarak fosil yakıtların enerji üretiminde gittikçe artan ağırlıkta kullanılmaya başlaması, ekonomik ve sosyal bir çok sorunu da beraberinde getirmiştir.

Fosil yakıtlar konusunda yeni arayışların ortaya çıkmasında dönüm noktası olan gelişme, 1970'li yıllarda petrol fiyatlarında ortaya çıkan büyük artışların sanayileşmiş ülkelerde üretimi olumsuz etkileyerek, üretimde düşüşle birlikte işsizlik ve enflasyonda artış yaratmasıdır. Üretim süreçlerinin fosil yakıtlara bağımlılığı ve söz konusu enerji kaynaklarının tükeniyor olduğu gerçeği, enerji arzı konusundaki krizi derinleştirmiş ve elektrik üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması için yeni enerji kaynaklarının bulunmasını bir zorunluluk haline getirmiştir.

Enerji krizinin yaşanmaya başladığı yıllar aynı zamanda, fosil yakıtların çevreye verdiği zararın çözümlenmesi gereken bir sorun olarak dile getirilmeye başladığı döneme denk düşmektedir. 1970'li yıllarda gündeme gelen "sürdürülebilir kalkınma" kavramıyla birlikte, kalkınmanın sosyal ve çevresel sürdürülebilirliğini kapsayan bir planlama çerçevesinde yapılması gerektiği düşüncesi ağırlık kazanmıştır. Bugünkü nesillerin refahının gelecek nesillerin refahı pahasına artırılmasının önüne geçmek için çevreyle uyumlu ekonomik ve sosyal politikaların uygulanması gerektiği kabul edilmiş ve bu amaca ulaşılabilmesi için alternatif enerji kaynaklarının güçlendirilme çalışmaları hızlanmıştır. Kullanımı tarihin çok eski dönemlerine uzanan rüzgar ve güneş enerjisinden günümüz teknolojisiyle yararlanma yönündeki araştırmalar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik ilginin bir sonucudur.

Sürdürülebilir kalkınma amacı doğrultusunda karbon emisyonunun düşürülebilmesi ve enerji üretiminin güvenli biçimde sürdürülebilmesi amacıyla yürütülen araştırmalarda, yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgarın son dönemlerde artan biçimde öne çıktığı görülmektedir. Sonsuz ve yaygın bir kaynak olan rüzgarın aynı zamanda maliyet-etkin ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olması, rüzgar türbinlerine yönelik araştırmaların gerek teorik gerekse uygulama düzeyinde artması sonucunu yaratmıştır. Rüzgar enerjisine yatırımların desteklenmesi amacıyla yüksek miktarlarda teşvikler ve alım garantisi sağlanmakta, bununla doğru orantılı olarak yatırımlar da hızla artmaktadır.

Rüzgar enerjisine artan bir talep olmasına rağmen, tesislerin kurulacağı yer konusunda bazı sorunlar bulunmaktadır. Bu sorunların başında, rüzgar türbinlerinin çalışabilmesi için gereken rüzgar gücü koşulunun sağlanması gelmektedir. Rüzgar türbinleri kanat boyutlarının birbirleri arasında zorunlu olarak mesafe bırakılmasını gerektirmesi ve bu nedenle geniş bir alana gerek duyulması, bir başka kısıtlama olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, türbinlerin çıkardıkları yüksek sesten dolayı yerleşim mesafelerine uzak bölgelerde kurulmaları gerekmektedir. Tüm bu sebepler rüzgar enerjisi santrallerinin karada kurulması açısından önemli dezavantajlar yaratması nedeniyle, son yıllarda deniz üstü rüzgar enerjisi santrallerine artan bir ilgi ortaya çıkmıştır.

Ülkemizde rüzgarın güçlü olduğu yüksek tepelerin ve açık alanların çokluğu genel olarak rüzgar enerjisi açısından bir avantaj yaratırken; üç yanının denizle çevrili olması ve uzun kıyı şeritlerinin varlığı özel olarak deniz üstü enerjisi açısından büyük bir potansiyelin olduğuna işaret etmektedir. Türkiye, rüzgar enerjisi kaynaklarından etkin biçimde yararlandığı taktirde, coğrafi konumunun sağladığı avantajla, enerji sektöründe uluslararası düzlemde önemli bir oyuncu haline gelme potansiyeline sahiptir.

1.1. Tez Konusu ve Amacı

Bütün insanlık için kritik bir öneme sahip olan yenilenebilir enerji ihtiyacına destek olabilmek için yeni teknolojiler geliştirilmeli veya mevcut teknolojiler iyileştirilmelidir. Bu doğrultuda, en çevre dostu kaynaklardan biri olan rüzgar enerjisinden yararlanarak elektrik enerjisi üretimi tezimizin hareket noktasını oluşturmuştur. Rüzgar enerjisi teknolojisini bir üst seviyeye çıkarmak için deniz üstü rüzgar santrallerinin gelişimi üzerinde durulmuştur.

Dünyada yenilenebilir enerjiye olan gereksinimin artmasına paralel olarak deniz üstü rüzgar türbinlerine olan ihtiyaç da her geçen yıl artmaktadır. Deniz üstü rüzgar enerjisi santrallerini ön plana çıkartan özellik, rüzgarın açık denizde karaya göre çok daha istikrarlı ve güvenilir bir yapıya sahip olmasıdır. Karada kurulu olan rüzgar enerji santrallerine göre taşıdığı avantajlar deniz üstü santrallerini daha cazip hale getirmektedir. Deniz üstü rüzgar santralleri farklı türde temeller üzerine kuruludur. Tez çalışmamızda tekil kazıklı (monopile) temele sahip olan deniz üstü rüzgar türbinleri esas alınmıştır. Tekil kazıklı temel yapısı, daha basit ve sağlam bir tasarıma sahip olması nedeniyle, diğer temel tiplerinden çok daha yaygın kullanılan ve son yıllarda popüler hale gelen temel tipidir. Bu çalışmada, diğer temel yapılarına göre avantajları göz önünde bulundurularak tekil kazık temelli (monopile) rüzgar türbini optimize edilmiştir.

Çalışmamızın temel amacı, deniz üstü rüzgar enerji kapasitesini bilimsel ve teknik açıdan araştırarak ülkemizde rüzgar enerjisinin gelişimine katkı sunmaktır. Bu doğrultuda, deniz üstü rüzgar türbinlerinin daha uzun ömürlü ve güvenli çalışması sağlanarak enerji üretiminin en üst seviyede tutulması için türbin temeline etki eden kuvvetler belirlenmiş ve bu kuvvetlere karşı sistem optimize edilmiştir.

Deniz üstü rüzgar türbinlerinin yer seçimi ve tasarımı karaya oranla çok daha karmaşık bir teknik değerlendirmeyi gerektirmektedir. Bunun en önemli nedeni, deniz üstü rüzgar türbinine etki eden çok sayıda kuvvetin söz konusu olmasıdır. Sistemin en verimli şekilde çalışabilmesi için, bu kuvvetler dikkate alınarak tasarlanması gerekmektedir. Çalışmamızda, öncelikle bu kuvvetlerin yönlerinin ve büyüklüklerinin belirlenmesi, ardından bu kuvvetlere karşı sistemin nasıl geliştirileceği araştırılmıştır. Deniz üstü türbinlerinin optimizasyonunun ekonomik boyutu çalışmamızda veri kabul edilmekle birlikte, bütün bu geliştirmelerin en optimize şekilde olabilmesi için en ekonomik malzemelerin ve yöntemlerin kullanılması gerektiği belirtilmelidir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı ısıtmasından kaynaklanmaktadır [1]. Bir doğa olayı rüzgar ısınma farkı kaynaklı hava sıcaklıklarında farklılıklar oluşması, bunun sonucu hava basıncında farklılıklar oluşması ve havanın yüksek basınçtan düşük basınca doğru hareket etmesiyle gerçekleşir. Rüzgar enerjisinde günümüzde kastedilen, atmosferdeki sıcak ve soğuk havanın yer değiştirilmesiyle oluşan rüzgarın kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştükten sonra elektrik enerjisine dönüştürülmesi olarak da tanımlanabilir. Rüzgar enerjisi, son yıllarda teknolojisi en hızlı gelişen yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra en hızlı büyüyen elektrik enerjisi üretim kaynağıdır [2].

2.1.1. Tarihsel gelişim

İnsanların refah düzeyinde artışı ifade eden kalkınmanın en önemli motoru enerjidir. Toplumların gelişme düzeyi arttıkça enerji kullanımı, dolayısıyla enerji gereksinimi de artmıştır. Tablo 2.1.'den görüldüğü gibi, enerji kullanımının tarihçesi aslında insanların avcılıktan teknoloji insanına dönüşüm sürecinde farklı alanlarda kullanılmaya başlama serüvenidir. Bu dönüşüm ve gelişim sürecinde enerji gereksinimi arttığı gibi, enerji kullanım alanları çeşitlenmiş ve enerjinin elde edildiği kaynaklar farklılaşmıştır. Tarihsel gelişim çizgisi içinde bakıldığında dikkat çeken en önemli özellik, teknolojik gelişmelerin baş döndürücü bir şekilde ortaya çıktığı günümüzde tarihin en eski dönemlerinde az sayıdaki doğal enerji kaynaklarına geri dönüş eğilimidir. İnsanlık tarihi kadar eski dönemlerin doğal enerji kaynakları olan rüzgar ve güneş enerjisine son dönemlerde artan bir ilgi ortaya çıkmıştır ve bu ilginin en önemli nedeni, diğer enerji kaynaklarının çevreye ve insana verdiği zararın gittikçe artan ölçüde anlaşılmış olmasıdır. Tez çalışmamızın konusu, en eski enerji kaynaklarından "rüzgar"ın enerji kaynağı olarak kullanılması yönündeki eğilimlerin ve alternatif arayışlarının yarattığı deniz üstü rüzgar enerjisi üretimi olduğu için, tarihsel gelişim çizgisi aşağıda aktarılırken esas ağırlık rüzgara verilmektedir.

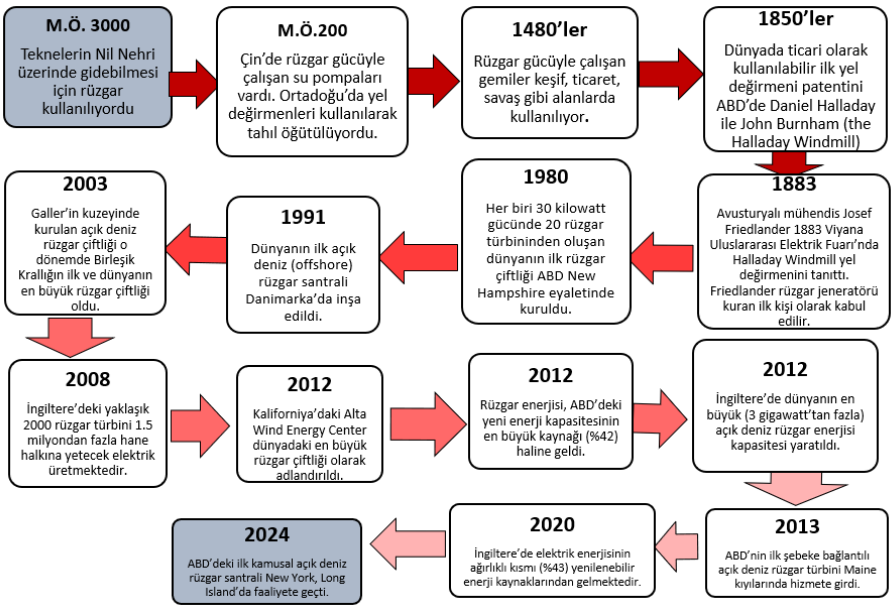
Tarihsel olarak ufkumuzun çok ötesinde eski dönemlerde, rüzgarlar denizleri çalkalamış, kıtaları aşındırmış, kumullar oluşturmuş, yelkenleri doldurmuştur. Dünyanın bugünkü haritasının oluşumunda, rüzgar gücünün yarattığı enerjinin önemli bir rolü vardır. Rüzgarın, insanların gündelik yaşamına girmesi taşıdığı bu doğal ve büyük enerji nedeniyle olmuştur. Hızı arttıkça fırtınaya ve kasırgaya dönüşen rüzgar toprağın biçimini bozmuş, erozyona

uğratmış, dönüştürmüş, yaratmış ve bunu yaparken toprakta yetişen bitki yapısını ve milyonlarca insanın yaşamını da değiştirmiş, dönüştürmüştür. Kültürlerin neredeyse tamamının ortaya çıkış hikayesi rüzgar gücüyle bağlantılıdır [4]. Aşağıdaki tabloda, avcı-insandan günümüzün teknoloji insanına kadar, insanlık tarihindeki gelişim evrelerinde yaşam biçiminde ortaya çıkan değişimin hem kullanılan toplam enerji miktarını artırdığı hem de enerji kullanım alanlarını çeşitlendirdiği gösterilmektedir. İnsanların yerleşik hale gelerek tarımsal faaliyetlere başlamasıyla birlikte nüfus yoğunluğunda ortaya çıkan artış enerji kullanımını tarımı da içerecek şekilde genişletirken, 18.yy'da yaşanan sanayi devrimi enerji kullanımında ulaşımı da ön plana çıkarmıştır.

Tablo 2.1. Enerji kullanımının tarihçesi [3]

		Gıda	Evsel	Tarım	Ulaşım	TOPLAM
100 bin yıl önce	Avcı İnsan	3	2	-	-	5
M.Ö. 5000	İlkel Tarım İnsanı	4	4	4	-	12
M.S. 1400	İleri Tarım İnsanı	6	12	7	1	26
M.S. 1850-1900	Sanayi İnsanı	7	32	24	14	77
M.S. 1970-2000	Teknoloji İnsanı	10	66	91	63	230

Bir enerji kaynağı olarak rüzgar, insanların yerleşik hale gelmesinden bu yana gerek bir yerden başka bir yere gitmek, yani ulaşım, gerekse yaşamak için beslenme gereksinimleri doğrultusunda kullanılmıştır. Başka bir deyişle, rüzgar enerjisini kullanmanın tarihi rüzgarın yarattığı kinetik enerjiden yararlanan yelkenli gemilere ve yel değirmenlerine kadar gitmektedir [5]. Bununla birlikte, rüzgar enerjisi 1970'lerin başlarına kadar tahıl üretimi ve sulama pompalarına mekanik güç sağlayan küçük bir piyasaya sınırlı kalmıştır. Çok az sayıda akü şarj cihazı ve elektrik enerjisi üreten daha büyük kapasiteli makineler istisna olmak üzere, rüzgar enerjisinin kullanımı ilkel versiyonlarının ötesine gitmemiştir [6].



Şekil 2.1. Deniz üstü rüzgar enerjisi gelişiminde önemli bazı tarihsel olaylar [7]

Şekil 2.1.'den görüldüğü gibi, M.Ö 50. yy'de Eski Mısır'da teknelerin Nil Nehri üstünde gidebilmesi için kullanılan rüzgar gücü, M.Ö. 2.yy'da Çin'de, Eski Mısır'da, İran'da ve Japonya'da sulama pompalarını çalıştırmak ve yel değirmenlerini kullanarak tahıl üretmek amacıyla kullanılmaya başladı. Rüzgar gücüyle hareket eden yelkenlilerin kıtalararası ulaşım ve ticarette kullanımı, 18.yy sonlarında İngiltere'de ortaya çıkan sanayi devriminin endüstriyel üretim sürecinde köklü bir değişiklik yaratmasına kadar devam etti. M.S. 7.yy'da Türklerin ve İranlıların yel değirmenlerinde yararlandıkları ve Asya'dan Avrupa'ya 10. yy.'da geçen rüzgar gücünün kullanımı, 11. ve 12. yüzyıllarda İngiltere, Fransa ve Hollanda'da yel değirmenlerinin kullanılmasıyla gündelik yaşama girmiştir [8]. Uzun yıllar boyunca tahıl üretiminde kullanılan yel değirmenleri, Avrupa'nın Ortaçağ'dan çıkıp ekonomik kalkınma sürecine girmesine büyük katkıda bulunmuştur. Hayli [9]'de belirtildiği gibi, yel değirmenlerinin ürettiği rüzgar enerjisi yardımıyla maden galerilerindeki sular boşaltılarak, Romalıların geride bıraktıkları madenler yeniden işletmeye açılmıştır.

Ticari kullanıma uygun ilk yel değirmeni, 1850'lerde mucit Daniel Halladay ve iş insanı John Burnham tarafından yaratılmıştır. Halladay yel değirmeni 1883'te Viyana'da düzenlenen uluslararası elektrik fuarında (Vienna International Exhibition) Avusturyalı mühendis Josef Friedlander tarafından tanıtıldığı için, Friedlander bir rüzgar jeneratörü kuran ilk kişi olarak tarihe geçmiştir. İngiltere'de elektrik üretimi amacıyla kurulan ilk yel değirmeni 1887 yılında James Blyth'dir. ABD'de ilk rüzgar türbini kurulumu ise 1888'de Charles Brush tarafından yapılmıştır.

Rüzgar enerjisinin ticari olarak kullanılması yönündeki çabalar sanayi devriminin yaşandığı 18.yy sonrası çok hızlanmıştır. İskoç akademisyen Profesör James Blyth 1887'de rüzgar gücüyle çalışan ilk pil şarj cihazını yapmış ve 1891'de İngiltere'de patentini almıştır. ABD'de, Charles Francis Brush 1887-88'de rüzgar gücü makinesini kullanarak elektrik üretmeyi başarmış ve 1900'e kadar evinin ve laboratuvarının elektriğini bu makineyle sağlamıştır. Danimarkalı mucit Pour la Cour rüzgar türbini inşa ederek elektrik üretmiştir [5].

Sanayi devrimiyle birlikte kömür yakıtının yanmasıyla ele edilen buhar gücüyle çalışan gemilerin icat edilmesi ve buhar motorlarına geçiş yapılması enerji kaynağı olarak rüzgarı geri plana itti. 1960'lı yıllara kadar kömür elektrik üretiminde kullanılan esas enerji kaynağıydı. 19.yy ortalarında petrolün enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, fosil yakıtların enerji kullanımındaki ağırlığı büyük ölçüde arttı. Günümüzde dünyada kullanılan enerjinin üçte birinden fazlasının petrole dayalı olması, tükenebilir bir kaynak olan petrolün taşıdığı önemi ortaya koymaktadır.

Rüzgar türbinleriyle ilgili tarihteki belli başlı dönüm noktaları şöyle özetlenebilir [5]: 1939'da ABD Vermont'ta 53 metre çapında 1,25 MW'lık Smith-Putnam rüzgar türbini kurulmuştur. II. Dünya Savaşı sonrası 1956-57'de Danimarka'da 200 kW'lık 24 metre çapında rüzgar türbini kurulmuş ve 1958-1967 arasında %20 kapasiteyle çalışmıştır. 1960'ların başında rüzgar enerjisi teknolojisinin öncüsü olarak bilinen Ulrich Hütter 100 kW'lık ve 34 metrelik iki kanatlı, yüksek rüzgar hızlı kararsız pervanesi olan Hütter Allgaier rüzgar türbinini geliştirdi. 1980 yılı, ABD California'da rüzgar enerjisi konusunda büyük bir sıçrama yaşanmıştır. 1985'ten sonra 1700 MW'lık rüzgar enerjisi kapasitesi yaratılmıştır. 1990'ların başında bir diğer gelişme Almanya'da yaşandı; 200 MW'lık yıllık kapasite artışıyla Kuzey Avrupa'da enerji konusunda büyük bir gelişme ortaya çıktı [5].

20.yy'ın ikinci yarısından itibaren teknolojik gelişmelerdeki hızlanmayla birlikte bir zamanlar yelken bezi veya sacdan yapılan kanatlar ahşaptan fiberglas kompozitlere doğru gelişti [6]. Rüzgar gücüyle modern anlamda ilk elektrik üretimi, 1979'da Danimarka şirketleri olan Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus'un seri rüzgar türbini üretimi yapmasıdır. Bu türbinlerin başta 20-30 kW gibi oldukça küçük olan kapasiteleri daha sonra 7 MW'a çıkartılmış ve bir çok ülkede kullanılmaya başlamıştır.

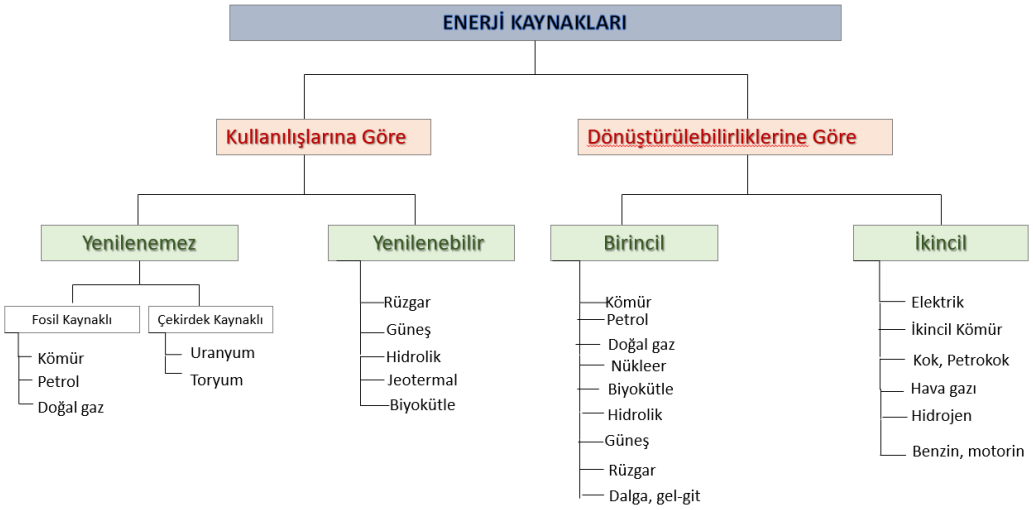
Rüzgar enerjisinden yararlanma konusundaki araştırmaların artması yönündeki eğilimlerin gerisindeki bir diğer neden ekonomiktir ve fosil yakıtların enerji kaynağı olarak

kullanılmasının gittikçe artan maliyetli hale gelmesinin de bir sonucudur. Yenilenemez, başka bir deyişle tükenebilir enerji kaynaklarının yerine yenilenebilir enerji kaynak arayışları açısından dönüm noktası taşıyan bir olay II. Dünya Savaşı'dır. İkinci büyük dünya savaşı sonrasında insanların yer değiştirmesini ifade eden ulaşım talebinin artması, petrolün ısınma ve elektrik üretimi amacıyla kullanımının yaygınlaşması, küresel petrol üretim ve tüketimini artırmıştır [10]. Petrolün keşfi dünya ekonomilerinin özellikle sanayi üretimlerinde enerji gereksinimini büyük ölçüde karşılamış ve bu şekilde ülke ekonomilerinin petrole bağımlılığı artmıştır. 1973 yılında, petrol üreten Arap ülkelerinin oluşturduğu OPEC 'in petrolün varil fiyatını 6 ay içinde 3 dolardan 12 dolara çıkartmasının ardından 1978, 1990 ve 2001 yıllarında yaşanan büyük petrol fiyatları artışı dünya üretimini büyük ölçüde etkileyerek, istihdam kayıpları ve işsizlikle birlikte enflasyon sorununu yaratmıştır. Gelişmiş ekonomilerin yüksek enflasyonla birlikte durgunluğa girmesi, petrol dışında enerji kaynağı arayışlarını hızlandırmıştır.

1970'li yıllarda petrolün enerji üretimindeki payı artarken, aynı dönemde hidroelektrikten yararlanma çabaları da güçlenmiştir. Elektrik üretimini düşük maliyetle üretme, dolayısıyla ucuz elektrik sağlama amacıyla bir çok ülke nükleer enerjiye ağırlık vermeye başlamıştır [10]. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizlerinin bir başka sonucu, petrolün çıkarılması esansında bulunma eğiliminde olan doğal gazın ısınma amacıyla kullanımının artmasına bağlı olarak doğal gaz arzının artmasıdır.

2.1.2. Rüzgar enerjisinin sınıflandırılması

Enerji, yaşamın temel gereksinimlerinden biri olmakla birlikte dünyadaki tüm varlıkların sürdürebilirliğinde önemli bir yere sahiptir. Enerji dönüşümleri evrende olan her türlü fiziksel ve biyolojik sürecin yaşanmasında kritik bir rol oynar. Sonuç olarak enerji bütün tarihte olduğu gibi günümüzde de son derece önemli bir unsurdur. Enerji yaşamımızda çeşitli alanlarda farklı şekillerde bulunabilmekte, bunlardan bazıları; jeotermal, kimyasal, hidrolik, güneş ve rüzgar. Farklı şekillerde elde edilen bu kaynaklar birbirlerine büyük farklılık gösterirler. Enerji kaynakları sınıflandırıldığında iki ana kategoriye ayrılır; yenilenebilir ve yenilemez enerji kaynakları. Şekil 2.2'de enerji kaynaklarının türlerine göre sınıflandırılmasına yer verilmiştir.



Şekil 2.2. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması [1]

Enerji hayatın her alanında olduğu gibi özellikle ekonomik anlamda devletler için çok büyük değere sahiptir. Enerji kaynaklarına sahip olmak tarihte her zaman büyük bir güç olmuş, bu kaynaklara sahip olmak için çok sayıda savaş yapılmıştır. Devletler özellikle petrol kaynaklarına sahip olabilmek için kan dökülmesine göz yummuştur. Günümüzde gelişen teknolojilerle artık yer altı enerji kaynakları yerine yenilenebilir kaynaklar kullanımı hızla artmaktadır. Tarih boyunca savaşlarla elde edilen kaynaklara artık yatırım yaparak elde edilebiliyor olunması dünya barışı için de faydalı olmuştur. Yenilenebilir enerji üretiminin artışıyla rüzgar enerji üretimi de yıllar içinde ciddi bir artış göstermiştir.

Enerji kaynakları, kullanışlarına göre yenilenemez ve yenilenebilir; dönüştürülme özelliklerine göre birincil (primer) ve ikincil (sekonder) ikiye ayrılır [1]. Yenilenemez enerji kaynakları, fosil kaynaklı (kömür, petrol, doğal gaz) ve çekirdek kaynaklı (uranyum, toryum); yenilenebilir enerji kaynakları ise, herhangi bir değişim veya dönüşüme uğramamış hidrolik, güneş, biyokütle, rüzgar, jeotermal, dalga, gel-git, hidrojenden oluşmaktadır. Enerji kaynakları dönüştürülebilme özelliklerine göre ayırıma tabi tutulduklarında, kömür, petrol, doğal gaz, nükleer, biyokütle, hidrolik, güneş, rüzgar, dalga ve gel-git birincil kaynakları; birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesiyle elde edilen elektrik, benzin, mazot, motorin, ikincil kömür, kok, petrokok, hava gazı ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ikincil enerji kaynaklarını oluşturmaktadır.

Koç ve Kaya [1]'da enerji kaynakları, tükenebilme veya yenilenebilirlik niteliklerine göre de sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre, kullanıldıkça azalmayan, tükenmeyen kaynaklar yenilenebilir enerji kaynakları; kullanıldığında bir daha eski haline

dönemeyen, tükenen kaynaklar yenilenemez enerji kaynakları grubunda yer almaktadır. Kömür, petrol ve doğal gaz fosil kaynaklı yenilenemez enerji kaynakları iken, uranyum ve toryum çekirdek kaynaklı yenilenemez enerji kaynaklarıdır. Bu sınıflandırmaya göre, rüzgar, güneş, hidrolik, jeotermal, biyokütle, dalga gel-git, hidrojen yine yenilenebilir enerji kaynağı grubundadır. Dolayısıyla rüzgar enerjisi, kullanışına göre yenilenebilir; dönüştürülebilme özelliğine göre birincil ve kullanıldıkça tükenip tükenmemesine göre yenilenebilir enerji kaynağı sınıfında yer almaktadır.

2.1.3. Rüzgar enerjisinin kullanım alanları

Ülkemizde rüzgar enerjisinin artan üretimiyle birlikte kullanım alanları da genişlemiştir. Günümüzde rüzgar enerjisi, kamu kurum ve kuruluşlarında; park, bahçe, cadde ve sokak aydınlatmalarında; sanayi ve hizmetler sektöründe faaliyet gösteren firmalarda; sulama sistemlerinde, konut ve işyerlerinde ve sinyalizasyonda kullanılmaktadır.

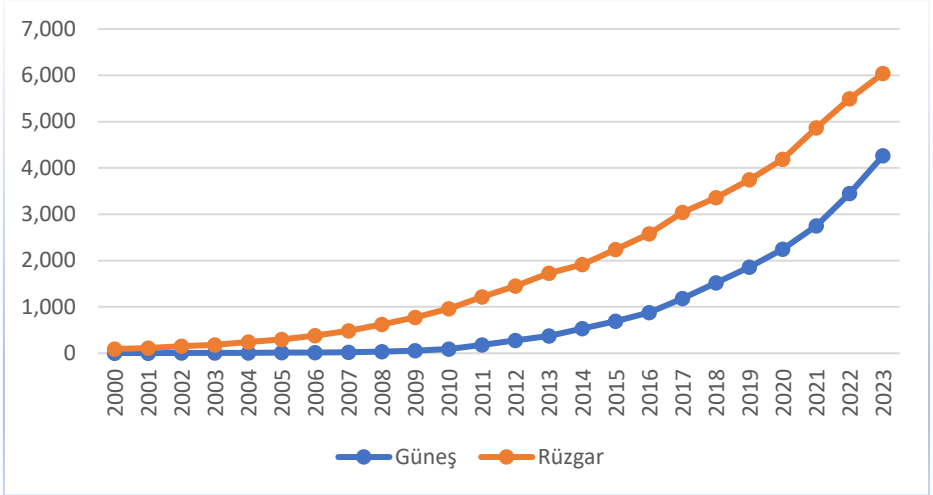
Akkaş [11]'a göre, "Elektrik üreten rüzgar türbinlerinin kullanım alanları; rüzgar çiftlikleri, dağıtılmış üretim türbinleri ve hibrit sistemler olarak, kurulu güç ve diğer güç kaynakları ile entegrasyon derecesine göre üç sınıfa ayrılabilir. Rüzgar çiftlikleri; büyük güçte birçok rüzgar türbininin beraberce çalıştırılarak konvensiyonel elektrik santrali oluşturması olarak tarif edilebilir. Dağıtılmış üretim türbinleri, daha çok küçük güçte rüzgar türbinlerinden oluşan şebekeye ya da direkt olarak yüke bağlı sistemlerdir. Hibrit sistemler ise; rüzgar türbinlerinin elektrik şebekesinin hiç olmadığı yerlerde; daha çok dizel jeneratörler ile oluşturulan minyatür bir şebeke yardımıyla çalıştırılmasıdır."

2.2 Sürdürülebilir Kalkınmanın Enerji Kaynakları

Fosil enerji kaynaklarının tükeniyor olması ve artan enerji kullanımının çevreye verdiği zararı önleme veya azaltma amacı, alternatif enerji kaynaklarının kullanımına ağırlık verilmesi eğilimini güçlendirmiş; rüzgar ve güneş bu açıdan öne çıkan enerji kaynakları olmuştur.

2.2.1. İklim değişikliğine karşı rüzgar enerjisi

Rüzgar enerjisinin ayırt edici bir diğer özelliği, doğanın bir parçası, dolayısıyla doğanın kendi ürünü olması nedeniyle, çevreye zarar vermeyen bir enerji kaynağı olmasıdır. Rüzgar enerjisinin dünya ölçeğinde kullanımının yaygınlaşması, iklim değişikliğine duyarlılığın arttığı ve teknolojide dev adımların atıldığı 20.yy'ın ikinci yarısında olmuştur.



Şekil 2.3. 2000-2023 yılları arasında dünyada rüzgar ve güneş enerjisi üretimi (TWh) [13]

Kyoto Protokolü, iklim değişikliği ile mücadele konusunda atılacak adımların netleştirilmesi yönündeki ilk adım olarak, 1997 yılında kabul edilmiş ve 2005 yılında yürürlüğe girmiştir [12]. Birçok devlet Kyoto Protokolü'ne imza atmıştır. Dünyanın hem fikir olduğu bu konuda yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişmesi gerekmektedir. Sadece teknolojinin gelişmesiyle kalmayıp yapılacak yatırımlarla birlikte tüketilen enerji miktarlarını karşılama konusunda üst sıralara çıkması bir zorunluluktur. Çoğu araştırmada, özellikle fosil yakıtların tükenmesinden dolayı yenilenebilir kaynaklar şu an olduğundan çok daha büyük bir role sahip olacaktır.

Dünyadaki güneş ve rüzgar enerjisi üretiminin 2000-2023 arasındaki gelişiminin verildiği Şekil 2.3'ten görüldüğü gibi, güneş ve rüzgar enerjisi üretiminde sürekli bir artış trendi vardır. Bu artışın ilerleyen yıllar içinde de katlanarak artması beklenmektedir.

2.2.2. Sürdürülebilir kalkınma

1970'li yıllar aynı zamanda "sürdürülebilir kalkınma" kavramının önem kazanmaya başladığı dönemdir. "Sürdürülebilir kalkınma" kavramının ilk kullanımı 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nun yayınladığı Brundtland Raporu olarak da bilinen "Ortak

Geleceğimiz" raporuyla olmuştur [14]. Bu raporda sürdürülebilir kalkınma, "günümüz kuşaklarının gereksinimlerinin gelecek kuşakların gereksinimlerinin karşılanmasından ödün verilmeden karşılanması" olarak tanımlanmaktadır. Dünya Bankası'nın 2003 yılında yayınladığı raporda, bir ülkedeki enerji kaynaklarının sürdürülebilir kalkınma kavramı çerçevesinde ele alınmakta ve çevreyi kirleten enerji kullanımının vergiler yoluyla cezalandırılarak caydırılması önerilmektedir. Bu bağlamda, sera gazlarının ve kirliliğe yol açan emisyonların azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ağırlık verilmesi vurgulanmaktadır [15].

Sürdürülebilir kalkınma kavramının ağırlık kazanması, II. Dünya Savaşı sonrasında yıkılmış ülkelerin onarım ve yeniden kalkınma çabalarının enerji gereksinimini büyük ölçüde artırması ve nüfus artışının bu gelişimi güçlendirmesiyle olmuştur. Hızlı nüfus artışıyla birlikte işsizlik ve yoksulluğun artması, bunun çevre sorunlarının yanında sosyal sorunları da artırması, kalkınma çabalarının önünde engel oluşturmaya başlamıştır. Bu dönemde, enerji üretiminin tüketimde artışı karşılayamamasının yarattığı enerji açığının büyük boyutlara ulaşmasına karşılık doğal enerji kaynaklarının azalmaya başlaması, kalkınmanın sürdürülebilirliği açısından yeni enerji kaynağı arayışlarını güçlendirmiştir. Artan endüstrileşmeyle birlikte küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunlarının ortaya çıkması, çevre kirliliği, hayvan ve bitki çeşitliliğinin zarar görmesi, yeni enerji kaynağı arayışlarını çevreye duyarlı enerji kaynaklarına yönlendirmiştir [16]. Rüzgar enerjisinin ağırlık kazanması bu arayışların bir sonucudur.

Sürdürülebilir kalkınma konusu, sorunların çözümünün ertelenemez hale gelmesi nedeniyle, kalkınmanın sosyal ve çevresel sürdürülebilirliği de kapsayacak şekilde planlanması gereğinin fark edilmesiyle eş zamanlı olarak tartışılmaya başlamıştır. Ekonomik, sosyal ve çevresel politikaların sürdürülebilir kalkınma amacına ulaşacak şekilde belirlenmesinde en büyük rolü oynayan faktör enerjidir [16]. Çevreyle uyumlu ekonomik ve sosyal politikaların uygulanmasıyla, bugünkü neslin refahı gelecek nesillerin refahına zarar verilmeden artırılması mümkün olacaktır.

21.yy başlarında rüzgar enerjisi, diğer tüm olası "yeni" elektrik kaynakları arasında en fazla gelecek vadeden ve dünyadaki en hızlı büyüyen alternatif enerji kaynağı haline gelmiştir [4].

3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAPASİTESİ

3.1. Dünyada Yenilenebilir Enerji Kapasitesi

Dünyada yenilenebilir enerji kapasitesine ilişkin önemli bazı veriler Tablo 3.1'de verilmektedir.

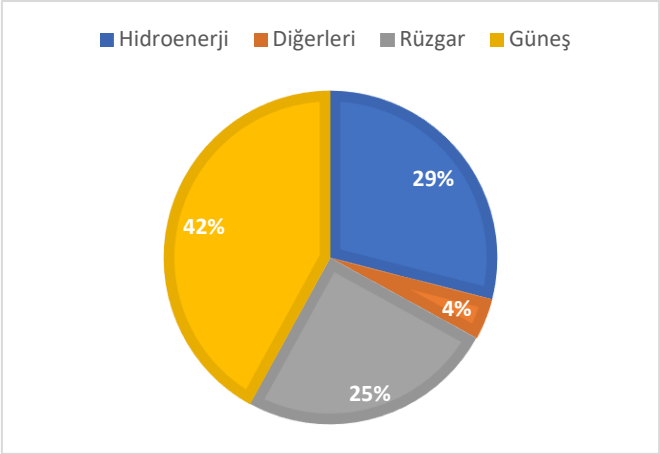
Tablo 3.1. Dünyada Yenilenebilir Enerji Kapasitesi: 2024 Yılı Verileri [17]

Yenilenebilir Enerji Kapasitesi 4 448 GW	Yenilenebilir Enerjinin Toplam Kapasite İçindeki Payı %46.4 Yenilenebilir Enerji Kapasitesi Yıllık Büyüme Oranı %15.1	
Güneş Enerjisi 1865 GW	Hidro 1283 GW	Rüzgar 1133 GW
Biyoenerji 151 GW	Jeotermal 15 GW	Deniz 1 GW

2024 sonu itibariyle küresel yenilenebilir enerji kapasitesi 4 448 GW'dır ve en büyük pay Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, %42 ile güneş enerjisine aittir. Güneş enerjisini, %29 ile hidroenerji, %25 ile rüzgar enerjisi izlemektedir. 2024 yılındaki 585 GW'lık yeni kapasite artışıyla birlikte, yenilenebilir enerji kaynakları toplam enerji artışının %90'ını oluşturmuştur. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı Genel Müdürü Francesco La Camera'ya göre, "*Yenilenebilir enerjide her yıl sürekli artış yaşanıyor olması, yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomik olarak uygulanabilir ve kolaylıkla konuşlandırılabilir olduğunu göstermektedir*."[18].

Dünyada güneş ve rüzgar enerjisi üretimi 2000-2023 arasında sürekli artış eğilimi göstermiştir. 2024'te, rüzgar ve güneş enerjisi üretimi tüm yenilenebilir enerji kaynağı artışlarının %96.6'sını oluşturmakta, dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynakları içinde baş rolü oynamaya devam etmektedir.

Şekil 3.1'de, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerinden elde edilen verilere göre Türkiye için 2024 yılı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları verilmektedir. Şekle göre en büyük pay %42 ile güneşe ait iken, rüzgar enerjisi %25 ile 3. yenilenebilir enerji kaynağıdır.



Şekil 3.1. 2024 Yılı Enerji Kaynaklarına Göre Yenilenebilir Enerji Kapasitesi

Dünyada bölgeler itibariyle yenilenebilir enerji kapasitesi Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Dünyada Bölgesel Yenilenebilir Enerji Kapasitesi, 2024 [17]

	Kapasite,GW	Küresel Pay,%	Değişim	Büyüme Oranı
Kuzey Amerika	573	12.9	+45.9	+8.7
Orta Amerika ve Karayipler	19	0.4	+0.6	+3.2
Güney Amerika	313	7.0	+22.5	+7.8
Avrupa	849	19.1	+70.1	+9.0
Orta Doğu	40	0.9	+3.3	+9.0
Afrika	67	1.5	+4.2	+6.7
Avrasya	131	2.9	+8.3	+6.8
Asya	2382	53.6	+421.5	+21.5
Okyanusya	74	1.7	+8.7	+13.3

Tablo 3.2'den görüldüğü gibi, 2024 yılı yenilenebilir enerji kapasitesi ve büyüme oranı açısından en yüksek artışların yaşandığı yıl olsa da, ülkeler ve bölgeler arasında önemli farklılıklar vardır. Bu konuda Asya özellikle önemlidir: Asya bölgesinde yenilenebilir enerji kapasitesi 421.5 GW artışla 2 382 GW'lık kapasiteye ulaşmıştır (dünya toplamının %53.6'sı), ki bu artış 2024'te dünya ölçeğindeki toplam ilave yenilenebilir enerji kapasitesinin %72'sine karşılık gelmektedir. Bu artışın büyük kısmı, +373.6 GW'lık artışla, Çin'de gerçekleşmiştir. 2024'te Avrupa'daki 70.1 GW'lık artışın 18.8 GW'lık kısmı Almanya'dan gelmiştir [17].

Kuzey Amerika'da %8.7'lik (45.9 GW) artışın büyük kısmı ABD'de gerçekleşmiştir. Afrika'daki %6.7'lik (4.2 GW) artışta en önemli pay Mısır, Etiyopya ve Güney Afrika'ya aittir. Okyanusya'da kurulu kapasitedeki %13.3'lük artışın (8.7 GW) esas kaynağı ise

Avustralya'dır. Güney Amerika, %7.8'lik artışla (22.4 GW) yukarıya doğru trendini sürdürmektedir. Orta Doğu bölgesinde gerçekleşen %9.0'luk artışın (3.3 GW) yarısından fazlası Suudi Arabistan'dadır [17].

3.1.1. Dünyada rüzgar enerjisi

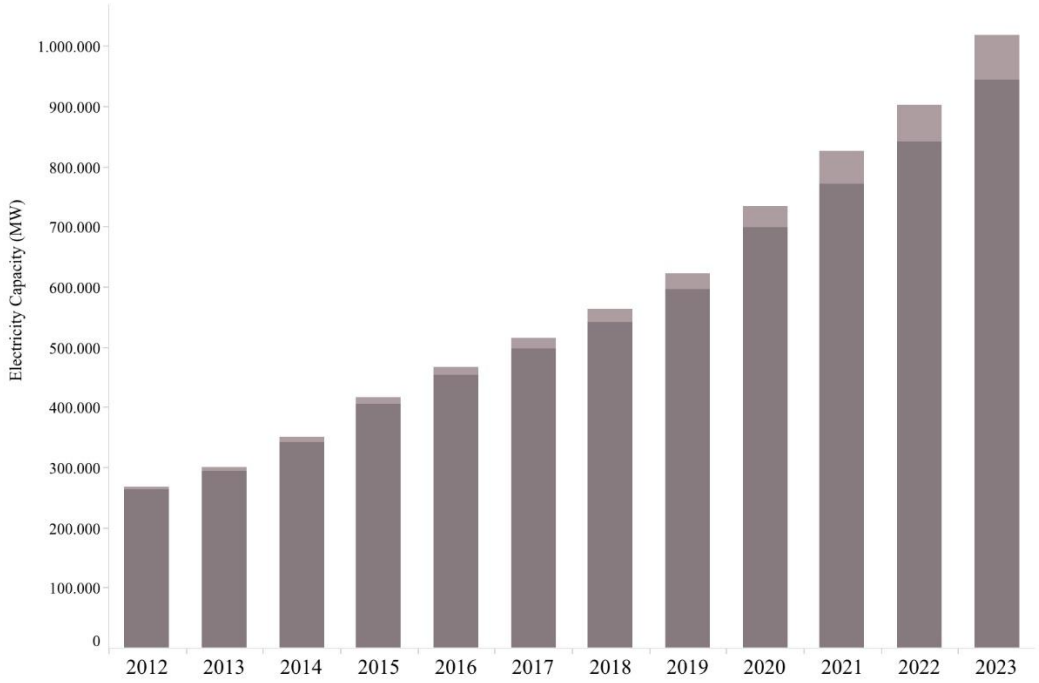
Rüzgar gücünün tahıl üretmek ve su pompalamak amacıyla kullanımı tarihsel olarak büyük gelişme göstermiş olsa da, 21.yy.'da geleceğe ilişkin en büyük umudu vadeden "rüzgar ile elektriğin birleşmesi" olmuştur. Rüzgar enerjisinin gelişim süreci, esas olarak iki ana eğilim çerçevesinde şekillenmiştir [4]. Birinci gelişim çizgisi, yüksek megavat türbinlerin kullanımıyla daha büyük ölçek ekonomileri yaratılmasıdır. Başka bir deyişle, üretim miktarı artırılarak rüzgar enerjisi üretim maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenmiş, ancak bu büyüklükteki türbinler işletim saati, yaratılan enerji ve rüzgar enerjisini geleneksel yakıtlara oranla daha rekabetçi hale getirecek bir katkının yaratılamaması nedeniyle 1980'lerin ortalarında terkedilmiştir. Mega-watt sınıfı türbinlerin kurulması 1990'larda gerçekleşmiş ve bu türbinlerle ticari enerji üretimi 1990'ların sonlarında başlamıştır. 2002'ye kadar, Avrupa'da ve Kuzey Amerika'da her biri 1.5 MW'lık 100'den fazla megavat-ölçekli rüzgar türbini kurulmuş ve faaliyete geçirilmiştir.

Şekil 3.2. Deniz üstü rüzgar çiftliği örneği [19]

Dünyada kurulu gerek kara gerekse deniz üstü rüzgar kaynaklı elektrik enerjisi kapasitesi, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı verilerine göre geçtiğimiz 20 yılda 98 kat

artışla, 1997'deki 7.5 GW'tan 2018'de 733 GW'a çıkmıştır. Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council, GWEC) verilerine göre, rüzgar enerjisi kurulu kapasitesi 117 GW'lık rekor düzeyde artışla 2024 yılında toplam 1,136 GW'a çıkmıştır.

Küresel düzeyde ilave edilen toplam kapasitenin 109 GW'lık kısmı karada kurulu rüzgar enerjisi santrallerinden gelirken, deniz üstü rüzgar türbinlerinin katkısı 8 GW'dır. Deniz üstü rüzgar enerjisinin katkısı düşük görünse de zaman içinde kara/deniz rüzgar enerjisi payının deniz üstü tesisler lehine değiştiği görülmektedir. Şekil 3.2'de rüzgar kaynaklı elektrik enerjisi kapasitesi verilmektedir: Sütunlardaki koyu gri bölge karada kurulu kapasiteyi ve açık gri bölge deniz üstü santrallerden üretilen elektrik enerjisini göstermektedir. Karada kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi 2010'da 178 GW'a, 2020'de 699 GW'a çıkarken, deniz üstü rüzgar enerjisi çok daha fazla artarak, 2010'de 3.1 GW'tan 2020'de 34.4 GW'a ulaşmıştır.

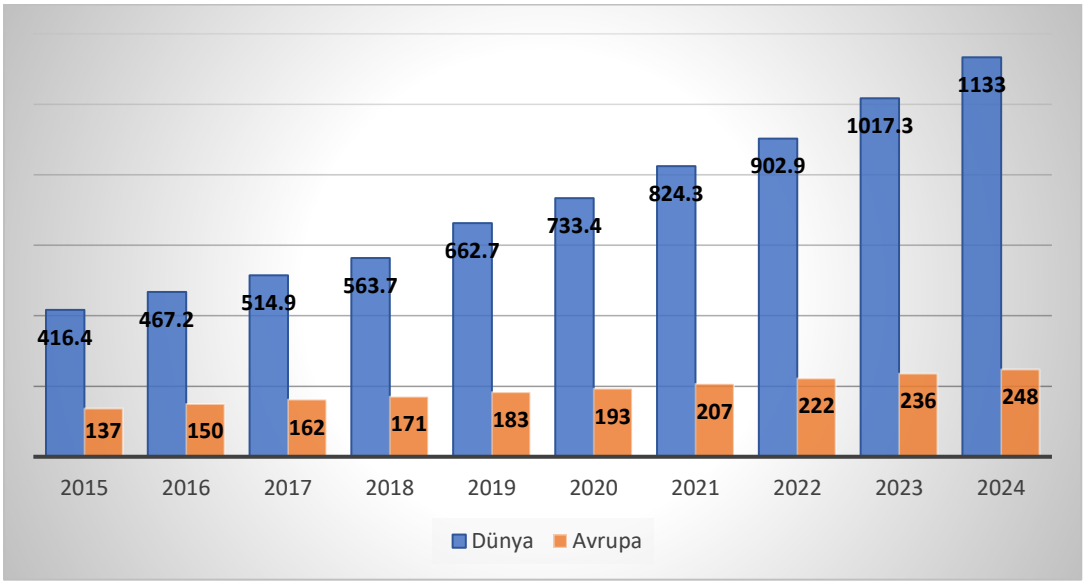


Şekil 3.3. Dünyada kara ve deniz üstü rüzgar kaynaklı elektrik enerjisi kapasitesi [20]

2010-2020 arasında rüzgar enerjisi kapasitesindeki artış, teknolojideki ilerlemenin ölçeği büyütmesiyle birlikte maliyetlerdeki düşüşün ve kapasite faktöründeki artışın sonucudur. Rüzgar türbini kapasitesi 1985'te yakalanan kapasite 0.05 MW ve rotor çapı 15 metre iken, günümüzde türbin kapasitesi kara santrallerinde 3-4 MW ve deniz üstü santrallerinde 8-12 MW'a ulaşmıştır. Rüzgar enerjisi açısından gözlenen artışın en büyük kısmı, %75'lik oranla Çin ve Hindistan başta olmak üzere, Asya-Pasifik bölgesinde

gerçekleşmiştir. İkinci sırada Avrupa gelmektedir. Avrupa'da yaratılan ilave 16.4 GW'lık bölümü Avrupa Birliği üyesi ülkelerden gelmektedir. Bu ülkeleri ABD ve Amerika'da yer alan diğer ülkeler izlemektedir.

Rüzgar enerjisi konusundaki ikinci gelişim çizgisi, yukarıda değinildiği gibi, yeni türbinlerin karada değil deniz üstünde kurulması yönündeki eğilimdir [4]. Avrupa'da bu strateji, kurulum yeri konusundaki çatışmaları ortadan kaldırabilir umuduyla, uygulamaya geçirildi. Ancak, çok daha pahalı altyapı yatırımı gerektirmesi, projelerin uzun gecikmelerle bitirilebilmesi ve türbinlerin karada kurulu olanlardan çok daha büyük olması gibi nedenlerle deniz üstü rüzgar türbini projelerinin gelişimi yavaş olduysa da Danimarka ve İsveç'te 1990'ların sonlarında kıyıya yakın yerlerde küçük projeler uygulanmaya başladı. Büyük çaplı bir proje, 2000'de Kopenhag limanı yakınlarında kurulan 20 2-MW'lık Middlegrunden türbinidir. Danimarka, 2002'de Baltık Denizi'nde 300 MW'lık deniz üstü kapasite kurulumuna başlamıştır.

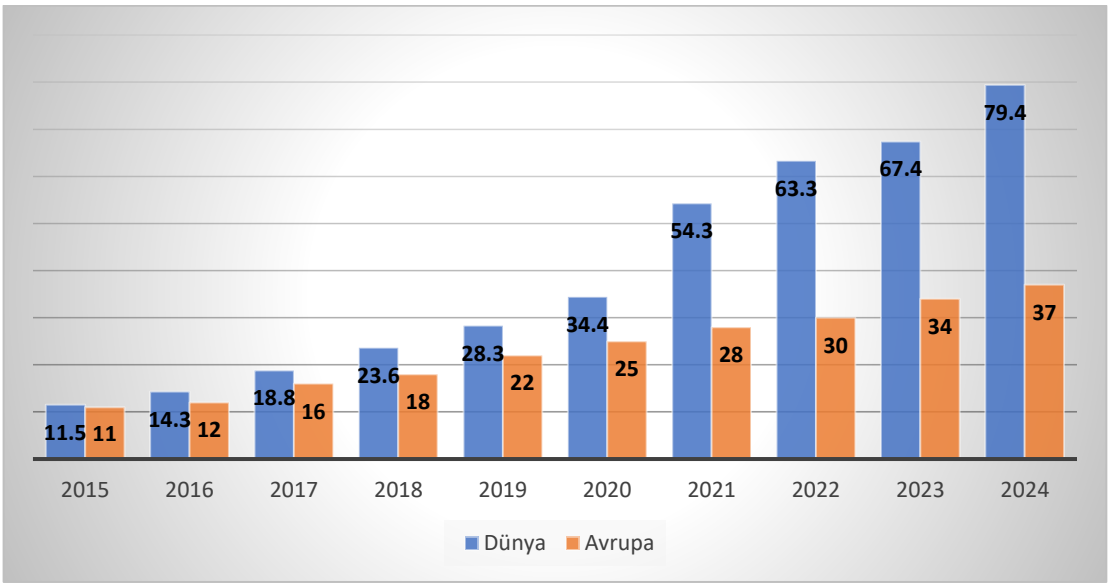


Şekil 3.4. Dünya ve Avrupa rüzgar enerjisi üretimi (GW) [21],[22]

Şekil 3.4'ten görüldüğü gibi, dünyada rüzgar enerjisi üretimi düzenli olarak artmaktadır. En fazla artış %17.6 ile 2019 yılında gerçekleşmiştir. Avrupa'daki artış dünyadaki artışa oranla çok daha düşük gerçekleşmiş; en büyük artış 2016'da %9 olarak yaşanmıştır.

3.1.1.1. Dünyada deniz üstü rüzgar enerjisi

Deniz üstü rüzgar enerjisinden yararlanarak elektrik üretimi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, karbondan arındırılmış bir gelecek için kritik önem taşıyan bir yapı taşı konumundadır. Fosil yakıtlara büyük ölçüde bağımlı olması nedeniyle karbon emisyonunu azaltmanın güç olduğu; dünya enerji tüketiminin üçte birini ve toplam karbondioksit emisyonunun beşte birini yapan çimento, kimyasal ve petrokimyasal, çelik gibi endüstriler (hard-to-abate industries) çok fazla miktarda güç ve sıcaklık gerektirdiği için "aşırı emisyon yoğun" sektörlerdir. Bu sektörlerde fosil yakıta alternatif kaynakların bulunması Paris Anlaşması'nın hedeflerine ulaşılmasında can alıcı önem taşımaktadır. Geçtiğimiz birkaç yılda maliyetlerde ortaya çıkan düşüşler ve gelecekte ölçek ekonomilerinin ortaya çıkma potansiyeli dikkate alınırsa, yenilebilir enerjinin bu tip sektörlerin karbondan arındırılması açısından kritik rol oynayacağı söylenebilir. Şebeke planlaması ve izin süreçlerinin daha sorunsuz olması nedeniyle, deniz üstü rüzgar türbinlerinin bu konuda lider konumuna gelme potansiyeli vardır.



Şekil 3.5. Dünya ve Avrupa deniz üstü rüzgar enerjisi (GW), [19], [23]

12 GW'lık yeni deniz üstü kapasitesinin eklenmesiyle birlikte, toplam global deniz üstü rüzgar kapasitesi 2024 yılı sonunda 79.4 GW'a ulaşmıştır. 2015-2024 arasında dünyada deniz üstü rüzgar enerjisi kapasitesi yaklaşık 7 kat artmıştır. Deniz üstü enerji kapasitesinde en yüksek gelişmenin yaşandığı yıl %58'lik artışla 2021 olmuştur. Önceki yıla göre %18'lik artış olması nedeniyle, 2023 deniz üstü enerji tarihindeki en yüksek gelişmenin kaydedildiği ikinci yıl olmuştur [19].

2015-2024 döneminde Avrupa'da deniz üstü rüzgar enerjisi üretimi, dünya üretimindeki artışın çok altında olmakla birlikte, 3 kattan fazla artış göstermiştir. Avrupa'da deniz üstü rüzgar enerjisi kapasitesinde en yüksek artışın yaşandığı yıl, %33'lük artışla 2016 yılı olmuştur. %22 artışın yaşandığı 2019 yılı, Avrupa'da deniz üstü rüzgar enerjisi kapasitesinin en çok arttığı ikinci yıldır.

Küresel Deniz Üstü Enerji Raporu'na (Global Offshore Wind Report) göre, Çin 2023 yılında 6.3 GW'lık yeni deniz üstü enerji kapasitesi ilavesiyle dünyadaki lider konumunu korumaktadır [19]. Avrupa'nın toplam olarak 2023 yılındaki ilave deniz üstü enerji kapasitesi 3.8 GW olmuştur, ki bunun 1.9 GW'lık kısmı Hollanda'ya aittir. Hollanda'yı, 833 MW ile İngiltere, 360 MW ile Fransa, 344 MW ile Danimarka, 257 MW ile Almanya, 35 MW ile Norveç ve 2 MW ile İspanya izlemektedir. 2023 sonu itibariyle, Asya'da 41 GW'lık ve Avrupa'da 34 GW'lık deniz üstü kapasite faaliyet halindedir.

Asya ve Avrupa toplam deniz üstü enerji kapasitesinin %99.9'una sahiptir. Avrupa toplam kurulu deniz üstü rüzgar kapasitesi açısından lider konumunu kaybetmiş olsa da, yüzer rüzgar türbini ve 'göbek' teknolojisi açısından en büyük pazar olma niteliğini korumaktadır. Kuzey Amerika'da 2023 sonu itibariyle faaliyet halindeki deniz üstü rüzgar kapasitesi, tümü ABD'de olmak üzere, 42 MW'dır. Dünya Deniz Üstü Enerji Raporu'na göre, 2023'teki 10.8 GW'lık yıllık deniz üstü kapasite kurulumunun 2028'de üç katına çıkması beklenmektedir.

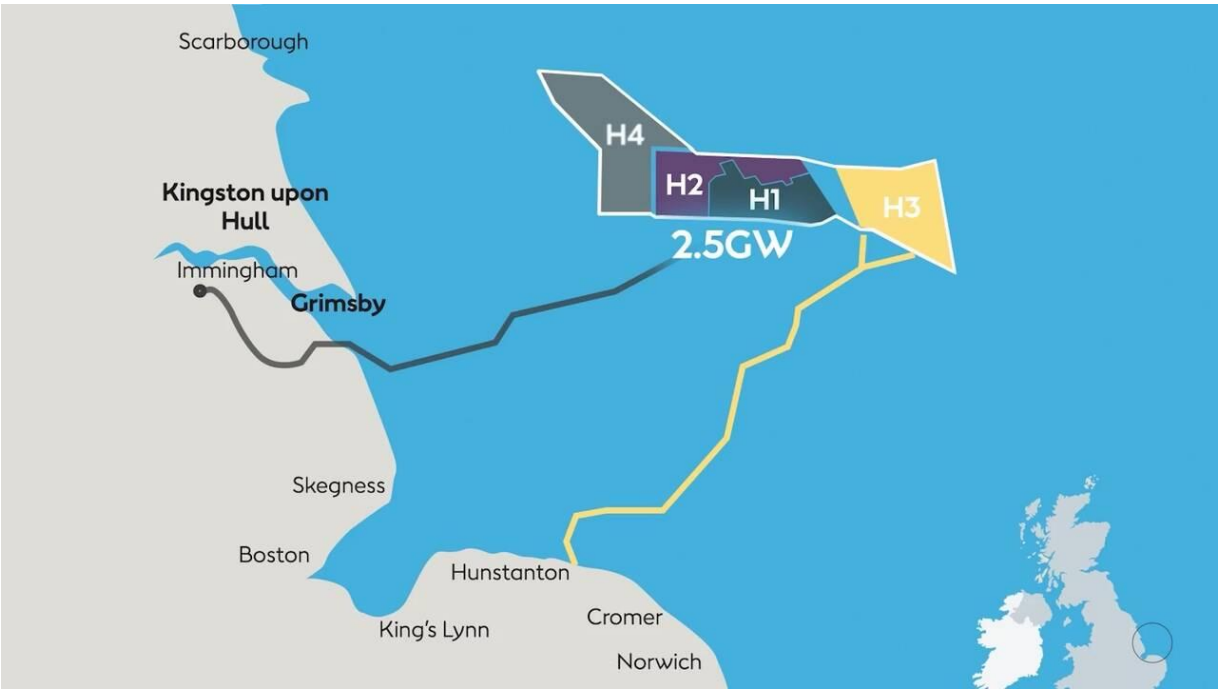
3.1.1.2. Önemli bazı deniz üstü rüzgar santralleri

Dünyada özellikle 2010 yılından itibaren çok sayıda deniz üstü rüzgar santrali projesi yapılmıştır. 2020'li yıllardan itibaren ise en büyük kapasiteli yatırımlar yapılmıştır. Dünyada büyük ölçekli deniz üstü rüzgar enerjisi çiftliklerinin kurulması yönündeki eğilimin gerisinde rüzgar enerjisi üretiminde azalan maliyetler, yani artan getirilerin varlığıdır. Bu şekilde rüzgar enerjisi tüketimi, türbin sayısı ve kurulum kapasitesi arttıkça daha etkin hale gelmektedir. Bugün itibariyle, kapasite olarak dünyanın en büyük 4 santrali İngiltere'de bulunmaktadır.

Aşağıda bazı yüksek kapasiteli ve yüksek sayıda rüzgar türbini barındıran tesisler örneklendirilmiştir. Güncel verilere göre, dünya üzerinde kurulu en yüksek kapasiteye sahip tesis, 2022'de İngiltere'de Kuzey Denizi'nde bulunan *"Horn Sea 2"* projesi bulundurduğu

165 rüzgar türbini ile 1386 MW enerji üretim kapasitesine sahiptir. Dünya üzerinde kurulu en yüksek ikinci kapasiteye sahip proje *"Horn Sea 1"* 1218 MW enerji üretim kapasitesindedir.

Bu iki projenin ardından şu an aynı bölgeye yapılmakta olan *"Horn Sea 3* ve *4"* projelerinin yeni ilklere imza atması öngörülmektedir. 2023'te yapımına başlanan Horn Sea 3 projesi 2.9 GW kapasiteye sahip olması hedeflenmektedir. Projenin 2027 yılında bitimi planlanmaktadır. Horn Sea 4 projesi ise 2025 yılında üretime başlanıp 2030 yılında enerji üretime başlaması planlanmaktadır. Şekil 3.6'da bu 4 projenin Kuzey Denizi'ndeki yerleri belirtilmiştir.



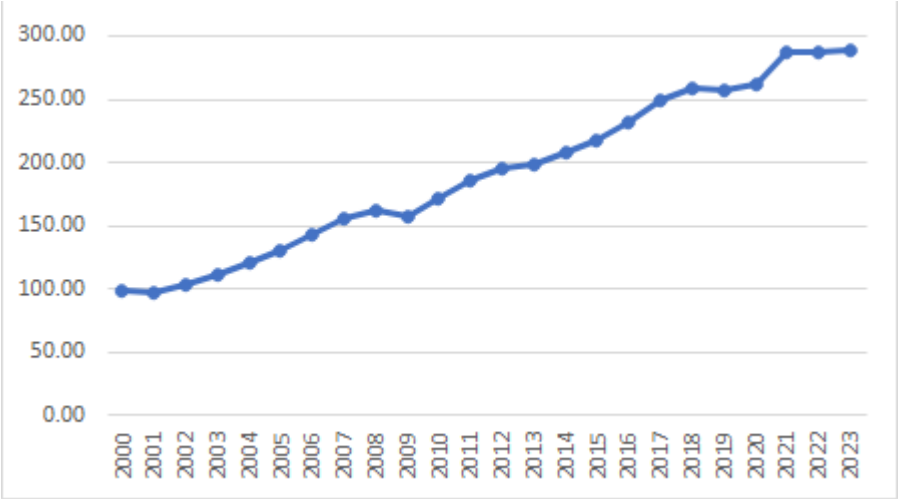
Şekil 3.6. Horn Sea projeleri bölgeleri, Horn Sea 3 Deniz üstü Rüzgar Çiftliği [24]

3.2. Türkiye'de yenilenebilir enerji kapasitesi

Genel olarak enerji, özel olarak elektrik enerjisi ülke ekonomilerinin gelişimi ve yaşam standartlarının iyileştirilmesi açısından can alıcı bir öneme sahiptir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyüme için sanayi, ticaret ve farklı sektörlerin büyümesi gerekmektedir, ki bu durum enerji ihtiyacını artırmaktadır. Enerji üretimi ve tüketicilerin kullanımına sunulması açısından en önemli konu, güvenirliğin ve sürekliliğin sağlanmasıdır.

3.2.1. Türkiye'de elektrik enerjisi üretim ve tüketimi

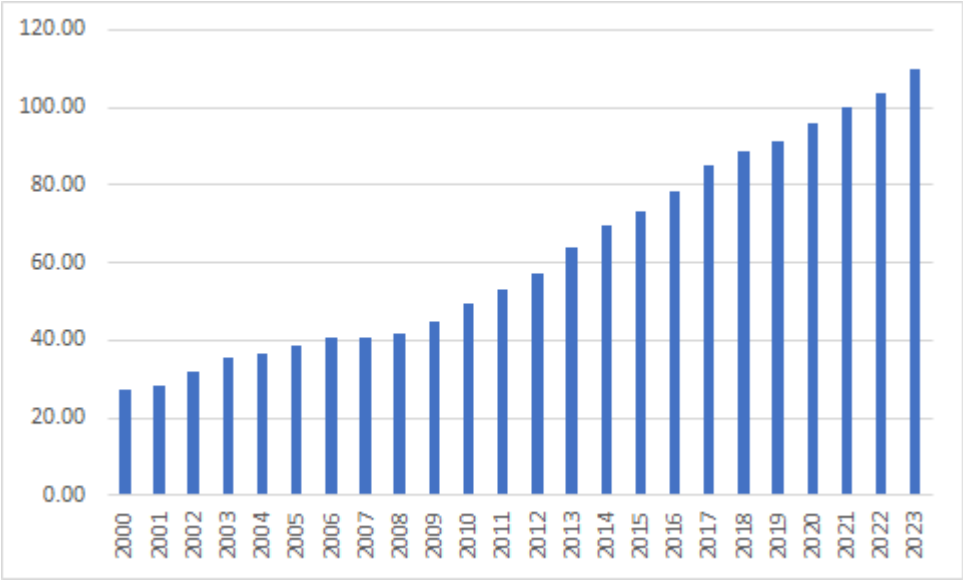
Enerji üretimi ve tüketimi açısından en önemli enerji türü elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisinden konutlarda, işyerlerinde aydınlatmadan iletişime ve ısınmaya kadar birçok farklı alanda yararlanıldığı gibi, sanayi, tarım ve hizmetler olmak üzere tüm ekonomik sektörlerde üretimin yapılabilmesi için en önemli enerji kaynağı olarak işlev görmektedir. Genel olarak enerji, özel olarak elektrik enerjisi açısından en önemli nokta, üretim süreçlerinde ve tüketimde kesinti olmaması için elektrik enerjisinde güvenirliğin ve sürekliliğin sağlanmasıdır. Ekonomik büyüme ve gelişme enerjiye duyulan gereksinimi artırmakta ve bu bağlamda elektrik enerjisinin önemi de artmaktadır.



Şekil 3.7. Türkiye'de Net Elektrik Tüketimi (TWh) [25]

Türkiye'deki enerji talebi ve tüketiminin enerji üretimini aşıyor olması enerji ithalatının artmasına, dolayısıyla tarım ve sanayi üretiminde en önemli girdi olan enerjide ülkemizin dışa bağımlı olmasına neden olmaktadır. Türkiye, petrol, kömür, doğal gaz, nükleer, biyokütle, dalga-gelgit, güneş ve rüzgardan oluşan birincil enerji kaynakları açısından %70'leri aşan oranda dışa bağımlı iken, ikincil enerji kaynağı olan elektrik enerjisi üretiminde dışa bağımlılık %58 gibi yüksek bir orandadır. Üretim açısından birincil önem taşıyan girdi olarak enerji sektöründe dışa bağımlılığın azaltılabilmesi için birincil enerji kaynaklarından daha etkin yararlanılması gerekir, ki rüzgar enerjisi bu açıdan önemli bir alternatiftir.

Türkiye'de elektrik santrallerinin kurulu gücü Şekil 3.8'den görüldüğü gibi, 2000-2023 arasında sürekli olarak artmış ve 2023 sonu itibariyle 110.026 MW'a ulaşmıştır.

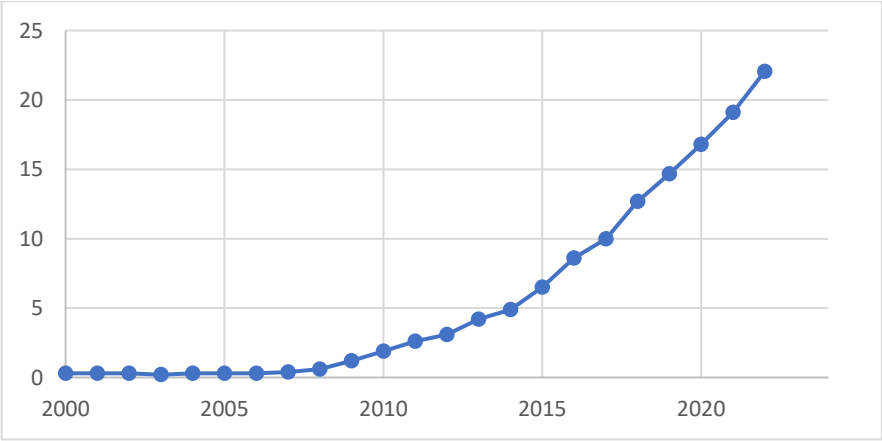


Şekil 3.8. Türkiye'de Elektrik Santrallerinin Kurulu Gücü (TW) [26]

3.2.2. Türkiye'de yenilenebilir enerji

Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önemin giderek artmasının gerisinde yeni teknolojilerin üretim artışıyla birlikte maliyetlerde düşüş şeklinde bir avantaj yaratması bulunmaktadır.

Şekil 3.9'da Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının, toplam enerji üretim miktarı içindeki oranının yıllar içinde arttığını ve 2024 itibariyle %23'e kadar arttığını gözlemliyoruz. Sözü edilen enerji kaynakları jeotermal, rüzgar, katı biyokütle, güneş, biyogaz kaynaklarını içerir. Artık günümüzde Türkiye'nin enerji üretiminde ciddi bir miktara ulaştığını, özellikle 2010 yıllarında başlayan hızlı yükselişin ilerleyen yıllarda da hızlanarak devam edeceği söylenebilir.



Şekil 3.9. Türkiye'de 2000-2024 arasında toplam enerji üretimi içinde yenilenebilir enerjinin oranı (%)

Günümüze bakacak olursak, Türkiye'yi ele aldığımızda ciddi bir doğalgaz ve kömür ithalatı bulunmaktadır. Bu ithalat zorunluluğu da Türkiye'yi yabancı ülkelere bağlı hale getirmektedir. Türkiye'nin enerji kaynağına göre kapasitesi ve kurulu gücü Tablo 3.3'te verilmektedir. Tablo 3.3'te görüldüğü gibi, toplam enerji kapasitesinin %56,28 yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmakta ise de üretilen enerjinin %42,25'lik kısmı yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır; kalan kısmı termik enerji kaynaklardan sağlanmaktadır.

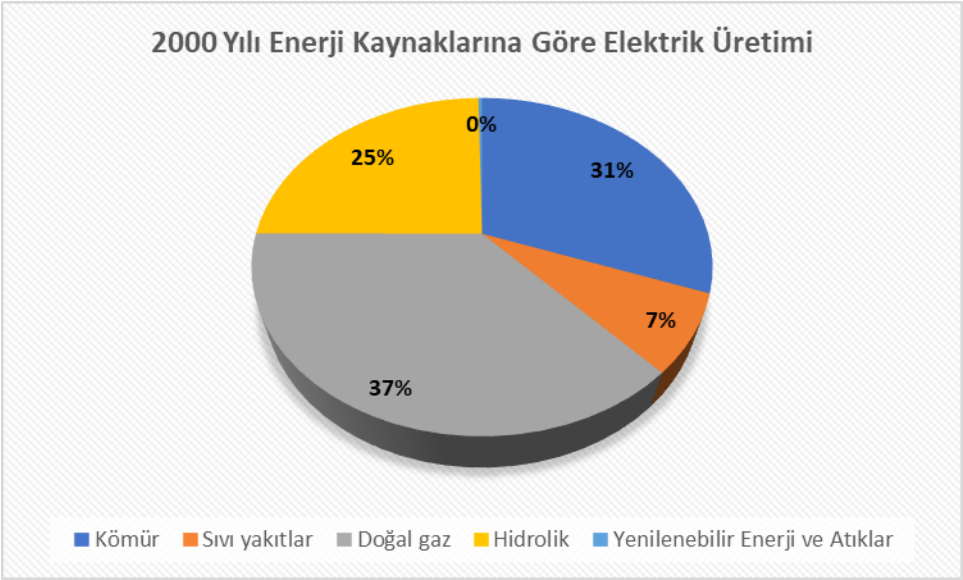
Türkiye açısından rüzgar enerjisine ağırlık verilmesinin bir avantajı enerjide dışa bağımlılığı azaltmak iken, diğer bir avantajı da rüzgar türbinlerine ait parçaların üretimi ve ihracatında karşılaştırmalı üstünlüğe sahip olma potansiyelidir.

Tablo 3.3. Türkiye'de enerji kurulu güç ve üretim kapasitesi miktarı (2023 sonu itibariyle)

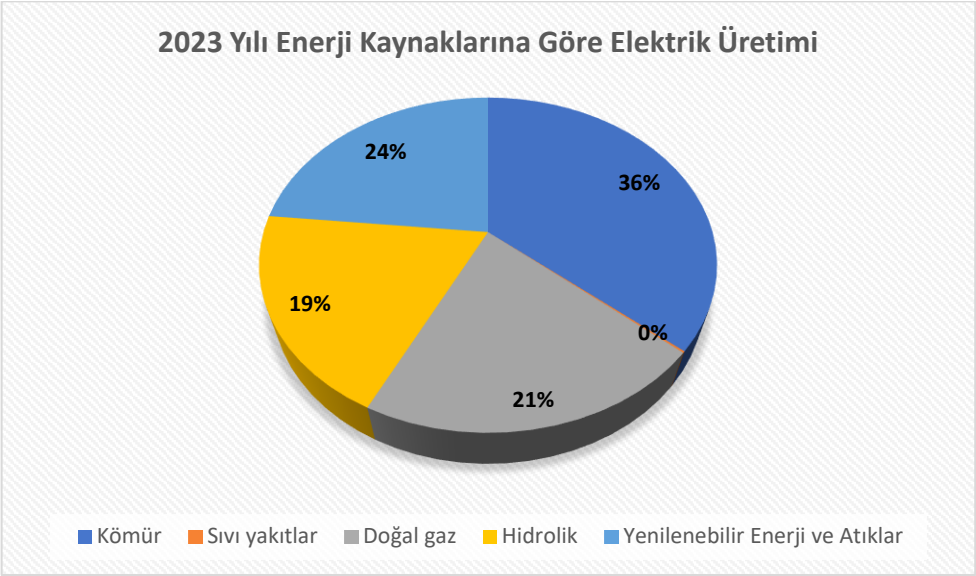
Enerji Kaynağı	Toplam Kurulu Güç (MW)	Yüzde (%)	Toplam Üretim (MWh)	Yüzde (%)
Hidrolik	31.962,06	29,23	63.854.222,03	19,66
Rüzgar	11.806,50	10,80	34.069.727,56	10,49
Güneş	13.998,25	12,80	18.606.600,61	5,73
Biyokütle	2.080,40	1,90	9.706.500,32	2,99
Jeotermal	1.691,34	1,55	10.997.593,06	3,39
Yenilenebilir	**61.538,54**	**56,28**	**137.234.643,58**	**42,25**
Termik	**47.810,18**	**43,72**	**187.559.207,68**	**57,75**
TOPLAM	**109.348,72**	**100,00**	**324.793.851,25**	**100,00**

Toplumların refah düzeyinin yükselmesi üretilen mal ve hizmet miktarıyla da ilişkilidir ve üretim sürecinde kullanılan enerjinin en yaygın ikincil kaynağı elektriktir. Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı, Şekil 3.10'dan görüldüğü gibi, artmaktadır.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de gösterildiği gibi, 2000 yılında %0,3 olan yenilenebilir enerji kaynakları payı 2023'te %23,4'e çıkmıştır.



Şekil 3.10. Türkiye'de 2000 yılı enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi



Şekil 3.11. Türkiye'de 2023 yılı enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi

3.2.3. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Dünyada olduğu gibi, Türkiye'de de rüzgar enerjisinin kullanımı yel değirmenlerine kadar geri gitmektedir. Yel değirmenleri, özellikle Ege ve Marmara bölgesinde, yüzyıllar boyunca gerek tahıl üretimi gerekse su çekme ve sulama amacıyla kullanılmıştır [8].

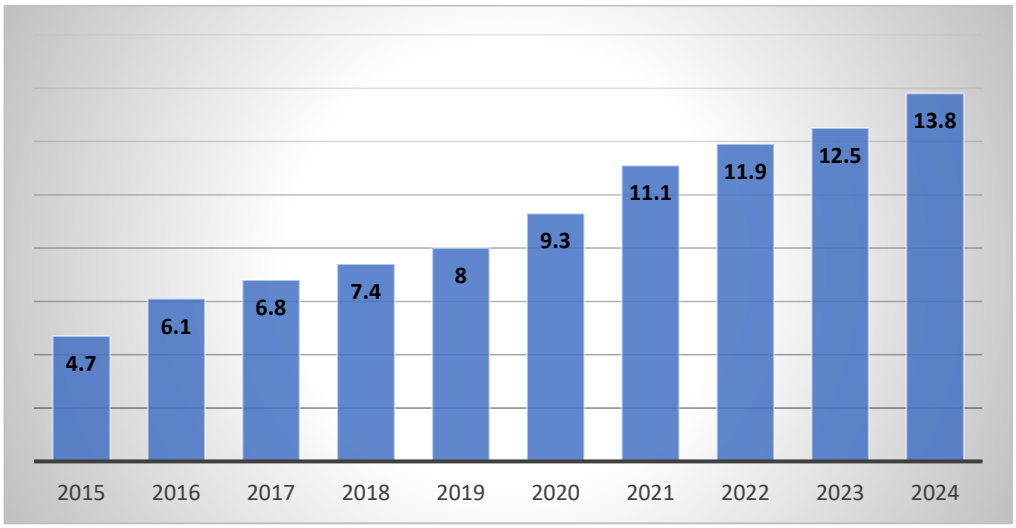
Rüzgarı yüksek tepelerin ve açık alanların varlığı, rüzgar enerjisini ülkemizin geleceği açısından potansiyeli en yüksek enerji kaynağı haline getirmektedir. Ülkemizin üç yanının denizle çevrili olduğu, uzun kıyı şeritlerine sahip olduğu ve deniz rüzgarlarının daha

verimli olduğu gerçeği dikkate alınırsa, deniz üstü rüzgar çiftliklerinin kurulmasının görece avantajlı olduğu söylenebilir. Türkiye, rüzgar enerjisi kaynaklarından etkin biçimde yararlandığı taktirde, coğrafi konumunun sağladığı avantajla, enerji sektöründe uluslararası düzlemde önemli bir oyuncu haline gelme potansiyeline sahiptir. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarına ağırlık verilmesinin gerisindeki en önemli neden, rüzgar ve güneş enerjisi teknolojilerinde azalan maliyetlerin, başka bir deyişle ölçeğe göre artan getirinin varlığıdır [5]. Bütün bu avantajların sonucu olarak, tüm dünyada gittikçe kritik bir yere sahip olan rüzgar enerjisi Türkiye için de önemli bir kaynak olmaya başlamıştır.

Türkiye'de son yıllarda rüzgar enerjisine verilen önemin göstergesi, 2020 yılında elektrik üretiminin %10'u rüzgar enerjisinden karşılanırken 2027 yılına kadar 16000 MW'lık ilave kapasitenin faaliyete geçirilmesinin hedeflenmesidir.

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgar ve güneş enerjisinin toplam elektrik kurulu gücü içindeki payı 2000-2023 yılları arasında dikkat çekici biçimde artmıştır. Mart 2025'te bu pay yaklaşık %36'dır. Rüzgar enerjisi kurulu gücü ise TEİAŞ verilerine göre, Mart 2024'te 12.082 megavattan %8,4 artışla Mart 2025'te 13.098'e çıkmıştır.

Şekil 3.12'de Türkiye'de 2015-2024 arasında rüzgar enerjisi üretimi verilmektedir. Grafikten görüldüğü gibi, 2015'ten sonra rüzgar enerjisi üretiminde sürekli bir artış ortaya çıkmıştır. Rüzgar enerjisi üretimi 2016'da 4,7 GWh'den yaklaşık %200 artışla 13,8 GWh'e çıkmıştır. En fazla artış %29,8 ile 2016 yılında ve %19,4 ile 2021 yılında gerçekleşmiştir.



Şekil 3.12. Türkiye'de rüzgar enerjisi (GWh) [27]

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği tarafından toplanan verilere göre, Türkiye'nin 7 bölgesinde kurulu yaklaşık 280 rüzgar santrali ve 4360'dan fazla rüzgar türbininin toplam kurulu gücü Şubat 2025'te 13 bin 43 megavata ulaşmıştır. Günlük elektrik üretiminde rüzgar enerjisinin payı %14'e yükselmiştir.

3.2.4. Türkiye'de Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi ölçümleri Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü (DMİGM) tarafından yapılmaktadır. Türkiye'de deniz üstü rüzgar gücü ,rüzgar hızının 6,5 m/s olduğu bölgelerde 17393.20 MW olduğu tahmin edilmektedir [5].

Türkiye için deniz üstü rüzgar enerjisi kaynağı alanlarının teknik olarak toplam 75 GW'lık potansiyele sahip olduğu tahmin edilmektedir. Bu konuda yapılan projeksiyonlar 2040 yılına kadar 7 GW'lık deniz üstü rüzgar enerjisi kapasitesi kurulması yönündedir [28].

Türkiye'de deniz üstü rüzgar enerjisi santralleri için saha büyüklükleri 2023 Ağustos'unda belirlenmiştir. Durak'ın [29] belirttiği gibi, "Bandırma açıklarında 1111 kilometrekare, Bozcaada açıklarında 299 kilometrekare, Gelibolu açıklarında 75,6 kilometrekare ve Karabiga kıyılarında 410 kilometrekare alan deniz üstü rüzgar enerjisi için tahsis" edilmiştir.

3.1.4.1. Rüzgar Enerjisinde Bölgesel Avantaj: Marmara Bölgesi

Marmara bölgesinin coğrafi özelliklerine bakılırsa, yaklaşık 67.000 kilometrekarelik yüzölçümüyle Türkiye yüzölçümünün %8,5'ine karşılık gelen bir büyüklüğe sahiptir. Bölgede yaşayan nüfus TÜİK 2022 yılı nüfus sayımına göre 26.650.405'tir. Türkiye genelinde "kilometrekareye düşen kişi sayısı" olarak ölçülen nüfus yoğunluğu 111 kişi iken, Marmara bölgesi yaklaşık 398 kişi ile nüfus yoğunluğu en yüksek bölgedir. Kuşkusuz bu durum, Marmara bölgesinin en fazla göç alan bölge olmasının yanında, bölgenin ülkenin sanayi, ticaret ve finans merkezi olma niteliğinin sonucudur. Marmara bölgesinin ülkedeki toplam sanayi üretimi içindeki payı %46,7'dir, ki bu ülke sanayiinin yaklaşık yarısının bu bölgede faaliyet gösterdiği anlamına gelmektedir.

Marmara bölgesinin ülke ekonomisi içindeki payı ve bu bölgede yaşayan ve istihdam edilen nüfus fazlalığı dikkate alınırsa, ülkedeki enerji gereksiniminin en fazla olduğu bölge

olduğu şüphe götürmez bir gerçektir. Enerji üretim tesislerinin enerji kullanımının en fazla olduğu bölgeye kurulması, enerjinin iletimi ve dağıtımı açısından büyük avantaj sağlayacaktır.

Türkiye'de rüzgar enerji santrallerinin kurulu gücü açısından en avantajlı bölge Marmara bölgesinin güneyidir [31]. T.C Resmi Gazete 'de yayınlanan bölgelerin özellikle İstanbul ve Bursa bölgelerine yakın olması belirtilen avantajı kanıtlar niteliktedir. Belirtilen iki şehre olan yakınlığı ile hem sanayinin fazlalığı (fabrikalar, üretim tesisleri) hem de nüfusun yoğunluğundan dolayı elektrik Türkiye'de elektrik tüketiminin en yüksek olduğu illerdendir.

Tablo 3.4. Marmara Bölgesindeki İllere Göre Elektrik Kurulu Gücü ve Tüketimi[30]

	Kurulu Güç (MW)	Tüketim (MWh)
İstanbul	3.746	53.703.000
Tekirdağ	1.570	9.726.000
Edirne	234	1.381.000
Kırklareli	1.937	3.442.000
Balıkesir	3.331	4.960.000
Çanakkale	4.743	3.967.000
Bursa	3.119	16.612.000
Bilecik	327	3.057.000
Sakarya	2.944	5.444.000
Kocaeli	2.260	14.768.000
Yalova	407	1.069.000

Güney Marmara Bölgesi Yenilenebilir Enerji Piyasası İstihdam Raporu'na göre, yenilenebilir enerji sektöründe yatırımların hızla devam etmesi halinde, 2035 yılına kadar kurulu güç ve istihdamın 2,5 katına çıkması beklenmektedir [32]. Rapora göre, Güney Marmara Bölgesinde rüzgar, güneş ve biyogaz santrallerinin kurulu gücü 2022 yılında, toplam 33 000 tam zamanlı istihdama karşılık gelecek şekilde, 2,85 GW'ı bulmuştur.

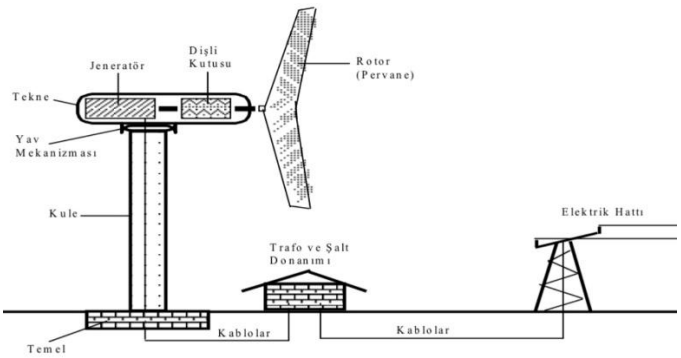
Deniz üstüne kurulan rüzgar türbinlerinin konum olarak büyük şehirler ve endüstriyel merkezler gibi enerji talebi yüksek olan bölgelere yakın olması tercih edilir. Bunun nedeni, enerji santrallerinin enerji ihtiyacı yüksek olan bölgelere yakın olmasının enerji iletim kayıplarını azaltmasıdır.

4. RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMİ

4.1. Rüzgar Türbini

4.1.1. Rüzgar Türbini Parçaları

Rüzgar gücünün belirli bir donanım aracılığıyla mekanik güç olarak kullanılması iki şekilde olmaktadır [9]: (i) un, yağ, bıçkı-hızar makinelerinin çalıştırılması, pamuk balyalarının sıkıştırılmasında kullanılan bir makineyi harekete geçirmek ve (ii) suyun pompalar yardımıyla içme amacıyla kullanıma hazır hale getirilmesi veya tarım alanlarının sulanması, fazla suyun tasfiyesi gibi amaçlarla doğrudan kullanımı. Rüzgar enerjisinin mekanik güce dönüştürülmesi için kurulan donanıma "rüzgar değirmenleri" ve rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren donanıma "rüzgar türbini" adı verilmektedir.



Şekil 4.1. Rüzgar Enerji Sistemi [9]

Rüzgar enerji sisteminde ana bileşen rüzgar türbinidir. Rüzgar türbini, rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye, yani elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar. Pervanelerin (rotor) rüzgarın gücüyle dönmeye başlamasıyla ortaya çıkan hareket, türbin mili üzerinden jeneratöre aktarılarak elektrik enerjisine çevrilir ve bu şekilde üretilen elektrik enerjisi genellikle yerel bir elektrik şebekesine aktarılır [33].[1]

Kurulu bir rüzgar türbininin türbin platformundan rotoruna kadar olan mesafeyi ifade eden hub (göbek) yüksekliği, türbinin yerden ne kadar yüksekte durduğunu göstermektedir. Rüzgar türbininin kule yüksekliği, yüzeyde engellerin, engebelerin var olduğu bölgelerde rüzgar makasındaki değişikliklerin yakalanması amacıyla artırılmaktadır.[2]

---

[1] Rüzgar türbinlerinin 1980'lerin başlarından 2010'lu yıllara kadar teknik gelişimini, kayıtlı kapasite, rotor çapı, hub yüksekliği, yakalanan (rated) ve cut-in rüzgar hızı olmak üzere beş parametre bazında inceleyen kapsamlı bir araştırma için bkz.[34].

[2] Kule yüksekliğindeki artışın sağladığı faydaların yanında bazı dezavantajları da vardır: Daha yüksek kulenin daha kalın olması taşıma vb. maliyetlerin yükselmesi anlamına gelmektedir.

Günümüzde rüzgar türbinlerinin büyük kısmı karada kuruludur. Karasal rüzgar türbinlerinin büyüklüğü gerek sermaye maliyetlerinin düşürülmesi gibi ekonomik gerekse daha iyi enerji üretimi yapılabilmesi amacıyla artmaktadır.

Karada kurulu ve denizlerde kurulu rüzgar türbinlerinde rotor çapında olan artış göbek yüksekliğini artırır. Güçlü rüzgardan yararlanabilmek için kulenin daha yüksek ve pervanelerin daha uzun olması gerekir. Enevoldsen and Xydis [34], kara rüzgar türbinleri için geçerli olan sorunun deniz üstü türbinler için geçerli olmadığını göstermektedir. Burada, göbek yüksekliği arttıkça kayıtlı kapasitenin aynı oranda arttığı varsayılmaktadır, ki bu kara türbinleri için geçerli bir eğilim iken deniz üstü türbinler için -deniz üstü rüzgar koşulları nedeniyle- geçerliliğini yitirmektedir.

4.1.2. Rüzgar Türbinlerinin Gelişimi

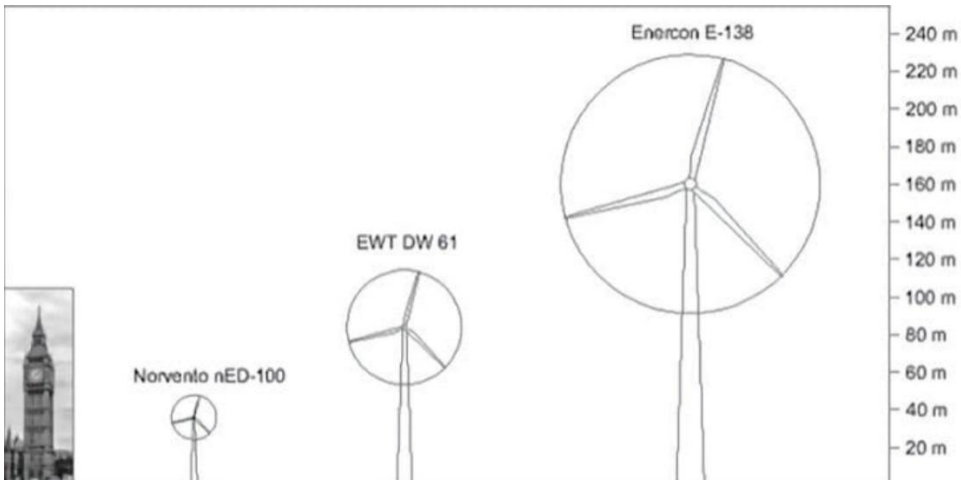
Rüzgar türbinlerinin zaman içindeki gelişim çizgisinin ve teknik özellikleri arasındaki ilişkilerin anlaşılması, gelecekte yüksek megavat rüzgar türbinlerinde ortaya çıkacak yenilikler açısından da çok önemli bilgiler içermektedir. Dünyanın ilk mega-watt rüzgar türbini, 1978 yılında Danimarka'da 2.0 MW kayıtlı kapasite (nameplate capacity) ve 54 m rotor çapı ile faaliyete geçmiştir. Tvind okulu öğretmenleri ve öğrencileri tarafından geliştirildiği için Tvindkraft ismini alan bu türbinin kuruluşu, rüzgar türbinlerinin çoğunun 10-110 kW ve rotor çapının 5-15 m olduğu 1975-1985 döneminde gerçekleşmiştir. O günden bu yana teknolojide ortaya çıkan gelişmelerle birlikte kule yüksekliği ikiye katlanmış ve rotor çapları kayıtlı kapasitenin yaklaşık sekiz katına çıkmış; 9.5 MW kapasiteli ve 164 m rotor çaplı rüzgar türbinlerinin kurulumu gerçekleşebilmiştir [34].

Şekil 4.2. Tvindkraft türbini [35]

Teknolojik gelişmelerdeki hıza paralel olarak 20.yy'ın ikinci yarısından itibaren, ortalama rüzgar türbini gücü bugünün 1.5 MW'lık ticari makineleriyle birlikte neredeyse doğrusal olarak artmıştır [6]. Şekil 4.3'te popüler rüzgar türbinlerinin ölçekleri gösterilmektedir. Enevoldsen and Xydis [34]'in gösterdiği gibi, rüzgar türbininin kayıtlı kapasitesi türbinin süpürme alanı (swept area) arttıkça artmaktadır. Karada kurulu çoğu rüzgar türbini projesinde belirtilen 1 ve 4 MW kapasite aralığında rotor çapı 50 m'den 140 m'ye kadar değişmekte; 4 MW'tan büyük kapasitelerde rotor çapı 100 m'den başlayarak 160 m'ye kadar çıkmaktadır.

Enevoldsen ve Xydis [34], kullandıkları istatistiksel modelde, deniz üstü türbinler için rotor çapı ile kapasite arasındaki ilişkinin 108 gözlem için 0.78'lik bir R^2 değeri bulurken, karadaki rüzgar türbinleri için 0,62 olarak bulmuştur.[3] Başka bir deyişle, deniz üstü rüzgar türbinleri için rotor çapı ile kapasite arasındaki pozitif ilişki karadaki benzerlerinden daha güçlüdür. Bu sonucun gerisinde, deniz üstü rüzgar enerjisi endüstrisinde rotor çapı ile kayıtlı kapasitenin, karadaki rüzgar endüstrisinden farklı olarak, paralel bir gelişme sergilemiş olması bulunmaktadır.[4]

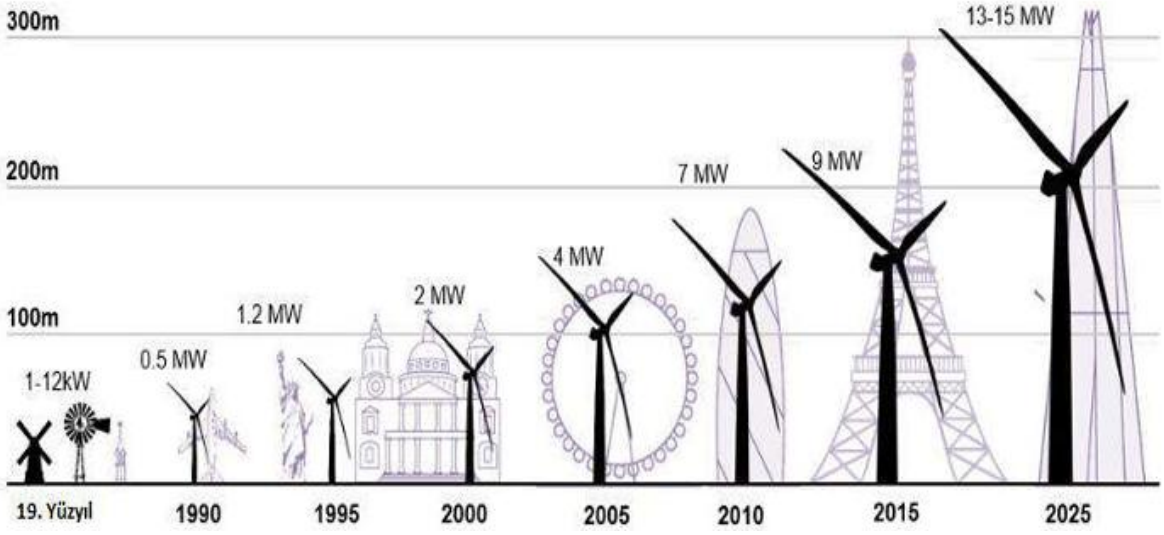
[3] R^2 , 0 ile 1 arasında değer alan ve istatistiksel modelin veri setindeki farklılıkları ne ölçüde yakaladığını ölçen bir değerdir: 0 olması modelin verilerdeki farklılıkları yakalama konusunda başarısız olduğu, 1 olması ise tüm farklılıkları yakalayabildiği anlamına gelmektedir.
[4] Karadaki rüzgar enerjisi endüstrisinde, kayıtlı kapasite yavaşça artarken rotor çapı artışı hızlı olmuştur.



Şekil 4.3. Rüzgar Türbini Ölçekleri [36]

Rüzgar türbinlerinin boyutunu tek başına değerlendirmek mümkün değildir; bu konuda bir ölçek kullanılması gerekmektedir. Şekilde örnek bazı türbinlerin maksimum güç çıkışı ile rotor çapı ve kule yüksekliği ilişkilendirilerek verilmektedir. Norvento nED-100 türbini maksimum güç çıkışı 100 KW'lık, rotor çapı 24 metre ve kule yüksekliği 36 metre iken, EWT DW 61 örnek türbini 1 MW maksimum güç çıkışlı, 61 metre rotor çaplı, kule yüksekliği 84 metre ve Enercon E-138 türbini 4,2 MW maksimum güç çıkışlı, 138,25 metre rotor çaplı, kule yüksekliği 160 metre olan bir türbindir [36].

Rüzgar türbini tasarımları zaman içinde teknolojideki gelişmelere paralel olarak gelişme göstermiştir. Geliştirilen her yeni rüzgar türbini nesliyle birlikte türbinlerin boyutu da artmış ve enerjinin yaşam döngüsü maliyetinde (life-cycle cost of energy) düşüşler ortaya çıkmıştır. Daha büyük türbinler geliştirme eğilimi esas olarak, yerden daha yüksekte rüzgarın daha hızlı, daha güçlü ve daha enerjik olmasının yarattığı avantajdan yararlanma isteğinden kaynaklanmaktadır. Rüzgar türbinlerinin kapasite faktöründe zaman içinde ortaya çıkan artışın temel nedeni budur [6]. Bununla birlikte, daha büyük çaplı türbin kurulumunun genel olarak daha maliyetli olması türbin boyutlarında süregiden artış eğilimini sınırlamaktadır.



Şekil 4.4. Rüzgar Türbini Gelişimi [29]

Deniz üstü rüzgar enerjisi piyasasının son on yılı, türbin güç derecesi ile rotor çapında sürekli bir artış yaratma arayışları tarafından şekillenmiştir. Şekil 4.4'te rüzgar türbini kurulu gücü ile rotor (pervane) çapının 1980 sonrası gelişim çizgisi verilmektedir [29]. 1990'ların ortalarına kadar ılımlı bir gelişme gösteren kurulu güç ve pervane çapı ilişkisi 1990'ların sonlarından itibaren hızla gelişmiştir. 1990'ların ortalarına kadar rüzgar türbinleri kW'lık güce sahipken, 1990'ların sonlarında MW'lık güce çıkmıştır. Rüzgar türbinlerinin rotor çapı 1990'da 40 m, 1995'te 70 m, 2000'de 80 m, 2005'te 120 m, 2010'da 126 m ve 2015'te 145 m olmuştur [37]. Özetlemek gerekirse, rüzgar türbinlerinin elektrik amaçlı kurulu gücü 1980-2012 yılları arasında 75 kW'tan 7500 kW'a çıkarken, aynı dönemde rotor çapı da 17 m'den 126 m'ye 7 kat artmıştır. Şekil 4.4'te 2025 yılı için geliştirilen 15 MW'lık referans rüzgar türbin örneği gösterilmektedir.[5]

4.2. Rüzgar Türbini Tipleri

4.2.1. Rotor Mil Eksenine Göre Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, genel çalışma prensipleri aynı olmakla birlikte, rotor mil eksenine göre iki ana gruba ayrılabilir: (i) Yatay eksenli rüzgar türbinleri, (ii) Dikey eksenli rüzgar türbinleri

[5] Referans rüzgar türbinleri (reference wind turbines, RWTs), güncel türbin teknolojisinin temsili modelleri için ulaşılabilir verileri sağlamaları nedeniyle rüzgar enerjisi alanında önemli bir amaca hizmet etmekte ve bu anlamda bir başvuru kaynağı işlevi görmektedirler.

4.2.1.1.Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)

Dünya genelinde en sık kullanılan rüzgar türbini türüdür, ticari olarak kullanılan türbinler genellikle yatay eksenlidir. Karada ve denizde kullanılabilir durumdadır. Özelliği, dönme ekseni rüzgar yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne dik olmasıdır. Yatay eksenli türbinlerin çoğu, önden rüzgar alacak şekilde tasarlanmıştır. Rotor kanat sayısı ile rotor hızı arasında ters orantı vardır. Rotor kanat sayısı azaldıkça, rotor daha hızlı dönmektedir. Rüzgar hızının, rotor kanadı uç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat uç hız oranı denir ve genelde (λ) ile gösterilir . Rotorlarda kullanılan kanat sayısı λ'nın büyüklüğüne göre belirlenmektedir [38], [39]:

λ= 1-5 aralığında ise, çok kanatlı rotor,

λ= 6-8 aralığında ise üç kanatlı rotor,

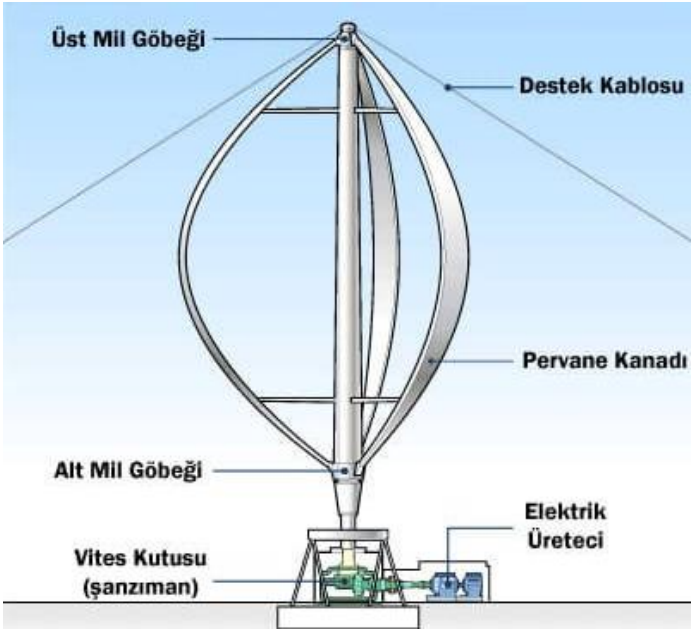
λ= 9-15 aralığında ise iki kanatlı rotor kullanılır.

Şekil 4.5. Deniz üstü yatay eksenli rüzgar türbinleri

4.2.1.2.Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT)

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin aksine pervane görünümüne sahip değildir. Dönme eksenleri rüzgar yönünün gelişine göre dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydir. Türbinlerin üreteç ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duymamaktadır. Rüzgar yönünden etkilenmedikleri için yönlendirici bir parçaya ihtiyaç duymazlar. Türbin kanat tasarımından dolayı verimleri düşüktür ve kule veya herhangi

türbini yerden yükseltecek başka bir parça bulunmadığı için daha düşük rüzgar hızlarında çalışmak durumunda kalırlar. İlk çalışmaya başlayacakları zaman kendi kendilerine başlayamazlar, bu yüzden çalışmadan önce şebekeden enerji çekmek zorunda kalırlar. Bu durumlar da enerji üretimini ciddi miktarlarda azaltmaktadır. Dikey rüzgar türbinleri kullanım olarak daha çok deneyseldir, ticari kullanımları çok azdır [40].



Şekil 4.6. Dikey eksenli bir rüzgar türbini ve ana parçaları

4.2.2. Rüzgarın Gelişine Göre Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, performanslarını artırmak için kurulmayı planlandığı bölgede ölçülen rüzgar yönlerine göre kurulmaktadır. Rüzgarın geliş yönüne göre, rüzgarı önden alan ve rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinleri, olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

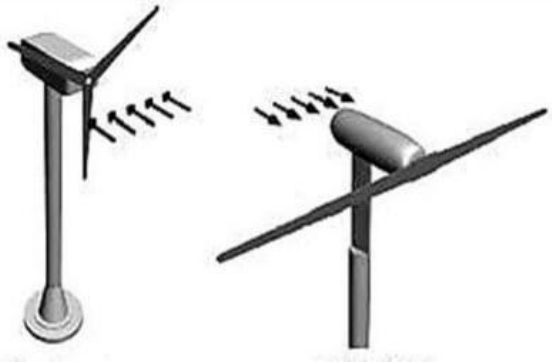
4.2.2.1. Rüzgarı Önden Alan Türbinler

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rotor yüzü rüzgara dönük olduğu durumlarda rüzgarı önden alan türbinler denmektedir. Bu rüzgar türbini tipinin sağladığı en büyük avantaj, kulenin kapladığı alan dolayısıyla yapacağı gölgeleme etkisine maruz kalmamasıdır. Bu duruma rağmen az da olsa bir gölgeleme etkisi vardır. Bu durumdan dolayı rüzgar kuleye eğilerek gelmektedir. Kulenin geometrik şekli yuvarlak ve düz olsa bile, kanatın kule hizasından geçtiği her anda türbinin performansı düşerek ürettiği güç azalmaktadır. Bu

sebepten ötürü kanatların çok sert yapılması ve kuleden biraz da olsa uzak mesafede yerleştirilmelidir. Aynı zamanda önden rüzgar alan türbinler, rotoru rüzgara karşı döndürmesi için yaw mekanizması bulundurmaktadır [40][6].

4.2.2.2. Rüzgarı Arkadan Alan Türbinler

Rüzgarı arkadan alan türbinlerde rotorları kule arkasına konumlandırılır. Bu sistemlerin en önemli avantajı rüzgara dönmek için sapma (yaw) mekanizmasına ihtiyaç duyulmamasıdır. Makine yuvası ve rotor kısımları uygun tasarlanırsa, makine yuvası rüzgarı pasif olarak izleyebilmektedir. Bu tip türbinlerde kanat kulenin olduğu hizadan geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgar alan türbinlere göre daha çok zarar verebilmektedir [38].



(a) **(b)**

Şekil 4.7. (a) Rüzgarı önden alan türbin, (b) Rüzgarı arkadan alan türbin

4.3. Deniz Üstü-Kara Rüzgar Santralleri Karşılaştırması

Haziran 2024 itibariyle dünyada en fazla deniz üstü türbinine sahip ülkeler, sırasıyla, Çin, İngiltere, Almanya ve Vietnam'dır. Dünya üstünde giderek artan deniz üstü rüzgar çiftlikleri, karada kurulan sistemlere göre bariz avantajları olduğu için deniz üstü rüzgar santrallerinin sayısının her geçen yıl artacağı öngörülmektedir. Bu avantajlardan en önemlilerinden biri, denizlerde rüzgarın çoğu zaman daha güçlü ve sürekli olmasıdır. Karada bulunan dağlar, binalar gibi engeller nedeniyle daha değişken olabilmektedir. Buna karşıt

[6] Yaw sistemi, rüzgar türbini kanatlarının rüzgara yönelmesini sağlayan kuyruk sistemidir.

denizdeki rüzgarlarda laminer bir akım hakimdir, bu durum daha az türbülans olmasına yol açar, bütün bu durumlar da daha fazla enerji üretilmesini sağlar.

Deniz üstü (offshore) rüzgar enerjisi santralleri (RES) ile karada kurulu (onshore) RES'ler arasında önemli bazı farklar şunlardır [8]:

-Deniz üstündeki rüzgar karadakine oranla daha yüksek ve istikrarlı olduğu için daha fazla enerji üretilebilir;

--Deniz üstü rüzgar türbini montaj ve kurulum maliyetleri karadakine oranla daha yüksektir;

--Deniz üstü rüzgar türbinlerine ulaşım daha zor olduğu için bakım maliyetleri daha yüksektir;

--Yüksek maliyetler nedeniyle deniz üstü rüzgar türbini projelerinin finansmanı daha büyük zorluk içerir;

--Deniz üstü rüzgar çiftliğinin işletilmesi karadakine oranla daha zordur.

Deniz üstü rüzgar türbinine ilişkin yukarıda ana hatlarıyla verilen avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi detaylandırabiliriz [41]:

Deniz üstü rüzgar türbinlerinin avantajları:

--Rüzgarın hızında ortaya çıkan çok küçük artışlar bile enerji üretiminde büyük artışlar yaratmaktadır. Açık denizdeki rüzgar genel olarak karadaki rüzgardan daha hızlı olduğu, örneğin 15-mph'lik bir rüzgar türbini 12-mph'lik türbinden iki kat daha fazla enerji üretebildiği için, deniz üstü rüzgar türbini kurmak çok daha verimli sonuçlar verir;

--Enerji üretiminde en önemli niteliklerden birisi, istikrarlı ve güvenilir bir üretim sürecidir, ki açık denizdeki rüzgar kara rüzgarından genellikle daha istikrarlı ve sürekli olduğu için, deniz üstü rüzgar türbinleri de karadaki türbinlerden daha güvenilir ve istikrarlı bir enerji kaynağıdır;

-- Genellikle turizm amaçlı kullanıldıkları için, kıyı bölgelerindeki yerleşim yerlerindeki enerji gereksinimi diğer bölgelerden daha yüksektir. Deniz üstünde bu bölgelere yakın santraller kurulması, enerji talebinin daha yakın kaynaklardan elde edilebilmesini sağlar;

--Deniz üstü rüzgar türbinlerinde türbülans yoğunluğu daha düşüktür;

--Deniz üstü rüzgar türbinlerinin yarattığı görsel ve işitsel kirlilik kara türbinlerinden daha azdır;

--Deniz üstü rüzgar çiftlikleri bazı açılardan karadaki çiftliklerle aynı avantajlara sahiptir, ki bunlardan birisi her iki rüzgar enerjisi tipinin de yenilenebilir enerji kaynağı olması, su tüketmemesi, yerli bir enerji kaynağı olması, istihdam olanağı yaratması ve çevre kirliliğine yol açan atık madde, sera gazı salınımı yaratmamasıdır.

Deniz üstü rüzgar türbinlerinin dezavantajları:

--Yaklaşık 60 metreden derin sularda sağlam ve güvenli rüzgar çiftliği kurulması oldukça güçtür; rüzgarın çok güçlü olduğu fırtına ve kasırga durumlarında ortaya çıkan dalga hareketleri ve rüzgar türbinlere zarar verebilir;

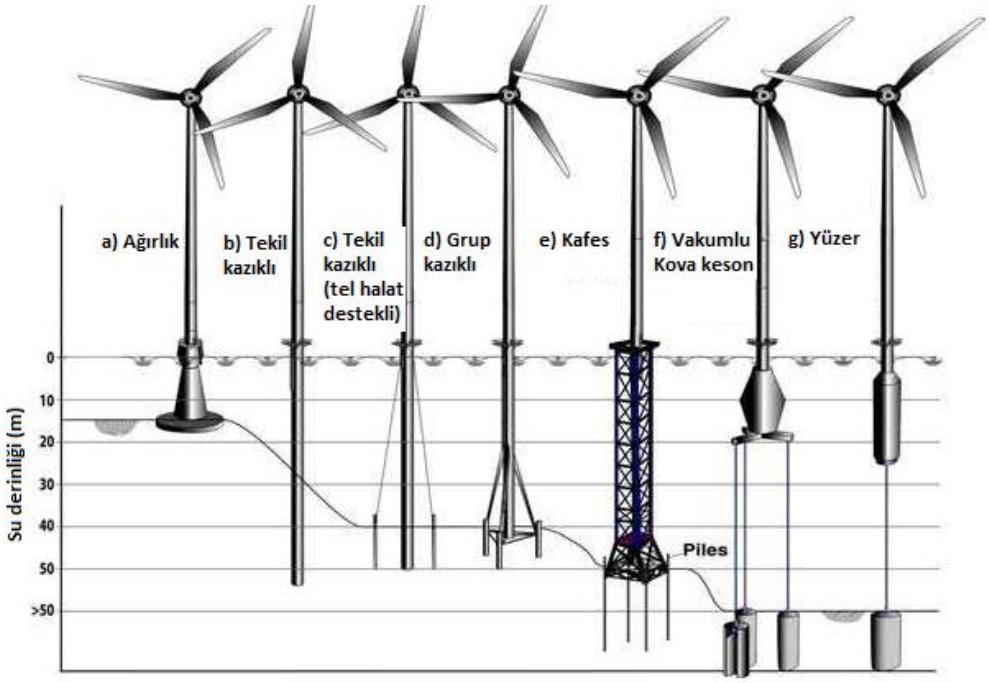
--Rüzgar türbinlerinde üretilen elektriğin karaya transferi için deniz zeminine yerleştirilen güç kablolarının üretimi ve kurulumu çok maliyetli olabilir;

--Deniz üstüne kurulan rüzgar türbinlerinin denizde yaşayan canlılar ve kuşlar üzerine etkileri tam olarak bilinmemektedir;

--Kıyı şeridine yakın kurulan rüzgar türbinleri yörede yaşayan kişilerde hoşnutsuzluk yaratabilir; bölgedeki turizm faaliyetlerini ve mülklerin piyasa değerini olumsuz etkileyebilir.

4.4. Deniz Üstü (Offshore) Rüzgar Türbini Tipleri

Deniz üstü rüzgar türbinleri sınıflandırıldığında genel olarak 2 ana gruba ayrılır; bunlar sabit ve yüzen türbinlerdir. Her iki grubunda farklı türleri vardır. Sabit rüzgar türbinlerine baktığımızda bunlar; ağırlık, tekil kazıklı, tekil kazıkla ancak tel halat destekli, grup kazıklı ve kafes vb. türlerden oluşur. Her bir farklı tür, farklı bir koşulda çalışarak farklı temel türlerine sahiptir.



Şekil 4.8. Rüzgar türbini temel türleri [42]

4.4.1. Tekil Kazıklı (Monopile) Deniz Üstü Rüzgar Türbini

Bu tezde tekil kazıklı (monopile) temele sahip olan deniz üstü rüzgar türbinlerinin üstünde durulmuştur. Tekil kazıklı temel yapısı, daha basit ve sağlam bir tasarıma sahip olması nedeniyle, diğer temel tiplerinden çok daha yaygın kullanılan temel tipidir. Tekil kazıklı temel son yıllarda yaygın olarak kullanılan popüler bir temel türüdür. Tekil kazıklı temel 2016 yılı sonuna kadar Avrupa'da kurulan deniz üstü rüzgar türbinlerinin %80,8'inin temel yapısını oluşturmaktadır [43].

Tekil kazıklı deniz üstü rüzgar türbinleri, denizlerde kıyılara yakın kısımlara kurulmaları zorunludur. Şu anda faaliyette olan deniz üstü rüzgar türbinlerinde, özellikle karaya yakın kurulan rüzgar türbinlerinde sıklıkla tekil kazık temeline sahip rüzgar türbinleri tercih edilir. Bu durumun en büyük nedenlerinden biri tekil kazıklı temele sahip olan rüzgar türbinlerinin, yeraltına kurulumu diğer seçeneklere göre daha kolay bir şekilde kazılarak kurulabilir. Derin sularda (açık denizler, okyanuslar) tekil kazık kullanmak mantıksız olacağı için yüzen türbin türleri tercih edilmektedir. Ayrıca tekil kazıkların diğer seçeneklere göre daha düşük maliyetli olması tercih edilme miktarını artırmaktadır. Bunun en büyük nedeni diğer temellerde kullanılan malzeme miktarının yüksek olmasıdır.

40 metreye kadar olan derinlikteki sularda kullanılabilen çelik tekil kazıkların 35 metreden daha sığ sulardaki deniz üstü türbinlerde kullanımı konusunda görüş birliği söz konusudur. Tekil kazıkların avantajlarını ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [44]:

Avantajları:

--Kum ve çakıllı topraklarda iyi performans gösterirler;

--Kolaylıkla kurulumu yapılabilen basit dizaynları vardır;

--Çeşitli ölçülerde sığ ve derin sulara kuruluma ayarlanabilir;

--40 metreye kadar kurulumları maliyet-etkindir; başka bir deyişle maliyeti minimize ve elde edilen ürün miktarını maksimize etmek için kullanılabilir.

Dezavantajları:

--Hidrodinamik yüklerin sorun oluşturduğu daha derin kurulumlar için gereken daha büyük kazıkların üretimi, kurulumu ve taşınması maliyetli ve riskli olabilir;

--Kazıkların kurulumu aşamasında çıkan gürültü, basınç dalgalarına duyarlı olan deniz canlılarının yaralanmasına veya ölümüne neden olabilir;

--Rüzgar, dalga ve sismik yükleme tekil kazıkları olumsuz etkileyebilir. Kurulum aşamasında bu tip sorunların ortaya çıkabileceği hesaba katılmamışsa, bu yapının erken yorulma hasarına yol açabilir.

4.4.1.1.Tekil Kazıklı Temel Tasarımı

Deniz üstü rüzgar enerjisi projelerinde maliyetlerin düşürülebileceği alanlardan birisi, daha iyi tasarımların, daha ucuz üretimin ve daha kolay kurulumun mümkün olduğu "destek yapı" sistemidir [45]. Şu anda geçerli olan destek yapı sistemi tasarımına göre tekli kazıklı (monopile) temel yapısı, seri üretime uygun basit bir tasarıma sahip olması ve geleneksel "darbeli kazık çakma (impact driving)" yöntemiyle kurulabilmesi nedeniyle, görece düşük risk taşımakta ve zemin tiplerinin çoğuna uyum sağlamaktadır.[7]

[7] Darbe kazık çakma sistemi, açık deniz rüzgar türbinlerinin temellerini deniz tabanına sabitlemek için kullanılan ve bir kazığı tortuya zorlama işlemidir. Darbeli kazık çakmada, çelik bir kazığın tepesine çekiçle vurularak havaya, suya ve tortuya ses gönderilir [46].

Tekil kazıklı rüzgar türbinlerinin enerji kapasitesi, tekil kazığın çapı ve suyun derinliği birlikte analiz edildiğinde, 6-8 MW'lık rüzgar türbinlerini destekleyen kazıkların 35 m'ye kadar su derinliği için tasarlandığı ve bu kazıkların 7,5 m çapta olduğu görülmektedir. 10 m'ye kadar çapa sahip kazıkların teknik olarak 60 m'ye kadar su derinliğine uygun olduğu söylenebilir. Ancak, daha büyük türbinler ve daha yüksek su derinliği tekil kazığın teknik uygunluğunu, özellikle de dalga hareketlerinin türbin yapısının dinamiklerine gittikçe daha fazla etki etmesi durumunda, bozabilir [45].

4.4.1.2.Tekil Kazıklı Rüzgar Türbini Taşınması

Karada kurulacak rüzgar türbini çiftlikleri genellikle şehirden uzak, dağların tepelerine kurulmak istenmektedir. Gürültü ve daha laminer bir akımın olması bu durumu getirir. Ancak türbinlerin kurulmak istenen yerlere taşınması ciddi sıkıntılar doğurmaktadır. Türbinlerin uzunluğu ve ağırlığı yüzünden kule kısmı birçok kısma ayrılmak zorunda kalmaktadır. Ayrılan kısımların montaj işlemleri kurulacakları yerlerde sağlanmaktadır. Bu parçaların taşınması özel taşıma araçları ve ekipmanlar kullanılmaktadır. Karayolları trafik yönetmeliği 128. Maddesi'nde açıkça en fazla taşıyabilecekleri yük için araçların azami ağırlıkları ve uzunlukları belirtilmiştir. Bütün bu kısıtlamalar karada kurulabilecek bir rüzgar türbini çiftliğindeki türbinlerin boyutlarını kısıtlamaktadır.

4.4.1.3.Tekil Kazıklı Türbin Montaj İşlemleri

Deniz üstü rüzgar türbinleri genellikle deniz kıyılarında kurulan tersane benzeri fabrikalarda üretilir. Bu durum da deniz üstü rüzgar türbinlerinin, karadaki rüzgar türbinlerine göre en büyük avantajlarından biri olan lojistik işlemlerinin rahatlığını doğurur. Deniz kıyısında üretilen devasa rüzgar türbinleri gemilere yüklenir. Deniz tabanının jeolojik yapısı önceden değerlendirilmiş olan bölgeye, kaldırma kapasitesi yüksek olan özel gemiler aracılığıyla taşınır. Gemiler tarafından taşınan rüzgar türbinlerinin tam olarak istenilen yere yerleştirilmesi için özek GPS (global konum belirleme) sistemleri kullanılmaktadır. Türbin tarafından oluşturulacak yükler, dalga kuvvetleri göz önünde tutularak kazık boyutu ve çakma derinliği belirlenir. İlk olarak kazık deniz tabanına dik olarak yerleştirilir, ardından su altında oluşabilecek aşırı gürültüyü azaltmak için hidrolik veya titreşimli çekiçler kullanılmaktadır. Bu işlemler sırasında düzenli kontrol sağlanarak çakma derinliği ve açısı istenilen düzeyde tutulur. Çakılma işlemi tamamlanan kazığın üstüne türbin kulesi yerleştirilir, sonrasında jeneratör ve kanatlar monte edilir. Montajı tamamlanan sistem test

edilir, başarılı olursa rüzgar enerjisi üretimine başlamaktadır. Belirtilen işlemler ekolojik sisteme zarar vermemek için deniz canlılarının üreme dönemlerinde yapılmamaktadır.

4.5. Türkiye'de Deniz Üstü Rüzgar Santrali: Yer Seçimi

Rüzgar enerjisinden yararlanma yönünde karar verilmesi sonrasında yanıtlanması gereken bir soru ortaya çıkmaktadır, ki bu rüzgar türbinlerinin karada mı yoksa deniz üstünde mi kurulması gerektiğidir. Bu sorunun yanıtı yukarıda belirtilen fayda ve maliyetler ile göreli avantaj ve dezavantajlar dikkate alınarak verilmelidir. Bugün gelinen noktada, rüzgar enerjisi ticari değeri en yüksek ve en umut verici teknolojilerden birisi olarak görülmektedir. Deniz üstü rüzgar enerjisi kaynaklarının 2050'de dünyanın elektrik talebini tek başına karşılamaya yeteceği tahmin edilmektedir [47].

Karada kurulan rüzgar santralleri, o bölgelerde yaşayan yerel halklar tarafından çok sayıda tepkiyle karşı karşıya kalmaktadır. Gelen tepkilerden çoğu rüzgar türbininin çok yüksek ses çıkararak halkın huzurunu bozduğu yönündedir. Birçok santralin kurulu olduğu Çanakkale'deki yerel bir gazete haberi bu sorunu şu şekilde yansıtmaktadır [48]: *"köy sakinleri yine Ezine Mahmudiye'de yapılan kapasite artırımı toplantısında olduğu gibi rüzgar türbinlerinin çıkardığı sesten şikayetçi oldu."* Haberden de anlaşıldığı üzere, rüzgar türbininin çıkarttığı ses halkın yaşamını ciddi şekilde etkilemektedir. Rüzgar türbinlerini denize kurarak ses sorunu kolaylıkla ve kesin bir şekilde engellenebilir. Aynı zamanda sistemler karadan denize taşınırsa karadaki arazi daha etkili şekilde kullanılabilir duruma gelecektir. Yerel halkı pozitif yönde etkileyebilecek diğer konular, karada yerleşim kurulabilir ve/veya tarım, hayvancılık gibi faaliyetler yapılabilir hale gelecek olmasıdır.

4.5.1. Sınırlamalar

Bu tezde, gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi için yapılan ölçümlerin analiz edilmesi ve dikkate alınması gereken sınırlamalar bulunmaktadır. Çeşitli gözlem ve ölçümlerle birlikte gelecekte tekil kazıklı bir rüzgar türbinine etki edebilecek kuvvetlerin tahmin edilebilmesine olanak sağlanmıştır. Çalışmada hangi bölgelerdeki ölçümlerin kullanılacağı konusunda, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Resmi Gazete' de yayınlanmış olan 4 bölge referans alınmıştır. Bu bölgeler dışında başka bir bölgede yapılacak bir çalışmanın

yakın zamanda uygulanabilmesi mümkün gözükmemektedir. Şekil 4.9'da belirlenen bölgeler kırmızı içinde gösterilmiştir.

Belirlenen bölgeler ve büyüklükler;

Bandırma'da 1111 km^2

Bozcaada'da 299 km^2

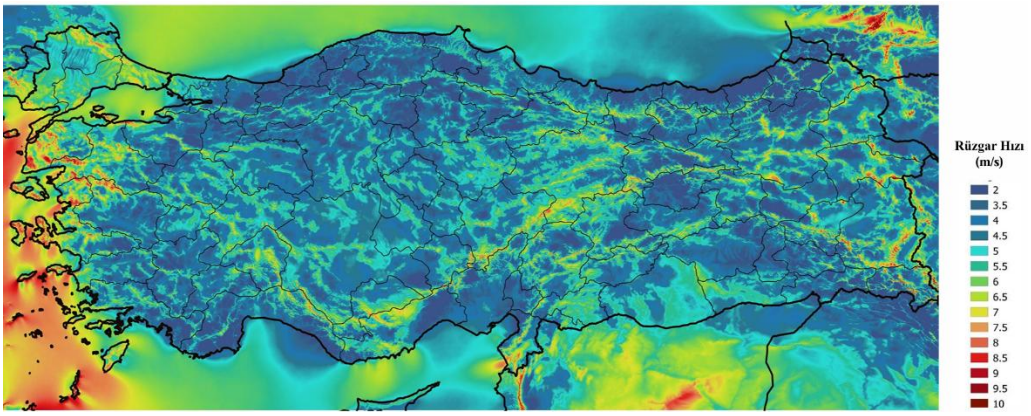
Gelibolu'da 75,6 km^2

Karabiga'da 410 km^2

Şekil 4.9. Resmi Gazete' de yayınlanmış deniz üstü RES kurulum alanları

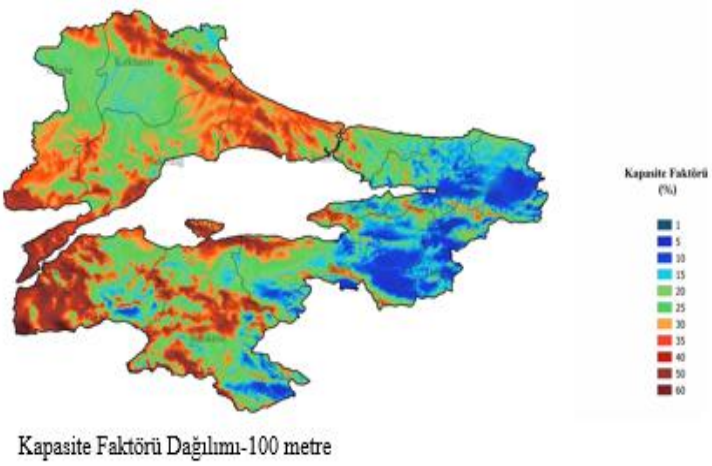
Rüzgar türbinleri, rüzgar hızlarının yüksek ve düzenli olduğu yerlere kurulmalıdır. Rüzgar türbininin kule yüksekliğinden dolayı aynı bölgedeki deniz seviyesindeki rüzgardan daha hızlı bir rüzgar kullanmaya yarar. Bunun nedeni, rüzgardaki gücün hızın küpüyle orantılı olmasıdır. Bunun anlamı, 9 m/s'lik rüzgar gücü olan bir alandaki rüzgar türbininin 6 m/s'lik gücün olduğu bir alandakine oranla üç kat daha fazla yüke maruz kalacak olmasıdır [36]. rüzgar gücünün yüksek olduğu bölgelere kurulacak bir rüzgar türbininin ömrünün kısalması, daha hızlı aşınması ve yıpranmasının nedeni budur.

Rüzgar enerjisi santrallerinin kurulum yerinin belirlenebilmesi için öncelikle rüzgar potansiyelinin araştırılması gerekir. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA), ülkemizde rüzgar enerjisinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için öncelikle rüzgar kaynaklarının, başka bir deyişle rüzgar potansiyelinin araştırılarak ortaya konulması amacına yönelik bir çözüm önerisi olarak geliştirilmiştir [2].



Şekil 4.10. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli [49]

Rüzgar türbini kurulumunun ekonomik olarak uygulanabilir olması için rüzgar hızının en az 5.4 m/s olması gerektiği göz önüne alınırsa, kurulum yeri açısından seçeneklerin oldukça sınırlı olduğu açıktır. Şekil 4.10'de görüldüğü gibi, Türkiye'de rüzgar enerjisi potansiyelinin en yüksek olduğu bölgeler, Ege ve Marmara bölgelerinin kıyı kısımlarıdır.



Şekil 4.11. Marmara bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli[8] [49]

[8] Kapasite faktörü dağılımı 3 MW gücündeki rüzgar türbinine ait teknik değerlere göre hazırlanmıştır

Deniz üstü rüzgar türbinleri için kurulum yeri açısından Marmara bölgesi, ekonomik açıdan avantajlı konumunun yanı sıra, rüzgar gücü açısından da avantajlı bir bölge olarak öne çıkmaktadır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı bünyesindeki Enerji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan "Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli" raporuna göre, Marmara Bölgesinin yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı, yıllık ortalama rüzgar güç yoğunluğu dağılımı ve kapasite faktörü dağılımı aşağıda verilmektedir.

Rüzgar türbininin gerçek güç çıktısının nominal veya maksimum güç çıktısına oranını ifade eden "kapasite faktörü", rüzgar türbininin belirli bir zaman diliminde belli bir konumdaki nominal ve gerçek güç üretimi arasındaki farktır [50].

Rüzgarın hızıyla gücü arasındaki orantılı ilişki rüzgar türbini kurulumu için yer seçimini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Rüzgar çiftliğinin kurulacağı yer "uzak olmalı ancak çok fazla uzak olmamalıdır. Örneğin, limandan çok uzak bir yer seçilmesi maliyetleri artıracak; çok yakın bir yer seçilmesi ile gemi trafiğinde sorunlara yol açacaktır [51]. Rüzgar türbini için seçilecek yer, bölgede yaşayan insanlara çok yakın olmamalı, ancak kurulum ve işletim için yeterince güç ve taşıma altyapısına sahip olmalıdır [52]. Kurulum yerinde rüzgar gücü yüksek olmalarıdır, ancak enerji üretiminin çevreye zarar vererek yapılması sonucunu yaratmamalıdır. Dolayısıyla, rüzgar türbinleri için kurulum yeri seçimi, teknik koşulların yanı sıra çevresel faktörlerden de etkilenmektedir. Caceoğlu [51], deniz üstü rüzgar çiftliği için kurulum yeri seçiminin, konunun farklı boyutlarının dikkate alınmasını gerektiren disiplinler arası bir çalışma alanı olduğu vurgusunu yapmaktadır.[9]Yer seçimi probleminin çok boyutlu olması, seçimi de problemli hale getirebilmektedir.

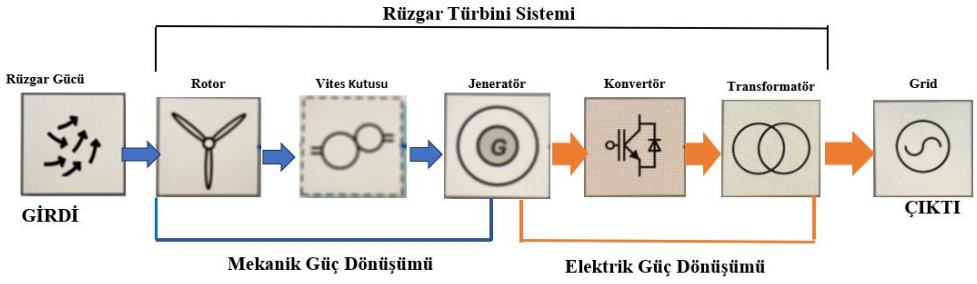
Türkiye'de deniz üstü rüzgar türbini kurulabilecek bölgeler idari olarak belirlenmiş durumda olduğu için, çalışmamızda deniz üstü rüzgar türbini yer seçimi sorununun çözümü ile ilgilenilmemekte, bu sorun veri kabul edilmektedir.

[9] Örneğin, rüzgar santrali projesinin sahibi veya geliştiricisi rüzgarın yüksek hızda estiği bir bölgede minimum maliyetle, mümkün olan en yüksek enerji üretimini yapmak isterken, elektrik mühendisleri mevcut elektrik iletim sistemine bağlanmanın uygun göründüğü bir yerde kurulum yapmayı ve bu şekilde ulusal elektrik şebekesinde sorun yaratmamayı tercih edebilir [51].

5. TÜRKİYE İÇİN DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNİ OPTİMİZASYONU

5.1. Rüzgar Türbini Çalışma Prensipleri

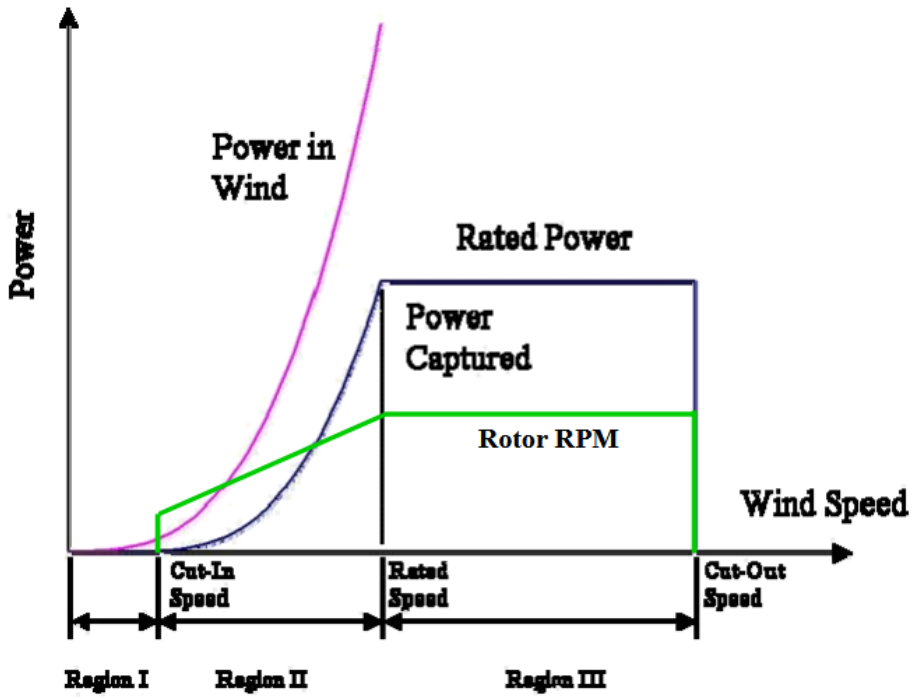
Şekil 5.1'de tipik bir rüzgar türbin sisteminde rüzgar gücü girdisinin elektrik enerjisi çıktısına dönüşüm sürecinin aşamaları verilmektedir. Bu süreçteki ana bileşenler, türbin pervanelerinin olduğu rotor, vites yani dişli kutusu (direct-drive çözümlerde bu parça bulunmaz), elektrik jeneratörü, güç konvertörü ve transformatördür.



Şekil 5.1. Rüzgar Türbin Sisteminde Güç Dönüşüm Aşamaları [53]

Rüzgar türbinlerinin ana çalışma prensibi, rüzgar kuvvetinden sağlanan kinetik enerjiyi elektrik enerjisine sağlamaktır. Her tür rüzgar türbini için geçerlidir bu durum. Rüzgardan sağlanan kinetik enerji kanatlar ve göbeğin bağlandığı rotor kısmında mekanik enerjiye çevrilmektedir. Rotor mili sağlanan mekanik enerjiyle birlikte devir hareketini hızlandırır, gövdedeki jeneratöre aktarır. Jeneratörde elde edilen elektrik enerjisi sistemde akü var ise depolanır yoksa direkt olarak kullanılmak üzere alıcılara ulaştırılır. Rüzgar türbinleri birçok farklı bileşenden oluşur bunlar genel olarak; kanatlar, kule, dişli kutusu, jeneratör ve elektik-elektronik elemanlarından oluşmaktadır [40].

Şekil 5.2'de rüzgar türbini için güç eğrisi gösterilmektedir. Burada, türbinin devreye girdiği minimum rüzgar gücü "Cut-in rüzgar hızı" olarak ve türbinin devreden çıktığı rüzgar gücü "cut-out rüzgar hızı" olarak isimlendirilmekte ve Rotor RPM, dakikadaki devir sayısını göstermektedir. Yakalanan veya nominal rüzgar hızı (rated wind speed), rüzgar türbininin kanatları üzerindeki aerodinamik kuvvetleri sınırlamak ve kanat eğim açısını değiştirerek üretilen gücü sabit tutmak için bir kontrol sisteminin devreye girdiği rüzgar hızıdır.



Şekil 5.2. Rüzgar türbini güç eğrisi [6]

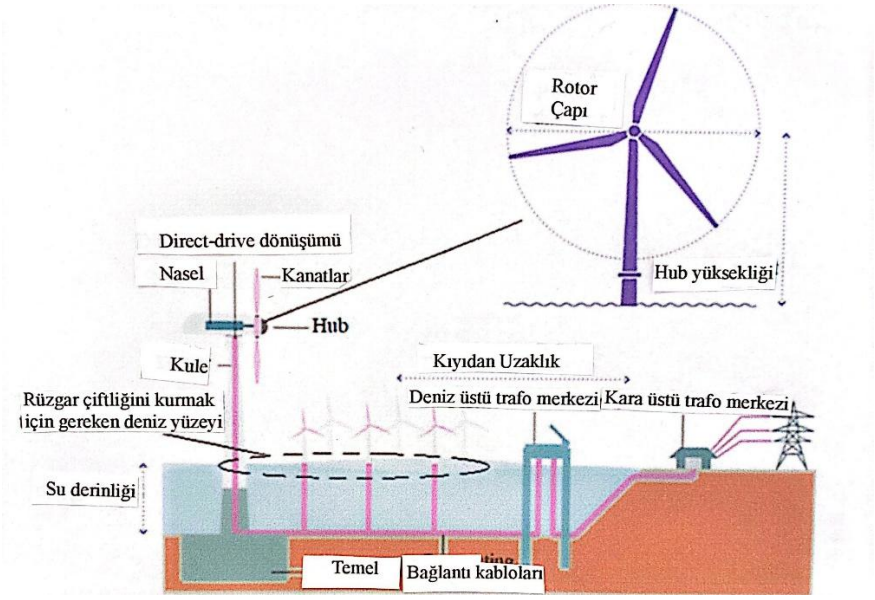
Cut-in rüzgar hızı, rüzgar türbininin elektrik üretmeye başladığı anı belirlemektedir. Rüzgar gücünün düşük olduğu bölgelerde daha düşük bir cut-in rüzgar hızı ideal olmaktadır. Yakalanan veya nominal rüzgar hızı (rated wind speed) rüzgar türbininin maksimum elektrik çıktısı yarattığı anı belirlemekteyken, daha düşük bir nominal rüzgar hızı rüzgar türbinini çoğu bölge için ideal hale getirmektedir. Enevoldsen and Xydis [34], nominal rüzgar hızının zaman içinde düştüğünü, ancak cut-in rüzgar hızı için belirgin bir gelişme kalıbı gözlenmediğini bulmaktadır.

Rüzgar türbini güç eğrisinin gösterdiği gibi, rüzgarın bir enerji kaynağı olarak doğanın kendi dinamiklerinin bir ürünü olması, dolayısıyla yapısı itibariyle her zaman aynı düzende ortaya çıkmamasıdır [11]. Cut-in ve cut-out rüzgar hızları rüzgarın bu yapısını yansıtmaktadır. Rüzgar insan kontrolü dışında gelişen bir faktör olduğu için, doğa olaylarına bağlı olarak bazen hiç esmez, bazı dönemlerde ise türbinin çalışmasını olanaksız hale getirecek kadar yüksek hızda esebilir. Bu iki uç durumda rüzgar türbininin rüzgardan bir enerji kaynağı olarak yararlanamayacağı belirtilmelidir.

Rüzgarın bir enerji kaynağı olarak yukarıda kısaca aktarılan özelliği, rüzgar türbini için kurulum yeri seçimini daha da önemli hale getirmektedir. Rüzgar enerjisinin deniz üstü türbinler aracılığıyla sağlanması yönündeki tercihlerin gerisindeki itici güç de rüzgarın istikrarlı ve güvenilir biçimde sağlanması gereği olmuştur.

5.1.1. Deniz Üstü (Offshore) Rüzgar Türbini

Deniz üstü rüzgar enerjisi, aşağıdaki Şekil 5.3'ten görüldüğü gibi, denizdeki rüzgarların gücünden alınan enerjinin elektriğe dönüştürülerek karadaki elektrik şebekesine verilmesidir.



Şekil 5.3. Deniz üstü rüzgar enerji santrali [54]

Şekil 5.3'ten görüldüğü gibi, deniz üstü rüzgar enerjisi santrallerinin temel unsurları, deniz üstü rüzgar türbini, su altı kabloları, ünite trafosu, deniz üstü şalt sahası (elektriği ileten ve dağıtan sistem) , deniz altı enerji nakil hattı, kara üstü enerji nakil hattı ve kara üstü trafo merkezidir [29].

5.1.2. Rüzgar Türbini: Etki Eden Kuvvetler

Rüzgar türbininde, rüzgarın esmesinden kaynaklanan kuvvetler sayesinde rotor kısmı döner ve rüzgar hızının oluşturduğu kinetik enerji sayesinde elektrik enerjisi üretimi gerçekleşir. Rüzgar türbininde enerji üretim hızı, hava yoğunluğu (ρ), rotor dönüşü sırasında taranan alan (A) ve belirli bir hıza kadar rüzgar hızıyla (V) doğru orantılıdır.

$$\text{Rüzgar Gücü} = \frac{1}{2}\ \rho\ A\ V^3 \tag{5.1}$$

Rüzgar gücü denklemi ve ilgili teori dikkate alındığında, rüzgar türbinlerindeki rotor çapının daha büyük olması, enerji üretimini doğrudan artıran bir faktör olarak gözükmektedir. Aynı zamanda yukarıdaki denkleme bakıldığında rüzgar gücü, rüzgar hızıyla doğrudan bağlantılı olmasının yanı sıra rüzgar hızının küpüyle de orantılı olduğu için, rüzgar

hızında artış rüzgar enerjisinde kat ve kat artış yaratmaktadır. Bununla birlikte, rüzgar enerjisi üretimini artıran bir diğer faktör olan türbinin rotor alanının artışı, maliyet artışına da yol açmaktadır. Bu durumdan dolayı, seçilecek bölgede en optimal rotor alanının seçimi kritik bir önem taşımaktadır.

Thresher et al. [6]'da vurgulandığı gibi, rüzgar türbinlerinin büyüklüğü -başka deyişle boyutu- konusunda bir sınır olduğu görüşü "kare küp kuralına" dayanmaktadır. Bu kurala göre, "rüzgar türbini rotoru boyut olarak büyüdükçe rotor-süpürme alanıyla (rotor-swept area) birlikte yaratılan enerji çıktısı da artarken, kullanılan materyalin hacmine bağlı olarak kütlesi ve maliyeti de çapın karesi kadar artar". Başka bir deyişle, belirli bir büyüklüğe ulaşıldıktan sonra, daha büyük bir türbinin maliyeti ortaya çıkan enerji çıktısı cinsinden gelirden daha hızlı büyüyecektir. Mühendisler bu sorunun üstesinden gelmek için, boyutu artırıp materyali kaldırarak veya materyali ağırlık ve maliyeti kısacak şekilde kullanarak, tasarım kurallarını değiştirmişlerdir.

Rüzgar enerjisine etki eden kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülme süreci teorik olarak ifade edilirken, rüzgar gücünün rüzgar türbinleri tarafından elektrik enerjisine dönüştürülebilecek kısmı aşağıdaki formül ile hesaplanabilmektedir.

$$P = \frac{1}{2}\rho C_p RAV^3 N_G N_D N_C \tag{5.2}$$

Yukarıdaki formülde; C_p güç faktörü, A rotor dönüşü sırasında taranan alan (m^2), N_G jeneratör verimi, N_D dişli kutusu verimi ve N_c ise kuplaj verimidir. Formülde bulunan C_p (güç faktörü), elde edilen şaft gücünün rüzgar türbinine gelen rüzgar gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. C_p yani güç faktörünün alabileceği en yüksek değer %59,3 olup bu değere Betz Limiti denir. U kanatların dönüş hızı, V kanatlara çarpan rüzgar olmak üzere C_p, U ve V oranının bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon aşağıda belirtilmiştir.

$$C_p = f\left(\frac{U}{V}\right) \tag{5.3}$$

Yukarıdaki ifadeden de anlaşılabileceği gibi, elde edilebilecek rüzgar enerjisinin en yüksek seviyede kalabilmesi için rotor dönüş hızının, anlık rüzgar hız değişimlerine göre değiştirilerek kanat ucu çevresel hız oranını en yüksek C_p değerini vermesi gerekmektedir.

5.2. Literatür Taraması

Deniz üstü rüzgar enerjisinden yararlanma konusundaki araştırmalar uluslararası literatürde özellikle son yıllarda artan bir ilgi görmekle birlikte, ülkemizde henüz yeterince araştırmaya konu olmamıştır. Tez çalışmamız ülkemiz açısından literatürdeki bu eksikliği gidermeye yönelik bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Rüzgar türbinlerinin kurulacağı yerin seçiminde en önemli değişken rüzgar potansiyeli ve deniz üstü rüzgar türbinleri için ilave olarak dalga kuvvetidir. Büyük ölçekli deniz üstü rüzgar santrali projelerinde türbinlerin destek temel yapısı olarak tekil kazığın tercih edildiği görülmektedir. Bunun en önemli nedeni, tekil kazıklı temelin maliyet-etkin bir tasarım olmasıdır, ancak monopile temel yapısının rüzgar türbinlerinin verimliliğini etkileyen sönümlemeyi diğer temel tiplerine oranla (özellikle yüzer temel) daha iyi tolere edebildiği gerçeği de dikkate alınmalıdır. Devriendt et al., [55]'e göre, tekil kazıklı temele sahip yapıların tasarımında ortaya çıkan en önemli sorun rüzgar ve dalga yüklerinden dolayı türbin yapısının yorulmasıdır (fatigue).[10] Rüzgar türbininin dinamik kuvvetleriyle yapısal rezonansın çakışması halinde büyük gerilimler ortaya çıkarak yapının yorulma sürecini hızlandırabilir. Bu nedenle, rüzgar türbini pervane kanatları ile destek yapının söz konusu rezonans çakışmasını önleyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Kallehave et al., [45], tekil kazıklı temel yapıları üzerine çalışmalarda üzerinde durulan önemli konunun suyun derinliğini olduğunu; bugüne kadarki çalışmaların genellikle sığ sularda yapıldığını ve ne kadar derinlikte diğer temel yapılarının daha tercih edilir hale geldiği sorusunun yanıtlanması gerektiğini vurgulamaktadır.[11] Deniz üstü rüzgar türbini tasarımında iki modelden yararlanılmaktadır: Türbin ve kule yapısını dikkate alan model türbin üreticisi tarafından geliştirilirken, temel dahil olmak üzere destek yapılarını dikkate alan model temel tasarımcısı tarafından geliştirilmektedir. Kallhave et al., [45]'nde bu iki model arasında dinamik etkileşimin olduğu, dolayısıyla optimal bir tasarım için bu iki modelin beraber ele alınarak ortak bir tasarım modeline ulaşılması gerektiği ifade edilmektedir. Bu süreçte, duvar kalınlıkları, gömülü kazık uzunluğu, kazık çapı gibi farklı parametrelere farklı değerler verilerek işlemlerin tekrar edilmesiyle (iterasyon) optimal yapıya ulaşılması hedeflenmektedir.

---

[10] Yapısal rezonans, bir yapının doğal frekansının dış titreşim kuvvetleriyle uyumlu hale gelmesiyle oluşur ve potansiyel olarak tehlikeli salınımlara yol açar.

[11] 2020 öncesinde Almanya ve İngiltere'de lisans alan rüzgar çiftliklerinin çoğu 40 m'den az derinlikte sularda kurulmuştur [45].

Kallehave et al., [45], türbin optimizasyon çalışmalarında daha bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesini savunmakta ve bu süreçte (i) zemin yapısının daha doğru modellenmesi, (ii) sönümleme (damping) özelliğinin dikkate alınması ve (iii) kabuk burkulmasının (Shell buckling) daha doğru tahmin edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Rüzgar türbini optimizasyonunda temel sönümlemesi (damping) dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan birisidir [56]. Sönümleme, genel anlamda, sistem enerjisinin çevreye yayılması olarak tanımlanabilir. Sönümlemenin türbin yapısının ömrünü uzatacak dinamik tepkinin genliğini sınırlayan kritik bir faktör olduğu yaygın kabul gören bir görüştür.

Devriendt et al. [55], rezonanstaki titreşimlerin büyüklüğü sönümleme oranıyla ters orantılı olduğu için, rüzgar türbininin ömrüne ilişkin tahminlerde sönümleme oranlarının kritik önem taşıdığını belirtmektedir. Ancak, gerçek sönümleme oranlarının sayısal yöntemlerle hesaplanması çok zor olduğu için, mevcut deniz üstü rüzgar türbinlerindeki ölçümlerin tasarım varsayımlarını doğrulaması gerektiği vurgulanmaktadır. Devriendt et al., [55] rüzgar türbini üzerinde deniz kaynaklı ortaya çıkan ilave sönümlemenin % 0.8-% 1.2 arasında olduğunu tahmin etmektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar temel destek yapısının tipine ve deniz zemininin koşulları gibi farklı parametrelere bağlı olarak değişebileceği için, sönümleme ölçüm ve analizlerinin farklı türbinler bazında yapılması gerektiği vurgulanmaktadır.

Malekjafarian et al. [56]'da, deniz üstü rüzgar türbinlerinde farklı sönümlenme kaynaklarını inceleyen araştırmaların bulguları özetlenmektedir. Söz konusu çalışmanın sonuçlarına göre, toplam sönümlemenin (i) aoredinamik sönümleme, (ii) hidrodinamik sönümleme, (iii) yapısal sönümleme, (iv) mekanik dağıtıcı araçların yarattığı ilave sönümleme, ve (v) temel (foundation) veya zemin (soil) sönümlemesi, olmak üzere beş temel kaynağı vardır. Farklı kaynaklardan gelen sönümlemenin tahmin edilmesi, deniz üstü rüzgar türbini tasarımı optimizasyonu ve yorulma ömrünün tahmin edilmesi için çok önemlidir.

Aerodinamik sönümleme göreli (relative) rüzgar hızındaki değişime bağlı olarak aerodinamik yüklerde ortaya çıkan değişimle ilgilidir ve rüzgar türbini ile türbin yapısı arasındaki etkileşimden kaynaklanır [57]. Rotor (pervane) çalışır durumdayken aerodinamik sönümleme toplam sönümlemenin büyük kısmını yaratırken, çalışmaz iken bu katkı ihmal edilir boyutlara düşmektedir. Chen and Duffour [58] ve Salaman and Tempel [59], aerodinamik sönümlemenin ön ve arka yönlerden (for-aft, FA, direction) %4-%8 aralığında

ve sağ-sol yönlerden (side-side, SS, direction) %0.08-%1.43 aralığında olduğunu tahmin etmektedir. Kuşkusuz, rüzgar hızı, pervanenin dönme hızı, kanatların rotora göre açısı (kanat eğim açısı, pitch angle) ve rotorun açısı (yaw angle) gibi faktörler aerodinamik sönümleme için tahmin edilen değerleri etkileyecektir [58], [60]. Deniz üstü rüzgar türbinlerinde aerodinamik sönümlemeyi tahmin eden analitik çalışmalarda, rüzgar hızının nominal (rated) rüzgar hızından çok daha yüksek olduğu durumda, aerodinamik sönümlemenin genellikle dikkate alınmadığı sonucuna ulaşılmıştır [58].

Hidrodinamik sönümlemenin, hidrodinamik sürüklenmeye bağlı sönümleme ve su dalgası radyasyonu olmak üzere iki temel kaynağı vardır [61], [62]. Hidrodinamik sürüklenme türbin yapısının dolaşımına (velovity) orantılıdır ve düşük dolaşımda ihmal edilebilir düzeydedir. Göreli dolaşımın bir fonksiyonu olan su dalgası radyasyonunun etkisi daha büyüktür. Cook and Vandiver [63] ve Shirzadeh et al. [64], deniz üstü rüzgar türbinlerinde hidrodinamik sönümlemeyi %0.07-%23 arasında tahmin ederken, bir diğer çalışmada radyasyon sönümlemesi %0.11-0.22 aralığında ve sürüklenme sönümlemesi üst sınırı %0.15 olarak bulunmaktadır [65].

Enerjiyi ısıya dönüştüren yapı materyalinin içindeki sürtünmenin türbinde yarattığı titreşim nedeniyle enerjinin türbin yapısı boyunca dağılmasına yapısal sönümleme denir. Damgaard and Andersen [66] deniz üstü rüzgar türbinleri için yapısal sönümlemeyi % 0.19 olarak tahmin ederken, bir diğer çalışmada sönümleme oranları %0.2 ve % 0.3 arasında bulunmaktadır [65]. Arany et al. [66] sönümleme oranları için %0.15 ve %1.5 değerlerini bulurken, Shirzadeh [64] % 0.5-%1.5 aralığını tahmin etmektedir.

Yapının yorulması deniz üstü rüzgar türbinlerinin tasarımında önemli bir parametre olduğu için, türbin yapısının dinamik tepkilerini azaltmanın bir yolu yapısal kontrol tekniklerinin kullanılmasıdır. Deniz üstü rüzgar türbin sistemlerinde yükleri hafifletmek ve titreşimlerin büyüklüğünü düşürmek için kullanılan önemli bir kontrol tekniği ayarlanmış kütle sönümleyicilerdir. Örneğin, kule salınım sönümleyici deniz üstü türbinlere entegre edilen ve titreşimlerin büyüklüğünü azaltmayı amaçlayan bir yardımcı yapıdır. Bu sistemler deniz üstü türbinlerde büyük miktarda sönümleme yaratmaktadır. Damgaard et al. [66] böyle bir sistemin deniz üstü türbine %1.36'lık sönümleme kattığını tahmin etmektedir.

Deniz üstü rüzgar türbini çalışır durumdayken aerodinamikten sonra ikinci en büyük sönümleme kaynağı olan temel (veya zemin) sönümlemesi, türbin faal değilken aerodinamik

kaynak etkili olmaktan çıktığı için en önemli sönümleme kaynağı konumuna gelmektedir.[12] Temel sönümlemesinin üç önemli kaynağı bulunmaktadır, ki bunlar radyasyon sönümlemesi; gözenek suyu (pore-water) dağılımı sönümlemesi ve zemindeki toprak materyalinin sönümlemesidir.

Deniz üstü türbinlerinin optimizasyonunun ekonomik boyutunu esas alan çalışmalarda üzerinde durulan ve yanıtı aranan soru, maliyet-etkinlik kriterinin nasıl iyileştirilebileceğidir. Ishtiyak and Sarkar [68], rüzgar türbinlerinin derin sularda kazıklar üzerine kurulmasının daha yüksek maliyetli olduğunu belirterek, yardım bacaklarıyla dipten destekli yapıların (Bottom Supported Tension Leg Tower, BSTLT) maliyet etkinliği artıracağını bulmaktadır. Bu çalışmada, yardım bacaklarının olduğu tasarımla, özel bir ekipman gerekmeksizin 50 m derinlikteki sularda bile daha küçük tekil kazıklı türbin kurulabileceğini ve bunun da güçlü bir endüstriyel potansiyele sahip olduğu sonucuna ulaşmaktadır.

Kim et al. [69], sürtünme tekerlekleri içeren hibrit temellerin türbinin temeline giden ağırlığı yaklaşık %38.24 oranında azaltacağını tahmin ederek, tek bir temel yapısından çok farklı temel yapılarının uygun bir karışımının optimizasyon açısından daha doğru bir yaklaşım olacağını bulmaktadır.

Deniz üstü rüzgar türbinlerinin optimizasyonu üzerine yapılmış çalışmalarda konu, ekonomik ve teknik olmak üzere, iki boyutuyla ele alınmaktadır. Konunun ekonomik boyutunun önemi, deniz üstü rüzgar enerjisi endüstrisi projelerinin yüksek maliyetler içermesi nedeniyle, fosil-yakıtlı enerji kaynaklarıyla rekabet edebilmek için sübvansiyon politikalarına, yani devlet desteğine, dayanıyor olmasıdır. Maliyetlerin düşürülebilmesinin yolu kısmen yeni teknolojilerin geliştirilmesinden, kısmen mevcut teknolojilerin ve tasarım yöntemlerinin optimizasyonundan geçmektedir [45].

Sakka et al. [70], Yunanistan'daki kara rüzgar çiftlikleri için ekonomik boyutu esas alan bir fizibilite çalışması yapmaktadır. Söz konusu çalışmada, rüzgar çiftliklerine yatırım karlılık oranı, bugünkü değer ve yatırımın iç getiri oranı (internal rate of return) olmak üzere iki ekonomik değişken dikkate alınarak, analiz edilmektedir. Çalışmada, 20 yıllık standart bir rüzgar türbini ömrü için kurulum, işletim ve finansman maliyetleri hesaba katılmaktadır. Sakka et al. [70], rüzgar türbini teknolojisi, elektrik enerjisi fiyatları, yatırım maliyetleri vb.

[12] Deniz üstü rüzgar türbini tasarımlarında, ayrıntılı bir yöntem bulunmaması nedeniyle, temel sönümlemesi bazen dikkate alınmamaktadır.

değişkenler veri iken, bir rüzgar çiftliğinin finansal uygulanabilirliğini belirleyen esas faktörün rüzgar potansiyeli olduğunu vurgulamakta ve 3.2 MW'lık 10 türbinden oluşan bir rüzgar enerjisi çiftliği için uygun kurulum yerlerini araştırmaktadır. Tez çalışmamızda, Türkiye için rüzgar hızı modellemesi yapılırken Sakka et al. [70]'nın iki parametreli Weibull dağılımı kullanılmaktadır.

5.3. Türkiye İçin Deniz Üstü Rüzgar Türbini Simülasyon Çalışması

5.3.1. Simülasyon İçin Veri Toplama Süreci

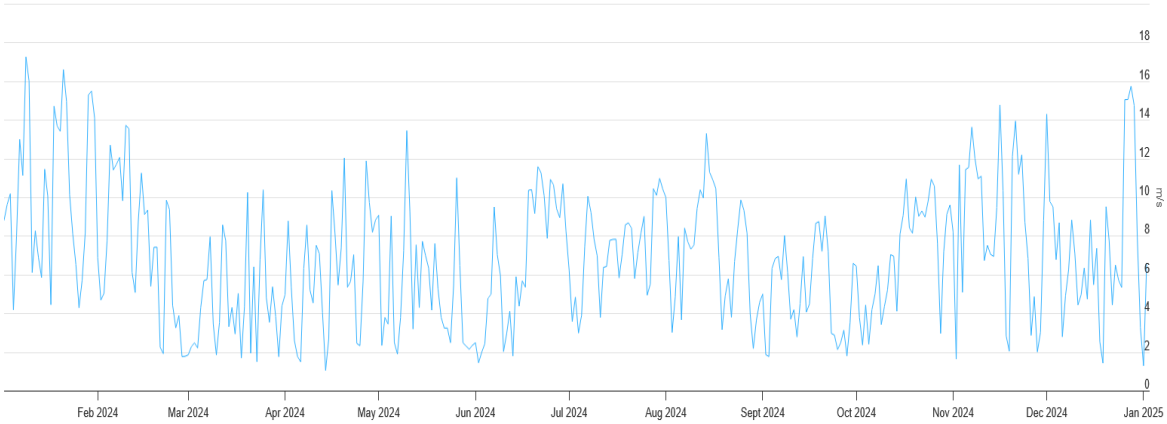
Bu tezin konusu, deniz üstü rüzgar türbininin optimizasyonudur. Rüzgar türbini optimizasyonunun yapılabilmesi için, öncelikle türbine etki eden kuvvetlerin hesaplanması gerekmektedir. Rüzgar türbini kurulumu için yer seçimindeki kritik faktör, rüzgar potansiyelidir. Deniz üstü türbinler için buna dalga kuvveti de eklenmektedir. Bu nedenle, belirlenen bölgelerdeki rüzgar ve dalga verilerinin elde edilmesi çalışmanın ilk aşamasını oluşturmaktadır. Dalga ve rüzgar verilerinin en doğru şekilde bulunabilmesi için birçok kaynak taranmıştır. Rüzgar verileri için uydu tarafından sağlanan verilere ulaşılmış ve bu veriler referans alınmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda seçilen bölgelerdeki rüzgar hızları belirlenmiştir.

Tam olarak net dalga verilerine ulaşılması için dalga şamandıralarının kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Dalga ölçüm şamandıraları tarafından seçilen bölgelerde yapılmış herhangi bir ölçümün hiçbir açık kaynakta bulunmaması ve sistemin çok yüksek maliyetli olması nedeniyle, ölçüm yapılmamasına karar verilmiştir. Bu durumlara karşın 03.07.2003-24.09.2003 tarihleri arasında Marmara Denizi'nde bulunan ambarlı ölçüm istasyonu tarafından yapılan dalga ölçüm verilerine ulaşılmıştır. Tezde kullanılan/seçilen bölgelerdeki dalga verileri, Ambarlı ölçüm istasyonundan elde edilen veriler referans alınarak kullanılmıştır.

Aşağıdaki resimde Ambarlı ölçüm istasyonunun konumu verilmiştir.

Şekil 5.4. Ambarlı ölçüm istasyonu konumu

Simülasyonlara başlamadan önce ilk olarak, Resmi Gazete' de yayınlanan ve Türkiye'de deniz üstü rüzgar santrallerinin hangi bölgelere kurulabileceğini gösteren karar incelenmiştir. Belirtilen bölgelerden Bandırma bölgesinde örnek bir yer seçilmiştir. Gerçekçi simülasyonların yapılabilmesi için, seçilecek bölgedeki, belli bir zaman aralığındaki rüzgar hızı verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda 40.52, 28.22 koordinatlarındaki yerin 01.01.2024- 01.01.2025 tarihleri arasındaki 1 yıllık rüzgar hızı verilerine ulaşılmıştır. Rüzgar hızı, yer aynı olsa da, yüksekliğin değişmesiyle birlikte farklı değerlere ulaşmaktadır. Rüzgar türbinlerinin boyutlarına yakın olması ve daha anlamlı sonuçlara ulaşabilmek için, 100 metre yükseklikteki rüzgar verileri kullanılmıştır. 1 yıl boyunca elde edilen ölçümlerin ortalaması alınarak, o bölgedeki ortalama rüzgar hızı hesaplanmıştır. Bandırma bölgesindeki veriler ele alındığında, rüzgar yıllık ortalama 6,89 m/s hız ile esmektedir. Aylık ortalamalara bakıldığı zaman, rüzgar hızının en yüksek olduğu ay 10,41 m/s ile Ocak ayıdır. Rüzgar hızının ortalamasının en düşük olduğu ay ise, 5,1 m/s ile Eylül ayıdır. 1 yıl içinde kaydedilmiş en yüksek hız, Ocak ayında 17,28 m/s olmuştur.



Şekil 5.5. Bandırma bölgesi rüzgar hızı verisi, 01.01.2024-01.01.2025 [71]

5.3.2. Optimize Edilecek Örnek Türbin Seçimi

Karada veya denizde kurulacak rüzgar türbinleri için birçok farklı seçenek vardır. Özellikle karada kurulan rüzgar türbini çiftliklerinde çeşitli dezavantajlardan dolayı düşük megavat enerji üreten rüzgar türbinleri tercih edilmiştir. Örneğin, Bandırma Dutliman'da kurulu olan Bilgin kara rüzgar enerjisi santrali, her biri 1.85 MW kurulu güce sahip 27 rüzgar türbini ile toplam 50 MW kurulu güce sahiptir. 50 MW kurulu gücüyle yıllık üretimi 134 GWh'dir. Santral, yıllık elektrik üretimi ile 35 bin kişinin günlük hayatındaki kişi başı tüketimini (sanayi, konut, metro ulaşımı, çevre aydınlatması vb.) karşılayabilmektedir. Santralde üretilen elektriğin sadece konut elektrik tüketiminde olduğunu düşünürsek, 45 bin konutun elektrik ihtiyacını karşılayabildiği ortaya çıkmaktadır.

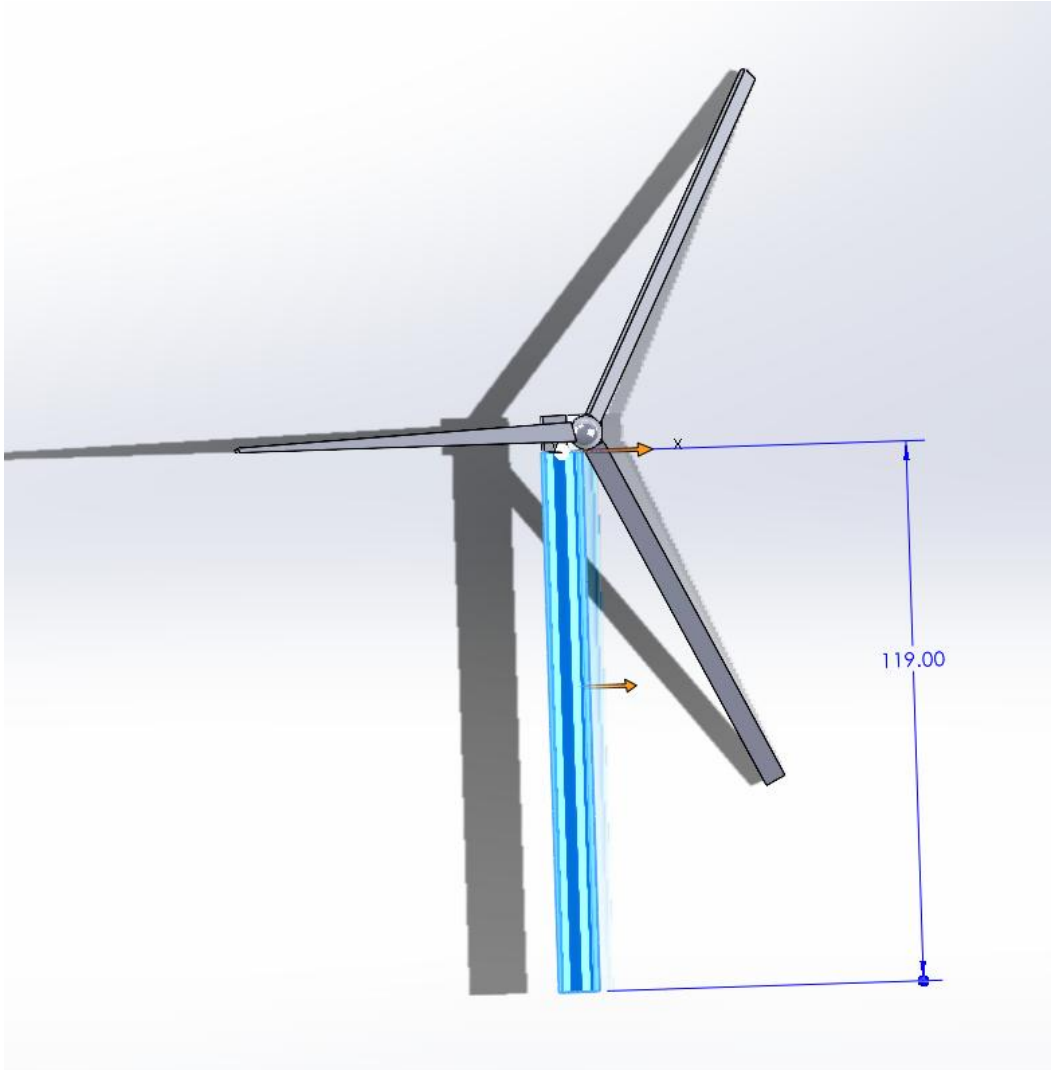
Tez çalışmamızda, genel adı 'IEA Wind 740-10-MW ROWPs' olan, genellikle 'IEA 10-MW' olarak bilinen, 10 megavat enerji üretme gücüne sahip olan rüzgar türbini örnek olarak alınmaktadır. Üstünde simülasyonlar yaparak optimize edeceğimiz türbin, karada kurulu olan "Bilgin rüzgar enerji santralinde" kurulu olan rüzgar türbinlerinden çok daha yüksek miktarda kurulu güce sahip bir türbindir.

Örnek olarak verilen "Bilgin enerji santralinde" kurulu 27 rüzgar türbini ile sahip olunan 50 MW'lık kapasite, 10 MW enerji üretim kapasitesine sahip ancak beş adet rüzgar türbini ile yapılabilir. Bu durum da birçok avantajı beraberinde getirmektedir. En önemli avantajlarından biri de yer kullanımında sağlanacak avantajdır [74].

5.3.2.1.DTU-10MW Rüzgar Türbini Verileri[13]

Rüzgar türbinlerinin özellikleri her açıdan diğer türbinlere göre farklılıklar gösterebilmektedir. Simülasyon çalışmamızda, ilk olarak seçtiğimiz rüzgar türbini 3 kanattan oluşmaktadır. Her bir kanadın uzunluğu 86.366 m'dir. Kanatların bir adetinin ağırlığı 42764 kg'dır. Rotor çapı 178 metre ve yerden yüksekliği (göbek yüksekliği) 119 m'dir.

[13] Rüzgar türbini verileri için bkz. [75].



Şekil 5.6. DTU-10 MW rüzgar türbini[14]

5.3.2.2.Verilerin Türbin Boyutuna Göre Uyarlanması[15]

Rüzgar hızları, farklı yüksekliklerde devreye giren farklı sürtünme kuvvetleri nedeniyle, değişiklik göstermektedir. Aşağıda verilen formül, türbinin yüksekliği ile türbine etki eden rüzgar hızı arasında doğru orantı olduğunu göstermektedir. Bandırma bölgesinde elde ettiğimiz rüzgar hızı verileri, 100 m yükseklikte için geçerlidir. Gerçekçi sonuçlar elde edebilmemiz için rüzgar hızı verilerine ait konumların türbin yüksekliğiyle aynı olması gerekmektedir. DTU-10 MW rüzgar türbinin boyutları, rotor göbeği yüksekliğinin 119 m

[14] Rüzgar türbini 'Creo Parametric 4.0' programı kullanılarak yapılmıştır.
[15] Model 'Creo Parametric 4.0' programı kullanılarak simüle edilmiştir.

olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, simülasyonlara rüzgar verisi girebilmek için 119 m yükseklikteki rüzgar hızına ihtiyaç duyulmaktadır.

Türbin yüksekliğindeki rüzgar hızı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\frac{V_{göbek}}{V_{ref}} = \left(\frac{Z_{göbek}}{Z_{ref}}\right)^{\alpha} \tag{5.4}$$

Bu formülde $V_{göbek}$ türbin yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s), V_{ref} seçilen yerdeki rüzgar hızı (m/s), $Z_{göbek}$ seçilen türbinin yüksekliği, Z_{ref} ölçüm yapılmış olan rüzgar yüksekliğidir. Yukarıdaki formülde α sabit bir kat sayıdır. Bu katsayı deniz üstü türbinler için α=0.14, karada bulunan durumlar için α= 0.2'dir. Yukarıdaki formülü kullanarak türbin yüksekliğindeki rüzgar hızını hesaplamak istediğimiz için $V_{göbek}$ elemanı bilinmeyendir. Diğer bilinen elemanlar yerlerine koyulduğunda $V_{göbek}$ ortaya çıkacaktır [70].

5.3.2.3.Verilerin DTU-10 MW Türbine Göre Ayarlanması

Referans aldığımız formül kullanılarak seçili türbinin yüksekliğindeki rüzgar hızı bulunmalıdır. Formüldeki bilinen değişkenlerin değerlerinin yerine konulması gerekmektedir. İşlemler sonucunda ulaşmak istediğimiz $V_{göbek}$ değeridir. DTU-10 MW rüzgar türbininin teknik verilerine bakıldığında türbin yüksekliği 119 m'dir, o yüzden $z_{göbek}$ 119 m olarak bulunmuştur. Elde edilen rüzgar verilerinin ölçüldüğü yüksekliğe bakıldığında z_{ref} 100 m olarak bulunmaktadır. Yapacağımız simülasyon deniz üstü rüzgar türbini için olacağından α=0,14 olarak alınmaktadır. Rüzgar verilerinin 1 yıllık ortalaması 6,89 m/s olarak hesaplanmaktadır, ki bu değer formüldeki V_{ref} değerini vermektedir.

Formüldeki bilinmeyenler yerine konulduğunda $V_{göbek}$ (türbin yüksekliğindeki rüzgar hızı) hesaplanmaktadır:

$$\frac{V_{göbek}}{V_{ref}} = \left(\frac{Z_{göbek}}{Z_{ref}}\right)^{\alpha} \tag{5.5}$$

V_{ref}= 6,89 m/s

Z_{ref}= 100 m

$Z_{göbek}$= 119 m

α= 0.14

$$\frac{V_{göbek}}{6.89} = \left(\frac{119}{100}\right)^{0.14} \tag{5.6}$$

Yukarıdaki işlemler yapıldığında, $V_{göbek}$=7,06 m/s bulunmaktadır. Bu şekilde, DTU-10 MW deniz üstü rüzgar türbinine, Bandırma bölgesinde etki edecek rüzgar hızı hesaplanmıştır.

5.3.3. Simülasyonlar

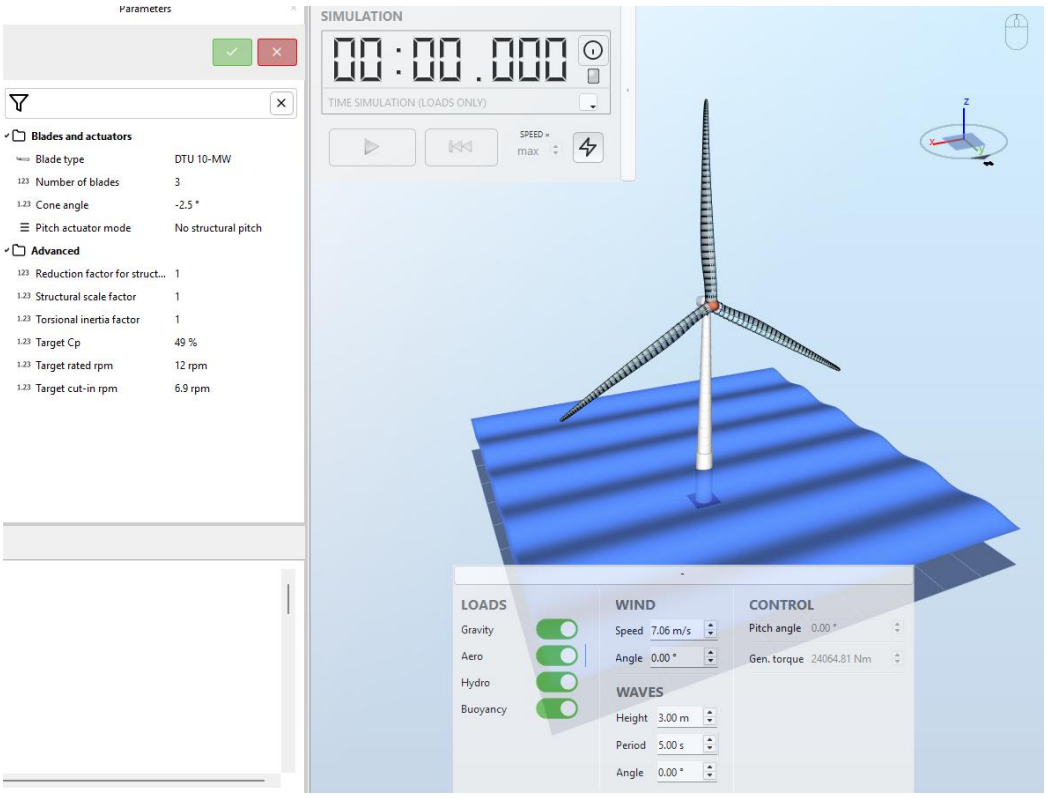
Çalışmamızda gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için birçok farklı yazılım incelenmiştir. Seçilen koşullardaki rüzgar türbinleri üzerinde oluşan kuvvetlerin durumunun en net belli olduğu 'ASHES' programı tercih edilmiştir. Kurulması planlanan tesis deniz üstünde olduğu için 'offshore' (deniz üstü) rüzgar türbinleri kısmı seçilmiştir. Ayrıca sistemimiz tekil kazıklı olduğu için türbin temeli sabit seçilmiştir. ASHES programında simülasyonlar yüzer şekilde kurulmuş rüzgar türbini santrallerini analiz ederek de çalışabilmektedir. Programda, seçilen bölgelerde kurulabilecek DTU-10 MW isimli rüzgar türbini seçilmiştir.

Rüzgar türbinleri, belirli rüzgar hızlarının üstüne çıkıldığında çok hızlı dönmeye başlamaktadır. Bu durum rüzgar türbinine zarar vermeye başladığında türbin durdurulmaz ise kullanılamaz hale gelebilir. Yüksek hızlı rüzgarın türbine zarar vermemesi için, belirli hızın üstüne çıkıldığında otomatik durdurma işlemi devreye girmektedir. Ayrıca, belirli bir hızın altına düşüldüğünde de rüzgar türbini çalışmayı ve enerji üretmeyi durdurur. DTU-10 MW rüzgar türbininde 'cut-in wind speed' (türbini durduran en düşük rüzgar hızı) 4 m/s'dir. Bu, 4 m/s hızın altında bir rüzgar olduğunda rüzgar türbininin çalışmayacak olması anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, 'cut-out wind speed' (türbini durduran en yüksek rüzgar hızı) 25 m/s'dir. Bu koşullar altında, simülasyonların yapılabilmesi için rüzgar hızlarının 4 – 25 m/s aralığında olması gerektiği söylenebilir.

Bandırma bölgesindeki ortalama yıllık rüzgar hızı 7,06 m/s olarak hesaplandığı için, türbinin çalışacağı 4-25 m/s aralığında kalmaktadır, ki bu durum rüzgar türbininin zarar görmeden enerji üretimini sağlamasına olanak vermektedir.

Simülasyonlarda 'ASHES' programı kullanılmaktadır. İlk olarak kullanılacak türbinin verileri düzenlenmiş ve türbinin kanat verileri için DTU-10 MW seçilmiştir. Daha sonra, rotorun eğimini düzenlemek için 'cone angle' verisi -2.5° olarak modele yazılmıştır. Simülasyon Bandırma bölgesinde yapılacağı için, bölgede elde edilen rüzgar hızı verileri ile birlikte dalga yüksekliği ve periyodu verileri de programa girilmiştir. Türbin temelinin

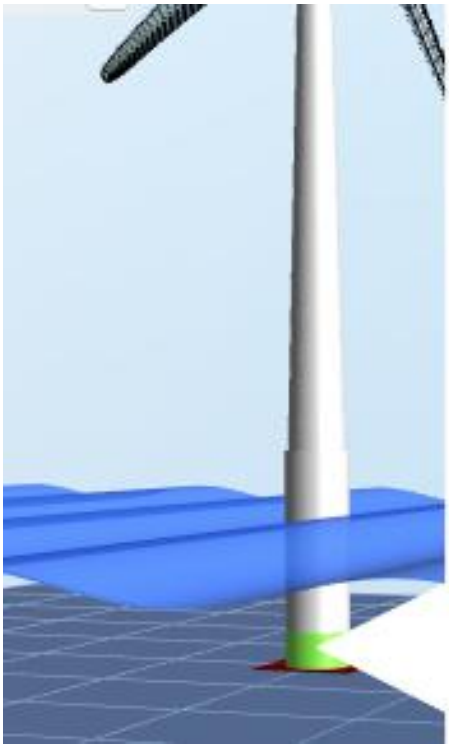
kalınlık ve uzunluk verileri, normal DTU-10 MW rüzgar türbinin verilerine göre ayarlanmıştır: Kazığın ilk kısmının taban kalınlığı 9 m, uzunluğu 30 m ve ikinci kısmının tabanı 8 m, uzunluğu 89 m'dir.



Şekil 5.7. ASHES programında simülasyonlar için türbinin ve koşulların hazırlanması

5.3.4. Türbin temeline etki eden kuvvetler

Rüzgar türbini temelinin en uygun koşullarda çalışabilecek şekilde tasarlanabilmesi için, türbine etki eden kuvvetlerin belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle deniz (dalga) kuvvetlerinin etkisinin hesaplanmasında türbinin alt kısımlarında dalgaların etki ettiği bir bölge önem taşıdığı için, temele etki eden kuvvetlerin bulunmasında aşağıdaki görselde yeşil renk ile gösterilen kısım seçilmiştir.



Şekil 5.8. Rüzgar türbininde kuvvetlerin ölçüleceği tekil kazıklı temel

Seçilen bölgeye etki eden dalga kuvvetinin hesaplanabilmesi için, atalet ve sürükleme kuvvetlerine gerek duyulmaktadır. Çalışmamızda 'ASHES' programı kullanılarak yapılan simülasyonlarla bu iki kuvvetin grafikleri elde edilmiştir.

5.3.4.1. Morison Denklemi

Morison Denklemi iki kuvvet bileşeninin toplamıdır; bunlardan birincisi atalet kuvveti (inertia force), ikincisi ise sürüklenme kuvvetidir (drag force). Sürükleme kuvveti, anlık akış hızının karesine orantılı bir kuvvettir. Bu iki kuvvet kullanılarak oluşturulan Morison Denklemi, aşağıdaki formül ile akış yönüne paralel olan doğrusal kuvveti verir:

$$F(t) = \rho C_m Vol\, V' + \frac{1}{2}\rho C_d A V|V| \qquad (5.7)$$

Morison Denkleminde:

F(t) sistem üzerine etki eden toplam doğrusal kuvveti

ρ= suyun yoğunluğunu

V'= dV/dt akış ivmesini

Vermektedir; dolayısıyla akış hızı V(t)'dir.

A, bir referans alanıdır (örn. gövdenin akış yönüne dik kesit alanı)

Vol, kuvvetin etki ettiği yerin hacmi

C_m= atalet kuvveti katsayısı

C_d= sürükleme kuvveti katsayısı

Denklemde atalet kuvvetinin gösterimi= $\rho\ C_m$ Vol V'

Denklemde sürüklenme kuvvetinin gösterimi= $\frac{1}{2}\ \rho\ C_d\ A\ V\ |V|$

Bir sistemde atalet kuvveti ve sürüklenme kuvveti bilindiği taktirde, Morison denklemi kullanılarak, denizden (dalgadan) gelen ve rüzgar türbininin temeline etki eden toplam kuvvet hesaplanabilmektedir. Türbinin temeline etki eden doğrusal kuvvet hesaplandığında temelin dayanması gereken kuvvet miktarı ortaya çıkmış olacaktır. Kuvvetlerin hesaplanmasıyla sistemin en uygun haline getirilerek optimize edilmesi öngörülmektedir. Türbinin üst kısmına etki eden kuvvetlere dayanıklılığını sağlayan en uygun materyal seçimi yapılıp en uygun miktarlarda kullanılarak ve ekonomik açıdan da en uygun faktörler göz önünde bulundurularak, bir türbin modeli tasarlanabilir.

5.3.4.2. Rüzgar Hızının Modellenmesi

Çalışmamızda, Sakka et al. [70]'nın, Yunanistan'daki orta ölçekli kara rüzgar çiftliklerine yatırımın karlılık durumunu değerlendirdikleri çalışmada kullandıkları yöntem esas alınmıştır. Bu yöntemde, rüzgar hızını modellemek için en yaygın kullanılan istatistiksel dağılım olan iki parametreli Weibull dağılımı kullanılmaktadır.[16] Olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir:

$$f(v) = \frac{k}{c}.\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} \qquad (5.8)$$

Kümülatif dağılım fonksiyonu:

11 Weibull dağılımının tercih edilmesinin nedeni, çok geniş bir kullanım alanı olmasıdır. Weibull dağılımı, normal dağılıma benzer şekilde süreklilik taşıyan verilerle ilişkili olasılıkları gösteren bir dağılım olmakla birlikte, normal dağılımdan farklı olarak, sağa veya sola çarpık verilere da uyumlu bir dağılımdır.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{5.9}$$

Burada *v* (m/s) rüzgar hızı; *c* (m/s) ölçek parametresi ve *k* rüzgar dağılımının ne kadar zirveli (peaked) olduğunu gösteren biçim (shape) parametresidir. Ölçek parametresi *c,* dağılımın yayılımını göstermektedir; büyük bir *c* değeri büyük yayılımlı bir dağılımı gösterirken, küçük bir *c* değeri küçük yayılımlı bir dağılımı gösterir. Biçim parametresi *k* Weibull eğimi olarak da tanımlanır, çünkü *k*'nın değeri, olasılık değerlerinin bulunduğu eğrinin eğimine eşittir. Şekil parametresi *k*'nın değeri 1'e eşit iken, Weibull dağılımı da iki parametreli üstel dağılıma özdeştir; *k*<1 iken Weibull dağılımı düzenli biçimde azalan değerleri göstermektedir. *k*'nın 2'ye eşit olması Rayleigh dağılımına özdeş olduğu anlamına gelir, ki bu iki serbestlik dereceli ki-kare dağılımına özdeş demektir.

Bir dağılımın ölçek *c* ve biçim *k* parametrelerinin tahmin edilmesinde genellikle maksimum olabilirlik (maximum likelihood) yöntemi kullanılır, ancak modelimiz doğrusal olduğu için çalışmamızda En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY) kullanılmaktadır. Sakka et al. [70]'da belirtildiği gibi, rüzgar türbini tahminlerinde iki kısıt daha dikkate alınmalıdır: (i) türbinin güç üretebilmesi, yani çalışması için gereken minimum rüzgar hızını (cut-in speed) gösteren v_{in} ve (ii) kontrol sisteminin üst bölümünde yer alan türbin kanatlarını rüzgarın türbini döndüremeyeceği bir açıya çevirerek (tüy konumu-feathering) türbinin çalışmasını durduracağı rüzgar hızının üst sınırını gösteren v_{out} (cut-out speed) değeri. Bu durumda, PDF dağılımında parametre sayısı dörde çıkmaktadır:

$$F(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \\ P(v < v_{in}) + \frac{[1 - P(v < v_{in}) - P(v > v_{out})]}{1 - e^{-\left(\frac{v_{out} - v_{in}}{c}\right)^k}} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{v - v_{in}}{c}\right)^k}\right], & v_{in} \le v \le v_{out} \\ 1, & v > v_{out} \end{cases} \tag{5.10}$$

Bu koşullarda k , $v_{in} \le v \le v_{out}$, kısıtı altında tahmin edilen iki parametreli Weibull dağılımındaki şekil parametresidir. Burada, $P(v < v_{in})$ rüzgar hızının cut-in değerinden düşük olasılığı ve $P(v > v_{out})$ rüzgar hızının cut-out değerinden büyük olma olasılığıdır. Dolayısıyla,

$$P_{oper} = 1 - P(v < v_{in}) - P(v > v_{out}) \tag{5.11}$$

Rüzgar türbininin çalışır olduğu rüzgar hızı aralığını göstermektedir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonunun parametreleri *c* ve *k*'nın tahmin edilmesi için öncelikle

fonksiyonunun her iki tarafının logaritması alınarak model doğrusal hale getirildikten sonra En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak parametrelere ait tahmin değerleri elde edilir.

5.3.4.3. Regresyon Modeli

İki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi açıklamak için kurulan regresyon modeli, korelasyon analizinden farklı olarak, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan değişkenler arasında tahmin edilen ilişki kullanılarak konuyla ilgili tahminler veya öngörüler yapılabilmesini olanaklı kılan bir yöntemdir. Basit bir doğrusal regresyon modeli

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \varepsilon_{i,} \qquad i = 1,2,\dots,n \tag{5.12}$$

Burada Y bağımlı değişkeni, X_1 bağımsız değişkeni, β_1 bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasında tahmin edilecek ilişkiyi gösteren parametreyi ve ε_i gözlenemeyen hata terimlerini göstermektedir. Tahmin edilen regresyon parametrelerinin öngörü amaçlı kullanılabilmesi için, modelin değişkenlerine ait gerçek gözlemler arasındaki ilişkileri mümkün olduğu kadar iyi yansıtıyor olması gerekmektedir. Regresyon modelinde kullanılan verilerin trend içermesi, başka deyişle durağan olmaması, halinde regresyon tahminleri "sahte regresyon (spurious regression)" şüphesi yaratacaktır, ki bu durumda elde edilen parametre tahminleri kullanılarak yapılacak yorumların ve öngörülerin hatalı olacağı söylenebilir. Durağanlık koşullarının sağlanması için, tahmin edilen model ile gerçek ilişki arasındaki farkı ifade eden hata terimlerinin ($\varepsilon_i = Y_i - \widehat{Y}_i$) tesadüfi olup normal dağılım göstermesi; hata terimlerinin beklenen değerinin sıfır olduğu varsayımının doğrulanması gerekir.[17]

[17] Durağanlık (birim kök) testleri, bir serinin rassal yürüyüş gösterip göstermediğini test etmektedir: Seri rassal yürüyüş gösteriyorsa birim kök var demektir; yani seri durağan değildir. En yaygın kullanılan birim kök testi olan Dickey ve Fuller test süreci aşağıdaki gibi açıklanabilir [72]:
$Y_t = Y_{t-1} + u_t \qquad u_t(0,\sigma^2)$: beklenen değeri sıfır ve varyansı sabit beyaz gürültü (white noise) hata terimi
$Y_t = a + bt + \rho Y_{t-1} + u_t$
Rassal yürüyüş sürecinde birim kökün varlığı aşağıdaki hipotezle araştırılır:
$H_0 = \rho \geq 1$ (Seri durağan değildir)
$H_1 = \rho < 1$ (Seri durağandır)
$\rho = 1 \Rightarrow Y_t$'nin bir birim kökü vardır, rassal yürüyüş serisidir, durağan değildir.
$H_0: \rho = 1$ "birim kök vardır" hipotezini test etmek kullanılan t istatistiği τ istatistiği olarak isimlendirilir. τ istatistiği için eşik değerleri Dickey-Fuller tarafından belirlenmiştir. Hesaplanan-t değeri , 0.01, 0.05 ve 0.10 kritik-t değerlerinden daha negatifse H_0 hipotezi reddedilir ve serinin birim kök içermediğine, durağan olduğuna karar verilir. Eğer seriler birim kök içeriyorsa, yani durağan değilse, serilerin birinci farkı alınarak durağan hale getirilir.

5.3.4.3.1. En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY)

Tahmin edeceğimiz doğrusal bir regresyon modeli olduğu için, regresyon tahminlerinde kullanılan en yaygın yöntem olan EKKY kullanılmaktadır. Doğrusal regresyon modeli varsayımlarına uyan EKKY parametre tahminleri doğrusal, sapmasız ve minimum varyanslıdır. Regresyon tahminlerinde amaç, gerçek bağımlı değişken olan Y'ye yakın değerler veren katsayı tahminleri bulmaktır [73]. Tahmin edilen regresyon modelinin

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1i}, \qquad i = 1,2,\dots,n \tag{5.13}$$

olduğunu varsayalım. Y değişkeni ile X değişkeni arasındaki ilişkiyi ifade eden β_0 ve β_1 parametrelerinin değerlerini bulmak için kullanılan EKKY'nin temeli, tahmin edilen modelin gerçek ilişkiden toplam sapmalarının (hata terimleri) karelerinin toplamını en küçük yapacak değerlerin bulunmasıdır.[18] Hata terimleri, gözlemlenen yani gerçek Y_i değerleri ile tahmin edilen, yani beklenen $\widehat{Y_i}$ değerleri arasındaki farklardan oluşmaktadır:

$$\widehat{\varepsilon_i} = Y_i - \hat{Y}_i \tag{5.14}$$

EKKY, β_0 ve β_1 parametrelerinin tahminleri olan $\hat{\beta}_0$ ve $\hat{\beta}_1$'nın farkını en küçük yapacak şekilde aşağıdaki gibi belirler:

$$en\ küçük\ \sum_{i=1}^{n} \hat{\varepsilon}_i^2 = en\ küçük\ \sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2 \tag{5.15}$$

Tahmin ettiğimiz regresyon modelinin birinci farkında durağan olduğunu görsel olarak tespit ettiğimiz için, modelimizin gerçek ilişkiyi doğru biçimde yansıttığı söylenebilir.

5.3.5. Model Tahmini ve Analiz

5.3.5.1. Weibull fonksiyonu parametre tahmini

Weibull Fonksiyonunun parametreleri EKKY ile tahmin edilmiştir. Bu denklemdeki k ve c değerlerinin tahmin edilebilmesi için lineer regresyon analizi kullanılacaktır. Regresyon analizi yapılmadan önce yıllık rüzgar verilerine aşağıdaki adımlar kullanılarak işlemler yapılmıştır:

1-Yıllık rüzgar verileri 0'dan başlayıp 0.4 artırılarak aralıklara ayrılmış ve her aralıkta kalan sayı miktarı not edilmiştir.

[18] Hata terimlerinin kareleri alınarak, tahmin değerlerinin gerçek değerlerden negatif yönde sapmalarının pozitif yönde sapmaları telafi etme riski ortadan kaldırılmaktadır.

2-Aralıklarda kalan sayılar toplam veri miktarı olan 8807'ye bölünerek, verilerin her aralıkta kaç kere olma olasılığı hesaplanmış ve olasılık dağılım fonksiyonları (PDF) elde edilmiştir.

3-Kümülatif dağılım fonksiyonunun (CDF) hesaplanması için, her bir aralıktaki PDF fonksiyonları ile o sayıdan önceki PDF'lerin değerlerinin toplamı alınmıştır.

Weibull Birikimli Dağılım Fonksiyonu

(CDF): $F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$ şeklindedir.

Birikimli dağılım fonksiyonunun 1-$F(v)$=$e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$ her iki tarafının logaritması alındığında ln(1-$F(v)$)= - $\left(\frac{v}{c}\right)^k$ elde edilir.

Y=-ln(1-$F(v)$), a=k lnc ve X=ln v ve b=k denildiğinde aşağıdaki regresyon denklemi elde edilir.[19]

$$Y= a+bx \tag{5.16}$$

EKKY yöntemi kullanılarak yukarıdaki denklem aşağıdaki şekilde tahmin edilir.

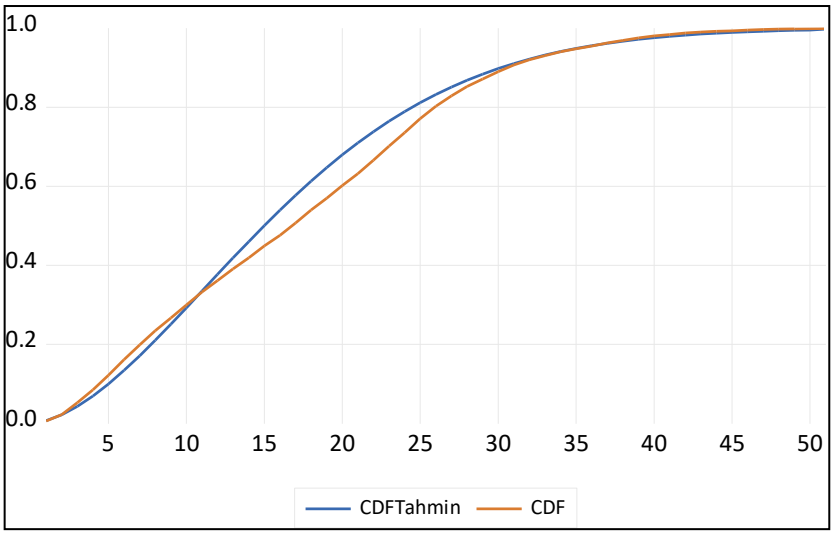
$$Y=-3.444+1.718X \tag{5.17}$$

$$(-6.975)^* \quad (7.76)^*$$

Parantez içindeki değerler t-değerini göstermektedir. Hem sabit (a) hem de kesişim (b) değeri istatistiksel olarak sıfırdan farklıdır. Bu değerler kullanılarak Weibull Birikimli Dağılım Fonksiyonunun parametreleri olan k=1.718 ve c=0.134 tahmin edilir. Bu parametreler kullanılarak gerçekleşen gerçek ve tahmin edilen Weibull Fonksiyonunun grafikleri aşağıda verilmektedir.

Şekil 5.9'dan görüldüğü gibi, tahmin edilen birikimli dağılım fonksiyonu ile ölçümler sonucu elde edilmiş olan birikimli dağılım fonksiyonları grafiklerinin birbirlerine benzer oldukları görülmektedir. Başka bir ifadeyle, regresyondan elde edilen katsayı değerlerinin gerçek değerler ile uyumlu olduğu söylenebilir.

[19] Y ve X serilerine durağanlık testi yapıldığında trend durağan olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.9. Ölçülen ve tahmin edilen birikimli dağılım fonksiyonları

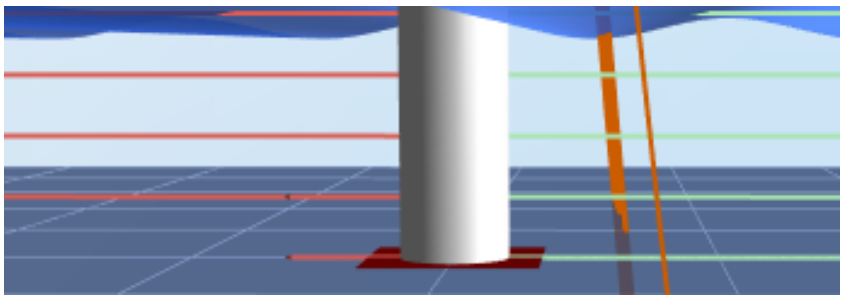
Deniz üstü rüzgar santrallerinin kurulması planlanan Bandırma bölgesindeki rüzgar dağılımı, 8807 gözlem değerinin birikimli dağılım fonksiyonu olan Weibull dağılım fonksiyonu ile temsil edilmesinin uygun olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla türbinin tasarımında Weibull dağılımı kullanılması uygun bulunmuştur. Bu dağılım kullanılarak bölgede oluşabilecek diğer koşullar açısından başka simülasyonlar yapılmıştır.

Birikimli dağılım fonksiyonları göz önünde bulundurulduğunda olasılık olarak rüzgar hızlarının tahminleri yapılır. Değerler ele alındığında %76 olasılık ile rüzgar hızının 9,2m/s'ye eşit veya daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Genelleme yapılmak istenildiğinde, rüzgar hızının 9,2 m/s alınarak hesaplama yapılması akla uygundur. Bu durum ile birlikte rüzgar hızının 9,2 m/s olduğu koşullarda, rüzgar türbininin temeline etki eden kuvvet ve moment grafikleri hesabı için olan simülasyonlarda kullanılmıştır.

Rüzgar hızlarından dolayı türbine etki edecek kuvvetler ele alındığında Bandırma bölgesinde oluşabilecek en yüksek rüzgar hızlarının belirlenmesi için birikimli dağılım fonksiyonundan yararlanılmıştır. Birikimli dağılım fonksiyonu göz önüne alındığında %99,90 olasılık ile rüzgar hızı 20m/s değerine eşit veya daha az olmuştur. Bu veri kullanılarak Bandırma bölgesinde oluşabilecek en yüksek rüzgar hızı olan 20 m/s kullanılarak bölgede oluşabilecek en yüksek kuvvetlerin simülasyon hesabı yapılmıştır. Bu durumda oluşabilecek en yüksek kuvvet simülasyonunda dalga boyu 3 m olarak alınmıştır.

5.3.6. Etki eden kuvvetlerin belirlenmesi: Simülasyon analizi

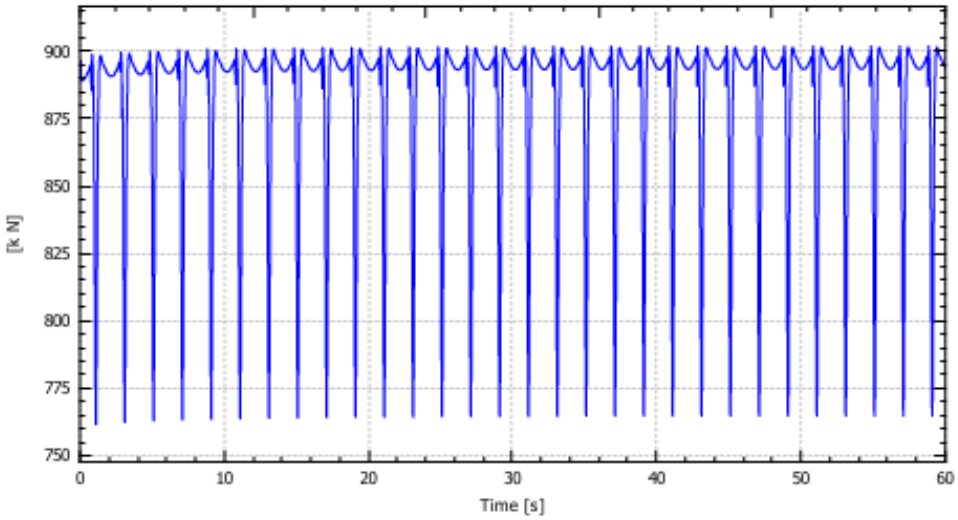
'ASHES' programı üzerinden simülasyon çalıştırıldığı zaman türbine etki eden kuvvetler net bir şekilde gözlemlenmektedir. Dalga kuvveti tarafından türbinin temeline etki eden kuvvetler ele alındığında, sürükleme kuvveti (drag force) ve atalet kuvveti (inertia force) rüzgar türbininin temeline kuvvet uygulamaktadır.



Şekil 5.10. Türbinin temeline etki eden sürükleme (kırmızı) ve atalet kuvveti (yeşil)

Elde edilen kuvvetlerin büyüklüklerinin bulunması için simülasyon çalıştırılır. Simülasyon 60 saniye çalıştırılarak kuvvetlerin türbine etki ettikleri kuvvetler bulunur. Bulunan kuvvetlerin sonrasında yararlanılmak üzere kuvvetlerin grafiği çizdirilir. Grafikler değerlendirildiğinde türbininin temeline etki eden kuvvet ve momentler bulunmuş olunur.

Türbinin temeline etki eden kuvvetlerin yarattığı etkileri belirlemek için, seçilen bölgedeki ortalama rüzgar hızı ve dalga verileri ile simülasyon yapılmıştır. Sisteme etki eden burulma (torsion) momenti hesaplanarak türbinin temelinde oluşabilecek deformasyonlar önlenebilecektir. Simülasyon sonucunda elde edilen grafik aşağıda belirtilmiştir. Şekil 5.11'de rüzgar kuvvetinden dolayı gelen kuvvetler gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Rotorda oluşan itme kuvveti

Dalga kuvvetinden gelen kuvvetleri bulmak için atalet ve sürükleme kuvvetlerinin kendi içlerinde toplamı bulunmalı sonrasında Morison Denklemi aracılıyla toplam dalga kuvveti bulunmalıdır.

Elde edilen değerler sonucunda Bandırma bölgesindeki ortalama rüzgar hızı ve dalga verilerine göre rüzgar türbininin temelinde oluşacak kuvvet hesabı için rüzgar ve dalga tarafından etki eden kuvvetlerin toplanması gerekmektedir.

Aşağıda, seçilen bölgede tahmin edilen rüzgar yıllık ortalama rüzgar hızı 9.20 m/s değeri kullanılarak temelde oluşacak kuvvet ve momentler hesaplanarak, sistemin temelinin dayanıklılığı hesaplanmıştır.

Rüzgar türbininin rotoruna etki eden kuvvet:

1280 kN

Toplam etki eden atalet ve sürükleme kuvvetleri

Toplam atalet kuvveti: 506,8 kN

Toplam sürükleme kuvvet: 8495 kN

Elde Edilen kuvvetlerden moment hesabı aşağıda verilmiştir.

Rotor da oluşan rüzgardan kaynaklı kuvvet: 1280 kN

Temelde oluşan toplam dalga kuvveti: 515.3 kN

Bütün kuvvetlerin temelde oluşan momente etkisi aşağıda hesaplanmıştır.

Moment formülü: $F \times L$

Moment formülünde F etki eden kuvvet ve L kuvvetin temele olan uzaklığıdır.

Rotorda oluşan rüzgar kuvvetinin temele etki eden momenti:

Moment hesabı kuvvetin temele olan uzaklığından bulunur. Deniz seviyesinden 119 m yükseklikte olan göbek yüksekliğine 20 m olan deniz seviyesi eklendiğinde 139 m'lik yükseklik bulunmuş olur.

$$1280\ kN\ \times 139m\ = 177\ 920\ kN.m$$

Kulede oluşan rüzgar kuvvetinden kaynaklı temelde oluşan moment aşağıda hesaplanmıştır.

$$3392kN.m$$

Kulede oluşan dalga kuvvetinden kaynaklı temelde oluşan moment aşağıda hesaplanmıştır.

$$7422\ kN.m$$

Temelde oluşan toplam moment hesabı:

$$3392 + 7422 + 177{,}920 = 188\ 734\ kN.m$$

Böylece rüzgar hızının 9.20 m/s, dalga boyunun 1 m, dalga periyotunun 5 s olduğu senaryoda, oluşan kuvvetin temelde oluşturduğu toplam moment 188 734 kN.m olarak hesaplanmıştır.

Toplam Kuvvet:

F_T=1280+515.3 +44.9

F_T= 1840.2 kN elde edilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı senaryolarda temele etki eden toplam kuvvetler

Koşullar	Rotorda oluşan kuvvet	Etki eden toplam dalga kuvveti	Kuleye etki eden rüzgardan kaynaklı sürükleme kuvveti	TOPLAM KUVVET	TOPLAM MOMENT
Rüzgar hızı 9.2 m/s Dalga boyu 1 m Temel çapı 9 m	1280 kN	512.8 kN	44.89 kN	1837 kN	188.7 MN.m
Rüzgar hızı 20 m/s Dalga boyu 3 m Temel çapı 9 m	2850 kN	949.8 kN	187.7 kN	3987.5 kN	422.7 MN.m
Rüzgar hızı 7.06 m/s Dalga boyu 0 m Temel çapı 9m	900 kN	0 kN	27 kN	927 kN	127.3 MN.m
Rüzgar hızı 7.06 m/s Dalga boyu 1 m Temel çapı 8 m	900 kN	403.4 kN	24.4 kN	1327.8 kN	132.8 MN.m
Rüzgar hızı 7.06 m/s Dalga boyu 1m Temel çapı 10 m	900 kN	612.8 kN	30.3 kN	1543.1 kN	136.5 MN.m

Ekler bölümünde işlemlerin ayrıntıları sunulmuştur.

Tablo 5.1'de çeşitli senaryolarda ortaya çıktığı hesaplanan toplam kuvvetler gösterilmektedir. Yıl içinde çoğu zaman etki eden rüzgar ve dalga kuvvetine göre, en yüksek rüzgar hızı ve dalga kuvvetine maruz kaldığı; sadece rüzgar kuvveti olup dalga kuvvetinin hiç olmadığı; temel çapının 8 m'ye düşürüldüğü ve 10 m'ye yükseltildiği durumlarda türbine etki eden kuvvetler tabloda belirtilmiştir.

5.3.7. Temel boyutunun dayanıklılıkla ilişkisi

Yukarıdaki simülasyonlarda türbin temelinin çapı 8 ve 10 m olduğu koşullarda simülasyonlar yapılmıştır. Türbinin temelinin çapı değiştirildiğinde birçok değer değişmektedir. Aşağıda, türbin temelinin 10 ve 8 m olduğu koşullardaki dayanıklılık hesapları verilmiştir:

Aşağıda kullanılan formüller Beer, F.P., Johnston, E.R., DeWolf tarafından yazılmış "Mechanics of Materials" kitabından alınmıştır.

Hesaplanmış olan toplam momentler:

Temel çapı 10 m =136.5 MN.m

Temel çapı 8 m = 132.8 MN.m

Dış Çaplar:

D_1= 10 m D_2= 8 m

Dış Yarıçaplar:

$R_{dış}$= 5 m $R_{dış}$=4 m

Duvar kalınlığı 6 cm olarak alınmıştır.

$R_{iç}$= 4.94 m $R_{iç}$= 3.94 m

Atalet Momenti Hesabı:

$I = \frac{\pi}{4} * (Rdış^4 - Riç^4)$

$I_{10m} = \frac{\pi}{4} * (5^4 - 4.94^4) = 23.14\ m^4$

$I_{8m} = \frac{\pi}{4} * (4^4 - 3.94^4) = 11.794 m^4$

Dayanıklılık momenti hesabı:

$Z = \frac{I}{c} = \frac{I}{D/2}$

$Z_{10m} = \frac{23,140}{5} \approx 4.63\ m^3$

$Z_{8m} = \frac{11,794}{4} \approx 2.95\ m^3$

Eğilme gerilmesi hesabı

$\sigma = \frac{M}{Z}$

Daha önceden hesaplanan momentler kullanılacaktır.

M_{10} = 136.5 MN.m

M_8 = 132.8 MN.m

$\sigma_{10m} = \frac{136,500,000}{4,628} \approx 30.2$ MPa

$\sigma_{8m} = \frac{132,800,000}{2,948} \approx 45.7$ MPa

Gerilme artışı yüzdelik hesabı

$\frac{45.7 - 30.2}{30.2} \approx 52\%$

Yüzde 52'lık gerilim artışı yaşanmış oldu.

Rüzgar türbinlerinde yüksek mukavemeti, kaynaklamanın iyi olması, uygun maliyeti sayesinde S235 çeliği kullanılması önerilir.

S235 Çeliğinin akma dayanımı= 235 MPa

σ_{10m}=30.2 MPa<235 MPa σ_{8m}=45.7 MPa<235 MPa

Gerilimde yaşanan artışa rağmen türbin temelinde bulunan çeliğin akma dayanımı, türbin temeli 8 m'ye düşürüldüğü senaryoda dayanılabilecek en yüksek akma dayanımının yaklaşık %20'si seviyesinde kaldığı için güvenlik katsayılarının göz önünde bulundurulduğu koşullarda dahi kullanılabilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

Olası en yüksek kuvvetlerin yaşandığı senaryoda oluşan toplam moment = 422.7 MN.m

Dış çap= 8 m

Dış yarıçap = 4 m

Duvar kalınlığı 6 cm olarak alınmıştır.

$R_{iç}$= 3.94 m

Atalet Momenti Hesabı:

$I = \frac{\pi}{4} * (Rdış^4 - Riç^4)$

$I_{8m} = \frac{\pi}{4} * (4^4 - 3.94^4) = 11.794 m^4$

Dayanıklılık momenti hesabı:

$Z = \frac{I}{c} = \frac{I}{D/2}$

$Z_{8m} = \frac{11,794}{4} \approx 2.95\ m^3$

Eğilme gerilmesi hesabı

$\sigma = \frac{M}{Z}$

$\sigma = \frac{422,700,000}{2,948} \approx 143$ MPa

S235 Çeliğinin akma dayanımı= 235 MPa

143 MPa <235 MPa

Seçili bölgede yaşanılabilecek en yüksek kuvvetler oluştuğu koşullarda kullanılacak çelik yaşanılacak kuvvete dayanabilecektir.

6. SONUÇ

Çalışmamızın hareket noktası, son yıllarda dünyada gittikçe artan bir ilgiye konu olan deniz üstü rüzgar türbinlerinin Türkiye açısından optimizasyonudur. Genel olarak optimizasyon, en az maliyetle en yüksek verimi alabilmek anlamına gelmektedir. Çalışmamızda konunun ekonomik boyutu veri kabul edilerek, rüzgar türbinine etki eden faktörler bazında teknik bir analiz yapılmıştır.

Böyle bir analizin birinci aşaması, deniz üstü rüzgar türbini için potansiyele sahip yerler arasında seçim yapılmasıdır. Türkiye'de Ulusal Enerji Planı'nda belirlenen deniz üstü rüzgar santrallerinin kurulabileceği dört bölge arasından Bandırma bölgesi seçilerek, 1 yıllık rüzgar hızı verileri toplanmıştır. Rüzgar türbini konusunda teknik bir değerlendirme yapılabilmesi için öncelikle türbine etki eden faktörlerin tespit edilmesi gerekmektedir. Rüzgar türbinine etki eden faktörlerin modellenmesi, türbin temelinin teknik boyutlarının belirlenmesi açısından yol gösterici bilgiler içermektedir. Çalışmamızda, tekil kazıklı (monopile) deniz üstü rüzgar türbininde, temele etki eden rüzgar ve dalga faktörlerinin etkileri modellenmiştir.

Rüzgar hızının modellenmesinde en yaygın kabul gören iki parametreli Weibull dağılımı kullanılarak, toplanılan rüzgar verilerinin kümülatif dağılım fonksiyonu tahmin edilmiştir. Weibull fonksiyonu tahminleri, bölgede gelecekte oluşacak rüzgar gücünü tahmin etmemize olanak sağladığı için, rüzgar türbininin tasarlanması aşamasında kullanılması gereken önemli bir bilgi kaynağı oluşturmaktadır. Weibull fonksiyonunun ölçek ve biçim parametreleri, doğrusal regresyon modeli kurularak, En Küçük Kareler Yöntemiyle (EKKY) tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değerler ile gerçekte ölçülmüş olan değerler birlikte analiz edildiğinde, tahmin edilen modelin gerçek verilere anlamlı biçimde uyumlu oldukları bulunmuştur.

Weibull fonksiyonu parametrelerinin tahmin edilen değerleri, seçilen bölgede kurulabilecek rüzgar türbini santrali temeline etki edecek olan rüzgar hızının boyutunu vermektedir. Enerji üretimi rüzgar hızıyla doğrudan ilişkili olduğu için, elde edilen değerler ekonomik açıdan değerlendirilmek üzere bir fizibilite çalışmasında kullanılabilir.

Tahmin edilen birikimli dağılım fonksiyonu ile türbinin çalışabileceği koşullar olan 'cut-in' hızından yüksek ve 'cut out' hızından düşük rüzgar hızları belirlenerek, türbinin elektrik üretmeye devam edeceği zamanlar olasılık olarak hesaplanmıştır. Bandırma bölgesinde, rüzgar hızının türbinin çalışmasını durduracak ölçüde yüksek olması durumunun

ortaya çıkma olasılığının düşük olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, rüzgar türbininin faaliyete geçeceği en düşük rüzgar hızını ifade eden “cut-in” rüzgar hızının %30 olasılık ile ortaya çıkacağı tahmin edilmiştir. Bulgulardan hareketle, seçilen bölge özelinde bugünden öngörülmesi mümkün olmayan bir olumsuzluk söz konusu olmadığı taktirde, deniz üstü rüzgar türbininin %70 olasılık ile çalışarak elektrik üretmeye devam edeceği çalışmamızın önemli bir sonucudur.

Seçilen bölgede türbinin temeline etki eden dalga kuvveti, sürükleme ve atalet kuvvetlerini dikkate alan Morison denklemi yardımıyla hesaplanmıştır: Dalga boyu artırıldığında türbine etki eden dalga kuvvetinin de arttığı gözlemlenmiştir. Türbinin tekil kazıklı temeline etki eden dalga kuvveti arttıkça temel çapının artması gerektiği belirlenmiştir.

Toplanan ve tahmin edilen değerler aracılığıyla ‘ASHES’ programında simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan simülasyonlarda, türbine etki eden dalga ve rüzgar verileri girilerek türbinin temeline etki eden kuvvetler hesaplanmıştır. Tahmin edilen değerler aracılığıyla, seçilen bölgede oluşabilecek en yüksek rüzgar hızı ve dalga boyu kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Rüzgar hızı artırıldığında türbine etki eden kuvvetlerin net bir şekilde arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Seçilmiş olan bölgede oluşabilecek en yüksek kuvvetlerin oluştuğu senaryo hesaplanmıştır. Rüzgar hızı ve dalga boyunun olağan duruma aykırı şekilde yüksek olmasına rağmen, türbin çapının 8 m olduğu durumda gerilme normal boyutlarda kalmıştır. Bu sayede türbin çapının 8 olmasının bir sakıncası olmadığı gözlemlenmiştir.

Temel çapı 8 m’ye düşürüldüğünde oluşan gerilim %52 artmasına rağmen, bu değer kullanılan çeliğin yeldirme dayanımından, güvenlik katsayıları göz önünde bulundurulduğunda bile, çok daha küçük olduğu için, 8 m’nin uygun bir temel çapı olabileceği belirlenmiştir. Türbin çapı ne kadar küçük olursa temelin kurulumu için gereken çelik miktarı da azalacağı için kurulum maliyeti düşeceği gibi, türbinin taşınması daha kolay hale gelecektir. Kurulum maliyetinin düşürülmesi, deniz üstü rüzgar enerjisine yapılacak yatırımların artması sonucunu yaratacaktır.

KAYNAKLAR

[1] E. Koç ve K. Kaya, "Enerji Kaynakları Yenilenebilir Enerji Durumu," *Mühendis ve Makina,* vol. 56, no. 668, pp. 36-47, 2015.

[2] Y. Malkoç, "Rüzgar Enerjisi Kaynaklarımız," *2.Rüzgar Enerjisi Sempozyumu,* Samsun: Türkiye, 4-5 Haziran 2009, pp. 1-5.

[3] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (2010), Rüzgar Enerjisi Tahmin Sistemi. Available at: https://www.mgm.gov.tr (Accessed: 4 February 2025).

[4] M. Pasqualetti, R. Righter, and P. Gipe, "History of Wind Energy," in *Encyclopedia of Energy*, vol. 6, C. Cleveland, Ed., Academic Press, 2004, pp. 419-433.

[5] E. Kaya (2024). 4. *Rüzgar Enerjisi Tarihçesi ve Türkiye'deki Gelişimi*. Available at: https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/4-ruzgar-enerjisi-tarihcesi-ve-turkiyedeki-gelisimi/ (Accessed: 11 April 2025).

[6] R. Thresher, M. Robinson, and P. Veers, "Wind Energy Technology: Current Status and R&D Future," Conference Paper, NREL/CP-500-43374, Presented at *the Physics of Sustainable Energy Conference*, University of California at Berkeley, August 2008.

[7] National Grid Group (n.d.). *The history of wind energy*. Available at: https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/history-wind-energy (Accessed: 11 April 2025).

[8] M. Durak ve S. Özer (2008). Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama. Available at: https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2021/05/RUZGAR-ENERJISI-TEORI-VE-UYGULAMA_MURAT-DURAK-PDF.pdf (Accessed: 3 January 2025).

[9] S. Hayli, "Rüzgar Enerjisinin Önemi, Dünyada ve Türkiye'deki Durumu," *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi,* vol. 11, no. 1, pp. 1-26, 2001.

[10] M. A. Demir ve H. Yakışık, "Enerjinin Tarihsel Gelişimi," *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, vol.13, no. 3, pp. 1333-1353, 2024.

[11] A.A. Akkaş, “Rüzgar Enerjisi Sistemlerinin Performans Değerlendirmesi,” *Rüzgar Enerjisi Sempozyumu,* İzmir: Türkiye, 5-7 Nisan 2001, pp.75-84.

[12] İklim Değişikliği Başkanlığı (n.d.). *Kyoto Protokolü.* Available at: https://iklim.gov.tr/kyoto-protokolu-i-35 (Accessed: 20 December 2024).

[13] H. Ritchie, P. Rosado, and M. Poser (2020). “Energy Production and Consumption” *Our World in Data.* Available at: https://ourworldindata.org/energy-production-consumption (Accessed: 5 February 2025).

[14] G. Koçaslan, “Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi Çerçevesinde Türkiye’nin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Yeri ve Önemi,” *Sosyal Bilimler Dergisi,* no.1, pp.53-61, 2010.

[15] A. Uysal (2003). “Sürdürülebilir Kalkınma: Genel Bakış,” TÜBİTAK Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Available at: https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/2023-10/EK-3_1.pdf (Accessed: 8 April 2025).

[16] C. Oskay, “Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesinde Rüzgar Enerjisinin Önemi ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Yatırımlarına Yönelik Teşvikler,” *Niğde Üniversitesi İİBF Dergisi,* vol. 7, no. 1, pp. 76-94, 2014.

[17] IRENA International Renewable Energy Agency (2025). *Renewable Capacity Highlights.* Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_H ighlights_2025.pdf (Accessed: 12 April 2025).

[18] IRENA International Renewable Energy Agency (2025). *Record-Breaking Annual Growth in Renewable Power Capacity,* Available at: https://www.irena.org/News/articles/2025/Mar/Record-Breaking-Annual-Growth-in-Renewable-Power-Capacity (Accessed: 12 April 2025).

[19] GWEC Global Energy Council (2024). *Global Offshore Wind Report 2024*. Available at: https://www.gwec.net/reports/globalwindreport (Accessed: 11 April 2025).

[20] IRENA International Renewable Energy Agency (2025). *Wind Energy.* Available at: https://www.irena.org/Energy-Transiton-Technology/Wind-energy (Accessed: 20 April 2025).

[21] IRENA International Renewable Energy Agency (2024). *Renewable Energy Statistics,2024.* Available at: https://www.irena.org/Publications/2024/Mar /Renewable-capacity-statistics-2024 (Accessed: 9 April 2025).

[22] IRENA International Renewable Energy Agency (2025). *Renewable Energy Statistics, 2025.* Available at: https://www.irena.org/Publications/2025/Jul/ Renewable-capacity-statistics-2025 (Accessed: 9 April 2025).

[23] WindEurope (2025). *Wind Report,2025.* Available at: www.windeurope.org (Accessed: 5 February 2025).

[24] Orsted (n.d.). *Hornsea 3*. Hornsea 3 Offshore Wind Farm. Available at: https://hornseaproject3.co.uk (Accessed: 15 April 2025).

[25] TÜİK (n.d.). *Enerji İstatistikleri.* Available at: https://data.tuik.gov.tr (Accessed: 15 April 2025).

[26] TEİAŞ (n.d.). *Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri.* Available at: https://www.teias.gov.tr (Accessed: 16 April 2025).

[27] Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği-TÜREB (n.d.). *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu-Ocak 2025.* Available at: https://tureb.com.tr/yayinlar/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporlari/5 (Accessed: 12 April 2025).

[28] World Bank Group (2024). *Türkiye Denizüstü Rüzgar Enerjisi Yol Haritası: Yeşil Enerji Geleceğine Giden Yolda Seyretmek.* Available at: https://www.worldbank.org/tr/news/press-release/2024/11/07/offshore-wind-roadmap-for-turkiye-navigating-pathways-to-a-green-power-future (Accessed: 20 April 2025).

[29] M. Durak (2020). *Denizüstü Rüzgar Elektrik Santralları.* Available at: https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2021/05/Denizüstü-RES_Murat-Durak-sıkıştırıldı.pdf (Accessed:20 April 2025).

[30] Enerji Atlası (n.d.). *Şehirlerin Elektrik Santrali Kurulu Güçleri ile Üretim ve Tüketim Bilgileri.* Available at: https://www.enerjiatlasi.com/sehir/ (Accessed: 20 April 2025).

[31] Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA) (2014). Güney Marmara Bölgesi Rüzgar Enerjisinde Birinci. Available at: https://www.gmka.gov.tr (Accessed: 9 April 2025).

[32] Temiz Enerji (2023). "Güney Marmara Bölgesi yenilenebilir enerji potansiyeli ile gençlerin istihdama katılımını artıracak," Available at: https://temizenerji.com/2023/08/14/guney-marmara-bolgesi-yenilenebilir-enerji-potansiyeli-ile-genclerin-istihdama-katilimini-artiracak/ (Accessed: 9 April 2025).

[33] EGESA Enerji (2023). "Rüzgar Enerji Sistemlerinin Çalışma Prensibi", Available at: https://egesa.com/blog/ruzgar-enerji-sistemlerinin-calisma-prensibi (Accessed: 10 April 2025).

[34] P. Enevoldsen and G. Xydis, "Examining the trends of 35 years growth of key wind türbine components," *Energy for Sustainable Development,* vol. 50, pp. 18-26, 2019.

[35] wind-turbine-models.com (n.d.). *Tvind Prototype*. Available at: https://en.wind-turbine-models.com/turbines/39-tvind-prototye (Accessed: 20 April 2025).

[36] Renewables First (n.d.). *General windpower information.* Available: https://renewablesfirst.co.uk/renewable-energy-technologies/windpower/windpower-learning-centre/general-windpower/ (Accessed: 15 April 2025).

[37] M. G. Molina and P. E. Mercado, "Modelling and control design of pitch-controlled variable speed wind turbines", Available: https://www.researchgate.net/ publication/221911675, DOI: 10.5772/15880, 2011.

[38] N. Nurbay, ve A. Çınar, (2005). "Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması", Available: http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424 ee_ek.pdf (Accessed: 14 April 2025).

[39] Elektrikport.com (n.d.). *Rüzgar Türbinlerinin çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması*. Available at: https://www.elektrikport.com/haber-roportaj/ruzgar-turbinlerinin-cesitleri-ve-birbirleriyle-karsilastirilmasi/8178#ad-image-4 (Accessed : 15 April 2025).

[40] G. Emniyetli, “Evsel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı,” M.S. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, 2007.

[41] American Geosciences (n.d.). What are the advantages and disadvantages of offshore wind farms? Available at: https://profession.Americangeosciences.org/society/intersections/faq/What are the advantages and disadvantages of offshore wind farms? (Accessed: 12 April 2025).

[42] M. Durak (2021). *Mavi Vatanın Enerjisi: Deniz Üstü Rüzgar Elektrik Santralleri*. Available at: https://ww1.mmo.org.tr/sites/default/files/016_0.pdf (Accessed: 10 April 2025).

[43] X. Wang, X. Zeng, J. Li, X. Yang, and H. Wang, “A Review on recent advancements of substructures for offshore wind turbines,”, *Energy Conversion and Management,* vol. 158, pp. 103-119, 2018.

[44] M. Keene (2021). “Comparing offshore wind turbine foundations,” *Wind Power Engineering Development*, Available at: https://www.windpowe rengineering .com/comparing-offshore-wind-turbine- foundations/ (Accessed: 11 April 2025).

[45] D. Kallehave, B.W. Byrne, C.L.Thilsted, and K. K. Mikkelsen, “Optimization of monopiles for offshore wind turbines,” *Philosophical Transactions A,* vol. 373, no. 2035, pp.1-21, 2015, DOI: 10.1098/rsta.2014.0100.

[46] The University of Rhode Island. “What is vibratory pile driving and how does it compare to impact pile driving?”, Available at: https://web.uri.edu/offshore-renewable-energy/ate/what-is-vibratory-pile-driving-and-how-does-it-compare-to-impact-pile-driving/ (Accessed: 24 April 2025).

[47] The World Economic Forum (2024). How can offshore wind be a nature-positive climate solution?. Available at: https://www.weforum.org/stories/2024/06/how-can-offshore-wind-be-a-cllimate-solution-and-contribute-to-a-nature-positive-transition/ (Accessed: 10 April 2025).

[48] O. İnal (2023). “RES’te ses şikayeti,”, *Çanakkale Web Haber,* Available at : https://www.canakkalewebhaber.com/gundem/reste-ses-sikayeti (Accessed: 14 January 2025).

[49] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (n.d.). Türkiye rüzgar enerji potansiyeli. Available at: https://repa.enerji.gov.tr (Accessed: 20 April 2025).

[50] LuvSide (n.d.). Capacity factor: influence on electricity generation. Available at: https://www.luvside.de/en/capacity-factor-wind-turbine/ (Accessed: 20 April 2025).

[51] E. Caceoğlu, "Offshore Wind Turbines in Marmara Region, TÜRKİYE: Site Selection and Preliminary Geotechnical Design of Monopiles," Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2023.

[52] H. McKenzie (2023). *How to Optimize Location Planning for Wind Turbines*. Available at: https://carto.com/blog/location-planning-for-wind-turbines (Accessed: 8 April 2025).

[53] F. Blaabjerg, and K. Ma, "Wind Energy Systems,", *Proceedings of the IEEE,* vol. 105, no. 11, pp. 2116-1231, 2017.

[54] S. Tumse, M. Bilgili, A. Yıldırım ve B. Şahin, "Comparative Analysis of Global Onshore and Offshore Wind Energy Characteristics and Potentials," *Sustainability,* MDPI, vol. 16, no. 15, pp. 6614. Available at: https:/doi.org/10.3390/su16156614, 2024.

[55] C. Devriendt, P. J. Jordaens, G. De Sitter, and P. Guillaume , "Damping estimation of an offshore wind türbine on a monopile foundation" *European Wind Energy Association,* 2012. Available: https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/iet-rpg.2012.0276. Accessed: 30 April 2025.

[56] A. Malekjafarian, S. Jalilvand, P. Doherty, and D. Igoe, "Foundation damping for monopile supported offshore wind turbine: A review," *Marine Structures,* vol. 77, no.102937, pp. 1-22, 2021.

[57] E. N. Wayman, P. Sclavounos, S. Butterfield, J. Jonkman, and W. Musial, "Coupled dynamic modelling of floating wind türbine systems," Golden, CO (United States), *National Renewable Energy Lab. (NREL),* 2006.

[58] C. Chen and P. Duffour, "Modelling damping sources in monopile-supported offshore wind turbines," *Wind Energy,* 21, pp. 1121-1140, 2018.

[59] D. C. Salaman and J. Van der Tempel, “Aerodynamic damping in the design of support structures for offshore wind turbines,” In: *Paper of the Copenhagen offshore conference, Citeseer,* Available at: https://citeseerx.ist.psu.edu, 2005.

[60] M. Ozbek, and D. J. Rixen, “Operational modal analysis of a 2.5 MW wind türbine using optical measurement techniques and strain gauges,” *Wind Energy,* 16, pp. 367-381, 2013.

[61] L. D. Dilas, “Estimation of soil damping contribution on offshore monopiles using Plaxis 3D approach,” M. S. Thesis, TU Delft, Civil Engineering and Geosciences, Netherland, 2018, Available at: http://resolver.tudelft.nl/uuuid:69c1590f-d4b3-4da1-9181-4960966ea52a.

[62] J. Jonkman, and P. Sclavounos. (2006). Development of fully coupled aeroplastic and hydrodynamic models for offshore wind turbines. Presented at 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 995.

[63] M. F. Cook, and J. K. Vandiver. (1982). Measured and predicted dynamiz response of a single pile platform to random wave excitation. Presented at Offshore Technology Conference. Available: https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program/002ak.pdf

[64] R. Shirzadeh, C. Devriendt, M. A. Bidakhvidi, and P. Guillaume, “Experimental and computational damping estimation of an offshore wind türbine on a monopile foundation,” *Journal of Wind Engineering and Individual Aerodynamics,* 120, pp. 96-106, 2013.

[65] *Overall Damping for Piled Offshore Support Structures.* Available: https://www.scribd.com/document/520939659/1-d-Overall-Damping-for-Piled-Offshore-Support-Structures. Accessed: May 1, 2025.

[66] M. Damgaard, and J. K. Andersen. (2012). Natural Frequency and damping estimation of an offshore wind türbine structure. Presented at The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, Rhodes, Greece, June 17-23.

[67] A. Arany, S. Bhattacharya, J. H. Macdonald, and S. J. Hogan, "Closed form solution of Eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSI", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* vol. 83, no. 12, pp. 18-32, 2016.

[68] M. Ishtiyak, and A. Sarkar, "Optimizing a monopile with a bottom-supported tension leg tower concept for offshore wind turbine in intermediate waters," *Ocean Engineering,* vol. 328, no. 121055, pp. 1-15, 2025.

[69] Y. J. Kim, J. Choe, J. Lim, and S. W. Choi, "Foundation types of fixed offshore wind turbine," *Journal of Ocean Engineering and Technology,* vol. 38, no. 2, pp. 74-85, 2024.

[70] E. G. Sakka, D. V. Bilionis, D. Vamvatsikos, and C. J. Gantes, "Onshore wind farm siting priorization based on investment profitability for Greece,", *Renewable Energy,* vol. 146, pp. 2827-2839, 2020.

[71] Historical weather *API*. Open. (n.d.). https://open-meteo.com/en/docs/historical-weather-api?end_date=2025-01-02&hourly=wind_speed_100m&latitude=40.5272&longitude=28.2203&start_date=2024-01-02&wind_speed_unit=ms

[72] V. Ceyhan (n.d.). *Durağanlık Tespiti ve Testleri.* On Dokuz Mayıs Üniversitesi Ders Notları, Available at: https://avys.omu.edu.tr/app/public/vceyhan (Accessed: 24 April 2025).

[73] Ö. G. Alma ve Ö. Vupa, "Regresyon analizinde kullanılan en küçük kareler veren küçük medyan kareler yöntemlerinin karşılaştırılması," *SDÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi (E-Dergi),* vol.3, no. 2, pp. 219-229, 2008.

[74] Bandirma Rüzgar Enerji santrali. *Bilgin Enerji* (n.d.). Available at: https://bilgin.com.tr/tr/tesisler/ruzgar-enerji-santralleri/bandirma-ruzgar-enerji-santrali (Accessed: 14 May 2025).

[75] *NREL_5MW_126_RWT*¶. NREL_5MW_126_RWT - NREL/turbine-models power curve archive 0 documentation. (n.d.). Available at: https://nrel.github.io/turbine-models/NREL_5MW_126_RWT.html (Accessed: 14 May 2025)

EKLER

EK 1: Farklı Senaryolarda Rüzgar Kuvveti ve Moment Hesabı

1. Rüzgar hızının 7.06 m/s, dalga boyunun 1 m, temel çapının 8 m olduğu senaryo

RÜZGAR

Birim	Rotor göbeğinde oluşan kuvvet (kN)	Rötor göbeği tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
	900.00	139.00	125,100.00

Birim	Kuleye etki eden rüzgar kuvveti (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
	0.61	20.00	12.20
	1.22	25.00	30.50
	1.22	30.00	36.60
	1.22	35.00	42.70
	1.22	40.00	48.80
	1.14	44.95	51.24
	1.13	49.90	56.39
	1.12	54.85	61.43
	1.11	59.80	66.38
	1.10	64.75	71.23
	1.08	69.70	75.28
	1.07	74.65	79.88
	1.06	79.60	84.38
	1.04	84.55	87.93
	1.02	89.50	91.29
	1.00	94.45	94.45
	0.98	99.40	97.41
	0.97	104.35	101.22
	0.95	109.30	103.84
	0.93	114.25	106.25
	0.92	119.20	109.66
	0.90	124.15	111.74
	0.88	129.10	113.61
	0.86	134.05	115.28
	0.85	139.00	118.15
Toplam	0.00	25.60	1,967.82

			(kN)	Hız (m/s)
C_d=	1.00		0.61	7.06
rho=	1.2250	kg/m3		

DALGA

Birim	Sürüklenme Kuvveti (kN)	Atalet kuvveti (kN)	Kuvvetler toplamı (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
	0.1	40	40.1	5	200.50
	0.5	89	89.5	10	895.00
	2.6	159	161.6	15	2,424.00
	2.2	110	112.2	20	2,244.00
	5.4	398	403.4		5,763.50

			Net kuvvet (kN)	Hız (maks) (m/s)	Net kuvvet (kN)	Hız (maks) (m/s)
C_d=	1.20					
C_m=	1.63		0	0.00	0	0.00
rho=	1026.9	kg/m3	40	0.15	0.1	0.09
			49	0.19	0.4	0.18
			110	0.42	2.2	0.42

2. Rüzgar hızının 9.2 m/s, dalga boyunun 1 m, temel çapının 9 m olduğu senaryo

RÜZGAR

Birim		Rotor göbeğinde oluşan kuvvet (kN)	Rötor göbeği tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
		1280.00	139.00	177,920.00

Birim		Kuleye etki eden rüzgar kuvveti (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
		1.16	20	23.2
		2.32	25	58
		2.32	30	69.6
		2.32	35	81.2
		2.32	40	92.8
		2.02	44.95	90.799
		1.98	49.9	98.802
		1.95	54.85	106.9575
		1.92	59.8	114.816
		1.89	64.75	122.3775
		1.87	69.7	130.339
		1.83	74.65	136.6095
		1.8	79.6	143.28
		1.77	84.55	149.6535
		1.74	89.5	155.73
		1.71	94.45	161.5095
		1.68	99.4	166.992
		1.64	104.35	171.134
		1.61	109.3	175.973
		1.58	114.25	180.515
		1.55	119.2	184.76
		1.52	124.15	188.708
		1.49	129.1	192.359
		1.46	134.05	195.713
		1.44	139	200.16
Toplam	0.00	44.89		3,391.99

DALGA

Birim	Sürüklenme Kuvveti (kN)	Atalet kuvveti (kN)	Kuvvetler toplamı (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
	0.095	42	42.095	5	210.48
	0.5	122	122.5	10	1,225.00
	2.9	202.6	205.5	15	3,082.50
	2.5	140.2	142.7	20	2,854.00
	5.995	506.8	512.795		7,371.98

3. Rüzgar hızının 20 m/s, dalga boyunun 3 m, temel çapının 8 m olduğu senaryo

RÜZGAR

Birim		Rotor göbeğinde oluşan kuvvet (kN)	Rötor göbeği tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
		2850.00	139.00	396,150.00

Birim		Kuleye etki eden rüzgar kuvveti (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
		5.1	20	102
		10.2	25	255
		10.2	30	306
		10.2	35	357
		10.2	40	408
		8.7	44.95	391.065
		8.63	49.9	430.637
		8.5	54.85	466.225
		8.3	59.8	496.34
		8.13	64.75	526.4175
		7.89	69.7	549.933
		7.75	74.65	578.5375
		7.5	79.6	597
		7.28	84.55	615.524
		7.13	89.5	638.135
		6.98	94.45	659.261
		6.8	99.4	675.92
		6.61	104.35	689.7535
		6.4	109.3	699.52
		6.22	114.25	710.635
		6.08	119.2	724.736
		5.9	124.15	732.485
		5.78	129.1	746.198
		5.66	134.05	758.723
		5.55	139	771.45
Toplam	0.00	187.69		13,886.50

DALGA

Birim	Sürüklenme Kuvveti (kN)	Atalet kuvveti (kN)	Kuvvetler toplamı (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
	1.1	110	111.1	5	555.50
	4.9	280	284.9	10	2,849.00
	13.8	350	363.8	15	5,457.00
	10	180	190	20	3,800.00
	29.8	920	949.8		12,661.50

4. Rüzgar hızının 7.06 m/s, dalga boyunun 1 m, temel çapının 10 m olduğu senaryo

RÜZGAR

Birim	Rotor göbeğinde oluşan kuvvet (kN)	Rötor göbeği tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
	900.00	139.00	125,100.00

Birim	Kuleye etki eden rüzgar kuvveti (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
	0.763	20	15.26
	1.52	25	38
	1.52	30	45.6
	1.52	35	53.2
	1.52	40	60.8
	1.41	44.95	63.3795
	1.39	49.9	69.361
	1.38	54.85	75.693
	1.36	59.8	81.328
	1.34	64.75	86.765
	1.33	69.7	92.701
	1.31	74.65	97.7915
	1.3	79.6	103.48
	1.28	84.55	108.224
	1.26	89.5	112.77
	1.24	94.45	117.118
	1.22	99.4	121.268
	1.21	104.35	126.2635
	1.19	109.3	130.067
	1.17	114.25	133.6725
	1.15	119.2	137.08
	1.13	124.15	140.2895
	1.12	129.1	144.592
	1.1	134.05	147.455
	1.08	139	150.12
Toplam	31.81		2,452.28

DALGA

Birim	Sürüklenme Kuvveti (kN)	Atalet kuvveti (kN)	Kuvvetler toplamı (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
	0.14	52	52.14	5	260.70
	0.66	129	129.66	10	1,296.60
	3.3	251	254.3	15	3,814.50
	2.75	174	176.75	20	3,535.00
	6.85	606	612.85		8,906.80

5. Rüzgar hızının 7.06 m/s, dalga boyunun 0 m, temel çapının 9 m olduğu senaryo

RÜZGAR

Birim		Rotor göbeğinde oluşan kuvvet (kN)	Rötor göbeği tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
		900.00	139.00	125,100.00

Birim		Kuleye etki eden rüzgar kuvveti (kN)	Tabandan yükseklik (m)	Tabanda oluşan moment (kN.m)
		0.69	20	13.8
		1.38	25	34.5
		1.38	30	41.4
		1.38	35	48.3
		1.38	40	55.2
		1.27	44.95	57.0865
		1.25	49.9	62.375
		1.24	54.85	68.014
		1.23	59.8	73.554
		1.22	64.75	78.995
		1.2	69.7	83.64
		1.18	74.65	88.087
		1.16	79.6	92.336
		1.14	84.55	96.387
		1.11	89.5	99.345
		1.09	94.45	102.9505
		1.08	99.4	107.352
		1.06	104.35	110.611
		1.04	109.3	113.672
		1.03	114.25	117.6775
		1.02	119.2	121.584
		1	124.15	124.15
		0.98	129.1	126.518
		0.97	134.05	130.0285
		0.95	139	132.05
Toplam	0.00	28.43		2,179.61