



**T.C.**

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM BİLİM DALI**

**TR22 GÜNEY MARMARA BÖLGESİ'NİN AÇIK DENİZ  
(OFFSHORE) RÜZGAR ENERJİ TÜRBİNLERİNİN KURULMA  
POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**HASAN HAKAN BAŞARAN**

**Tez Danışmanı**

**PROF. DR. İSMAİL TARHAN**

**ÇANAKKALE – 2023**





T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**TR22 GÜNEY MARMARA BÖLGESİ'NİN AÇIK DENİZ (OFFSHORE)  
RÜZGAR ENERJİ TÜRBİNLERİNİN KURULMA POTANSİYELİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

HASAN HAKAN BAŞARAN

Tez Danışmanı

PROF. DR. İSMAİL TARHAN

ÇANAKKALE – 2023



T.C.  
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Hasan Hakan BAŞARAN tarafından Prof. Dr. İsmail TARHAN yönetiminde hazırlanan ve **31/08/2023** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**TR22 Güney Marmara Bölgesi'nin Açık Deniz (Offshore) Rüzgar Enerji Türbinlerinin Kurulma Potansiyelinin Araştırılması**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**İmza**

Prof. Dr. İsmail Tarhan  
(Danışman)

.....

Prof. Dr. Hüseyin ÇAVUŞ

.....

Doç. Dr. Taner TANRIVERDİ

.....

Doç. Dr. Özlem Kocahan YILMAZ

.....

Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer YÜCEL

.....

Tez No : .....

Tez Savunma Tarihi : 31/08/2023

Prof. Dr. Ahmet Evren ERGİNAL  
Enstitü Müdürü

.././20..

## ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Hasan Hakan BAŞARAN

31/08/2023

## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca bilimsel verilerin nasıl analiz edileceği, bu analizler sonucunda neler elde edileceği ve akademik hayatımda benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. İsmail TARHAN'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmama değerli tecrübe ve bilgileriyle her türlü desteği bilimsel desteği sağlayan sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇAVUŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer YÜCEL hocalarıma teşvikleri için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının gerçekleşmesi süresince bilgi ve birikimlerini aktararak, verilerin toplanmasına, teorik ve deneysel anlamda desteklerini esirgemeyen Sayın Erman KAYA'ya teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, çalışmam süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, yaşadığım olumsuzluklarda ve iyi günlerimde yanımda olan, maddi manevi her türlü desteği benden hiçbir zaman eksik etmeyen, hayatımın her evresinde bana destek olan anneme, babama, kardeşime ve canı gönülden sevdiğim ve saydığım değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hasan Hakan BAŞARAN  
Çanakkale, Ağustos 2023

## ÖZET

# TR22 GÜNEY MARMARA BÖLGESİ'NİN AÇIK DENİZ (OFFSHORE) RÜZGAR ENERJİ TÜRBİNLERİNİN KURULMA POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

Hasan Hakan BAŞARAN  
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı Doktora Tezi  
Danışman: Prof. Dr. İsmail TARHAN

31/08/2023, 89

İçinde bulunduğumuz çağda artan enerji talebi ışığında temiz ve doğal enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmazdır, bu ihtiyaçlar doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarında rüzgar enerjisine olan eğilim her yıl artmaktadır. Bu nedenle karadaki rüzgar enerjisi sahalarının yanı sıra açık denizlerdeki rüzgar enerjisi sahalarının da kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Son yıllarda açık deniz sahalarında rüzgar enerjisi verimliliği daha yüksek olduğu için rüzgar santrallerinin kurulması önem kazanmıştır. Türkiye'de henüz açık deniz rüzgar santrali bulunmamakla birlikte çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada, WindPRO yazılımı kullanılarak 1992-2022 yılları arası için elde edilen veriler ile Türkiye'nin TR22 (Güney Marmara) bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyeli incelenmiştir. Açık deniz rüzgar türbinleri kurulumu için en uygun yerin seçilmesi amacıyla çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan MOORA yöntemi kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere ve seçilen kriterlere göre Balıkesir ve Çanakkale illerinin yer aldığı Güney Marmara Bölgesi'ndeki en uygun yerler sıralanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Açık deniz rüzgar türbini, Türkiye'nin rüzgar potansiyeli, MOORA, Rüzgar enerjisi, Açık deniz rüzgar enerjisi, WindPro

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE POTENTIAL TO INSTALL OFFSHORE WIND ENERGY TURBINES IN TR22 SOUTH MARMARA REGION

Hasan Hakan Başaran

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Department of Physics PhD Thesis

Advisor: Prof. Dr. İsmail TARHAN

08/31/2023, 89

In the light of the increasing energy demand in our age, it is inevitable to turn to clean and natural energy sources, and the tendency towards wind energy is increasing every year in line with these needs. For this reason, it is obligatory to use wind energy fields in the open sea as well as onshore wind energy fields. Since wind energy efficiency is high, the establishment of wind power plants in offshore areas has gained importance in recent years. Although there is no offshore wind farm in Türkiye yet, studies are still ongoing. The wind energy potential of Türkiye's TR22 (South Marmara) region was examined with the data obtained from WindPro software between 1992-2022. Analysis was carried out using the MOORA method, which is one of the multi-criteria decision-making methods, in order to select the most suitable location for offshore wind turbines. According to the obtained data and selected criteria, the most suitable places in the Southern Marmara Region are listed.

**Keywords:** Offshore wind turbine, Türkiye's wind potential, MOORA, Wind energy, Offshore wind energy, WindPro



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x

### BİRİNCİ BÖLÜM

#### GİRİŞ

1.1. Giriş.....	1
1.2. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi.....	5
1.3. Temellerine Göre Açık Deniz Rüzgar Türbin Tipleri.....	7
1.3.1. Ağırlık (Yerçekimi) Temelli.....	7
1.3.2. Tek Kazıklı Temeller.....	8
1.3.3. Kova Temeller.....	8
1.3.4. Üç Kazıklı Temel.....	8
1.3.5. Kafes Temel.....	8
1.3.6. Yüzer Temel.....	8
1.4. Çalışmada Kullanılan Türbin Tipi.....	9

### İKİNCİ BÖLÜM

#### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Dünya’da Yapılan Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Çalışmaları.....	10
2.2. Türkiye’de Yapılan Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Çalışmaları.....	11

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM  
MATERYAL YÖNTEM

14

3.1. Rüzgar Gücü ve Enerjisi.....	14
3.2. Doğrusal Momentum Teorisi ve Betz Yasası.....	15
3.3. Rüzgar Veri Analizinde Dağılım Fonksiyonları.....	19
3.3.1. Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu.....	19
3.3.2. Rayleigh Olasılık Dağılım Fonksiyonu.....	20
3.4. Kapasite Faktörü.....	20
3.5. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi.....	21
3.5.1. Hellmann Bağıntısı .....	21
3.6. Pürüzlülük Uzunluğu.....	22
3.7. Türbülans Yoğunluğu.....	23
3.8. MOORA Yöntemi.....	23
3.9. WindPRO Yazılımı.....	25

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM  
ARAŞTIRMA BULGULARI

27

4.1. Ayvacık Bölgesi.....	29
4.2. Ayvalık Bölgesi.....	33
4.3. Bandırma Bölgesi.....	37
4.3.1. Bandırma Bölgesi – Batı.....	38
4.3.2. Bandırma Bölgesi – Doğu.....	41
4.4. Bozcaada Bölgesi.....	45
4.4.1. Bozcaada Bölgesi – Kuzey.....	46
4.4.1. Bozcaada Bölgesi – Güney.....	49
4.5. Eceabat Bölgesi.....	53
4.6. Edremit Körfezi.....	56
4.7. Erdek Bölgesi.....	60
4.8. Gökçeada Bölgesi.....	63
4.8.1. Gökçeada Bölgesi – Güney.....	64
4.8.2. Gökçeada Bölgesi – Kuzey.....	67

BEŞİNCİ BÖLÜM  
SONUÇ ve ÖNERİLER

	72
5.1. Sonuç ve Öneriler .....	72
KAYNAKÇA .....	80
EKLER.....	I
EK-1 MOORA Yöntemi ile En Uygun Yer Seçim Sıralama Kriterleri.....	I



## SİMGELER VE KISALTMALAR

AHP	Analytical Hierarchical Process
CAPEX	Capital Expenditures
CBS	Coğrafi Bilgi Sistem
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
DWIA	Danish Wind Industry Association
ECMWF	Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi
EIA	U.S. Energy Information Administration
ETKB	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GIS	Geographic Information System
GMKA	Güney Marmara Kalkınma Ajansı
GWEC	Global Wind Energy Council
IRENA	The International Renewable Energy Agency
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MERRA	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
MOORA	Multi-Objective Optimization on the Basis of Ratio Analysis
MRC	The Meteorological Resource Center
MTA	Maden Tetkik Arama Enstitüsü
NHMRC	Ulusal Sağlık ve Tıbbi Araştırma Konseyi
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı
OWE-GIS	Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Coğrafi Bilgi Sistemi
RES	Rüzgar Elektrik Santrali
SMCDA	Spatial Multi-Criteria Decision Analysis
TUREB	Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
%	Yüzde
c	Ölçek Parametresi
Hz	Herzt
k	Şekil Parametresi
KF	Kapasite Faktörü
m	Metre
km	Kilometre

rmp	Revolutions per minute
s	Saniye
sa	Saat
TW	Terawatt
W	Watt
KW	Kilowatt
GW	Gigawatt
h	Saat
$\sigma$	Standart Sapma



## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo No</b>	<b>Tablo Adı</b>	<b>Sayfa No</b>
<b>Tablo 1</b>	SG 6.0-155 model/ versiyonu rüzgar türbin özellikleri (WindPro)	10
<b>Tablo 2</b>	Hellmann katsayısının topografik verilere göre değişimi	26
<b>Tablo 3</b>	Pürüzlülük sınıfları, bölge ve uzunlukları	27
<b>Tablo 4</b>	Türbülans yoğunluğu sınıfları	28
<b>Tablo 5</b>	Çalışmada kullanılan türbin özellikleri (WindPRO)	31
<b>Tablo 6</b>	MOORA yöntemi için dikkate alınan kriterler	33
<b>Tablo 7</b>	MOORA yöntemi için alternatif konumlar	33
<b>Tablo 8</b>	Ayvacık için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro) 36	37
<b>Tablo 9</b>	Ayvalık için Hesaplanan Yıllık Enerji Üretim Bilgileri (WindPro)	41
<b>Tablo 10</b>	Bandırma-Batı Kesimi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	45
<b>Tablo 11</b>	Bandırma-Doğu Kesimi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	49
<b>Tablo 12</b>	Bozcaada-Kuzey Kesimi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	53
<b>Tablo 13</b>	Bozcaada-Güney Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	56
<b>Tablo 14</b>	Eceabat Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	60
<b>Tablo 15</b>	Edremit Körfezi Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	64
<b>Tablo 16</b>	Erdek Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	67
<b>Tablo 17</b>	Gökçeada-Güney Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	71

<b>Tablo 18</b>	Gökçeada-Kuzey Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)	75
<b>Tablo 19</b>	Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Güç Yoğunluğuna Göre Sıralanışı	79
<b>Tablo 20</b>	Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Rüzgar Hızına Göre Sıralanışı	79
<b>Tablo 21</b>	Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Kapasite Faktörüne Göre Sıralanışı	80
<b>Tablo 22</b>	Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Su Derinliğine Göre Sıralanışı	80
<b>Tablo 23</b>	Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Türbülans Yoğunluğuna Göre Sıralanışı	81
<b>Tablo 24</b>	Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Önem Katsayısına Göre Sıralanışı	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Charles F. Brush'ın elektrik enerjisi üretmek için kullandığı 1887-1888 tarihli yel değirmeni	2
Şekil 2	Yıllara göre karasal ve açık deniz rüzgar santrali yeni kurulumlarının güç dağılımı	3
Şekil 3	Nisan, 2023 itibariyle Türkiye'de Enerji Dağılımı	4
Şekil 4	Türkiye'deki RES'ler için kümülatif kurulum	5
Şekil 5	Bölgelere göre RES'lerinin güç (MW) ve oran (%) cinsinden dağılımı	6
Şekil 6	Temellerine göre açık deniz rüzgar türbinleri	7
Şekil 7	Rüzgar akım türbini	21
Şekil 8	Fay hatlarına olan yakınlıklar; a) Ayvacık, b) Ayvalık, c) Bandırma-1, d) Bandırma-2, e) Bozcaada-1, f) Bozcaada-2, g) Eceabat, h) Edremit Körfezi, i) Erdek, j) Gökçeada-1, k) Gökçeada-2	34
Şekil 9	Ayvacık bölgesi taranan alan ve türbin yerleştirmeleri	35
Şekil 10	Ayvacık bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	36
Şekil 11	Ayvacık bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	36
Şekil 12	Rüzgar Veri Analizi – Ayvacık	38
Şekil 13	Ayvalık bölgesi taranan alan ve türbin yerleştirmeleri	39
Şekil 14	Ayvalık bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	40
Şekil 15	Ayvalık bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	40
Şekil 16	Rüzgar Veri Analizi – Ayvalık	42
Şekil 17	Bandırma-Batı bölgesi kesimi için taranan alan ve türbin yerleştirmeleri	43



<b>Şekil 18</b>	Bandırma-Batı bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	44
<b>Şekil 19</b>	Bandırma-Batı bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	44
<b>Şekil 20</b>	Rüzgar Veri Analizi – Bandırma-Batı Kesimi	46
<b>Şekil 21</b>	Bandırma-Doğu bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri	47
<b>Şekil 22</b>	Bandırma-Doğu bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	48
<b>Şekil 23</b>	Bandırma-Batı bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	48
<b>Şekil 24</b>	Rüzgar Veri Analizi – Bandırma-Doğu	50
<b>Şekil 25</b>	Bozcaada-kuzey bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri	51
<b>Şekil 26</b>	Bozcaada-Kuzey bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	52
<b>Şekil 27</b>	Bozcaada-Kuzey bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	52
<b>Şekil 28</b>	Rüzgar Veri Analizi – Bozcaada-Kuzey	54
<b>Şekil 29</b>	Bozcaada-Güney bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri	55
<b>Şekil 30</b>	Bozcaada-Güney bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	55
<b>Şekil 31</b>	Bozcaada-Güney bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	56
<b>Şekil 32</b>	Rüzgar Veri Analizi – Bozcaada-Güney	57
<b>Şekil 33</b>	Eceabat bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri	58
<b>Şekil 34</b>	Eceabat bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	59
<b>Şekil 35</b>	Eceabat bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	59
<b>Şekil 36</b>	Rüzgar Veri Analizi – Eceabat	61
<b>Şekil 37</b>	Edremit Körfezi bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri	62

<b>Şekil 38</b>	Edremit Körfezi bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	62
<b>Şekil 39</b>	Edremit Körfezi bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	63
<b>Şekil 40</b>	Rüzgar Veri Analizi – Edremit Körfezi	64
<b>Şekil 41</b>	Erdek bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri	65
<b>Şekil 42</b>	Erdek bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	66
<b>Şekil 43</b>	Erdek bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	67
<b>Şekil 44</b>	Rüzgar Veri Analizi – Erdek	68
<b>Şekil 45</b>	Gökçeada-Güney bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri	69
<b>Şekil 46</b>	Gökçeada-Güney bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	70
<b>Şekil 47</b>	Gökçeada-Güney bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	70
<b>Şekil 48</b>	Rüzgar Veri Analizi – Gökçeada Güney	72
<b>Şekil 49</b>	Gökçeada-Kuzey bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri	73
<b>Şekil 50</b>	Gökçeada-Kuzey bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık	73
<b>Şekil 51</b>	Gökçeada-Kuzey bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık	74
<b>Şekil 52</b>	Rüzgar Veri Analizi – Gökçeada Kuzey	75

# BİRİNCİ BÖLÜM

## GİRİŞ

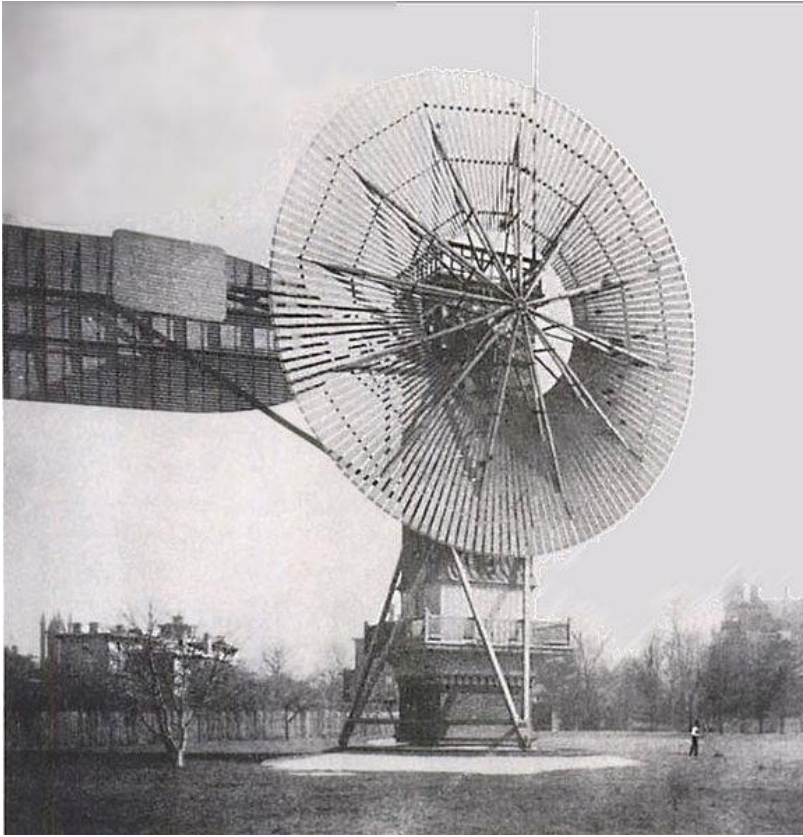
### 1.1. Giriş

Enerjiye olan ihtiyaç insanlık tarihi kadar eskidir ve doğru orantılı olacak şekilde artmaktadır. İnsanlık tarihinde ilk modern aletlerin kullanımı ile enerji ihtiyacını sağlayan toplumlar diğerlerine göre daha önde olmuşlardır. İlk kullanılan enerjilerden birisi de rüzgar enerjisidir, bu sayede toplumlar hayatlarının bir kısmını daha da kolaylaştırarak diğer önceliklerine daha fazla zaman ayırabilmiş ve gelişmişlerdir. İlk çağlarda kullanılan rüzgar enerjisi; kuyulardan su çekmede, yiyecek ihtiyaçlarını karşılamak için yel değirmenlerinde öğütme gibi işlemlerle kullanılmıştır. Detaylandırarak olursak MÖ 5.000 gibi erken bir tarihte tekneleri Nil Nehri boyunca ilerletmek için rüzgar enerjisini kullandılar. MÖ 200'e gelindiğinde, Çin'de rüzgarla çalışan basit su pompaları kullanılıyordu, İran'da ve Orta Doğu'da dokuma kamış bıçaklı yel değirmenleri tahıl öğütüyordu (EIA, 2023). Daha sonraları da rüzgar enerjisi toplumların gelişimiyle denizcilikte kullanılmış, yeni ticaret yolları ve ulaşımda kullanılmıştır.

Teknolojinin gelişimi ile rüzgar enerjisinden faydalanma daha da artmış ve Amerikalı Charles F. Brush, 1887-1888 yılı kış aylarında ilk kez kullanılan (Şekil 1.) elektrik üretmek için rüzgarla çalışan bir makine kullanan ilk kişi kabul edilmiştir (Price, 2005). Elektrik enerjisi üretimi için kullanılan ilk yel değirmeni, İskoçya'da 1887 yazında Glasgow'daki Anderson Koleji'nden Prof. James Blyth tarafından inşa edilmiş ve 1891 yılında patenti alınmıştır (Price, 2005). Aynı şekilde; Danimarkalı Poul La Cour'un da 1890'lar boyunca nispeten gelişmiş rüzgar türbinleri inşa ettiği bilinmektedir (Price, 2005). Rüzgar türbinlerinin gelişimini takip ettiğimizde 1887-1888 kışında Charles F. Brush tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde, Ohio, Cleveland' de o zamana kadar inşa edilmiş en büyük ve yüksek mühendislik gerektiren cihaz tasarlanmış ve inşa edilmiştir, 1900 yılına kadar da işletilmiştir (DWIA, 2023).

Elektrik enerjisine olan ihtiyaç, teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak yeni makinelerin üretilmesiyle artan bir yükseliş göstermiştir. Şehirlerden uzaklarda yaşayanlar,

çiftlikler, yol aydınlatmaları gibi gereksinimleri karşılamak için rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisi bir çözüm olmuştur. 1973 petrol krizi, Danimarka ve Amerika Birleşik Devletleri'nde, gücün uzaktan kullanımı için elektrik şebekelerine bağlanabilen daha büyük şebeke ölçeğinde rüzgar jeneratörlerin araştırılmasını tetiklemiştir. Bugün, rüzgarla çalışan türbinler, izole konutlarda pil şarj etmek için küçük istasyonlardan ulusal elektrik şebekelerine elektrik gücü sağlayan gigawatt büyüklüğündeki deniz üstü rüzgar çiftliklerine kadar her boyutta faaliyet göstermektedir.

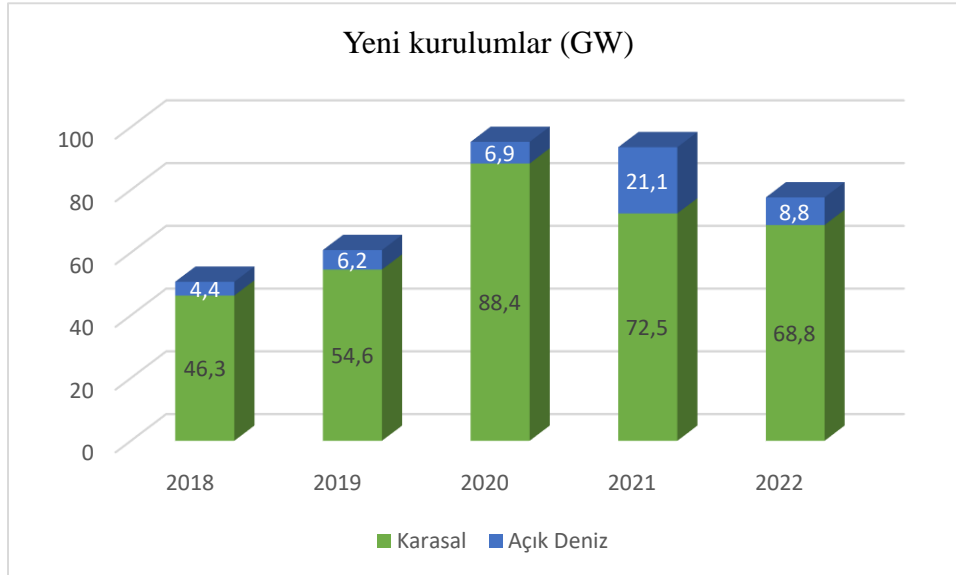


Şekil 1. Charles F. Brush'ın elektrik enerjisi üretmek için kullandığı 1887-1888 tarihli yel değirmeni (DWIA, 2023).

Enerjiye olan ihtiyaç, Dünya nüfusunun artması ile birlikte bugün ele alınması gereken en büyük sorunlarından biridir. Hem siyasi ve ekonomik hem de çevresel faktörler, ülkelerin mevcut kaynaklarını kullanarak temiz enerji üretmek ve enerjide dışa bağımlılıklarını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir (Richter, 1996). Gelişmekte olan dünyada, yüksek fiyatlar, enflasyon ve çevre sorunları modern enerjiye erişime yönelik ilerlemeyi yavaşlatıyor. Elektriği olmayan insan sayısının son yıllarda ilk

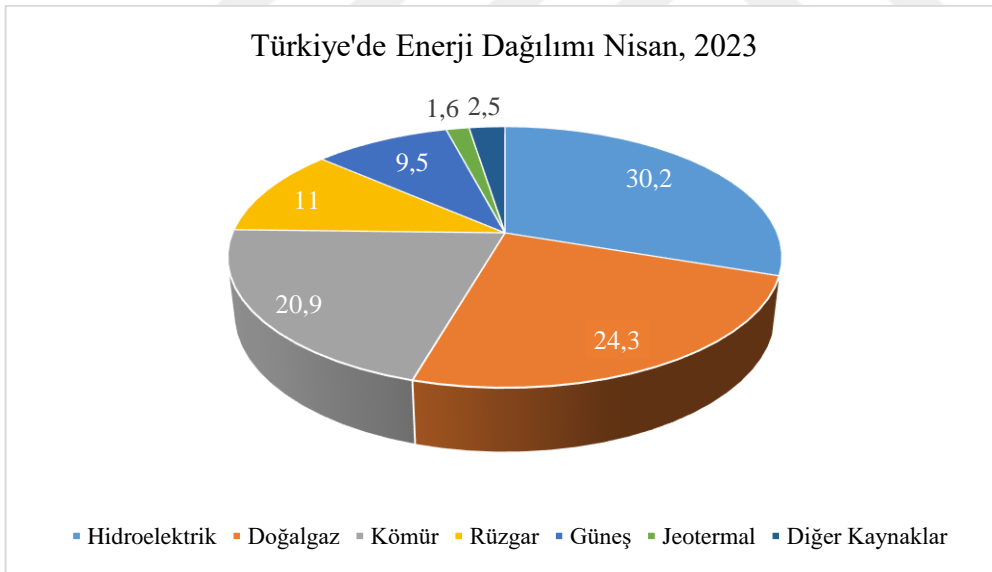
kez 2022'de artması muhtemel görünmektedir (IEA, 2022). 2022'nin sonunda yenilenebilir enerji, küresel kurulu güç kapasitesinin %40'ını oluşturmaktadır (IRENA, 2023). Yine de yenilenebilir enerjinin toplam kapasitenin yarısını oluşturduğu bir dünyaya yaklaştıkça, şebeke esnekliği ve değişken yenilenebilir enerjiye uyum bağlamında dahil olmak üzere, yenilenebilir enerjiyi en önemli elektrik üretimi kaynağı olarak belirlemek için çeşitli planlamalar yapılmaktadır (IRENA, 2023).

2030 yılına kadar toplam elektrik üretiminin %61'inin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmasını hedefleyen IEA, yenilenebilir enerji kapasitesinin üç katına çıkması gerektiğini ve bu büyümenin büyük kısmının rüzgar ve güneş enerjisinden kaynaklanacağını öne sürülmektedir (IEA, 2022 ve GWEC, 2023). 2022'de dünya çapında yalnızca 78 GW'lık yeni kapasite devreye alınırken, pazar, esas olarak Çin'de beklenen devasa büyümenin etkisiyle 2023'te toparlanmaya hazırlanmaktadır. Kümülatif olarak, 2022'nin sonuna kadar küresel olarak (şebeke bağlantısını hesaba katılmadan) yaklaşık 940 GW rüzgar enerjisi kurulmuştur. GWEC pazar araştırmasına göre 1 TW kapasiteye 2023 ortalarında ulaşılabileceğini öngörülmektedir (GWEC, 2023).



Şekil 2. Yıllara göre karasal ve açık deniz rüzgar santrali yeni kurulumlarının güç dağılımı (GWEC, 2023).

Küresel olarak, 2022'de elektrik şebekelerine 77,6 GW'lık yeni rüzgar enerjisi kapasitesi bağlanmış ve toplam kurulu rüzgar kapasitesi, 2021'e kıyasla %9'luk bir artışla 906 GW'a ulaşmıştır (GWEC, 2023). Aynı kaynakta 8,8 GW yeni açık deniz rüzgar santrali şebekeye bağlanmış ve toplam küresel açık deniz rüzgar kapasitesi 2022'nin sonuna kadar 64,3 GW'a ulaştığı vurgulanmıştır (Şekil 2.). Yeni eklemeler ile 2022 yılı 2021 yılına göre %58 daha düşük olmasına rağmen yine de açık deniz rüzgar kapasitesi tarihindeki en yüksek ikinci yıl olarak kayıtlara geçmiştir (GWEC, 2023). Türkiye'de enerji ihtiyacını incelediğimizde, 2022 yılında elektrik tüketimi 2021 yılına göre %1,2 azalarak 328,9 TWh düşmüş, elektrik üretimi ise %2,5 azalarak 326,2 TWh olarak gerçekleştirilmiştir (ETKB, 2023). Türkiye milli enerji programı araştırma verilerine göre elektrik tüketiminin 2025 yılında 380,2 TWh, 2030 yılında 455,3 TWh ve 2035 yılında 510,5 TWh olacağı tahmin edilmektedir. 2022'de ülkemizin elektrik üretimimizin %34,6'sı kömürden, %22,2'si doğal gazdan, %20,6'sı hidroelektrikten, %10,8'i rüzgardan, %4,7'si güneşten, %3'ü jeotermalden ve %3,7'si diğer kaynaklardan elde edilerek gerçekleşmiştir (ETKB, 2023).



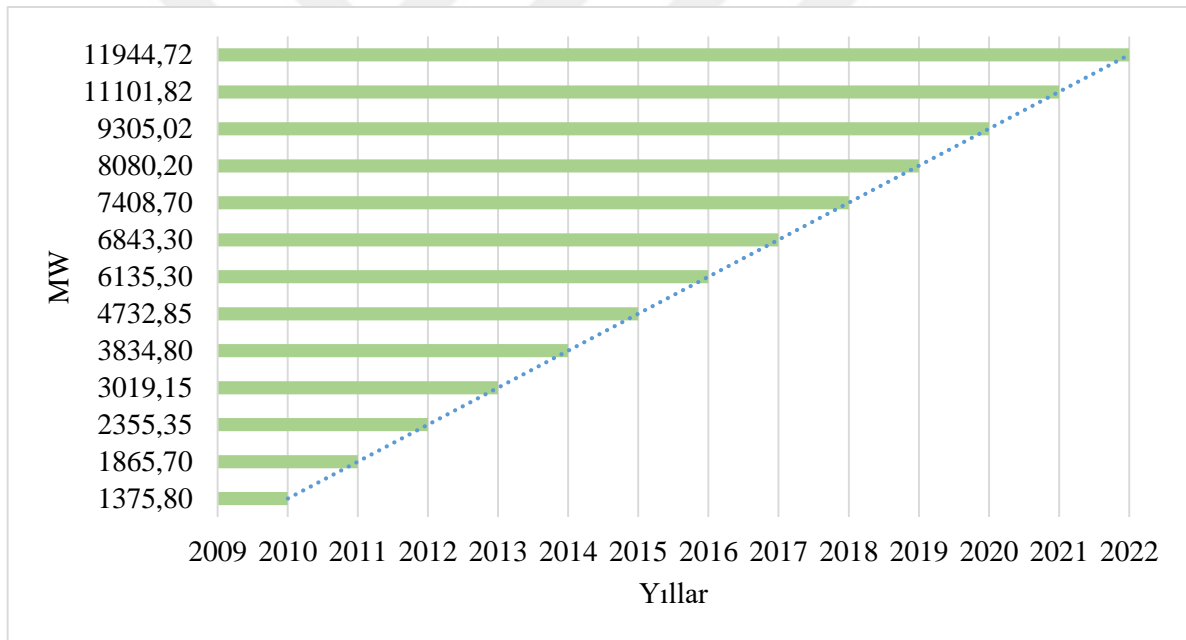
Şekil 3. Nisan, 2023 itibariyle Türkiye'de Enerji Dağılımı (Veriler ETKB'dan alınmıştır.)

ETKB 2023 verilerine göre Nisan ayı sonu itibarıyla ülkemizin kurulu gücü 104,5 MW ulaşmıştır. 2023 Nisan ayının sonlarında doğru yapılan hesaplamalarda ülkemizin kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı %30,2 hidroelektrik, %24,3 doğalgaz, %20,9 kömür, %11 rüzgar, %9,5 güneş, %1,6 jeotermal ve %2,5 diğer enerji kaynaklarından

oluşmaktadır. Ayrıca 2023 yılı Nisan ayı sonu itibarıyla ülkemizdeki santral sayısı (lisanssız santraller dahil) 11.941'e yükselmiştir. Şekil 3'te verildiği üzere mevcut santrallerin 751'i hidroelektrik, 67'si kömür, 361'i rüzgar, 63'ü jeotermal, 345'i doğalgaz, 9.863'ü güneş ve 491'i diğer santraldir (ETKB, 2023).

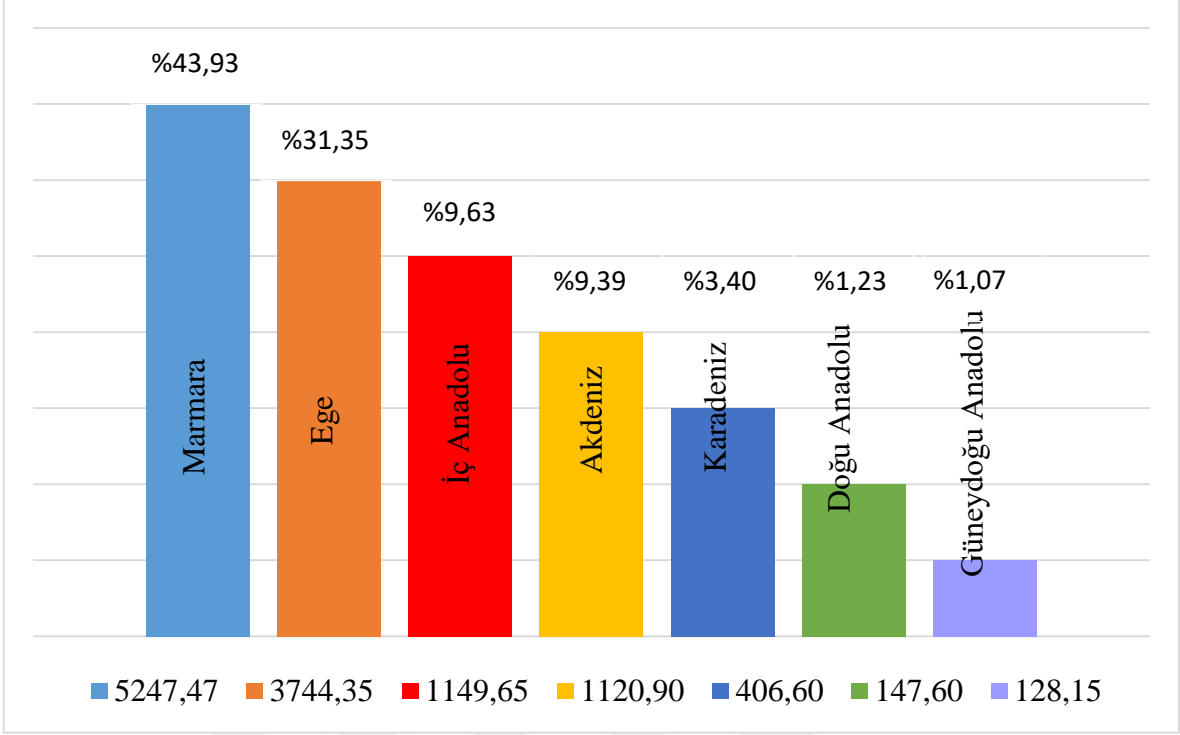
## 1.2. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Ülkemiz geçtiğimiz on yılda rüzgar enerjisini kullanımı bakımından önemli bir yol katetmiştir. Türkiye'nin rüzgar potansiyelinin kullanımına ilişkin grafik Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Türkiye'deki RES'ler için kümülatif kurulum (TUREB, 2023).

Ülkemizdeki rüzgar elektrik santralleri, bölgelerdeki işletmelere göre incelediğimizde (Şekil 5.) sırasıyla Marmara Bölgesi %43,93, Ege Bölgesi %31,35, İç Anadolu Bölgesi %9,62, Akdeniz Bölgesi %9,38, Karadeniz Bölgesi %3,40, Doğu Anadolu Bölgesi %1,24 ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi %1,07 olarak oranlarda faaliyet göstermektedirler (TUREB, 2023).



Şekil 5. Bölgelere göre RES'lerinin güç (MW) ve oran (%) cinsinden dağılımı (TUREB, 2023).

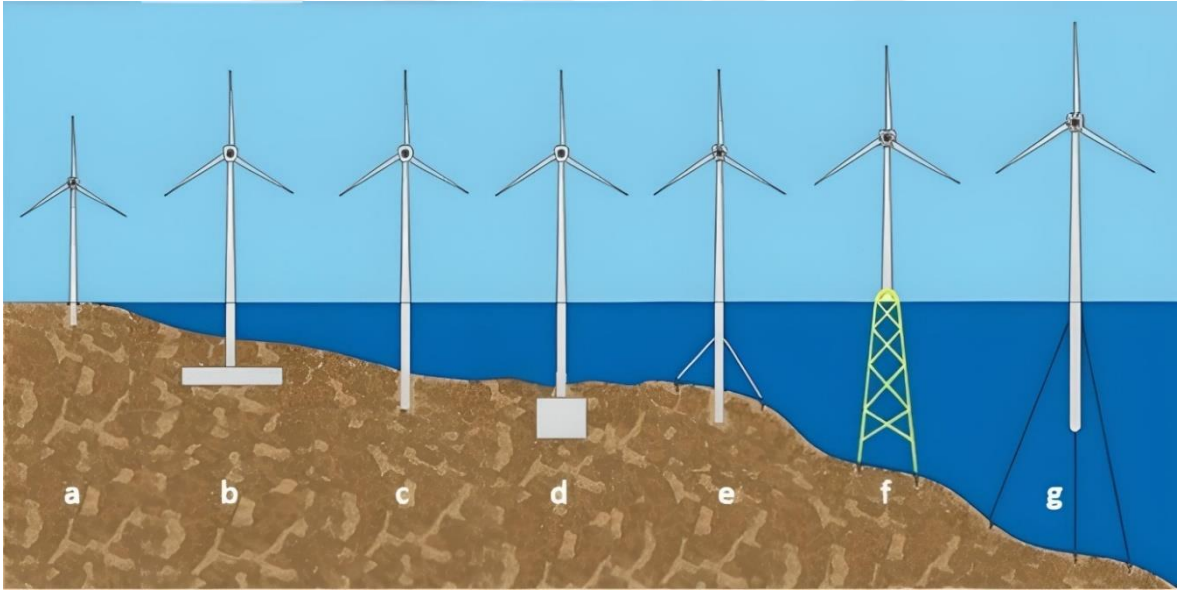
Ülkemizdeki RES'lerin işletmelerinin illere göre dağılımını incelediğinde İzmir'in lider konumda olduğunu görmekteyiz. İkinci sırada Balıkesir ardından Çanakkale gelmektedir. Türkiye genelinde yüzdelerine baktığımızda İzmir %15,97, Balıkesir %11,89, Çanakkale %8,17 olarak sıralanmaktadır (TUREB, 2023). TR22 bölgesinin toplam yüzdeliğini ele aldığımızda Türkiye'de yaklaşık %20'lik (2,396.8 MW) bir değer ile işletme halindeki kurulu gücü oluşturmaktadır (TUREB, 2023). Ayrıca bu bölgelere son dönemlerde yapılan yatırımlar sonucunda yakın gelecekte çok daha büyük kazanımların elde edileceği tahmin edilmektedir. Buradan rüzgar enerjisi, Balıkesir ve Çanakkale illeri için önemli bir enerji kaynağıdır diyebiliriz. Balıkesir ve Çanakkale, Türkiye'nin en iyi rüzgar enerjisi merkezleri olmasının yanı sıra rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde, ülke üretiminin yaklaşık üçte ikisini oluşturan ekonomik bir bölgede yer almaktadır (TUREB, 2023). Ülkemizdeki rüzgar enerjisi yatırımları, bahsettiğimiz tüm bu istatistiksel veriler karasal rüzgar türbinleri için hesaplanmıştır. Henüz ülkemizin açık deniz rüzgar elektrik santrali bulunmamaktadır. Ancak bu alanlarda GMKA toplantıları yapılmaktadır, çeşitli tezler, makaleler, fizibilite raporları hazırlanmaktadır. TR22 bölgesinin de açık deniz rüzgar elektrik santrallerine öncülük edeceği son yıllarda üzerinde durulan önemli konulardandır.



Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde açık deniz rüzgar potansiyellerinden yararlanılması kaçınılmaz bir gerçektir.

### 1.3. Temellerine Göre Açık Deniz Rüzgar Türbin Tipleri

Açık deniz rüzgar türbinlerinin temelleri, çevresel faktörlere maruz kalacakları için çok önemlidir ve bu temel türleri suyun derinliğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedirler (Şekil 6.). Açık deniz rüzgar türbinlerinin temel tiplerini belirleyen faktörler su derinliği, su tabanı, türbin tipleri, rüzgar hızı, dalga yüksekliği vb. olarak sıralanabilir (Moulas vd., 2017; Huvaj vd., 2019). Yaklaşık 50 m su derinliğinin altında kullanılan açık deniz rüzgar türbini temellerine sabit temeller denir. Bahsi geçen su derinliğinin üzerinde kullanılan temeller yüzer sistem olarak tanımlanır (Moulas vd., 2017; Huvaj vd., 2019).



Şekil 6. Temellerine göre açık deniz rüzgar türbinleri (Wang vd., 2018)

#### 1.3.1. Ağırlık (Yerçekimi) Temelli

Ağırlık (yerçekimi) temeli (Şekil 6b), açık deniz rüzgar türbinini ağırlığı ile sabit tutar. Yaklaşık 30 m derinliğe kadar kullanılabilir. Açık deniz rüzgar türbininin 27 m'deki

en derin ağırlık (yerçekimi) temeli Thornton Bank'ta bulunmaktadır (Wang vd., 2018; Kaiser ve Snyder, 2010).

### **1.3.2. Tek Kazıklı Temeller**

Tek kazıklı temeller (Şekil 6c) en yaygın kullanılan ve deniz tabanına çakılan büyük çaplı, kalın duvarlı çelik borulardır (Taşan ve Akdağ, 2018; Pérez-Collazo vd., 2015). Bu tip temeller için en uygun su derinliği aralığı 0-30 m arasında değişmektedir.

### **1.3.3. Kova temeller**

Kova temel (Şekil 6d), açık deniz koşullarında ağır yüklere dayanıklı, üstü kapalı büyük çaplı çelik boru silindirden oluşan bir temel türüdür (Taşan ve Akdağ, 2018). Bu temel bazı açık deniz platformlarında ankraj olarak kullanılmaktadır ve 5-60 m su derinliği aralığında kullanılmaktadır (Wang vd., 2018; Pérez-Collazo vd., 2015).

### **1.3.4. Üç Kazıklı Temel**

Bu temel tipi (Şekil 6e), 50 m'ye kadar olan su derinliklerinde kullanılmak üzere tek kazıklı temeller için geliştirilmiş bir versiyondur (Wang vd., 2018; Pérez-Collazo vd., 2015). Bu temel tipinin en büyük avantajı geniş bir tabana sahip olmasıdır, böylelikle türbinin devrilmesini önlenmiş olur. Dezavantajı ise geniş bir tabana sahip olması dolayısıyla montajının zor ve maliyetli olmasıdır (Lozano-Minguez vd., 2011).

### **1.3.5. Kafes Temel**

İsminden de anlaşılacağı üzere kafes temelli yapılar (Şekil 6f), üç veya dört çelik boru ayaklı kafes yapılardan oluşur. Bu tasarım için petrol ve gaz platformlarının yapısı

örnek alınmıştır (Wang vd., 2018; Lozano-Minguez vd., 2011; Koh vd, 2016). 10-60 m aralığındaki su derinliklerinde kafes temel tipi kullanılmaktadır. Bazı kaynaklarda 80 m'ye kadar kullanıldığı belirtilmiştir. (Wang vd., 2018; Pérez-Collazo vd., 2015).

### **1.3.6. Yüzer Temel**

Yüzer temel (Şekil 6g), açık denizlerde pürüzlülük minimum düzeyde olacağından rüzgardan en iyi şekilde yararlanmak için tasarlanmıştır (Wang vd., 2018). Bu temel sistemi, deniz tabanına bağlı yüzer bir platform ve çapa sisteminden oluşmaktadır (Kaiser ve Snyder, 2010; Castro-Santos ve Diaz-Casas, 2015). Yüzer temel sistemleri 50-100 m aralığındaki su derinliklerinde kullanılmaktadır (Wang vd., 2018; Liu vd.,2016).

## **1.4. Çalışmada Kullanılan Türbin Tipi**

Açık deniz rüzgar türbinleri kullanıldıkları bölgeye göre pek çok tip ve versiyonda üretilmektedir. TR22 bölgesinde çalıştığımız alanlarda kullanılan türbin tipi, SG 6.0-155 model/ versiyonu kullanılmıştır (Tablo 1.). Çalışmada ele alınan kullanılan rüzgar türbini modeli için, WindPro yazılımında bulunan özellikleri verilmiştir.

Tablo 1

SG 6.0-155 model/ versiyonu rüzgar türbin özellikleri (WindPro)

<b>Tip/ Versiyon</b>	<b>SG 6.0-155</b>	
Nominal Güç	6,600.0 kW	
<b>Rotor Çapı</b>	<b>155.0 m</b>	
Kule	Boru tipi	
<b>Şebeke bağlantısı</b>	<b>50/ 60 Hz</b>	
Jeneratör tipi	Variable	
<b>Nominal</b>	<b>9.3 rpm</b>	
Başlangıç	5.4 rpm	
<b>Devreye giren rüzgar hızı</b>	<b>4.0 m/s</b>	
Nominal rüzgar hızı	13.0 m/s	
<b>Rüzgar kesme hızı</b>	<b>25.0 m/s</b>	
Sağkalım rüzgar hızı	70.0 m/s	
<b>Varsayılan hub yüksekliği</b>	<b>122.5 m</b>	
Maks. bıçak genişliği	4.5 m	
<b>%90 yarıçap için bıçak genişliği</b>	<b>1.4 m</b>	

## İKİNCİ BÖLÜM

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Açık deniz rüzgar enerjisinin temel teknolojisi, 1990'ların başında Danimarka'da yapılmış, ardından bu rüzgar çiftliğinin piyasaya sürülmesinden bu yana büyük bir sıçrama gerçekleşmiştir. Günümüzde, açık deniz rüzgarı milyonlarca eve güç sağlamaktadır. Dünya çapında, geçen yıl 8,8 GW yeni açık deniz rüzgarı şebekeye dahil edildi ve toplam iş küresel açık deniz rüzgar kapasitesi 2022'nin sonuna kadar 64,3 GW'a ulaşmıştır (GWEC, 2023). GWEC 2023 raporuna göre açık deniz rüzgar enerjisi ilk kez 2025 yılında 25 GW'tan fazla kurulum yapılacağı, kurulumların bundan sonra hızla artacağı öngörülmektedir. Yeni eklemeler, 2021 yılına göre %58 daha düşüktü ancak yine de 2022'yi açık deniz rüzgar kurulumları için tarihin en yüksek ikinci yılı yapmıştır (GWEC, 2023). Açık deniz rüzgar türbinleri için çeşitli fizibilite çalışmaları, doktora-yüksek lisans tezleri, makaleler, kitaplar yayınlanmıştır. Ülkemizde henüz açık deniz rüzgar enerjisi santrali kurulu değil, ancak çeşitli çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Çalışmalarda, açık deniz rüzgar türbinlerinin kurulabileceği olası yerlerin belirlenmesi, inceleme ve potansiyel analizlerini içeren fizibilite çalışmaları daha fazla kriter dikkate alınarak ön plana çıkarılmalıdır. Sürdürülebilirlik konusunda en az iki ila on yıllık veri elde edilmelidir. Bir yıllık rüzgar verilerinin yatırımcılar için uzun vadeli ve bekleyen bir girişim olduğu düşünüldüğünde, veriler Weibull ve Rayleigh dağılımları gibi çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilebilir. Bu analizler sonucunda rüzgar türbinlerinin konumlarının, kapasite faktörlerinin ve elektrik üretim verimliliğinin incelenmesi ve bu kaynakların kısa, orta ve uzun vadeli etkilerinin irdelenerek tartışılması çalışmaların temelini oluşturmalıdır (Şahin vd., 2012).

#### 2.1. Dünya'da Yapılan Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Çalışmaları

Ohunakin ve arkadaşları tarafından 2023 yılında, Nijerya kıyı şeridindeki açık deniz rüzgar potansiyelini araştırmışlardır. En yüksek açık deniz rüzgar potansiyeli için zamansal/mekansal analizler yapılmıştır. Açık deniz türbinlerinin rüzgar karakteristikleri ve enerji üretimi değerlendirilmiş olup seçilen sahalar arasında, rüzgar işletmesi için en iyi açık deniz sahası Agbami olarak bulunmuştur. Vestas V236-15.0 MW, seçilen türbinler arasında en iyi performansa sahip olduğu tespit edilmiştir (Olayinka S. Ohunakin, 2023). Yapılan

çeşitli çalışmalarda, İngiltere'de açık deniz rüzgar santrali yeri seçimi için MCDA ve GIS'in kullanılarak SMCD'A'yı gerçekleştirmek için kullanılan analitik hiyerarşi süreci (AHP) yaklaşımından Li ve arkadaşları (2022) faydalanmıştır ve rüzgar enerjisi yoğunluğu, rüzgar hızı, su derinliği ve kıyı şeridinde olan uzaklık ana kriterlerler olarak almışlardır. Dört farklı yükseklikte açık deniz rüzgar çiftliği kurulumuna uygun alanların araştırılarak çeşitli ülkelerdeki açık deniz rüzgar çiftliği gelişimini karşılaştırmak için bir gelişme Endeksi tanımlaması amaçlanmıştır (Li vd., 2022). Dhingra ve arkadaşları (2022) Hindistan için açık deniz rüzgar enerjisinin büyümesinin önündeki engeller belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır. Engellerin önceliklendirilmesi için kullanılan Fuzzy mantık yaklaşımı ile AHP kullanılmıştır ve bu engeller için yönetsel ve pratik sonuçlar bulunması amaçlanmıştır. Teknik bariyer, açık deniz rüzgar enerjisinin önündeki en kritik engel olduğu tespit edilmiştir (Dhingra vd., 2022). Brezilya'nın brüt, teknik ve çevresel-sosyal, açık deniz rüzgar potansiyelleri Vinhoza ve Schaeffer tarafından 2021 yılında araştırılmıştır. CBS yaklaşımı, uygun alanların haritasını çıkarmak için kıyıdan uzak rüzgar çiftliklerinin yerleşim bölgelerini göz önünde bulundurmıştır. GIS-MCDA, ekonomik yaklaşıma göre uygun alanları sıralamak için kullanılmıştır. Çevresel ve sosyal açıdan uygun alanlar Brezilya'da toplam 330 GW potansiyel kapasiteye sahiptir. Brezilya'daki en cazip on bölge toplam 126 GW potansiyel kapasiteye sahip olduğu tespit edilmiştir (Vinhoza ve Schaeffer, 2021). Japon-55 yıllık yeniden analiz (JRA-55) veri setine dayalı olarak, Güney Çin Denizi'ndeki rüzgar kaynaklarının mekansal-zamansal değişimleri analiz edilmiş ve uzun vadeli değişim ve dalga durumu da dahil olmak üzere farklı ağırlıklara sahip çeşitli kriterleri göz önünde bulundurulmuştur (Wen vd., 2021). Sonuçlar, Luzon Boğazı ve Tayvan Boğazı'nın diğer bölgelere göre daha yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olduğunu, Luzon Boğazı'ndaki yıl içi dalgalanmanın ise 400 ila 2500 W/m<sup>2</sup> arasında önemli ölçüde yüksek olduğunu ve bu nedenle istikrarlı güç çıkışı sağlamak için uygun olmadığını göstermiştir. Gelecekte önerilen açık deniz rüzgar enerjisi geliştirme projesi, SWT-7.0-154 tipi rüzgar türbini başına yıllık 35,36 MWh elektrik üretme potansiyeli ile Hong Kong kıyılarındadır (Wen vd., 2021). Basra Körfezi'nde yer alan İran adaları, anakaradan uzak olmaları nedeniyle Nezhad ve arkadaşları tarafından 2022 yılında tercih edilip çalışılmıştır (Nezhad vd., 2022). Açık deniz rüzgar türbininin olası konumlarını belirlemek için uzun vadeli Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2 (MERRA-2) elde edilen veriler analiz edilmiştir. Açık deniz rüzgar türbinleri özellikle, 40 yıllık aylık verilere ve son 10 yıllık saatlik verilere dayanan bir açık deniz rüzgar sınıflandırması, İran

Denizi'ndeki on iki İran adasında Açık deniz rüzgar türbinlerinin potansiyel kurulumları için en iyi alanlar analiz edilmiştir. Bu çalışmada zaman serisi yöntemi, açık deniz rüzgar potansiyelini ve İran adaları için karar verme sürecinin haritasını daha iyi anlamak ve yönetmek için tasarlanmış, test edilmiş ve geliştirilmiştir. Ayrıca İran adalarında kullanılan açık deniz rüzgar hızına dayalı olarak üretilen enerji kaynağına zaman serisi yöntemi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda; Kharg, Siri ve Abu Musa adaları gibi İran adalarının türbin kurulumları için ilgi çekici açık deniz rüzgar enerjisi potansiyellerine sahip olduğunu göstermektedir (Nezhad vd., 2022). Yapılan bir başka çalışmada Alkhalidi ve arkadaşları 2019 yılında Kuveyt'de on kıyı ve açık deniz lokasyonundaki rüzgar enerjisi potansiyelini araştırmıştır. Farklı yüksekliklerde rüzgar verileri Meteoroloji Dairesi'nden temin edilen aylık ve yıllık istatistiksel parametreleri ve aylık ve yıllık güç yoğunluğunu belirlemek için istatistiksel analizler yapılmış olup rüzgar verilerinin analizi ile rüzgar enerjisi yoğunluğunu hesaplamak için iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, Kuveyt karasularında açık deniz rüzgar türbinleri için uygun ve çekici yerin seçilmesinde etkin rol oynamıştır. (Alkhalidi vd., 2019). Afrika kıtasına ait bir diğer çalışmada, Elsner 2019'da tüm Afrika kıtası için açık deniz rüzgar enerjisi potansiyelinin analizleri yapılmıştır. Afrika kıtasının kıyı devletlerinin üçte biri için çok iyi açık deniz rüzgar potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır. Açık deniz rüzgar enerjisi kaynaklarının %90'ından fazlası üç Afrika Kalkınma Topluluklarında yoğunlaştığına dikkat çekilmiştir ve Afrika'nın enerji geleceğinde önemli bir rol oynayabileceğine dikkat çekilmiştir (Elsner, 2019). Kolombiya'da yapılan bir başka çalışmada Rueda-Bayona ve arkadaşları 2019 yılında açık deniz rüzgar enerjisinin dünyadaki ilerlemeleri ve zorlukları, yenilenebilir enerjinin yasal ve idari çerçevesi tartışılmıştır. 2015–2016 yıllarında El Niño felaketinin Kolombiya elektrik sistemini riske attığından beri rüzgar hızı eğilimleri ve güç yoğunluğu sonuçları, açık deniz rüzgar enerjisi araştırmalarına yönelimi daha da arttırmıştır. Açık deniz rüzgar santrallerinin kurulabileceği alanları belirlemek için daha derinlemesine araştırmalara ihtiyaç duyulsa da, Rueda-Bayona ve arkadaşlarının yapmış olduğu bu çalışmada elde edilen enerji potansiyeli, açık deniz üretim kapasitesinin karada belirlenen 20 GW'ı geçebileceğini tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu bulgular, yakın gelecekte tamamen temiz ve yenilenebilir bir elektrik matrisi için Kolombiya'nın daha da gelişmesine katkıda bulunabilir (Rueda-Bayona vd., 2019). Onea ve Rusunun 2022 yılında yapmış olduğu çalışmada, Akdeniz'de bulunan yoğun nüfuslu büyük adaların açık deniz rüzgar projelerinin uygulanmasından elde edilebilecek faydaların kapsamlı bir araştırmasını sunmuştur. Çalışmada ilk olarak, rüzgar enerjisi potansiyelinin

genel bir görüntüsünü elde etmek için ERA5 verileri analiz edilmiş ve rüzgar hızı alanları (100 m yükseklikte) çalışılmıştır. Münhasır Ekonomik Bölgelerin (MEB) değerlendirilmesi rüzgar koşulları açısından en umut verici alanlar ile birlikte vurgulanmış olup ortalama rüzgar hızının 9 m/s'ye yakın olduğu Sardunya ve Kıbrıs yakınlarında bulunan bölgelerde geçerli olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonuçları ayrıca, bir rüzgar türbininin en iyi performanslarının, bir türbinin çalışma zamanının en az %6'sı boyunca tam kapasitede çalışabildiği bu alanların kuzeybatı kesiminde beklendiğini göstermektedir (Onea ve Rusu, 2022). Hong Kong'da Shu ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yapılan bir diğer çalışmada, açık deniz rüzgar özellikleri ve rüzgar enerjisi potansiyeli değerlendirilmiştir. Weibull dağılım modeli, gerçek rüzgar verilerinin yeterli bir temsilini vermektedir. Çeşitli rüzgar özelliklerinin yıllık, mevsimsel, aylık ve günlük değişimleri incelenmiştir. Güneydoğu suları, Hong Kong'daki açık deniz rüzgar çiftliği gelişimi için en umut verici bölge olarak tanımlanmıştır (Shu vd., 2015). Cavazzi ve Dutton 2016 yılında İngiltere'de yapılan bir çalışmada ekonomik olarak erişilebilir açık deniz rüzgar enerjisi kaynağını değerlendirmek amacıyla bir Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Coğrafi Bilgi Sistemi (OWE-GIS) geliştirilmiştir. OWE-GIS yazılımı; su derinliğine ve en yakın limanlara veya şebeke bağlantı noktalarına olan mesafeye bağlı geliştirme maliyetleri, yıllık ortalama rüzgar hızına, potansiyel kayıplarına ve türbin mevcudiyetine bağlı potansiyel enerji üretimi, işletme ve bakım maliyetleri, ve iskonto oranı ve proje ömrü gibi finansal parametreleri ana bileşenleri dikkate alarak açık deniz rüzgar çiftliğinden elde edilen enerji maliyetlerini tahmin etmektedir. Cavazzi ve Dutton (2016) tarafından yapılan çalışmada iskonto oranı, proje ömrü ve toplam sermaye harcaması (CAPEX), kullanılabilirlik ve yıllık ortalama rüzgar hızı hakkındaki varsayımların etkisini göstermek için bir duyarlılık analizi sunulmuştur (Cavazzi ve Dutton, 2016). Werapun ve arkadaşları tarafından 2014 yılında yapılan bir başka çalışmada Tayland yarımadasının orta bölgesinde yer alan Suratthani eyaletinde açık deniz rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada Phangan Adası, farklı yüksekliklere rüzgar hızı anemetreleri, bağıl nem dedektörleri ve termometre ile hesaplanabilen beş hava ölçüm noktası analiz edilirken, iki rüzgar türbini dedektörü 100 ve 120 m yüksekliklere sabitlenmiş, veriler Aralık 2011'den Kasım 2012'ye kadar 10 dakikalık örnekleme aralıklarında sürekli olarak kaydedilmiş ve ortalama rüzgar hızı 4,28 m/s ve ortalama rüzgar gücü yoğunluğu  $85 \text{ W/m}^2$  olarak belirlenmiş olup, hakim rüzgar yönünün Kuzey olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere dayanarak, performanslarını değerlendirmek için 9 rüzgar çiftliği düzeni simülasyonu yapılmış, açık deniz rüzgar santrallerinin kapasite faktörleri



0,98-2,68 aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Simüle edilen konum ve yerleşim planlarının kötü yatırımlar olacağını belirtilmiştir. Ancak, adanın yüksek bölgelerinin daha yüksek rüzgar hızları da benzer şekilde değerlendirilmesine dikkat çekilmiştir (Werapun vd., 2014).

## 2.2. Türkiye’de Yapılan Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Çalışmaları

Bozcaada civarındaki açık deniz rüzgar santrali sahaları için yapılan bir fizibilite çalışması, kıyı bölgeleri için çeşitli parametreler dikkate alınarak ve WindPro yazılımı kullanılarak teknik ve ekonomik analizler ile yapılmıştır. Ayrıca karşılaşılan sorunlar incelenmiş ve çözüm önerileri tartışılmıştır (Satir vd., 2018). Tortumoğlu ve Doğan (2021) tarafından Türkiye'nin Kuzey Ege kıyılarında açık deniz rüzgar türbini kurulumu için uygun yer seçimi çalışması yapılmıştır. Tortumoğlu ve Doğan tarafından yapılan bu çalışmada, Kuzey Ege'deki çalışma alanları için WAsP yazılımı kullanılarak Gökçeada ve Bozcaada açıklarının açık deniz rüzgar türbini kurulumu için daha uygun olduğu vurgulanmıştır (Tortumoğlu ve Doğan, 2021). Türkiye'nin kuzeybatı kıyısındaki çeşitli yerler için Caceoğlu ve arkadaşları (2022) açık deniz rüzgar çiftlikleri için uygun yer bulmak için CBS ile birlikte Analitik Hiyerarşi Sürecini (AHP) kullanmışlardır. Caceoğlu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada çevresel kaygılara önem vererek bazı senaryo ve fikir birliği analizleri de yapmışlar ve en uygun kurulum alanlarının Bozcaada ve Kıyıköy olduğunu belirtmişlerdir (Caceloğlu vd., 2022). Emeksiz ve Demirci (2019) tarafından otuz bir kıyı bölgesinde metodolojik bir çerçevede toplam on çoklu yer seçim kriteri ve analitik hiyerarşi süreci (AHP) ile değerlendirmeler yapmışlardır. Bafra, Sinop ve Mersin kıyılarında sırasıyla 2.112 MW, 1.176 MW ve 1.293 MW kurulu güce sahip açık deniz rüzgar santrallerinin kurulabileceğini değerlendiren Emeksiz ve Demirci, olası toplam kurulu gücün aşılabileceğine dikkat çekmişlerdir. (Emeksiz ve Demirci, 2019). Argın ve arkadaşları (2019) tarafından Türkiye'de elli beş farklı bölgenin açık deniz rüzgar enerjisi potansiyeli, bu bölgelerdeki meteoroloji istasyonlarının verilerinin çok kriterli yer seçimi yöntemini (Argın vd., 2019) ve WAsP kullanarak analiz etmişlerdir. Analiz sonucunda en uygun kıyılar olarak; Bozcaada, Bandırma, Gökçeada, İnebolu ve Samandağ kıyıları önerilmiştir. Belirtilen sahalardaki toplam tahmini açık deniz rüzgar enerjisi kapasitesinin 1.629 MW olduğu bulunmuştur (Argın vd., 2019). Kabak ve Akalın (2022) tarafından Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS) ve ArcGIS yazılımı ile birlikte Fuzzy Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP)

kullanılarak Ege Denizi'nde açık deniz rüzgar santrallerinin kurulması için ideal yerler gerekçeleriyle birlikte belirtilmiştir (Kabak ve Akalın, 2022). Ülkemizdeki açık deniz rüzgar santralleri için teknik, çevresel ve sosyal olmak üzere üç ana kriter ile on üç alt kriter dikkate alınarak, türbin kurulumu için en uygun yerler Genç ve arkadaşları (2021) tarafından araştırılmış ve 1.194 km<sup>2</sup>'lik alanı ile Marmara Denizi olduğunu tespit etmişlerdir. Marmara Denizi'ni sırasıyla Ege Denizi, Karadeniz ve Akdeniz'in takip ettiğini belirtmişlerdir. Çalışmada belirtilen yerler dikkate alındığında, bir açık deniz rüzgar santralının kurulabileceği alanın yaklaşık 3.295 km<sup>2</sup>'ye ulaştığı ve bu alanın üç tarafı denizlerle çevrili Türkiye denizlerinin yaklaşık %1,4'üne tekabül ettiği vurgulanmıştır (Genç vd., 2021). Bir diğer fizibilite çalışması ise Edremit Körfezi için Özbek ve Tunç (2021) tarafından gerçekleştirilen açık deniz rüzgar enerjisi çalışmasıdır. Bu çalışma, Ege Denizi'nde yer alan çok yüksek bir potansiyele sahip Edremit Körfezi'nde inşa edilecek 50-90 MW kapasiteli bir açık deniz rüzgar santrali için araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada batimetrik haritalardan elde edilen deniz derinliği verileri ile MERRA uydusunun rüzgar hızı verileri ve körfezdeki meteoroloji ölçüm istasyonu verileri birlikte değerlendirilerek analizler yapılmıştır. Nomine güçleri 2 ile 3,6 MW arasında değişen sekiz farklı türbin tipi için kapasite faktörleri ve yıllık enerji üretim verimleri hesaplanmıştır (Ozbek ve Tunc, 2021). Deveci ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışmada, Ege Denizi'nde açık deniz rüzgar santralının kurulabileceği olası alanların belirlenmesi ve listelenmesinde literatürdeki çok kriterli karar verme teknikleri bir arada ele alınmış ve hibrit bir yaklaşımla analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Ege Denizi'nin kuzeyinde ve Çanakkale Boğazı'nın çıkışında yer alan Bozcaada sahilinin açık deniz rüzgar santrali kurulumu için en uygun bölge olduğunu belirtmişlerdir (Deveci vd., 2021). 2020 yılında yaptıkları çalışmada Genç ve arkadaşları, Türkiye'de rüzgar enerjisi kullanımının artması ve kurulu rüzgar santralleri hakkında bilgi verirken, Türkiye'nin açık deniz rüzgar santrallerinden elektrik üretimi geliştirme konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğu vurgulamışlar ve bu potansiyelin değerlendirilmesi, çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinin Türkiye'nin enerji ihtiyacının karşılanmasındaki payını artıracak ve enerjide dışa bağımlılığı daha da azaltacağı sonucuna varılmıştır (Genç vd., 2020). Genç ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptıkları bir diğer çalışmasında Türkiye'nin Doğu Akdeniz kıyısında yer alan Hatay ilinin Antakya, Belen, İskenderun ve Samandağ ilçeleri incelenmiş ve yüzeyden 10 m yükseklikte 5 m/s rüzgar hızına ve yılın sekiz ayında aylık ortalama 200 W/m<sup>2</sup> rüzgar güç yoğunluğuna sahip oldukları tespit edilmiştir. Çalışmada Belen-Hatay için rüzgar hızlarının mevsimsel kümülatif olasılık

dağılımları analiz edilmiştir. Yaz aylarında rüzgar hızları diğer mevsimlere göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, Belen-Hatay bölgesi rüzgar açısından oldukça elverişli bir yer olayına dikkat çekilmiştir. (Genç vd., 2020).



## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmamızda, TR22 Bölgesinde açık deniz rüzgar enerjisi potansiyelini araştırmak için WindPro uygulamasından alınan 1992-2022 yılları arasında 30 yıllık veriler kullanılmıştır. Kullanılan bu veriler ile açık deniz rüzgar türbinleri için en uygun yerin seçilmesi için çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan MOORA yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerin yapılabilmesi çeşitli bağlantılar ve yöntemlerden yararlanılmıştır.

#### 3.1. Rüzgar Gücü ve Enerjisi

Rüzgar gücünü hesaplayabilmemiz için rüzgar enerjisinin nasıl elde edildiğini bilmemiz gerekmektedir. Rüzgar enerjisini elde etmek için bazı temel kavram ve denklemler kullanılmaktadır. Bunlar hareket halindeki havanın kinetik enerjisi ve temel yoğunluk formülüdür. Yeryüzünde karaların ve denizlerin farklı ısınma katsayıları nedeniyle oluşan sıcaklık farkları sonucu ortaya çıkan basınç farkları (basınç gradiyenti) sonucunda atmosferdeki su yoğunlukları V hacimli m kütleli hava kütesinin v hızı ile hareketi, hava kütesinde;

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

kinetik enerji taşınımına yol açar. Oluşan bu kinetik enerji rüzgar türbinleri yardımıyla önce mekanik sonra elektrik enerjisine dönüştürülür.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

Rüzgar türbindeki kanatların dönme hareketiyle oluşturdukları yarıçap (r), kesit alanı (A), hacim (V) ve aldığı yol (L) arasındaki ilişki;

$$L = vt \quad (3.3)$$

$$V = AL \quad (3.4)$$

$$A = \pi r^2 \quad (3.5)$$

(3.3), (3.4), (3.5) denklemleri sırasıyla denklem 3.2’de kullanılırsa,

$$m = \rho AL = \rho \pi r^2 L = \rho \pi r^2 vt \quad (3.6)$$

denklemini elde edilir. “m” kütlesine ve “v” hızına sahip olan havanın kinetik enerjisi,

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho\pi r^2vtv^2 = \frac{1}{2}\rho\pi r^2tv^3 \quad (3.7)$$

olarak yazılır. Denklem 3.7’den de birim zaman başına düşen enerji miktarından gücünü;

$$P = \left\{ \begin{array}{l} \frac{W}{t} = \vec{F} \cdot \vec{v} \\ \frac{E_k}{t} \\ V \cdot I \end{array} \right\} = \frac{1}{2}\rho\pi r^2v^3 \quad (3.8)$$

olarak Rüzgar enerjisinin güç denklemi elde edilir. Bu denklem, hava kütlesinin taşıdığı kinetik enerjisinin tamamının güce aktarıldığı durumu içindir. Elektromekanik sistem olan rüzgar türbinlerindeki olası kayıplar dikkate alındığında güç ifadesi,

$$P = C_p E_k \quad (3.9)$$

haline gelir. Burada  $C_p$  güç aktarım katsayısı olarak adlandırılan Betz limitidir.

### 3.2. Doğrusal Momentum Teorisi ve Betz Yasası

Betz yasasına göre rüzgar enerjisi, oluşturduğu enerjinin tamamını yani %100'ünü kullanamaz. Alman Fizikçi Albert Betz, kendi adını taşıyan Betz yasası ile enerjinin tamamının neden kullanamadığını ifade etmiştir. Betz yasası, bir rüzgar türbinin döneme hareketiyle oluşan kinetik enerjisinin %59,3'ünden (16/27) fazlasını yakalayamayacağından ileri sürmektedir. Yani enerji verimliliği %59'dan fazla olamaz (Betz A., 1966; Rendall D.G.,1966; Mathew, 2006).

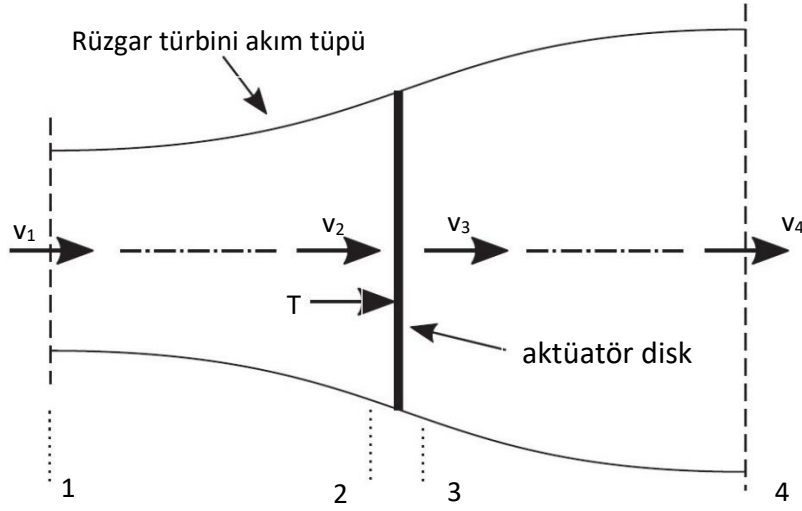
Betz'in çalışmasında dikkat edilen bazı kabuller vardır;

- (i) hava akışının homojen, sıkıştırılmaz ve sabit durumda olduğu varsayılmaktadır.
- (ii) bıçak sayısı sınırlı değildir.
- (iii) tüm disk üzerindeki itme kuvveti eşittir.
- (iv) rotor izi dönmemektedir.
- (v) diskin en üst noktasındaki ve en alt noktasındaki statik basınçlar değişim göstermemiş olup ortamın statik basıncına eşittir.

Betz'in ortaya koyduğu kabullerle ortaya çıkan düşüncesi, rüzgar, kinetik enerjisini (bir kısmını) aktüatör diskinde aktarırken yavaşlamasıdır. Bu nedenle, Şekil 7'de gösterilen eksenel yön boyunca dört rüzgar hızı tanımlanabilir:  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  ve  $v_4$ . T itme kuvvetinin her bir tarafındaki kuvvetlerin net toplamı olarak ifade etmek üzere (Betz A., 1966; Manwell, J.F. vd., 2009), doğrusal momentumun korunumu ilkesine göre ve Betz kabulleri göz önüne alındığında, itme kuvveti, büyüklük olarak hava akışının momentum değişim hızına eşit olduğu durum olup;

$$T = v_1(\rho A v_1) - v_4(\rho A v_4) \quad (3.10)$$

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (3.11)$$



Şekil 7. Rüzgar akım türbini (Betz A., 1966; Manwell, J.F. vd., 2009).

İş sadece disk üzerinde, yani 2 ve 3 numaralı kesitler arasında hava akımı tarafından gerçekleştiğinden, bu iki kısım için Bernoulli denklemini kullanılırsa;

$$\left. \begin{aligned} p_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \\ p_3 = \frac{1}{2} \rho v_3^2 = p_4 = \frac{1}{2} \rho v_4^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

$p_1=p_4$  basınçlarının ve  $v_3=v_4$  hızlarının Betz kabullerini yapıp, yukarıdaki Bernoulli denklemlerini birbirinden çıkardığımızda Denklem 3.13'yi elde ederiz.

$$p_1 - p_3 = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_4^2) \quad (3.13)$$

T itme kuvvetinin aktüatör diskinin her bir tarafındaki kuvvetlerin net toplamı Denklem 3.13'de verilen  $p_2-p_3$ , T itme kuvvetine eşit olur.

$$T = A_2(p_2 - p_3) = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_4^2) \quad (3.14)$$

Basınç ve momentum denklemlerinden elde edilen itme kuvvetleri eşitlendiğinde;

$$v_2 = \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (3.15)$$

Rüzgar hızlarını disk tarafından çıkarılan güçle ilişkilendirdiğimizde, disk dönüşünden dolayı diskteki uzak akım hızı ve akım hızı kesiti arasındaki rüzgar hızındaki azalmayı temsil eden aksenal induksiyon faktörü  $a$ 'yı tanımlayalım;

$$a = \frac{v_1 - v_2}{v_1} \quad (3.16)$$

Denklem 3.16 sayesinde elde edeceğimiz türbinden geçen rüzgar hızı Denklem 3.17 ve diskin arka kısmında kalan hız Denklem 3.18 ile verilmektedir.

$$v_2 = v_1(1 - a) \quad (3.17)$$

$$v_4 = v_1(1 - 2a) \quad (3.18)$$

Betz'e göre, aktüatör diski tarafından toplanan mekanik güç, Denklem 3.14 ile verilen itme kuvveti çarpı diskten geçen rüzgar hızı olarak elde edilebilir;

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 (v_1^2 - v_4^2) v_2 \quad (3.19)$$

Denklem 3.17 ve 3.18'deki  $v_2$  ve  $v_4$ 'ün ifadelerini Denklem 3.19'e uyarlırsak ve serbest akış (uzak akım hızı) rüzgar hızını  $v = v_1$  olarak belirlediğimizde, gücü aksenal endüksiyon faktörünün bir fonksiyonu olarak elde ederiz;

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 v^3 4a(1 - a)^2 \quad (3.20)$$



Buradan rotordaki gücün rüzgardaki güce oranından bir güç katsayısı ( $C_p$ ) elde ederiz;

$$C_p = \frac{P}{P_w} = 4a(1 - a)^2 \quad (3.21)$$

Denklem 3.21'yi kullanarak güç katsayısının ( $C_p$ ) en yüksek değeri, aksenal endüksiyon faktörüne ( $a$ ) göre türev alınıp, sıfıra eşitleyerek bulunur.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dC_p}{da} = 0 \\ 4a(1 - 2a + a^2) = 0 \\ a = \frac{1}{3} \end{array} \right\} \quad (3.22)$$

Denklem 3.21 de belirtilen değerler kullanılarak  $C_p$  katsayısının en yüksek değeri yani Betz katsayısı olarak adlandırılan değer bulunur. Ve bulunan bu değer (Denklem 3.23) Betz yasasını, yani bir rüzgar türbinin döneme hareketiyle oluşan kinetik enerjisinin %59,3'ünden fazlasını yakalayamayacağından bahsetmektedir.

$$C_p = 0,5926 \quad (3.23)$$

İdeal bir rüzgar türbinin çalışmasına etkiyen çevresel ve mekaniksel birçok faktör vardır. Mekaniksel faktörlerden bazılarında hava akışının değişken oluşu ve bu hava akışının rotora etkisi, türbinin bıçaklarının uzunluğu ve uç kısımlarındaki kayıplar, sürtünme ve sürüklenme kuvveti gibi faktörler örnek olarak verilirken, çevresel faktörler ise türbin yakınlarında bulunan engeller, rüzgar verimliliğinin ani değişimleri gibi faktörler verilebilir. Bu sebeplerden dolayı, elde edilebilecek en yüksek güçte yaşanacak kayıplar olacaktır. Rüzgar türbininden elde edilecek toplam verim, türbinden elde edilen gücün, rüzgarın gücüne oranıdır (Betz A., 1966; Rendall D.G.,1966, Manwell, J.F. vd., 2009).

$$\left. \begin{aligned} \eta_{verim} &= \frac{P_{Türbin}}{P_{Rüzgar}} = \frac{P_{Türbin}}{\frac{1}{2}\rho Av^3} = \eta_{mekanik} C_p \\ P_{Türbin} &= \frac{1}{2}\rho Av^3 (\eta_{mekanik} C_p) \end{aligned} \right\} P = \frac{1}{2} c_p \rho \pi r^2 v^3 \quad (3.24)$$

### 3.3. Rüzgar Veri Analizinde Dağılım Fonksiyonları

Rüzgar verilerinin analizlerinde yorumlanmasında çoğunlukla Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları kullanılmaktadır. Mekanik cihazların ömrünü ortaya koymak için elde edilen Weibull dağılım fonksiyonunda şekil (k) ve ölçek (c) olmak üzere iki parametre kullanılırken, Rayleigh dağılımında bir parametre (ölçek parametresi, c) kullanılmaktadır. Bu da rüzgar veri analizinde Weibull dağılımının daha yaygın olarak kullanılmasının bir nedenidir. Bu dağılımlar, Weibull ve Rayleigh,  $v > 0$ ,  $k > 0$  ve  $c > 0$  değerleri için tanımlanır.

#### 3.3.1. Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu

Ölçek (c) ve şekil (k) parametlerine bağlı olarak ifade edilen Weibull yoğunluk fonksiyonu  $f_w$  herhangi bir hızında esen rüzgarın esme frekansı vermektedir ve aşağıdaki denklemlerle verilmektedir (Oral vd., 2019; Mayhoub ve Azzam, 1996; Weisser, 2003).

$$\left. \begin{aligned} f_w(v) &= \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-1 \left(\frac{v}{c}\right)^k\right], k > 0, v > 0, c > 0 \\ k &= \left(\frac{\sigma_v}{v_m}\right)^{-1,086} \\ c &= v_m \left(0,568 + \frac{0,433}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Denklem 3.25'te “ $f_w(v)$ ” fonksiyonu, “v” rüzgar hızını gözlemleme olasılığıdır, “c” Weibull ölçek parametresidir ve “k” boyutsuz Weibull şekil parametresidir. Temel olarak, ölçek parametresi “c”, dikkate alınan bir rüzgar konumunun ne kadar 'rüzgarlı' olduğunu gösterirken, ölçüm yapılan yerin türbülans yoğunluğunu da karakterize eden şekil parametresi “k”, rüzgar dağılımının ne kadar doruğa ulaştığını gösterir. (Oral vd., 2019; Mayhoub ve Azzam, 1996; Weisser, 2003).

### 3.3.2. Rayleigh Olasılık Dağılım Fonksiyonu

Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonu, Weibull dağılım fonksiyonunun tek parametreliliği yani şekil parametresi olan  $k$ 'nın 2'ye eşit olduğu ( $k=2$ ) durumuna karşılık bir fonksiyondur. Rüzgar hızının frekans dağılımı bilinmediğinde ve yıllık ortalama rüzgar hızı 4,5 m/s'den büyük olduğunda, rüzgar hızı frekans dağılımını tahmin etmek için Rayleigh dağılımının kullanılması önerilir (Cliff, 1977; Weisser, 2003). Denklem 3.26'te verilen Rayleigh dağılımı ( $f_R$ ) ile bir bölgedeki rüzgar hızının rüzgar esme sıklığı, sadece o bölgedeki ortalama rüzgar hızı " $v_m$ " kullanılarak hesaplanabilir. Ortaya çıkan rüzgar hızları bir olasılık yoğunluk dağılımıdır (Cliff, 1977; Weisser, 2003).

$$\left. \begin{aligned} F_R(v) &= \left( \frac{2v}{c^2} \right) \exp \left[ -1 \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right] \\ f_R(v) &= \frac{\pi}{2} \left( \frac{v}{v_m^2} \right) \exp \left[ -1 \left( \frac{\pi}{4} \right) \left( \frac{v}{v_m^2} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

### 3.4. Kapasite Faktörü

Kapasite faktörü "KF", bir yılda yani toplamda ( $365 \times 24$ )=8760 saatte bir elektrik üretim tesisinin ne kadar enerji üretebileceğini gösterir.

$$KF = \frac{\text{Bir yılda üretilen enerji toplamı}}{\text{Türbinin nominal güçte üreteceği toplam enerji}} \quad (3.27)$$

Kapasite faktörü, bir elektrik santralının bir yıllık nominal güç çıkışına bağlı olarak bir yılda ürettiği enerji miktarını üretip üretemeyeceğini belirtir. Rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin stratejik olarak işletilmesinde, enerjinin potansiyelinin belirlenmesi ve incelenmesi önemlidir (Akkaş, 2001; Mathew, 2006; Çetin vd., 2011; Gençel ve Tarhan, 2019).

### 3.5. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi

#### 3.5.1. Hellmann Bağıntısı

Rüzgar hızı, farklı yüksekliklerde farklı değerler göstermektedir. Bu yüzden rüzgar türbini kurulacak alana dikkat etmek gerekmektedir, çünkü kullanılacak türbin yüksekliği elde edilecek olan rüzgar gücünü ve enerjisini etkileyecektir. Farklı yüksekliklerde rüzgar hızının farklılıklar göstermesinin coğrafik sebepleri, hava kütesinin basınç farklarından dolayı hareket ederek yer yüzüyle oluşturduğu sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Sürtünme etkisi de yeryüzeyinin pürüzlüğüne bağlıdır. 1916'da Hellmann, kuvvet yasası olarak da adlandırılan Denklem 3.28'de verilen iki farklı yükseklikteki rüzgar hızının oranının bulunabileceğini varsayan, dikey rüzgar profili için basit ama etkili bir model önerdi.

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^a \quad (3.28)$$

Denklemdaki  $v$ ,  $h$  yüksekliğindeki rüzgar hızını,  $v_0$  ise, referans yükseklik olan  $h_0$  yüksekliğindeki rüzgar hızını temsil eder. “ $a$ ” sürtünme katsayısı veya topografyanın bir fonksiyonu olan Hellmann katsayısı olarak adlandırılır. Farklı topografik özellikler için Hellmann katsayısı “ $a$ ” Tablo 2'de verilmiştir (Karman, 1931; Mathew, 2006; Jafarzadeh, 2017; Okorie vd., 2018).

Tablo 2

Hellmann katsayısının topografik verilere göre değişimi (Karman, 1931; Mathew, 2006; Jafarzadeh, 2017; Okorie vd., 2018).

<b>Yüzey şekli</b>	<b>Hellmann katsayısı (a)</b>
Pürüzsüz sert zemin, deniz veya göl	0,10
Pürüzlü zemin, çim, ayak yüksekliğindeki engeller	0,15
Çalılar, çitler ve ekin arazileri	0,20
Ormanlık alanlar	0,25
Kırsal bölgeler, küçük yerleşim yerleri	0,30
Büyük binalar, şehirler	0,40

### 3.6. Pürüzlülük Uzunluğu

Teorik olarak pürüzlülük uzunluğu, nötr atmosferik kararlılık koşullarına yakın koşullar altında yüzeyden belirli bir yükseklikte rüzgar hızının ölçülmesiyle hesaplanabilir (Mathew, 2006; Boneya, 2011; MRC, 2021). Yüksekliğe bağlı rüzgar hızı hesaplamalarından biri olan logaritmik rüzgar yasası, kökeni akışkanlar mekaniğinden gelmektedir ve Denklem 3.29 kullanılarak hesaplanır.

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_0/z_0)} \quad (3.29)$$

Bu formülde “ $z_0$ ” pürüzlülük uzunluk katsayısını temsil eder ve birimi metredir. Esas olarak arazi tipine ve çevresel faktörlerin yüksekliğine bağlıdır. Bunların örnekleri Tablo 3'te verilmiştir (Mathew, 2006; Boneya, 2011; MRC, 2021).

Tablo 3

Pürüzlülük sınıfları, bölge ve uzunlukları (Mathew, 2006; Boneya, 2011; MRC, 2021).

Pürüzlülük sınıfları	Bölge	Pürüzlülük Uzunluğu
0	Su yüzeyi	0.0002
1	Açık alanlar, küçük engebeler	0.003
2	Aralarında 1 km'den daha fazla mesafe olan engebe dolu tarım arazileri	0.1
3	Çok sayıda engebe bulunan kentsel bölgeler ve tarım arazileri	0.4
4	Yoğun nüfuslu kentsel veya ormanlık alanlar	1.6

### 3.7. Türbülans Yoğunluğu

Akışkanlar mekaniğinde türbülans, basınç ve akışkan hızındaki ani değişimlerin neden olduğu bir olay olarak adlandırılır (Batchelor, 2000; Burton vd., 2001; Mathew, 2006). Buna göre rüzgarın hızı ve yönü, binalar, ağaçlar, kayalar gibi pürüzlü yüzeylerden ve

engellerden geçerken hız değiştirir. Bunun nedeni akışta oluşan türbülansdır. Nötr atmosferdeki türbülans yoğunluğu, açıkça yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Boyuna bileşen için, standart sapma " $\sigma$ " yükseklikle yaklaşık olarak sabittir, dolayısıyla türbülans yoğunluğu yükseklikle azalır. Türbülans yoğunluğunun rüzgar türbinlerinin ömrünü kısaltıcı etkisi vardır ve sık arızalara neden olur bu yüzden dikkate alınması önemlidir. Denklem 3.30 ile verilir;

$$I = \frac{\sigma}{v_m} = k^{-\frac{1}{1,086}} \quad (3.30)$$

Denklem 3.30'da burada "I" türbülans yoğunluğunu, " $\sigma$ " standart sapma değerini ve " $v_m$ " rüzgarın ortalama rüzgar hızını tanımlamaktadır. Türbülans yoğunluğu için bazı sınıflandırmalar yapılmış ve sınıflandırmalar Tablo 4'te verilmiştir (Batchelor, 2000; Burton vd., 2001; Mathew, 2006).

Tablo 4

Türbülans yoğunluğu sınıfları (Batchelor, 2000; Burton vd., 2001; Mathew, 2006).

Yoğunluk Sınıfları	Türbülans Yoğunluğu
Düşük	0,00 <I <0,10
Orta	0,10 <I <0,25
Yüksek	0,25 <I

### 3.8. MOORA yöntemi

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden biri olan MOORA ((Multi-Objective Optimization By Ratio Analysis) orantılı analize dayalıdır. Çok amaçlı optimizasyon yönetimi olan MOORA, bir karar verme probleminde birden çok değerlendirme kriteri yer alır. Bu kriterler de alternatif karar yöntemleri arasında karşılaştırma yapılabilir. İlk olarak 2006 yılında MOORA yönetimi, Brauers ve Zavadskas tarafından tanıtılmış olup (Brauers ve Zavadskas, 2006; Ersöz ve Atav, 2011; Ayçin, 2020). tüm kriterleri, alternatifleri değerlendirdiği ve kriterlerin tüm etkileşimlerini aynı anda

incelemekle birlikte öznel olmayan yönsüz değerleri de kullanarak normalize ettiği için bu çalışmada kullanılmıştır. MOORA Yöntemi, çeşitli kriterlere göre farklı alternatiflerden oluşan bir karar matrisi oluşturarak, en iyi alternatifin seçimini sağlar. ÇKKV yöntemlerinde ilk aşamada bir karar matrisi oluşturmak gerekmektedir. Hazırlanan karar matrisi içerisinde çözülmesi istenen problemin karar alternatifleri ve değerlendirme kriterleri bulunur. Karar matrisi,

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & \dots & \dots & \dots & k_{1n} \\ \vdots & & & & \\ k_{j1} & \dots & \dots & \dots & k_{jn} \\ \vdots & & & & \\ k_{mi} & \dots & \dots & \dots & k_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 0,1, \dots, m; j = 1,2, \dots, n \quad (3.30)$$

olarak verilir (Ayçin, 2020). Denklem 3.30'da belirtilen bu matriste; “ $k_{ij}$ ”, “ $j$ ” kriterinin “ $i$ ” alternatifinin karşılığı, “ $m$ ” alternatif sayısını ve “ $n$ ” kriter sayısını temsil etmektedir. Öncelikle karar matrisi boyutsuz olacak şekilde normalleştirilir ve karar matrisindeki tüm öğeler karşılaştırılabilir (Karande ve Chakraborty, 2012). Bu amaçla karar matrisi oluşturulduktan sonra Denklem 3.30 normalize edilir. Yapılan bu normalizasyon işlemi Denklem 3.31’de verilmiştir.

$$k_{ij}^* = \frac{k_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m k_{ij}^2}} \quad (3.31)$$

Denklem 3.31’de verilen “ $k_{ij}^*$ ” değeri, “ $i$ ” alternatifinin 0 ile 1 arasında “ $j$ ” kriterine göre karşılaştırıldığı normalize edilmiş boyutsuz bir değerdir. “ $k_{ij}^*$ ” değerleri 0 ile 1, ya da -1 ile 1 aralığında olacaktır (Ersöz ve Atav, 2011). Normalizasyon işlemleri tamamlandığında, karar probleminde yer alan kriterler, pozitifler ve negatifler veya maksimumlar ve minimumlar olarak belirlenirler. Bu işlemlerden sonra normalleştirilmiş fayda (maksimum) sağlayan kriterlerin performans değeri eklenir. Aynı şekilde fayda sağlamayan (minimum) kriterler için de aynı işlem tekrarlanır. Daha sonra minimize edilmiş

kriterlerin toplamı, maksimize edilmiş kriterlerin toplamından çıkarılır ve denklem 3.32’de verilen “ $l_i^*$ ” değeri elde edilir.

$$l_i^* = \sum_{j=1}^g k_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n k_{ij}^* \quad (3.32)$$

Denklem 3.32’de yer alan  $j=1, 2, \dots, g$  maksimum yönlü kriterleri,  $j=g+1, g+2, \dots, n$  minimum yönlü kriterleri vermektedir. “ $g$ ” ve “ $n-g$ ”, maksimize edilecek ve minimize edilecek kriter sayısıdır. Tüm işlemlerden sonra alternatifler aranan duruma göre artan veya azalan şekilde sıralanarak, en uygun alternatif belirlenebilir (Adalı ve Işık, 2017, Ayçin, 2020).

### 3.9. WindPro Yazılımı

WindPRO yazılımı, 100’den fazla ülkede 2.500’den fazla lisans sahibi ile dünyanın en yaygın kullanılan rüzgar enerjisi yazılım paketidir. Buna tüm önde gelen türbin üreticileri, proje geliştiriciler, mühendislik şirketleri, kamu hizmetleri, planlama yetkilileri ve araştırma kurumları dahildir. WindPRO; modüler tabanlı olup ve rüzgar çiftliği projelerinin geliştirilmesi ve planlanması ile ilgili tüm yönleri kapsar. Bu kapsamlar; rüzgar veri analizi, rüzgar kaynağı haritalaması, mikro yerleşim, saha uygunluk analizleri, enerji üretimi tahmini düzen optimizasyonu, çevresel etki hesaplamaları, görselleştirmeler, elektriksel ve ekonomik hesaplamalarını içerir. Ayrıca WindPRO, kaydedilen verilere dayalı olarak çalışan rüzgar çiftliklerinin ayrıntılı üretim analizleri için özellikler sunar. Bu uygulama sayesinde 1992-2022 yılları arasında TR22 bölgesinde belirlenen noktaların 30 yıllık rüzgar verileri alınarak analizler yapılmıştır. Yazılım kendi içerisinde yapılan güncellemelere bağlı olarak çeşitli rüzgar türbinlerinin özelliklerini bulundurmaktadır. Açık deniz rüzgar türbinleri kullanıldıkları bölgeye göre pek çok tip ve versiyonda üretilmektedir. Bu çalışmada SG 6.0–155 model tipi/versiyonu kullanılmıştır. Tablo 5’te rüzgar türbin modelinin WindPro yazılımında bulunabilecek özelliklerini listelenmiştir. Bu yazılım sayesinde çeşitli uydular üzerinden istenilen koordinatlardaki veriler elde edilmektedir. Veriler uzun yıllar elde edildikten sonra bazı net sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Çalışmada;



Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ECMWF)'nin veri tabanından ve ERA5 uydu verilerinden de faydalanılmıştır.

Tablo 5

Çalışmada kullanılan türbin özellikleri (WindPRO)

<b>Üretici</b>	<b>Siemens Gamesa</b>
Tip/ Versiyon	SG 6.0-155
Rated Power	6,600.0 kw
Rotor yarıçapı	155.0 m
Kule	Tubular
Şebeke bağlantısı	50/ 60 Hz
Ülke	İspanya
Jeneratör tipi	Değişken
Rated	9,3 rpm
Initial	5,4 rpm
Varsayılan hub yüksekliği	122,5 m
Maks. bıçak genişliği	4,5 m
%90 yarıçap için bıçak genişliği	1,4 m

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, bazı temel kriterler baz alınarak, deniz üstü rüzgar türbinleri için Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Marmara Bölgesi'nin güneyi seçilmiş ve SG 6.0–155tip/ versiyon 10 adet deniz üstü rüzgar türbini kullanılmıştır. Dikkate alınan kriterler arasında su derinliği, rüzgar hızı, kıyıya uzaklık, şebeke hatlarına uzaklık, gemi yollarına uzaklık ve fay hatlarına uzaklık bulunmaktadır. 122,5 m hub yüksekliği için WindPro yazılımından alınan veriler analiz edilerek bölgelerin en uygun hedef lokasyonları belirlenmiş ve kurulabilecek açık deniz üstü rüzgar türbini santralleri için fizibilite çalışması yapılmıştır. Ayrıca pürüzlülük uzunluğu (m) ve türbülans şiddeti (m) de kriter olarak kullanılmıştır. Kriterler belirlenirken; ortalama rüzgar hızı, ortalama güç yoğunluğu, kapasite faktörü ve pürüzlülük uzunluğu için “WindPro Yazılımı” verileri; Su derinliği için “Google Earth” ve “Naviaonics” verileri, en yakın gemi yolu mesafesi için “GPS Deniz Haritaları” verileri; En yakın fay hattına, aktif fay hattına olan uzaklık için “MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)” verileri; kara parçasına ve şebeke dağıtım hattına olan mesafe için “Naviaonics” verileri, kapasite faktörü için “Küresel Rüzgar Atlası (Global Wind Atlas)” verileri kullanılmıştır.

MOORA Yönteminde kullanılacak alternatifler Tablo 6'de verilmiştir. MOORA yöntemi ile açık deniz rüzgar türbinleri için en uygun yerlerin belirlenmesinde kullanılan kriterler (Tablo 6); MOORA yöntemi ile açık deniz rüzgar türbinleri için en uygun lokasyonların belirlenmesinde kullanılan alternatifler Tablo 7 de verilmiştir. Açık deniz rüzgar türbinlerinin kurulumu kıyıya yakın bölgelerde daha az maliyetli olduğu tahmin edildiğinden, araştırmamız bu bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Ancak, açık deniz üstü rüzgar santrali kurulumları kıyıya yakın gerçekleştirilmesine rağmen, açık deniz rüzgar santrali tipleri derinliğe göre değişiklik göstermiştir.

Yapılan çalışmalarda gürültü kirliliğini önlemek için kıyıdan yaklaşık 1,5 km olan uzaklıklar seçilmiştir. 1,5 km olan uzaklığı DSÖ (Dünya Sağlık Örgütü) ve NHMRC'den (Ulusal Sağlık ve Tıbbi Araştırma Konseyi) belirlemektedir. NHMRC tarafından 2015 yılında yayınlanan “Evidence on Wind Farms and Human Health (Rüzgar Santralleri ve

İnsan Sağlığına İlişkin Kanıtlar)” başlıklı bilgilendirme makalesinde belirtildiği gibi, “Bireyler rüzgar santrali gürültüsünü daha uzak mesafelerden algılasa da 1500 m'den daha uzak mesafelerde rahatsız edici olması pek olası değildir.”. Rüzgar çiftliği gürültüsünün, ev aletlerinin ses seviyelerinin altında olduğu belirtilen mesafede 30–35 dBA'nın altında olduğundan bahsedilmiştir.

Tablo 6

MOORA yöntemi için dikkate alınan kriterler

Kriter	Birim
Ortalama rüzgar hızı	m/s
Ortalama rüzgar güç yoğunluğu	W/m <sup>2</sup>
Esmeye sıklığı	birimsiz
Kapasite faktörü	%
Su derinliği	m
Türbülans	birimsiz
Gemi yoluna olan uzaklık	km
Fay hattına olan uzaklık	km
Aktif fay hattına olan uzaklık	km
Kara parçasına olan uzaklık	km
Şebekeye olan uzaklık	km

Tablo 7

MOORA yöntemi için alternatif konumlar

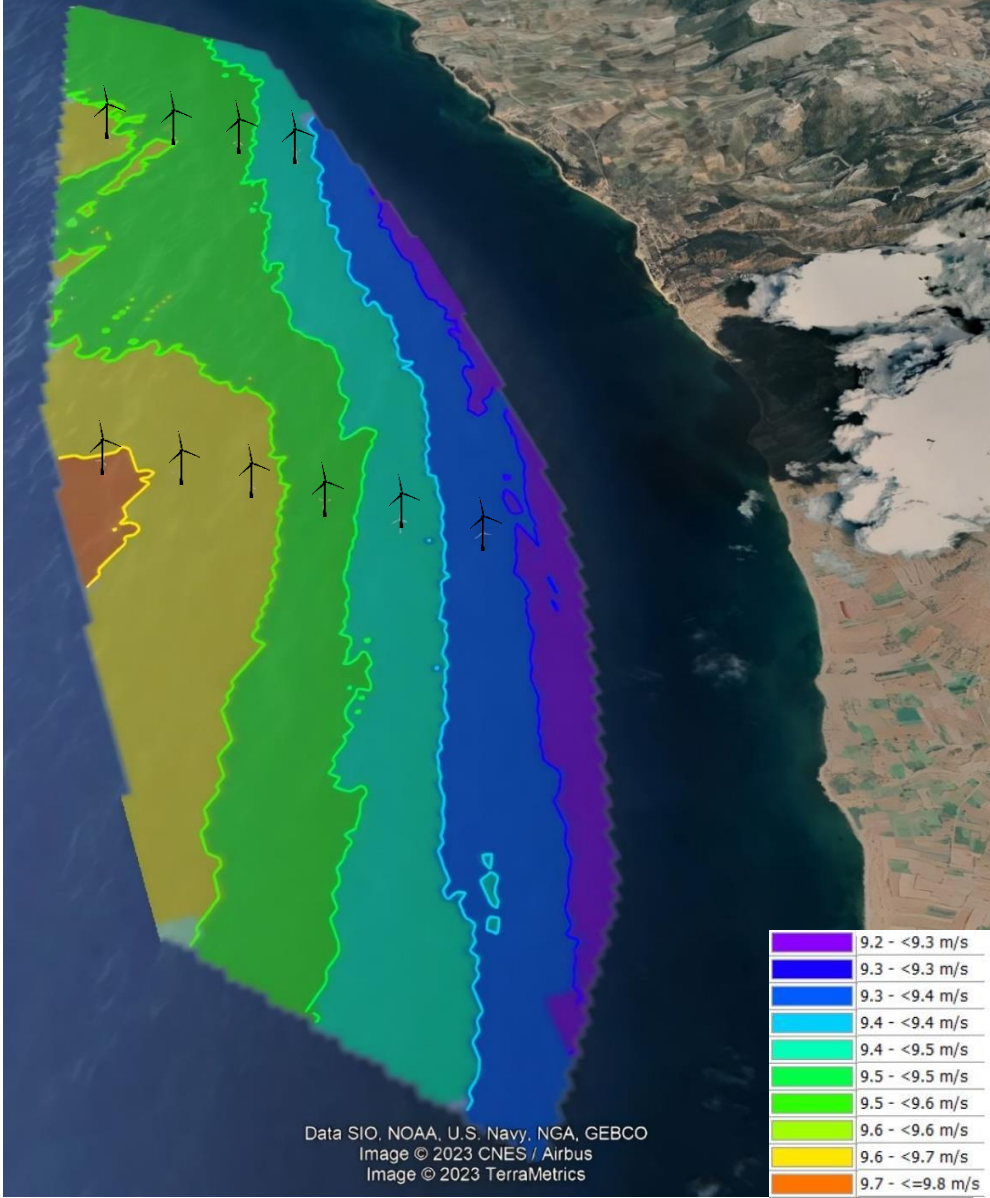
Konumlar	Enlem (°)	Boylam (°)
Ayvacık	39.645452	26.130841
Ayvalık	39.363685	26.704481
Bandırma-Doğu	40.397990	28.137728
Bandırma-Batı	40.357266	27.819786
Bozcaada-Kuzey	39.885302	26.003685
Bozcaada-Güney	39.810906	25.992961
Eceabat	40.301705	26.213057
Edremit Körfezi	39.490270	26.814713
Erdek	40.515363	27.681415
Gökçeada-1	40.097970	25.888055
Gökçeada-2	40.162003	25.680220



Şekil 8. Fay hatlarına olan yakınlıklar; a) Ayvacık, b) Ayvalık, c) Bandırma-1, d) Bandırma-2, e) Bozcaada-1, f) Bozcaada-2, g) Eceabat, h) Edremit Körfezi, i) Erdek, j) Gökçeada-1, k) Gökçeada-2, (MTA- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü).

#### 4.1. Ayvacık Bölgesi

Ayvacık, Türkiye'nin kuzeybatısında, Çanakkale iline bağlı bir ilçedir ve kıyı kesimleri Ege Denizine bağlıdır. Kösedere köyünü merkez alarak Ezine ilçesinin Tavaklı köyüne doğru Şekil 9'da belirtilen bölge deniz üstü rüzgar türbinleri için yaklaşık 40,8 km<sup>2</sup>'lik bir alanda en uygun yerlerden biri olarak taranmıştır. Araştırma bölgesinin açık deniz rüzgar türbini potansiyeli için özelliklerini sıralayacak olursak istenilen değerler türbin dağılımına göre yaklaşık olarak verilmektedir. Su derinlikleri 10 ile 45 m arasında değişkenlik göstermektedir. Kıyıya olan uzaklık 1.78 ile 4.06 km yer almakta ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık 23.92 km olarak belirlenmiştir. Kurulması öngörülen Bozcaada açıklarında bulunan sualtı şebeke hattına olan uzaklık 12,85 km olduğundan, kablo hattının en yakın kara parçasındaki ana hatta bağlanması tavsiye edilmektedir.



Şekil 9. Ayvacık bölgesi taranan alan ve türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)

En yakın aktif fay ve fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 3,03 ile 10,20 km'dir. Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I'e göre %54'lük bir kapasite faktörüne sahip olduğunu göstermektedir. "WindPro" yazılımına göre bu değer "%" olup, %6,93'lük bir fark görülmektedir. Bu sonucun taranan alanların boyutunun farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca; Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı sırasıyla belirlenmiş ve %4,06 olarak bir fark gözlemlenmiştir.





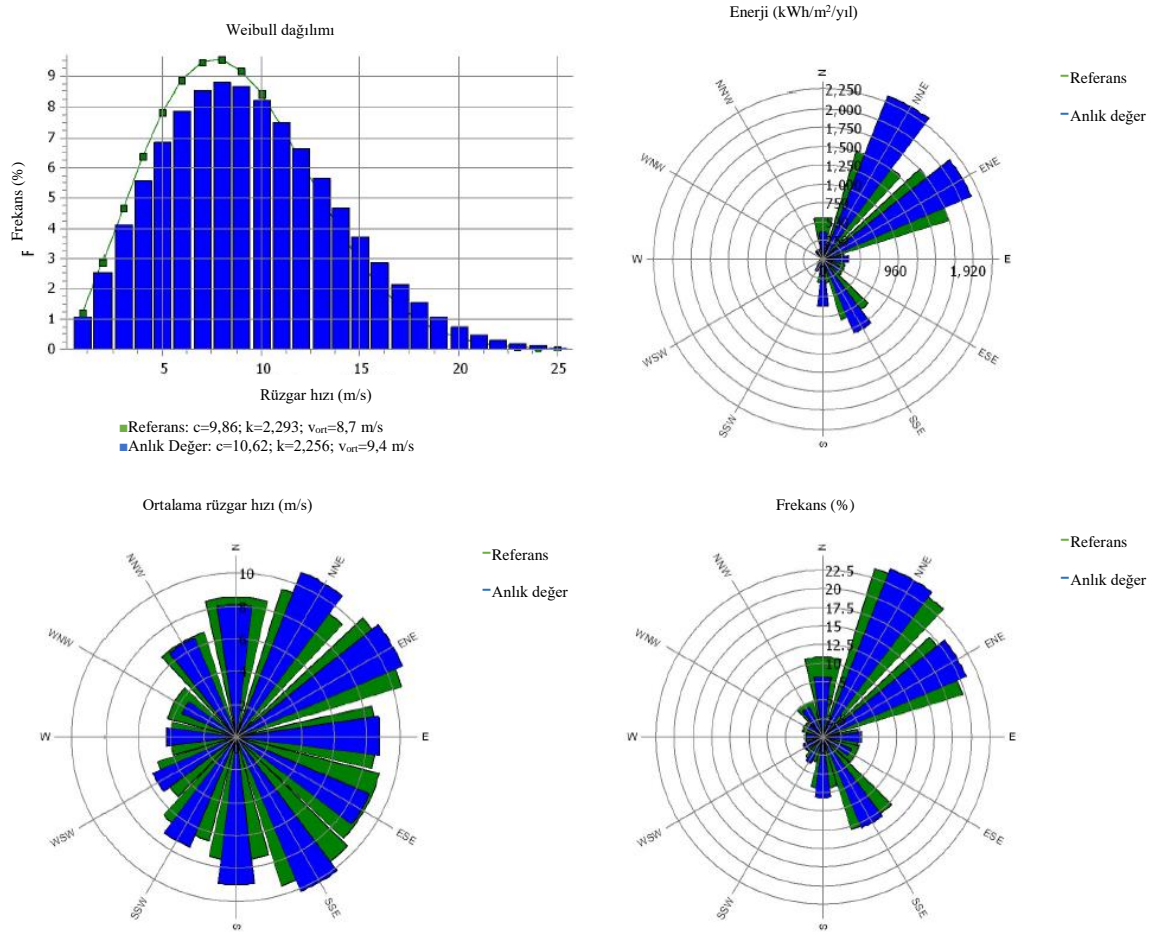
Bölgenin uygunluğunun araştırılmasıyla ilgili olarak saha verileri WindPro yazılımından alınmış olup Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8

Ayvacak için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

	Sonuca Göre Belirli Sonuçlar-10,0%
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	324.371,7
Sonuç- %10 [MWh/y]	291.934,5
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	330.621,4
Wake kaybı [%]	1,9
Kapasite faktörü [%]	50,5
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	29.193,5
Tam yükleme saatleri [saat/y]	4.423,0
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	9,6

Şekil 12'de gösterildiği gibi, hakim rüzgar yönü, Weibull dağılım fonksiyonu parametreleri, enerji artışı ( $kWh/m^2yıl$ ), rüzgar hızı (m/s) ve frekans (%) gösterilmektedir. Bölgede hakim rüzgar yönleri DKD olarak belirlenmiş olup, Global Wind Atlas' dan alınan veriler birbiriyle örtüşmektedir.

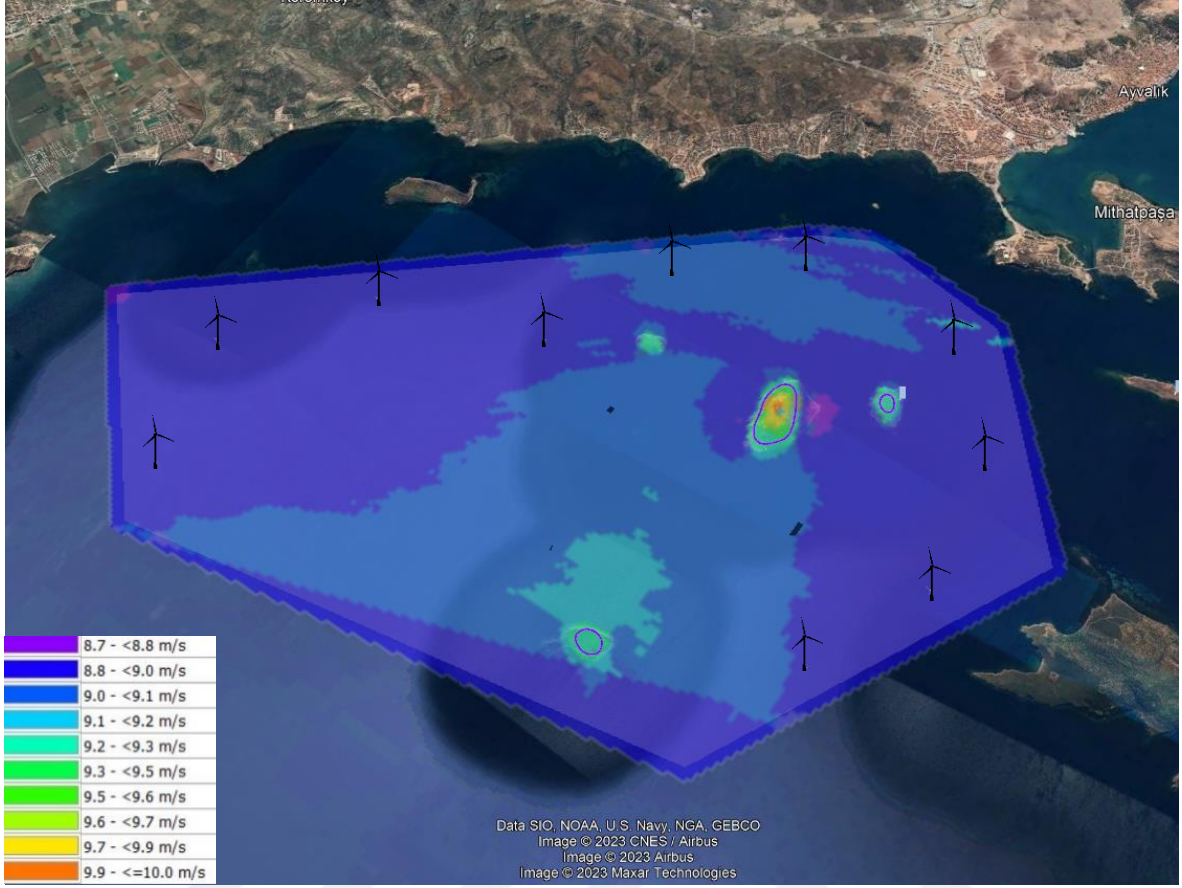


Şekil 12. Rüzgar Veri Analizi - Ayvalık (WindPro)

## 4.2. Ayvalık Bölgesi

Ayvalık, Türkiye'de Marmara Bölgesi'nin güneyinde yer alan Balıkesir iline bağlı bir ilçedir, kendine has doğal bir körfeze sahiptir. Bu sebeple turizm açısından önemli bir konumdadır ve Ege denizi kıyısında yer almaktadır. Çalışma alanı Şekil 13'de gösterildiği gibi Ayvalık'tan Gömeç'e doğru geniş bir alanı kapsamaktadır ve toplamda 83,3 km<sup>2</sup>'lik bir alan taranmıştır. Türbinlerin birbirine olan etkilerini azaltmak için dairesel olarak dizilmişlerdir. Diğer bir sebep de çalışma alanının etrafında küçük adacıkların oluşundan kaynaklanmaktadır. Bu adacıklar yarattığı engeller sebebiyle deniz üstü rüzgar türbinlerinin verimliliğini etkilediği düşünülmektedir.





Şekil 13. Ayvalık bölgesi taranan alan ve türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)

Araştırma bölgesinin açık deniz rüzgar türbini potansiyeli için lokasyonların özelliklerini sıraladığımızda, istenilen değerler türbin dağılımına göre yaklaşık olarak verilmektedir. Su derinlikleri 10 ile 40 m arasında değişkenlik göstermektedir ve kıyıya olan uzaklık 2,44 ile 4 km arasında olup, en yakın gemi yoluna olan uzaklık 4,09 km olarak belirlenmiştir. Çalışılan alan kıyıya çok yakın mesafelerde olduğu, su altı şebeke hattının olamamasından ve Ayvalık bölgesinin kendine has doğal bir körfezi olduğundan şebeke hattının en yakın kara parçasına bağlanmasının uygun olacağı tavsiye edilmektedir. Bu yüzden en yakın kara parçasına olan uzaklığı şebeke hattına olan uzaklık ile aynı alabiliriz. En yakın aktif fay ve fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 22,43 ile 19,70 km'dir. Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I'e göre %49'luk bir kapasite faktörüne sahip olduğu, "WindPro" yazılımına göre %3,5'lik bir fark olduğu görülmektedir. Bu sonucun taranan alanların boyutunun farklı olmasından kaynaklandığı öngörülsede neredeyse çıkan sonuçlar birbiri ile tutarlı bir yapıya sahiptir. Ayrıca Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve %0,2'lik bir fark



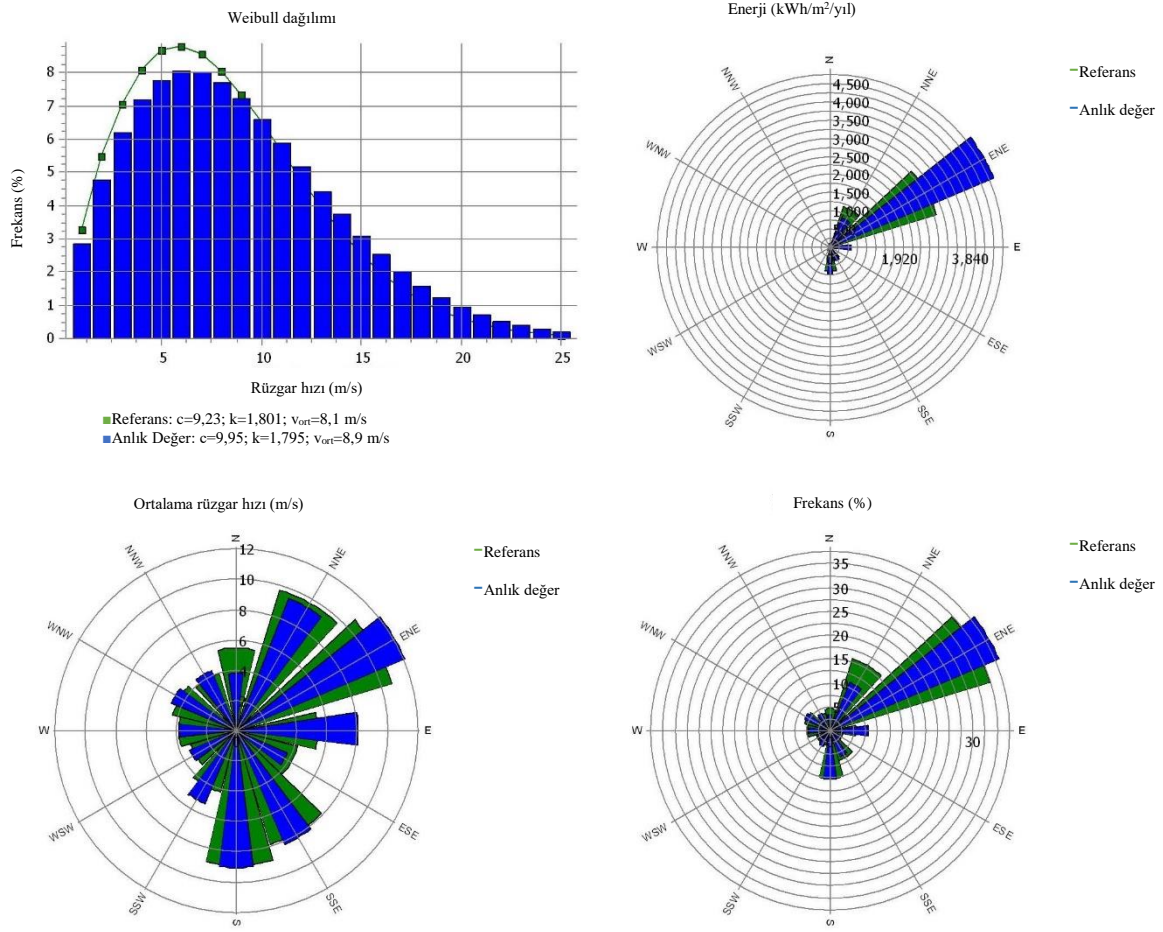
Ayvalık için hesaplanan yıllık enerji üretimi Tablo 9 da verilmiştir.

Tablo 9

Ayvalık için Hesaplanan Yıllık Enerji Üretim Bilgileri (WindPro)

	Sonuca Göre Belirli Sonuçlar-10,0%
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	292.336,2
Sonuç- %10 [MWh/y]	263.102,6
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	295.331,6
Wake kaybı [%]	1,1
Kapasite faktörü [%]	45,5
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	26.310,3
Tam yükleme saatleri [saat/y]	3.986
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	9,0

Şekil 16'da verildiği gibi, hakim rüzgar yönü, Weibull dağılım fonksiyonu parametleri, enerji artışı (kWh/m<sup>2</sup>yıl), rüzgar hızı (m/s) ve frekans (%) gösterilmektedir. Bölgede rüzgar yönleri DKD olarak belirlenmiş olup, Global Wind Atlas' dan alınan veriler ile örtüşmektedir.



Şekil 16. Rüzgar Veri Analizi - Ayvalık (WindPro)

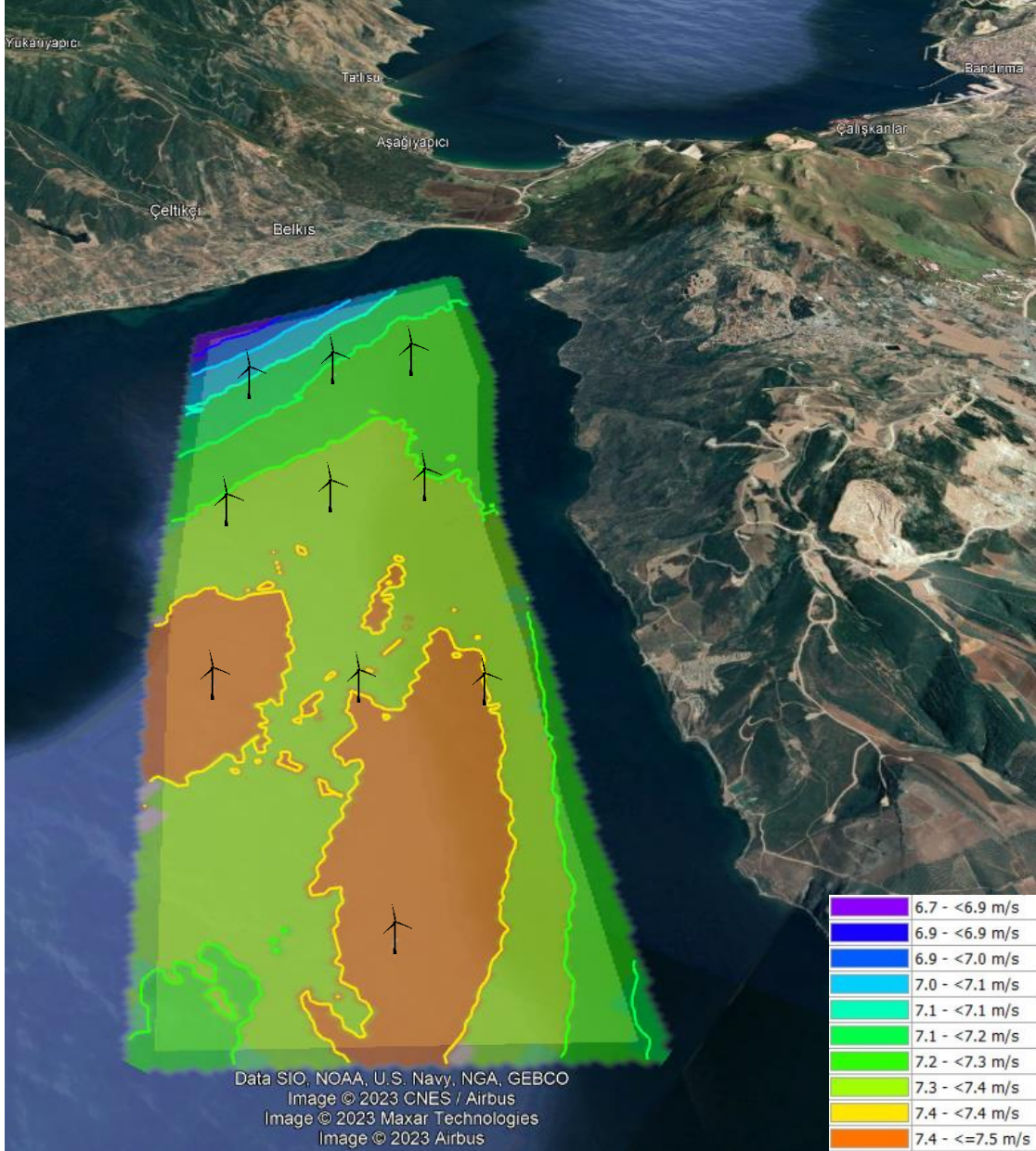
### 4.3. Bandırma Bölgesi

Bandırma, Türkiye'de Marmara Bölgesi'nin güneyinde yer alan Balıkesir iline bağlı bir ilçedir ve bu çalışmada Bandırma'nın doğu ve batı iki bölgeleri için araştırma yapılmıştır. Araştırma yapılan bölgeler Marmara Denizinde olduğu için diğer denizlerimizde kurulması öngörülen rüzgar türbinleri için biraz daha korunaklı bir yapıya sahiptir. Ayrıca Bandırma ilçesinin deniz ve demiryolu imkanları lojistik destek olarak bir avantaj sağlamaktadır.



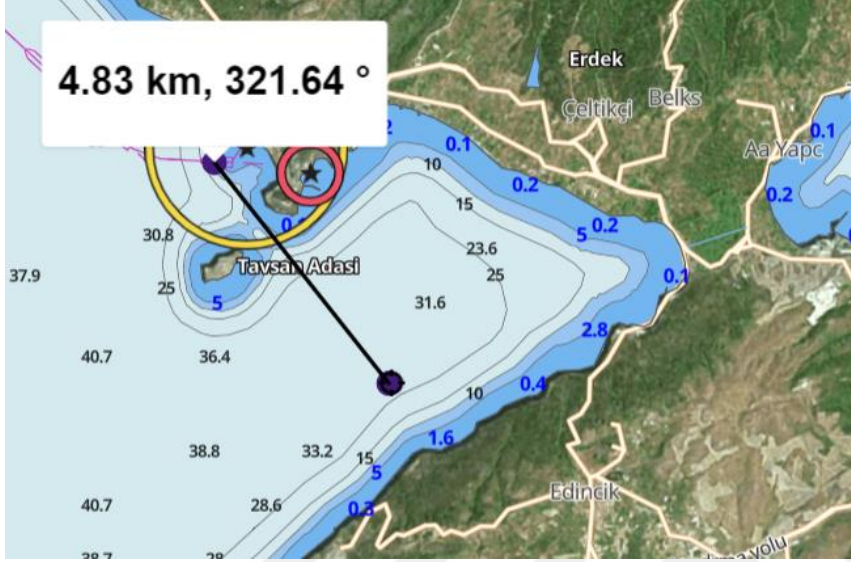
### 4.3.1. Bandırma Bölgesi- Batı Kesimi

Bandırma ilçesinin batı kesimi için çalışmamız kapsamında istenilen kriterlere uygun olarak yaklaşık 66,5 km<sup>2</sup>'lik bir alan taranmıştır. Bölgenin açık deniz rüzgar potansiyellerini incelediğimizde; su derinliği yaklaşık 15 ila 35 m arasında değiştiğini görmekteyiz.

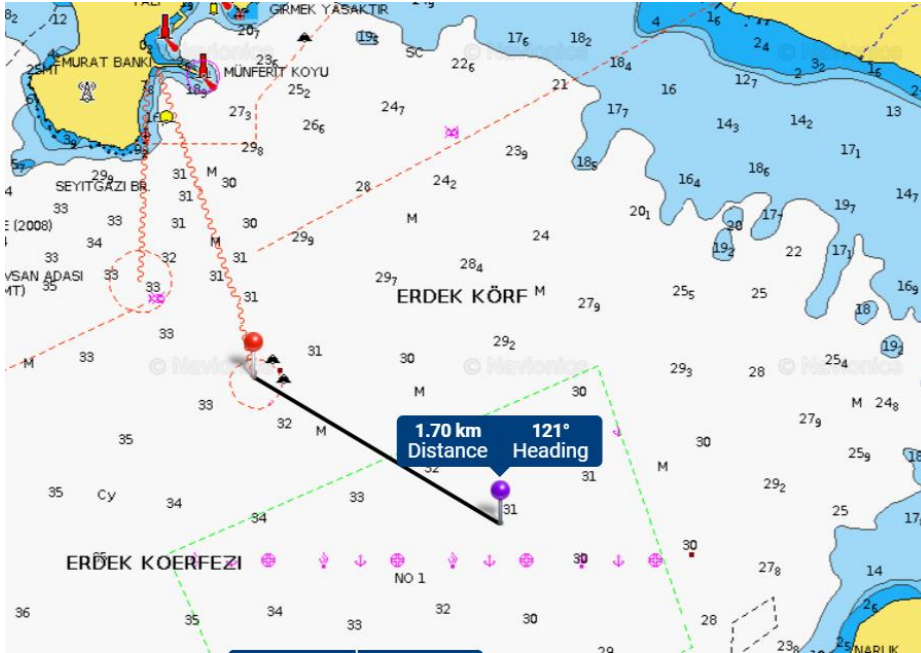


Şekil 17. Bandırma-Batı bölgesi kesimi için taranan alan ve türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)

Türbinlerin dağılımına göre kıyı şeridinde olan yaklaşık mesafe 1,5 ile 3,5 km, en yakın gemi yoluna olan mesafe yaklaşık 4,71 km ve aktif fay hattı ile fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 1,40 ve 1,88 km olarak ölçülmüştür.



Şekil 18. Bandırma-Batı bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık (GPS Deniz Haritaları i-boating)



Şekil 19. Bandırma-Batı bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık (Naviaonics)

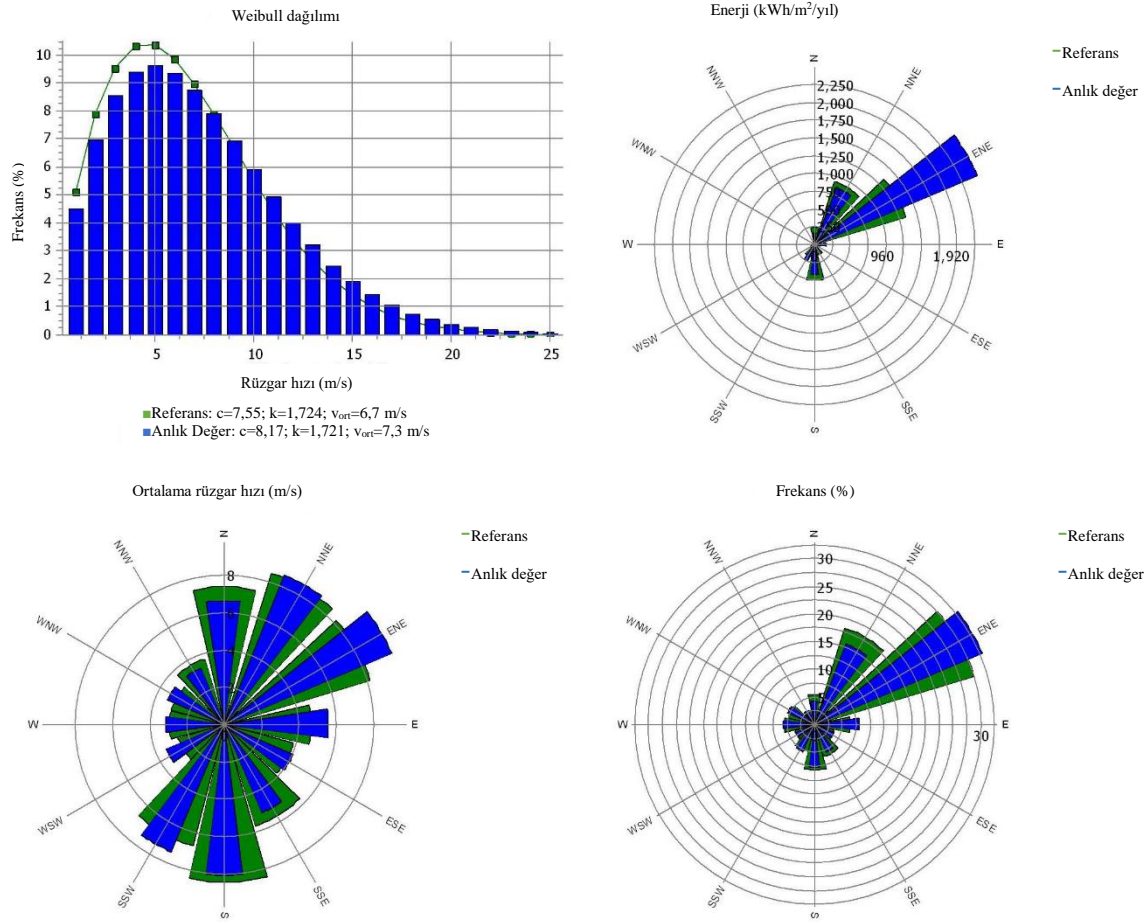
Bandırma'nın batı kesimi alınan verilere göre yıllık ortalama rüzgar hızı 7,4 m/s olduğu verilmiştir. Global Wind Atlas'tan alınan veriler ile karşılaştırıldığında ortalama rüzgar hızı neredeyse birbirine yakın değerler olarak ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I'e göre %44 lük bir kapasite faktörüne sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 10

Bandırma-Batı Kesimi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

	Sonuca Göre Belirli Sonuçlar-10,0%
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	222.416,8
Sonuç- %10 [MWh/y]	200.175,1
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	229.626,3
Wake kaybı [%]	3,1
Kapasite faktörü [%]	34,6
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	20.017,5
Tam yükleme saatleri [saat/y]	3.033
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	7,4

66,5 km<sup>2</sup> gibi geniş bir alanda tarama yapıldığı için WindPro yazılımı, %34,6 değeri ile Global Wind Atlas'tan daha düşük bir kapasite faktörü verisine sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Bu değer Global Wind Atlas verilen değere göre, %44, çok daha düşük olduğu söylenebilir. Tablo 10, Bandırma-batı kesiminin elektrik enerjinin rüzgar yönünün (kWh/m<sup>2</sup>/yıl), ortalama rüzgar hızı (m/s) ve frekansı (%) ile nasıl ilişkili olduğunu göstermektedir. Şekil 20 rüzgar yönünü, Weibull dağılım fonksiyonu parametreleri, rüzgar hızını (m/s) ve ayrıca bölgedeki rüzgarların frekansını (%) göstermektedir.

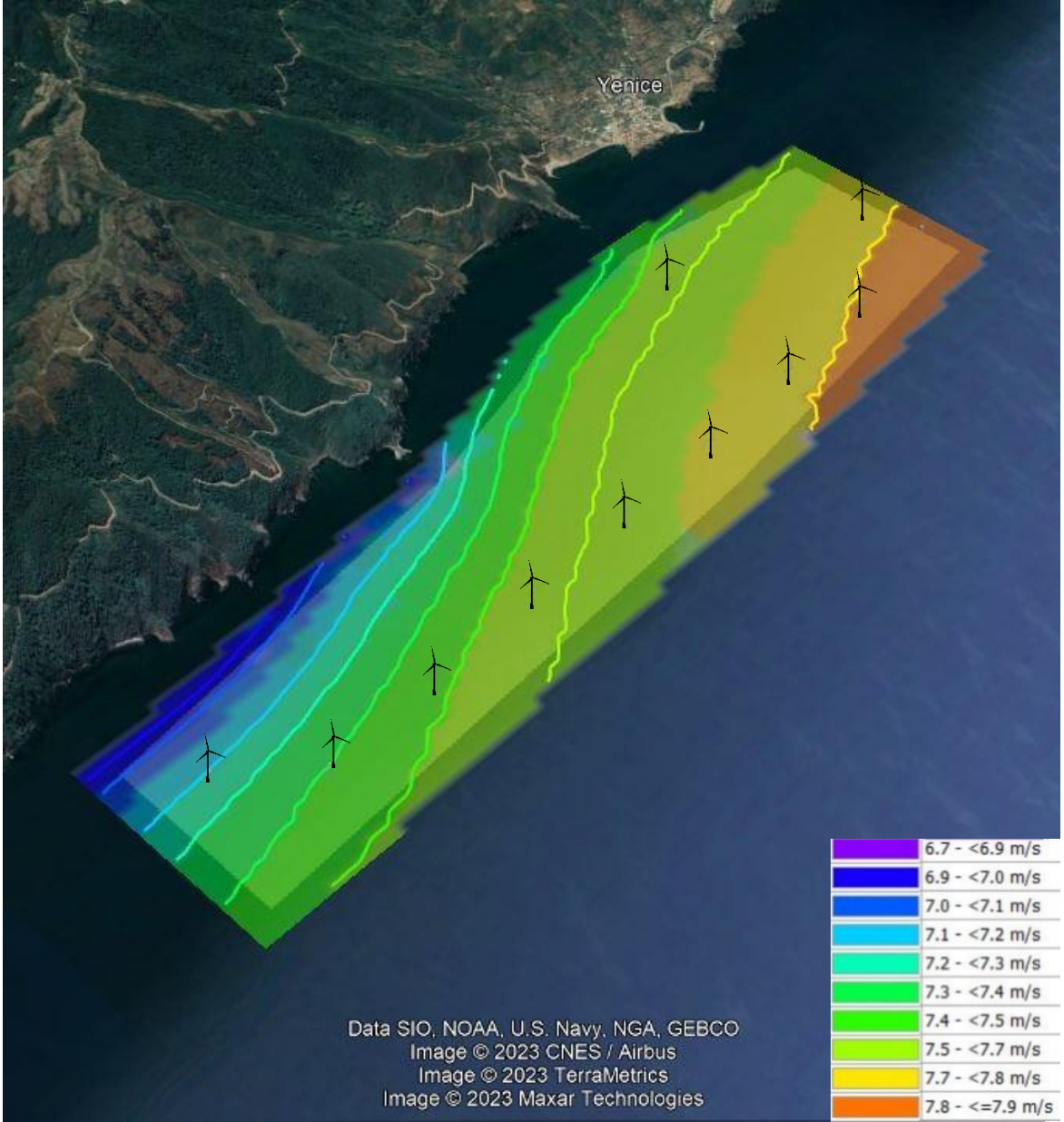


Şekil 20. Rüzgar Veri Analizi – Bandırma-Batı Kesimi (WindPro)

#### 4.3.2. Bandırma Bölgesi- Doğu Kesimi

Bandırma ilçesinin doğu kesimi -Karadağ bölgesi- için çalışmamız kapsamında istenilen kriterlere uygun olarak yaklaşık 10,2 km<sup>2</sup>'lik bir alan taranmıştır. Yenice kasabasının bir limana sahip olması çalıştığımız bölgenin yakınlığı ayrıca bir avantaj sağlamaktadır. Bölgenin açık deniz rüzgar potansiyellerini incelediğimizde, su derinliği yaklaşık 15 ila 40 m arasında değiştiğini görmekteyiz.



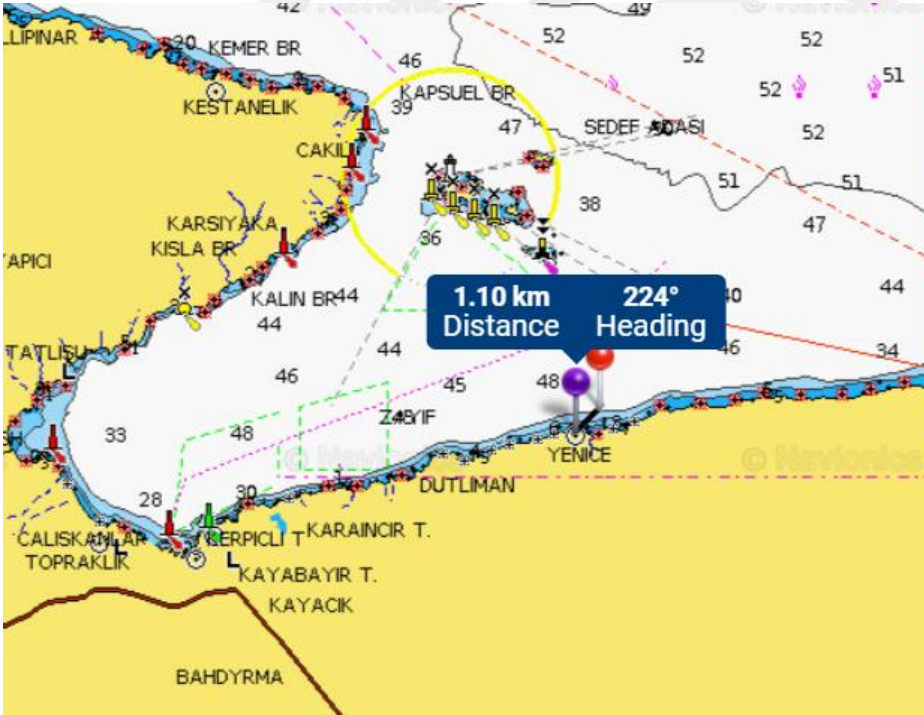


Şekil 21. Bandırma-Doğu bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)

Türbinlerin dağılımına göre kıyı şeridinde olan yaklaşık mesafe 0,8 ile 1,5 km, en yakın gemi yoluna olan mesafe yaklaşık 4 km ve aktif fay hattı ile fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 0,735 ve 18,71 km olarak ölçülmüştür.



Şekil 22. Bandırma-Doğu bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık (GPS Deniz Haritaları i-boating)



Şekil 23. Bandırma-Batı bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık (Naviaonics)

Su altı şebeke hattı bölgede henüz mevcut olmadığından en yakın yerleşim yerlerinden birisi olan Yenice kasabasına su altı şebeke hattı çekilebileceğiniz

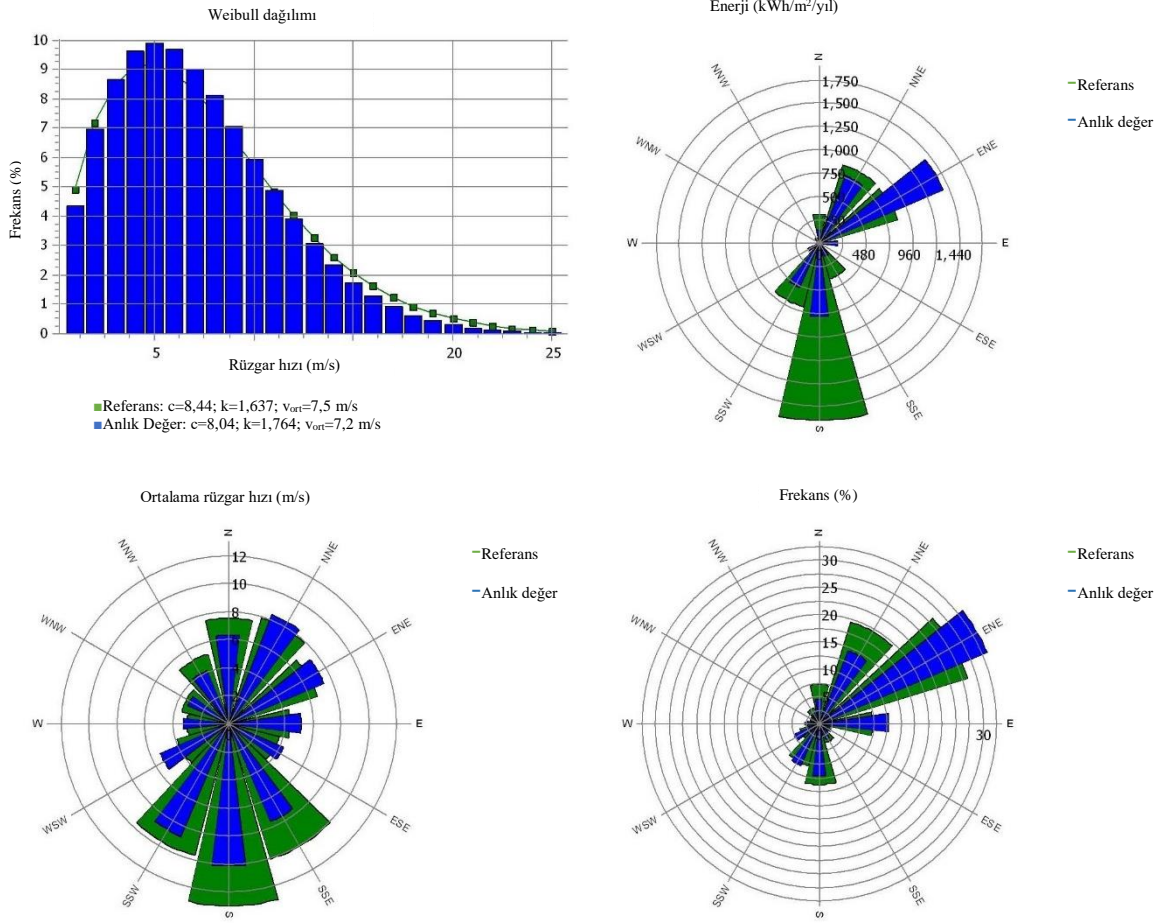
varsaydığımızda, hattın uzunluğu yaklaşık 1,10 km olarak tespit edilmiştir. Bandırma'nın doğu kesimi çalışmamızda WindPro tarafından alınan verilere göre ortalama rüzgar hızı 7,1 m/s olduğu görülmüştür. Global Wind Atlas'tan alınan veriler ile karşılaştırıldığında ortalama rüzgar hızı arasında yaklaşık olarak 1,31 m/s olan %12'lik bir fark olduğu tespit edilmiştir. Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I'e göre %44'lük bir kapasite faktörüne sahip olduğunu gösterirken, WindPro yazılımı taranan alanın kapasite faktörünü %35 olarak vermiştir. Bu tutarsızlıkların toplanan verilerin zamanlarının farkından kaynaklandığını öngörmekteyiz, aynı zamanda taranan alanın genişliğinin de bu farkı yarattığı tahmin edilmektedir. Çünkü Global Wind Atlas bize 3 km<sup>2</sup>'lik bir alanın verilerini vermektedir.

Tablo 11

Bandırma-Doğu Kesimi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

	Sonuca Göre Belirli Sonuçlar-10,0%
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	224.963,7
Sonuç- %10 [MWh/y]	202.467,4
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	233.010,9
Wake kaybı [%]	3,5
Kapasite faktörü [%]	35,0
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	20.246,7
Tam yükleme saatleri [saat/y]	3.068
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	7,6

Tablo 11, Bandırma-doğu kesiminin elektrik enerjisinin rüzgar yönünün (kWh/m<sup>2</sup>/yıl), ortalama rüzgar hızı (m/s) ve frekansı (%) ile nasıl ilişkili olduğunu göstermektedir. Şekil 24 rüzgar yönünü, Weibull dağılım fonksiyonu parametreleri, rüzgar hızını (m/s) ve ayrıca bölgedeki rüzgarların esme frekansını (%) göstermektedir.



Şekil 24. Rüzgar Veri Analizi – Bandırma-Doğu (WindPro)

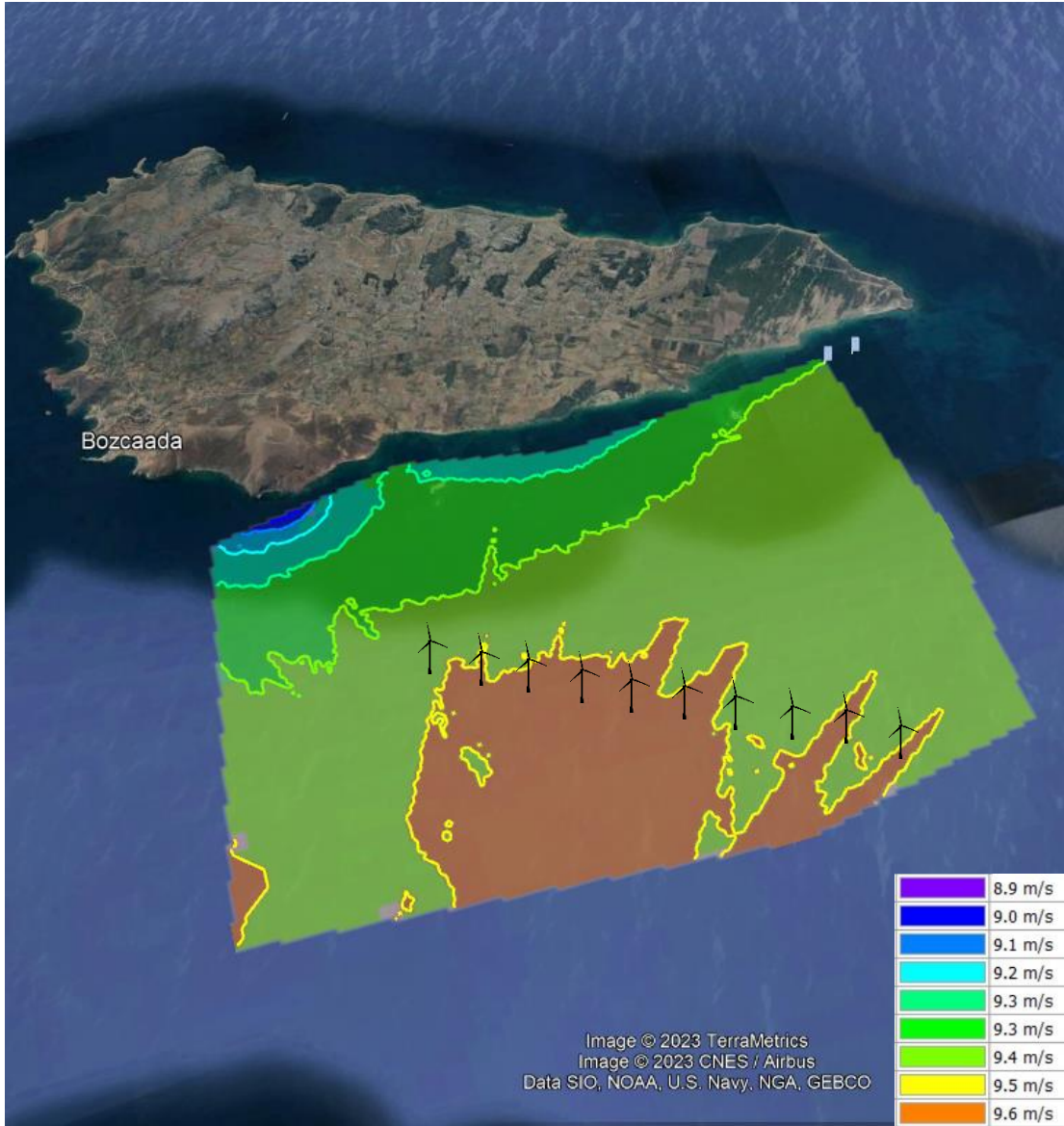
#### 4.4. Bozcaada Bölgesi

Bozcaada, Türkiye'de Marmara Bölgesi'nin güneyinde yer alan Çanakkale iline bağlı Ege Denizi'nde olup Türkiye'nin en batı noktalarından biri olan bir ilçedir ve bu çalışmada Bozcaada'nın kuzey ve güney kesimleri için araştırma yapılmıştır. Araştırma yapılan bölgeler Ege Denizinde ve sınır bir bölge konuma sahip olduğu için diğer çalışma alanlarına göre biraz daha politik ve stratejik bir konuma sahiptir. Ayrıca Bozcaada turistik bir konumda olduğu için kurulması öngörülen rüzgar türbinlerinin doğal yapıya ve halkı ses ve görüntü olarak rahatsız etmeyecek bir alanla kurulmasına dikkat etmek gerekmektedir.



#### 4.4.1. Bozcaada Bölgesi- Kuzey Kesimi

Bozcaada ilçesinin kuzey kesimine yönelik çalışmamız kapsamında istenilen kriterlere uygun olarak açık deniz rüzgar türbini sahaları için taranan alan yaklaşık 50,2 km<sup>2</sup>'dir. Bölgenin açık deniz rüzgar potansiyellerini incelediğimizde; açık deniz rüzgar türbinleri için Bozcaada'nın kuzey bölgesinde su derinliği 5 ile 26 m arasında değişmektedir.



Şekil 25. Bozcaada-kuzey bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)



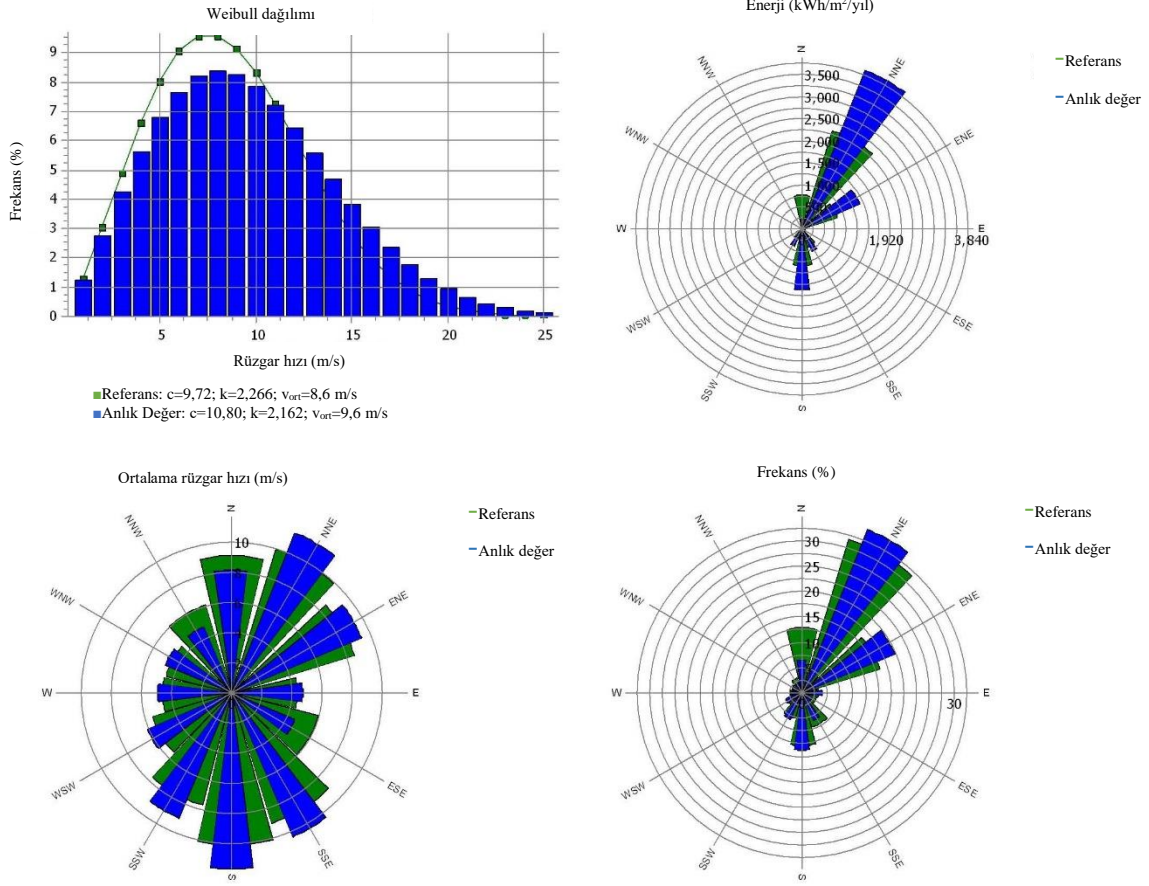
Türbinlerin dağılımına göre kıyı şeridinde olan yaklaşık mesafe 3,45 ile 5,56 km, en yakın gemi yoluna olan mesafe yaklaşık 5,45 km, ve aktif fay hattı ile fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 1,40 ve 1,88 km olarak ölçülmüştür. Su altı şebeke hattına olan uzaklığın 4,07 km olduğu tespit edilmiştir. Bölgenin uygunluğunun araştırılmasıyla ilgili olarak saha verileri WindPro yazılımından alınmış olup Tablo 12’de listelenmiştir.

Tablo 12

Bozcaada-Kuzey Kesimi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

	Sonuca Göre Belirli Sonuçlar-10,0%
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	322.981,8
Sonuç- %10 [MWh/y]	290.683,6
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	325.132,1
Wake kaybı [%]	0,7
Kapasite faktörü [%]	50,2
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	29.068,4
Tam yükleme saatleri [saat/y]	4.404
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	9,5

Global Wind Atlası'ndaki verilere göre bölgenin IEC Sınıf I'e göre kapasite faktörü %56, WindPro yazılımı ise %50,2'yi vermektedir. Farkın, taranan alanın büyüklüğünün bir sonucu olarak ortaya çıktığı varsayılmaktadır. Tablo 12'ye göre Bozcaada'nın kuzey bölgesi açık deniz rüzgar santrali kurulumu için uygun görülmüştür. Şekil 28'de WindPRO yazılımı kullanılarak Bozcaada-Kuzey kesimi için hakim rüzgar yönü, ortalama rüzgar hızı (m/s), enerji artışı (kWh/m<sup>2</sup>/yıl), frekans (%), Weibull dağılım fonksiyon grafiği ile ilgili görseller ve değerler elde edilmiştir. Bölgenin hakim rüzgar yönünün KKD rüzgar yönü ile sınırlandırıldığı ve hakim rüzgar verilerinin Global Wind Atlası'ndaki verilerle örtüştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve 0,26 m/s ile % 2,22'lik bir fark gözlemlenmiştir, bu da verilerin tutarlı olduğunu göstermiştir.

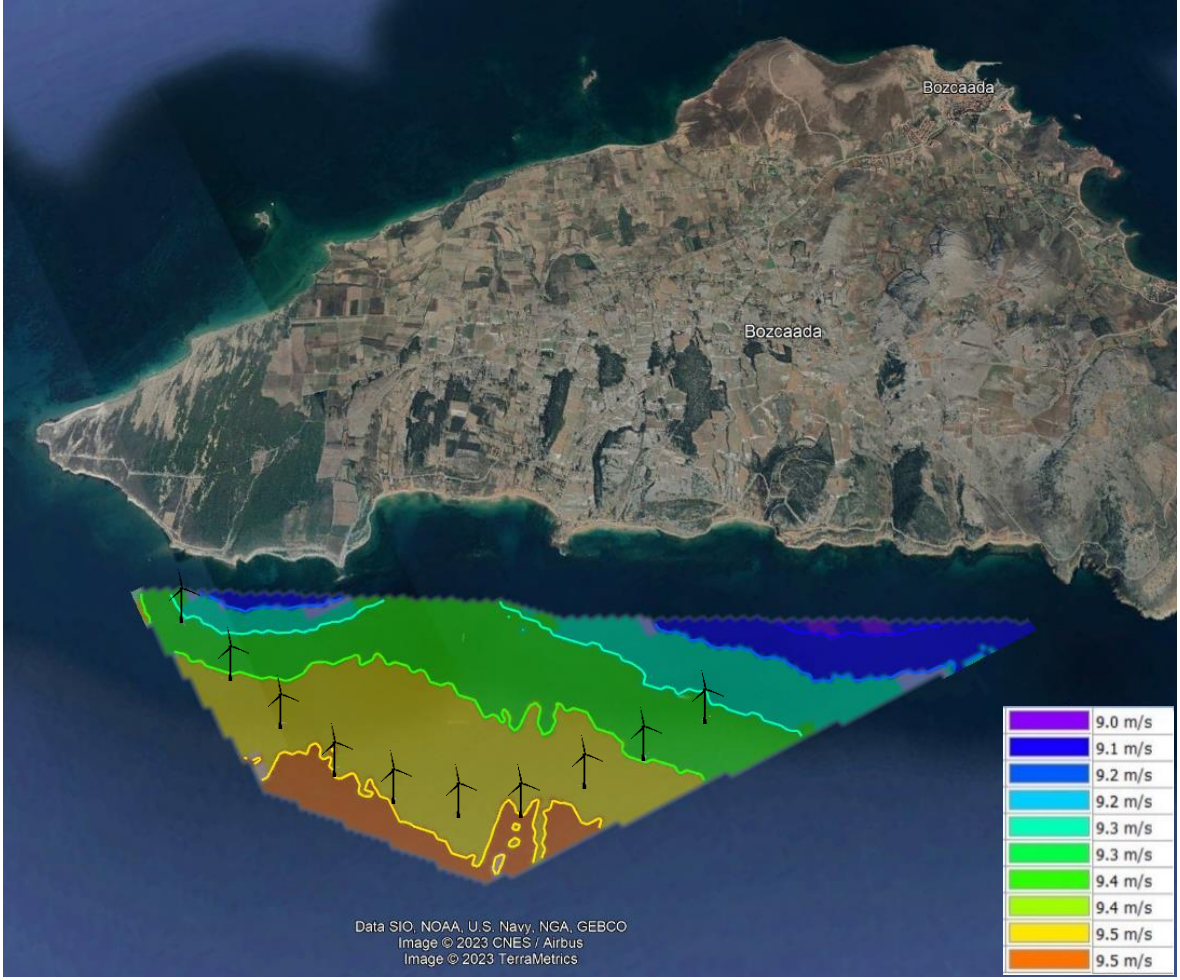


Şekil 28. Rüzgar Veri Analizi – Bozcaada-Kuzey (WindPro)

#### 4.4.2. Bozcaada Bölgesi- Güney Kesimi

Bozcaada ilçesinin güney kesimine yönelik çalışmamız kapsamında istenilen kriterlere uygun olarak açık deniz rüzgar türbini sahaları için taranan alan yaklaşık 24,5 km<sup>2</sup>'dir. Bölgenin açık deniz rüzgar potansiyellerini incelediğimizde; açık deniz rüzgar türbinleri için Bozcaada'nın güney bölgesinde su derinliği 5 ile 25 m arasında değişmektedir. Türbinlerin dağılımına göre kıyı şeridinde olan yaklaşık mesafe 0,6 ile 2,6 km, en yakın gemi yoluna olan mesafe yaklaşık 8,25 km, ve aktif fay hattı ile fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 18,40 ve 3,63 km olarak ölçülmüştür.

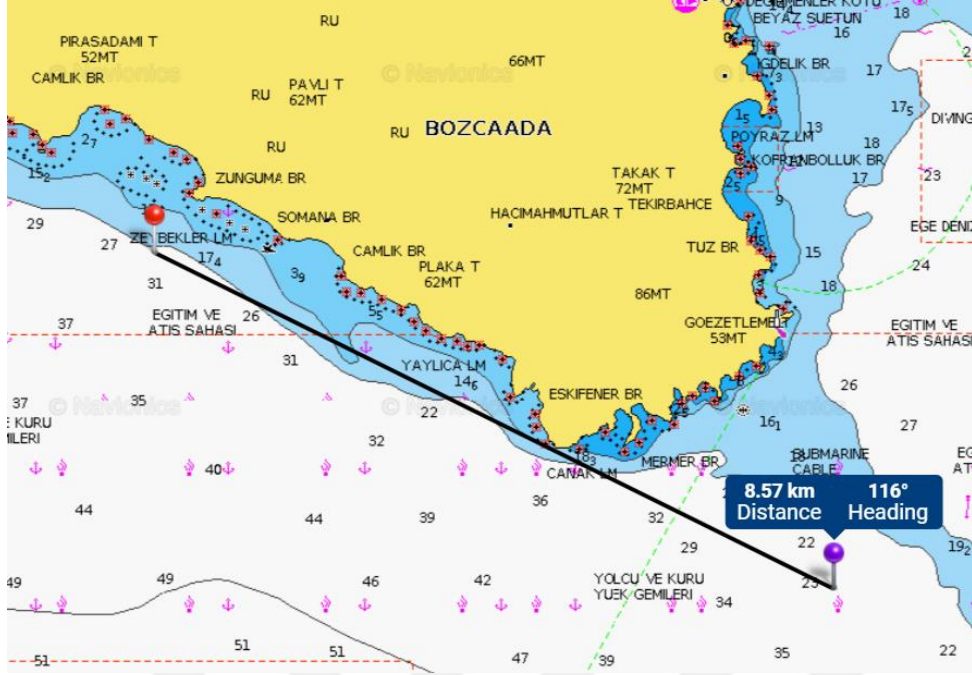




Şekil 29. Bozcaada-Güney bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)



Şekil 30. Bozcaada-Güney bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık (GPS Deniz Haritaları i-boating)



Şekil 31. Bozcaada-Güney bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık (Naviaonics)

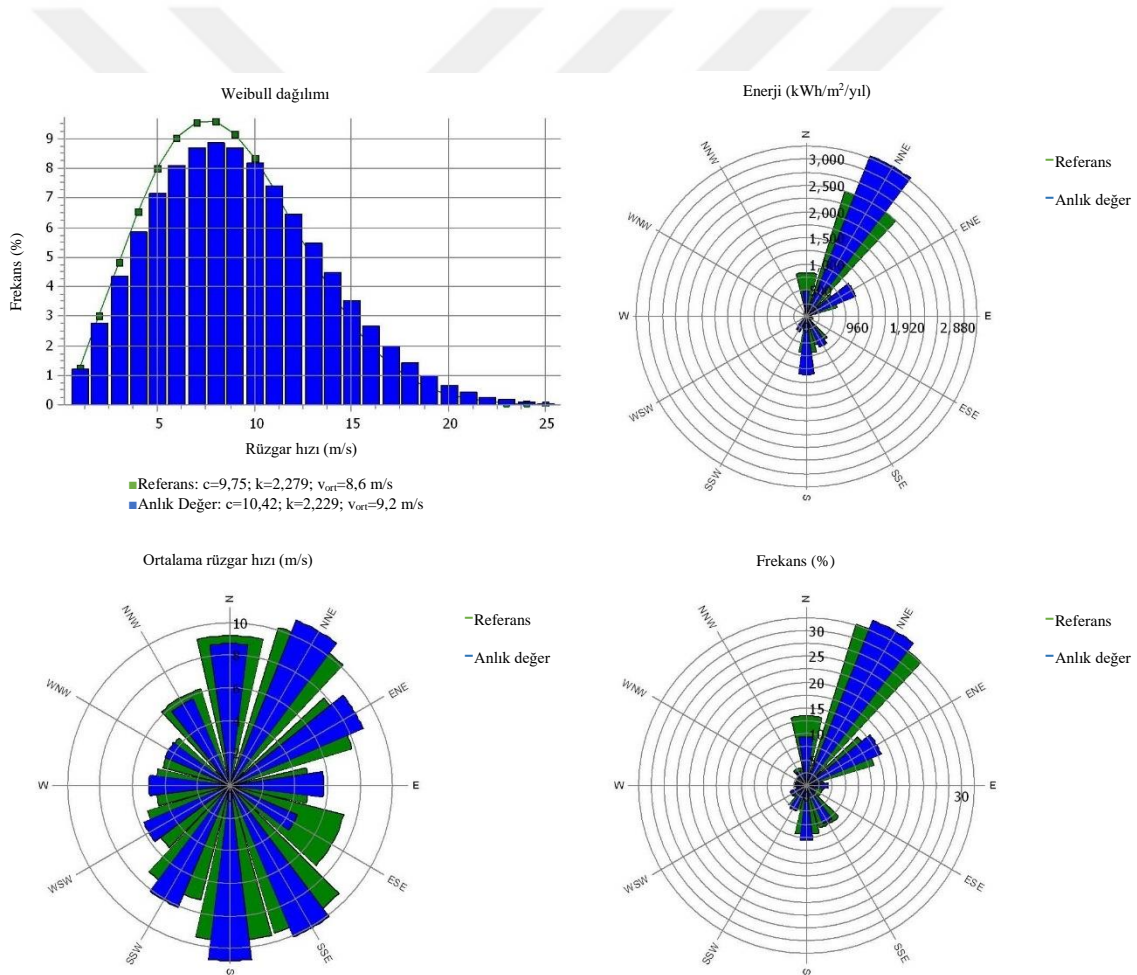
Su altı şebeke hattına olan uzaklığın 8,57 km olduğu tespit edilmiştir. Bölgenin uygunluğunun araştırılmasıyla ilgili olarak saha verileri WindPro yazılımından alınmış olup Tablo 13'te gösterilmiştir.

Tablo 13

Bozcaada-Güney Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

Sonuca Göre Belirli Sonuçlar-10,0%	
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	318.373,9
Sonuç- %10 [MWh/y]	286.536,5
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	324.889,4
Wake kaybı [%]	2,0
Kapasite faktörü [%]	49,5
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	28.653,7
Tam yükleme saatleri [saat/y]	4.341
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	9,4

Global Wind Atlas'daki verilere göre bölgenin IEC Sınıf I'e göre kapasite faktörü %55, WindPro yazılımı ise %49,5 olarak gözlemlenmiştir, % 10'luk farkın taranan alanın büyüklüğünün bir sonucu olduğu ve türbin dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 32'de WindPRO yazılımı kullanılarak Bozcaada-Güney için hakim rüzgar yönü, ortalama rüzgar hızı (m/s), enerji artışı (kWh/m<sup>2</sup>/yıl), frekans (%), Weibull dağılım fonksiyon grafiği ile ilgili görseller oluşturulmuştur. Bölgenin KKD rüzgar yönü ile sınırlandırıldığı ve hakim rüzgar verilerinin Global Wind Atlas'daki verilerle örtüştüğü tespit edilmiştir. Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve 0,16 m/s ile % 0,64'lük bir fark gözlemlenmiştir, bu da verilerin tutarlı olduğunu göstermektedir.

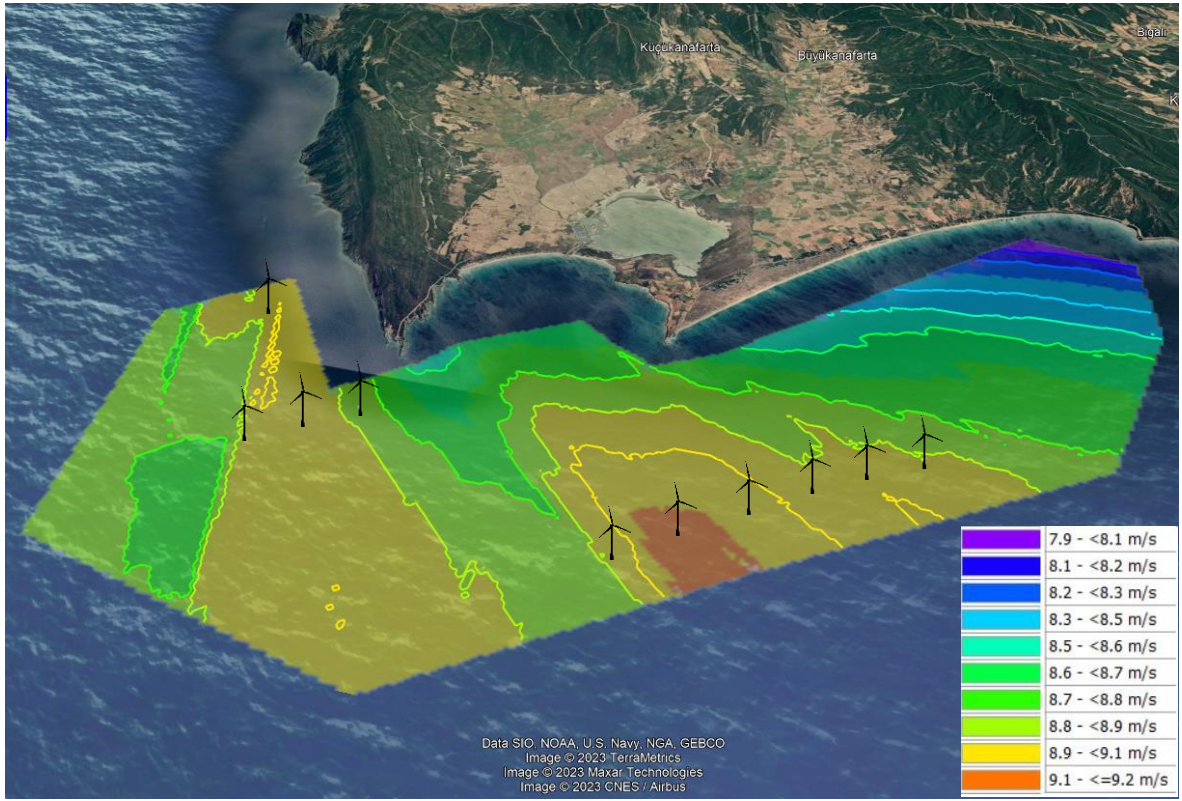


Şekil 32. Rüzgar Veri Analizi – Bozcaada-Güney (WindPro)



#### 4.5. Eceabat Bölgesi

Eceabat, Türkiye'nin kuzeybatısında, Çanakkale iline bağlı bir ilçedir ve kıyı kesimleri Ege ve Marmara Denizine uzanmaktadır. Bu çalışmada Eceabat'ın Ege denizine kıyısı olan bir bölge araştırılmıştır. Bölge deniz üstü rüzgar türbinleri için yaklaşık 118,4 km<sup>2</sup>'lik bir alan taranmıştır, taranan bu alanın büyük olmasının sebebi bölgenin coğrafik ve topografik konumundan kaynaklanmaktadır.

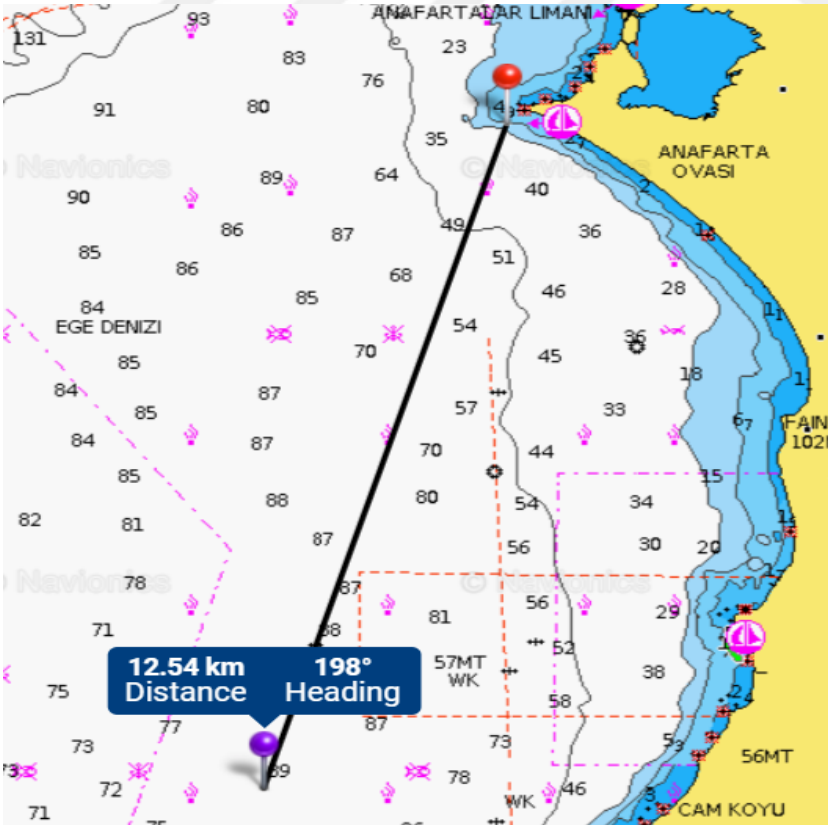


Şekil 33. Eceabat bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)

Bölgenin açık deniz rüzgar potansiyellerini incelediğimizde; açık deniz rüzgar türbinleri için değerler türbin dağılımına göre Eceabat bölgesinde; su derinliği 15 ile 80 m arasında değişmektedir, türbinlerin dağılımına göre kıyı şeridinde olan yaklaşık mesafesi 1,75 ile 3,75 km, en yakın gemi yoluna olan mesafe yaklaşık 10,60 km ve aktif fay hattı ile fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 11 ve 36,89 km olarak ölçülmüştür.



Şekil 34. Eceabat bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık (GPS Deniz Haritaları i-boating)



Şekil 35. Eceabat bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık (Naviaonics)

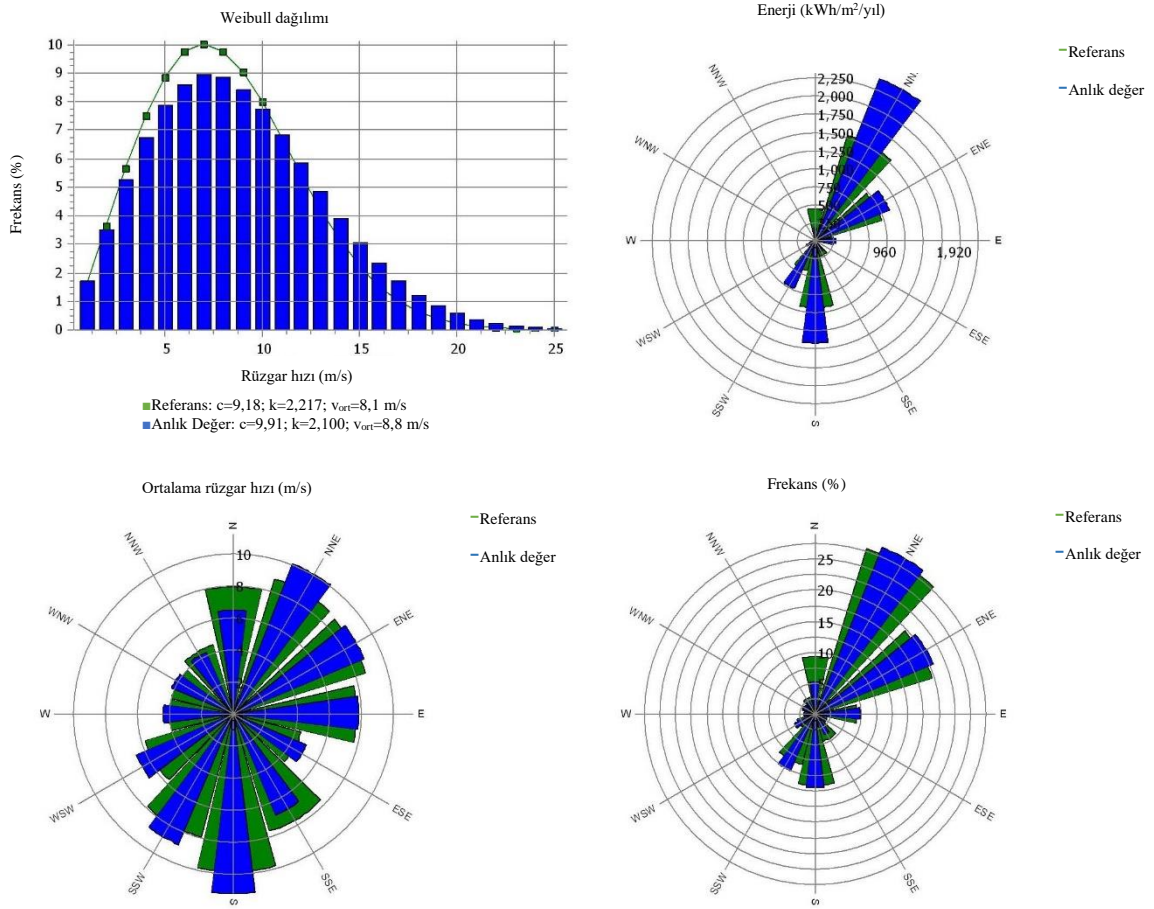
Eceabat bölgesindeki çalışma alanının su altı şebeke hattına olan uzaklığın yaklaşık olarak 12,54 km olduğu tespit edilmiştir. Bölgenin uygunluğunun araştırılmasıyla ilgili olarak saha verileri WindPro yazılımından alınmış olup Tablo 14'te listelenmiştir.

Tablo 14

Eceabat Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

Sonuca Göre 10,0% Hata Paylı Sonuçlar	
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	298.647,3
Sonuç- %10 [MWh/y]	268.782,6
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	301.834,3
Wake kaybı [%]	1,1
Kapasite faktörü [%]	46,5
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	26.878,3
Tam yükleme saatleri [saat/y]	4.072
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	9,0

Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I'e göre %50'lik bir kapasite faktörüne sahip olduğunu göstermektedir. “WindPro” yazılımına göre yaklaşık %3,5'luk bir fark olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin çalışma alanının geniş tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve 0,39 m/s ile % 4,3'lük bir fark gözlemlenmiştir. Bunlarda gösteriyor ki elde edilen veriler tutarlıdır.



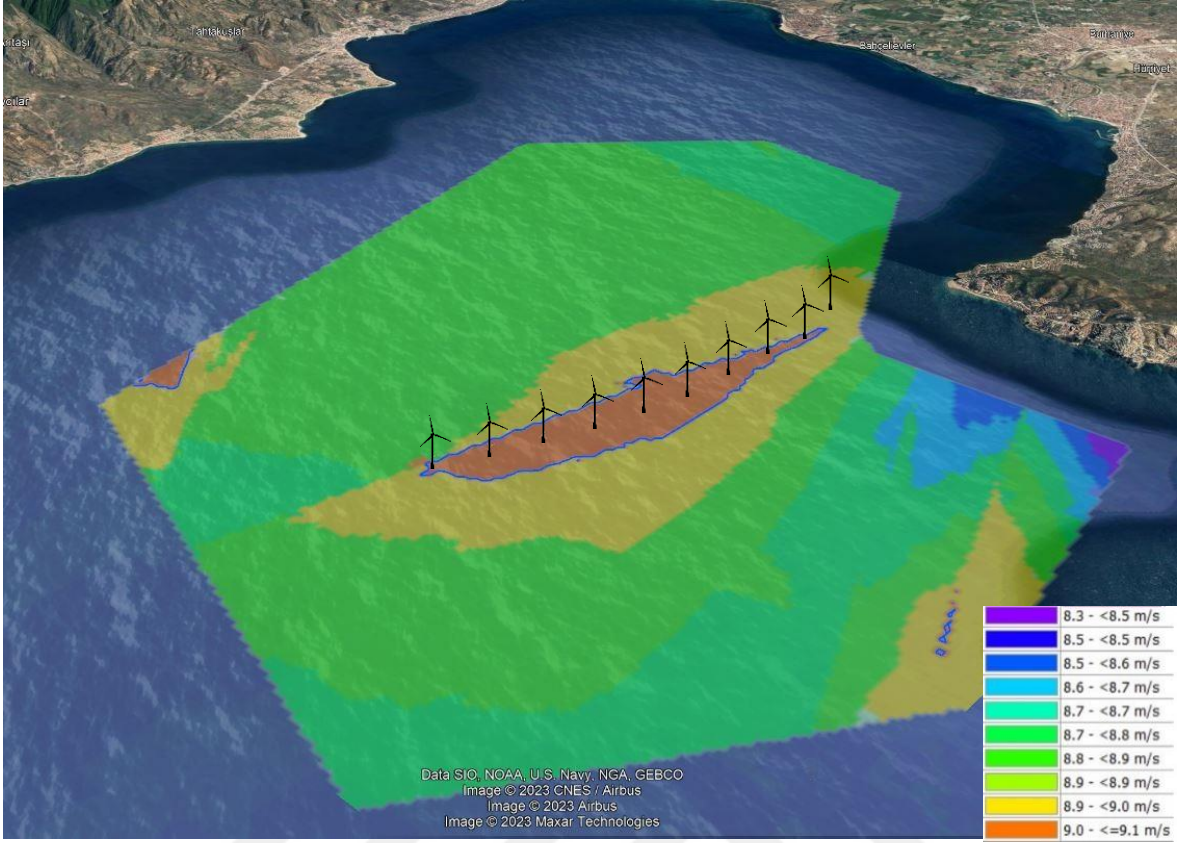
Şekil 36. Rüzgar Veri Analizi – Eceabat (WindPro)

#### 4.6. Edremit Körfezi Bölgesi

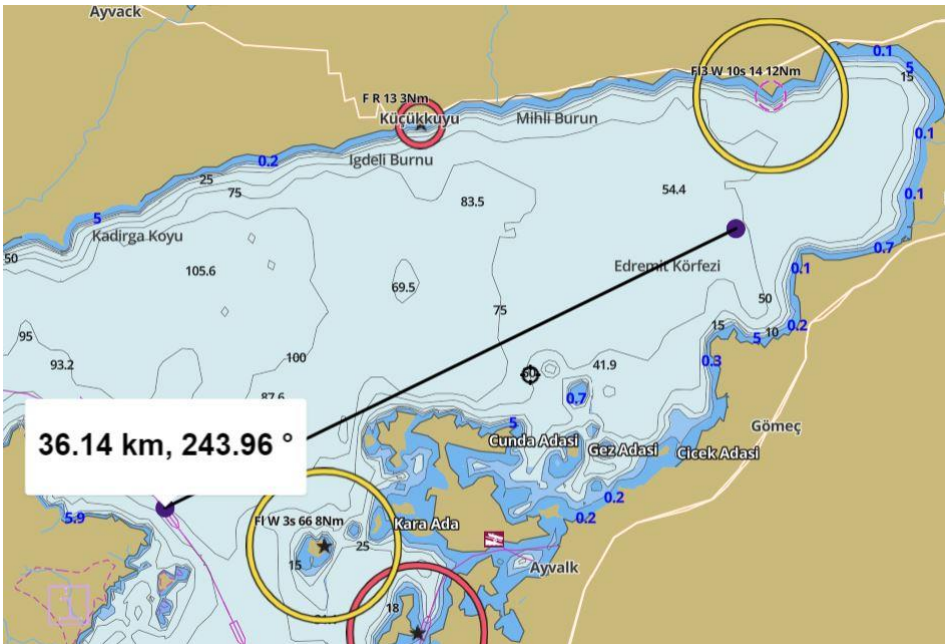
Edremit Körfezi, Türkiye'de Marmara Bölgesi'nin güneyinde yer alan Balıkesir iline bağlı Edremit ilçesinin Ege denizi kıyısında yer alan kendine has doğal bir körfездir. Çalışma alanı Şekil 37'de gösterildiği gibi Burhaniye ve Edremit'i kapsayan bir alandır, toplamda 119,7 km<sup>2</sup>'lik bir alan taranmıştır. Türbinler, birbirine olan etkilerinin azaltılması için çizgisel olarak dizilmişlerdir.

Araştırma bölgesinin açık deniz rüzgar türbini potansiyeli kurlumu için istenen kriterleri incelediğimizde değerler türbin dağılımına göre yaklaşık olarak; su derinliği 15 ile 55 m arasında değişkenlik göstermektedir. Kıyıya olan uzaklık 1,50 ile 6,54 km değişkenlik göstermekte ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık 35,04 km olarak tespit edilmiştir.





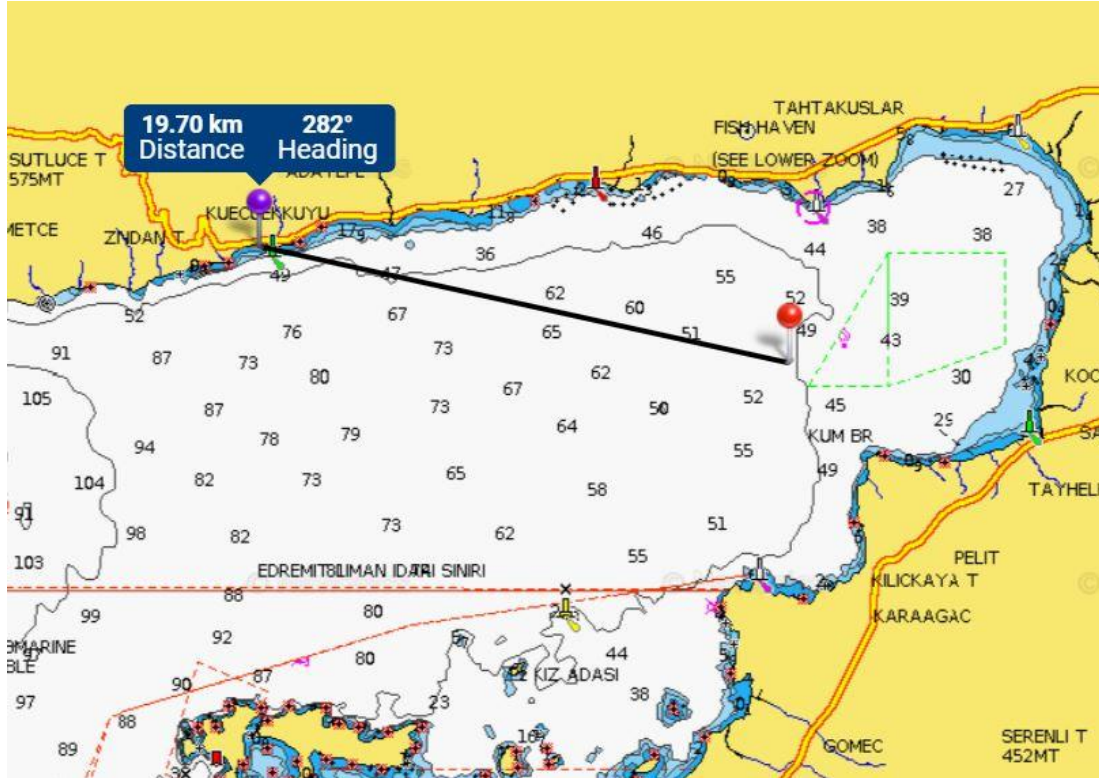
Şekil 37. Edremit Körfezi bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)



Şekil 38. Edremit Körfezi bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık (GPS Deniz Haritaları i-boating)



Bölgeye en yakın su altı şebeke hattı Çanakkale iline bağlı olan Küçükkuyu kasabasından geçmektedir, aradaki uzaklık yaklaşık olarak 19,70 km uzunluğundadır. Bu sebeple karaya olan en yakın uzaklık dikkate alınabilir, ancak yeni bir enerji dağıtım santrali kurulacağı için maliyetler karşılaştırılmamıştır. Bu çalışmada su altı şebeke hattına olan uzaklık alınmıştır.



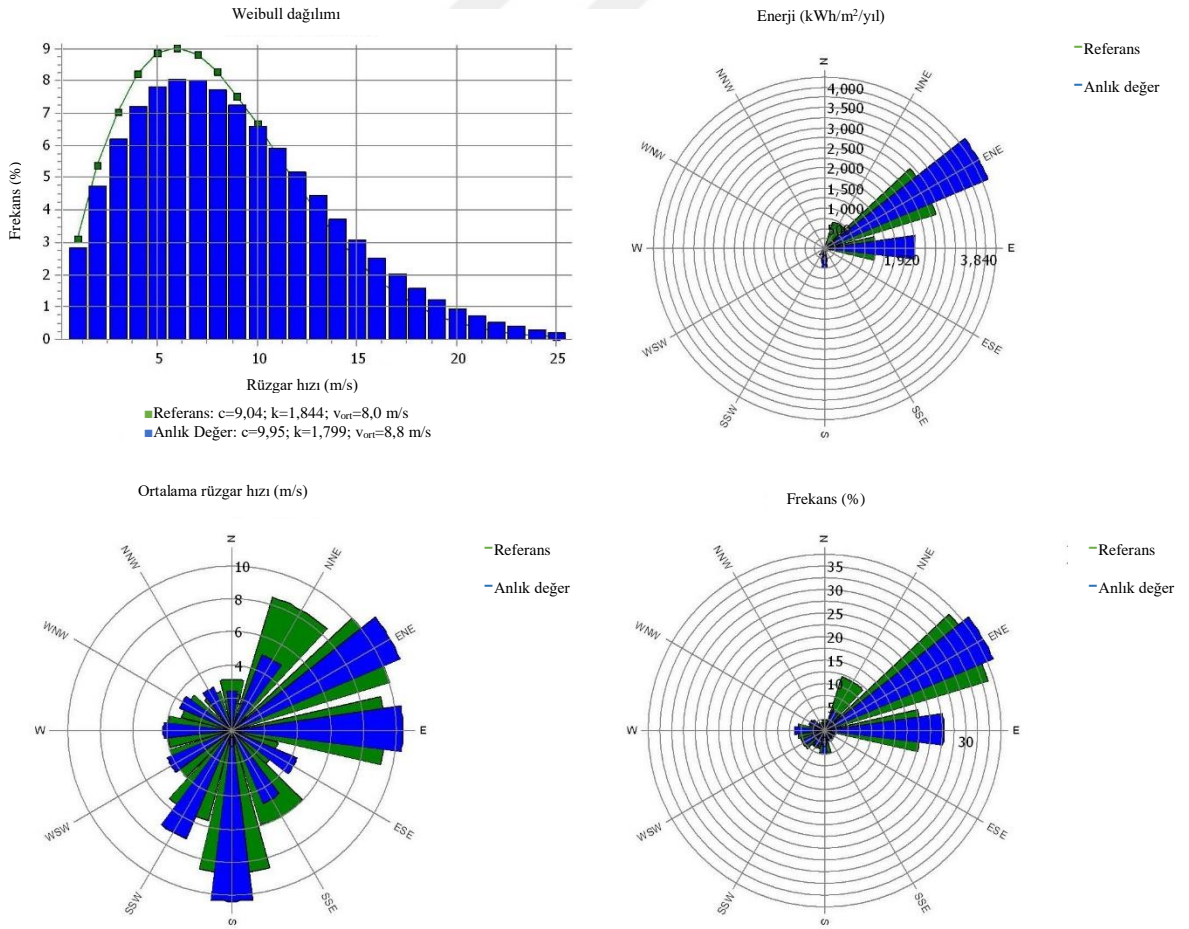
Şekil 39. Edremit Körfezi bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık (Naviaonics)

Bölgenin uygunluğunun araştırılmasıyla ilgili olarak saha verileri WindPro yazılımından alınmış olup Tablo 15’te gösterilmiştir. Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I’e göre %49’luk bir kapasite faktörüne sahip olduğunu göstermektedir. “WindPro” yazılımına göre %4,7’lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin çalışma alanının geniş bir alanı kapsadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve 0,1 m/s’lik bir fark gözlemlenmiştir. Bunlarda göstermektedir ki elde edilen veriler ile tutarlılığın çok iyi olduğunu göstermektedir.

Tablo 15

Edremit Körfezi Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

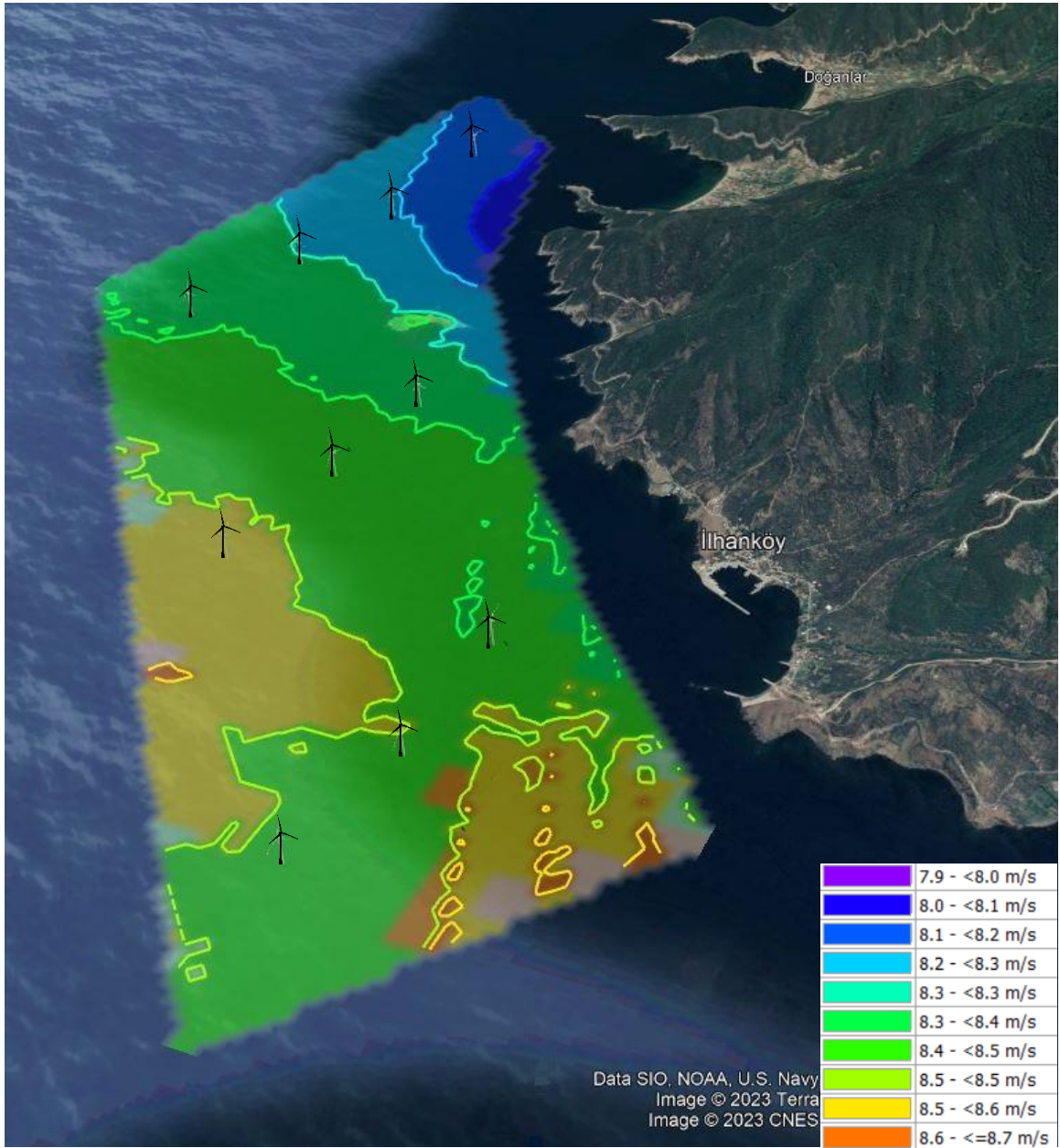
Sonuca Göre Belirli Sonuçlar-10,0%	
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	284.908,7
Sonuç- %10 [MWh/y]	256.417,8
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	300.000,6
Wake kaybı [%]	5,0
Kapasite faktörü [%]	44,3
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	25.641,8
Tam yükleme saatleri [saat/y]	3.885
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	9,0



Şekil 40. Rüzgar Veri Analizi – Edremit Körfezi (WindPro)

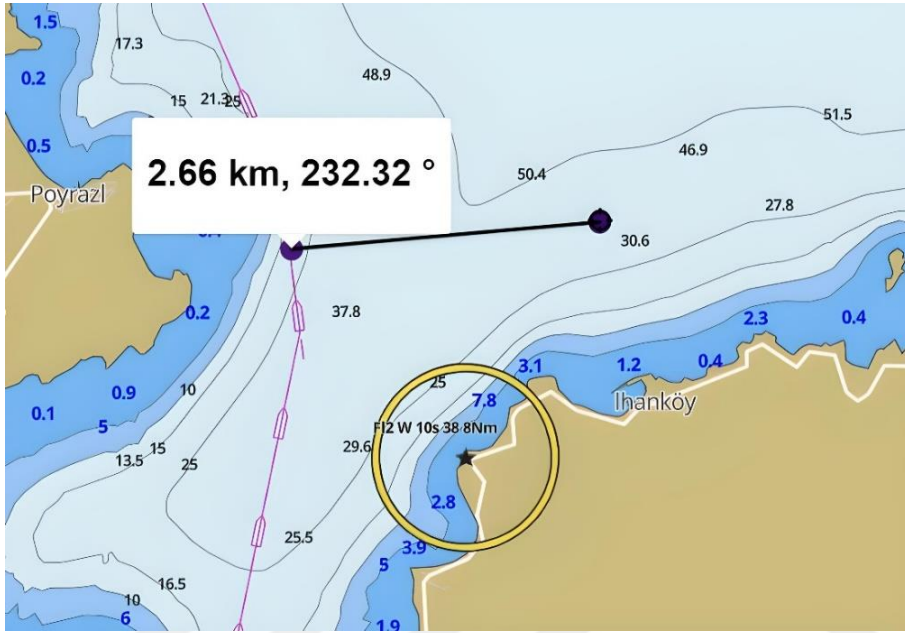
#### 4.7. Erdek Bölgesi

Erdek, Türkiye'de Marmara Bölgesi'nin güneyinde yer alan Balıkesir iline bağlı bir ilçedir, Kapıdağ yarımadasında yer almaktadır ve kendine ait doğal bir körfeze sahiptir. Bandırma ilçesi ile birbirine çok yakındır bu sebeple çalışma alanı biraz daha uzak tutulmuştur. Araştırma yapılan alan Marmara Denizinde olduğu için diğer denizlerimizde kurulması öngörülen rüzgar türbinleri için biraz daha korunaklı bir yapıya sahiptir.



Şekil 41. Erdek bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)

Çalışma alanı İlhan köy kasabasına yakın olduğu için liman hizmetleri için bir avantaja sahiptir, Karadağ yarım adasının kuzeydoğusu tarafında 27 km<sup>2</sup>'lik bir alan taranmıştır. Türbin dağılımları birbirlerine olan etkileri azaltmak için Şekil 41'deki gibi konumlandırılmıştır.



Şekil 42. Erdek bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık (GPS Deniz Haritaları i-boating)

Araştırma bölgesinin açık deniz rüzgar türbini potansiyeli kurlumu için istenen kriterler incelendiğinde; değerler türbin dağılımına göre yaklaşık olarak, su derinliği 15 ile 50 m arasında değişkenlik göstermektedir. Kıyıya olan uzaklık 1,04 ile 3 km arası değişkenlik göstermekte ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık 2,66 km olarak tespit edilmiştir. Su altı şebeke hattına yakın olması ayrı bir avantaj olarak görülebilir, çalışma alanına su altı şebeke hattının yaklaşık uzaklığı 1,27 km olarak gözlemlenmiştir. Aktif fay hattı ile fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 23,19 ve 9,34 km olarak ölçülmüştür. Bölgenin uygunluğunun araştırılmasıyla ilgili olarak saha verileri WindPro yazılımından alınmış olup Tablo 16'da gösterilmiştir. Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I'e göre %47'luk bir kapasite faktörüne sahip olduğunu göstermektedir. "WindPro" yazılımına göre %5,6'lık bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin çalışma alanının geniş bir alanı kapsadığından kaynaklandığı düşünülmektedir.





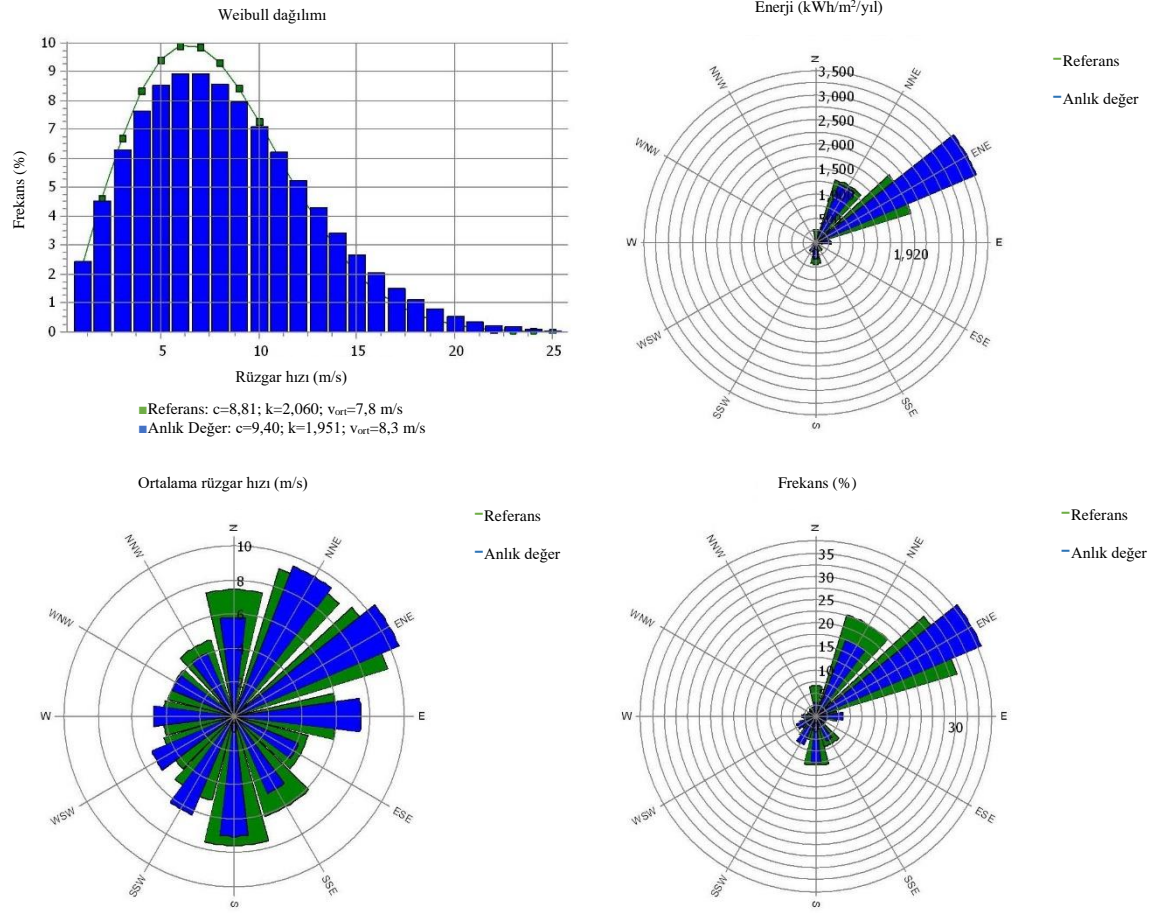
Şekil 43. Erdek bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık (Naviaonics)

Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve 0,05 m/s ile % 0,59'luk bir fark gözlemlenmiş olup hakim rüzgar yönü KKD olarak tespit edilmiştir. Bunlarda göstermektedir ki elde edilen veriler çok iyi derecede örtüşmektedir.

Tablo 16

Erdek Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

Sonuca Göre 10,0% Hata Paylı Sonuçlar	
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	265.882,8
Sonuç- %10 [MWh/y]	239.294,5
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	276.817,6
Wake kaybı [%]	4,0
Kapasite faktörü [%]	41,4
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	23.929,4
Tam yükleme saatleri [saat/y]	3.626
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	8,4



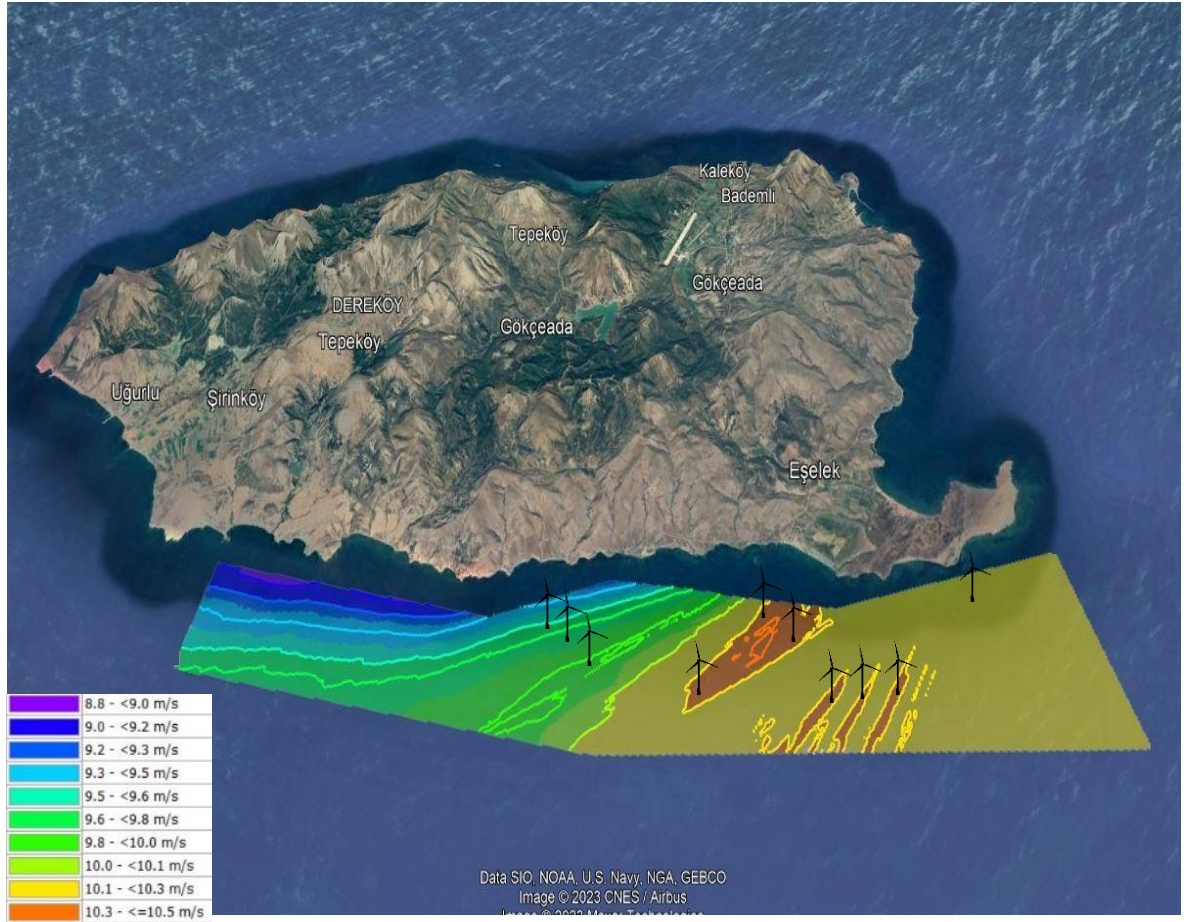
Şekil 44. Rüzgar Veri Analizi – Erdek (WindPro)

#### 4.8. Gökçeada Bölgesi

Gökçeada, Türkiye'de Marmara Bölgesinde yer alan Çanakkale iline bağlı bir ilçedir. Türkiye'nin en batısı ve en büyük adası olması özelliğine sahiptir. Ege Denizi'nin kuzeyinde yer almakta ve bu çalışmada Gökçeada'nın kuzey ve güney kesimleri için araştırma yapılmıştır. Araştırma yapılan bölgeler Ege Denizinde ve sınır bir bölge konuma sahip olduğu için diğer diğer çalışma alanlarına göre biraz daha politik ve stratejik bir konuma sahiptir. Ayrıca Gökçeada'da kurulması öngörülen rüzgar türbinlerinin turistik bir konum olduğu için doğal yapıya ve ses ile görüntü olarak rahatsız etmeyecek bir alanla kurulmasına özen gösterilmesi gerekmektedir.

#### 4.8.1. Gökçeada Bölgesi- Güney Kesimi

Gökçeada ilçesinin güney kesimi için çalışmamız kapsamında istenilen kriterlere uygun olarak açık deniz rüzgar türbini sahaları için taranan alan yaklaşık 227,1 km<sup>2</sup>'dir. Bölgenin açık deniz rüzgar potansiyellerini incelediğimizde; açık deniz rüzgar türbinleri için Gökçeada'nın güney bölgesinde su derinliği 5 ile 50 m arasında değişmektedir.



Şekil 45. Gökçeada-Güney bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)

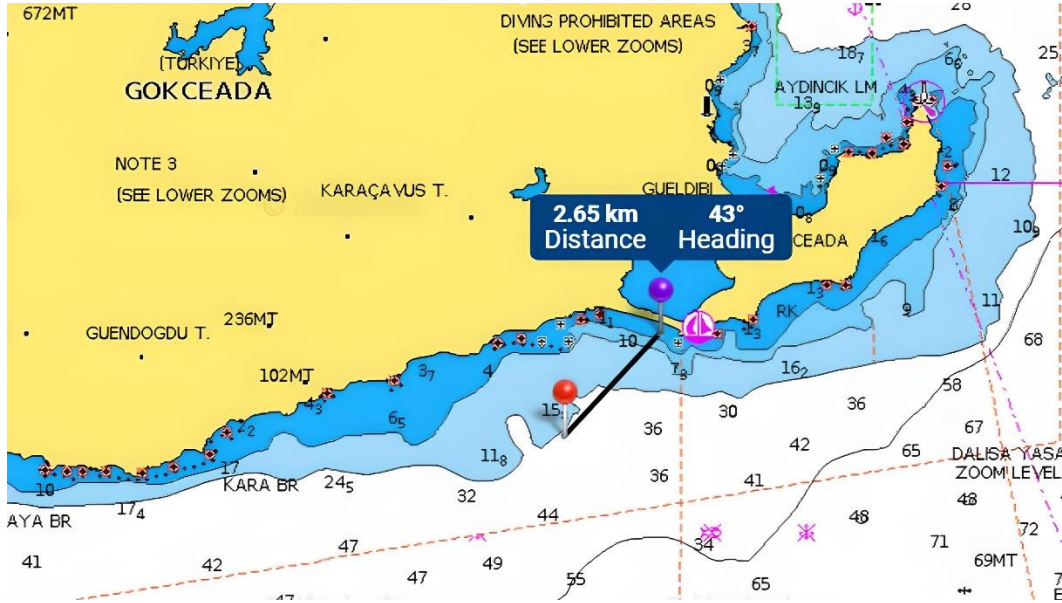
Türbinlerin dağılımına göre kıyı şeridinde olan yaklaşık uzaklık 2,22 ile 4,23 km, en yakın gemi yoluna olan uzaklık yaklaşık 15,30 km ve aktif fay hattı ile fay hattı arasındaki uzaklıklar sırasıyla 27,65 ve 46,57 km olarak ölçülmüştür.





Şekil 46. Gökçeada-Güney bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık (GPS Deniz Haritaları i-boating)

Su altı şebeke hattına olan uzaklığın 8,57 km olduğu tespit edilmiştir. Bölgenin uygunluğunun araştırılmasıyla ilgili olarak saha verileri WindPro yazılımından alınmış olup Tablo 17'de gösterilmiştir.



Şekil 47. Gökçeada-Güney bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık (Naviaonics)

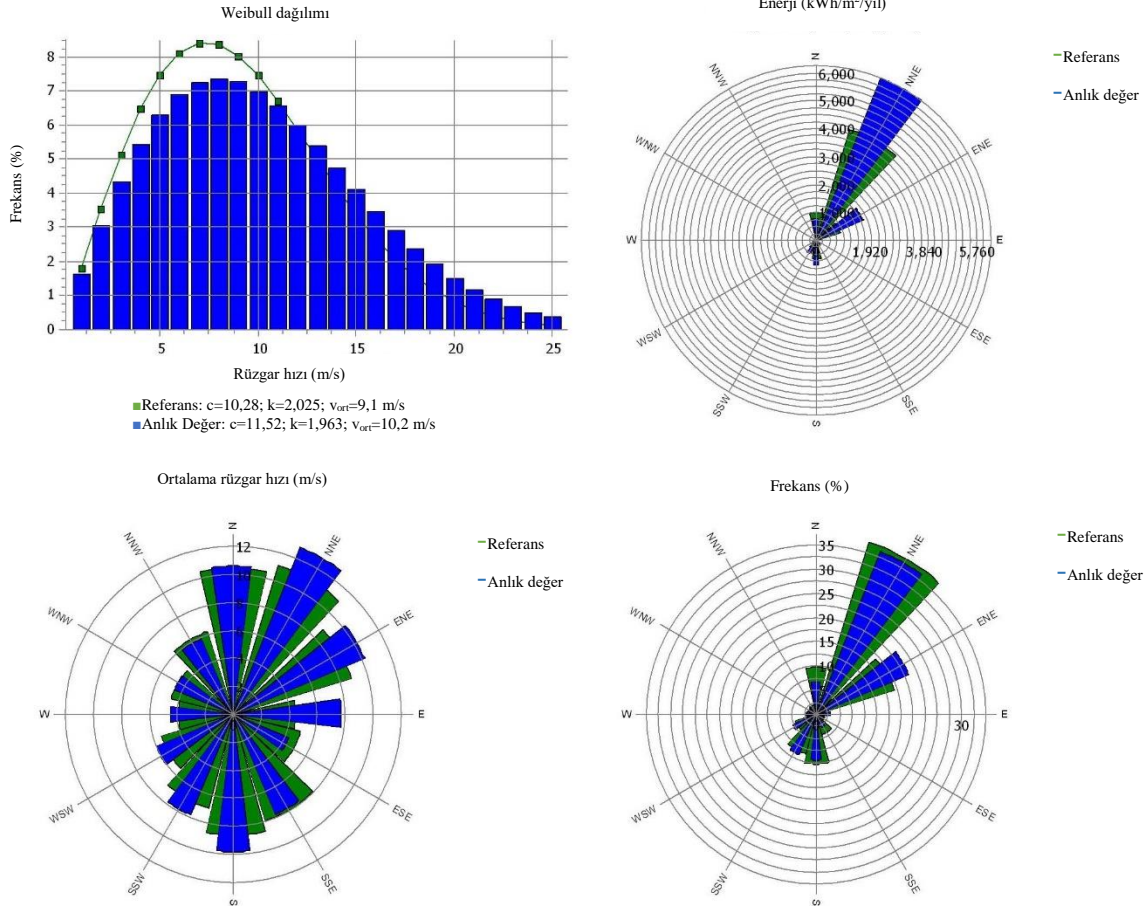


Tablo 17

Gökçeada-Güney Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

Sonuca Göre 10% Hata Paylı Sonuçlar	
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	333.249,0
Sonuç- %10 [MWh/y]	299.924,1
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	335.474,2
Wake kaybı [%]	0,7
Kapasite faktörü [%]	51,8
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	29.992,4
Tam yükleme saatleri [saat/y]	4.544
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	10,2

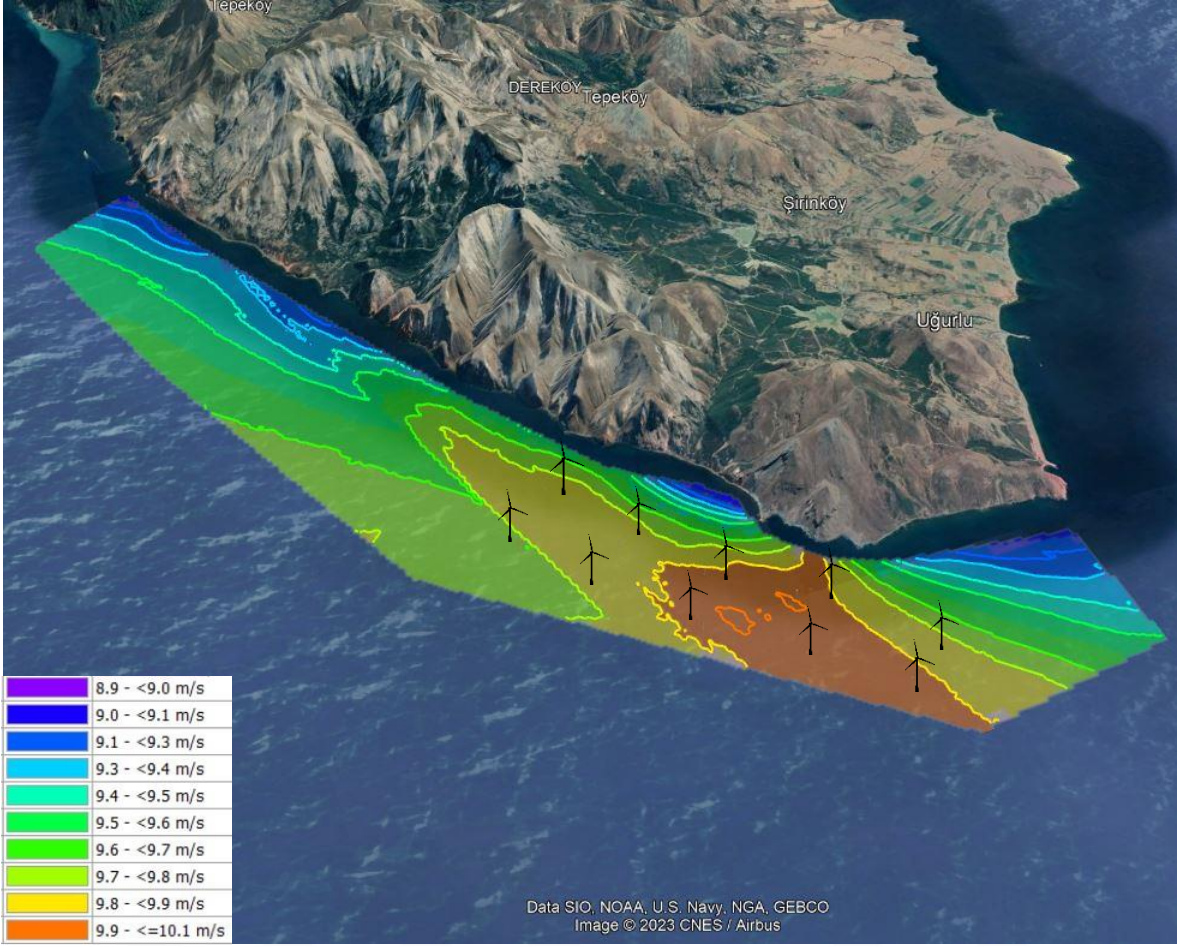
Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I'e göre %50'lik bir kapasite faktörüne sahip olduğunu göstermektedir. “WindPro” yazılımına göre %3,6'lık bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin çalışma alanının geniş bir alanı kapsadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Genel olarak çalışma alanı incelendiğinde alınan verilerin tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve 1,37 m/s ile %12,9 bir fark gözlemlenmiş olup hakim rüzgar yönü KKD olarak tespit edilmiştir. Ortalama hızın bu küçük farkının taranan alanın büyüklüğünden kaynaklandığı düşünülmektedir.



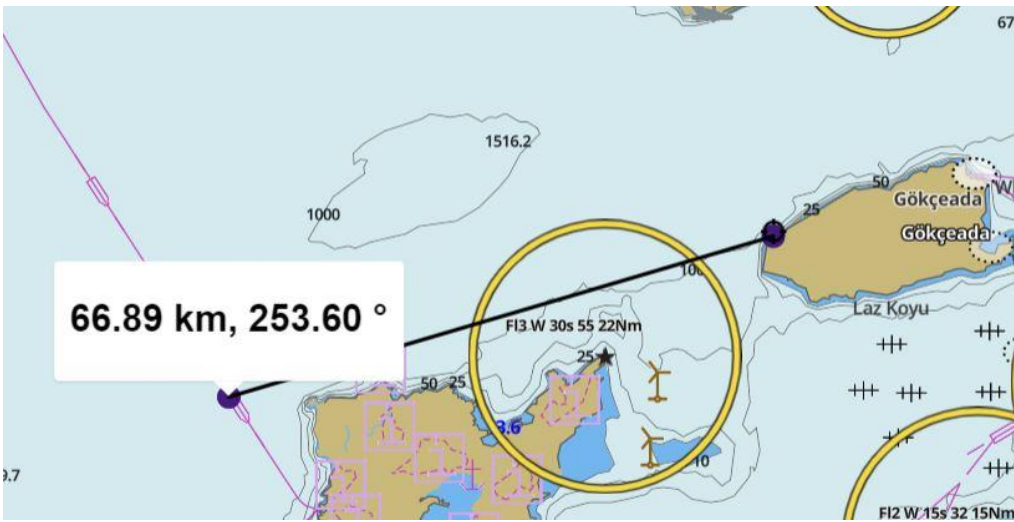
Şekil 48. Rüzgar Veri Analizi – Gökçeada Güney (WindPro)

#### 4.8.2. Gökçeada bölgesi- Kuzey Kesimi

Gökçeada ilçesinin kuzey kesimi için çalışmamız kapsamında istenilen kriterlere uygun olarak açık deniz rüzgar türbini sahaları için taranan alan yaklaşık 151,2 km<sup>2</sup>'dir. Bölgenin açık deniz rüzgar potansiyellerini incelediğimizde; açık deniz rüzgar türbinleri için Gökçeada'nın güney bölgesinde su derinliği 5 ile 50 m arasında değişmektedir.

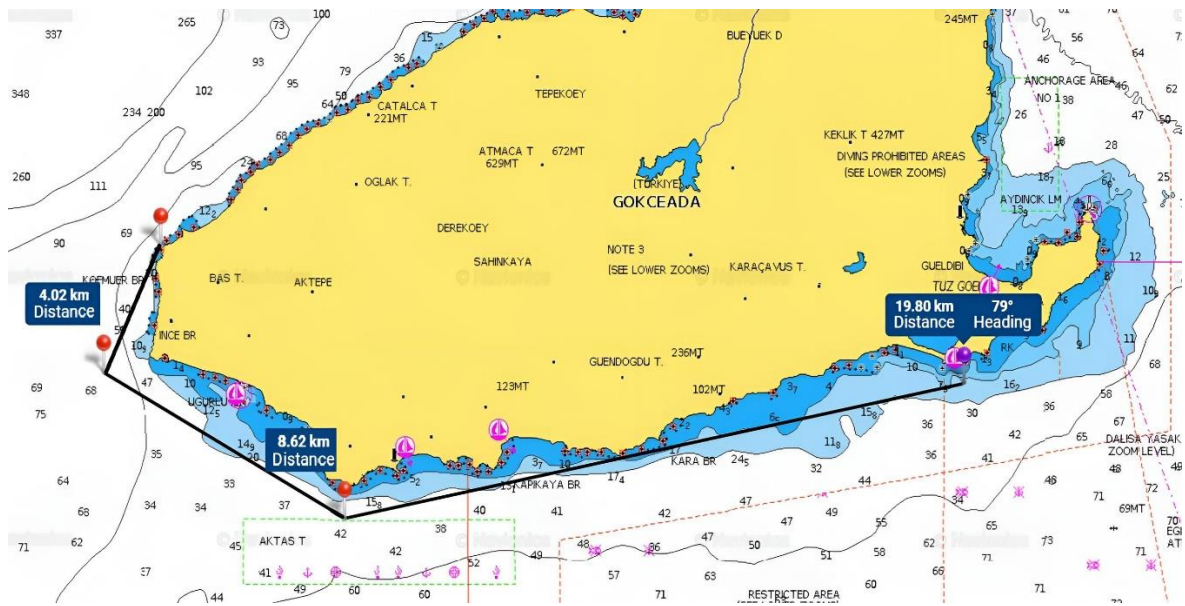


Şekil 49. Gökçeada-Kuzey bölgesi için taranan alan, türbin yerleştirmeleri (Google Earth, WindPro)



Şekil 50. Gökçeada-Kuzey bölgesi su derinlikleri ve en yakın gemi yoluna olan uzaklık (GPS Deniz Haritaları i-boating)

Türbinlerin dağılımına göre kıyı şeridinde olan yaklaşık mesafe 1,68 ile 2,51 km, en yakın gemi yoluna olan mesafe yaklaşık 66,89 km'dir. Gemi yoluna olan uzaklık sınırlarımızın ötesinde Yunanistan'a bağlı Limni adasının etrafından geçmektedir. Ayrıca aktif fay hattı ile fay hattı arasındaki mesafeler sırasıyla 26,05 ve 49,39 km olarak ölçülmüştür. Su altı şebeke hattına olan uzaklığın 32,44 km olduğu tespit edilmiştir. Gökçeada'nın topografik yapısı engebeli olması yüzünden olası kurulması rüzgar enerjisi santralinden su altından şebeke hattının çekilmesinin daha uygun olacağı ve maliyetinin düşük olacağı düşünülmektedir.



Şekil 51. Gökçeada-Kuzey bölgesi su derinlikleri ve su altı şebeke hattına olan uzaklık (Naviaonics)

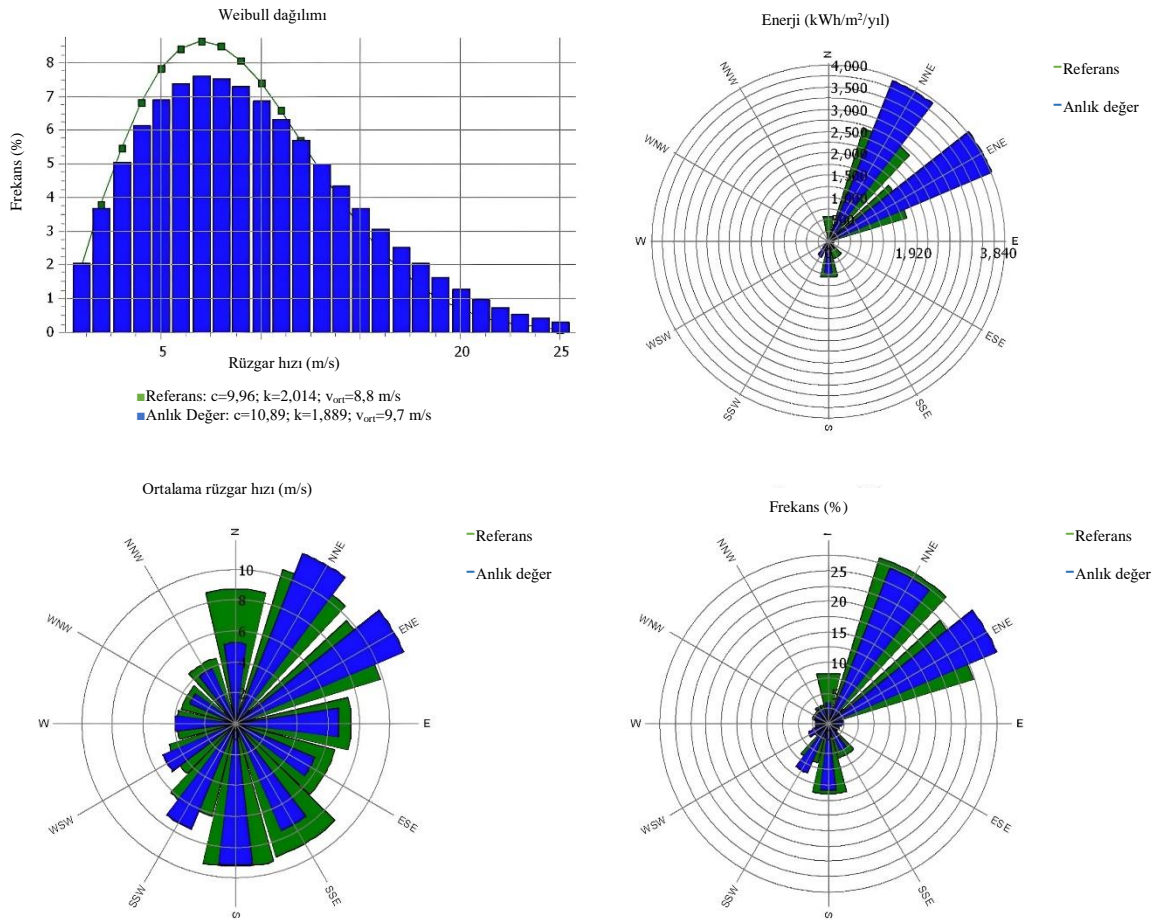
Çalışma alanının uygunluğunun araştırılmasıyla ilgili olarak saha verileri WindPro yazılımından alınmış olup Tablo 18'de gösterilmiştir. Global Wind Atlas verileri, bölgenin IEC Sınıf I'e göre %50'lik bir kapasite faktörüne sahip olduğunu göstermektedir. "WindPro" yazılımına göre %1,8'luk bir fark olduğu gözlemlenmiştir.



Tablo 18

Gökçeada-Kuzey Bölgesi için Hesaplanan Yıllık Enerji üretim bilgileri (WindPro)

Sonuca Göre Belirli Sonuçlar-10,0%	
Türbin kombinasyonu	Rüzgar Çiftliği
Sonuç [MWh/y]	315.499,9
Sonuç- %10 [MWh/y]	283.949,9
GROSS (kayıpsız) Türbinden bağımsız [MWh/y]	327.073,5
Wake kaybı [%]	3,5
Kapasite faktörü [%]	49,1
Ortalama türbin sonuçları [MWh/y]	28.395,0
Tam yükleme saatleri [saat/y]	4.302
Hub yüksekliğindeki ortalama hız [m/s]	9,9



Şekil 52. Rüzgar Veri Analizi – Gökçeada Kuzey (WindPro)

Global Wind Atlas ve WindPro yazılımı karşılaştırılarak bölgenin ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve 1,37 m/s ile %11,71 bir fark gözlemlenmiş olup hakim rüzgar yönü KKD olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebinin çalışma alanının geniş bir alanı kapsadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Genel olarak çalışma alanı incelendiğinde alınan verilerin tutarlı olduğu tespit edilmiştir.



## BEŞİNCİ BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 5.1. Sonuç ve Öneriler

Yapılan çeşitli fizibilite çalışmaları, açık deniz rüzgar çiftliklerinin faydalı yatırımlar yaratabileceğini göstermektedir. Açık deniz rüzgar enerjisi, özellikle kıyı şeridi olan ülkelerde artan küresel enerji talebine yanıt olarak önde gelen alternatif çözümlerden biridir. Mevcut analizlere göre, teknolojinin nasıl ilerlediğine bağlı olarak kurulum maliyetlerinin zaman içinde azalacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca, su yüzeyinin pürüzlülüğü karadakinden çok daha az olduğundan, açık deniz rüzgar türbinleri daha yüksek verime sahiptir. Ülkemiz, yayınlanan uluslararası raporların verilerine göre rüzgar enerjisi sektöründe hızla dünya liderlerinden biri haline gelmektedir. Türkiye aynı zamanda açık deniz rüzgar enerjisi için büyük potansiyele sahip bir ülkedir, ancak henüz açık deniz rüzgar enerjisi çiftlikleri kurulu olmamakla birlikte, bir açık deniz rüzgar çiftliği kurulmadan önce yapılması gereken fizibilite çalışmaları vardır. Bu çalışmanın en önemli katkısı, Türkiye'de açık deniz rüzgar türbini kurulum çalışmalarında “uygun yer seçimi” için birçok kriteri dikkate alan ve doğru bir sıralama yapan örnek bir model sunmasıdır. MOORA metoduna bağlı olarak yapılan bu çalışmada, Gökçeada civarının açık deniz rüzgar türbini çiftlikleri kurmak için en iyi yer olduğu belirlenmiştir (Tablo 19). Sığ su, yüksek rüzgar hızı gibi kriterler ile kapasite faktörü, gemilere ve fay hatlarına uzaklık gibi diğer özelliklerin birleşimi sonucunda bu bölge diğer bölgelere göre daha iyi kriterlere sahiptir. Çalışmamızda yer alan on bir bölge için farklı kaynaklardan alınan verilerin birbiri ile tıpatıp aynı olmasa da tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bölgeler türbin kurulumu için uygundur, ancak sıralama yapıldığında baştan sona doğru sıralayacak olursak; Gökçeada-Kuzey, Gökçeada-Güney, Bozcaada-Güney, Ayvalık, Bozcaada-Kuzey, Erdek, Ayvacık, Eceabat, Bandırma-Doğu, Edremit, Bandırma-Batı olarak verilebilir (Tablo 19-24 ve EK-1). Bu çalışmada; incelenen alanlarda, su derinliği çok derin olmayan bölgelerin seçimine dikkat edilmeye çalışılmıştır. Bu sebeple; özellikle bu bölgelerde tek kazıklı açık deniz rüzgar türbinleri uygun olacaktır. Böylelikle, bu seçimin türbin maliyeti ve bakımı açısından daha uygun ve daha avantajlı olacağı dikkat çekmektedir.

Çalışmalarımız kapsamında, Türkiye'nin Kuzeybatısında yer alan Güney Marmara bölgesi için açık deniz rüzgar santrali kurulumları için bir fizibilite geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla büyük farklar göstermeden tutarlılık göstermekte ve farklı kriterleri dikkate alarak Türkiye'de açık deniz rüzgar türbinlerinin kurulumuna daha geniş bir bakış açısı sağlayacağına inanılmaktadır. Böylece; konuyla ilgili literatüre önemli katkılar sağlanabilmesi yanında mevcut verilerin duyarlılığı artırılmış ve ele alınan kriterler zenginleştirilerek farklı bakış açıları da ortaya konmuş olacaktır. Ayrıca; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 04.08.2023 tarihinde duyurulan “Deniz üstü RES Aday YEKA İlanı” ile belirlenen (ETKB-YEKA, 2023) alanlar arasında çalışmamızda da yer alan sahaların bulunması, bu çalışmaların önemini ve değerini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak; dünya nüfusundaki artışlar ile birlikte elektrikli cihazların ve araçların artışları yanında dünya genelinde yaşanan pandemiler, depremler savaşlar, iklim krizleri gibi olayların enerji arz-talep dengesinde olumsuz etkilere ve aksamalara yol açması temiz, doğa dostu, ekonomik ve sürdürülebilir enerji gereksinimlerini daha da önemli hale getirmektedir. Bu bağlamda; mevcut enerji santrallerine ilave olarak denizüstü rüzgar enerji santrallerine, hatta denizüstü güneş enerji santrallerine, dalga ve akıntı enerji santrallerine yönelmeyi zorunlu hale getirmektedir. Enerjinin verimli ve tasarruflu kullanımının önem kazandığı lokal olarak ülkemizde ve global olarak dünyamızda enerjinin daha bilinçli üretilmesi ve kullanılmasına özen gösterilmesi bu tür çalışmaların farklı bakış açılarının da ele alınıp, artarak devam etmesini zorunlu kılmaktadır.



Tablo 19

Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Güç Yoğunluğuna Göre Sıralanışı

Sıralama	Konumlar	Güç Yoğunluğu
1	Gökçeada Güney Kesimi	9775
2	Gökçeada Kuzey Kesimi	8729
3	Bozcaada Kuzey Kesimi	7969
4	Ayvacık	7411
5	Ayvalık	7233
6	Edremit	7229
7	Bozcaada Güney kesimi	7070
8	Eceabat	6414
9	Erdek	5875
10	Bandırma Batı Kesimi	4503
11	Bandırma Doğu Kesimi	4187

Tablo 20

Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Rüzgar Hızına Göre Sıralanışı

Sıralama	Konumlar	Rüzgar Hızı
1	Gökçeada Kuzey Kesimi	10,2
2	Gökçeada Güney Kesimi	9,7
3	Ayvacık	9,6
4	Bozcaada Kuzey Kesimi	9,5
5	Bozcaada Güney kesimi	9,2
6	Ayvalık	9
7	Eceabat	8,8
8	Edremit	8,8
9	Erdek	8,4
10	Bandırma Doğu Kesimi	7,6
11	Bandırma Batı Kesimi	7,3

Tablo 21

Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Kapasite Faktörüne Göre Sıralanışı

Sıralama	Konumlar	Kapasite Faktörü
1	Gökçeada Güney Kesimi	51,8
2	Ayvacık	50,5
3	Bozcaada Kuzey Kesimi	50,2
4	Bozcaada Güney kesimi	49,5
5	Gökçeada Kuzey Kesimi	49,1
6	Eceabat	46,5
7	Ayvalık	45,5
8	Edremit	44,3
9	Erdek	41,4
10	Bandırma Doğu Kesimi	35
11	Bandırma Batı Kesimi	34,6

Tablo 22

Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Su Derinliğine Göre Sıralanışı

Sıralama	Konumlar	Su Derinliği
1	Gökçeada Güney Kesimi	51,8
2	Ayvacık	50,5
3	Bozcaada Kuzey Kesimi	50,2
4	Bozcaada Güney kesimi	49,5
5	Gökçeada Kuzey Kesimi	49,1
6	Eceabat	46,5
7	Ayvalık	45,5
8	Edremit	44,3
9	Erdek	41,4
10	Bandırma Doğu Kesimi	35
11	Bandırma Batı Kesimi	34,6

Tablo 23

Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Türbülans Yoğunluğuna Göre Sıralanışı

Sıralama	Konumlar	Türbülans Yoğunluğu
1	Bozcaada Güney kesimi	0,16
2	Edremit	0,12
3	Ayvacık	0,12
4	Bandırma Batı Kesimi	0,11
5	Bozcaada Kuzey Kesimi	0,11
6	Ayvalık	0,11
7	Erdek	0,10
8	Eceabat	0,09
9	Gökçeada Kuzey Kesimi	0,09
10	Bandırma Doğu Kesimi	0,08
11	Gökçeada Güney Kesimi	0,08

Tablo 24

Açık Deniz Rüzgar Türbini Kurulacak Konumların Önem Katsayısına Göre Sıralanışı

Sıralama	Konumlar	Önem Katsayısı
1	Gökçeada Kuzey Kesimi	1,6249
2	Gökçeada Güney Kesimi	1,5975
3	Bozcaada Güney kesimi	0,9500
4	Ayvalık	0,9242
5	Bozcaada Kuzey Kesimi	0,8988
6	Erdek	0,7514
7	Ayvacık	0,6522
8	Eceabat	0,5660
9	Bandırma Doğu Kesimi	0,3140
10	Edremit	0,3057
11	Bandırma Batı Kesimi	0,1291

## KAYNAKÇA

- Adalı, E.A., Işık, A.T. (2017). “The multi-objective decision making methods based MULTIMOORA and MOOSRA for the laptop selection problem”. *J IndEngInt* 13, 229–237. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40092-016-0175-5>.
- Akkas, A.A. (2001). “Rüzgar Enerjisi Sistemleri Performans Değerlendirmesi”, *Rüzgar Enerji Sempozyumu*, 5-7 Nisan 2001, Süzer Paradise Hotel, Alaçatı, İzmir. <http://www.ruzgarsempozyumu.org/wp-content/uploads/2014/08/008.pdf>.
- Alkhalidi, M.A., Al-Dabbous, S.Kh., Neelamani, S., Aldashti, H.A. (2019). “Wind energy potential at coastal and offshore locations in the state of Kuwait”. *Renewable Energy*, 135, 529-539, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.039>.
- Argin, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S., Cali, U. (2019). “Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection”. *Energy Strategy Reviews*, 23, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.005>.
- Ayçin, E., 2020. *Çok Kriterli Karar Verme: Bilgisayar Uygulamalı Çözümler*. Nobel Akademik Yayıncılık., ISBN978-605-7846-17-4.
- Batchelor, G. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics (Cambridge Mathematical Library)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955>.
- Betz, A. (1966). *Introduction to the Theory of Flow Machines*. Pergamon Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-05426-6>
- Boneya, G. (2011). Design of a Photovoltaic-Wind Hybrid Power Generation System for Ethiopian Remote Area, Msc Thesis, Addis Ababa Institute of Technology, School of Graduate Studies, Addis Ababa University. Addis Ababa, Ethiopia. <http://etd.aau.edu.et/handle/123456789/6872>.
- Brauers, W.K.M., Zavadskas, E.K., (2006). “The MOORA method and its Applications to privatization in a transition Economy”, *Control Cybern.* 35(2), 445–469. <http://eudml.org/doc/209425>.

- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex. <https://doi.org/10.1002/0470846062>.
- Caceoğlu, E., Yildiz, H.K., Oğuz, E., Huvaj, N., Guerrero, J.M. (2022). “Offshore wind power plant site selection using Analytical Hierarchy Process for Northwest Turkey”, *Ocean Engineering*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111178>.
- Castro-Santos, L., ve Diaz-Casas, V. (2015). “Sensitivity analysis of floating offshore wind farms”, *Energy Convers. Manag.* 101, 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.032>.
- Cavazzi, S., ve Dutton, A.G. (2016). “An Offshore Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's offshore wind energy potential”, *Renewable Energy*, 87 (1), 212-228. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.021>.
- Cliff, W.C. (1977). *Effect of Generalized Wind Characteristics on Annual Power Estimates from Wind Turbine Generators*, United States: N. p. <https://doi.org/10.2172/5197838>.
- Çetin, N.S., Çelik, H., Basaran, K. (2011). “Rüzgar Türbinlerinde Kapasite Faktörü ve Türbin Sınıfı İlişkisi (Capacity Factor in Wind Turbines and Turbine Class Relationship)”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May 2011, Elazığ, Türkiye. 131-136.
- Deveci, M., Özcan, E., John, R., Pamucar, D., Karaman, H. (2021). “Offshore wind farm site selection using interval rough numbers based Best-Worst Method and MARCOS”, *Applied Soft Computing*, 109, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107532>.
- Dhingra, T., Sengar, A., Sajith, S. (2022). “A fuzzy analytic hierarchy process-based analysis for prioritization of barriers to offshore wind energy”, *Journal of Cleaner Production*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131111>.
- DWIA, Danish Wind Industry Association (2023, 2 Mayıs). A Wind Energy Pioneer: Charles F. Brush, Erişim: 20 Nisan 2023. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/pictures/brush.htm>

- EIA, U.S. Energy Information Administration (2023, 20 Nisan). People have been using wind energy for thousands of years, Erişim adresi: <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>
- Elsner, P. (2019). “Continental-scale assessment of the African offshore wind energy potential: Spatial analysis of an under-appreciated renewable energy resource”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 394-407, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.034>.
- Emeksiz, C., ve Demirci, B. (2019). “The determination of offshore wind energy potential of Turkey by using novelty hybrid site selection method”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100562>.
- Ersöz, F., Atav, A. (2011). “Çok Kriterli Karar Verme Problemlerinde MOORA Yöntemi”, *YAEM 2011 Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendislięi 31. Ulusal Kongresi*, Sakarya Üniversitesi, 05-07 Temmuz 2011, Sayfa 78–87. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85141509532&origin=inward#metrics>.
- ETKB, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi Merkezi, Erişim: 20 Nisan 2023, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar>.
- ETKB-YEKA, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Denizüstü RES Aday YEKA İlanı, Erişim tarihi: 05 Ağustos 2023, <https://enerji.gov.tr/duyuru-detay?id=20382>.
- Genç, C., Sakalli, A., Stoyanov, I., Iliev, T., Mihaylov, G., Beloev, I. (2020). “Development of wind energy and the installed wind power plants in Turkey”, *E3S Web Conf.* 207. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020702013>.
- Genç, C., Sakalli, A., Stoyanov, I., Iliev, T., Mihaylov, G., Beloev, I. (2020). “Wind Energy Potential for Electricity Production in Hatay, Turkey”, *E3S Web of Conferences* 207. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020702014>.
- Genç, M.S., Karipoęlu, F., Koca, K. (2021). “Suitable site selection for offshore wind farms in Turkey’s seas: GIS-MCDM based approach”, *Earth Sci Inform* 14, 1213–1225. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00632-3>
- Gençel, H., Tarhan, I. (2019). “Rüzgar Enerjisinin “Önemli Geçiř, Yerlerinden Olan Çanakkale Bölgesindeki Bazı Rüzgar Enerji Santralleri için Kapasite Faktörü

- İncelemesi”, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences*, 5 (1), 120–139, <https://doi.org/10.28979/comufbed.537295>.
- GWEC, *Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2023*, Erişim: 20 Nisan 2023, <https://gwec.net/globalwindreport2023/>
- Huvaj, N, Caceoğlu, E., Baidol, Y. (2019). “Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri Temel Tipi Seçimi ve Deniz Tabanı Zemin Araştırmaları”, 5. *İzmir Rüzgar Sempozyumu*, İzmir. <http://www.ruzgarsempozyumu.org/wp-content/uploads/2019/09/017.pdf>.
- IEA, *International Energy Agency*, Erişim: 20 Nisan 2023, <https://www.iea.org/commentaries/for-the-first-time-in-decades-the-number-of-people-without-access-to-electricity-is-set-to-increase-in-2022>
- IRENA, *The International Renewable Energy Agency. Renewable capacity statistics 2023*, Erişim: 20 Nisan 2023, <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
- Jafarzadeh, N. (2017). Analysis of hybrid wind-solar power plant for itu Ayazaga Campus, Istanbul Technical University, Energy Institute. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=71OJX8w\\_8PRQU1mSH\\_U6-joiIQbLWbp81kCV467dpSt2H34z9UR7YmJIBKplBv4Pd](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=71OJX8w_8PRQU1mSH_U6-joiIQbLWbp81kCV467dpSt2H34z9UR7YmJIBKplBv4Pd).
- Kabak, M., ve Akalın, S. (2022). “A model proposal for selecting the installation location of offshore wind energy turbines”, *Int J Energy Environ Eng*, 13, 121–134. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00421-0>
- Kaiser, M.J., ve Snyder, B. (2010). *Offshore Wind Energy Installation and Decommissioning Cost Estimation in the US Outer Continental Shelf*. Louisiana, Energy Research Group LLC.
- Karande, P., Chakraborty, S. (2012). “Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for materials selection”, *Mater. Des*, 37, 317–324, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.013>.
- Koh, J.H., Ng, E.Y.K. (2016). “Downwind offshore wind turbines: opportunities, trends and technical challenges, Renew. Sustain”. *Energy Rev.*, 54, 797–808. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.096>.

- Li, Z., Tian, G., ve El-Shafay, A.S. (2022). “Statistical-analytical study on world development trend in offshore wind energy production capacity focusing on Great Britain with the aim of MCDA based offshore wind farm siting”, *Journal of Cleaner Production*, 363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132326>.
- Liu, Y., Li, S., Yi, Q., Chen, D. (2016). “Developments in semi-submersible floating foundations supporting wind turbines: a comprehensive review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60, 433–449. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.109>.
- Lozano-Minguez, E., Kolios, A.J., Brennan, F.P. (2011). “Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures”, *Renew. Energy* 36, 2831–2837. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.020>.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. (2009). *Wind Energy Explained, 2nd edn*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119994367>.
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer Berlin Heidelberg Inc., Germany. <https://doi.org/10.1007/3-540-30906-3>.
- Mayhoub, A.B. ve Azzam, A. (1997). “A survey on the assessment of wind energy potential in Egypt”, *Renewable Energy*, 11 (2), 235-247. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(96\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(96)00113-9).
- Moulas, D, Shafiee, M., Mehmanparast, A. (2017). “Damage analysis of ship Collisions with offshore wind turbine foundations”. *Ocean Eng.*, 143, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.050>.
- MRC, *The Meteorological Resource Center, Access*, Erişim tarihi: 7 Temmuz 2021, [http://www.webmet.com/met\\_monitoring/663.html](http://www.webmet.com/met_monitoring/663.html).
- Nezhad, M.M., Neshat, M., Piras, G., Garcia, D.A. (2022). “Sites exploring prioritisation of offshore wind energy potential and mapping for wind farms installation: Iranian islands case studies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112791>.
- Ohunakin, O.S., Matthew, O.J., Adaramola, M.S., Atiba, O.E., Adelekan, D.S., Aluko, O.O., Henry, E.A., Ezekiel, V.U. (2023). “Techno-economic assessment of offshore wind energy potential at selected sites in the Gulf of Guinea”, *Energy Conversion and Management*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117110>.



- Okorie, U.S., Ikot, A.N., Onyeaju, M.C. (2018). “Bound state solutions of Schrödinger equation with modified Mobius square potential (MMSP) and its thermodynamic properties”, *J Mol Model*, 24, 289. <https://doi.org/10.1007/s00894-018-3811-8>.
- Onea, F., ve Rusu, E. (2022). “A spatial analysis of the offshore wind energy potential related to the Mediterranean islands”, *Energy Reports*, 8 (16), 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.249>.
- Oral, F. , Behçet, R., Gönel, E. (2019). “WindPRO Programı ile Rüzgar Analizi Ve Enerji Üretim Miktarının Belirlenmesi”. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 362-371. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.517140>.
- Özbek, M., ve Tunç, K. (2021). “Feasibility of Offshore Wind Energy in Turkey; A Case Study for Gulf of Edremit at the Aegean Sea”. *Gazi University Journal of Science*, 34 (2) , 423-437. <https://doi.org/10.35378/gujs.734895>.
- Pérez-Collazo, C., Greaves, G., Iglesias, D. (2015). “A review of combined wave and offshore wind energy, Renew. Sustain”. *Energy Rev.*, 42, 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.032>.
- Price TJ. (2005). “James Blyth — Britain’s First Modern Wind Power Pioneer”. *Wind Engineering*, 29(3), 191-200. <https://doi.org/10.1260/0309524057743549>
- Righter R.W. (1996). “Pioneering in wind energy: The California experience”. *Renewable Energy*, 9(1–4), 781-784, ISSN 0960-1481, [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88399-6](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88399-6).
- Rueda-Bayona, J.G., Guzmán, A., Cabello Eras, J.J. (2019). “Wind and power density data of strategic offshore locations in the Colombian Caribbean coast”, *Data in Brief*, 27, 104720, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104720>.
- Satir, M., ve Murphy, F., McDonnell, K. (2018). “Feasibility study of an offshore wind farm in the Aegean Sea, Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2), 2552-2562. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.063>.
- Shu, Z.R., Li Q.S., Chan, P.W. (2015). “Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong”, *Energy Conversion and Management*, 101, 644-657. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.070>.

- Şahin, A.D., Öztopal, A., Kaymak, M.K. (2012). *Kısa Süreli Rüzgar Enerjisi Tahmin Sistemi Geliştirilmesi Projesi*, İstanbul, Erişim: 07.07.2022, <https://docplayer.biz.tr/21998979-Kisa-sureli-ruzgar-enerjisi-tahmin-sistemi-gelistirilmesi-projesi.html>.
- Taşan, H. E. ve Akdağ, C. T. (2018). “Açık Deniz Yapıları Kova Temel Sistemi Davranışı Üzerinde Tekrarlı Yük Frekansının Etkisi”, *Teknik Dergi*, 29 (3), 8411-8431. <https://doi.org/10.18400/tekderg.337970>
- Tortumluoğlu, M.İ., ve Doğan, M. (2021). “Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması”. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23 (67) , 25-41. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236703>.
- TUREB, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği. (2023). *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu - Ocak 2023*, Erişim: 10 Mayıs 2023, <https://tureb.com.tr/haber/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2023/291>
- Vinhoza, A., ve Schaeffer, R. (2021). “Brazil's offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111185>.
- von Kármán, Th. (1931). *Mechanical similitude and turbulence*, National Advisory Committee on Aeronautics, Washington, DC. <https://resolver.caltech.edu/CaltechAUTHORS:20140804-121813080>.
- Wang, X., Zeng, X., Li, J., Yang, X., Wang, H. (2018). “A review on recent advancements of substructures for offshore wind turbines”, *Energy Convers. Manag.*, 158, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.061>.
- Weisser, D. (2003). “A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the ‘Weibull’ density function”, *Renewable Energy*, 28 (11), 1803-1812. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00016-8).
- Wen, A., Wu, T., Wu, X., Zhu, X., Li, R., Ni, J., Hu, G., Qiao, Y., Zou, D., Chen, J., Wang, D., Lou, P. (2022). “Evaluation of MERRA-2 land surface temperature dataset and its application in permafrost mapping over China”, *Atmospheric Research*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106373>.

Werapun, W., Tirawanichakul Y., Kongnakorn W., Waewsak J. (2014). “An Assessment of Offshore Wind Energy Potential on Phangan Island by in Southern Thailand”, *Energy Procedia*, 52, 287-295. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.080>.



## EKLER

### EK-1

#### MOORA Yöntemi ile En Uygun Yer Seçim Sıralama Kriterleri

Konumlar	Derinlik	Kıyıya Uzaklık	Türbülans Yoğunluğu	Şebeke uzaklığı	Rüzgar Hızı	Aktif Fay Uzaklığı	Fay Uzaklığı	Gemi Yolu Uzaklığı	Esme Sıklığı	Kapasite Faktörü	Güç Yoğunluğu	Önem Katsayısı	Sıralama
Gökçeada Kuzey	27,5	2,095	0,11	32,44	9,70	26,05	49,39	66,89	4302	49,1	8729	1,6249	1
Gökçeada Güney	27,5	3,225	0,08	8,57	10,20	27,65	46,57	15,3	4544	51,8	9775	1,5975	2
Bozcaada Güney	15	1,6	0,09	8,57	9,20	18,4	3,63	8,25	4341	49,5	7070	0,9500	3
Ayvalık	25	3,22	0,12	1,35	9,00	22,43	19,7	4,09	3986	45,5	7233	0,9242	4
Bozcaada Kuzey	15,5	4,505	0,09	4,07	9,50	22,12	9,24	5,45	4404	50,2	7969	0,8988	5
Erdek	32,5	2,02	0,10	1,27	8,40	23,19	9,34	2,66	3626	41,4	5875	0,7514	6
Ayvacık	27,5	2,92	0,08	12,85	9,60	3,03	10,02	23,92	4423	50,5	7411	0,6522	7
Eceabat	47,5	2,75	0,11	12,54	8,80	11	36,89	10,6	4072	46,5	6414	0,5660	8
Bandırma Doğu	27,5	1,15	0,16	1,1	7,60	0,735	18,71	4	3068	35	4187	0,3140	9
Edremit	35	4,02	0,12	19,7	8,80	7,16	11,63	35,04	3885	44,3	7229	0,3057	10
Bandırma Batı	25	2,5	0,11	1,7	7,30	1,4	1,88	4,71	3033	34,6	4503	0,1291	11