

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN**  
**UYGUN YER SEÇİM KRİTERLERİNİN**  
**İRDELENMESİ VE ÜLKEMİZ EGE KIYILARI**  
**İÇİN UYGULANMASI**

**Muhammed İkbāl TORTUMLUOĞLU**

**Ağustos, 2020**

**İZMİR**

**AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN  
UYGUN YER SEÇİM KRİTERLERİNİN  
İRDELENMESİ VE ÜLKEMİZ EGE KIYILARI  
İÇİN UYGULANMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik-Hidroloji ve Su Kaynakları  
Programı**

**Muhammed İkbāl TORTUMLUOĞLU**

**Ağustos, 2020  
İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**MUHAMMED İKBAL TORTUMLUOĞLU**, tarafından **DOÇ. DR. MUSTAFA DOĞAN** yönetiminde hazırlanan “**AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN UYGUN YER SEÇİM KRİTERLERİNİN İRDELENMESİ VE ÜLKEMİZ EGE KİYILARI İÇİN UYGULANMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Yönetici

Doç. Dr. Ayşegül Özgenç AKSOY

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Ali  
KUMANLIOĞLU

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam sürecinde, kıymetli bilgi, birikim ve tecrübelerinden her daim faydalandığım, beni her zaman çalışmaya teşvik eden tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa DOĞAN' a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmam sürecinde desteklerini hiç esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Yalçın Arısoy'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürler.

Muhammed İkbāl TORTUMLUOĞLU



# INVESTIGATION OF SUITABLE SITE SELECTION CRITERIA FOR OFFSHORE WIND TURBINE AND APPLICATION FOR AEGEAN COASTS OF TURKEY

## ABSTRACT

Wind energy has been used by human beings for various purposes for about 2000 years. The development process, which started with windmills converting wind energy into mechanical energy, continues with offshore wind turbines in the 21st century. In this study, the development of offshore wind turbines and the factors causing this development are evaluated. The eligible site selection criteria, which constitute the most important step in the design process of offshore wind turbines, have been examined in detail. The methods and engineering solutions used in choosing the appropriate location were evaluated. It is aimed to determine suitable areas for monopile foundation offshore wind turbines on the Aegean coasts, which have high potential in terms of offshore wind energy. In this context, wind data obtained from 14 meteorological stations close to the coast in the Aegean region were first analyzed with the WAsP Climate Analyst 3.1 program. Later, vector maps for regions suitable for wind speed were created with Global Mapper and WAsP Map Editor. Wind atlases were obtained by making the final analysis with the WAsP 12.3 program. Since monopile foundation offshore wind turbines can be applied up to 40 m sea depths, areas over 40 m sea depth have been eliminated. Forbidden areas (military training and shooting fields, no-diving areas, sea floor cable lines and ship routes) that pose a problem for offshore wind turbine placement have been identified and written on maps. Turbine layout has been made for suitable regions.

**Keywords:** Offshore wind turbines, suitable location selection for offshore wind turbines

## İÇİNDEKİLER

|                                                              | Sayfa     |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....                   | ii        |
| TEŞEKKÜR .....                                               | iii       |
| ÖZ .....                                                     | iv        |
| ABSTRACT .....                                               | v         |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                       | ix        |
| TABLolar LİSTESİ.....                                        | xii       |
| <br>                                                         |           |
| <b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>                                | <b>1</b>  |
| <br>                                                         |           |
| 1.1 Rüzgar Enerjisinin Dünya Üzerindeki Mevcut Durumu.....   | 2         |
| 1.2 Amaç ve Kapsam .....                                     | 7         |
| <br>                                                         |           |
| <b>BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR TARAMASI .....</b>                  | <b>8</b>  |
| <br>                                                         |           |
| <b>BÖLÜM ÜÇ - RÜZGAR ENERJİSİ.....</b>                       | <b>18</b> |
| <br>                                                         |           |
| 3.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....                | 18        |
| 3.1.1 Yel Değirmenlerinin Tarihsel Gelişimi.....             | 18        |
| 3.1.2 Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi .....           | 21        |
| 3.1.3 Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi..... | 23        |
| 3.2 Rüzgar Türbinlerinin Kısımları.....                      | 24        |
| 3.3 Rüzgar Enerjisi Dönüşümünün Fiziksel Prensipleri .....   | 27        |
| 3.4 Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi .....                | 33        |
| 3.4.1 Logaritmik Kural.....                                  | 34        |
| 3.4.2 Güç Kuralı.....                                        | 34        |
| 3.5 Rüzgar Verilerinin İstatistiksel İncelenmesi .....       | 35        |
| 3.5.1 Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu .....              | 36        |
| 3.5.2 Rayleigh Dağılımı .....                                | 37        |
| 3.6 İz Etkisi .....                                          | 38        |

## **BÖLÜM DÖRT - AÇIK DENİZ RÜZGAR ENERJİSİ..... 41**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Açık Deniz ve Karasal Rüzgar Enerjisinin Karşılaştırılması.....   | 42 |
| 4.2 Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterleri..... | 43 |
| 4.2.1 Bölgenin Rüzgar Potansiyeli.....                                | 43 |
| 4.2.2 Derinlik Koşulları.....                                         | 45 |
| 4.2.2.1 Ağırlık Tipi Temeller .....                                   | 46 |
| 4.2.2.2 Tekil Kazık Temeller (Monopile) .....                         | 47 |
| 4.2.2.3 Üç Ayak (Tripod).....                                         | 48 |
| 4.2.2.4 Kafes Tipi Temel (Jacket).....                                | 49 |
| 4.2.2.5 Yüzer Temeller.....                                           | 49 |
| 4.2.3 Karasuları Sınırı .....                                         | 50 |
| 4.2.4 Askeri Sınırlar .....                                           | 50 |
| 4.2.5 Deniz Tabanı Boru Hatları, Deniz Ulaşım Hatları.....            | 51 |
| 4.2.6 Çevresel Hususlar.....                                          | 51 |

## **BÖLÜM BEŞ - EGE KIYILARI İÇİN UYGUN YER SEÇİMİ ..... 52**

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 Gereçler ve Yöntem .....                                                          | 52 |
| 5.1.1 WAsP Genel Bakış .....                                                          | 53 |
| 5.1.2 Rüzgar Verilerinin WAsP Climate Analyst 3.1 Programı ile Analizi .....          | 54 |
| 5.1.3 Vektör Haritasının Oluşturulması.....                                           | 55 |
| 5.1.4 WAsP 12.3 Programı ile Nihai Analiz .....                                       | 60 |
| 5.1.5 Uygun Yer Seçiminde İzlenilen Akış Şeması .....                                 | 61 |
| 5.2 Ege Bölgesi Meteoroloji İstasyonlarından Alınmış Rüzgar Verilerinin Analizi ..... | 63 |
| 5.3 Türbin Yerleşimine Uygun Olmayan Alanların Belirlenmesi ve Türbin Yerleşimi ..... | 67 |
| 5.3.1 Gökçeada .....                                                                  | 67 |
| 5.3.2 Bozcaada .....                                                                  | 70 |
| 5.3.3 Ayvacık .....                                                                   | 74 |
| 5.3.4 Çanakkale.....                                                                  | 76 |

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| 5.3.5 Gümüldür .....                           | 79        |
| 5.3.6 Datça .....                              | 82        |
| <b>BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b> | <b>85</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                         | <b>87</b> |
| <b>EKLER.....</b>                              | <b>93</b> |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                          | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1 Global enerji tüketiminin tarihsel değişimi .....                                                              | 1     |
| Şekil 1.2 Küresel toplam kurulu gücün tarihsel gelişimi .....                                                            | 3     |
| Şekil 1.3 Avrupa toplam kurulu gücün ülke bazında dağılımı.....                                                          | 4     |
| Şekil 1.4 Avrupa toplam kurulu gücün gelişimi .....                                                                      | 5     |
| Şekil 1.5 Ülkemizde kurulu gücün yıllara göre değişimi.....                                                              | 6     |
| Şekil 1.6 Türkiye rüzgar enerjisi atlası .....                                                                           | 7     |
| Şekil 2.1 Kafes sistemi biçiminde gövde detayı .....                                                                     | 9     |
| Şekil 2.2 Amasra kıyılarındaki doğalgaz ve petrol hatları.....                                                           | 12    |
| Şekil 2.3 F-G ve Jensen's modelle yapılmış iki farklı rüzgar türbini yerleşim planı.                                     | 14    |
| Şekil 2.4 Açık deniz rüzgar türbini ve dalga enerji dönüştürücü birleşik tasarım .....                                   | 15    |
| Şekil 2.5 Wimbledon yel değirmeni müzesinde bulunan 1800'lü yıllarda George<br>Cooke tarafından yapılmış bir resim ..... | 16    |
| Şekil 3.1 Heron'un yel değirmeni.....                                                                                    | 19    |
| Şekil 3.2 Düşey eksenli yel değirmenleri, Sistan İran .....                                                              | 19    |
| Şekil 3.3 Hollanda tipi yel değirmenleri .....                                                                           | 20    |
| Şekil 3.4 Paul La Cour'un rüzgar türbini, Askov, Danimarka.....                                                          | 21    |
| Şekil 3.5 Rüzgar türbinlerinin gelişimi .....                                                                            | 22    |
| Şekil 3.6 Vindeby açık deniz rüzgar türbinleri .....                                                                     | 23    |
| Şekil 3.7 Düşey eksenli rüzgar türbinleri .....                                                                          | 25    |
| Şekil 3.8 Yatay eksenli rüzgar türbini parçaları.....                                                                    | 26    |
| Şekil 3.9 Rüzgar türbini akım borusu .....                                                                               | 28    |
| Şekil 3.10 Güç katsayısı ile rotor öncesi ve sonrası hızların oranının grafiği.....                                      | 31    |
| Şekil 3.11 İdeal türbin için akım koşulları .....                                                                        | 32    |
| Şekil 3.12 Gerçek ve ortalama rüzgar hızı profilleri.....                                                                | 33    |
| Şekil 3.13 Farklı k değerleri için Weibull dağılımı.....                                                                 | 36    |
| Şekil 3.14 Farklı ortalama hız değerlerine göre Rayleigh dağılımı .....                                                  | 37    |
| Şekil 3.15 Jensen iz etkisi modeli .....                                                                                 | 39    |
| Şekil 4.1 Açık deniz rüzgar türbini temel tipleri.....                                                                   | 46    |
| Şekil 4.2 A) Ağırlık tipi temel üretimi ve B) Temellerin taşınması, Lillgrund .....                                      | 47    |
| Şekil 4.3 Tekil kazıklı temel şematik gösterimi.....                                                                     | 48    |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.4 Alpha Ventus türbinlerinin üç ayak temelleri .....                        | 49 |
| Şekil 5.1 WAsP işlem ağacı .....                                                    | 53 |
| Şekil 5.2 Düzenlenmiş rüzgar verisi .....                                           | 54 |
| Şekil 5.3 Gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi .....                                    | 55 |
| Şekil 5.4 Global Mapper’da türetilmiş eş yükselti eğrileri .....                    | 56 |
| Şekil 5.5 WAsP Map Editor değersiz derinlik çizgileri .....                         | 57 |
| Şekil 5.6 Pürüzlülük yüksekliklerinin işlenme sistematığı .....                     | 59 |
| Şekil 5.7 Dead ends ve LRF hataları.....                                            | 59 |
| Şekil 5.8 Çalışma penceresi hiyerarşisi.....                                        | 60 |
| Şekil 5.9 Resource grid haritası .....                                              | 61 |
| Şekil 5.10 Uygun yer seçimi akış şeması.....                                        | 63 |
| Şekil 5.11 İstasyonların Google Earth haritası üzerindeki yerleri .....             | 65 |
| Şekil 5.12 Ayvacık istasyonu gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi.....                  | 65 |
| Şekil 5.13 Gökçeada gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi .....                          | 67 |
| Şekil 5.14 Gökçeada vektör haritası.....                                            | 68 |
| Şekil 5.15 Gökçeada rüzgar atlası.....                                              | 68 |
| Şekil 5.16 Gökçeada türbin yerleşimi ve rüzgar hızı haritası .....                  | 69 |
| Şekil 5.17 Gökçeada ortalama enerji üretim haritası .....                           | 70 |
| Şekil 5.18 Bozcaada gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi.....                           | 71 |
| Şekil 5.19 Bozcaada vektör haritası .....                                           | 71 |
| Şekil 5.20 Bozcaada rüzgar atlası .....                                             | 72 |
| Şekil 5.21 Bozcaada açık deniz türbin yerleşim ve rüzgar hızı haritası.....         | 73 |
| Şekil 5.22 Bozcaada ortalama enerji haritası .....                                  | 73 |
| Şekil 5.23 Ayvacık gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi.....                            | 74 |
| Şekil 5.24 Ayvacık vektör haritası .....                                            | 74 |
| Şekil 5.25 Ayvacık rüzgar atlası .....                                              | 75 |
| Şekil 5.26 Ayvacık yasak sahalar ve rüzgar hızı haritası.....                       | 76 |
| Şekil 5.27 Çanakkale gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi .....                         | 76 |
| Şekil 5.28 Çanakkale vektör haritası.....                                           | 77 |
| Şekil 5.29 Çanakkale rüzgar atlası .....                                            | 78 |
| Şekil 5.30 Çanakkale boğazı deniz tabanı kablo hatları ve rüzgar hızı haritası..... | 79 |
| Şekil 5.31 Gümüşlük gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi.....                           | 80 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.32 Gümüldür vektör haritası .....                        | 80 |
| Şekil 5.33 Gümüldür rüzgar atlası .....                          | 81 |
| Şekil 5.34 Gümüldür yasaklı sahalar ve rüzgar hızı haritası..... | 81 |
| Şekil 5.35 Datça gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi .....          | 82 |
| Şekil 5.36 Datça vektör haritası .....                           | 83 |
| Şekil 5.37 Datça rüzgar atlası .....                             | 83 |
| Şekil 5.38 Datça yasaklı sahalar ve rüzgar hızı haritası.....    | 84 |



## TABLÖLAR LİSTESİ

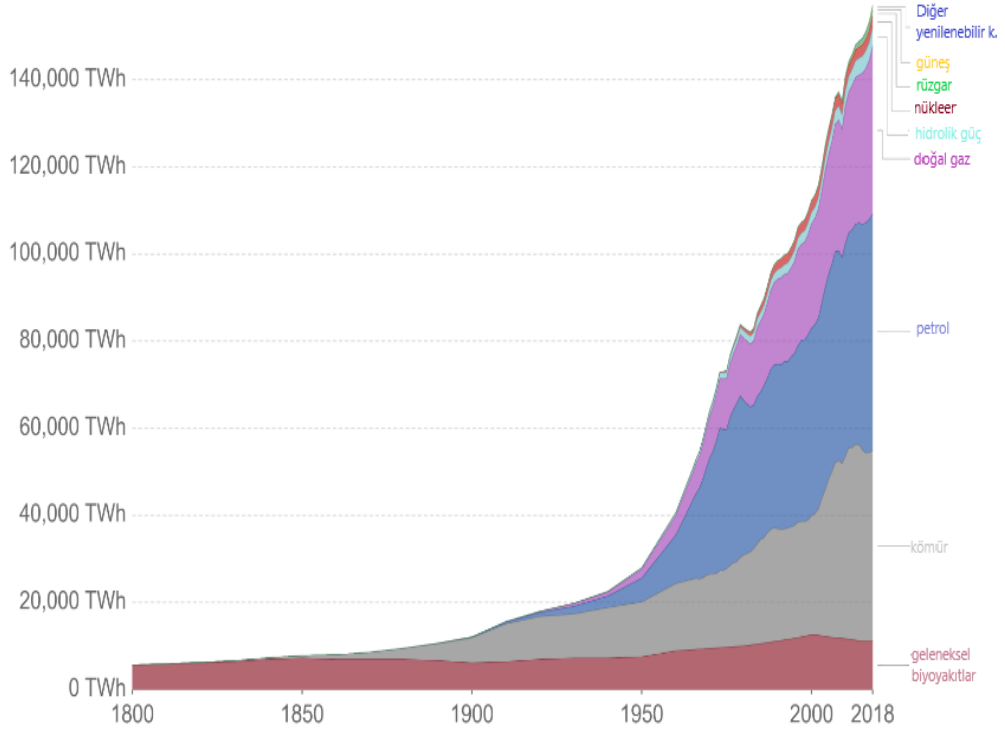
### Sayfa

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1 Açık deniz rüzgar türbinleri tasarımı için kullanılan uluslararası teknik şartnameleri ..... | 13 |
| Tablo 3.1 Farklı alanlardaki pürüzlülük yükseklikleri .....                                            | 34 |
| Tablo 4.1 Ülkelere göre açık deniz rüzgar enerjisi kurulu güçler.....                                  | 41 |
| Tablo 5.1 Map Editor programına girilmesi gereken pürüzlülük yükseklikleri.....                        | 58 |
| Tablo 5.2 Farklı türbin modellerinin cut-in hızları .....                                              | 62 |
| Tablo 5.3 İstasyon bilgileri .....                                                                     | 64 |
| Tablo 5.4 Ortalama rüzgar hızları .....                                                                | 66 |

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

İnsanoğlunun sanayi devrimi ile birlikte enerji kullanımı ve bu bağlamda enerjiye olan ihtiyacı gün geçtikçe hızlı bir şekilde artmıştır. Enerji kullanımının değişimi ve tedarik edildiği kaynak bakımından tarihsel gösterimi grafik biçimde Şekil1.1’de verilmiştir (Ritchie ve Roser, 2020). İnsanoğlu, artan nüfusu ile birlikte artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için biyokütle (fosilleşmemiş veya yaşayan canlılardan elde edilen biyolojik kütle) ve fosil kaynaklar gibi konvansiyonel enerji kaynaklarından faydalanmıştır. Sanayi devrimi ile birlikte üretimin artması, bununla doğru orantılı olarak enerji ihtiyacının artmasına neden olmuştur. Fosil kaynakların gün geçtikçe azalması, fiyatlarının artması ve özellikle atmosferdeki CO<sub>2</sub> miktarının çok fazla yükselmesi nedeniyle son yüzyılda araştırmacılar, rüzgar ve güneş gibi farklı enerji kaynaklarına yönelmişlerdir (Penna, 2020).



Şekil 1.1 Global enerji tüketiminin tarihsel değişimi (Ritchie ve Roser, 2020)

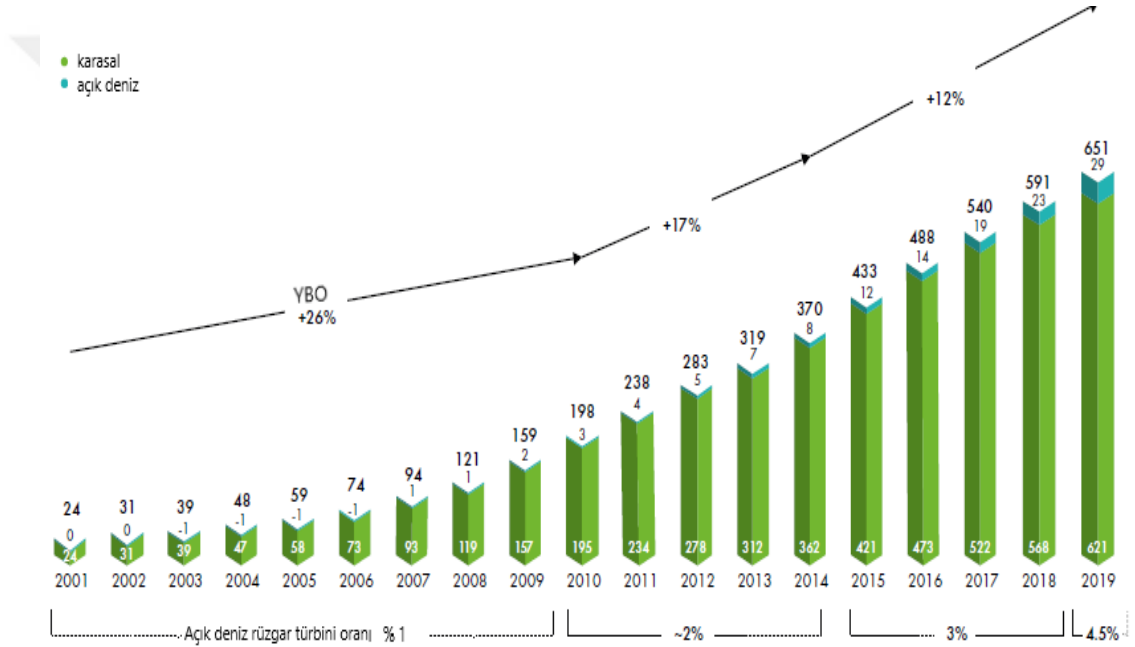
Enerjinin ve hayatın temel kaynağı olan güneş sayesinde dünyamız ısınmaktadır. Dünyamıza gelen güneş ışınları yansımakta, bu yansıyan güneş ışınları sera gazları: su buharı, karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), nitrojen oksit (NO<sub>2</sub>) tarafından tutulmasıyla beraber ısınma gerçekleşmektedir. Bahsi geçen sera gazlarının dünya atmosferindeki miktarı arttıkça ısınma artacağından küresel bir ısınma ve bununla beraber iklim değişikliği söz konusu olmaktadır. Fosil kaynakların tüketimi sonucunda oluşan sera gazı toplam sera gazının üçte ikisini oluşturmaktadır (Kuşkaya ve Bilgili, 2020). Sera gazı etkisini azaltmak ve küresel ısınmayı kontrol etmek amacıyla 1997 yılında Kyoto protokolü imzalanmıştır. Bu protokol çerçevesinde, atmosfere bırakılan metan ve karbon dioksit miktarının azaltılması için alternatif enerji kaynaklarına (rüzgar, güneş vb) yönelim istenmektedir. 2015 yılında ise Paris İklim Anlaşması imzalanmış, bu anlaşma çerçevesinde küresel ısınmayı kontrol altında tutmak hedeflenmiştir. Görüldüğü üzere ülkeler son yıllarda küresel ısınma ve iklim değişikliği konularını ciddi manada önemsemekte, bu konularda gerçekçi adımlar atmaktadır. Beklenen hedeflere ulaşabilmek için de enerji politikalarına yenilikçi çözümler getirilmektedirler (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi , 1998).

Rüzgar enerjisinin son 20 yıl içerisinde uygulamaları hızla artmıştır. Yenilenebilir enerji, çevre dostu ve doğru uygulandığı takdirde verimli enerji kaynağı olması sebebiyle rüzgar enerjisini cazibeli hale getirmektedir. Rüzgar enerjisinin uygulamaları karasal (onshore) ve açık deniz (offshore) olmak üzere iki çeşittir. Rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Yatay eksenli, düşey eksenli gibi farklı uygulamaları bulunan rüzgar türbinlerinin yapısal olarak detaylı incelenmesi bu çalışma kapsamında yapılmıştır. Bu uygulamalar dünya üzerinde bir çok ülke tarafından kullanılmaktadır (Wu ve diğer., 2019).

## **1.1 Rüzgar Enerjisinin Dünya Üzerindeki Mevcut Durumu**

*Global Wind Energy Council* (GWEC) rüzgar enerjisinin dünyadaki durumu hakkında yarıyıl ve yıllık olmak üzere raporlar hazırlayan bir kuruluştur. Oluşturulan raporlar mevcut durumu görmede oldukça faydalı olmaktadır. Bu kuruluşun 2019 yılı

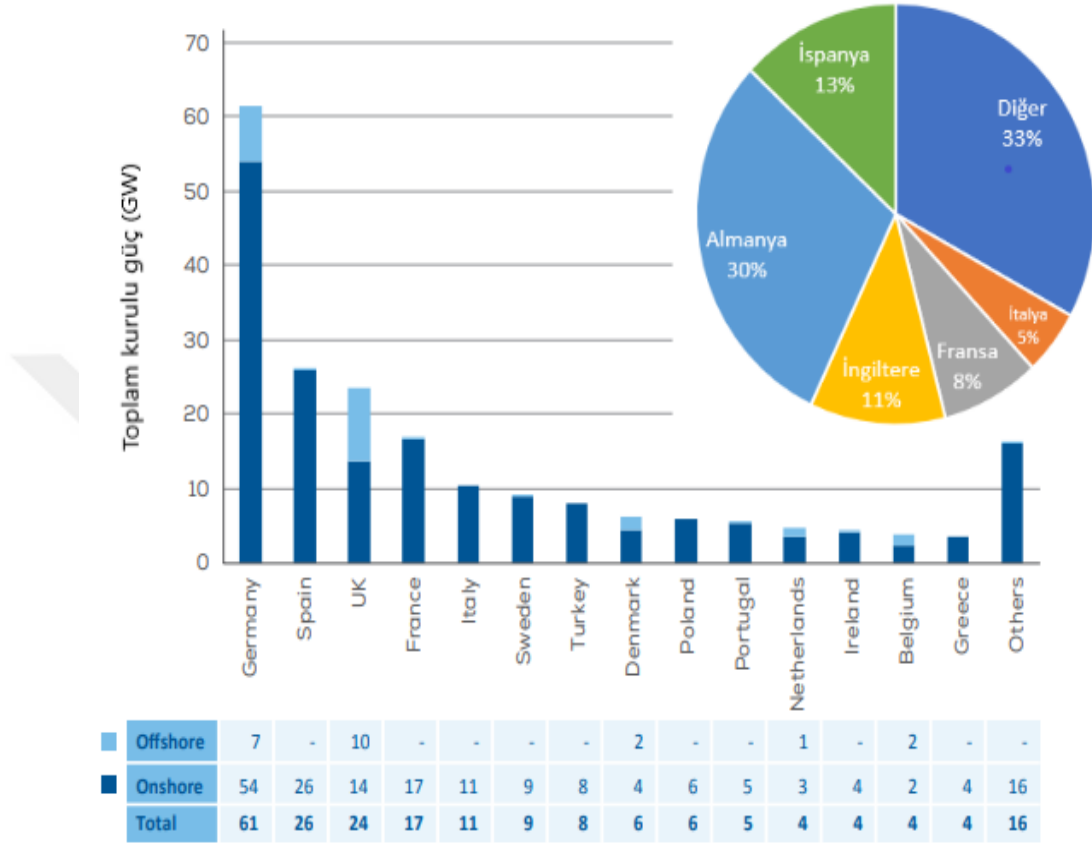
sonu için oluşturmuş olduğu raporlarından alınan Şekil 1.2 incelendiğinde, verilen grafikte dünya üzerinde 2019 yılı itibariyle toplam rüzgar enerjisi kurulu gücü 29 GW açık deniz (offshore) ve 621 GW karasal (onshore) olmak üzere toplam 651 GW olduğu görülecektir. 2001 yılında sadece 24 GW olan kurulu güç, 2019 yılı itibariyle 651 GW değerlerine ulaşmıştır. Aynı zamanda 2001 yılı itibariyle açık deniz (offshore) rüzgar enerjisinin GW düzeyinde kurulu gücü yokken 2019 yılında 29 GW düzeylerine ulaşması ve özellikle artışın 2014 yılından itibaren oransal olarak fazla olması, gelişen teknolojiyle birlikte açık deniz rüzgar enerjisini cazibeli hale getirdiği söylenebilir (GWEC, 2019).



Şekil 1.2 Küresel toplam kurulu gücün tarihsel gelişimi (GWEC, 2019)

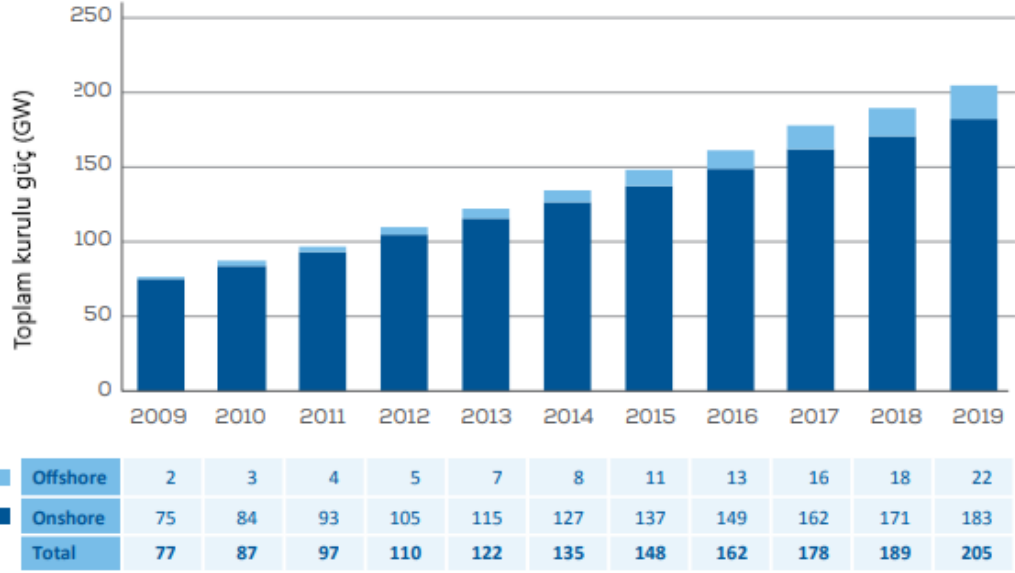
GWEC kuruluşu gibi benzer amaçlara hizmet eden bir diğer kuruluş olan *Wind Europa* da, Avrupa'daki rüzgar enerjisiyle alakalı yarıyıl ve yıllık olmak üzere raporlar hazırlayan bir kuruluştur. Avrupa, toplam 205 GW kurulu güç değeriyle dünya üzerinde rüzgar enerjisinde lider konumdadır. Şekil 1.3'de Avrupa ülkelerinin sahip olduğu toplam kurulu güç değerleri gösterilmiştir. Özellikle Almanya, İspanya ve İngiltere 20 GW değerinden fazla kurulu güce sahipken, Türkiye bu listede 8 GW kurulu güç değeriyle yedinci sırada yer almaktadır. Şekil 1.3'de görüldüğü üzere

İngiltere ve Danimarka sahip olduğu rüzgar enerji kurulu gücünün yaklaşık üçte birini açık denizden elde etmektedir (WindEurope, 2020).



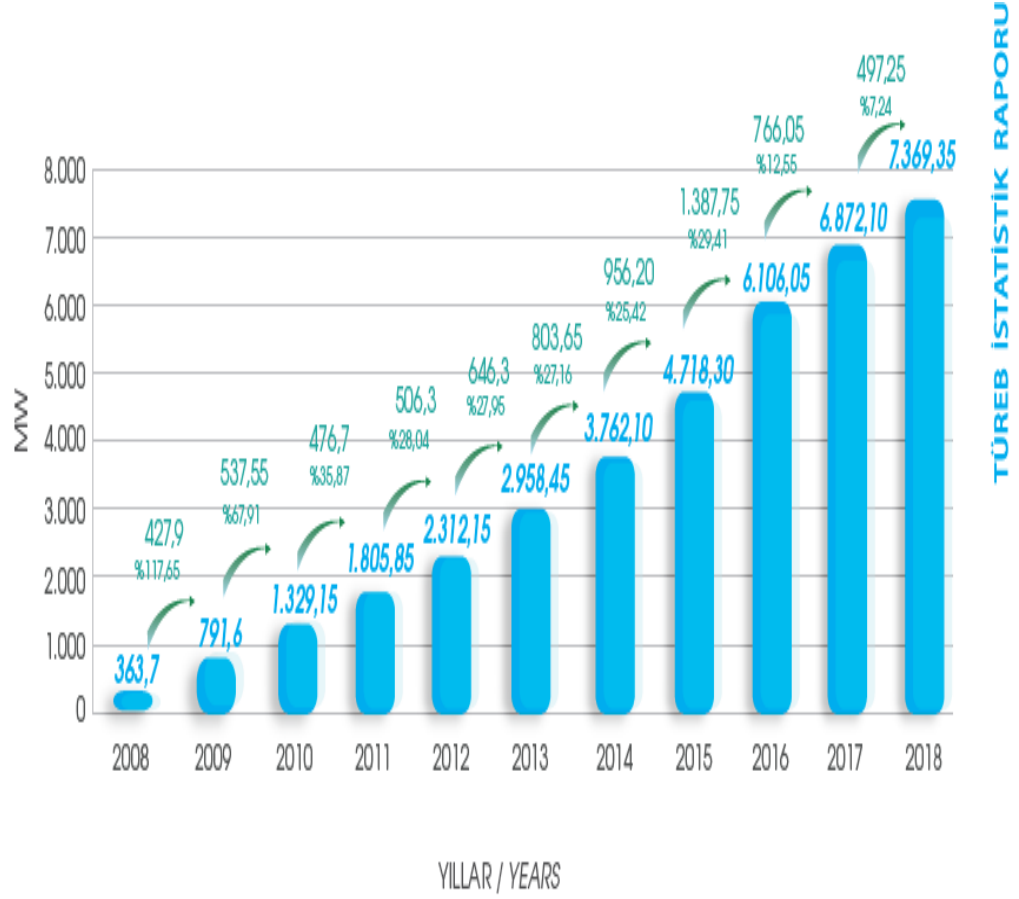
Şekil 1.3 Avrupa toplam kurulu gücün ülke bazında dağılımı (WindEurope, 2020)

Açık deniz rüzgar enerjisinin Avrupa'da göstermiş olduğu gelişimi görmek için Şekil 1.4 incelediğinde; 2009 yılında kurulu gücü sadece 2 GW olan açık deniz rüzgar enerjisinin, 2019 yılında 22 GW değerlerine ulaşarak yaklaşık 11 kat artması, açık deniz rüzgar enerjisine yönelimin boyutunu göstermektedir. Açık denizlerde sürekli ve yüksek hızlardaki rüzgarlar, rüzgar türbini tarlaları kurmak için geniş alanların mevcut olması, rüzgar türbini parçalarının karayoluyla götürülmesindeki karşılaşılan problemler açık deniz rüzgar türbinlerini olası çözüm haline getirmektedir (WindEurope, 2020).



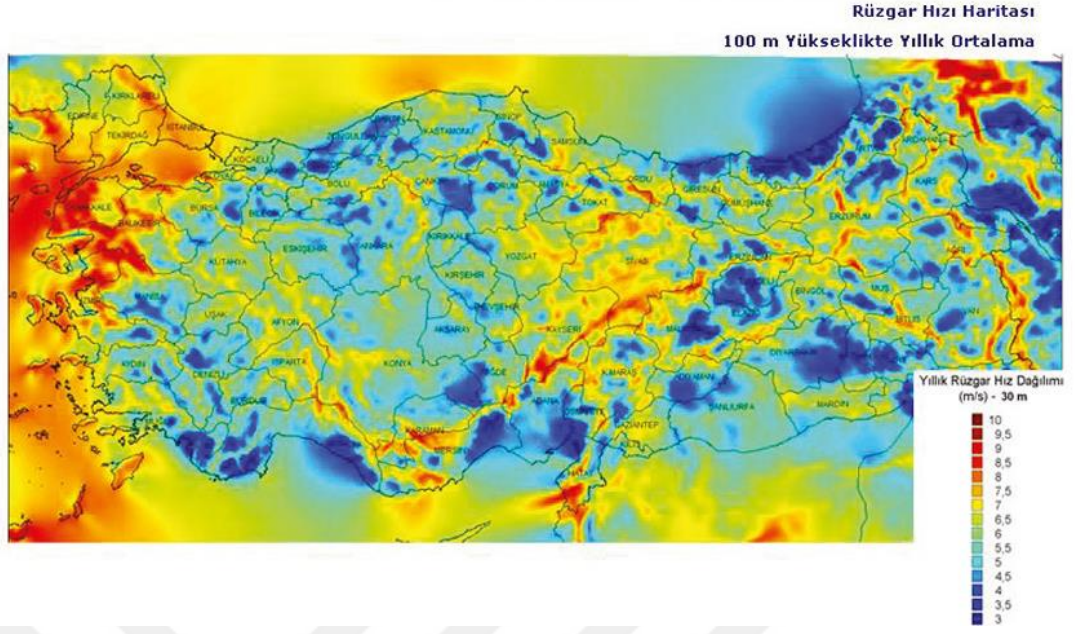
Şekil 1.4 Avrupa toplam kurulu gücün gelişimi (WindEurope, 2020)

Türkiye rüzgar enerjisi toplam kurulu gücü bakımından yaklaşık 7396 MW değeriyle Avrupa’da yedinci sıradadır. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliğinin(TÜREB) hazırlamış olduğu 2019 yılı raporunda yer alan, Şekil 1.5’de verilen grafik incelendiğinde; 2008 yılında toplam kurulu gücü 363 MW olan rüzgar enerji santrallerinin 2019 yılı sonu itibarıyla 7396 MW düzeylerine ulaştığı görülecektir. Son 10 yıl içerisinde rüzgar enerjisine yapılan yatırım ülkemiz için azımsanmayacak boyuttadır. Ülkemizde mevcut rüzgar enerji santrallerinin hepsi karasal (onshore) rüzgar enerji santralleridir. Yine aynı raporda iller bazında rüzgar enerjisi santralleri kurulu gücü değeri incelendiğinde; 1426 MW kurulu gücüyle İzmir’in ilk sırada , 1123 MW toplam kurulu gücüyle Balıkesir’in ikinci sırada ve 669 MW kurulu gücüyle Manisa’nın üçüncü sırada yer aldığı görülmektedir. Ege bölgesinde bulunan bu üç ildeki rüzgar enerji santrallerinin toplam kurulu gücü ülkemizdeki toplam kurulu gücün yaklaşık yarısını oluşturmaktadır (TÜREB , 2019).



Şekil 1.5 Ülkemizde kurulu gücün yıllara göre değişimi (TÜREB , 2019)

Ülkemiz Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) tarafından hazırlanmış Şekil 1.6'daki grafikte 100 m yükseklik için rüzgar hızı haritası verilmiştir. Ege Bölgesi kıyılarının, ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyeli açısından en yüksek bölgesi olduğu görülmektedir (EİGM, 2019). Danimarka Teknik Üniversitesi tarafından oluşturulmuş dijital küresel rüzgar atlası da incelendiğinde, 100 m yükseklik için Ege Bölgesi kıyılarının, rüzgar enerji potansiyelinin yüksek olduğu görülmektedir (Global Wind Atlas, 2020). Ege bölgesine yapılan yatırımın fazla olması, bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin fazla olmasının doğal bir sonucudur. Ülkemiz mevcut durumda açık deniz (offshore) rüzgar enerji santraline sahip değildir. Türkiye'nin üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke olması ve özellikle Ege Bölgesi'nin yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip olması bu bölgeye kıyısı olan Ege Denizi'nin açık deniz rüzgar enerjisi için uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.6 Türkiye rüzgar enerjisi atlası (EİGM, 2019)

## 1.2 Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasının amacı, Ege bölgesi ve kıyılarında yapılabilecek tekil kazık açık deniz rüzgar türbini için uygun yer seçiminin incelenmesidir. Bu tez çalışması kapsamında rüzgar atlasları ön fikir vermesi amacıyla dikkate alınmıştır. Ege kıyılarının farklı bölgelerinden alınan rüzgar verilerinin analizi WASP paket programı ile yapılmıştır. Oluşturulan dijital haritalara bölgenin pürüzlülük bilgileri işlenmiş, derinlik koşulları irdelenmiştir. Açık deniz rüzgar türbini sahaları kurmak için uygun olmayan askeri eğitim ve atış sahaları, deniz tabanı boru hatları, deniz ulaşım hatlarının bulunduğu alanlar, dalışa yasak sahalar elenmiştir.

## **BÖLÜM İKİ**

### **LİTERATÜR TARAMASI**

Açık deniz rüzgar türbinleri son 20 yıl içerisinde uygulanmaya başlayan ve gelişen bir alandır. Bu bölüm kapsamında açık deniz rüzgar türbinleri ve uygun yer seçimiyle alakalı yapılmış olan çalışmalar verilmiştir.

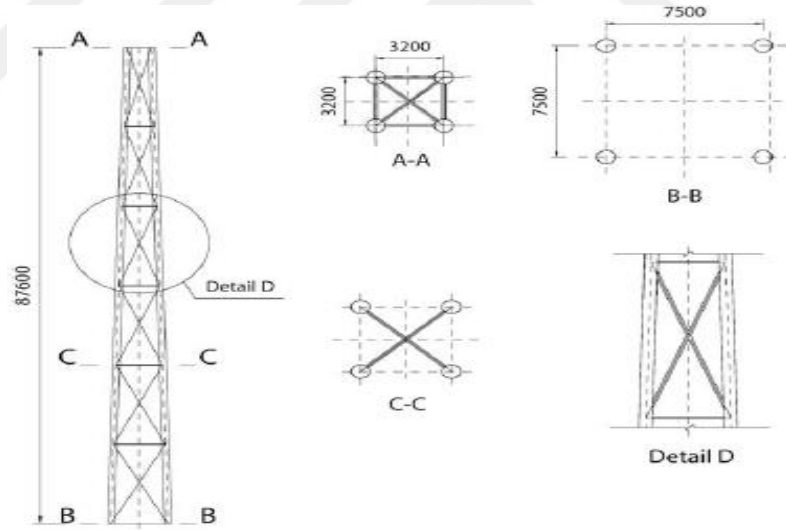
Manwell ve diğer. (2002) yapmış oldukları çalışmada, Amerika, New England bölgesi kıyıları için mevcut açık deniz rüzgar verileri ile deniz feneri vasıtasıyla toplamış oldukları yeni rüzgar verilerini karşılaştırmışlardır. Bölgede yapılabilecek rüzgar türbinlerinden yüksek verim alabilmek için öncelikle bölgenin veri kaynaklarının tutarlı olması gerektiğini ve bu verilerden uzun dönem tahminler yapabilecek istatistiksel analizlerle ilgili bilgilendirmeler yapmışlardır. Ayrıca MesoMap vasıtasıyla yeni rüzgar verisi toplamış oldukları bölgenin haritalarını yapmışlardır.

Ozerdem ve diğer. (2006) rüzgar türbini tarlaları için teknik ve ekonomik durumları incelemişlerdir. Bu çalışmada özellikle rüzgar türbini tarlalarının tasarımında kullanılan ekonomik modeller incelenmiştir. Bu modeller için karşılaştırmalar yapmışlardır.

Manwell ve diğer. (2007) yılında Massachusetts Üniversitesi'nde yapmış oldukları çalışmada, Amerika'nın kuzeydoğu kıyılarında yapılabilecek açık deniz rüzgar türbinleri ve rüzgar türbini tarlaları tasarım çalışmalarında göz önünde bulundurulması gereken koşulları beş maddede vermiş ve bunları alt başlıklar halinde incelemişlerdir. Bu başlıklar; tasarım gereklilikleri, kullanılabilir açık deniz veri kaynakları, veri tahminleri ve ekstrapolasyon teknikleri, yerinde veri toplama, muhtemel oluşabilecek kasırga, kuzeydoğu fırtınaları ve yüzen buz kütleleri gibi aşırı durumları içermektedir. Çalışma sonucunda, Amerika'nın kuzeydoğu kıyılarında yapılabilecek rüzgar türbinleri ve rüzgar türbini tarlalarında, Avrupa'daki örneklerinden farklı olarak kasırgalar ve yüzen buz kütlelerinin hesaba katılması çok detaylı şekilde incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Açık deniz rüzgar türbinlerinin, yapılacakları bölgeye özgü

özellikler gözetilerek tasarımının yapılması gerektiği, aksi takdirde istenilen verimin alınamayacağı ve istenmeyen durumların ortaya çıkabileceğini bildirmişlerdir.

Breton ve Moe (2009) yapmış oldukları çalışmada Avrupa ve Kuzey Amerika'daki mevcut açık deniz rüzgar türbini tarlalarında verimliliği düşüren etmenleri incelemişlerdir. Bu iki bölgede yapılabilecek başka rüzgar türbini tarlaları için daha teknolojik ve uygulanabilir çözümler öne sürmüşlerdir. Rüzgar tarlalarında rüzgar türbinlerinin dizilme biçiminin enerji üretimine etkisini belirtip, trapez şeklinde bir dizilimin verimli olabileceğini öne sürmüşlerdir. Özellikle rüzgar türbini gövdesi için daha hafif malzeme önerilerini sunmuşlardır. Boru şeklinden farklı olarak Şekil 2.1'de gösterildiği üzere rüzgar türbini gövde biçimini kafes sistemi şeklinde de uygulanabileceğini ve bununla ilgili konseptleri göstermişlerdir. Ayrıca rüzgar türbinleri temelleri için de daha derin sulara uygulama yapılabilecek yüzer temel örneklerini derlemişlerdir.



Şekil 2.1 Kafes sistemi biçiminde gövde detayı (Breton ve Moe, 2009)

Manwell ve McGowan (2010) rüzgar türbini ve tarlası tasarımını, uygulanmasını ve teorik olarak ele alınmasını detaylı bir şekilde çalışmaları içerisinde incelemişlerdir. Hem karasal rüzgar türbinleri hem de açık deniz rüzgar türbinleri için özellikle tasarım ve teorik bilgi açısından ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Rüzgar türbini tarihsel süreci ile başlayan çalışmada, uygun bölge seçimi, rüzgar istatistiksel analizi, rüzgar

türbinlerinin aerodinamik altyapısının incelenmesi ve iz etkisinin irdelenmesi, mekanik ve dinamik açıdan rüzgar türbinlerinin incelenmesi, açık deniz rüzgar türbinleri tasarımı ve uygulaması gibi daha bir çok başlık detaylı şekilde verilmiştir.

Taşan ve diğer. (2010) açık deniz rüzgar türbinlerinde kullanılan temel türlerinden bahsetmişlerdir. En yaygın olarak kullanılan temel tür olan tekil temel için laboratuvar ortamında yaptıkları deneysel çalışma ile açık deniz rüzgar türbini temeline etki edecek düşey yükleme ve tekrarlı yatay yüklemenin oluşturduğu deformasyonları incelemişlerdir. Laboratuvarda kullanılan tekil kazık, 2,90 m uzunluğunda ve 0,22 m çapındadır. Yapılan deneyler sonucunda kazık çapının %6'sı kadar düşey deplasman %4'ü kadar yatay deplasman gerçekleşmiştir. Kazık çevresinde oluşan çökmenin kazık çapı kadar olduğunu bildirmişlerdir.

Akdağ ve Güler (2010) Karadeniz kıyısı Amasra mevki açık deniz rüzgar türbini potansiyelini araştırmak için yapmış oldukları çalışmada, bölgenin rüzgar verilerinin analizi sonucunda ortalama aylık rüzgar hızının 10 m için 6 m/sn değerlerine kadar çıktığının belirtmişlerdir. Rüzgar güç yoğunluğunun 231, 26 W/m<sup>2</sup> düzeylerinde olup açık deniz rüzgar türbinleri için uygun bir bölge olduğunu belirtmişlerdir.

Malhotra (2011) açık deniz rüzgar türbini ve rüzgar türbini tarlasınının tasarım ve yapım aşamasında izlenmesi gereken adımları ve tasarım çalışmalarını adım adım sıralamıştır: İlk olarak olası alan ve bölgeler seçilmelidir. Rüzgar atlaslarından faydalanılarak ön değerlendirme yapılır. Aday bölgedeki rüzgar potansiyelini değerlendirmek için bölgenin rüzgar verileri analiz edilmeli. Veriler en az 12 aylık olmalı. Rüzgar potansiyeli açısından uygunsa daha sonra bölgenin karadan uzaklığına, derinlik durumuna, elektrik dağıtım şebekelerine uzaklığına, gemi rotalarındaki konumunu bakılır. Ayrıca tasarım yapılacak bölgede varsa gömülü doğalgaz-elektirik hatlarının durumuna, askeri - siyasi yasaklı alanlara ve kuşların göç yollarına bakılmalı. Bölge seçimi yapıldıktan sonra tasarım adımlarını Malhotra şu şekilde sıralamıştır: dış etkilerin değerlendirilmesi, bölgenin rüzgar potansiyeline uygun rotor çapında türbin seçimi, türbine etki eden tasarım yüklerinin belirlenmesi, derinlik ve tasarım yüklerine uygun temel seçimi, rüzgar türbini gövdesini ve temelini deniz

seviyesinde birbirine bağlayan geçiş elemanın seçimi, uygunluk analizleri ve nihai tasarım. Bu adımlar çalışma kapsamında detaylı şekilde incelenmiştir.

Güzel (2012) çalışmasında açık deniz rüzgar türbini tasarım adımlarını anlatmış, Bozcada ve Gökçeada için örnek açık deniz rüzgar türbini çalışması yapmıştır. 20 m ve 45 m olmak üzere iki farklı derinlik senaryosu için rüzgar türbini konuşturması yapmış, bu durumlar için ekonomik analiz yapmıştır.

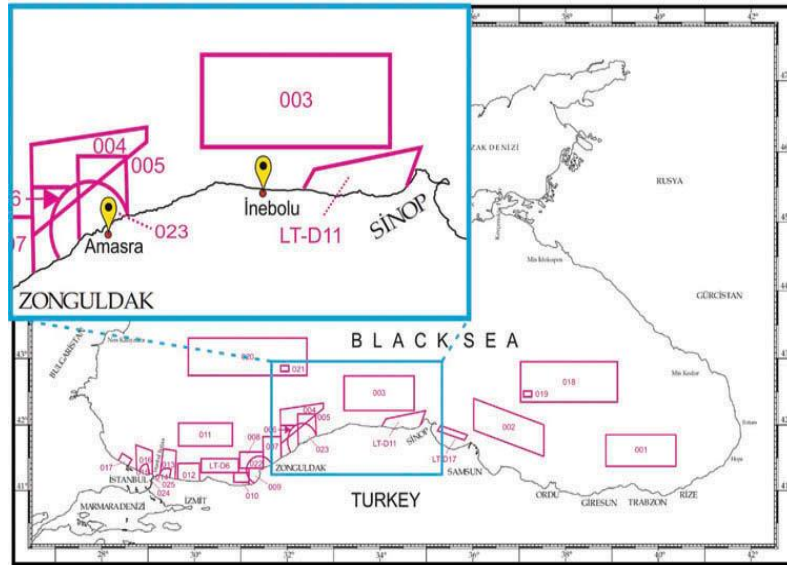
Akpınar (2013) yapmış olduğu çalışmada Karadeniz kıyısında bulunan altı meteoroloji istasyondan (Sinop, Samsun, Ordu, Giresun, Trabzon ve Hopa) 10 m yükseklikten alınan 9 yıllık saatlik rüzgar hızı verisini analiz etmiştir. Karadeniz kıyı şeridinin bir bölümündeki rüzgar enerji potansiyeli hakkında değerlendirme yapmıştır. Analiz sonucunda bu bölge için aylık rüzgar hızı ortalaması 1,53 m/s ile 4,06 m/s arasında değiştiğini göstermiştir. Sinop kıyıları yıllık rüzgar enerji yoğunluğu 525,25 kWh/m<sup>2</sup>/ değeriyle en yüksek çıkmıştır. Ayrıca Giresun istasyonundan alınan verilerin % 62,6'sı kayıp veya hatalı veri olduğu için Giresun için yapılan analizin gerçek durumu yansıtmayacağı belirtilmiştir. Hopa'nın ise % 0,7 kayıp veri ile yapılan analizler arasında en az eksik veri bulunan meteoroloji istasyonu olduğu belirtilmiştir.

Argın ve Yerci (2015) Türkiye kıyılarında olası açık deniz rüzgar türbini yapılabilecek 40 dan fazla bölgeyi incelemişlerdir. Çalışmalarında açık deniz rüzgar türbini yapılacak alanlardaki sivil havacılık uçuş alanları, deniz tabanı petrol boru hatları, askeri alanlar, balıkçıların seyir güzergahları bakımından incelemeler yapmışlardır. Datça kıyıları sivil havacılık alanı bakımından yoğun bir bölge olduğu, Çanakkale kıyıları askeri eğitim sahaları barındırdığı, Gemlik kıyıları deniz seyahat güzergahında bulunduğu için açık deniz rüzgar türbinleri açısından uygun alanlar olmadığı belirtilmiştir. Gökçeada, Bozcada, Amasra, İnebolu, Samandağ kıyıları açık deniz rüzgar türbinleri için uygun bölgeler olduğu ama buralarda da deniz derinliğinin sorun teşkil edebileceğini belirtmişlerdir.

Ostachowicz ve diğer. (2016) çalışması açık deniz rüzgar türbini tasarımı için başvurulması gereken önemli kitaplardan birisidir. Çalışmalarında açık deniz rüzgar

türbinleri tasarım adımları rüzgar tarlaları tasarımı, rüzgar türbinlerine etki eden kuvvetler ve bunların analizleri, açık deniz rüzgar türbinlerinde kullanılan yeni teknolojik malzemeler ve açık deniz rüzgar türbini bıçaklarındaki teknik boyutlar gibi bir çok konu başlığını teknik ayrıntılarla beraber incelemiştir.

Argin ve Yerci (2017) yapmış oldukları çalışmada, Karadeniz kıyısında bulunan 20 farklı lokasyondan aldıkları rüzgar verilerinin istatistiksel analizleri WAsP paket programı ile yapmışlardır. Çalışmada, bir bölgeye yapılacak açık deniz rüzgar türbinleri için yaptıkları çalışmalarında askeri atış sahalarına, gemi geçiş güzergahlarına, kara sınırlarına, sivil havacılık alanlarına, boru ve yeraltı kablo hatlarına özellikle dikkat edilmesi gerektiğini önemle vurgulamışlardır. Yapmış oldukları analizler sonucunda, özellikle İnebolu ve Amasra 172 W/m<sup>2</sup> - 273 W/m<sup>2</sup> aralığında değişen rüzgar güç yoğunluğu açısından uygun bulmuşlardır. Nitekim Şekil 2.2’de Amasra kıyılarında bulunan askeri atış sahası ve doğalgaz boru hatlarından dolayı bu bölgeye açık deniz rüzgar türbini tarlası kurulmasının uygun olmayacağını belirtmişlerdir.



Şekil 2.2 Amasra kıyılarındaki doğalgaz ve petrol hatları (Argin ve Yerci, 2017)

Argin ve diğer. (2019) yapmış oldukları çalışmada, Karadeniz, Ege ve Marmara’da kıyıya yakın 55 adet meteoroloji istasyonundan almış oldukları rüzgar verilerinin

istatistiksel analizlerini WAsP paket programı ile türbin konuşlandırmasını ise WindPro ile yapmışlardır. Siemens firmasının SWT-3.0 model rüzgar türbini kullanılarak yapılacak olan konuşlandırma senaryosu belli rüzgar hızı aralıkları için mümkündür. Özellikle türbinin devreye girdiği cut-in hızı bu gibi seneryalarda dikkate alınmalıdır. SWT-3.0 model rüzgar türbininde cut-in değeri 3,0 m/s olduğu için analizi yapılan 55 adet istasyondan 11 tanesi rüzgar güç potansiyeli ve ortalama rüzgar hızı bakımından uygulanabilir olduğu anlaşılmıştır. Türkiye kıyıları için genel bir projeksiyon verilmiştir.

Huvaj ve diğer. (2019) çalışmalarında açık deniz rüzgar türbinleri için kullanılan temel tipleri, açık deniz rüzgar türbini yapılacak bölge için temel seçimini etkileyen faktörleri ve temel tasarımını en önemli kısımlarından birini oluşturan deniz tabanı zemin araştırmalarını derlemişlerdir. Açık deniz rüzgar türbini tasarımlarıyla alakalı uluslararası teknik şartnameleri Tablo 2.1'deki şekliyle vermişlerdir.

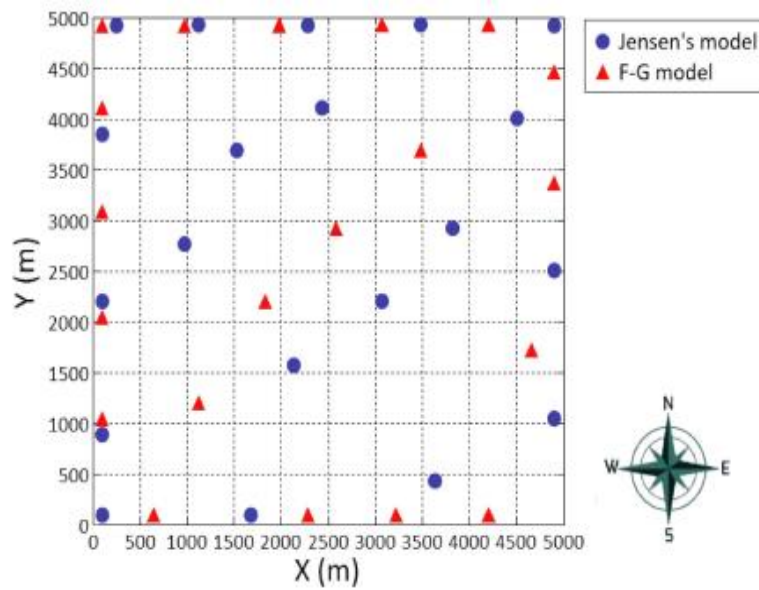
Tablo 2.1 Açık deniz rüzgar türbinleri tasarımı için kullanılan uluslararası teknik şartnameleri

| Şartname Adı                                                                                                                                                                            | Ülke             | Yıl  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------|
| ISO 19905-1: Petroleum and natural gas industries - Site specific assessment of mobile offshore units - Part 1: Jack-ups                                                                | İsviçre          | 2012 |
| API 2000: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design                                                                | -                | 2000 |
| DNVGL-RP-C212: Offshore soil mechanics and geotechnical engineering                                                                                                                     | Norveç           | 2017 |
| DNVGL-ST-0126: Support structures for wind turbines                                                                                                                                     | Norveç           | 2018 |
| DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures                                                                                                                                 | Norveç           | 2014 |
| BSH No-7004: Standard Ground Investigations - Minimum requirements for geotechnical surveys and investigations into offshore wind energy structures, offshore stations and power cables | Almanya          | 2014 |
| ISSMGE TC1: Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments                                                                                         | Birleşik Krallık | 2005 |
| DS 472: Forudsætninger for vindmøllekonstruktioner I Danmark                                                                                                                            | Danimarka        | 2007 |

Wu ve diğer. (2019) açık deniz rüzgar türbinlerinde kullanılan temeller hakkında kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Açık denizler için geoteknik hususları içeren veri tabanı oluşturulması ve açık deniz rüzgar türbini temelleri için matematiksel modellerinin oluşturulmasının, uygulamaları daha güvenli ve etkili şekilde yapılmasına olanak sağlayacağını belirtmiştir. Açık deniz rüzgar türbinlerinde kullanılan temel tiplerinden olan yüzer temel tiplerinin ilk örneklerinden bahsedilmiş, bu temel tipinin derin sularda kullanımının mümkün olabilmesi için yüzer temelleri

deniz tabanına sabitlemekte kullanılan çapa sistemlerinin ve hidrodinamik bağlama sistemlerinin gelişmesi gerektiğini bildirmişlerdir.

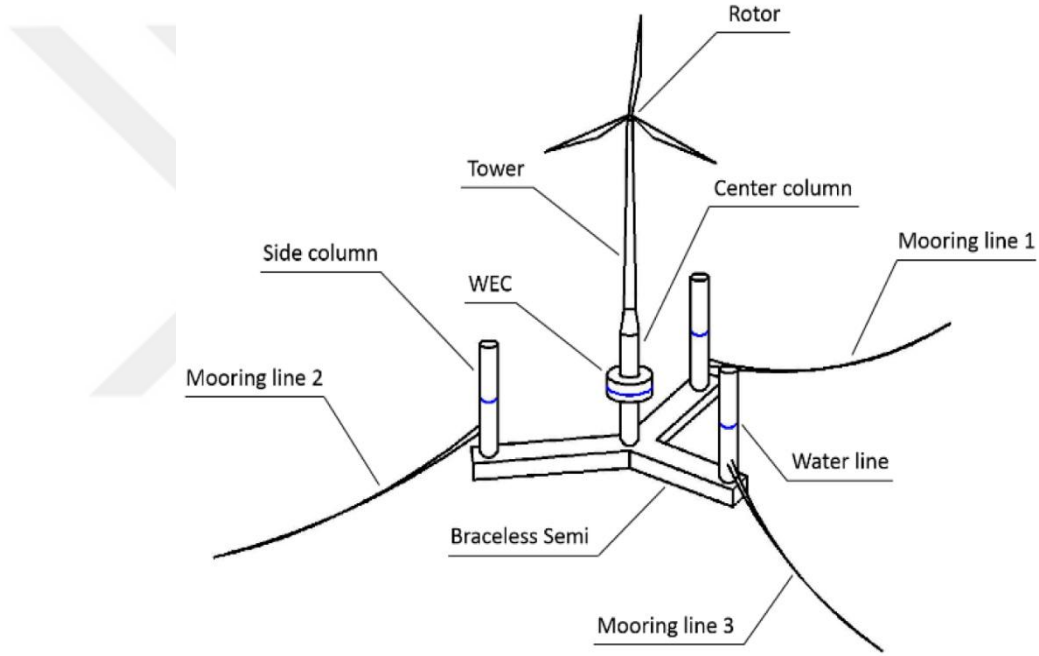
Tao ve diğer. (2019) offshore rüzgar türbinlerinden oluşan rüzgar tarlalarında rüzgar türbinlerinin birbirlerine göre en uygun konumda yerleştirilmesi önemli bir konudur. Rüzgar türbinlerinin arkasında oluşan iz etkisi enerji verimini düşürmektedir. Araştırmacılar bu etkiyi en aza indirecek şekilde rüzgar türbinlerini konuşlandırabilmek için çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada Jensen's, Frandsen ve Jensen-Gaussian (J-G) modeli gibi iz etkisinin analitik modellerinden bahsedilmiştir. Bu modeller arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında Frandsen-Gaussian (F-G) iz etkisi modeli incelemişlerdir. Bu modelin Jensen's, modeli ile karşılaştırılması yapılmıştır. (F-G) ile Jensen's modelleri kullanılarak ve rüzgar türbinlerinin yerleştirilmesinde kullanılan HGWO isimli özel bir algoritma ile türbin konuşlandırılması Şekil 2.3' de gösterildiği gibi verilmiş ve bu senaryo için ekonomik bir analiz yapılmıştır.



Şekil 2.3 F-G ve Jensen's modelleriyle yapılmış iki farklı rüzgar türbini yerleşim planı (Tao ve diğer. 2019)

Wang ve diğer. (2020) yapmış oldukları çalışmada, hem açık deniz rüzgar türbini hem de dalga enerjisinden faydalanarak elektrik üreten bir sistemin konsept çalışmasını yapmışlardır. 5 MW güce sahip yarı batık yüzer açık deniz rüzgar türbinin

gövdesinin deniz seviyesiyle buluştuğu noktaya, dalga enerjisini elektrik enerjisine çeviren bir sistem yerleştirip, bu sistemin matematiksel analizini ve paket program üzerinde modellenmesi yapmışlardır. Şekil 2.4’de yarı batık platformun açık denizde oluşan dalga hareketi ile yukarı aşağı hareketi sonucunda dalga enerjisi dönüştürücü (WEC:wave energy converter) vasıtasıyla dalga enerjisini elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Çalışmada konseptin nümerik analizleri yapılmıştır. Açık deniz rüzgar türbinine etki edecek rüzgar, dalga gibi dış kuvvetlerin etkisini incelemek için ANSYS paket programı ile modelleme yapılmıştır. Açık denizlerdeki en önemli iki enerji kaynağı için yapılan tasarım gelecek için ümit vericidir.



Şekil 2.4 Açık deniz rüzgar türbini ve dalga enerji dönüştürücü birleşik tasarım (Wang ve diğer., 2020)

Penna (2020) çalışmasında erken modern dönemi (M.S 400-1750), çağdaş tarih dönemi (1800-1945) ve modern dönemi (1945 yılından sonra) kapsayacak şekilde enerji kullanımındaki kaynakların değişimini anlatmıştır. İnsanoğlu, erken modern dönemde organik enerji kaynaklarından faydalandığı bir dönem geçirmiştir. Erken modern dönemin sonlarına doğru insanoğlu, rüzgar ve su enerjisinden az da olsa faydalanabileceği sistemleri kullanmıştır. Çağdaş tarih döneminde mineral enerji rejimi (kömür ve petrol) ortaya çıkmış, insanoğlunun temel enerji kaynakları bunlar olmuştur. Çağdaş tarih döneminde de özellikle Avrupa’da yel değirmenleri ve su

değirmenlerinin kullanıldığını belirtmiştir. Şekil 2.5’de Londra’da Wimbledon yel değirmeni müzesinde olan 1800’lü yıllarda Wimbledon Common bölgesinde bulunan bir yel değirmeninin George Cooke tarafından çizilmiş bir resmi yer almaktadır. Çağdaş tarihin sonlarında ve modern dönemde en çok gelişen enerji kaynakları yenilenebilir enerji kaynakları olmuştur. Bu dönem için ise yenilenebilir enerji kaynakları rejimi demmiştir. Çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisi için bir bölüm yazmıştır. Bu bölüm içerisinde açık deniz rüzgar türbinleriyle alakalı; açık deniz rüzgar enerjisinin gelişimi, dünya üzerindeki mevcut durumu ve gelecek yıllar için bir projeksiyondan bahsetmiştir.



Şekil 2.5 Wimbledon yel değirmeni müzesinde bulunan 1800’lü yıllarda George Cooke tarafından yapılmış bir resim (Penna, 2020)

Ucar ve Balo (2020) Türkiye kıyılarında bulunan 12 adet ilden (Balıkesir, İstanbul, Tekirdağ, İzmir, Muğla, Antakya, Mersin, Antalya, Sinop, Bartın, Ordu) alınan rüzgar verilerinin analizini yaparak Türkiye kıyı bölgeleri için bir projeksiyon yapmayı amaçlamışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda Çanakkale ve Balıkesir arası kıyı bölgeleri yıllık rüzgar hızı ortalaması bakımından en yüksek bölge olduğunu

belitmişlerdir. İstatiksel analizde Weibull dağılımı kullanılmıştır. Veriler için ortalama yıllık Weibull şekil parametresinin ( $k$ ) 1,54 ile 1,86 arasında değişirken, ortalama yıllık ölçek parametresinin ( $c$ ) ise 2,52 m/s ile 8,34 m/s arasında değiştiğini göstermişlerdir.



## **BÖLÜM ÜÇ**

### **RÜZGAR ENERJİSİ**

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi uzun yıllardır insanlar tarafından kullanılmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte karalara kurulan rüzgar türbinleri açık denizlerde de uygulama alanı bulmuştur. Bu bölüm içerisinde rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimden bahsedilmiş ve rüzgar enerjisinin teknik boyutu incelenmiştir.

#### **3.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi**

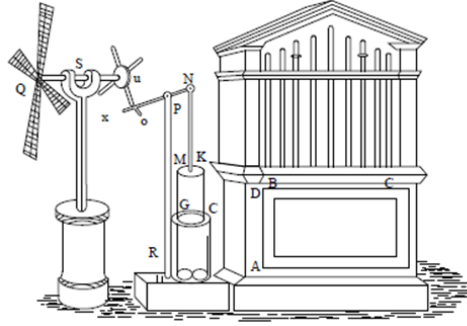
İnsanoğlu, rüzgar enerjisini tarihin çok eski yıllarından beri çok farklı alanlarda kullanmaktadır. Erken tarihlerde rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye çevirerek kullanımı görülmektedir. M.Ö 3000 yıllarından itibaren rüzgar enerjisinden, yelkenli gemilerde, modern rüzgar türbinlerinin atası olarak kabul edilen yel değirmenlerinin suyun yükseltilmesi ve pompalanmasında, tarım ürünlerinin öğütülmesinde, odun kesme gibi çok çeşitli alanlarda faydalanılmıştır (Manwell ve McGowan, 2010).

Rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimini incelerken karşımıza yel değirmeni ve rüzgar türbini olarak iki terim çıkmaktadır. Kullandıkları enerji kaynağının aynı olmasına karşın dönüştürdükleri enerji türü farklı olduğu için birbirine karıştırmamak gerekir. Yel değirmenleri rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirirken, modern rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çevirmektedir (Penna, 2020). Bu iki türün tarihsel gelişimi alt başlık olarak verilecek ve daha sonra açık deniz rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi incelenecektir.

##### **3.1.1 Yel Değirmenlerinin Tarihsel Gelişimi**

Yel değirmenlerinin suların yükseltilmesi ve tarım ürünlerini öğütme işleminde kullanımı millattan önceye dayanmaktadır. Özellikle bugün Tibet, Çin, Afganistan, İran'ın bulunduğu bölge yel değirmenlerinin ortaya çıktığı yerler olarak düşünülmektedir. Ama yel değirmenleriyle alakalı bilinen en eski yazılı örnek antik

çağa dayanmaktadır. Bugünkü Mısır topraklarında yaşamış, İskenderiyeli Heron olarak bilinen Yunan matematikçinin *Pnömatika* adlı kitabında yel değirmeni örneği bulunmaktadır. Şekil 3.1’de İskenderiyeli Heron’nun tasarladığı yatay eksenli yel değirmeninin görseli bulunmaktadır. İskenderiyeli Heron’nun yaşadığı tarihler tam olarak bilinmese de M.Ö 10 ile M.S 70 yılları arasında yaşadığı kuvvetle muhtemel olduğu tarihçiler tarafından belirtilmektedir (Manwell ve McGowan, 2010).



Şekil 3.1 Heron'un yel değirmeni (Manwell ve McGowan, 2010)

M.S 700’lü yıllarda yapıldığı düşünülen, İran’nın doğusunda bulunan Sistan bölgesindeki yel değirmenleri ise bilinen en eski düşey eksenli yel değirmenleridir. Şekil 3.2’de Sistan bölgesinde bulunan yel değirmenleri gösterilmiştir. Bu yel değirmenleri, bölge insanı tarafından tarım ürünlerinin öğütülmesi işleminde hala kullanılmaktadır. Bunlar bilinen en eski iki yel değirmeni örneği olup modern rüzgar türbinlerinin ataları olarak kabul edilmektedir (Shepherd, 1991).



Şekil 3.2 Düşey eksenli yel değirmenleri, Sistan İran (Ramin, 2012)

Yel değirmenlerinin Avrupa'daki ilk örnekleri 12. yüzyılda ortaya çıkmıştır. Bu kayıtları teşkil eden yel değirmenlerinin, 10-11. yüzyılda Orta Doğu topraklarına yapılan Haçlı Seferleri ile Avrupa'ya geldiği düşünülmektedir. Avrupa'da ortaya çıkan yel değirmenleri İran'ın Sistan bölgesindeki türbinlerinden farklı olarak yatay eksenli yel değirmenleriydi. Avrupa'nın kuzeyinde tasarlanan yatay eksenli yel değirmenleri, yüksek rüzgar hızlarında düşey eksenli rüzgar türbinleri kadar kolay parçalanmadığı için tercih edilmiştir. Şekil 3.3'de görülen, bugün Hollanda'nın simgesi olan Hollanda tipi yel değirmenleri, Avrupa'da çok yaygınlaştı. Bu yel değirmenleri Avrupalılar tarafından suların pompalanması, tarım ürünlerinin öğütülmesi, odunların kesilmesi gibi çeşitli amaçlara hizmet edecek şekilde kullanılmıştır (Manwell ve McGowan, 2010).



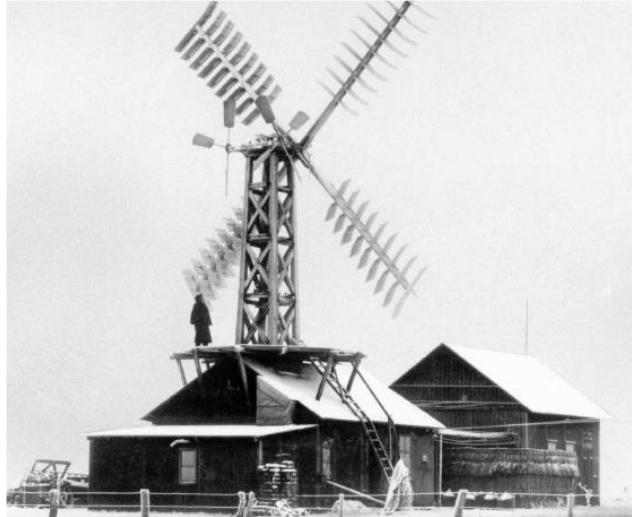
Şekil 3.3 Hollanda tipi yel değirmenleri (Holland, 2019)

Sanayi Devrimiyle birlikte, üretimlerin artması, buhar makinelerinin kullanımı ve yaygınlaşması, kömür, petrol gibi fosil yakıtların buhar makinelerinde yakıt olarak kullanılması rüzgar enerjisine yönelimi azaltmıştır. Yel değirmenleri, Sanayi Devrimiyle birlikte çok azalmış, 19. yüzyılın sonlarına doğru ampulün icadı ve alternatif akımın bulunması yani elektriğin kullanımıyla birlikte, yerini rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çeviren rüzgar türbinlerine bırakmaya başlamıştır. Yel değirmenleri yaklaşık olarak 1900 yıl insanlığın ihtiyaçlarına hizmet etmiştir. Yel değirmenleri modern anlamdaki rüzgar türbinlerinin atası olarak kabul edilmektedir (Kocatürk ve Ünsan, 2015).

### 3.1.2 Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi

Elektriğin geniş alanlarda kullanımı, ilk elektrik santral tesislerinin doğmasına sebep olmuştur. Dünya üzerindeki ilk elektrik santrali 1882 yılında Amerika'nın New York şehrinde kurulmuştur. 500 kW güç çıkışına sahip olan bu tesisin ardından, Berlin'de 1884 yılında ikinci elektrik santrali kuruldu. Fabrikalaşma ve şehirleşmenin artması ile birlikte Avrupa ve Amerika'da elektriğe olan ihtiyaç da artmıştır (Penna, 2020).

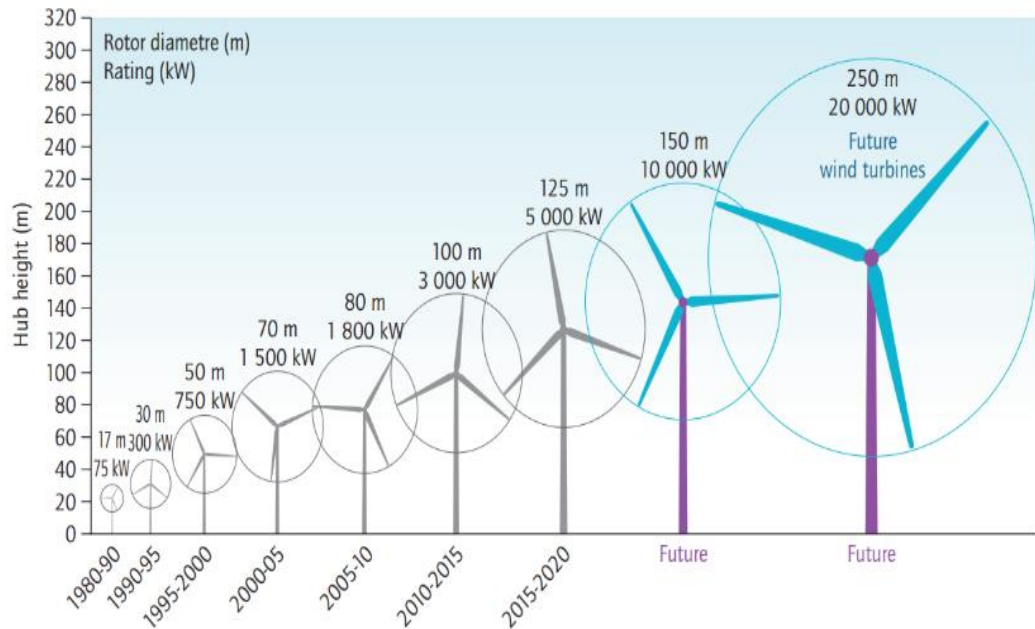
Kırsal alanlarda elektrik ağının yaygınlaşması çok yavaş ilerlemekteydi. Elektrik üretilen santrallerden kırsal alanlara elektriğin ulaştırılması ciddi kablo ve ulaşım maliyetleri oluşturmaktaydı. Kırsal alanlarda yaygın şekilde kullanılan yel değirmenleri, elektrik üretilebilmek için kullanılabilir mi sorusu ilk rüzgar türbinlerinin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Nitekim, Amerika'da su pompalamak için rüzgar türbininde elektrik üretme denemeleri gerçekleştirilmiştir. Ama ilk sistematik anlamda rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çeviren rüzgar türbini Danimarka'da uygulanmıştır (Hau, 2013).



Şekil 3.4 Paul La Cour'un rüzgar türbini, Askov, Danimarka (Hau, 2013)

Şekil 3.4'de verilen, 1891 yılında yapılan, 23 m rotor çapıyla 89 kW elektrik enerjisi üreten ilk rüzgar türbini, Paul La Cour tarafından Danimarka'da kurulmuştur.

Birinci Dünya Savaşı'ndan dolayı fosil yakıtlarının fiyatının çok yükselmesi rüzgar türbinlerine olan ilgiyi arttırmıştır. 1918 yılı itibariyle Danimarka'da 120 adet rüzgar türbini bulunmaktaydı. 1920'den sonra rüzgar türbinleri Amerika başta olmak üzere bir çok ülkede artış göstermeye başladı. İkinci Dünya Savaşı'nın ardından oluşan ekonomik krizler ve enerji krizi, ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. 1900 yılların başında kW düzeyinde güç üretebilen rüzgar türbinleri, 2000'li yıllarda 4-5 MW güç üretebilen rüzgar türbinlerine dönüşmüştür. Rotor çapları ise 150 m değerlerine ulaşmıştır. 1980'li yıllardan 2020'li yıllara kadar rüzgar türbinlerinin boyutlarının değişimi ve rotor çaplarının değişimi Şekil 3.5'de verilmiştir. Rüzgar türbinlerinin ilk uygulamaları, genellikle kırsal kesimlerde su pompalanması gibi işlerde kullanılmak üzere inşa edilirken, bu günlerde şehirlerin ve fabrikaların elektrik ihtiyacını karşılamak üzere açık denizlere uygulanmaktadır. Rüzgar türbinlerindeki sıçramalar, global savaşıardan sonra ortaya çıkan kaynak sıkıntılarından dolayı yaşanmıştır. Özellikle 1970-1980'li yıllarda yaşanan enerji ve petrol krizinden sonra rüzgar türbinlerine yönelim artmıştır. Küresel ısınma ve atmosferdeki sera gazlarının fosil yakıtlarından dolayı artışı küresel çapta önlemler alınmasına zemin hazırlamış ve rüzgar enerjisine yönelimi arttırmıştır (Manwell ve McGowan, 2010; Hau, 2013).



Şekil 3.5 Rüzgar türbinlerinin gelişimi (WindEurope, 2020)

### ***3.1.3 Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi***

Açık deniz rüzgar türbinlerinin fikir olarak ilk ortaya çıkışı 1970’li yıllara dayanmaktadır. Birçok araştırmacı bu konuyla alakalı kuramsal çalışmalar ortaya koymuşlar ve bunlarla ilgili görseller yapmışlardır. Ama somut olarak ilk test amaçlı açık deniz rüzgar türbini Norveç Nordersund’da 1990 yılında kurulmuştur. Bu tesis, ticari bir nitelik taşımamakla beraber rüzgar türbini tarlası mahiyetinde de değildi. Bu bağlamda, ilk ticari açık deniz rüzgar tarlası, 1991 yılında Danimarka Vindeby’de kurulmuştur. Bu rüzgar tarlası kıyıdan 2 km uzaklıkta olup, maksimum su derinliği 4 m olan bir bölgeye yapılmıştır. Rüzgar tarlası 11 adet rüzgar türbininden oluşmaktadır ve kurulu gücü 4,95 MW değerindedir. 2016 yılına kadar aktif çalışmaya devam eden tesis, ekonomik ömrü dolduğu için kapatılmıştır. Yaklaşık olarak her yıl 3000 evin ihtiyacını karşılayacak kadar yıllık güç çıkışı sağlamıştır. Danimarka’daki bu örnekten sonra açık deniz rüzgar enerjisi, Avrupa’da hızlı şekilde artmaya başlamıştır. Özellikle İngiltere, Almanya, İsviçre gibi ülkelerde geniş rüzgar türbini tarlaları kurulmuştur. Daha sonra Amerika ve Çin ilk açık deniz rüzgar tarlalarını kurmuşlardır (Hau, 2013).



Şekil 3.6 Vindeby açık deniz rüzgar türbinleri (Nikolaos, 2004)

Avrupa, açık deniz rüzgar enerjisinde dünyaya öncülük etmektedir. Avrupa'daki farklı ülkelerde bulunan geniş çaplı açık deniz rüzgar tarlaları ciddi kurulu güçlere sahiptir. Örneğin; İngiltere'de bulunan, 3 etaptan oluşan Hornsea rüzgar tarlası projesinin 1.etabı 2019 yılında elektrik üretmeye başlamıştır ve kurulu gücü 1200 MW (1,2 GW) değerindedir. 174 adet rüzgar türbini ihtiva eden Hornsea rüzgar tarlası, kurulu güç açısından, dünya üzerindeki en büyük açık deniz rüzgar tarlası olma özelliğini taşımaktadır. Yaklaşık 30 yıl içerisinde ilk kurulan açık deniz rüzgar tarlasından bu güne kadar açık deniz rüzgar enerjisinin gelişimi aşıkardır. Yeni teknolojilerle birlikte açık deniz rüzgar enerjisi tasarımı ve uygulamalarında daha etkili çözümler ortaya çıkmıştır. Açık deniz rüzgar enerjisinin gelişimi teknolojinin gelişimiyle paralellik göstermektedir. Özellikle derin sulara yapılacak rüzgar türbinleri bu sektörün daha fazla gelişmesinde katkı sağlayacaktır (Power Technology, 2019).

Ülkemizde mevcut durumunda açık deniz rüzgar tarlası veya türbini bulunmamaktadır. Yapılan araştırmalarda özellikle Ege Denizi ve Marmara kıyıları açık deniz rüzgar enerjisi açısından verimli araziler olarak görülmektedir. Bunlar haricinde Karadeniz kıyıları ve İskenderun körfezi içinde çalışmalar mevcuttur. 2018 yılında, T.C Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı Ege ve Marmara kıyılarında 1200 MW kurulu güce sahip açık deniz rüzgar türbinleri için ihale yapılacağını ifade etmiştir. Önümüzdeki yıllar içinde Türkiye'de açık deniz rüzgar tarlaları kurulması için çalışmalar olacaktır (TÜREB , 2019).

### **3.2 Rüzgar Türbinlerinin Kısımları**

Manwell ve McGowan (2010) rüzgar türbinlerini, rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çevirebilen makineler olarak tanımlamaktadırlar. Rüzgar türbinlerinin atası olarak kabul edilen yel değirmenleri, rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirmektedir. Rüzgar türbinleri de direkt olarak rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çevirmemektedir. Öncelikle rüzgar enerjisi mekanik enerjiye çevrilip ve daha sonra bu mekanik enerji, elektrik enerjisine çevrilmektedir. Bu bakımdan yel değirmenleri rüzgar türbinlerinin bir parçası olarak düşünülebilir.

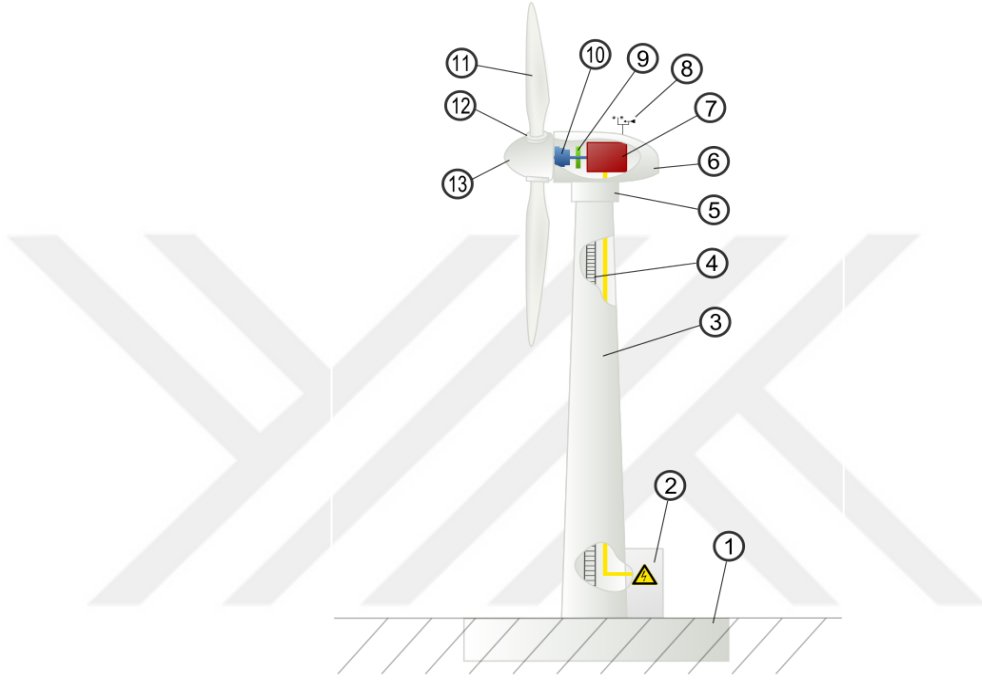
Rüzgar türbinlerinin; temel yapıları, kule şekilleri, kanat sayısı bakımından farklı türleri mevcuttur ama en temel ayırım yatay eksenli ve düşey eksenli rüzgar türbinleri olmak üzere iki çeşittir. Kullanılan mevcut rüzgar türbinleri genellikle yatay eksenli rüzgar türbinleridir. Bu iki farklı rüzgar türbininin hem karada hem de açık denizde uygulamaları mevcuttur. Şekil 3.7’de düşey eksenli rüzgar türbinlerinin örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.7 Düşey eksenli rüzgar türbinleri (Gehlot, 2018)

Rüzgar türbinleri yapıları gereği kompleks makinelerdir. Bir bütün olarak düşünüldüğünde rüzgar türbini olarak adlandırılan bu makine, bileşenleri incelendiğinde bir çok farklı sistemi içinde barındırmaktadır. Rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çevrilmesini sağlayan hareketli döner sistemler, yapının ayakta kalmasını sağlayan kule-temel bileşenleri ve üretilen elektriği kablolar vasıtasıyla trafolarla aktaran kablo sistemleri, rüzgar türbininin en temel bileşenleridir. Şekil 3.8’ de yatay eksenli bir rüzgar türbininin sahip olduğu parçalar gösterilmiştir. Rüzgar türbininin şematik gösterimi kara üzerine kurulan bir uygulamayı temsil etmektedir. Açık denizlerde kullanılan rüzgar türbinleri temel ve gövde açısından farklılıklar arz

etmektedir. Numaralı olarak verilen kısımlar sırasıyla; 1.Temel, 2. Elektrik şebekesi bağlantı kutusu, 3. Rüzgar türbini kulesi, 4. Erişim merdiveni, 5. Rüzgar yönü diski, 6. Motor kutusu (*Nacalle*), 7. Jeneratör, 8. Anemometre, 9. Fren sistemi, 10. Şanzıman kutusu (*Gearbox*), 11. Kanat (*Rotor Blade*), 12. Kanat yönü kontrolü, 13. Kanat göbeği'dir (*Rotor Hub*) (Bianchi ve diğer., 2007).



Şekil 3.8 Yatay eksenli rüzgar türbini parçaları (Bianchi ve diğer., 2007).

Temel ve kule kısmı rüzgar türbininin maruz kaldığı statik ve dinamik yükleri taşıyan kısımlardır. Rüzgar türbinleri binlerce tonlara varan ağırlıklara sahip yapılardır. Aynı zamanda rüzgar gibi ciddi dinamik kuvvetlerin etkisi altında bulunmaktadır. Bundan dolayı rüzgar türbinlerinin kule ve temel kısımları bu yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Kule kısmı genellikle boru şekilde olmakla beraber farklı tasarımları da mevcuttur. Kulenin içindeki erişim merdiveni, olası arıza durumlarında motor kutusuna müdahale olanağı sunmaktadır. Çelik, kulelerde en çok kullanılan yapı malzemesidir (Hau, 2013).

Motor kutusu (*Nacalle*) içerisinde rüzgar enerjisini mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine çeviren şaft, şanzıman ve dişli sistemleri yer almaktadır. Kanatların

hareketiyle birlikte motor kutusu içerisindeki düşük hızlı şaft açısal hızla dönmektedir. Şanzıman kutusu düşük devirle dönen şaftı yüksek devirlere çıkarmaktadır. Bu hareket enerjisi, jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Ayrıca motor kutusunun içinde fren sistemleri bulunmakta ve yüksek hızlarda hareketi engellemektedir (Hau, 2013).

Kanatlar rüzgar vasıtasıyla dönen aksamlardır. Kanatlar ve motor kutusunun arka kısmında bulunan anemometreler vasıtasıyla rüzgar yönüne göre rüzgar türbinin göbek kısmı ve kanatları dönmektedir. Açıları değiştirilerek rüzgarın tam karşıdan alınması sağlanmaktadır. Bu sistem rüzgardan maksimum verimi alabilmek için yapılmaktadır (Manwell ve McGowan, 2010).

### 3.3 Rüzgar Enerjisi Dönüşümünün Fiziksel Prensipleri

Rüzgar türbininin en önemli bileşenlerinden olan dönüşüm elemanlar, hareket eden havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedir. Bu enerji dönüşüm işleminin dayandığı fiziksel prensipler bulunmaktadır. Rüzgar enerjisinin dönüşümünü kavrayabilmek için bu prensipleri anlamak önem arz etmektedir (Hau, 2013).

Rüzgar enerjisinde hareket halinde olan madde havadır. Hareket halinde olan her madde hızının karesi ve kütlesiyle doğru orantılı olmak üzere kinetik enerjiye haizdir. Kütlesi ( $m$ ) hızı ( $v$ ) olan hareket eden havanın kinetik enerjisi ( $E_k$ ); (Denklem 3.1)

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

Hareket eden havanın belirli bir ( $A$ ) alanından ( $v$ ) hızıyla geçmesiyle oluşan hacimsel debide ( $\dot{V}$ ) olmak üzere ; (Denklem 3.2)

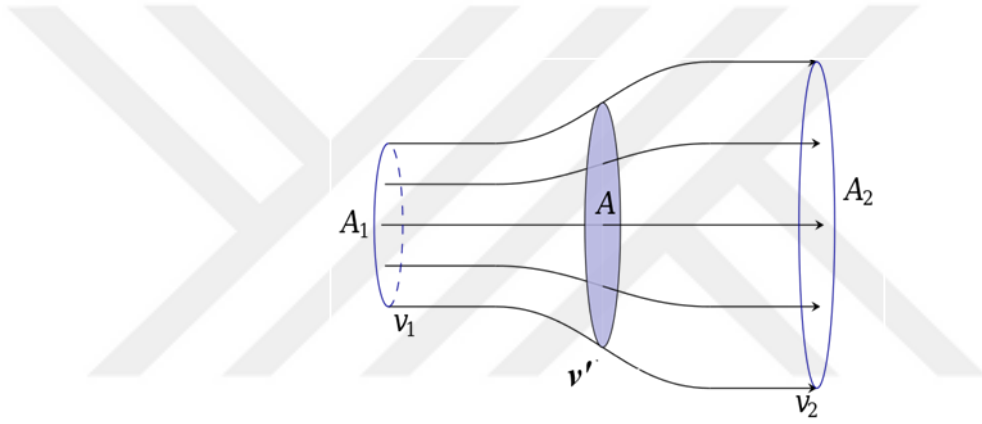
$$\dot{V} = vA \quad (3.2)$$

Havanın yoğunluğuna ( $\rho$ ) denilirse kütleli debi ( $\dot{m}$ ); (Denklem 3.3)

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

Denklem 3.1'deki kütle yerine birim zamanda birim alandan geçen kütle yani kütleli debi ifadesi yerleştirilirse  $v$  hızına sahip rüzgardan elde edilebilecek güç ( $P$ ) bulunur (Denklem 3. 4)

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (3.4)$$



Şekil 3.9 Rüzgar türbini akım borusu (Bianchi ve diğer., 2007)

Rüzgar türbinlerinde mekanik enerji, rüzgarın kinetik enerjisi vasıtasıyla elde edilmektedir. Şekil 3.9'da  $A$  ile tanımlanan alan rüzgar türbini kanatları tarafından süpürülen alandır. Rüzgar  $A_1$  alanından akım borusuna  $V_1$  hızıyla giriş yapıp,  $A$  alanına haiz rüzgar türbininden geçerek, türbinin arka tarafındaki  $A_2$  alanından  $V_2$  hızıyla çıkmaktadır. Türbin önündeki kinetik enerjinin bir kısmı türbinde mekanik enerjiye dönüşeceği için türbin arkasındaki hızın azalması olasıdır. Kütleli debi sabit olduğu için hızın azalmasından dolayı türbin arkasındaki  $A_2$  alanı  $A_1$  alanından büyüktür (Bianchi ve diğer., 2007).

Türbindeki mekanik enerji, türbinden önceki akımın gücüyle türbinden sonraki akımın gücünün farkına eşittir (Denklem 3.5 ve Denklem 3.6).

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 \quad (3.5)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (3.6)$$

Kütlesel debi türbin önünde ve arkasında sabit olduğu için (Denklem 3.7)

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \quad (3.7)$$

Denklem 3.6 kütleli debinin sabit olmasından dolayı Denklem 3.8 yazılabilir.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.8)$$

veya

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.9)$$

Denklem 3.9 incelendiğinde, elde edilebilecek en yüksek güç değeri  $v_2$  hız değeri '0' olduğu zaman gerçekleşmektedir. Denklem 3.7'de  $v_2$  değeri '0' olarak yazılırsa, eşitlik gereği  $v_1$  değerinin de sıfır olması gerekmektedir. Bu fiziksel olarak anlamsız bir durumdur. Güç değerinin maksimum olacağı nokta belirli bir  $v_1/v_2$  oranında mümkündür ve bu sonuç fiziksel olarak anlamlıdır. Bu orana ulaşabilmek için bir başka eşitlik ile mekanik güç tanımlanmalıdır. Hareket eden havanın rotor üzerinde itki kuvveti, momentum korunumu kanunuyla Denklem 3.10 yazılabilir (Manwell ve McGowan, 2010).

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (3.10)$$

Etki-tepki kuralı gereği Denklem 3.10'daki kuvvete denk bir kuvvet rotor tarafından havaya uygulanmaktadır. Bu itki, hava kütleli  $v'$  hızıyla akım düzleminde itmektedir. Gerekli güç Denklem 3.11'de verilmiştir.

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (3.11)$$

Rüzgar akımından elde edilebilecek mekanik enerji, hem Denklem 3.11'den hem de Denklem 3.8'den elde edilmektedir. Bu iki denklem birbirine eşitlenerek,  $v'$  hızı  $v_1$  ve  $v_2$  cinsinden yazılabilir (Denklem 3.12 ve Denklem 3.13).

$$\frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (3.12)$$

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (3.13)$$

Böylece, türbin kanatlarının süpürdüğü A alanındaki hız, türbin öncesi ve sonrasındaki hızların ( $v_1$  ve  $v_2$ ) aritmetik ortalamasına eşittir (Denklem 3.14).

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (3.14)$$

Böylece, kütleli debi Denklem 3.15 biçiminde yazılabilir.

$$\dot{m} = \rho v' A = \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \quad (3.15)$$

Rotordan mekanik güç çıkışı (Denklem 3.16):

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \quad (3.16)$$

Türbin önünde  $v_1$  hızına sahip bozulmamış rüzgar akımından elde edilebilecek güç Denklem 3.17'de gösterilmiştir.

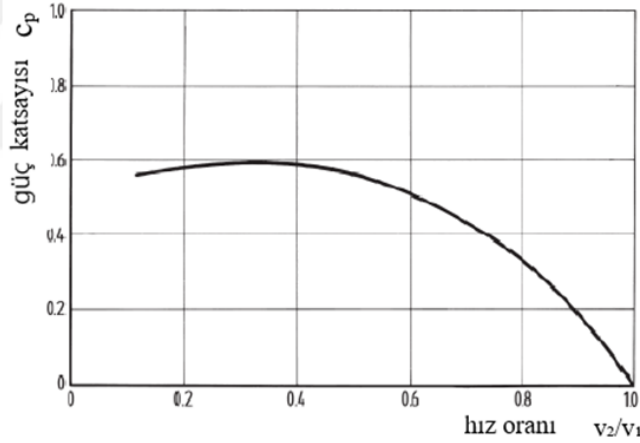
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A \quad (3.17)$$

Rüzgar türbini kanatlarının süpürdüğü A alanından elde edilebilecek güç Denklem 3.16’da verilmiştir. Türbinin kanatlarının süpürdüğü A alanından elde edilebilecek güç ile türbin önündeki bozulmamış hava akımından elde edilebilecek gücün birbirine oranına ‘güç katsayısı’ denir ve ‘ $c_p$ ’ biçiminde gösterilir (Denklem 3.18).

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18’de bazı düzenlemeler yapıldıktan sonra güç katsayısı  $v_2/v_1$  hız oranının bir fonksiyonu olarak yazılabilir (Denklem 3.19).

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (3.19)$$



Şekil 3.10 Güç katsayısı ile rotor öncesi ve sonrası hızların oranının grafiği (Hau, 2013)

Denklem 3.19’un analitik olarak çözülüp grafiği çizilirse, Şekil 3.10’daki grafik elde edilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere, belirli bir hız oranı değerine göre güç katsayısı maksimum değerini almaktadır. ‘ $v_2/v_1$ ’ değeri 1/3 olduğu zaman, güç katsayısı maksimum değeri olan ‘ $c_p=0,593$ ’ ulaşmaktadır. Bu güç katsayısı değerine ‘ideal güç katsayısı’ denmektedir. Güç katsayısının bu değeri, ilk defa Alman fizikçi Albert Betz tarafından bulunduğu için ‘Betz faktörü’ olarak da adlandırılmaktadır.

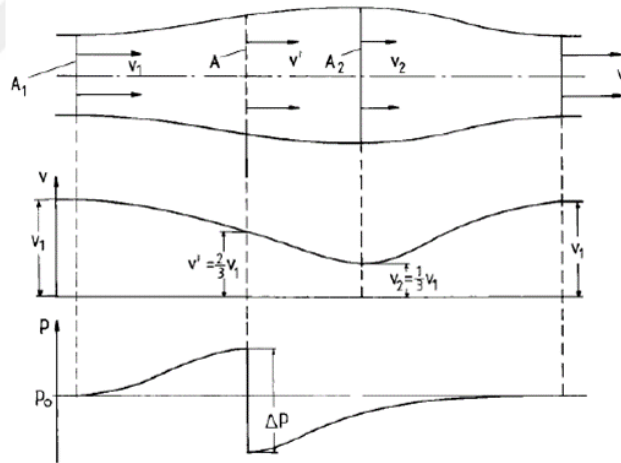
Fiziksel açıdan ise bozulmamış bir rüzgar akımından elde edilebilecek maksimum güç oranını ifade etmektedir.

$v_2/v_1 = 1/3$  değerinde, ideal güç katsayısı (Denklem 3.20) :

$$v_2/v_1 = 1/3 \quad \rightarrow \quad c_p = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (3.20)$$

İdeal bir rüzgar türbininde türbin öncesi ve sonrasın hızların oranının  $v_2/v_1 = 1/3$  olduğu bir önceki sayfada gösterilmişti. Türbin rotorunun taradığı A alanındaki hız  $v'$  ile  $v_1$  ve  $v_2$  hızları arasındaki bağıntı Denklem 3.14 'de verilmiştir. Bu bağıntı kullanılarak ideal bir türbin için rotor bölgesindeki hız, Denklem 3.21'deki şekliyle yazılabilir (Manwell ve McGowan, 2010).

$$v' = \frac{2}{3} v_1 \quad (3.21)$$



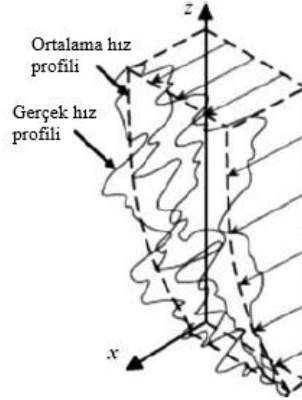
Şekil 3.11 İdeal türbin için akım koşulları (Hau, 2013)

Rotor bölgesi, rotor öncesi ve sonrası bölgelerdeki hızlar, alanlar ve güç çıkışları hakkında çıkarımlar verilmiştir. Bu ilişkiler ışığında, akım çizgileri Şekil 3.11'de incelendiğinde rotor sonrasında A2 alanının A alanından ve A1 alanından büyük olduğu görülmektedir. Alandaki bu değişim hızın azalmasına sebep olmaktadır. Rotor

bölgesine yaklaşan havanın hızının azalması sonucunda basıncı artmaktadır. Rotor bölgesinde ani bir basınç atlaması yaşanmaktadır. Daha sonra rotor arkasında basınç değeri atmosfer basıncına doğru yükseliş göstermektedir (Hau, 2013).

### 3.4 Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi

Rüzgar hızı yükseklikle artmaktadır. Rüzgar hızının konumsal değişimi, teorik olarak ve matematiksel modeller kullanılarak ortalama rüzgar hızı biçiminde gösterilse de, doğadaki çevresel etmenlerden dolayı rüzgar hızı ortalama çevresinde değişen bir profil izlemektedir. Şekil 3.12 ortalama rüzgar hızı ile gerçek rüzgar hızının gösterimini içermektedir. Bunun temel sebepleri yer yüzeyindeki sürtünme kuvvetleri ve yüzeydeki engellerden kaynaklanan türbülanstır. Engellerden dolayı kaynaklanan türbülanslar sonucunda kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıplar neticesinde rüzgar enerjisinden elde edilebilecek güç azalmaktadır.



Şekil 3.12 Gerçek ve ortalama rüzgar hızı profilleri (Hau, 2013)

Düşey ekseninde rüzgar hızının değişiminin incelenmesinde genellikle iki matematiksel model kullanılmaktadır. Birincisi logaritmik kuraldır (*log law*). Bu model temel olarak sınır tabakası ayrılması ve akışkanlar mekaniğine dayanmaktadır. Bu yaklaşım teorik ve ampirik bir yaklaşımdır. İkinci model ise güç kuralı (*power law*) olarak bilinmektedir. Bu yaklaşım ise türbülans akımlarına dayanmaktadır.

### 3.4.1 Logaritmik Kural

Rüzgar hızının düşeyde logaritmik değişiminin tahmin edilmesinin temelinde birkaç teori bulunmaktadır. Bunlar; karışım uzunluğu teorisi, eddy viskozite teorisi ve benzerlik teorisidir. Logaritmik kuralın matematiksel ifadesi Denklem 3.22’de verilmiştir.

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (3.22)$$

Burada,  $U(z)$ : yer seviyesinden  $z$  kadar yükseklikteki hız,  $k$ : Von Karman sabiti ( $k=0,4$ ),  $z_0$ : yüzey pürüzlülük yüksekliğidir.  $U^*$ : sürtünme hızıdır. Bu denklem sayesinde rüzgar profili elde edilebilmektedir. İntegrasyon işlemi alt limit olarak  $z_0=0$  değerinden başlamaz çünkü doğada mutlak pürüzsüz bir yüzey yoktur. Yaklaşık olarak yüzey pürüzlülük yükseklikleri tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Farkı alanlardaki pürüzlülük yükseklikleri

| Alan tanımı                              | Pürüzlülük yüksekliği, $z_0$ (mm) |
|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Su yüzeyi                                | 0,2                               |
| Kar yüzeyi                               | 3                                 |
| Çim                                      | 8                                 |
| Seyrek bitki örtüsüne sahip düz araziler | 30                                |
| Seyrek ağaçlık alanlar                   | 100                               |
| Ağaçlık alan veya seyrek yerleşim        | 250                               |
| Ormanlık alanlar                         | 500                               |
| Yüksek binaların olduğu şehir merkezi    | 3000                              |

### 3.4.2 Güç Kuralı

Rüzgar hızının düşeydeki değişimini tahmin edebilmek için kullanılan bir başka yöntem de Güç Kuralı modelidir. Denklem 3.23’deki gibi ifade edilmektedir. Özellikle sıcaklık gradyanının mevcut olmadığı durumlarda kullanılması uygundur.

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (3.23)$$

Burada;  $U(z)$ ,  $z$  yüksekliğindeki rüzgar hızı,  $U(z_r)$  referans olarak alınan  $z_r$  yüksekliğindeki hız,  $\alpha$  ise sıcaklık, nem, yoğunluk, yükseklik gibi bir çok değişkene bağlı bir parametredir. Yapılan çalışmalar neticesinde teorik yaklaşık olarak 1/7 alınan  $\alpha$  parametresi, rüzgar hızı tahmin edilecek bölgeye özgü bir parametre bulunması uygundur. Bilim insanları  $\alpha$  parametresinin tahmini için birkaç ampirik formül ortaya koymuşlardır.

Alabama Üniversitesi'nde rüzgar enerjisi üzerinde çalışan Justus (1978),  $\alpha$  parametresini Denklem 3.24'deki gibi ifade etmektedir.

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln(U_{ref})}{1 - 0,088 \ln \frac{Z_{ref}}{10}} \quad (3.24)$$

Burada, referans yüksekliğindeki hız  $U_{ref}$  m/sn,  $Z_{ref}$  m birimindedir.

### 3.5 Rüzgar Verilerinin İstatistiksel İncelenmesi

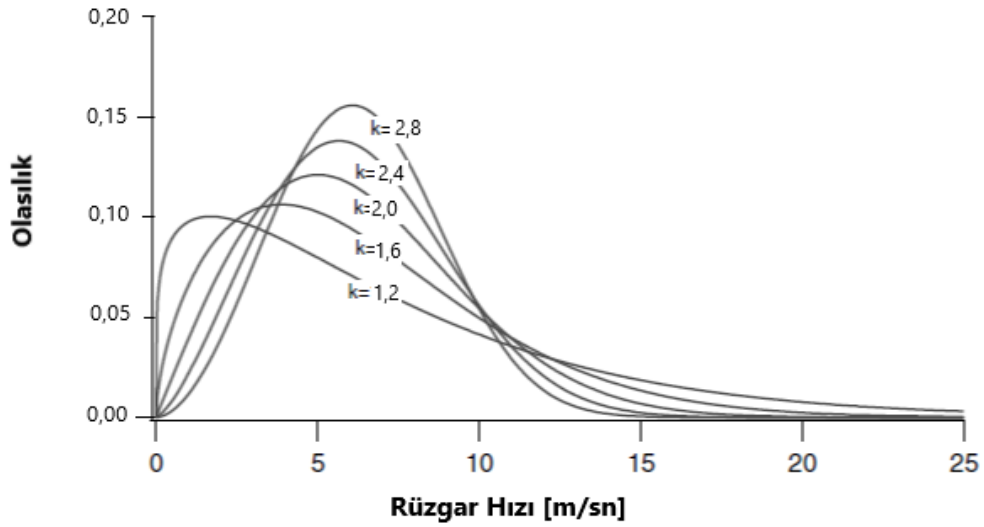
Rüzgar türbini yapılacak alan için rüzgar verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Elde edilen rüzgar verileri, istatistiksel olarak analiz edilerek uzun dönem rüzgar tahminleri yapılabilmektedir. Bölge için rüzgar enerji potansiyeli belirlenebilmekte ve farklı verilerin alındığı bölge için rüzgar hızı dağılımı tahmin edilebilmektedir. Belirli bir bölge için rüzgar hızları her yıl farklı değerler içermektedir. Bu değişiklik tahmin yapabilmeyi zorlaştırsada, rüzgar hızlarının değişimi belirli dağılımlarla tanımlanabilmektedir. *Weibull* ve *Rayleigh* olasılık dağılım fonksiyonları rüzgar verilerinin istatistiksel olarak incelenmesinde en çok kullanılan iki dağılımdır (Manwell ve McGowan, 2010).

### 3.5.1 Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu

Weibull olasılık dağılım fonksiyonu rüzgar verilerinin değerlendirilmesinde en çok tercih edilen dağılımdır. Rüzgar hızında Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun kullanılabilmesi için şekil ( $k$ ) ve ölçek ( $c$ ) parametreleri bilinmelidir. Bu iki parametre ortalama rüzgar hızının ve standart sapmanın birer fonksiyonlarıdır. Sırasıyla Denklem 3.25 ve 3.26'da Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun ve kümülatif dağılım fonksiyonunun genel formu verilmiştir (Kurban, Kantar, Hocaoglu, 2007).

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{U}{c}\right)^k \right] \quad (3.25)$$

$$F(U) = 1 - \exp \left[ - \left(\frac{U}{c}\right)^k \right] \quad (3.26)$$



Şekil 3.13 Farklı  $k$  değerleri için Weibull dağılımı (Manwell ve McGowan, 2010)

Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu,  $U$  hız değerinden küçük ya da eşit olma olasılığını vermektedir. Şekil ( $k$ ) ve ölçek ( $c$ ) parametrelerinin bulunmasında maksimum likelihood en küçük kareler metodu gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Şekil parametresi olan  $k$  değeri arttıkça dağılım daha dik bir hal almaktadır. Bu rüzgar

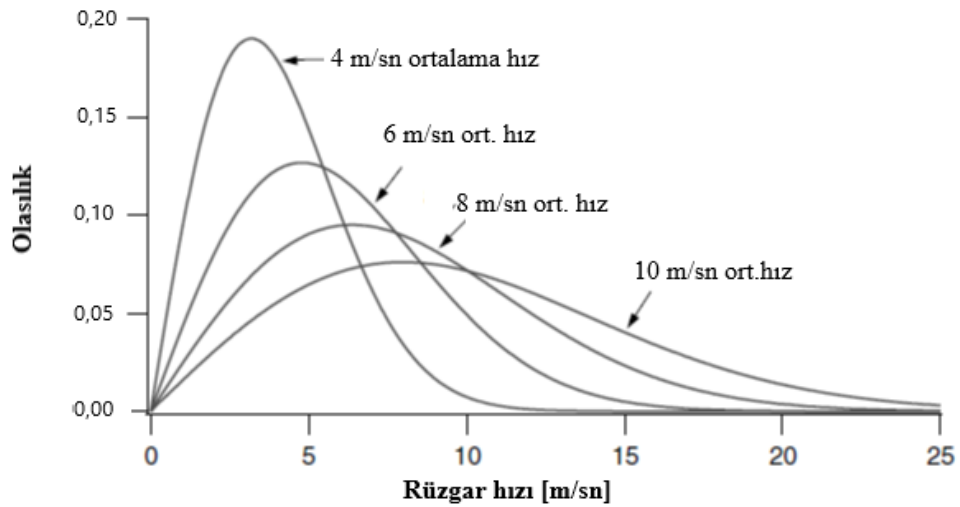
daha düşük rüzgar hızı değişimi anlamına gelmektedir. Şekil parametresi rüzgar hızının frekans dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Şekil 3.13’de farklı k değerleri için dağılım örnekleri verilmiştir. Şekil parametresi rüzgar hızı analizlerinde 1,5 ile 3 arasında bir değer alması gerektiği belirtilmektedir (Celik, 2004; Manwell ve McGowan, 2010).

### 3.5.2 Rayleigh Dağılımı

Bu dağılım basitçe rüzgar kaynağını temsil ettiği için sadece ortalama rüzgar hızını bilmek yeterli olmaktadır. *Weibull* dağılımındaki şekil parametresi  $k=2$  olması halinde *Rayleigh* dağılımı elde edilmektedir. Ortalama rüzgar hızı  $\bar{U}$  (m/sn) için olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu genel gösterimi sırasıyla Denklem 3.27 ve 3.28’de verilmiştir. Şekil 3.14’de farklı ortalama hız değerleri için dağılım örnekleri verilmektedir (Manwell ve McGowan, 2010).

$$p(u) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{U}{\bar{U}^2} \right) \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (3.27)$$

$$F(U) = 1 - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (3.28)$$

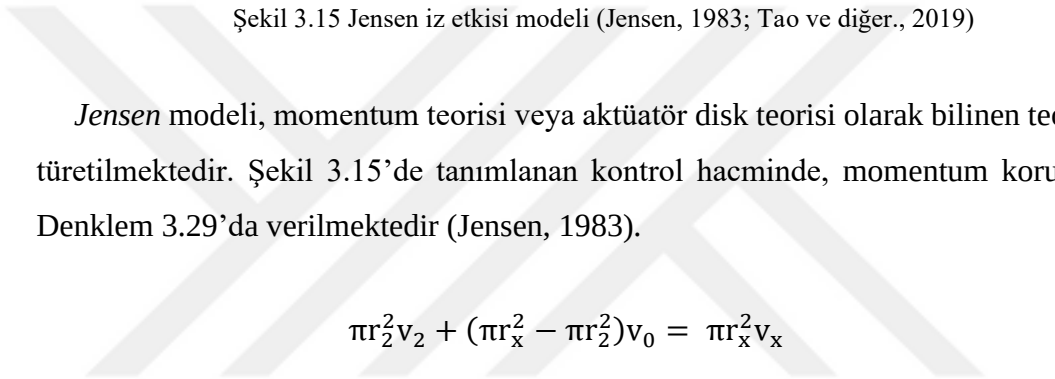


Şekil 3.14 Farklı ortalama hız değerlerine göre Rayleigh dağılımı (Manwell ve McGowan, 2010)

### 3.6 İz Etkisi

İz etkisi rüzgar tarlalarında en çok enerji kayıplarına sebep olan etkidir. Birbirine yakın rüzgar türbinleri arasında etkili olmaktadır. Bozulmamış rüzgar, türbininden geçtikten sonra türbininin arka tarafında hızı azalmaktadır. Bu durum arkasındaki rüzgar türbinlerine ulaşan rüzgarın enerjisinin düşük olması anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki rüzgar tarlalarında %10-20 enerji kaybı iz etkisinden dolayı olmaktadır. Rüzgar tarlalarında bu durumu en aza indirebilmek ve gelen rüzgardan maksimum fayda sağlayabilmek için rüzgar türbinlerinin birbirine göre konumları önemlidir (Jensen, 1983; Tao ve diğer., 2019).

Rüzgar türbini sonrasında oluşan rüzgar akımı birçok matematiksel model ile modellenerek iz etkisi tanımlanmaya çalışılmıştır. *Jensen* iz etkisi modeli, uygulanmasının kolay olmasından dolayı çokça tercih edilmektedir. Bu model rüzgar tarlalarının tasarımında kullanılan WindFarmer, WindSim, OpenWind WAsP gibi ticari bir çok programda geniş uygulama alanı bulunmaktadır. *Jensen* modeli, iz etkisinin türbinden sonra bir boyutlu olarak lineer genişlediğini varsaymaktadır. Şekil 3.15’de *Jensen* iz etkisi modeli gösterilmiştir. İz etkisi, rüzgar türbininin arkasındaki alanda etkili olmaktadır. Bu alan yakın iz bölgesi ve uzak iz bölgesi olarak iki kısımda incelenmektedir. Şekil 3.15’de RT kısaltmasıyla verilen nokta rüzgar türbinini bulunduğu konumdur ve  $x=0$  olarak tanımlanmaktadır. Yakın iz bölgesi  $0 < x < x_1$  ile tanımlanmakla beraber yaklaşık olarak  $x_1 = 3d_r$  uzunluğundadır ( $d_r$ : rüzgar türbini rotor çapı). Yakın iz bölgesi çalkantı ve türbülansların etkili olduğu bölgedir. *Jensen* modeli türbülans etkilerini ihmal etmektedir. Bu durum *Jensen* modelinin uzak iz bölgesi için uygulanabilir olduğu anlamına gelmektedir. Uzak iz bölgesi  $x > x_1$  ile tanımlanmaktadır. Uzunluğu  $x_2$  olarak gösterilen uzak iz bölgesi yaklaşık olarak  $10d_r$  kadar olduğu belirtilmektedir (Jensen, 1983).



*Jensen* modeli, momentum teorisi veya aktüatör disk teorisi olarak bilinen teoriden türetilmektedir. Şekil 3.15’de tanımlanan kontrol hacminde, momentum korunumu Denklem 3.29’da verilmektedir (Jensen, 1983).

Denklem 3.29’da  $v_0$  bozulmamış rüzgar hızı,  $r_2$  türbinin hemen arkasındaki yarıçap,  $r_x$  türbinden  $x$  mesafe uzaklıktaki iz yarıçapı,  $v_x$  türbinden  $x$  mesafe uzaktaki iz bölgesi içindeki hız olarak tanımlanmaktadır.

$$v_2 = v_0(1 - 2\alpha) \quad (3.30)$$

39

beraber, Jensen modelinde yaklaşık olarak 0,1 değerinde alınabileceğini belirtilmektedir (Shakoor, Hassan, Raheem ve Wu, 2016; Jensen, 1983).

$$\alpha = \frac{0,5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.31)$$

*Jensen* modeli, uzak iz bölgesini koni veya silindir şapka biçiminde tanımlamaktadır. Modelin uygulanabilir olduğu uzak iz bölgesi alanı içerisinde bir x konumdaki  $v_x$  hızı Denklem 3.32 ile verilmiştir.

$$v_x = v_0 \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \left( \frac{r_2}{r_2 + \alpha x} \right)^2 \right] \quad (3.32)$$

Burada  $C_T$ , itki katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Denklem 3.33'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$C_T = \frac{T}{T_m} \quad (3.33)$$

$T$ , rüzgar tarafından türbin süpürme alanına yapılan itkiyi ifade etmektedir.  $T_m$  ise teorik maksimum itki kuvvetinin belirtmekte ve Denklem 3.34'de gösterilmiştir.  $T_m$  ifadesinde  $r_r$  yarıçapı rüzgar türbinini rotor yarıçapını belirtmektedir (Tao ve diğer., 2019).

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi r_r^2 v_0^2 \quad (3.34)$$

## BÖLÜM DÖRT

### AÇIK DENİZ RÜZGAR ENERJİSİ

Açık deniz rüzgar türbinleri, rüzgardan elektrik enerjisi üretim işleminin bir uygulaması olarak adlandırılabilir. Zaman içerisinde gelişimi Bölüm 3’de detaylı şekilde anlatılmıştır. Gelişen teknolojiyle birlikte uygulama alanı da genişleyen açık deniz rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisinden faydalanmada önemli bir yere sahiptir. Bu uygulamanın öncülüğünü Avrupa ülkeleri yapmasına karşın; Amerika, Çin ve diğer Asya ülkelerinde de önemli ölçüde kurulu güce sahip tesisler bulunmaktadır. Tablo 4.1’de GWEC (*Global Wind Energy Council*) kuruluşunun 2019 yılı yıllık raporunda ülkelerin sahip olduğu açık deniz rüzgar enerjisi kurulu güçleri verilmiştir. Birçok uluslararası kuruluş yenilenebilir bir enerji kaynağı olan açık deniz rüzgar enerjisinin gelişimi için çalışmaktadır. Bunlardan bir başkası olan *The Ocean Renewable Energy Action Coalition (OREAC)*, 8 Haziran 2020 Dünya Okyanus Günü’nde duyurduğu *2050 yılına kadar 1400 GW açık deniz rüzgar enerjisi vizyonu* ile Dünya’daki karbon salınımını azaltılması hedeflemiştir. Raporda, 1400 GW açık deniz rüzgar enerjisinin 2050 yılına kadar küresel elektrik talebinin onda birini karşılayabileceği, yıllık 3 milyar tondan fazla CO<sub>2</sub> salınımını azaltacağı ve 24 milyon kişinin istihdam olabileceği belirtilmiştir (GWEC, 2019).

Tablo 4.1 Ülkelere göre açık deniz rüzgar enerjisi kurulu güçler (GWEC, 2019)

| Ülke                  | 2019 yılında kurulan(MW) | Toplam kurulu güç (MW) |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| Birleşik Krallık      | 1764                     | 9723                   |
| Almanya               | 1111                     | 7493                   |
| Belçika               | 370                      | 1556                   |
| Danimarka             | 374                      | 1703                   |
| Hollanda              | 0                        | 1118                   |
| Diğer Avrupa Ülkeleri | 8                        | 310                    |
| Çin                   | 2395                     | 6838                   |
| Güney Kore            | 123                      | 292                    |
| Diğer Asya Ülkeleri   | 0                        | 30                     |
| Amerika               | 0                        | 30                     |

#### 4.1 Açık Deniz ve Karasal Rüzgar Enerjisinin Karşılaştırılması

Açık deniz rüzgar enerjisinin, karasal rüzgar enerjisine kıyasla bir çok avantajı vardır. Bunun yanında açık deniz rüzgar enerjisi uygulamasında bazı zorluklar da mevcuttur.

Açık denizlerdeki güçlü rüzgar potansiyeli, yüksek kurulum ve işletme maliyetlerini dengeleyebilecek düzeydedir. Denizlerde bulunan sürekli ve düzenli rüzgarlar elektrik enerji üretimini artırmaktadır. Aynı zamanda düzensiz rüzgarlar türbin parçalarında (özellikle kanatlarda ve dişlilerde) ekonomik ömrü azaltmaktadır. Rüzgar türbinlerinin kıyıdan uzakta kurulması görsel etki ve gürültü faktörlerini ortadan kaldırmaktadır. Açık denizlerin sağladığı geniş kurulum alanları, büyük ölçekte rüzgar türbini tarlaları kurmaya olanak sağlamaktadır. Karasal alanlardaki engeller, arazi şartları türbin önünde türbülanslar meydana getirmekte, bu durum enerji kayıplarına sebep olmaktadır. Açık deniz uygulamasında bu kayıplar en düşük seviyededir. Rüzgar türbinlerinin büyük yapıları, karada taşıma problemini ortaya çıkarmaktadır. Açık denizlerde, karadaki rüzgar türbinlerine kıyasla çok daha büyük rotor çapına sahip rüzgar türbinleri kurmak mümkündür (Bussel ve Zaaijer, 2001; Breton ve Moe, 2009).

Bununla birlikte açık deniz rüzgar enerjisi uygulamasında bazı zorluklar mevcuttur. Açık denizde yapılan türbinlerin temel, kule ve kablo maliyetleri karadakilere nispeten 1,5-2 kat daha pahalıdır. Kurulum öncesi planlama aşaması da karadakilere göre uzun bir süreç istemektedir. Özellikle deniz tabanı, derinlik araştırmaları zahmetli ve masraflı işlemlerdir. Bir başka zorlukta türbinlerin bakım ve onarım işlemleridir. Açık denizlerde meydana gelebilecek aşırı hava koşulları sonucunda oluşabilecek arızalara müdahale etme süresi, karadakilere kıyasla daha uzun ve maliyetlidir. Bu müdahaleler büyük vinç gemileriyle ya da havadan yapılan operasyonlarla mümkündür (Bussel ve Zaaijer, 2001; Breton ve Moe, 2009).

Açık denizlerde karşılaşılan zorluklar mühendislik çözümleri ile aşılabilecek durumlardır. Özellikle karalardaki sınırlı alanlar açık denize yönelime sebep

olmaktadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak ve temiz enerjiye ulaşmak için açık deniz rüzgar enerjisi önemli bir kaynaktır. Kısa vadede pahalı gibi görünen açık deniz rüzgar enerjisinin uzun dönemdeki kazanımları çok önemlidir. Uygulamaların artması ile birlikte tecrübe de artacaktır. Bu durum daha etkili çözümlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlayacaktır.

#### **4.2 Açık Deniz Rüzgar Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterleri**

Açık deniz rüzgar türbini tasarımında, ilk basamak uygun bölge seçimidir. Bir önceki başlık altında bahsedilen yüksek maliyetlerden dolayı, uygun yer seçimi ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Yapılan projenin beklenen sonuçları verebilmesi için uygun yer seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır;

- Bölgenin rüzgar potansiyeli
- Derinlik koşulları
- Karasuları sınırı
- Askeri sınırlar
- Deniz tabanı kablo ve boru hatları
- Çevresel hususlar (kuşların geçiş güzergahı, dalışa yasak sahalar)

##### **4.2.1 Bölgenin Rüzgar Potansiyeli**

Rüzgar enerjisi uygulamalarının başarılı olabilmesi için rüzgar hız potansiyelinin yüksek olduğu bölgelere kurulum yapılması gerekmektedir. Doğru ve güvenilir rüzgar verileri bölgenin rüzgar potansiyelini belirlemede çok önemlidir. Bölge seçiminde kurum veya kuruluşlar tarafından oluşturulmuş rüzgar atlaslarını incelemek ön fikir oluşturma için gereklidir. Türkiye Cumhuriyeti Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından oluşturulmuş rüzgar enerjisi potansiyel atlası ve Danimarka Teknik Üniversitesi tarafından oluşturulmuş dijital küresel rüzgar atlası, ülkemizdeki rüzgar potansiyelinin incelenebildiği iki önemli kaynaktır. Bu gibi rüzgar atlaslarından faydalanarak ön çalışma yapılmalı, daha sonra belirli bölgeler için rüzgar verileri temin edilmelidir. Rüzgar verileri en az bir yıllık olmalıdır. İdeal olan, rüzgar verisinin on yıllık

olması, veriyi toplayan anemometre yerden otuz metre yükseklikte olması ve sıcaklık, nem, basınç gibi diğer hususları içermesidir. Türkiye’de Devlet Meteoroloji işlerinden temin edilebilen rüzgar verileri genellikle yerden 10 m yükseklikten alınmış verilerdir ve istasyonlar karada bulunmaktadır. Rüzgar verilerinin farklı yüksekliklerdeki değeri, Bölüm 3’de anlatılan, yükseklikle rüzgar hızının değişimi başlığında anlatılan modeller vasıtasıyla hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda WAsP, WindPro gibi ticari paket programlarda, bölgenin topografik verilerini kullanarak bölge için rüzgar atlasları oluşturmaktadır. Rüzgar türbini yapılacak bölge ile veri temin edilen bölge arasındaki uzaklık arttıkça tahminlerdeki hata payı da artmaktadır. Açık deniz rüzgar türbini kurulacak bölge için denize kurulmuş bir istasyondan en az bir yıllık veri almak hata payını en aza indirecektir (Hau, 2013).

Açık deniz rüzgar türbini kurulacak bölgenin 10 m yükseklik için en az 3 m/sn rüzgar hızına sahip olması istenmektedir. Piyasadaki birçok rüzgar türbini en az 3 m/sn hızda aktif olup enerji üretmeye başlamaktadır. Literatürde bu eşiğe *cut in* denmektedir. Aynı zamanda 25-30 m/sn rüzgar hızlarında da türbin parçalarının zarar görmemesi için rüzgar türbinleri devre dışı kalmaktadır. Bu sınır da *cut out* olarak adlandırılmaktadır. Bu sınırlarda uygun yer seçimin de dikkat edilmesi gereken bir başka husustur (Argin ve diğer., 2019)

Kapasite faktörü, bir rüzgar türbini tarlasının bir yıllık net enerji üretiminin, tam kapasite çalışması halinde elde edilebilecek güce oranını ifade etmektedir. Örneğin bir rüzgar türbini tarlasında 3 MW nominal güce haiz 10 adet rüzgar türbini bulunsun. Bu rüzgar türbin tarlasında yıllık net üretim 60 MW-saat ise bu tesisin kapasite faktörü Denklem 4.1’deki gibi hesaplanmaktadır. Rüzgar tarlalarında kapasite faktörü %20-50 aralığında değişmektedir. 7 m/sn ortalama rüzgar hızına sahip bir bölgede kapasite faktörü yaklaşık olarak %28 dolaylarındadır. Ortalama rüzgar hızı arttıkça kapasite faktörü de artmaktadır. Kapasite faktörü tesisin devamlılığı ile doğrudan alakalı bir konudur. Türbinlerde oluşan arızalar, bakım onarım çalışmaları için rüzgar türbinlerinin durdurulması ve özellikle bölgenin sahip olduğu rüzgar rejiminin düzensiz olması kapasite faktörünü azaltmaktadır. Bu yüzden uygun yer seçiminde rüzgar rejimi önemli bir husustur. Bölgenin rüzgar veri analizleriyle ilgili detaylı bilgi

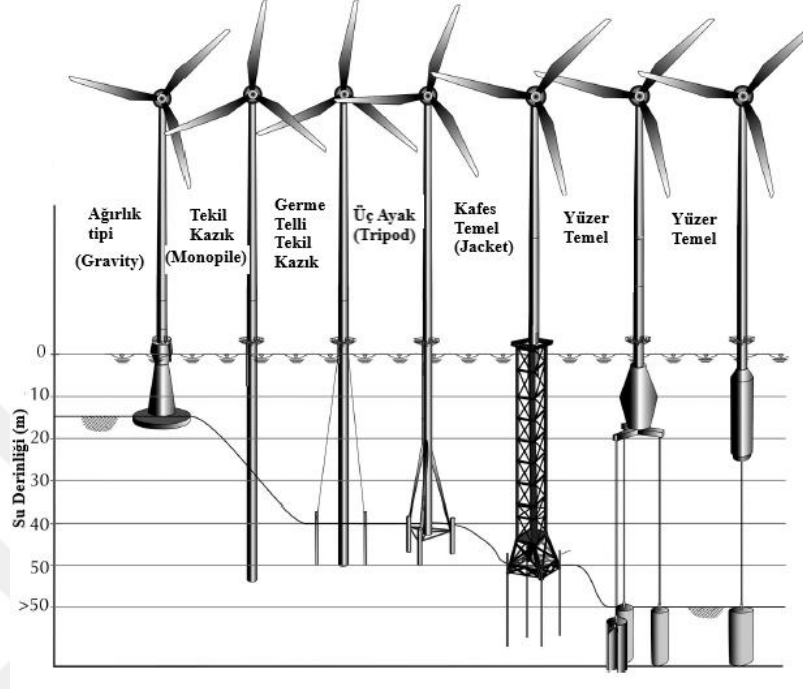
Bölüm 3’de verilmiştir. Açık denizlerde kurulan rüzgar türbini tarlaları rüzgar rejimi düzeni karadakilere göre daha düzenlidir. Buna karşın olası arıza ve bakım onarım çalışmalarında tesisin durma süresi daha uzundur. Bundan dolayı açık denizlere kurulan rüzgar türbin tarlalarında teknik destek hizmetleri tasarım esnasında önemli bir yer tutmaktadır.

$$\frac{60 \text{ MWsaat}}{(8760 \text{ saat/yıl})(30 \text{ MW})} = 0,2283 \approx \% 23 \quad (4.1)$$

#### **4.2.2 Derinlik Koşulları**

Açık deniz rüzgar türbinlerine uygun yer seçiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da deniz veya okyanus derinlik koşullarıdır. Rüzgar atlasları yardımıyla ön fikir edinilen daha sonra rüzgar verileri analiz edilen bölgenin, ikinci basamak olarak derinlik koşullarını incelemek gerekmektedir. Açık denizlerde zemin yapıları değişiklik içerebilmektedir: ani derinlik artışları ve azalışları, deniz tabanında bulunan çukurlar, deniz tabanı zemin yapısının değişmesi gibi. Bunların tespiti için batimetri haritaları incelenmeli, deniz tabanı sonar araştırmalarına bakılması gerekmektedir. Ülkemiz kıyıları için batimetri haritaları, Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığından elde edilebildiği gibi dijital batimetri haritaları internetten sağlanabilmektedir. *EMODnet (The European Marine Observation and Data Network)* Avrupa birliği tarafından desteklenen, Dünya’daki kıyılar ve denizler ilgili batimetri haritaları deniz tabanı canlı yaşamı, deniz biyolojisi gibi birçok alanda veri sağlayan bir organizasyondur. Bu verilere internet üzerinden erişim mümkündür. Veriler ASCII ve TIFF formatında indirilebilmektedir. Açık deniz rüzgar türbinlerinin temel yapısı, belli derinlikler için farklılıklar arz etmektedir. Belli bir derinlikten sonra da artık karada yapılan temel anlayışından farklı olarak yüzer temeller ortaya çıkmaktadır. Temel sistemleri açık deniz rüzgar türbinlerinin ekonomik olarak maliyetlerin %20-25 gibi önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Uygun yer seçiminde deniz derinlik koşulları, temel maliyetlerini doğrudan etkilediği için dikkat edilmesi gereken bir husustur. Açık denizlere yapılabilen temel sistemleri ağırlık tipi, tekil kazık, üç ayak (tripod), jacket tipi ve yüzer temeller olarak ayrılmaktadır. Bu temel

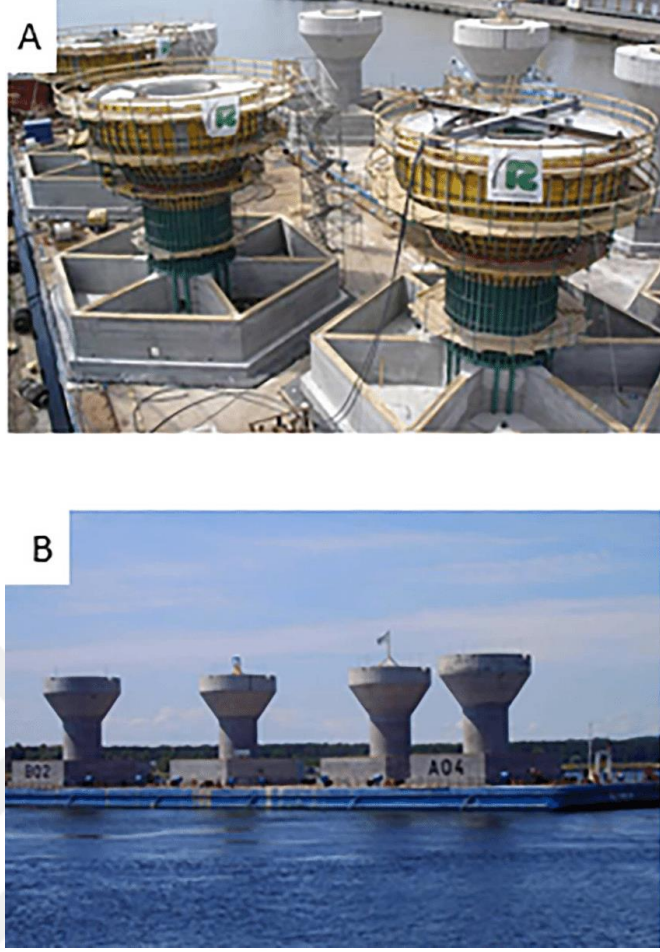
tiplerinin hangi derinliklere kadar uygulanabildiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir (Malhotra, 2009).



Şekil 4.1 Açık deniz rüzgar türbini temel tipleri (Malhotra, 2009)

#### 4.2.2.1 Ağırılık Tipi Temeller

Ağırılık tipi temeller, kendi ağırlıklarıyla rüzgar türbinlerinin açık denizde maruz kaldıkları rüzgar yükü, dalga yükü ve statik yüklere ve momentlere karşı koyan temel tiptir. Bir tür betonarme keson yapı olan ağırılık tipi temeller, karada üretilip denizde batırılmaktadır. Maksimum 10-15 m deniz derinliğine sahip bölgelere yapılan bu temeller, diğer temellere nispeten düşük yük taşıma kapasitesine sahiptir ve inşası daha kolaydır. Ağırlıkları 1500 ton civarında olan ağırılık tipi temeller deniz tabanı sıkıştırılmış kil, kumlu toprak ve kaya olan bölgeler için daha uygundur. İsveç’in kuzey kıyılarında bulunan, 48 adet açık deniz rüzgar türbininden oluşan Lillgrund rüzgar tarlasının türbinlerinin ağırılık tipi temellerinin karada üretim aşaması ve gemi ile taşınması Şekil 4.2’de verilmiştir (Wu ve diğer., 2019; Langhamer, Holand ve Rosenqvist, 2016).

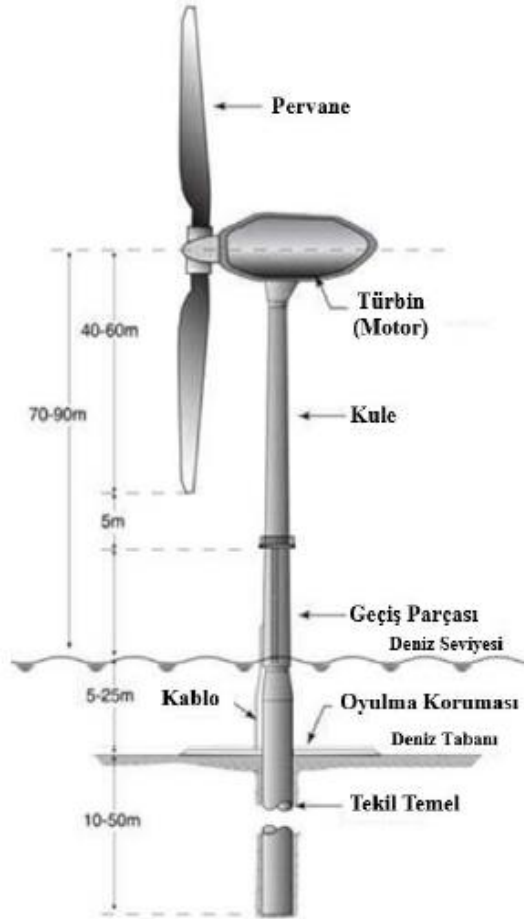


Şekil 4.2 A) Ağırlık tipi temel üretimi ve B) Temellerin taşınması, Lillgrund (Langhamer ve diğer. 2016)

#### 4.2.2.2 Tekil Kazık Temeller (Monopile)

Açık deniz rüzgar türbinlerinde kullanılan bir başka temel tipi tekil kazık temellerdir. Yapılan temel uygulamalarında en çok kullanılan temel sistemidir. Dünya üzerindeki açık deniz rüzgar türbini uygulamalarının %80'ini tekil kazık temeller oluşturmaktadır. Kullanımının fazla olmasının temel sebepleri nispeten ucuz olması ve kolay uygulanabilmesidir. Deniz derinliği 30 m olan alanlarda kullanılmakla beraber 45-50 m derinliklere de kadar halatlarla güçlendirilmiş türleri uygulanabilmektedir. Tekil kazıklar genellikle silindir şeklinde, 4-6 m çapında, 150 mm et kalınlığında ağırlıkları 250 tonları bulabilen temel yapılarıdır. Çelik silindirler titreşimli çekiçlerle zemine çakılmakta veya zemin yapısının sert olduğu bölgelerde silindir çapından daha geniş delikler açarak yerleştirilmektedir. Şekil 4.3'de şematik

olarak bir tekil kazık temel örneği verilmektedir. Deniz tabanı ile kazık birleşme bölgelerinde oluşan oyulmaların önüne geçebilmek için oyulma koruma uygulamaları yapılmaktadır (Malhotra, 2011; Kaya ve Oğuz, 2019).



Şekil 4.3 Tekil kazıklı temel şematik gösterimi (Kaya ve Oğuz, 2019)

#### 4.2.2.3 Üç Ayak (Tripod)

Bu tür temeller aslında 3 tane tekil temelin eşkenar üçgen şeklinde birleştirilmesi ve bu yapının da bir boruyla türbine bağlanmasıyla oluşturulmaktadır. 40-50 m derinliklerinde uygulanabilen bu temel sistemi 100-500 ton arasında değişen ağırlık değerlerine sahiptir. Almanya’da bulunan *Alpha Ventus* (2009) ve İsveç, Nordersund açık deniz rüzgar tarlalarında üç ayak temel sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.4’de *Alpha Ventus* rüzgar tarlasının üç ayak temellerinin taşınma işlemi verilmiştir (Wu ve diğer., 2019).



Şekil 4.4 Alpha Ventus türbinlerinin üç ayak temelleri (German Offshore Wind Energy Foundation, 2008)

#### 4.2.2.4 Kafes Tipi Temel (Jacket)

Bu temel tipleri, çelik elemanların karada kaynak yapılmasıyla imal edilmektedir. Daha sonra açık deniz rüzgar türbini yapılacak bölgeye taşınır ve deniz tabanına çakılır. Sistem olarak üç ayak temellere göre daha karmaşıktır. Deniz tabanına dört ayağı da oturan bu temellerin ayakları zemine sabitlenmektedir. 40-45 m derinlikten yaygın kullanılan bu temeller 150-500 ton arasında değişen ağırlıklara sahiptir. İskoçya'nın kuzey doğusunda, Kuzey Denizi'nde yer alan Beatrice rüzgar tarlasında maksimum derinliğin 45 m olduğu bölgede kafes tipi temeller kullanılmıştır. Ormonde, Birleşik Krallık, Bohai Sea, Çin rüzgar tarlalarında kafes tipi temellerin kullanıldığı projelerdir (Wu ve diğer., 2019).

#### 4.2.2.5 Yüzer Temeller

Derinliğin 60 m üstünde olduğu bölgelerde deniz tabanına temas eden temel türlerini kullanmak ekonomik açıdan çok masraflı olmakta ve uygulama güçlüğü de ortaya çıkmaktadır. Açık deniz rüzgar türbinlerinde yüzer temeller uygun çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Yüzer temellerde platformun statik dengesinin sağlayabilmek için birkaç farklı model öne sürülmektedir. Bunlar; platformun deniz tabanına halatlarla sabitlendiği (*mooring system*), türbin kulesinin altında koyulan

balast yüklerle stabilite sağlanan sistemler (*Buoy-spar system*), kaldırma kuvvetinden faydalananlardır (*Buoyancy Stabilised*). Yüzer tipte temellerin dünya üzerinde örnekleri çok sınırlıdır. Gelişen teknoloji ve uygun çözümlerle kıyıdan uzakta derin denizlerde yüzer temellerin kullanımının artacağı düşünülmektedir. Blue H Technologies firmasının 2007 yılında, İtalya kıyılarında 113 m derinlikte ticari olmayan açık deniz rüzgar türbininde ve daha sonra 2016 yılında yapımına başlanan İskoçya'nın kuzeyinde bulunan Hywind projesinde 220 m derinliklerde yüzer temeller uygulanmıştır (Taşan ve diğer., 2010; Wu ve diğer., 2019).

#### **4.2.3 Karasuları Sınırı**

Uluslararası hukuka göre karasuları, bir devletin kıyılarına bitişik deniz alanlarında bölgesel yetkiye sahip olduğu sınırdır. Açık deniz rüzgar türbinin kurulurken bu sınırlara dikkat edilmesi gerekmektedir. 1982 tarihli Birleşmiş Milletler Deniz Hukuk Sözleşmesine göre devletlere, 12 deniz miline kadar kendi karasuları sınırını belirleyebilme yetkisi tanınmıştır. Birçok ülke bu anlaşmayı imzalayarak sınırlarını 12 deniz miline kadar çıkarmıştır. Rüzgar potansiyeli açısından yüksek olan Ege Denizi'nde bu durum bir sorun teşkil etmektedir. Bu anlaşmayı imzalayan ülkelerden Yunanistan, Ege Denizinde karasuları sınırını 12 deniz miline çıkarmak istemiştir. Bunun sonucunda Ege Denizi'nde %70 hakimiyet Yunanistan'a geçecektir. Bu durum ülkemiz tarafından çok tabii olarak hükümsüz kabul edilmiştir. Ülkemizin 1964 yılında çıkardığı kanun ile birlikte Ege Denizi'nde karasuları sınırının 6 deniz mili olduğuna karar vermiştir. Akdeniz ve Karadeniz kıyıları için böyle bir sorun mevcut değildir (Birleşmiş Milletler, 1982).

#### **4.2.4 Askeri Sınırlar**

Devletlerin askeri güçleri bazı deniz alanlarını askeri tatbikatlar ve atış sahaları olarak kullanmaktadır. Açık deniz rüzgar türbini tarlaları geniş alanlara kurulduğu için askeri sınırlar, uygun yer seçiminde dikkat edilmesi gereken bir başka husustur. Askeriye'nin kullandığı alanlar, özellikle ekonomik açıdan uygun açık deniz rüzgar tarlaları oluşturma işlemini karmaşık hale getirmektedir (Argin ve Yerci, 2017).

#### **4.2.5 Deniz Tabanı Boru Hatları ve Deniz Ulaşım Hatları**

Deniz tabanında mevcut olan petrol-doğalgaz boru ve elektrik hatlarının uygun yer seçimi aşamasında incelenmesi gerekir. Sadece mevcut hatlar değil, açık deniz rüzgar türbin tarlasının kurulması halinde ortaya çıkacak elektrik hatları da dikkat edilmesi gereken bir diğer husustur. Kurulum yapılacak bölgedeki balıkçılık, deniz ulaşım hatları da önem arz etmektedir. Nihai projede aday bölgeler için devlet kurumlarından gerekli izinler ve bilgiler alınmalıdır (Bianchi ve diğer., 2007).

#### **4.2.6 Çevresel Hususlar**

Rüzgar türbinleri 150 m'ye varan kule boyu ve rotor çaplarına sahiptir. Bu durum görsel etki hususunu ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamana çalıştıkları zaman çıkardıkları gürültü sebebiyle ses etkisi konusu da gündeme gelmektedir. Rüzgar türbinlerinin gürültüleri ortalama 1.5 km mesafeden sonra ortadan kalkmaktadır. Açık deniz rüzgar türbinleri kıyıdan uzakta yapıldığı takdirde yerleşim yerlerine etki eden gürültü faktörü ortadan kalkacaktır. Karasal rüzgar türbinlerine göre ses ve görüntü açısından daha avantajlı olan açık deniz rüzgar türbinleri için deniz manzarasını bozduğundan dolayı bazı tepkiler oluşmaktadır. Nitekim Amerika'da bulunan Cape Wind açık deniz rüzgar tarlası projesi gerekli izinleri alamadığı için hayata geçememiş bir projedir. Aktivistlerin yaptığı çalışmalar sonucunda bölgenin ekolojik turizm alanı olması projenin hayata geçmemesinde etkili olan bir husustur.

Rüzgar türbinlerinin diğer canlı türlerine etkisi tartışılan bir konudur. Özellikle kuş ölümlerine ve deniz yaşamına etkilerinden dolayı rüzgar türbinlerini eleştiren görüşler vardır. Yapılan çalışmalarda fosil yakıtlardan kaynaklanan küresel ısınmanın daha fazla canlı türünü yok ettiğini savunan görüşler bulunmaktadır. Aynı zamanda açık denizlerin temellerinde oluşan deniz habitatlarının deniz çeşitliliğine katkı sağladığını belirten görüşler de bulunmaktadır. Uygun yer seçiminde nihai aşamada Cape Wind örneği gibi problem yaşanmaması için bu husus da dikkate alınmalıdır (Snyder ve Kaiser, 2009).

## **BÖLÜM BEŞ**

### **EGE KIYILARI İÇİN UYGUN YER SEÇİMİ**

Açık deniz rüzgar türbinlerinin gelişimi ve mevcut durumu önceki bölümlerde anlatılmaya çalışılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan açık deniz rüzgar enerjisinin önümüzdeki yıllarda uygulamalarının artacağı düşünülmektedir. Ülkemizin üç tarafı denizlerle çevrili olduğu, Ege kıyılarının rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu göz önüne alındığında, açık deniz rüzgar türbinlerinin gelecek yıllarda ülkemiz kıyılarında uygulanması olasıdır. Bu bölüm içerisinde uygun yer seçiminin tespitinde izlenen yöntemden bahsedilecektir.

#### **5.1 Gereçler ve Yöntem**

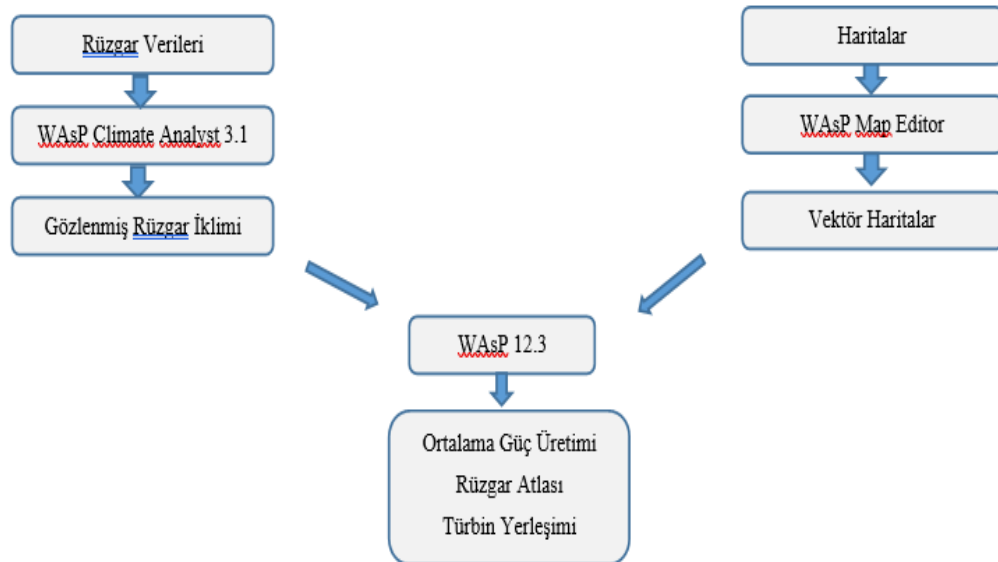
Açık deniz rüzgar türbinlerinin tasarım aşaması çok disiplinli bir iştir. Birçok mühendislik alanını ilgilendiren adımları içermektedir. Uygun yer seçimi tasarım sürecinin ilk basamağıdır. Kurulan rüzgar çiftliklerinde verimin yüksek olabilmesi doğrudan uygun yer seçimi ile alakalıdır. Rüzgar potansiyelinin doğru tahmin edilmesi enerji üretimini etkilemekte, derinlik ve kıyıdan uzaklık gibi faktörler ise yatırım maliyetlerini değiştirmekte ve daha birçok kriter açık deniz rüzgar türbinleri için hayati önem taşımaktadır. Bu kriterlerin tümüyle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için rüzgar verileri, haritalar, programlar ve yardımcı programlar kullanılmaktadır. Bu bölüm içerisinde, bu tez çalışması kapsamında kullanılan bilgisayar programları, haritalar ve yöntemler hakkında bilgi verilecektir.

Açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçiminde öncelikle yapılması gereken rüzgar verileri elde etmektir. Rüzgar verileri bölgenin rüzgar geçmişini ortaya koyacak, hakim rüzgar yönünün tayinini sağlayacak ve ileriye dönük rüzgar tahmini yapmaya olanak sağlayacaktır. Anemometre rüzgar ölçümlerini yapmak için kullanılan alettir. Rüzgar vektörel bir kuvvettir. Bu yüzden rüzgar verileri hız ve yön olmak üzere iki ana veri içermektedir. Türkiye’de rüzgar verileri Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nden temin edilebilmektedir. Genellikle yerden 10 m yüksekte bulunan anemometreler vasıtasıyla rüzgar verileri elde edilmektedir. Büyük

çoğunlukla saatlik olarak alınan rüzgar verileri dakika (30 dk, 20 dk vb) olarak da uygun anemometreler vasıtasıyla elde edilebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında Ege kıyılarında alınan rüzgar verileri, 2014-2019 yılları arasında yerden 10 m yükseklikten ölçülmüş saatlik rüzgar verileridir. Rüzgar verilerinin istatistiksel analizlerinin teknik boyutları 3. Bölüm içerisinde verilmiştir. Çok sayıda veri içerdiği için istatistiksel analizleri elle yapmak uzun ve zahmetli bir süreçtir. Bu analizler için geliştirilmiş WindPro, WAsP, OpenWind gibi birçok program vardır. Microsoft Excel programı üzerinden de bu analizleri yapmak mümkündür. Bu çalışma kapsamında istatistiksel analizler WAsP Climate Analyst 3.1 programı ile yapılmıştır. Uygun bölgelerinin haritaları WAsP Map Editor ve Global Mapper vasıtasıyla, bölgenin rüzgar atlası ve türbin yerleşimleri WAsP 12.3 programıyla düzenlenmiştir.

#### 5.1.1 WAsP Genel Bakış

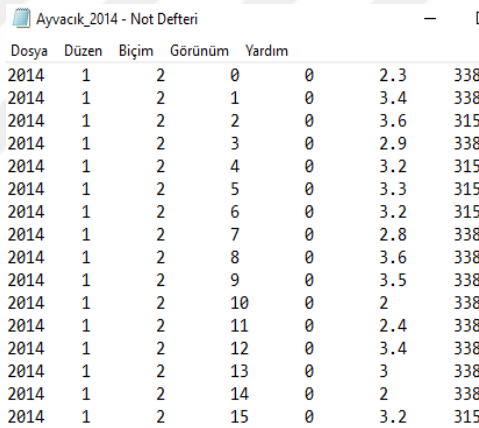
WAsP programı Danimarka Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilmiş bir paket programdır. WAsP Climate Analyst 3.1 ve WAsP Map Editor programları ana program olan WAsP 12.3'e atılacak uygun verileri elde edebilmek için kullanılmaktadır. Şekil 5.1'de WAsP programının genel işlem ağacı verilmiştir.



Şekil 5.1 WAsP işlem ağacı

### 5.1.2 Rüzgar Verilerinin WAsP Climate Analyst 3.1 Programı ile Analizi

WAsP Climate Analyst 3.1 programına öncelikle rüzgar ölçümü yapılan noktanın koordinatları girilmelidir. Ölçüm aletinin yerden yüksekliği bir sonraki adımda program tarafından istenmektedir. Daha sonra ham rüzgar verilerinin programa aktarımı yapılmaktadır. Ham rüzgar verileri programının istediği formatta olmalıdır. Program “.dat”, “.txt”, “.prn”, “.csv” formatlarındaki rüzgar verilerini açabilmektedir. Rüzgar verilerinde tarih, hız, yön bilgilerinin her biri ayrı sütunlarda olması gerekmektedir. Rüzgar yön verileri derece cinsinden olmalıdır. Şekil 5.2’de önce makro ile düzenlenmiş sonra metin formatına çevrilmiş rüzgar verileri verilmiştir. Baştan ilk 5 sütun sırasıyla yıl, ay, gün, saat, dakika ifade etmekte 6. ve 7. sütunlar rüzgar hızı ve yönünü belirtmektedir (WAsP , 2019).

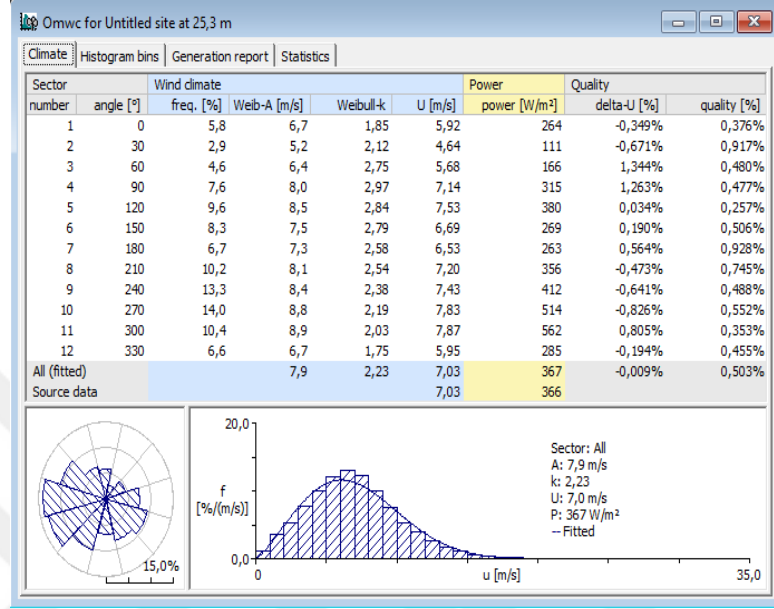


| Dosya | Düzen | Biçim | Görünüm | Yardım |     |     |
|-------|-------|-------|---------|--------|-----|-----|
| 2014  | 1     | 2     | 0       | 0      | 2.3 | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 1       | 0      | 3.4 | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 2       | 0      | 3.6 | 315 |
| 2014  | 1     | 2     | 3       | 0      | 2.9 | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 4       | 0      | 3.2 | 315 |
| 2014  | 1     | 2     | 5       | 0      | 3.3 | 315 |
| 2014  | 1     | 2     | 6       | 0      | 3.2 | 315 |
| 2014  | 1     | 2     | 7       | 0      | 2.8 | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 8       | 0      | 3.6 | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 9       | 0      | 3.5 | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 10      | 0      | 2   | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 11      | 0      | 2.4 | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 12      | 0      | 3.4 | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 13      | 0      | 3   | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 14      | 0      | 2   | 338 |
| 2014  | 1     | 2     | 15      | 0      | 3.2 | 315 |

Şekil 5.2 Düzenlenmiş rüzgar verisi

Bu çalışma kapsamında alınan rüzgar verilerindeki rüzgar yönleri Excel’de makro yazılarak derece cinsine çevrilmiştir. Rüzgar ölçüm aletlerinin bozulması, elektriğin kesilmesi ve daha birçok nedenden dolayı oluşan veri eksiklikleri program tarafından ayrıştırılmaktadır. Aynı zamanda durgunluk eşiği (calm threshold) değerinin programa girilmesi gerekmektedir. Bu eşik ölçüm aletinin bir nevi hassasiyeti anlamına gelmektedir. WAsP Climate Analyst 3.1 rüzgar verileri girilen bölgenin gözlenmiş ortalama rüzgar iklimini (OMWC) vermektedir. Şekil 5.3’te programın kullanma kılavuzunda bulunan örnek bir OMWC verilmiştir. OMWC hakim rüzgar yönünü gösteren rüzgar gülünün, ortalama rüzgar hızının, Weibull A ve Weibull k

parametrelerinin, rüzgâr hızı dağılım histogramının ve ortalama güç potansiyelinin görülebileceği bir üretim raporudur. OMWC ana programa aktarılmak üzere kaydedilmektedir (WAsP , 2019).

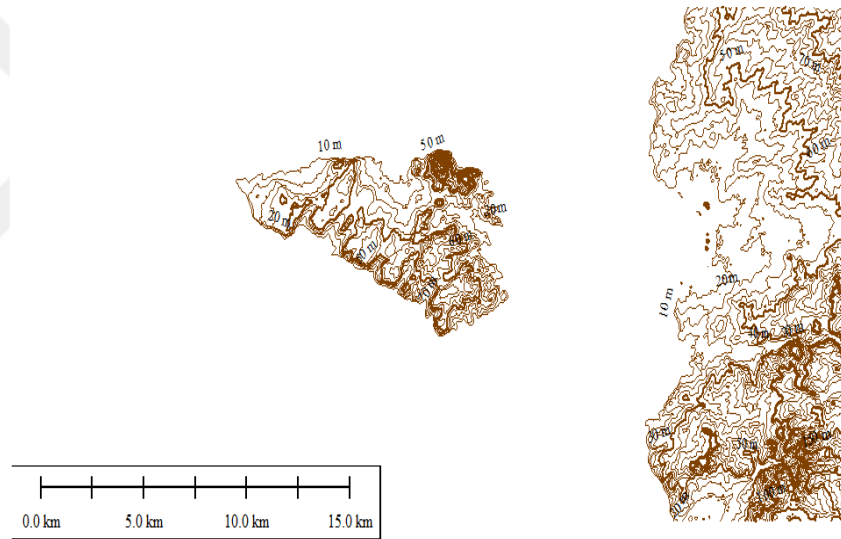


Şekil 5.3 Gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi (OMWC) (WAsP , 2019)

### 5.1.3 Vektör Haritasının Oluşturulması

WAsP 12.3 ana programı için dışardan yüklenmesi gereken iki önemli veri vardır. Biri gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi (OMWC), diğeri ise vektör haritalardır. Vektör haritalar, bölgeye ait izohipsleri, pürüzlülük alanlarını, derinlik çizgilerini içeren dijital haritalardır. WaSP Map Editor, vektör haritalarında gerekli düzenlemeleri yapmak ve pürüzlülük alanlarını oluşturmak için kullanılan, WAsP 12.3 programına yardımcı bir programdır. Ama öncelikle, haritaları WAsP Map Editorün açabileceği “.bna” “.dxf” “.map (WAsP formatı)” dönüştürmek ve topografik haritalardan izohips eğrilerini oluşturmak gerekmektedir. Bunun için gerekli olan eş yükselti eğrilerini içeren topografik haritalar ve deniz derinliklerini içeren batimetri haritalarını işlemek ve istenilen formatlarda kaydedebilmek amacıyla coğrafi bilgi sistemi programlarından yardım almak gerekir. Global Mapper bu programlardan biridir. Global Mapper hemen hemen bütün harita formatlarını açabilen ve işlem yaptıktan sonra istenilen formatta kaydedebilen bir programdır.

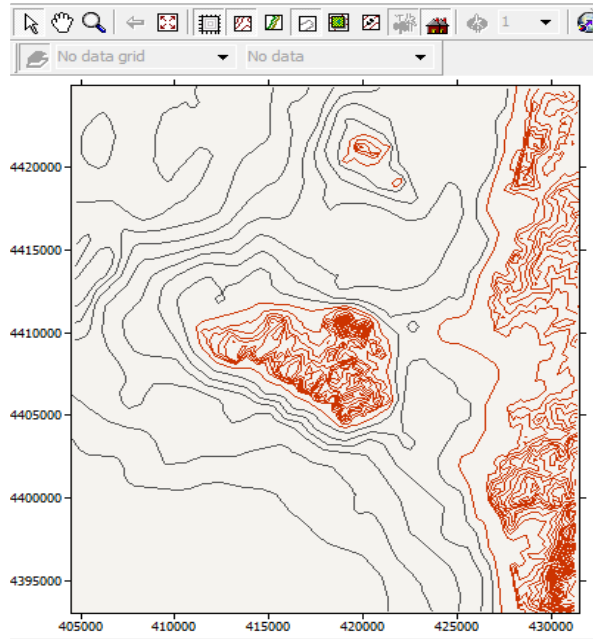
Vektör haritalar birkaç farklı yöntemle oluşturulabilmektedir. Bunlardan birisi NASA tarafından yapılmış STRM (Shuttle Radar Topography Mission) topografik haritaları kullanılarak oluşturulan haritalardır. İnternette ücretsiz olarak elde edilebilmektedir. Bu haritalar Global Mapper programında açılarak “Generate Contour” komutu vasıtasıyla bölgenin eş yükselti eğrileri oluşturulup daha sonra “.map” formatında kaydedilebilmektedir. Şekil 5.4’de Global Mapper’ de izohips eğrileri türetilmiş örnek bir alan verilmiştir. Açık deniz rüzgar türbinleri için büyük önem taşıyan deniz derinlik çizgilerini topografik haritalarda mevcut değildir. Batimetri haritaları Map Editor programında arka plan haritası olarak açılabilip gerekli kalibrasyon işlemleri yapıp dijitalleştirilebilmektedir. Batimetri haritalarına Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı’ndan ulaşılabilir.



Şekil 5.4 Global Mapper’da türetilmiş eş yükselti eğrileri

İnternet üzerinden ücretsiz olarak erişilebilen European Marine Observation and Data Network (EMODnet) ve The Global Multi-Resolution Topography (GMRT) dijital haritaları vektör harita oluşturmak için kullanılabilecek bir başka yöntemdir (Marine Geoscience Data System, 2019). Bu dijital haritalar, hem Digital Elevation Map (DEM) tabanlı topografik haritaları ve batimetri haritalarının dijital hallerini içermektedir. İlgili bölgenin haritaları ASCII, GeoTiff formatları biçiminde indirilebilmekte, Global Mapper programı ile açılarak “generate contour” komutu ile eş yükselti eğrileri türetilmektedir. Bu türetme işleminde derinlik çizgileri de

program tarafından oluşturulmaktadır. Global Mapper’de türetme işleminden sonra harita “.map” formatında kaydedilmesiyle WAsP Map Editor programında işlenebilmeye uygun hale gelmektedir. Derinlik  izgileri WAsP Map Editor programında düzenlenebilmektedir. WAsP programı kara üstü rüzgar türbinlerinin tasarımı için üretilmiş program olup açık deniz rüzgar türbinleri için tasarım yapılırken bazı düzenlemeler yapmak gerekmektedir. Derinlik çizgileri dijital haritalarda eksi (-) işaretili olduğu için rüzgar türbinlerinin göbek yüksekliliği hatalı çıkmaktadır. Bu durum ortalama enerji üretiminin hatalı çıkması anlamına gelmektedir. Derinlik çizgilerini değersiz derinlik çizgilerine çevirmek gerekmektedir. Bu işlem WAsP Map Editor programında bulunan non-attribute komutu ile yapılmaktadır. şekil 5.5’de karalardaki eş yükselti eğrileri (kırmızı eğriler) ve denizlerdeki değersiz derinlik çizgilerinin (gri çizgiler)  rnek bir görseli verilmiştir. Non-attribute komutu tasarım aşamasında büyük kolaylık sağlayan bir komuttur. Açık deniz rüzgar çiftlikleri kurmak için uygun olmayan alanlar non-attribute çizgilerle belirtildiği taktirde WAsP 12.3 programında “Edit Mask” menüsünden bu alanlar maskelenebilmekte ve türbin yerleşimi için uygun alanlar rahatlıkla belirlenebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan vektör haritalar (EMODnet) ve (GMRT) dijital haritalarından faydalanılarak yapılmıştır.



şekil 5.5 WAsP Map Editor değersiz derinlik çizgileri

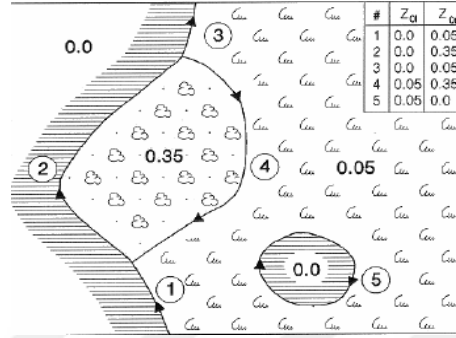
WAsP Map Editor’de yapılan önemli işlemlerden birisi de pürüzlülük alanlarının belirlenmesidir. Yüzeylerin pürüzlülükleri rüzgar hızını etkilemektedir. Rüzgarın düşeyde ve yatayda değişiminin program tarafından doğru tahmin edilebilmesi için analiz yapılan bölgenin pürüzlülük çizgileri WAsP Map Editor programına işlenmelidir. WAsP Map Editor programına özel yüzey koşulları için girilmesi gereken pürüzlülük çizgisi yükseklikleri programın kullanma kılavuzunda verilmiştir. Bu değerler Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Tablo 5.1’deki pürüzlülük yüksekliklerinin kullanıldığı matematiksel ifade Bölüm 3.4’de verilmiştir. Rüzgar hızının yükseklikle değişiminin belirlenebilmesi için bu değerlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 5.1 Map Editor programına girilmesi gereken pürüzlülük yükseklikleri (WAsP , 2019)

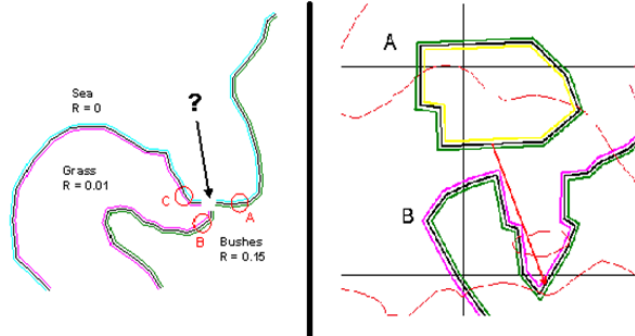
| Arazi yüzeyi                 | WAsP Pürüzlülük Yüksekliği $z_0$ (m) |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Yüksek ağaçlı orman          | 1,5                                  |
| Şehir                        | 1                                    |
| Orman                        | 0,80                                 |
| Rüzgar kesici/ kıran         | 0,30                                 |
| Ağaçlık alan veya çalı       | 0,20                                 |
| Sık çiftlik alanı            | 0,10                                 |
| Seyrek çiftlik alanı         | 0,05                                 |
| Seyrek binalı yerleşim alanı | 0,03                                 |
| Havaalanı pisti              | 0,01                                 |
| Çimlik arazi                 | 0,008                                |
| Kar yüzeyi                   | 0,003                                |
| Kum yüzeyi                   | 0,003                                |
| Su yüzeyi                    | 0                                    |

Pürüzlülük alanları belirli bir sistematik çerçevesinde programa işlenebilmektedir. Şekil 5.6 programın kullanma kılavuzundan alınmış bir görseldir ve bu görsel üzerinden bu sistematığı anlatmak daha basittir. Bu görselinin sol üst köşesinde iki adet  $z_0$  değeri verilmiş olan bir tablo vardır. Soldaki  $z_{0l}$  değerleri çizgilerin solunda kalan bölgelerin pürüzlülük yüksekliğini temsil etmekte, sağdaki  $z_{0r}$  değerleri ise çizgilerin sağında kalan pürüzlülük yüksekliğinin temsil etmektedir. Örneğin 2 numaralı çizginin solunda kalan bölge su yüzeyi olduğu için pürüzlülük yüksekliği 0,000 m, sağında kalan bölge rüzgar kesicilerin olduğu bir bölge olduğu için

pürüzlülük yüksekliği 0,35 m değerindedir. Bu sistematik takip edilerek analizi yapılacak bölgenin pürüzlülük yükseklikleri WAsP Map Editor’e işlenmesi gerekir. WAsP 12 programında yapılan nihai analiz için vektör haritalar önemli bir basamaktır. Pürüzlülük yükseklikleri belirlenirken uydu görüntülerinden ve bölgeyle ilgili görsellerden faydalanmak hızlı ve akıllıca bir çözüm olacaktır.



Şekil 5.6 Pürüzlülük yüksekliklerinin işlenme sistematığı (WAsP , 2019)



Şekil 5.7 Dead ends ve LRF hataları (WAsP , 2019)

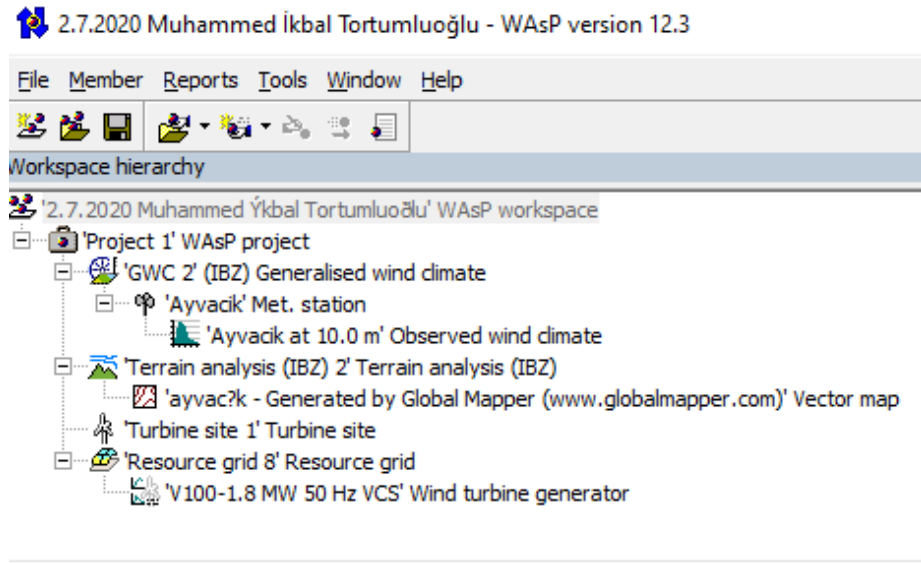
Pürüzlülük yükseklikleri haritaya işlenirken dikkat edilmesi gereken iki önemli husus vardır. Bunlara dikkat edilmezse program hata vermektedir. Bunlardan ilki “Dead ends” hatasıdır. Pürüzlülük çizgileri ya kapalı bir alan oluşturmalı ya da uçları sınır alanına bağlanmalı veya bir başka sınır düğüm noktasına bağlanmalıdır. Şekil 5.7’de sol görselde Dead ends hatasıyla ilgili bir görsel verilmiştir. Bu durumda bu çizgilerin uçları “Anchoring” komutu ile düğüm noktası yapılması gerekmektedir. İkinci hata ise Line Face Rougness (LFR) hatasıdır. Bunlar aynı alana bakan iki çizginin o alana ait pürüzlülük yüksekliklerinin eşit olması anlamına gelmektedir.

Şekil 5.7’de sağdaki görselde LRF hatası verilmiştir. Bu iki hataya işlem sırasında dikkat etmek gerekmektedir.

#### 5.1.4 WAsP 12.3 Programı ile Nihai Analiz

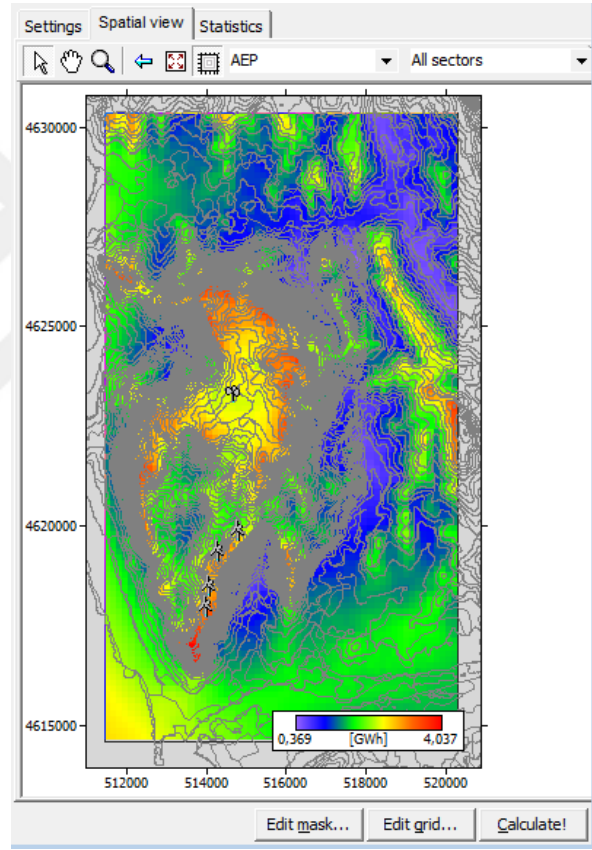
Gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi ve vektör haritalar WAsP 12.3 ana programında nihai analiz yapabilmek için en önemli iki unsurdur. Bunların doğruluğu titizlikle kontrol edilmelidir. WAsP 12.3 ana programı en güncel sürümdür. Bu program sayesinde rüzgar çiftliği tasarımı, iz etkisi raporu, rüzgar gücü potansiyeli, rüzgar atlası oluşturulabilmektedir.

Programa girdiler belirli bir hiyerarşi gözetilerek girilmelidir. Aksi takdirde program hata vermekte ve analiz yapamamaktadır. İlk olarak yeni proje açılmalıdır. Climate Analyst tarafından oluşturulan Gözlenmiş Rüzgar İklimi programa girdi olarak aktarılır. Meteoroloji istasyonun konumu otomatik olarak yerini alır. Daha sonra oluşturulmuş olan vektör harita programa aktarılır. Bu iki girdi sorunsuz şekilde aktarıldıktan sonra program “resource grid” haritasını oluşturulabilir. Şekil 5.8’de örnek bir projenin work space penceresi verilmiştir. Bahsi geçen hiyerarşik sıralama açıkça görülmektedir.



Şekil 5.8 Çalışma penceresi hiyerarşisi

Resource grid haritası, analiz yapılan bölgenin Weibull-A ve Weibull-k dağılımlarının, yükselti ve pürüzlülüğten kaynaklanan rüzgar hızı değişimlerinin, sektörlere ait frekansların alan üzerindeki değişimlerinin görülebildiği bir haritadır. Bu harita sayesinde türbin yerleşimi için uygun alanlar tespit edilebilmektedir. Map Editor kısmında anlatılan edit mask menüsü resource grid haritası oluşturulduktan sonra aktif hale gelmektedir. Bu aşamada maskeleyerek uygun olmayan alanlar türbin sahasından çıkarılabilmektedir. Şekil 5.9’da programın kullanma kılavuzunda alınmış olan örnek resource grid haritası verilmiştir. Ortalama Enerji Üretimi(AEP)’nin alan üzerindeki değişimi görülebilmektedir.



Şekil 5.9 Resource grid haritası (WAsP , 2019)

#### 5.1.5 Uygun Yer Seçiminde İzlenilen Akış Şeması

Açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçimi birçok kriteri içeren karmaşık bir süreçtir. Bu yüzden belirli adımlar izlenilerek yapılacak tasarım hatayı en aza indirecek ve zamandan tasarruf sağlayacaktır. Bu tez çalışması kapsamında Ege bölgesinde

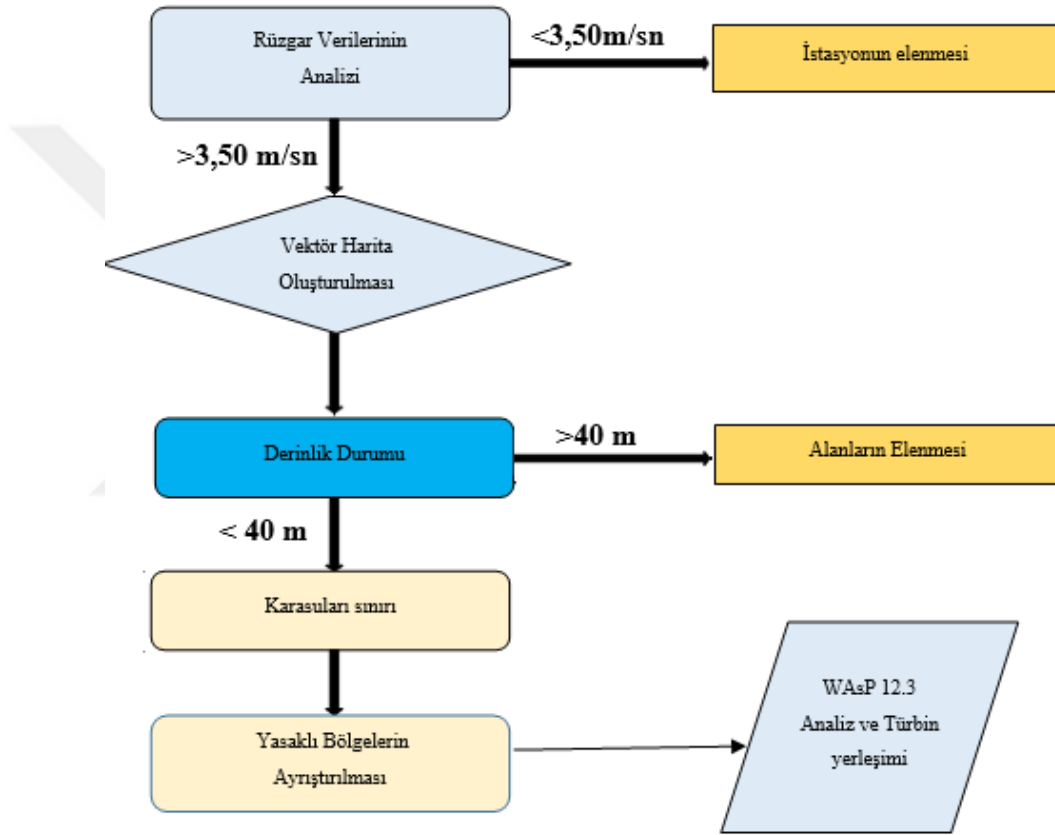
kıyıya yakın 14 adet meteoroloji istasyonundan alınmış rüzgar verileri kullanılmıştır. Ege bölgesi için yapılmış olan rüzgar atlasları göz önüne alınarak bu istasyonlar seçilmiştir. İlk olarak seçilen istasyon verileri WAsP Climate Analyst 3.1 programıyla analiz edilmiştir. Bu analizdeki amaç, ortalama rüzgar hızı 3,5 m/sn hızın altındaki bölgeleri elemektir. 3,5 m/sn ortalama rüzgar hızı bir eşik değeri olarak alınmıştır. Bunun sebebi piyasadaki birçok rüzgar türbininin enerji üretmeye başladığı hız (cut-in speed) değerinin 3-4 m/ sn değerleri arasında olmasıdır. Tablo 5.2’de WAsP programında güç eğrileri tanımlı olan çeşitli firmaların rüzgar türbinlerinin model ve cut in hızları gösterilmiştir. Tablo 5.2’de verilen türbinler, dünyanın farklı yerlerinde kara üstü ve açık deniz rüzgar çiftliklerinde kullanılmıştır.

Tablo 5.2 Farklı türbin modellerinin cut-in hızları (WAsP , 2019)

| Türbin Modeli              | Enerji üretmeye başladığı hız (cut-in speed) [m/sn] |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| Bonus 1 MW                 | 4,00                                                |
| Bonus 1.3 MW               | 3,00                                                |
| Bonus 2 MW                 | 4,00                                                |
| SWT-1.3-62                 | 3,00                                                |
| SWT-2.3-93 (offshore)      | 4,00                                                |
| Vestas V80 2 MW (offshore) | 4,00                                                |
| Vestas V80 (Nearshore)     | 4,00                                                |
| Vestas V90 1.8 MW          | 3,50                                                |
| Vestas V112 3 MW           | 3,00                                                |
| Nordex N90 (offshore)      | 3,00                                                |
| Power Wind 90              | 3,00                                                |

Rüzgar hızı 3,5 m/sn yüksek olan bölgelerin vektör haritaları Map Editor vasıtasıyla oluşturulmuştur. Vektör haritaların oluşturulmasındaki amaç türbin yerleşimine uygun alanların görülebilmesidir. Nitekim Bölüm 4’de bahsedilen uygun yer seçiminde belirleyici kriterlerden olan bölgenin deniz derinlik durumu irdelenmiştir. Deniz derinlik durumu temel türünü belirleyen unsurdur. Bu çalışmada tekil kazık temellere uygun alanların belirlenmesi amaçlanmıştır. Tekil kazık temeller için ideal uygulama derinliği 10-40 m arasındadır. Bu yüzden vektör haritalarda 40 m derinlik sınırı olarak alınmıştır. Rüzgar türbinlerinin yerleşimi yapılırken türbinler arasında belirli

mesafeler bırakılmaktadır (Yan yana olan rüzgar türbinleri arasında 3-5 rotor çapı kadar, arka arkaya olan rüzgar türbinlerinde 7-10 rotor çapı kadar). Deniz derinliğinin kısa mesafelerde fazla şekilde arttığı alanlar özellikle arka arkaya rüzgar türbini kurmak için uygun olmayan alanlardır. Derinlik durumu uygun olmayan bölgeler elenmiştir. Son olarak da karasuları sınırı, askeri atış sahaları gibi unsurlar göz önüne alınarak uygun alanlar belirlenmiştir. Açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçiminde izlenen yöntemin şematik gösterimi Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Uygun yer seçimi akış şeması

## 5.2 Ege Bölgesi Meteoroloji İstasyonlarından Alınmış Rüzgar Verilerinin Analizi

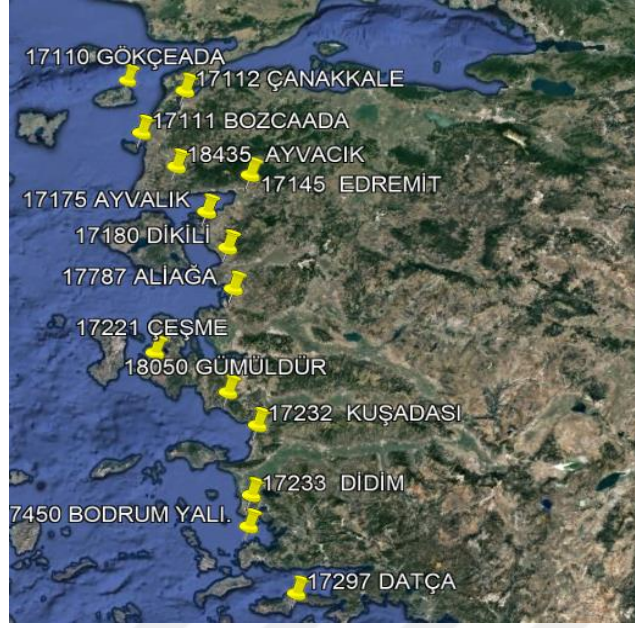
REPA rüzgar atlası ve Global Wind Atlas incelenerek Ege Bölgesinden 14 adet meteoroloji istasyonu seçilmiş ve rüzgar verileri DMİ’ den temin edilmiştir. Rüzgar verileri 01/01/2014-31/03/2019 tarihleri arasında 1 saatlik ve yerden 10 m

yükseklikten alınmış rüzgar yönü ile hızını içeren verilerdir. İstasyonları isimleri, kod numaraları ve enlem-boylam koordinat cinsinden koordinatları Tablo 5.3'te, harita üzerindeki yerleri de Şekil 5.11'de gösterilmiştir. DMI' den .text dosyası halinde alınan rüzgar verileri WASP Climate Analyst 3.1 programının işleyebileceği formata uygun olarak Excel'de makro yazılarak düzenlenmiştir.

Tablo 5.3 İstasyon bilgileri

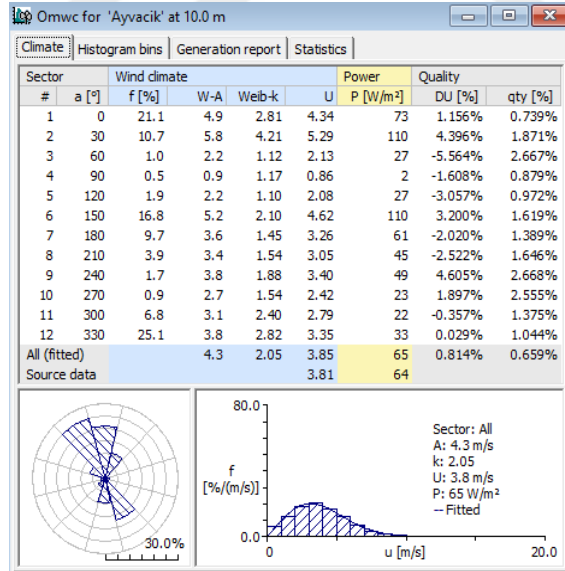
| İstasyon Kodu | İstasyon Adı     | Koordinatları(Enlem/Boylam) |
|---------------|------------------|-----------------------------|
| 17110         | Gökçeada         | 40.191000°/ 25.907500°      |
| 17111         | Bozcaada         | 39.823600°/ 26.072793°      |
| 17112         | Çanakkale        | 40.141000°/ 26.399300°      |
| 18435         | Ayvacık          | 39.608091°/ 26.395790°      |
| 17145         | Edremit          | 39.589500°/ 27.019200°      |
| 17175         | Ayvalık          | 39.311300°/ 26.686100°      |
| 17180         | Dikili           | 39.073700°/ 26.888000°      |
| 17787         | Aliağa           | 38.792200°/ 26.968200°      |
| 17218         | Çeşme            | 38.303600°/ 26.372400°      |
| 18050         | Gümüldür         | 38.072000°/ 27.002600°      |
| 17232         | Kuşadası         | 37.859700°/ 27.265200°      |
| 17233         | Didim            | 37.369900°/ 27.264500°      |
| 17450         | Bodrum Yalıkavak | 37.150800°/ 27.264400°      |
| 17297         | Datça            | 36.708300°/ 27.691900°      |

Rüzgar verileri ortalama rüzgar hızlarını tayin edebilmek için önemlidir. Aynı zamanda WASP 12.3 ana programında nihai analiz yapılırken kullanılacak olan gözlenmiş ortalama rüzgar ikliminin belirlenmesi için rüzgar verilerinin analiz edilmesi gerekmektedir. 18435 kodlu Ayvacık istasyonunun analizi sonucu elde edilen raporlar örnek teşkil etmesi için verilecek gerekli olan kısımlar anlatılacaktır. Diğer istasyonların gözlenmiş rüzgar iklimi raporları ekler kısmında verilmiştir.



Şekil 5.11 İstasyonların Google Earth haritası üzerindeki yerleri

18435 kodlu Ayvacık istasyonunun Wasp Climate Analyst 3.1 programında analizi sonucu elde edilen gözlenmiş rüzgar iklimi Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12 Ayvacık istasyonu gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

Rüzgar yönlerinin frekansları Şekil 5.12 ‘de baştan üçüncü sütunda f [%] simgesinin altında görülmektedir. Sol altta görülen rüzgar gülü bu frekans değerine

göre oluşturulmakta ve hakim rüzgar yönü frekansı en yüksek yön olmaktadır. Ayvacık istasyonu için hakim rüzgar yönü 12. Sektör (330°) kuzeybatıdır. Rüzgar hızı simgesi U olarak verilen sütunda tüm sektörler ait ortalama rüzgar hızları görülmektedir. En altta ise tüm sektörlerin ortalama rüzgar hızı verilmiştir. Ayvacık istasyonu için tüm sektörlerin ortalama rüzgar hızı 3,81 m/sn değerindedir. Tüm sektörlerin ortalama güç yoğunluğu ise 64 W/m<sup>2</sup> değerindedir.

14 adet istasyon için aynı analiz yapılmış ve ortalama rüzgar hızı değerleri belirlenmiştir. İstasyonlara ait ortalama rüzgar hızı değerleri Tablo 5.4’de verilmiştir. İzlenilen yöntem şeması gereği ortalama rüzgar hızı değeri 3,5 m/sn altında olan istasyonlar elenmiştir. Ortalama rüzgar hızı 3,5 m/sn değerinin üstünde olan istasyonlar koyu renk ile belirtilmiştir.

Tablo 5.4 Ortalama rüzgar hızları

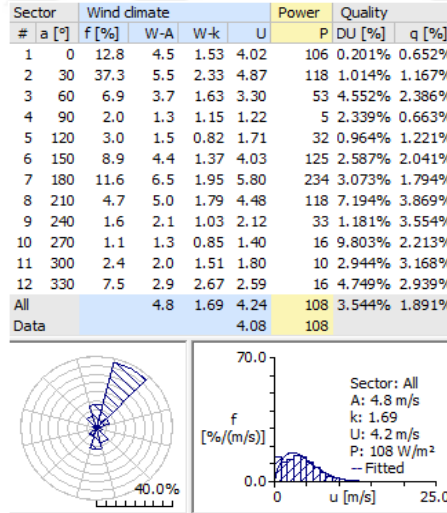
| İstasyon Adı     | Ortalama rüzgar hızı [m/sn] |
|------------------|-----------------------------|
| <b>Bozcaada</b>  | <b>4,78</b>                 |
| <b>Gökçeada</b>  | <b>4,08</b>                 |
| <b>Gümüldür</b>  | <b>3,96</b>                 |
| <b>Ayvacık</b>   | <b>3,81</b>                 |
| <b>Datça</b>     | <b>3,63</b>                 |
| <b>Çanakkale</b> | <b>3,59</b>                 |
| Bodrum Yalıkavak | 3,34                        |
| Didim            | 2,91                        |
| Aliğa            | 2,69                        |
| Dikili           | 2,38                        |
| Çeşme            | 2,31                        |
| Kuşadası         | 2,24                        |
| Ayvalık          | 2,10                        |
| Edremit          | 1,99                        |

### 5.3 Türbin Yerleşimine Uygun Olmayan Alanların Belirlenmesi ve Türbin Yerleşimi

Rüzgar hızı açısından sıralanan istasyonlardan Bozcaada, Gökçeada, Gümüldür, Ayvacık, Datça ve Çanakkale 3,5 m/sn ortalama rüzgar hızının üstünde bir hıza sahip oldukları için vektör haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar üzerinde derinlik koşulu irdelenmiş, 40 m deniz derinliğinin aşıldığı alanlar çıkarılmıştır. Daha sonra türbin yerleşimine uygun olmayan yasaklı alanlar elenerek türbin yerleşimi yapılabilecek bölgeler tespit edilmiştir.

#### 5.3.1 Gökçeada

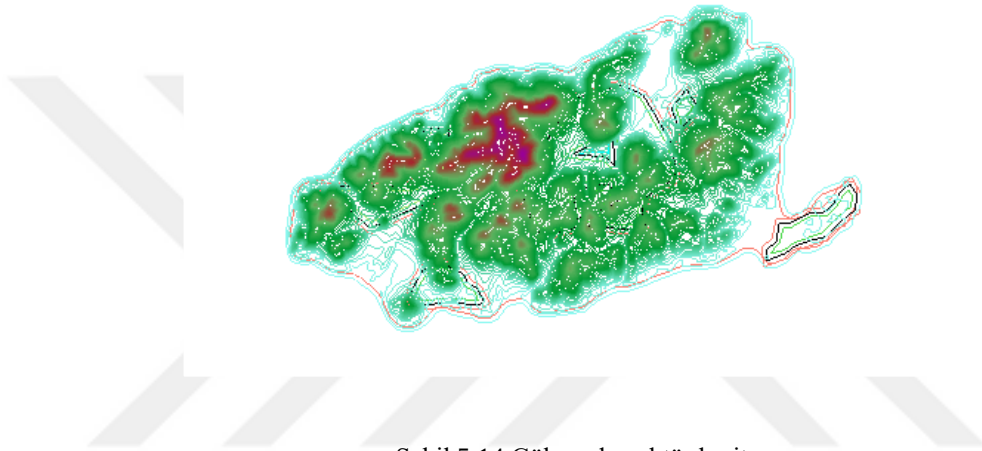
Gökçeada istasyonundan 01.01.2014 – 31.03.2019 yılları arasında saatlik olarak ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönü verileri WAsP Climate Analyst 3.1 vasıtasıyla analiz edilmiştir ve oluşturulan gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.13 Gökçeada gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

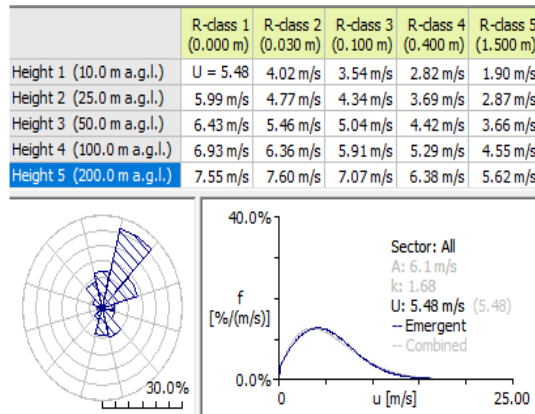
Gökçeada için hakim rüzgar yönü 2. Sektör (30°) olan kuzeydoğudur. Ortalama rüzgar hızı 4,08 m/sn’ dir. Gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi meteoroloji istasyonundan alınmış olan rüzgar verilerinin salt analizidir. Açık denizde oluşacak

rüzgar iklimini görebilmek için rüzgar atlası oluşturmak gerekmektedir. Bu bağlamda bölgenin vektör haritası önem arz etmektedir. Gökçeada için WAsP Map Editor 'de oluşturulmuş vektör harita Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Gökçeada için en küçük yükseklik çizgisi 0 m, en büyük yükseklik çizgisi 640 m'dir. Pürüzlülük alanları uydu görüntülerinden faydalananarak oluşturulmuştur. Gökçeada için toplamda 11 adet pürüzlülük alanı tanımlanmış. Bunlardan en düşüğü su yüzeyi 0,000 m pürüzlülük yüksekliğine sahipken, en yükseği 1,000 m değeriyle orman ve yerleşim alanını temsil etmektedir.



Şekil 5.14 Gökçeada vektör haritası

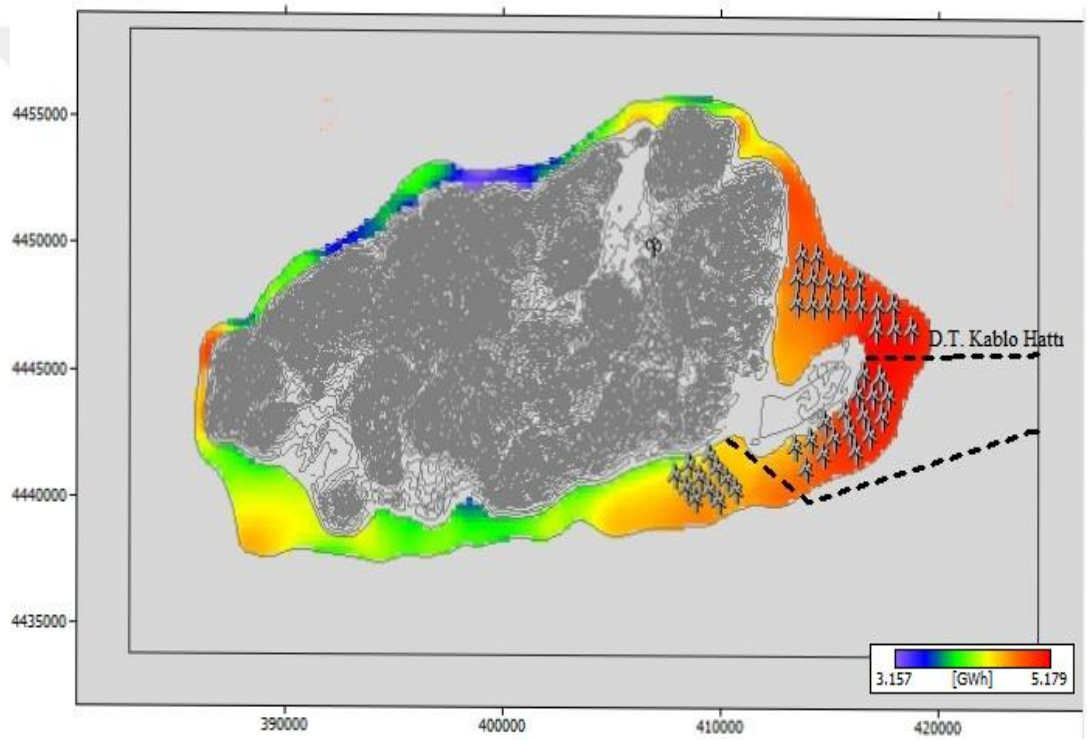
Gökçeada için gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi ve vektör harita WAsP 12.3 ana programa girdi olarak girilerek rüzgar atlası elde edilmiştir. Rüzgar atlasında yerden belirli yüksekliklerde ve farklı pürüzlülük alanlarında oluşacak ortalama rüzgar hızları görülebilmektedir.



Şekil 5.15 Gökçeada rüzgar atlası



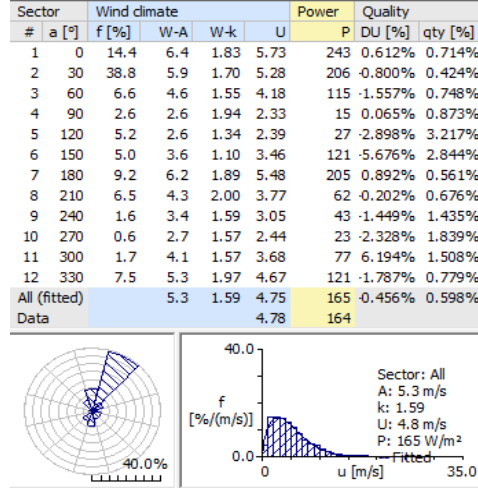
kart haritalarından faydalanılarak belirlenen deniz tabanı kablo hatları siyah kesikli çizgilerle belirtilmiş ve kablo hatlarının bulunduğu yerlere türbin yerleşimi yapmaktan kaçınılmıştır. Toplamda 45 adet 80 m rotor çapına sahip Vestas V80- 2 MW rüzgar türbinin konuşlandırılması yapılmıştır. Şekil 5.17’de Gökçeada için ortalama enerji üretim haritası verilmiştir. Toplamda Gökçeada için 90 MW kurulu güce sahip olan bu yerleşim sonucunda yıllık ortalama net enerji üretim değeri 252,986 GWh/yıl olarak WAsP programı vasıtasıyla hesaplanmıştır. Yerleşim yapılırken iz etkisi dikkate alınmış, yan yana olan rüzgar türbinleri arasında 7 rotor çapı mesafe, arka arkaya olan rüzgar türbinleri arasına 10 rotor çapı mesafe bırakılmıştır.



Şekil 5.17 Gökçeada ortalama enerji üretim haritası

### 5.3.2 Bozcaada

Bozcaada istasyonundan 01.01.2014 – 31.03.2019 yılları arasında saatlik olarak ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönü verileri WAsP Climate Analyst 3.1 vasıtasıyla analiz edilmiştir ve oluşturulan gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 5.18’de verilmiştir.



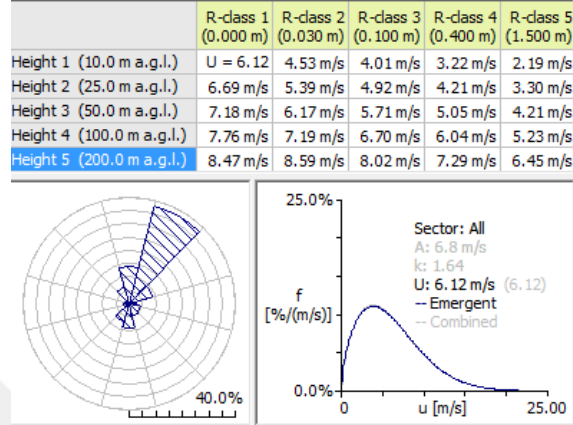
Şekil 5.18 Bozcaada gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

Bozcaada için hakim rüzgar yönü 2. Sektör (30°) olan kuzeydoğudur. Ortalama rüzgar hızı 4,78 m/sn' dir. Bozcaada, Gökçeada'ya göre rüzgar potansiyeli daha yüksektir. Açık denizde oluşacak rüzgar iklimini görebilmek için rüzgar atlası oluşturmak gerekmektedir. Rüzgar atlasını oluşturabilmek için vektör haritaya ihtiyaç vardır. Bozcaada için WAsP Map Editor 'de oluşturulmuş vektör harita Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Bozcaada için en küçük yükseklik çizgisi 0 m, en büyük yükseklik çizgisi 200 m'dir. Pürüzlülük alanları uydu görüntülerinden faydalanarak oluşturulmuştur. Bozcaada için toplamda 17 adet pürüzlülük alanı tanımlanmış. Bunlardan en düşüğü su yüzeyi 0,000 m pürüzlülük yüksekliğine sahipken, en yükseği 1,000 m değeriyle orman ve yerleşim alanını temsil etmektedir.



Şekil 5.19 Bozcaada vektör haritası

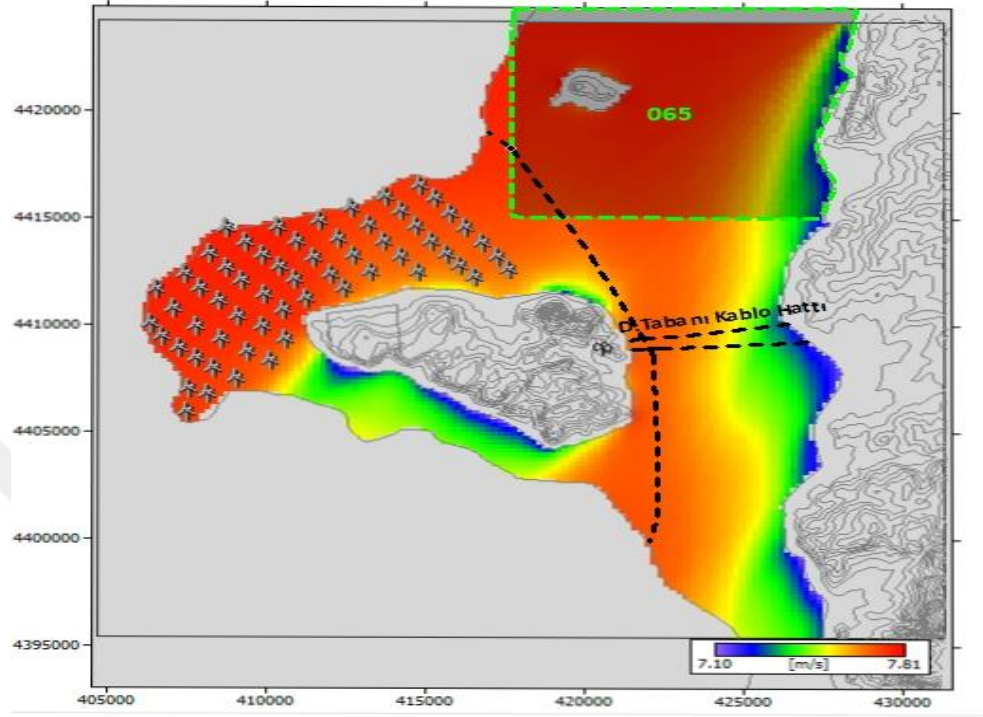
Bozcaada için gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi ve vektör harita WAsP 12.3 ana programa girdi olarak girilerek rüzgar atlası elde edilmiştir. Bozcaada rüzgar atlası Şekil 5.20’de verilmiştir. Bozcaada için 10 m yükseklikte gözlenmiş ortalama rüzgar ikliminde 4,78 m/sn olan ortalama rüzgar hızı, deniz üzerinde 6,12 m/sn değerine ulaşmıştır.



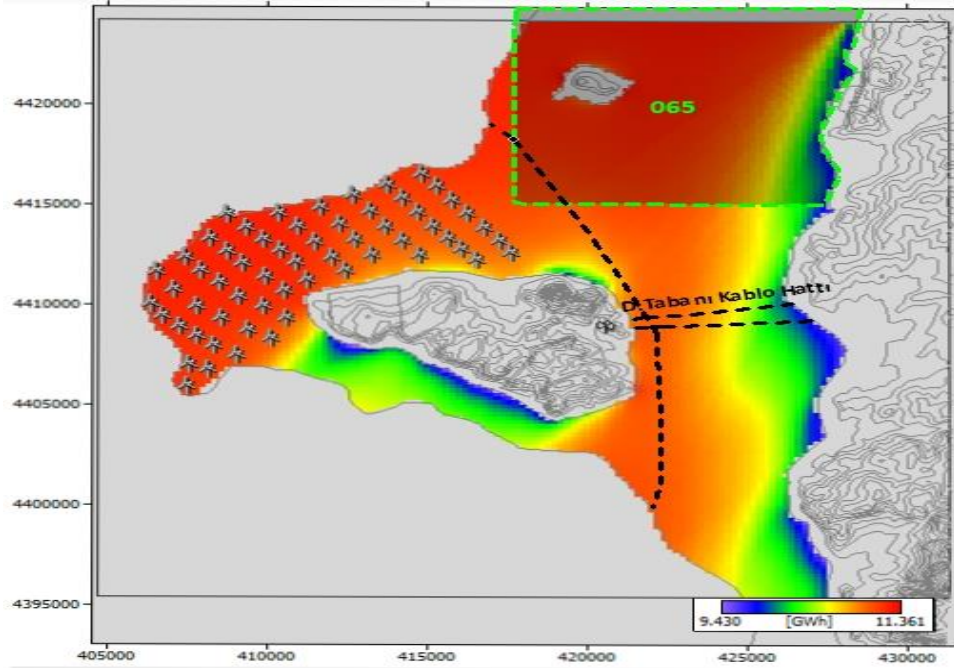
Şekil 5.20 Bozcaada rüzgar atlası

Bozcaada için 40 m üzerindeki derinlik alanları, yasaklı alanlar, deniz tabanı kablo hatlarının bulunduğu alanlar belirlenmiş ve elenmiştir. Bu işlemlerden sonra Bozcaada için oluşturulmuş rüzgar hızının değişiminin, yasaklı alanların ve türbin yerleşiminin görülebildiği harita Şekil 5.21’de verilmiştir. Yeşil kesikli çizgiyle belirtilen 065 kodlu alan, askeri eğitim ve atış sahasıdır. Bu saha, Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığının yayınlamış olduğu 2018 yılı denizcilere ilan yıllığı incelenerek oluşturulmuştur. Bozcaada’nın güneydoğu kıyılarında bulunan deniz tabanı kablo hatları şekilde 5.21’de gösterilmiştir. Yasaklı sahalar ve deniz tabanı kablo hatlarının bulunduğu alanlara türbin yerleşimi yapılmaktan kaçınılmış, adanın kuzeybatı kıyılarının yüksek rüzgar potansiyeline sahip olmasından dolayı türbin yerleşiminde kuzeybatı açıkları tercih edilmiştir. 112 m rotor çapına sahip Vestas firmasına ait V112- 3MW-Offshore tipi açık deniz rüzgar türbini konuşlandırılması yapılmıştır. Şekil 5.22’de Bozcaada için ortalama enerji üretim haritası verilmiştir. Bozcaada için 180 MW kurulu güce sahip bu yerleşiminin yıllık ortalama enerji üretimi 670,854 GWh/yıl olarak WAsP programıyla hesaplanmıştır. Yerleşim yapılırken iz etkisi

dikkate alınmış, yan yana olan rüzgar türbinleri arasında 7 rotor çapı mesafe, arka arkaya olan rüzgar türbinleri arasına 10 rotor çapı mesafe bırakılmıştır.



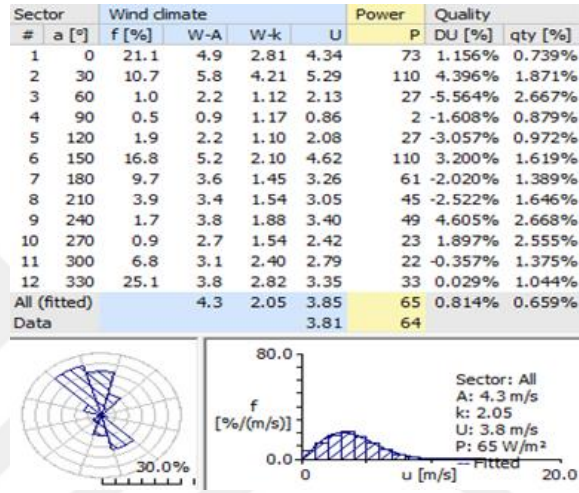
Şekil 5.21 Bozcaada açık deniz türbin yerleşim ve rüzgar hızı haritası



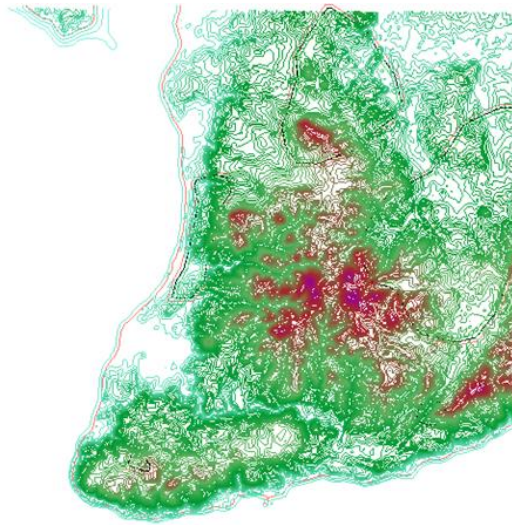
Şekil 5.22 Bozcaada açık deniz türbin yerleşim ve rüzgar hızı haritası

### 5.3.3 Ayvacık

Ayvacık istasyonundan 01.01.2014 – 31.03.2019 yılları arasında saatlik olarak ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönü verileri WAsP Climate Analyst 3.1 vasıtasıyla analiz edilmiştir. Ayvacık istasyonu rüzgar verilerinin analizi sonucunda elde edilen gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 5.23'te verilmiştir. Hakim rüzgar yönü 12. Sektör(330°) kuzeybatıdır. Ortalama rüzgar hızı 3,81 m/sn değerindedir.



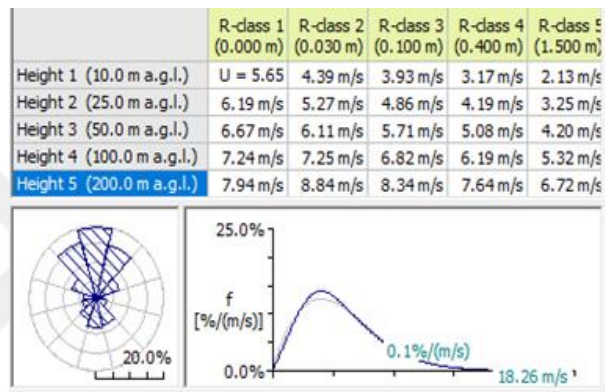
Şekil 5.23 Ayvacık gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



Şekil 5.24 Ayvacık vektör haritası

Ayvacık için WAsP Map Editor ‘de oluşturulmuş vektör harita Şekil 5.24’te gösterilmiştir. Ayvacık için en küçük yükseklik çizgisi 0 m, en büyük yükseklik çizgisi 630 m’dir. Pürüzlülük alanları uydu görüntülerinden faydalanarak oluşturulmuştur.

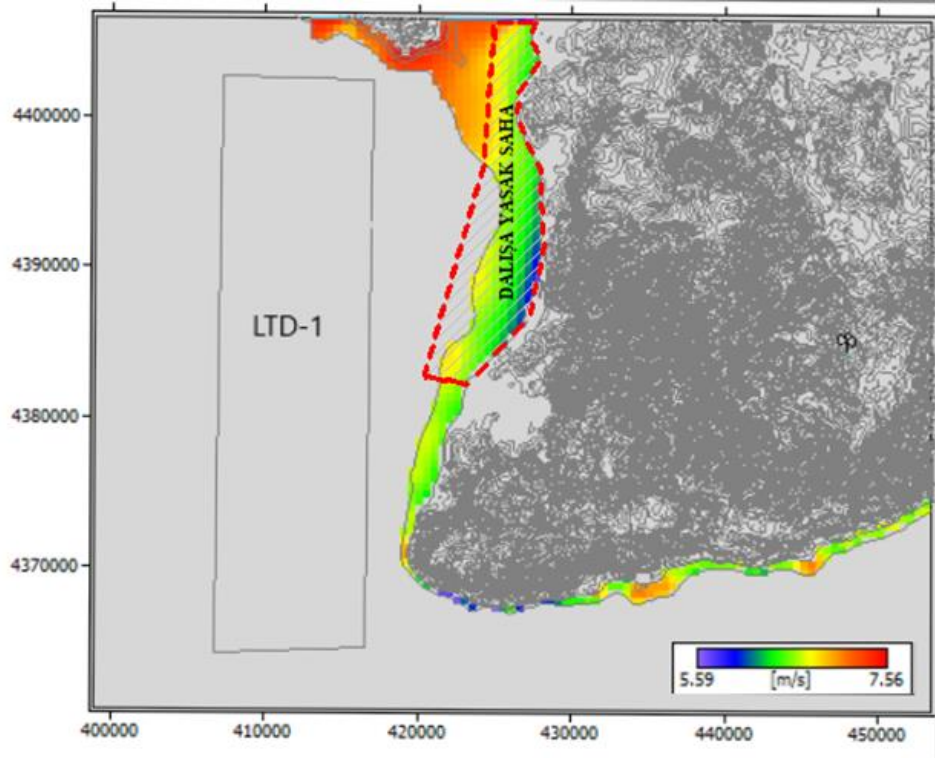
Ayvacık için oluşturulmuş rüzgar atlası Şekil 5.25’te verilmiştir. Yerden 10 m yükseklik için ortalama rüzgar hızı meteoroloji istasyonunun olduğu noktada 3,81 m/sn iken açık denizde 5,65 m/sn değerindedir. Ayvacık istasyonu rüzgar atlası incelendiği rüzgar hızı açısından uygun bir bölge olduğu görülmektedir.



Şekil 5.25 Ayvacık rüzgar atlası

Ayvacık için 40 m üzerindeki derinlik alanları ve yasaklı alanlar bulunduğu alanlar belirlenmiş ve elenmiştir. Şekil 5.26’da rüzgar hızı ve yasaklı sahaları içeren harita verilmiştir.

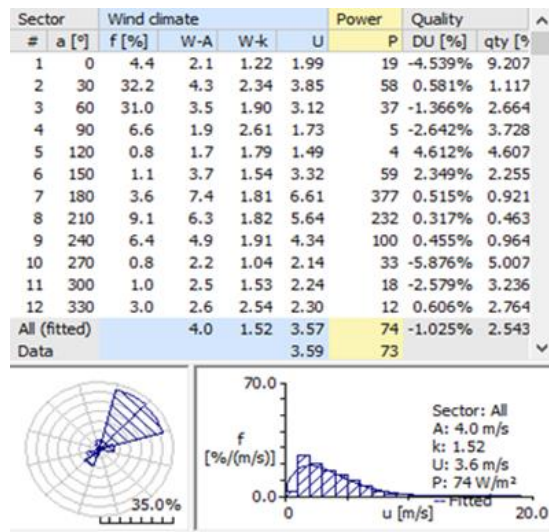
Ayvacık istasyonunun güneyinde bulunan kıyılarda deniz derinliği kıyıya yakın bölgelerde ani artış gösterdiği için türbin yerleşimi için uygun alanlar çok kısıtlıdır. Kuzeybatı tarafı türbin yerleşimi için uygun geniş alanlara ve yüksek rüzgar potansiyeline sahip olmasına karşın burada da dalışa yasak saha mevcuttur. Şekil 5.26’da LTD-1 olarak gösterilen alan askeri eğitim ve atış sahasıdır. 40 m derinlik sınırının dışında bulunsun da türbin yerleşimi yapılabilecek alanlara yakınlığı söz konusudur. Rüzgar türbinleri 100 m yüksekliklere varan gövde uzunlukları ve oluşturdukları türbülanslar sebebiyle hava, deniz taşıtlarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı bu bölge için türbin konuşlandırılması yapılamamıştır.



Şekil 5.26 Ayvacık yasak sahalar ve rüzgar hızı haritası

#### 5.3.4 Çanakkale

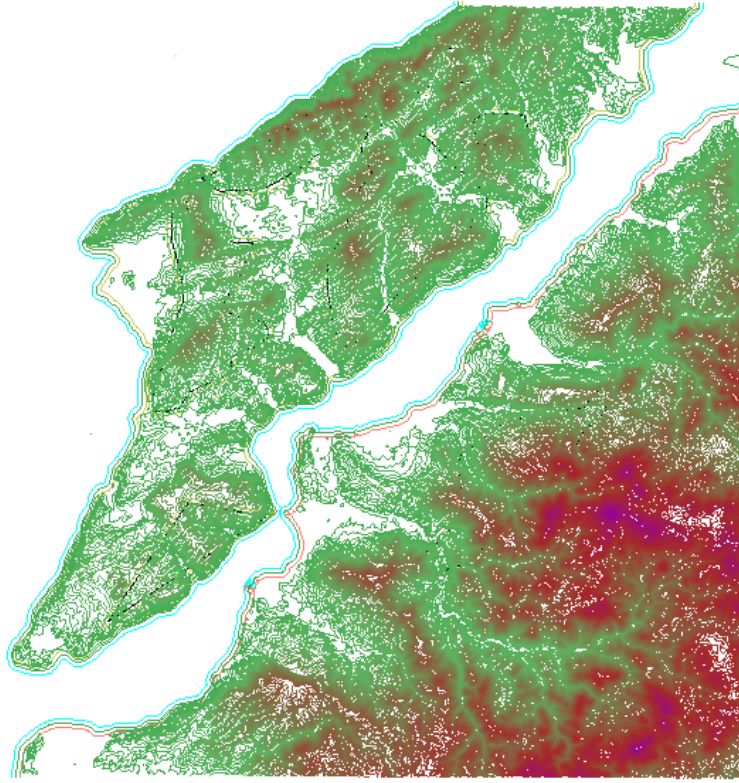
Çanakkale gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.27 Çanakkale gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

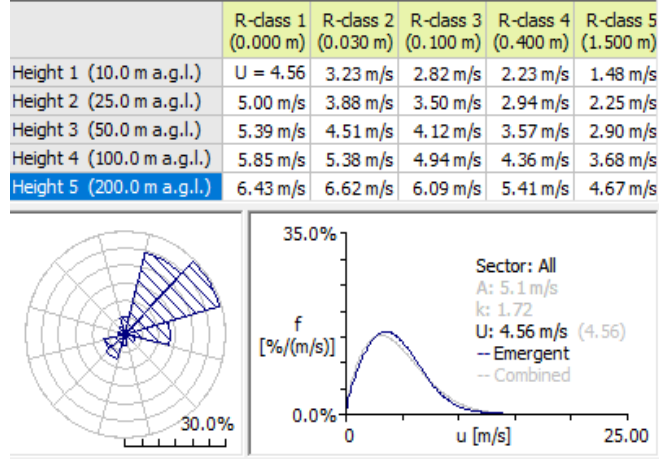
Çanakkale istasyonu Gökçeada'nın güneydoğusunda, Bozcaada'nın kuzeyindedir. Çanakkale istasyonundan 01.01.2014 – 31.03.2019 yılları arasında saatlik olarak ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönü verileri yerden 10 m yükseklikten ölçülmüştür. Rüzgar verilerinin analizi sonucunda elde edilen gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 5.27'de verilmiştir. Hakim rüzgar yönü 2. Sektör ( $30^\circ$ ) kuzeydoğudur. Ortalama rüzgar hızı 3,59 m/sn değerindedir.

Çanakkale için WAsP Map Editor 'de oluşturulmuş vektör harita Şekil 5.28'de gösterilmiştir. Çanakkale için en küçük yükseklik çizgisi 0 m, en büyük yükseklik çizgisi 930 m'dir. Pürüzlülük alanları uydu görüntülerinden faydalanarak oluşturulmuştur.



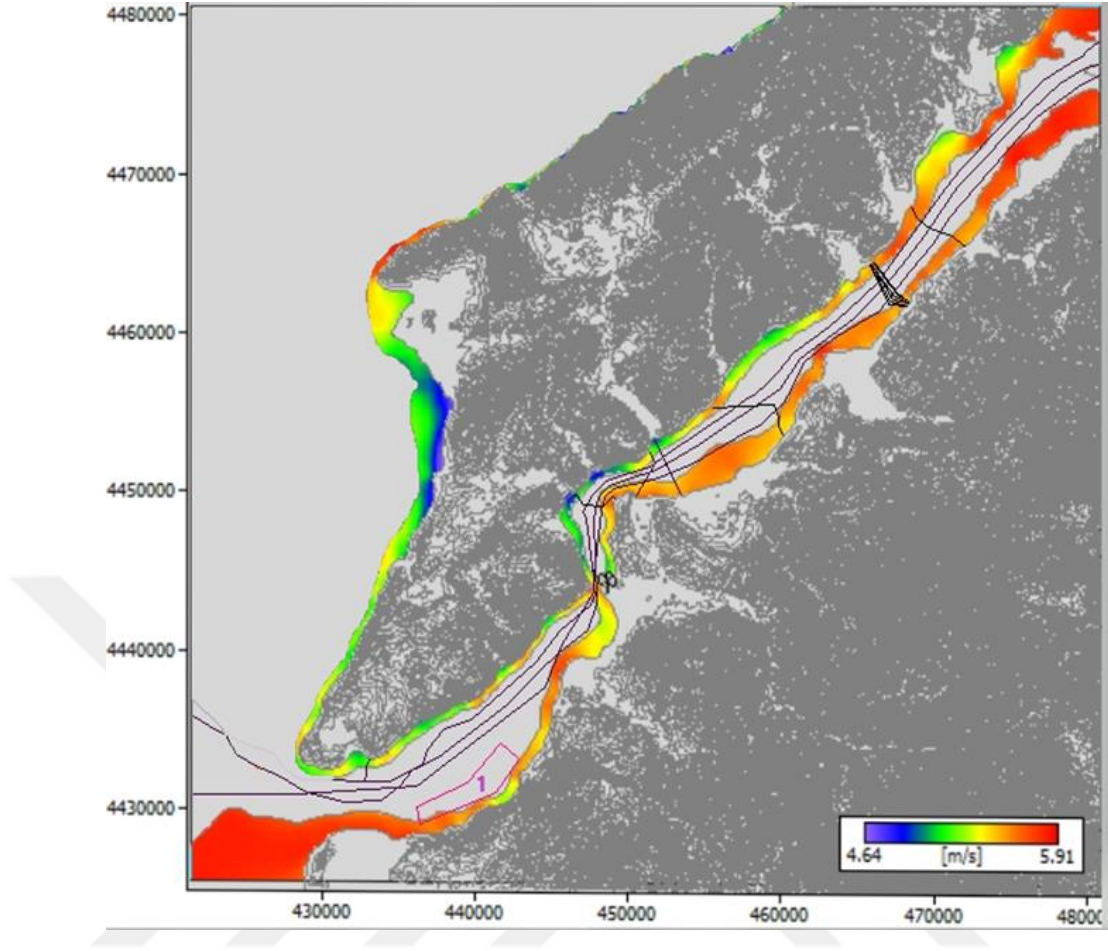
Şekil 5.28 Çanakkale vektör haritası

Çanakkale için oluşturulmuş rüzgar atlası Şekil 5.29'de verilmiştir. Yerden 10 m yükseklik için ortalama rüzgar hızı meteoroloji istasyonun olduğu noktada 3,59 m/sn iken, açık denizde 4,56 m/sn değerine ulaşmıştır.



Şekil 5.29 Çanakkale rüzgar atlası

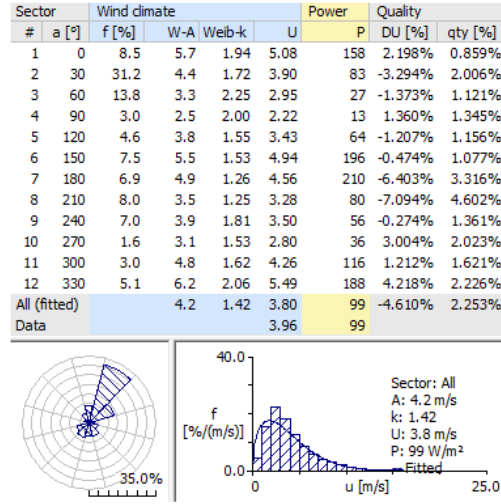
Çanakkale kıyıları rüzgar hızı açısından uygun olsa da deniz tabanı kablo hatları, yasaklı alanlar ve deniz ulaşım güzergahları gibi etmenlerden dolayı türbin yerleşimine uygun değildir. Şekil 5.30'da Çanakkale kıyıları için oluşturulmuş harita verilmiştir. Siyah çizgiler deniz tabanı kablo ve boru hatlarını göstermektedir. T.C Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın verilerine göre Çanakkale boğazından 2018 yılında toplam 43.999 adet gemi geçiş yapmıştır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı-Deniz Ticareti Genel Müdürlüğü, 2018). Çanakkale ve İstanbul boğazı Karadeniz'i Akdeniz'e bağlayan tek su yolu olduğu için gemi trafiği açısından yoğun bölgelerdir. Gemi trafiği bu kadar yoğun olduğu için demirleme sahaları ve yasaklı alanlar çoktur. Ayrıca, kıyıya yakın bölgelerden itibaren başlayan hızlı derinlik artışından dolayı Çanakkale kıyıları açık deniz rüzgar tarlaları kurmak için uygun değildir.



Şekil 5.30 Çanakkale boğazı deniz tabanı kablo hatları ve rüzgar hızı haritası

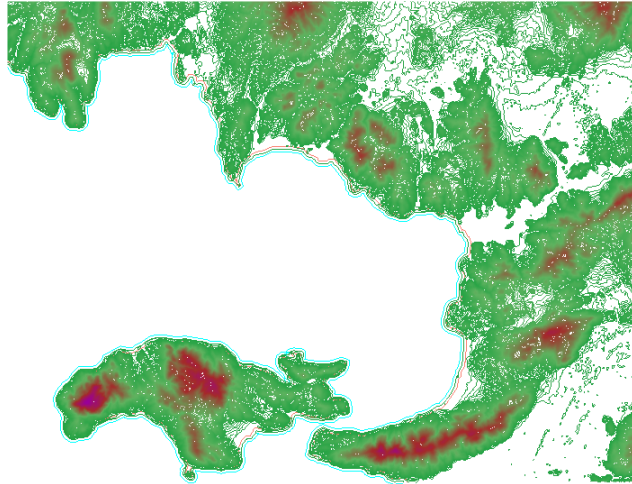
### 5.3.5 Gümüldür

Gümüldür istasyonundan 01.01.2014 – 31.03.2019 yılları arasında saatlik olarak ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönü verileri WAsP Climate Analyst 3.1 vasıtasıyla analiz edilmiştir. Gümüldür istasyonu rüzgar verilerinin analizi sonucunda elde edilen gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 5.31’de verilmiştir. Hakim rüzgar yönü 2. Sektör (30°) kuzeydoğudur. Ortalama rüzgar hızı 3,96 m/sn değerindedir.



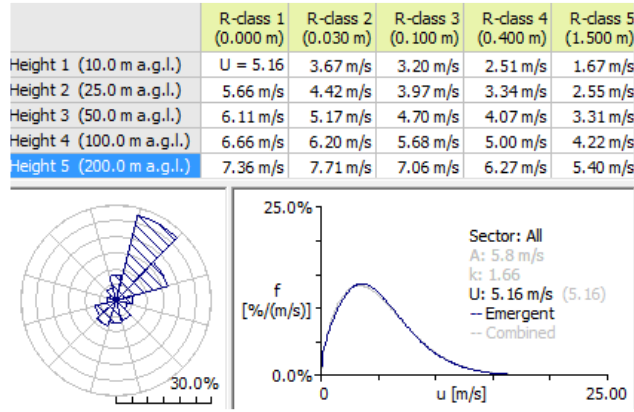
Şekil 5.31 Gümüldür gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

Gümüldür için WAsP Map Editor 'de oluşturulmuş vektör harita Şekil 5.32'de gösterilmiştir. Gümüldür için en küçük yükseklik çizgisi 0 m, en büyük yükseklik çizgisi 1200 m'dir. Pürüzlülük alanları uydu görüntülerinden faydalananarak oluşturulmuştur.



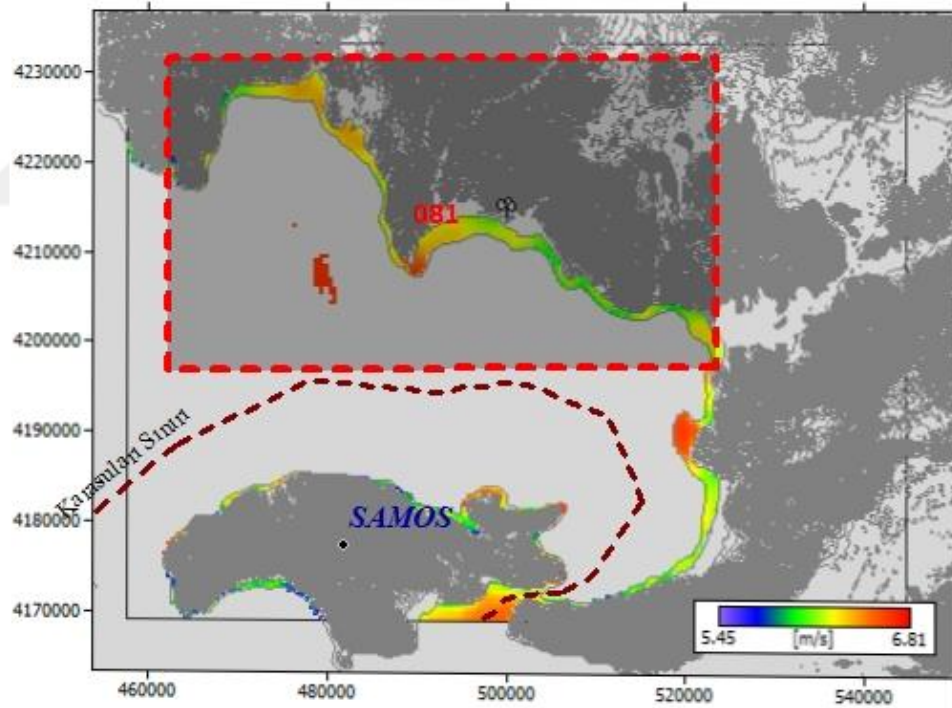
Şekil 5.32 Gümüldür vektör haritası

Gümüldür için oluşturulmuş rüzgar atlası Şekil 5.33'de verilmiştir. Yerden 10 m yükseklik için ortalama rüzgar hızı 3,96 m/sn iken, açık denizde 5,16 m/sn değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 5.33 Gümüşdüz rüzgar atlası

Gümüşdüz kıyıları için oluşturulmuş, yasaklı sahaların, karasuları sınırının ve rüzgar hızı veri haritasının görülebileceği harita Şekil 5.34'te verilmiştir.



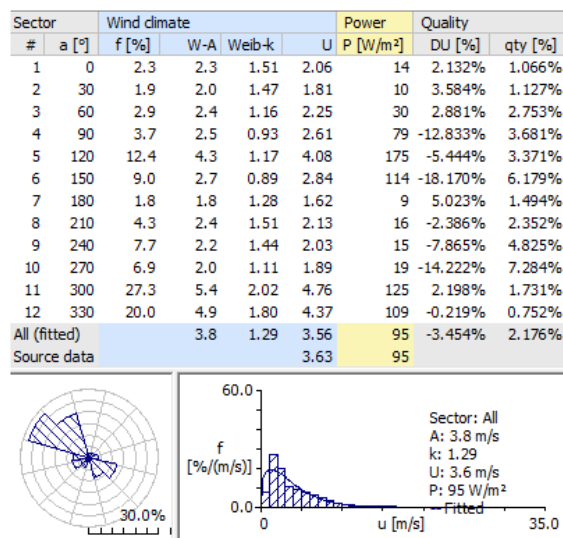
Şekil 5.34 Gümüşdüz yasaklı sahalar ve rüzgar hızı haritası

Gümüşdüz kıyılarında da deniz derinliği kıyıya yakın bölgelerde ani artış göstermektedir. Türbin yerleşimi için uygun alanlar çok kısıtlıdır. Aynı zamanda turistik sahillerin çok olduğu bir bölgedir. Gümüşdüz kıyıları, bu çalışmanın 4.

bölümünde bahsedilen Cape Wind açık deniz rüzgar projesinin karşı karşıya kaldığı izin problemleriyle karşılaşılması muhtemel bir bölgedir. Şekil 5.34'te kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen 081 kodlu alan askeri eğitim ve atış sahasıdır. Bu saha, Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığının yayınlamış olduğu 2018 yılı denizcilere ilan yıllığı incelenerek haritaya işlenmiştir. Bu alan türbin yerleşimine uygun olmayan bir alandır. Kahverengi kesikli çizgi ile belirtilen sınır, Yunanistan'ın yetki sahibi olduğu Samos Adası deniz yetki sınırı ile Türkiye deniz yetki sınırını ayıran sınırdır. Ege denizi, Türkiye ile Yunanistan arasında çekişmeye sebep olan bir denizdir. Bu sınırların ihlal edilmesi gibi durumlar sıkça karşılaşılmaktadır. Bu bölgede askeri uçaklar-gemiler sınır güvenliği için uçuş yapmakta ve seyir halinde bulunmaktadır. Bu sebeplerden dolayı Gümüşkaya kıyıları açık deniz rüzgar türbini yerleşimi yapmak için uygun alanlar değildir.

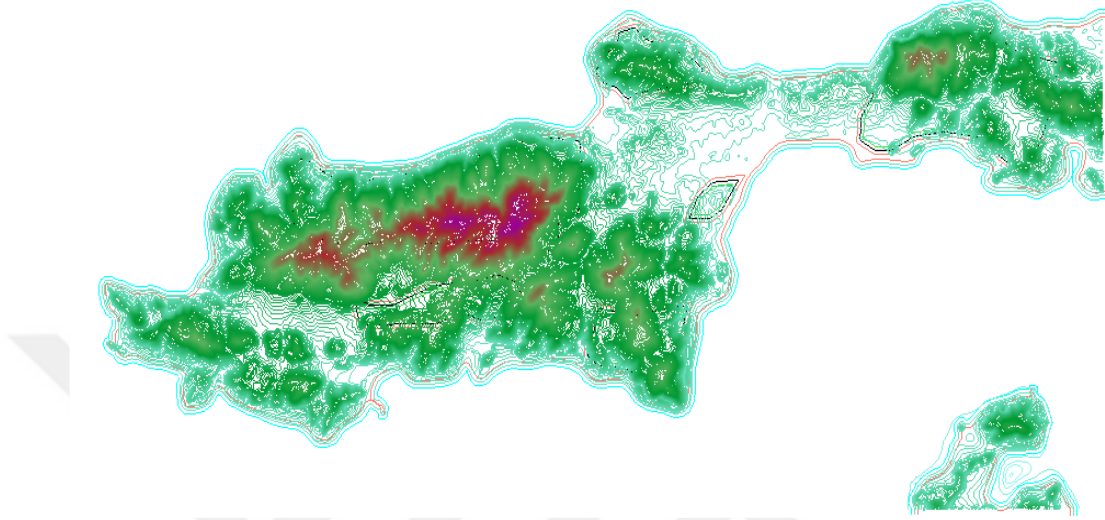
### 5.3.6 Datça

Datça istasyonundan 01.01.2014 – 31.03.2019 yılları arasında saatlik olarak ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönü verileri WAsP Climate Analyst 3.1 vasıtasıyla analiz edilmiştir. Datça istasyonu rüzgar verilerinin analizi sonucunda elde edilen gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi Şekil 5.35'te verilmiştir. Hakim rüzgar yönü 11. Sektör (300°) kuzeybatıdır. Ortalama rüzgar hızı 3,63 m/sn değerindedir.



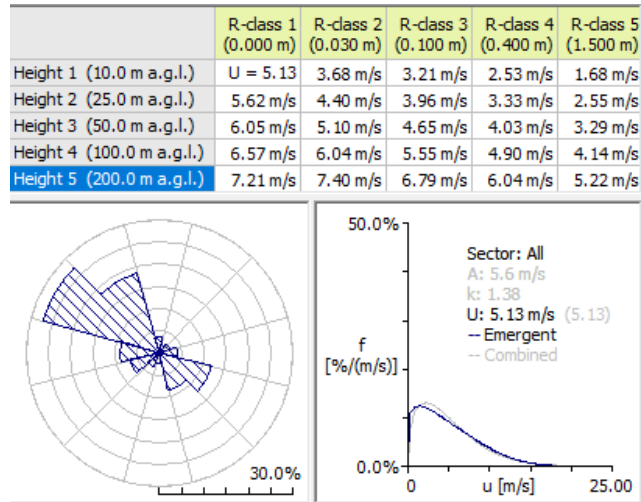
Şekil 5.35 Datça gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi

Datça için WAsP Map Editor ‘de oluşturulmuş vektör harita Şekil 5.36’da verilmiştir. Datça için en küçük yükseklik çizgisi 0 m, en büyük yükseklik çizgisi 1140 m’dir. Pürüzlülük alanları uydu görüntülerinden faydalanarak belirlenmiştir.



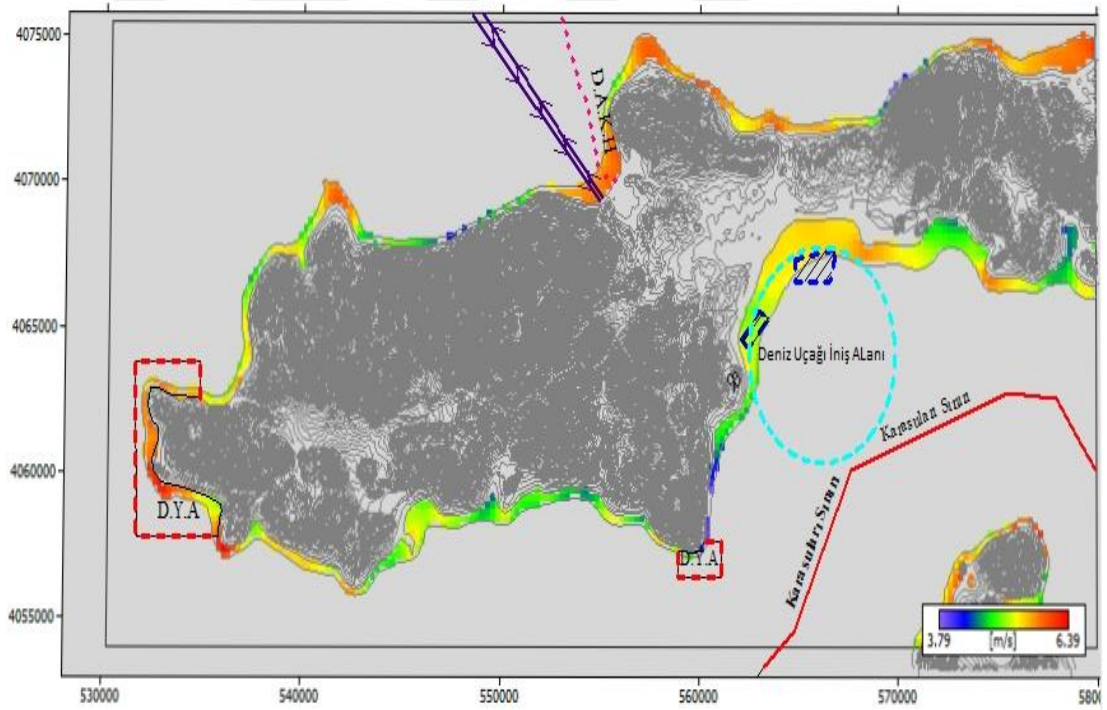
Şekil 5.36 Datça vektör haritası

Vektör harita ve gözlenmiş ortalama rüzgar ikliminin WAsP 12.3 ana programına girdi olarak girilmesiyle elde edilen rüzgar atlası Şekil 5.37’de verilmiştir. Yerden 10 m yükseklik için ortalama rüzgar hızı 3,63 m/sn iken, açık denizde 5,13 m/sn değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 5.37 Datça rüzgar atlası

Datça kıyıları rüzgar hızı açısından uygun alanlara sahiptir. Ama deniz derinlikleri kıyıdan kısa mesafelerde hızlı şekilde artmaktadır. Şekil 5.38’de Datça kıyılarının rüzgar hızı değişiminin ve yasak sahaların görülebildiği harita verilmiştir. Datça yarımadasının kuzey kıyılarında deniz tabanı kablo hatları bulunmakta aynı zamanda feribotların ve gemilerin geçiş güzergahında bulunmaktadır. Şekil 5.38’de D.Y.A kısaltmasıyla verilen kırmızı kesikli çizgili alanlar dalışa yasak sahaları belirtmektedir. Mavi kesikli çizgiyle belirtilen alan, Sivil Havacılık Dairesi Başkanlığı tarafından hazırlanmış olan suya iniş kalkış alanları isimli rapordan alınmıştır. Karasuları sınırı da kırmızı düz çizgi ile belirtilmiştir. Datça kıyıları da Gümüldür kıyıları gibi turistik bölgelerdir. Teknelerin ve gemilerin demirleme yaptığı birçok irili ufaklı liman bulunmaktadır. Bu sebeplerden dolayı Datça kıyıları için türbin yerleşimi yapılamamıştır.



Şekil 5.38 Datça yasaklı sahalar ve rüzgar hızı haritası

## **BÖLÜM ALTI**

### **SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Ülkelerin izlemiş olduğu çevreci politikalar sayesinde ve yaşanabilir bir dünya için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim gün geçtikçe hızlanarak artmaktadır. Açık deniz rüzgar enerjisi son yirmi yıl içerisinde ciddi gelişim gösteren yenilenebilir enerji türlerinden biridir. Avrupa ülkeleri açık deniz rüzgar enerjisinde öncü konumdadır. Dünya üzerindeki farklı ülkelerde yaygınlaşan açık deniz rüzgar enerjisi gelişen teknolojiyle birlikte gelişim süreci de hızlanmaktadır. Farklı deniz derinlik koşullarında farklı temel çözümleriyle karşımıza çıkan açık deniz rüzgar türbin teknolojisinde, uygulamalarının büyük çoğunluğu tekil temel açık deniz rüzgar türbinleridir. Uygulama kolaylığı ve diğer temel türlerine nispeten maliyetlerinin az olması nedeniyle çokça tercih edilmektedir.

Açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yer seçimi çok kriterli bir süreçtir. Bu tez çalışması kapsamında, ortalama rüzgar hızı, deniz derinlik durumu, karasuları sınırı, askeri eğitim ve atış sahaları, deniz tabanı kablo hatları, deniz ulaşım güzergahları ve çevresel hususlar gözetilerek açık deniz rüzgar türbinleri için uygun yerler belirlenmiştir.

Bodrum Yalıkavak, Didim, Aliğa, Dikili, Çeşme, Kuşadası, Ayvalık, Edremit istasyonlarının ortalama rüzgar hızı 3,5 m/sn değerinin altında kaldığı için rüzgar hızı açısından uygun bulunmamıştır. Bozcaada, Gökçeada, Çanakkale, Ayvacık, Gümüldür ve Datça istasyonlarının ortalama rüzgar hızı 3,5 m/sn değerinin üstünde olduğu için bu istasyonlar rüzgar hızı açısından uygun bulunmuştur.

Bozcaada kıyıları analizi yapılan istasyonlar arasında en yüksek ortalama rüzgar hızına sahip istasyondur. Rüzgar hızı kriteri açısından uygun bulunan bir bölgedir. Özellikle Bozcaada'nın kuzeybatı açıkları yüksek rüzgar potansiyeline sahiptir ve sığ bölgeler bulunmaktadır. Sığ alanlar askeri atış sahası, deniz tabanı kablo hatları, dalışa yasak sahalar gibi kriterler açısından uygun alanlardır. Toplamda 60 adet 112 m rotor çapına sahip açık deniz rüzgar türbini konuşlandırılması yapılmıştır.

Gökçeada rüzgar hızı kriteri açısından uygun bir bölgedir. Sığ alanları Bozcaada kadar geniş olmasa da türbin yerleşimi yapabilecek kadar geniş sığ alanlar mevcuttur. Sığ alanların bazı bölgelerinde deniz tabanı kablo hatları bulunmaktadır. Ama bu kablo hatları türbin yerleşimine engel olacak kadar değildir. Askeri eğitim ve atış sahası, deniz ulaşım hatları ve çevresel hususlar açısından Gökçeada açıkları sorun teşkil etmemektedir. Toplamda 45 adet 80 m rotor çapına sahip açık deniz türbin yerleşimi yapılmıştır.

Çanakkale, Gümüldür ve Datça kıyıları ani artan deniz derinliklerinden dolayı deniz derinlik durumu kriteri açısından uygun bulunmamıştır. Aynı zamanda Çanakkale kıyıları deniz tabanı boru hatları ve deniz trafiği açısından, Gümüldür kıyıları askeri eğitim atış sahası, karasuları sınırı ve çevresel hususlar açısından, Datça kıyıları sivil havacılık alanları, karasuları sınırı ve çevresel hususlar açısından uygun değildir. Bu nedenlerden dolayı türbin yerleşimi yapılamamıştır.

Ayvacık istasyonun kuzeybatısında, Bozcaada'nın hemen altında bulunan kıyı kesimi rüzgar hızı ve deniz derinlik durumu açısından uygun bölgeler olmasına karşın, geniş bir alanda dalışa yasak saha mevcuttur. Ayvacık istasyonun güneybatısında bulunan kıyı kesiminde deniz derinliği kısa mesafelerde hızlı şekilde artmaktadır. Bundan dolayı bu bölgeye de türbin yerleşimi yapılamamıştır.

Sonuç olarak Ege kıyılarında açık deniz rüzgar türbinleri belirlenen kriterlere göre en uygun iki yer Bozcaada ve Gökçeada açıklarıdır. Ayvacık istasyonun kuzeybatı kıyıları gerekli izinler alındığı takdirde açık deniz rüzgar türbini kurulabilecek bir başka aday bölge olarak düşünülebilir.

## KAYNAKLAR

- Akdağ, S. A. ve Güler, Ö. (2010). Wind characteristics analyses and determination of appropriate wind turbine for Amasra Black Sea region, Turkey. *International Journal of Green Energy*, 7 (4), 422-433.
- Akpınar, A. (2013). Evaluation of wind energy potentiality at coastal locations along the north eastern coasts of Turkey. *Energy*, (50), 395-405.
- Argın, M. ve Yerci, V. (2015). The assessment of offshore wind power potential of Turkey. In *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 966-970.
- Argın, M. ve Yerci, V. (2017). Offshore wind power potential of the Black Sea region in Turkey. *International Journal of Green Energy*, 14 (10), 811-818.
- Argın, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S. ve Cali, U. (2019). Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multicriteria site selection. *Energy Strategy Reviews*, 23, 33-46.
- Barış, O., Ozer, S. ve Tosun, M. (2006). Feasibility study of wind farms: A case study for İzmir, Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94 (10), 725-743.
- Bianchi, F. D., Battista, H. D. ve Mantz, R. J. (2007). *Wind turbine control systems* (1. Baskı). Londra: Springer.
- Birleşmiş Milletler. (1982). *Birleşmiş Milletler deniz hukuku sözleşmesi*. 20 Haziran 2020, <https://denizmevzuat.uab.gov.tr/uploads/pages/uluslararası-sozlesmeler/denizhukuku.pdf>

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi . (1998). *Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı İklim değişikliği*. 20 Haziran 2020, <https://iklim.csb.gov.tr/kyoto-protokolu-i-4363>

Breton, S.-P. ve Moe, G. (2009). Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America. *Renewable Energy*, 34 (3), 646–654.

Bussel, G. V. ve Zaaier, M. (2001). Reliability, availability and maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study, *Newcastle: MAREC 2001 Marine Renewable Energies Conference, 7-8 Ocak 2001, Newcastle, 113 (1), 119-126*.

Celik, A. N. (2004). A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. *Renewable Energy*, 23 (4), 593-604.

EİGM. (2019). *T.C. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü*. 20 Haziran 2020, <https://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/REPA>

Gehlot, S. (2018,). *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*. 10 Haziran 2020, <http://www.blogtheorem.com/vertical-axis-wind-turbine-vawt-energy-for-future>

German Offshore Wind Energy Foundation, O. J. (2008). *Transport of a tripod*. 15 Haziran 2020, <https://www.offshore-stiftung.de/en/media-library?filtercat=3%2C4%2C5&page=4>

Global Wind Atlas. (2020). *Global wind atlas*. 5 Mayıs 2020, <https://globalwindatlas.info/>

Güzel, B. (2012). *Açık deniz rüzgar enerjisi, fizibilite adımları ile Bozcaada ve Gökçeada örnek çalışması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

GWEC. (2019). *Global wind report*. Brüksel: Global Wind Energy Council.

Hau, E. (2013). *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (3. Baskı). Berlin: Springer.

Holland. (2019). *Functions of windmills in Holland*. 10 Haziran 2020, <https://www.holland.com/global/tourism/travel-inspiration/traditional/functions-of-windmills-in-holland.htm>

Huvaj, N., Caceoğlu, E. ve Baidol, Y. (2019). Deniz üstü rüzgar türbinleri temel seçimi ve deniz tabanı zemin araştırmaları. 5. *İzmir Rüzgâr Sempozyumu*, 197-210.

Jensen, N. (1983). *A note on wind generator interaction, technical report*. Roskilde: Risø National Laboratory. Risø-M, No. 2411.

Kaya, B. ve Oğuz, E. (2019). Tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbinlerinin Avrupa'daki gelişimi, 5. *İzmir Rüzgâr Sempozyumu*, 175-196.

Kocatürk, A. S.ve Ünsan, Y. (2015). Rüzgar enerji santrallerinin tarihsel gelişimi ve açık deniz rüzgar enerji santrallerinin tipleri ve açık deniz rüzgâr enerji santrallerinin tipleri. *GİDB Dergi*, (2) , 3-16.

Kurban, M., Kantar, Y. M. ve Hocaoglu, F. O. (2007). Weibull dağılımı kullanılarak rüzgar hız ve güç yoğunluklarının istatistiksel analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 206-218.

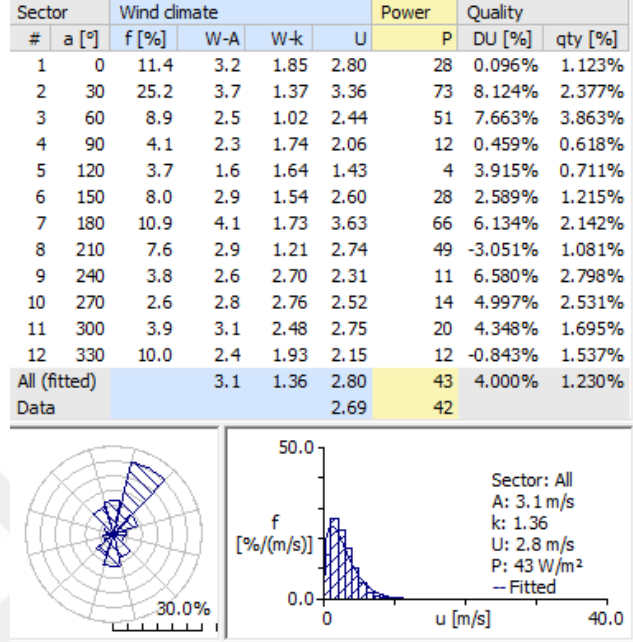
Kuşkaya, S. ve Bilgili, F. (2020). The wind energy-greenhouse gas nexus: The wavelet-partial wavelet coherence model approach. *Journal of Cleaner Production*, (245), 1-14.

- Langhamer, O., Holand, H. ve Rosenqvist, G. (2016). Effects of an offshore wind farm (OWF) on the common shore crab *Carcinus maenas*: Tagging pilot experiments in the Lillgrund offshore wind farm (Sweden), 11 (10). *Plos One*, 1-17.
- Malhotra, S. (2009). Design and construction considerations for offshore wind turbine foundations in north America" Civil Engineering Practice. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers Section/ASCE*, (Spring/Summer 2009), 7-42.
- Malhotra, S. (2011). Selection, design and construction of offshore wind turbine foundations, wind turbines. D. I. Al-Bahadly içinde, *Wind Turbines* (231-264). Shanghai: InTech.
- Manwell, J. F. ve McGowan, J. G. (2010). *Wind energy explained (2. Baskı)*. Chichester: Wiley.
- Manwell, J., Elkinton, C., Rogers, A. ve McGowan, J. (2007). Review of design conditions applicable to offshore wind energy systems in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (3), 210–234.
- Manwell, J., Rogers, A., McGowan, J. ve Bailey, B. (2002). An offshore wind resource assessment study for New England. *Renewable Energy*, 27 (2), 175-187.
- Marine Geoscience Data System. (2019). *GMRTMapTool*. 13 Ağustos 2020, <https://www.gmrt.org/GMRTMapTool/>
- Nikolaos, N. (2004). *Deep water offshore wind technologies*. Yüksek lisans Tezi, University of Strathclyde Department of Mechanical Engineering, Glasgow.
- Ostachowicz, W., McGugan, M., Hinrichs, J. U. ve Luczak, M. (2016). *MARE-WINT new materials and reliability in offshore wind turbine technology*. İsviçre: Springer.

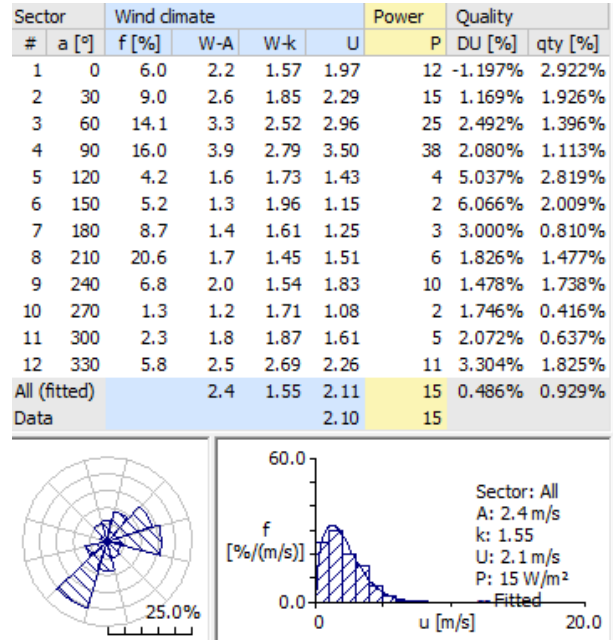
- Ozerdem, B., Ozer, S. ve Tosun, M. (2006). Feasibility study of wind farms: A case study for İzmir, Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94 (10), 725-743.
- Penna, A. N. (2020). *The history of energy flows: from human labor to renewable power*. Oxfordshire: Routledge.
- Power Technology. (2019). *Construction begins for UK's 1.2GW Hornsea Project One windfarm*. 7 Haziran 2020, <https://www.power-technology.com/news/construction-begins-uks-1-2gw-hornsea-project-one-windfarm/>
- Ramin. (2012). *Historical Iranian sites and people*. 10 Temmuz 2020, <http://historicaliran.blogspot.com/2012/03/nashtifan-windmills.html>
- Ritchie, H. ve Roser, M. (2020). *Energy*. 5 Temmuz 2020, <https://ourworldindata.org/energy>
- Shakoor, R., Hassan, M. Y., Raheem, A. ve Wu, Y.-K. (2016). Wake effect modeling: A review of wind farm layout optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (58), 1048-1059.
- Shepherd, D. G. (1991). *Historical development of windmill*. United States: NASA.
- Snyder, B., & Kaiser, M. J. (2009). Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy. *Renewable Energy*, 34 (6), 1567-1578.
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı-Deniz Ticareti Genel Müdürlüğü. (2018). *Deniz Ticareti İstatistikleri-2018*. Ankara: T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı-Deniz Ticareti Genel Müdürlüğü.

- Tao, S., Kuenzel, S., Xu, Q. ve Chen, Z. (2019). Optimal Micro-Siting of wind turbines in an offshore wind farm using Frandsen–Gaussian wake model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34 (6), 4944 - 4954.
- Taşan, E., Akdağ, C. T. ve Savidis, S. (2010). Offshore rüzgar enerjisi temel sistemleri- tekil kazık temel sisteminin tekrarlı yatay yükler altında davranışı. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*. İstanbul: İstanbul Kültür Üniversitesi.
- Tempel, J. V. (2006). *Design of support structures for offshore wind turbines*. Doktora Tezi, Delft Teknik Üniversitesi, Delft.
- TÜREB . (2019). *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu*. Ankara : Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği.
- Ucar, A. ve Balo, F. (2020). Assessment of wind power potential for turbine installation in coastal areas of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (7), 1901-1912.
- Wang, Y., Zhang, L., Michailides, C., Wan, L.ve Shi, W. (2020). Hydrodynamic Response of a Combined Wind–Wave Marine Energy Structure. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (4), 253-276.
- WAsP . (2019). Program Helping. Denmark.
- WindEurope. (2020). *Wind energy in Europe in 2019 Trends and statistics*. Brüksel: WindEurope.
- Wu, X., Hu, Y., Li, Y., Yang, J., Duan, L., Wang, T. ve diğer. (2019). Foundations of offshore wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (104), 379-393.

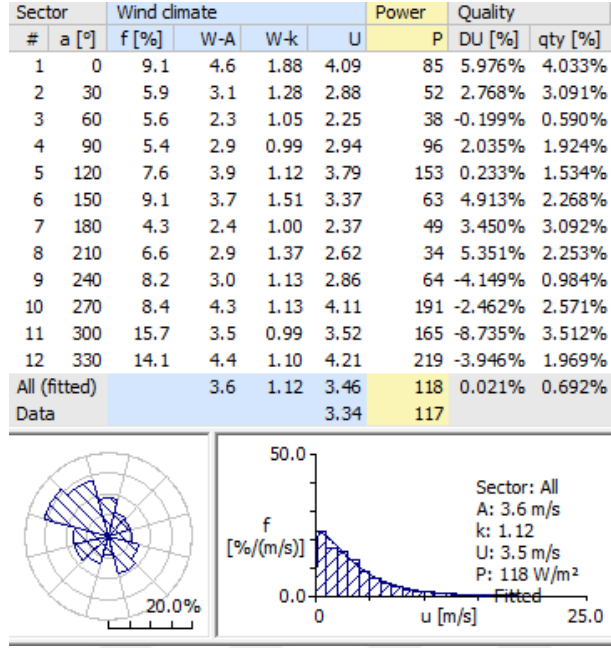
## EKLER



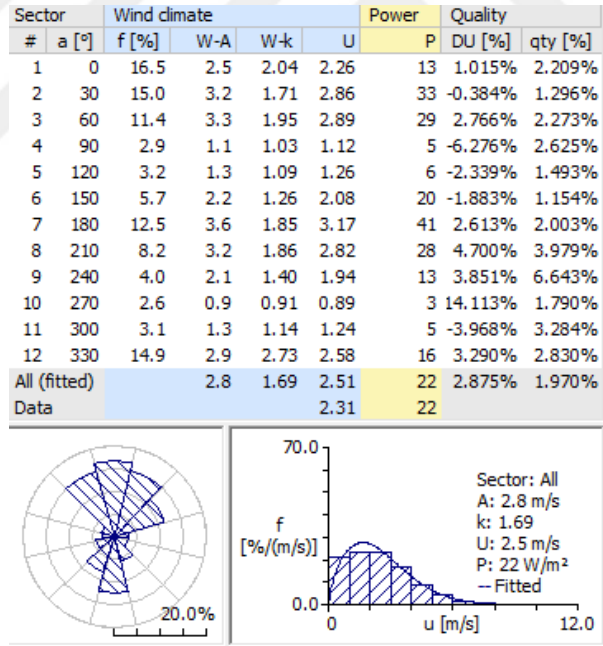
Şekil A.1 Aliğa gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



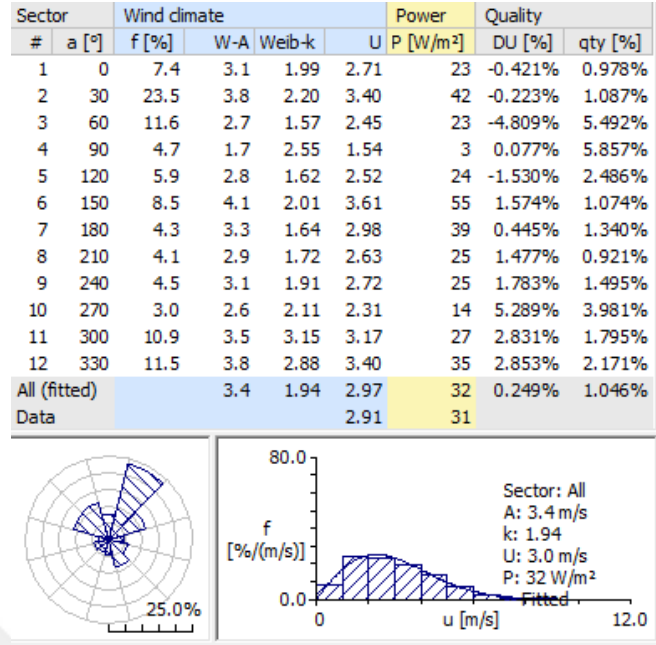
Şekil A.2 Ayvalık gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



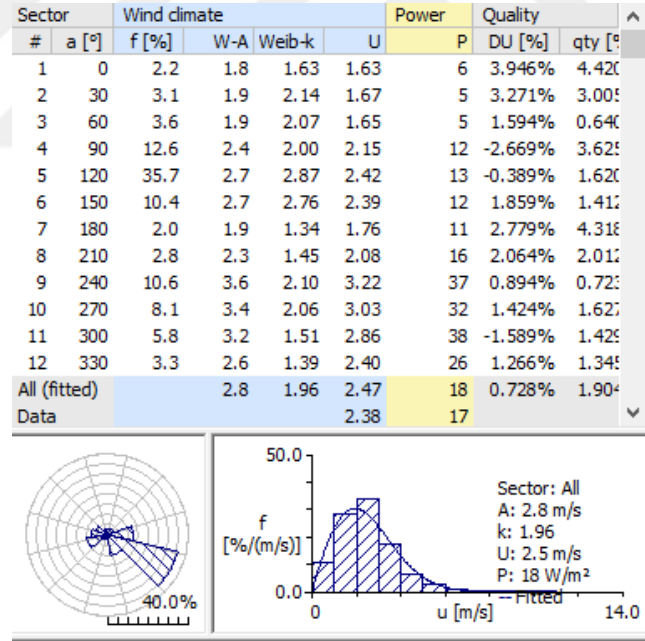
Şekil A.3 Bodrum Yalıkavak gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



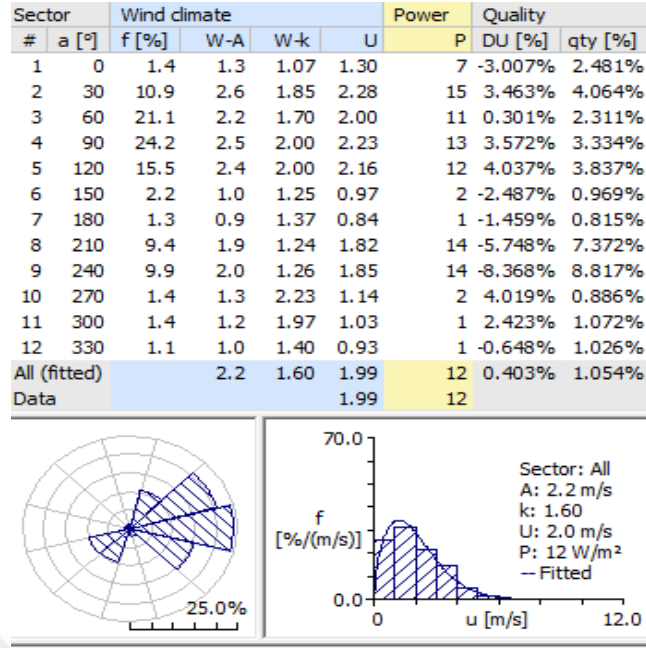
Şekil A.4 Çeşme gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



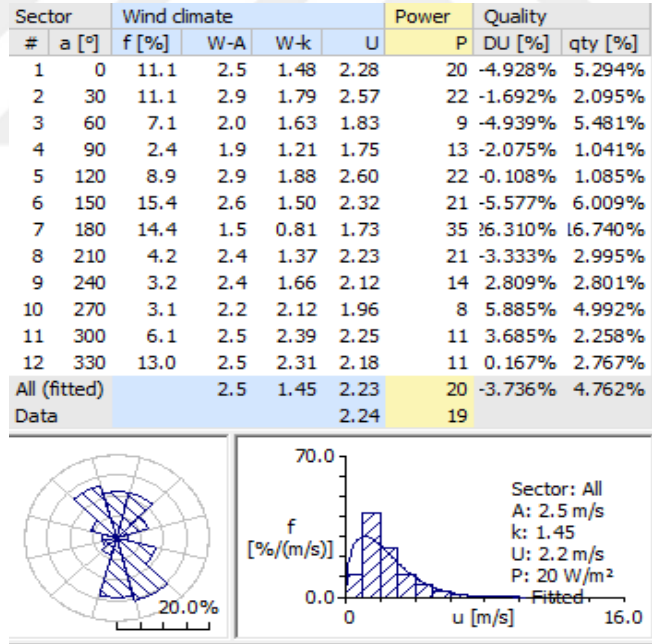
Şekil A.5 Didim gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



Şekil A.6 Dikili gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



Şekil A.7 Edremit gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi



Şekil A.8 Kuşadası gözlenmiş ortalama rüzgar iklimi