



**T.C.  
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZ ÜSTÜ (OFFSHORE) RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN  
ARAŞTIRILMASI ve ANTAKYA KÖRFEZİ İÇİN VERİMLİLİĞİNİN  
İNCELENMESİ**

**CEM ÖKSEL**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY  
ARALIK-2015**



T.C.  
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DENİZ ÜSTÜ (OFFSHORE) RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN  
ARAŞTIRILMASI ve ANTAKYA KÖRFEZİ İÇİN VERİMLİLİĞİNİN  
İNCELENMESİ**

**CEM ÖKSEL**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY**

**ARALIK-2015**

29.12.2015

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

**Cem ÖKSEL**

## ÖZET

### **DENİZ ÜSTÜ (OFFSHORE) RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI ve ANTAKYA KÖRFEZİ İÇİN VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Bu çalışmada, deniz üstü rüzgâr enerjisindeki temel faktörler incelenmiş ve Dünya'daki güncel durum belirtilmiştir. Türkiye'de hali hazırda bir deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali bulunmamaktadır ve kurulması planlanan bir tesis için yatırım öncesi yapılacak olan fizibilite çalışmasında ele alınması gereken konular ve izlenilecek adımlar detaylıca incelenmemiştir. Bu adımlar ışığında, deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyeli en yüksek illerimizden Hatay'da bulunan Antakya körfezi için WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) yazılımından yararlanılarak örnek çalışma yapılmıştır. WASP'ta kullanılmak üzere Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün Samandağ meteoroloji istasyonuna ait 2013-2015 tarihleri arasındaki saatlik rüzgâr hızı ve yönü verileri temin edilmiştir. Türbin yerleşimi ve ileri analizler için bölgeye ait sayısal topografik haritalar Global Mapper programında ilgili yerin 3 ark saniyelik topografik haritasının vektörel hale dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Minimum hata payı için bu verilere ek olarak bölge pürüzlülük ve ölçüm istasyonu yakın çevresi engel bilgileri de programa aktarılmış olup çalışmanın sonucunda kurulacak tesis için geri ödeme süresi ortalama 6.6 yıl olarak bulunup bölgenin rüzgâr verimliliğinin deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali kurulumu için uygun olduğu gözlemlenmiştir.

2015, 85 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, deniz üstü, rüzgâr, türbin, WASP

## ABSTRACT

### OFF-SHORE WIND ENERGY POTENTIAL RESEARCH FOR ANTAKYA BAY

In this study, the key factors associated with Off-shore wind energy have been examined with the aim of assessing off-shore wind-energy potential in Antakya. Currently, there are no nationally-agreed procedures and practices on how to construct off-shore wind farms or how to conduct feasibility study as there is no installed off-shore wind farm in the boundaries of Turkey. To that end, this paper aims to contribute to a better understanding of off-shore wind power plants and introduces a case study for planning, designing and implementing wind turbines on Antakya bay, Turkey. A software package called Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP), which is a standard tool in wind energy industry, was used in the case study for analysing and modelling wind climate in the studied area. The outputs of WAsP were created based on quantitative wind data (e.g., hourly wind speed and direction) recorded at Samadağ meteorological station between 2013-2015. A geographic information program called Global Mapper was employed for advanced analysis and turbine placement by means of converting topographic maps of selected areas into vector format. Additionally, roughness measurements and information on the presence of obstacles in the surrounding environment were entered to the software in order to reduce the error rate. Based on the estimations and outputs of WAsP software package, cost-benefit analysis was conducted to examine whether it is economically feasible to install wind energy turbines in Antakya. The results showed that the break-even point comes in 6.6 operational years, which lead to the conclusion that the placement of off-shore wind energy turbines is economically wise. Moreover, it was concluded in case study that the installation of wind energy farm in Antakya bay is also favorable in terms of wind power density of this region.

2015, 85 pages

**Key Words:** Energy, off-Shore, wind, turbine, WAsP

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Ali Koç'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez konusunun belirlenmesi ve çalışmaların takip edilmesinde her türlü yardımı esirgemeyen Tez İzleme Komitesi üyeleri ve tez çalışmaları sırasında tüm bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na, Araştırma Görevlisi Hüseyin Yağlı 'ya ve isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgememiş herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen eşim Havva Duygu ÖKSEL'e, kızım Arya ÖKSEL'e ve hayatımın her aşamasında bana destek olan aileme en büyük teşekkürlerimi sunuyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VII
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	VII
1.GİRİŞ.....	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Rüzgârın Çeşitleri ve Oluşumu.....	3
2.2. Enerji Olarak Rüzgâr ve Tarihi .....	5
2.3 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi .....	7
2.3.1 Dünyada Rüzgâr Enerjisi.....	7
2.3.2 Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi.....	11
2.4. Rüzgâr Türbini ve Bileşenleri .....	19
2.5. Rüzgâr Enerjisi Belirlenmesinde Temel Denklemler.....	22
2.6. Rüzgârın İstatiksel Özellikleri ve Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu... ..	27
2.7. Rüzgâr Enerjisini Etkileyen Faktörler .....	28
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	34
3.1. Off-Shore Rüzgâr Enerjisi.....	34
3.1.1.Açık deniz rüzgâr enerjisi temel faktörleri.....	35
3.1.1.1 Rüzgâr profili, enerji üretimi ve kapasite faktörü.....	35
3.1.1.2 Su derinliği, zemin yapısı ve temeller.....	35
3.1.1.3 Kurulum, yerleşim ve konum Geniş Kurulum Alanı.....	38
3.1.1.4 Çevre ve canlılara olan etki.....	40
3.1.1.5 Görsellik, ses ve tasarım.....	41
3.1.2 Açık deniz rüzgar enerjisi güncel durumu.....	42
3.2. Off-Shore Rüzgâr Enerjisi Fizibilite Adımları.....	45
3.2.1 Rüzgar atlasına göre bölge seçimi.....	45
3.2.2 Rüzgar ve coğrafya verilerinin temini.....	46
3.2.3 Rüzgar analizi ve rüzgar atlası oluşturma.....	47
3.2.4 Harici ve dahili alanların belirlenmesi.....	47
3.2.4.1 Batimetri haritası.....	48
3.2.4.2 Askeri ve milli sınırlar.....	48
3.2.4.3 Deniz ulaşım hatları.....	49
3.2.4.4 Canlı yaşam – göç alanları.....	49
3.2.4.5 Kum çıkarım, mayın ve diğer alanlar.....	50
3.2.4.6 Toplumsal – turistik harici alanlar.....	50
3.2.5 Türbin ve temel seçimi.....	50
3.2.6 Türbin yerleşimi.....	51
3.2.7 Güç üretimi hesaplanması.....	51
3.2.8 Maliyet hesaplanması.....	52
3.2.9 Fizibilite değerlendirmesi.....	53
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	54
4.1. Metodoloji.....	54

4.1.1	Ham rüzgar verilerinin analizi.....	56
4.1.2	Vektör harita işlenmesi.....	61
4.1.3	Türbin yerleşimi ve hesaplamalar.....	68
4.2	Antakya Körfezi Örnek Çalışması.....	70
4.2.1	Rüzgar verilerinin analizi.....	70
4.2.2	Sayısal harita analizi.....	71
4.2.3	Rüzgar atlası ve veri haritaları.....	73
4.2.4	Türbin seçimi ve mikro-konuşlandırma.....	74
4.2.5	Enerji üretimi ve enerji geliri.....	76
4.2.6	Maliyet analizi.....	79
4.2.7	Fizibilite değerlendirmesi.....	80
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	82
6.	KAYNAKLAR.....	83
	ÖZGEÇMİŞ.....	85





## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yerküre Rüzgar Sirkülasyonu.....	3
Şekil 2.2. Coriolis kuvvetinin küresel rüzgarlara olan etkisi.....	4
Şekil 2.3. Charles F.Brush ‘un 1887 yılında yaptığı 12kW rüzgar türbini.....	6
Şekil 2.4. 2014 itibariyle dünyadaki toplam rüzgar enerjisi kurulu gücü (WWEA,2014).....	7
Şekil 2.5. Kıtalar arası kapasite dağılım yüzdeleri (GWEC, 2014).....	8
Şekil 2.6. Kişi başına düşen kurulu güç değerleri ile ilk 20 ülke (WWEA,2014).....	10
Şekil 2.7. Kilometrekare başına kurulu güç açısından lider 20 ülke (WWEA, 2014).....	10
Şekil 2.8. 2014 yıl sonu Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı.....	13
Şekil 2.9. 50 m yükseklik için REPA (Malkoç, 2008).....	14
Şekil 2.10. Türkiye’deki Rüzgâr enerjisi santralleri için yıllık kurulum (TREİR,2015).....	15
Şekil 2.11. Modern bir türbinin bileşenleri (Url-6).....	20
Şekil 2.12. Rüzgâr türbinin enerji çıkarımına ait akış borusu.....	23
Şekil 2.13. Güç katsayısı – hızlar oranı ilişkisi grafiği.....	25
Şekil 2.14. Rotor ve çevresine ait akım koşulları (Hau, 2006).....	27
Şekil 2.15. Weibull olasılık dağılım fonksiyonu.....	28
Şekil 2.16. Rüzgâr hızının yükseklik ile değişimi.....	29
Şekil 2.17. Kanat sayısı – güç katsayısı – kanat ucu hızı oranı grafiği.....	32
Şekil 3.1. 1993-2014 arası Toplam Açık Deniz Kurulu Kapasitesi (EWEA, 2014).....	34
Şekil 3.2. Açık Deniz Türbin Temelleri (Malhotra, 2010).....	36
Şekil 3.3. MGM Türkiye Rüzgar Atlası (MGM, 2015).....	44
Şekil 4.1. WaSP program girdi ve çıktıları.....	54
Şekil 4.2. WaSP Climate Analyst program işleyişi şeması.....	55
Şekil 4.3. Wind Climate Analyst programına aktarılacak ham veri örneği (WaSP, 2010).....	56
Şekil 4.4. Wind Climate Analyst programına aktarılacak ham veri örneği (WaSP, 2010).....	57
Şekil 4.5. Wind Climate Analyst Programında veri dizileri girildikten sonra sonuçların elde edilmesi (WaSP, 2010).....	58
Şekil 4.6. OMWC sonuç sayfası (WaSP, 2010).....	59
Şekil 4.7. WaSP programının B-Z modeli önizlemesi (WaSP, 2010).....	61
Şekil 4.8. Map Editor’da arkaplan haritası için belirlenen sabit noktalar (WaSP, 2010).....	63
Şekil 4.9. Map Editor’da arkaplan haritası için sabit noktaların kalibrasyonu.....	63
Şekil 4.10. WaSP için örnek pürüzlülük eğrileri (WaSP, 2010).....	65
Şekil 4.11. a)Pürüzlülük çizgilerinin uçları b) LFR hatası örneği (WaSP, 2010).....	66
Şekil 4.12. Siemens’in 3,6 MW gücündeki türbinine ait güç eğrisi (WaSP, 2010).....	68
Şekil 4.13. DMİ’den temin edilen rüzgar verilerinin formatı.....	69
Şekil 4.14. Makro ile düzenlenmiş rüzgar verileri.....	69
Şekil 4.15. Samandağ için Wasp Climate Analyst rüzgar iklimi sonuçları.....	70
Şekil 4.16. STRM dosyalarının Global Mapper’daki hali.....	71
Şekil 4.17. Çalışma bölgesindeki rüzgâr hızlarının ve güçlerinin yükseklik ve pürüzlülük katsayılarına göre değişimi .....	72
Şekil 4.18. Antakya körfezine ait rüzgâr hızları haritası ve eş yükselti eğrileri.....	74
Şekil 4.19. Antakya körfezi olası türbin yerleşimi Google Earth izdüşümü.....	75

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kurulu kapasitesi en fazla olan 15 ülke (WWEA,2014).....	9
Çizelge 2.2. 2014 sonu Afrika ve Ortadoğu bazında kurulu kapasiteler [MW] (GWEC,2014).....	11
Çizelge 2.3. 2014 sonu Asya ve Avrupa bazında kurulu kapasiteler [MW] (GWEC,2014).....	11
Çizelge 2.4. 2014 sonu Dünya'nın geri kalanı ve Dünya toplamı bazında kurulu kapasiteler [MW] (GWEC,2014).....	12
Çizelge 2.5. Türkiye'de işletmedeki RES'ler ve kurulu güçleri (Url-5).....	16
Çizelge 2.6. Pürüzlülük sınıfları ve uzunlukları.....	30
Çizelge 3.1. Açık deniz rüzgar enerjisinin toplam kurulu kapasitesi (WWEA,2011; Url- 8).....	42
Çizelge 4.1. WaSP B-Z Modeli çözünürlük kıyaslaması (WaSP, 2010).....	61
Çizelge 4.2. WaSP'ın baz aldığı pürüzlülük değerleri ve karşılıkları (WaSP, 2010)....	64
Çizelge 4.3. Vestas V90-3.0MW Rüzgar Türbini Özellikleri.....	73
Çizelge 4.4. Yerel imalat rüzgar türbinin ve bileşenlerine ait teşvik alım fiyatları (Altuntaşoğlu, 2011).....	76
Çizelge 4.5. Türbin bölgesine uyarlanmış veriler.....	77
Çizelge 4.6. Kurulacak rüzgâr türbinlerinden elde edilebilecek yıllık net ve brüt enerji miktarı .....	77
Çizelge 4.7. Maliyet analizi tablosu.....	78
Çizelge 4.8. Rüzgâr Türbini Tesisi Geri Ödeme Süresi Hesapları .....	80

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

C	: Santigrad
CO <sub>2</sub>	: Karbon Dioksit
V	: Volt
W	: Watt
WAsP	: Wind Atlas Analysis and Application Program
€	: Euro
\$	: Dolar
MW	: Megawatt
MWh	: Megawatt Saat
GWh	: Gigawatt Saat
Km	: Kilometre
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt Saat

### KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
DEM	: Digital Elevation Model
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EÜAŞ	: Elektrik Üretim A.Ş.
EWEA	: European Wind Energy Association
LFR	: Line Face Roughness
MİLRES	: Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin
MÖ	: Milattan Önce
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
OEWC	: Observed Extreme Wind Climate
OMWC	: Observed Mean Wind Climate
OWC	: Observed Wind Climate
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
RES	: Rüzgâr Enerjisi Santrali
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik Üretim A.Ş.
STRM	: Shuttle Radar Topography Mission
UTM	: Universal Transverse Mercator

## 1.GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacının hızla artmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Rüzgâr ve güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları içinde önde gelen enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında lokomotif görevi gören rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi 90'lı yıllardan itibaren büyük bir hızla artış göstermiştir. 2014 yılının ilk yarısı itibariyle dünyada rüzgâr enerjisinin kurulu kapasitesi 336 GW'ı geçmiş bulunmaktadır ve rüzgâr enerjisi dünyanın elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %4'ünü karşılamaktadır (GWEO, 2014). Rüzgâr enerjisi son 3 yılda gösterdiği %50'lik büyüme hızıyla hızlı büyüyen enerji kaynaklarından biri olmuştur (WWEA, 2014). Günümüzde 103 ülke rüzgâr enerjisini elektrik üretiminde kullanmakta ve Türkiye bu ülkeler arasında kurulu güç bakımından 16. Sırada yer almaktadır (WWEA, 2014).

Rüzgâr enerjisinin hızla gelişmekte olan uygulama alanlarından birisi de deniz üstü rüzgâr enerjisidir. Deniz üstü rüzgârları karaya göre genellikle daha güçlü ve düzenli olmasının yanı sıra lojistik olarak da avantaj sağlamaktadır. Dünyada kurulu güç bakımından rüzgâr enerjisinin %2'lik kısmını deniz üstü rüzgâr enerjisi oluşturmaktadır. İlk açık deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali 1991'de denenmiş ve 2000'li yıllarda bu alanda patlama yaşanmıştır. Günümüzde toplam 8 GW açık deniz rüzgâr enerjisi kurulu gücü bulunmaktadır ve yaklaşık 2.9 GW daha kurulum aşamasında bulunmaktadır. Ortalama kurulum derinliği 2014 sonu itibari ile 22.4 metre, ortalama kıyıya olan uzaklık ise 32.9 km'dir (EWEA, 2014).

Türkiye 2014 yılı sonu itibariyle, toplam elektrik üretiminin %16,13'ü hidrolik kaynaklardan, %47,9'u doğalgazdan, %29,89'u kömürden, %1,18'i sıvı yakıtlardan, %5,17'si çok yakıtlılardan (multi-fueled), %3,38'i rüzgârdan ve %0,94'ü jeotermal ve biyogazdan, %0,57'si atık ve yenilenebilir kaynaklardan, %0,01'i güneş enerjisinden sağlanmaktadır. 2014 yılında Türkiye'nin enerji arzının, petrolde %92, doğalgazda %99, taş kömüründe %95 olmak üzere toplamda %73,4'lük bölümü ithalat ile karşılanmıştır (EÜAŞ, 2014). Tüm bu veriler göz önünde bulundurulduğunda enerji talebi bakımından Türkiye'nin dışa bağımlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, ülkelerin enerji politikalarında arz güvenliğinin sağlanması için yerli kaynaklara yönelerek enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi kaçınılmazdır. Bundan dolayı, yenilenebilir enerji

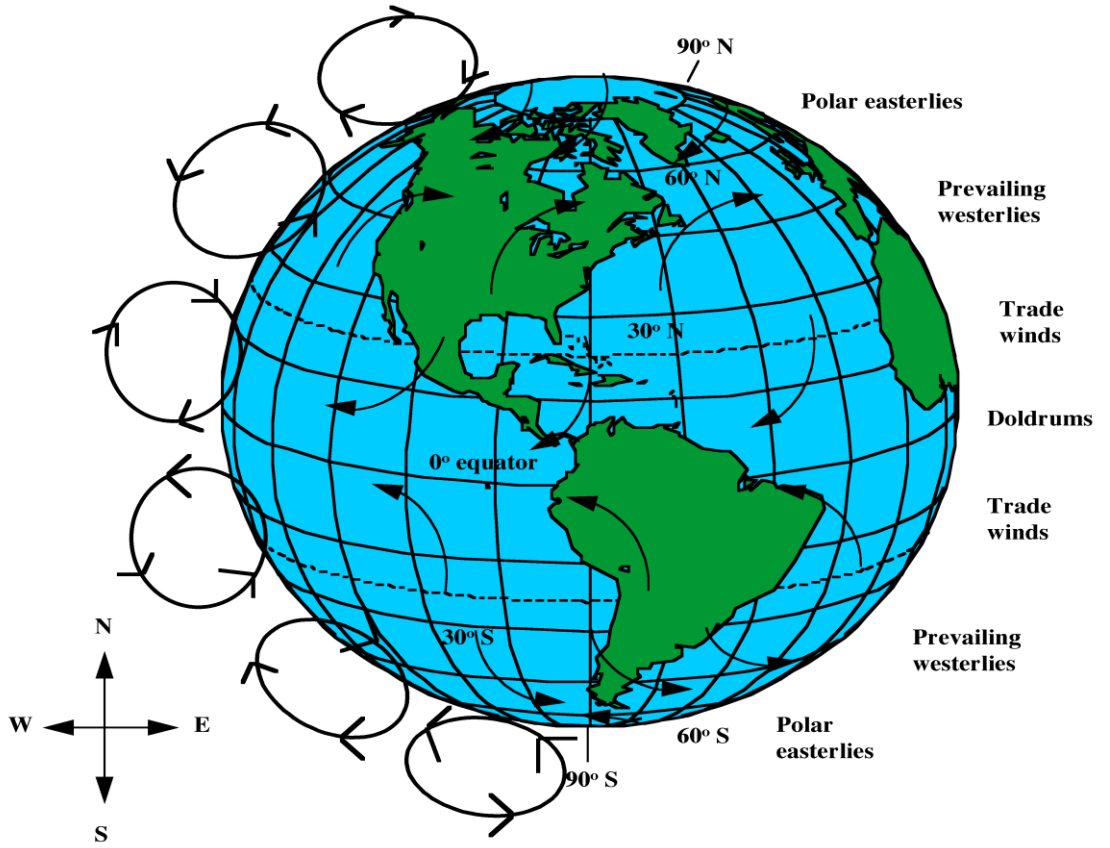
kaynakları ve deniz üstü rüzgâr enerjisi önemli bir seçenek oluşturmaktadır. Türkiye'de ilk rüzgâr enerji santrali İzmir'de 1998 yılında üretime geçmiştir. Bunu takiben yapılan düzenlemeler ile birlikte Türkiye'de özellikle 2014 yılında devreye giren 803 MW'lık sistemler ile kurulu güç hızlı bir şekilde artmış ve toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü Nisan 2015 itibariyle 3397 MW'a ulaşmıştır (EPDK, 2015).

İlk kurulum maliyeti açısından değerlendirildiğinde rüzgâr enerjisi ile elektrik üreten tesisler hala oldukça pahalıdır. Bu nedenle, rüzgâr enerjisi kullanarak elektrik üreten tesislerin yapımından önce maliyet analizlerinin yapılmasında, kurulum lokasyonundaki rüzgâr enerjisi potansiyelinin araştırılması önemlidir. Bu çalışmada, Antakya körfezinde kurulması hedeflenen olası deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali fizibilite analizinin yapılmasına olanak sağlayan WAsP programı tanıtılmış, bu program kullanılarak Antakya körfezi bölgesine ait son iki yıllık rüzgâr verileri analiz edilmiş ve kurulması planlanan türbinlerin konumları tespit edilmiştir. Ayrıca, seçilen bölgeye deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali kurulumu simüle edilmiş ve elde edilen güç doğrultusunda bir fizibilite çalışması yapılarak bölgenin deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali kurulumuna uygunluğu araştırılmıştır.



arasındaki uzaklık başı basınç farkı basınç gradyanı olarak adlandırılır ve bu gradyan büyüdükçe rüzgâra etkiyen kuvvet de büyür; bundan dolayı rüzgâr hızı da aynı oranda artar. (Johnson, 2001)

Coriolis Etkisi: Yerkürenin eksenini etrafındaki dönüşünden meydana gelir. Normal şartlarda düz bir doğrultuda hareket etmesi gereken havanın doğrultusunda sapmalara neden olan Coriolis kuvveti, irtifa kazanarak yayılan rüzgârı kuzey ve güney yarımkürelerde  $30^\circ$  enlemi civarında daha alçak irtifalara yönlendirir. Coriolis etkisi iki yarımkürede zıt yönlere doğru gerçekleşir. (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. Coriolis kuvvetinin küresel rüzgarlara olan etkisi

Atalet Etkisi: Havanın dairesel olan hareketlerinden oluşan bir etkidir.

Sürtünme Etkisi: Hareket eden hava yeryüzünde sürtünmeden dolayı bir direnç ile karşılaşır ve bu direnç rüzgâr hızını azaltabildiği gibi yönünü de değiştirebilir. Türbülans denilen durum sürtünme etkisinin bir sonucudur. İrtifa arttıkça havanın yoğunluğu azalacağından sürtünme etkisi de azalır ve atmosfer sınırında tamamen sıfırlanır. (Manwell ve ark., 2002)

Bu faktörlerden başka, deniz-kara etkisi, gündüz-gece etkisi, nem ve topografik etkilerde rüzgâr oluşumunu ve şeklini etkileyen diğer etmenlerdir.

Özetle ana faktörler küresel, diğer etmenler ise lokal rüzgarların oluşmasını sağlamaktadır. Kutup rüzgârları, Batı rüzgârları, Alize rüzgarları küresel rüzgarlardır. Yerel rüzgârlar ise muson, tropikal, kasırğa, meltemler, vadi ve dağ rüzgarlarını kapsamaktadır. (Manwell ve ark., 2002).

## **2.2. Enerji Olarak Rüzgâr ve Tarihi**

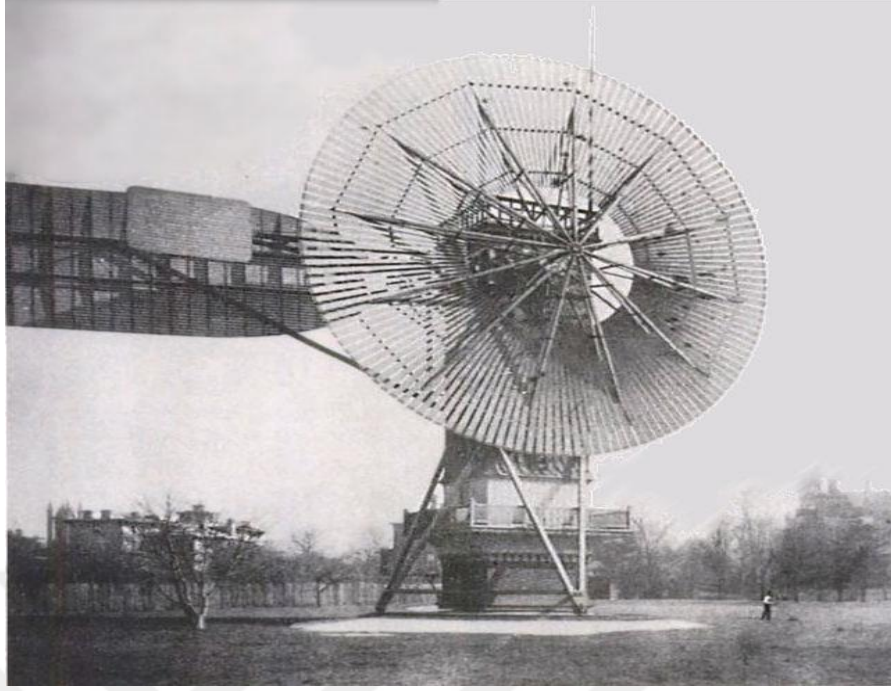
Rüzgârlar, güneşin ısıtması sonucu biriken potansiyel enerjinin, basınç farklılıkları ile kinetik enerjiye dönüşmüş halidir. Bu enerjinin işlevsel hale gelmesi için mekanik enerjiye çevirimi eski çağlardan beridir uygulanmaktadır. Kinetik enerjinin elektrik enerjisine çevirimi için de yine ara proses olarak mekanik enerjiye çevirimi yakın geçmişten itibaren bilinen ve uygulanan bir yöntemdir. İlk olarak karşımıza deniz ulaşımında çıkan bu kullanım, buhar jeneratörlerinin icadına kadar deniz ulaşımı için vazgeçilmez olmuştur. Yine bu sayede büyük coğrafi keşifler yapılmış ve ülkere güç ve iktidar sağlamıştır.

Karada ise rüzgârın kinetik enerjisinden yarar sağlama yel değirmenleri vasıtası ile olmuştur. M.Ö. 17. Yüzyılda kullanıldığı tahmin edilen en eski yel değirmenleri zamanının Babil imparatorluğu sınırları içerisindeydi. Resmiyette ise M.S.7. Yüzyılda Persler tarafından kullanılan yatay eksenli tasarıma sahip olan ilkel bir değirmendir.

Hollanda tipi yel değirmenleri ise 16.Yüzyılda yaygınlaşmaya başlamıştır. Aşırı rüzgârlardan zarar görmemesi için açılır-kapanır tipte “yay yelken” kanatlar ve rüzgârın doğrultusuna göre kendini ayarlayabilen sistemler zamanla bu tip değirmenlere bütünleşmiş edilmiştir. Suyun belirli yerlere pompalanması ve de tahıl öğütmede kullanılan bu tip değirmenler içme suyu eldesi için de büyük önem taşımıştır. (Hau,2006; Johnson 2001).

12 kW nominal kapasite, 18 metre hub yüksekliği ve 4 ton ağırlığı ile rüzgar enerjisi ile elektrik üretebilen ilk türbin Amerikalı Charles Francis Brush tarafından yapılmıştır. (Şekil 2.3.). Yıl 1920’yi gösterdiğinde türbinlerin verimliliği üzerine çalışan Albert Betz, bu verimliliğin maksimum %59,3 olabileceğini kanıtladı.





Şekil 2.3. Charles Francis Brush ‘un 1887 yılında yaptığı 12kW rüzgar türbini

İki ve üç kanatlı türbinler 1920’li yıllarda Amerika pazarında yer almaya başladı. Maksimum 3kW gücünde olan bu türbinler kırsalda elektrik elde etmek için kullanılmaktaydı. 2.Dünya Harbi öncesinde FL.Smidth ve Lykegaard firmaları 30-60kW gücünde rüzgar türbini üretimi yapmaktaydılar. Savaştan sonra ise 200kW gücünde bir türbin Johannes Juul tarafından üretildi. Kanat açıları ile hız kontrolüne sahip olan bu türbin üç kanatlıydı ve asenkron motor kullanıyordu. Günümüz türbin teknolojisine altyapı niteliğinde olan bu türbinler aynı zamanda dönemleri için büyük icatlardandılar.

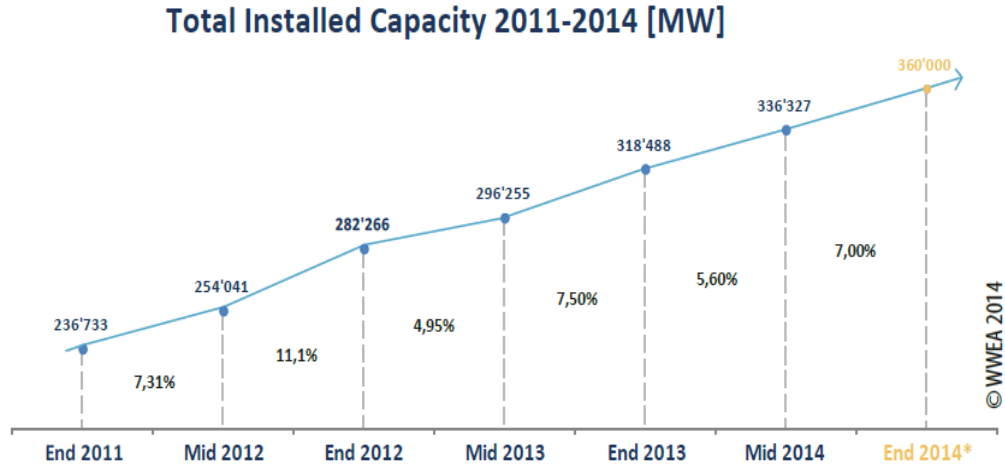
1900’lerin son çeyreğine kadar çeşitli tipte ve büyüklükte türbinler yapılmış olup 1973 petrol krizinden sonra bu alanda bir atılım gerçekleşmiştir. Petrol bazlı yakıtlardaki fahiş fiyatlar ve sınırlılık yenilenebilir enerji kaynağı arayışına dönüşmüştür. Ülkeler bu tip projeler için fon oluşturmuş ve destek vermiştir. İlk olarak 1978 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde rüzgâr türbinlerinin dağıtım şebekesine bağlanmasına izin verilmiş ve bu alanda düzenlemeler yapılmıştır. Bu ticari anlamda rüzgâr türbinlerinin önünü açmıştır çünkü artık birden fazla türbini birleştirerek daha büyük kapasiteli rüzgâr tarlaları oluşturulabilecek ve de şebekeye bağlanabilecektir. Son 37 yılda tekil türbinlerin nominal güçleri 5MW’a kadar çıkmıştır ve artık deniz üstlerine bile kurulabilir hale gelmişlerdir.

## 2.3 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

### 2.3.1 Dünyada Rüzgâr Enerjisi

Son 40 yılda küresel iklim değışiklikleri ve fosil bazlı enerji kaynaklarının hızla tükenmesi sonucu alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan gereksinim hızla artış göstermiştir. Rüzgâr bu alternatif enerji kaynakları arasında lokomotif görevi görmekte olup son 20 yılda bu tip enerji santrallerinin kurulumunun artması da bunun ispatı niteliğindedir.

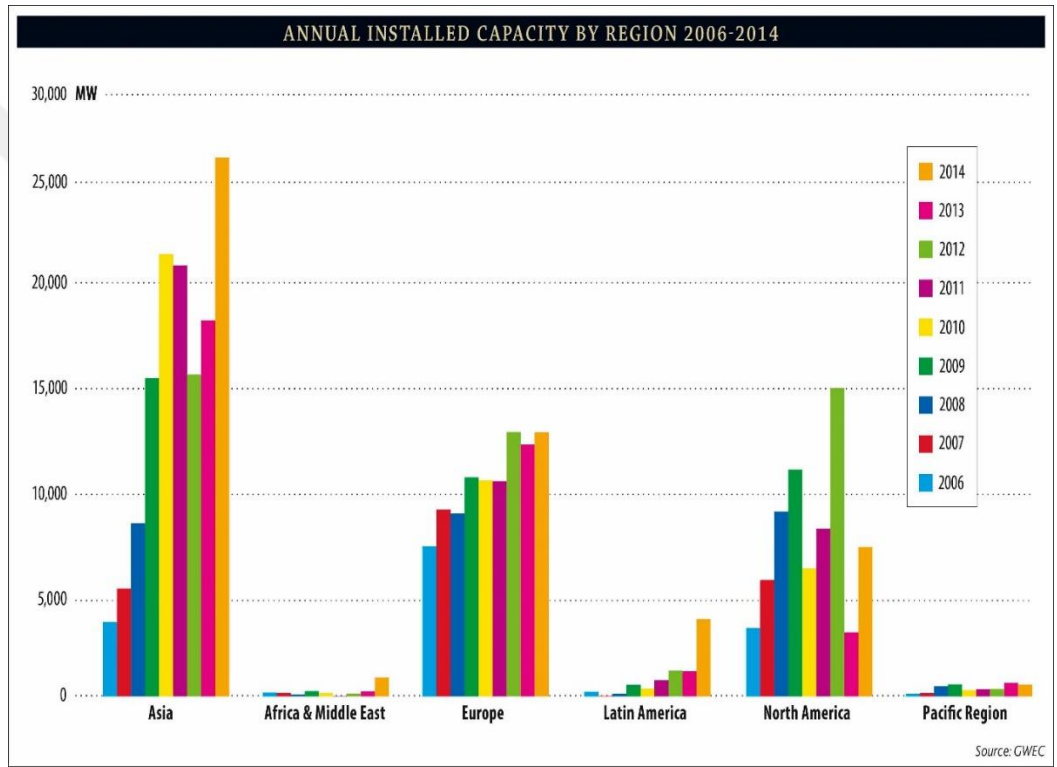
2014 yılı ortalarında yapılan çalışmalar ve analizlere göre tüm dünyada kurulu rüzgâr türbinleri küresel senelik elektrik enerjisi arzına 360GW katkıda bulunmaktadır ve bu rakam dünya elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %4’üne denk gelmektedir. Örnek vermek gerekirse bu rakam İngiltere’nin yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek kadardır. Şekil 2.4.’de 2011-2014 seneleri arası dünya toplam kurulu rüzgar enerjisi gücü görülmektedir. 2011 senesinde 236GW olan kurulu güç 2014 ortasında gelindiğinde iki katına ulaşmıştır. (WWEA,2014).



Şekil 2.4. 2014 ortası itibariyle dünyadaki toplam rüzgar enerjisi kurulu gücü (WWEA, 2014)

Kıtalara göre kurulu güç dağılımı Şekil 2.5.'de görülmektedir. 2009 yılına kadar Avrupa kıtası lider iken bu yıldan sonra Asya liderliği ele geçirmiştir. Afrika ve diğer kıtalarda ise az da olsa bu oran artmaktadır.

Detaylı incelendiğinde, Çin Asya kıtasındaki artışın temel nedenidir. Bu artış Kore, Japonya ve Hindistan gibi ülkeler tarafından da desteklenmektedir. ABD ve Kanada, Kuzey Amerika kıtası için lider ülkelerdir. 2014 sonu itibari ile kurulu kapasitesi en fazla olan 15 ülke Çizelge 2.1'de görülmektedir.



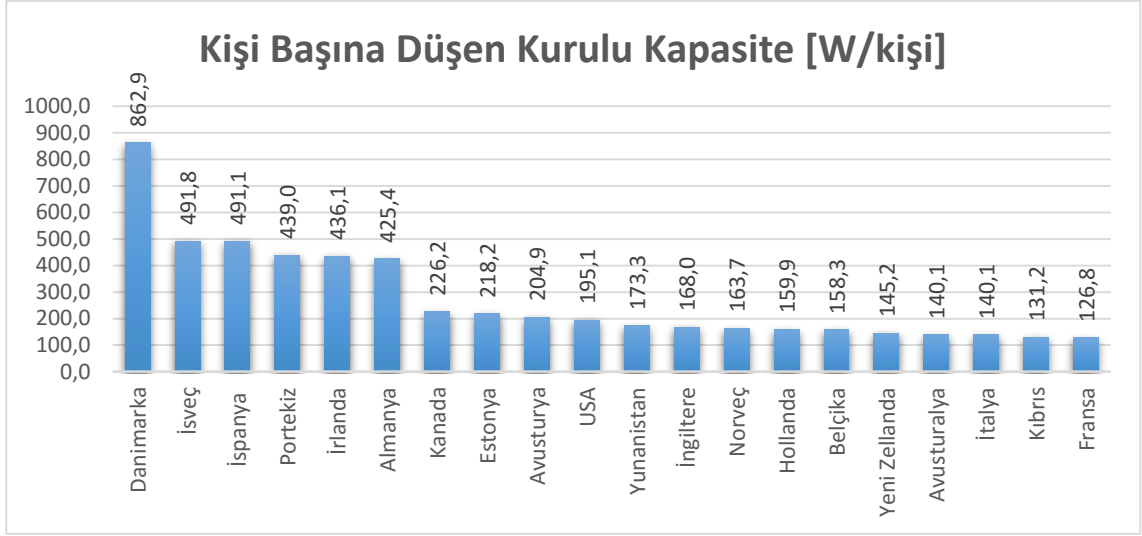
Şekil 2.5. Kıtalar arası kapasite dağılım yüzdeleri (GWEC, 2014)

Çizelge 2.1. Kurulu kapasitesi en fazla olan 15 ülke (WWEA,2014).

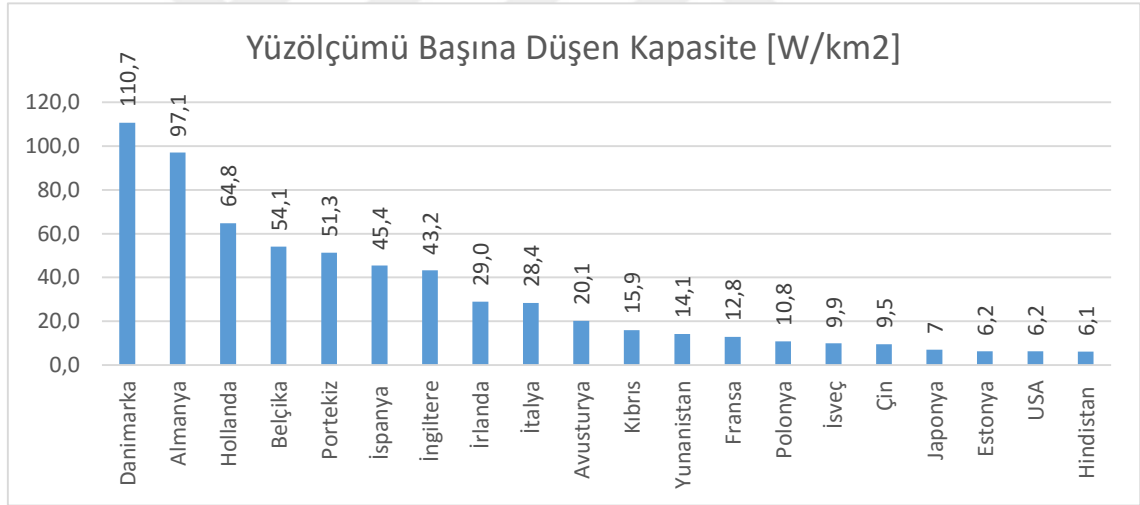
Position	Country	Total Capacity by June 2014 [MW]	Added Capacity H1 2014 [MW]	Total Capacity end 2013 [MW]	Added Capacity H1 2013 [MW]	Total Capacity end 2012 [MW]	Added Capacity H1 2012 [MW]	Total Capacity end 2011 [MW]
1	China	98'588	7'175	91'413	5'503	75'324	5'410	62'364
2	USA	61'946	835	61'108	1,6	59'882	2'883	46'919
3	Germany	36'488	1'830	34'658	1'143	31'315	941	29'075
4	Spain	22'970	0,1	22'959	122	22'796	414	21'673
5	India*	21'262	1'112	20'150	1'243	18'321	1'471	15'880
6	United Kingdom	11'180	649	10'531	1'331	8'445	822	6'018
7	France	8'592	338	8'254	198	7'499	320	6'877
8	Italy	8'586	30	8'551	273	8'144	650	6'640
9	Canada	8'526	723	7'698	377	6'201	246	5'265
10	Denmark	4'855	83	4'772	416	4'162	56	3'927
11	Portugal	4'829	105	4'724	22	4'525	19	4'379
12	Sweden	4'824	354	4'470	526	3'745	-	2'798
13	Brazil	4'700	1'301	3'399	281	2'507	118	1'429
14	Australia	3'748	699	3'049	475	2'584	-	2'226
15	Poland	3'727	337	3'390	310	2'497	-	1'616
	Rest of the World	31'506	2'042	29'451	1'761	24'660	3'026	16'493
	<b>Total</b>	<b>336'327</b>	<b>17'613</b>	<b>318'488</b>	<b>13'978</b>	<b>282'607</b>	<b>16'376</b>	<b>233'579</b>

© WWEA 2014

Çizelge 2.1'deki durum, kıtalararası dağılımdaki değişikliği destekler durumdadır. Kurulu kapasite açısından lider durumdaki Çin'in toplam kurulu gücü Haziran 2014 itibariyle 98 GW'ı geçmiş bulunmaktadır. İkinci konumdaki ABD'deki toplam kurulu güç ise 61,9 GW'tır. Fakat kurulu kapasiteden elde edilen elektrik ülkenin toplam elektrik üretimine oranlandığında durum değişmektedir; Çin'de rüzgâr enerjisi toplam elektrik üretiminin %2'sini karşılamaktadır. Aynı durum ABD'de %4,5 civarına ulaşmıştır (URL3; GWEO, 2014). Bazı ülkelerde ve bölgelerde ise rüzgâr en büyük elektrik kaynaklarından biri halindedir. Elektrik üretiminde rüzgâr enerjisi kullanım oranı açısından lider ülke Danimarka'dır. Bu açıdan Danimarka'nın ve diğer lider ülkelerin rüzgâr enerjisi kullanım oranları; Danimarka: 34 %, Portekiz: 20 %, İspanya: 20 %, Almanya: 10 % şeklindedir. Benzer şekilde toplam kurulu kapasitenin toplam nüfusa oranı Şekil 2.6'da ve kurulu kapasitenin yüzölçümüne oranı Şekil 2.7'de görülmektedir. Toplam kurulu kapasiteleri en yüksek olan ülkeler kişi başına kapasitede ve yüzölçümü başına kapasitede daha geride bulunmaktadır. Bu açılardaki lider ülkeler rüzgâr enerjisini ülke politikalarında ve toplumsal bilinçlerinde daha üst seviyede tutan, rüzgâr enerjisi sektörüne yön veren ülkelerdir (WWEA, 2014; GWEC, 2014).



Şekil 2.6. Kişi başına düşen kurulu güç değerleri açısından lider 20 ülke (WWEA,2014)



Şekil 2.7. Kilometrekare başına kurulu güç açısından lider 20 ülke (WWEA, 2014).

Bu oranlarda Danimarkalı, Alman ve İspanyol türbin üreticilerinin büyük katkısı vardır. Bu üreticiler hem ulusal hem de uluslararası piyasada lider tedarikçi konumundadırlar. Çin, Hindistan, Kore ve Japonya'daki rakip üreticiler de son yıllarda ataktadırlar. Dünya genelinde toplam 103 ülke rüzgâr enerjisini elektrik üretiminde kullanmaktadır. Bu ülkelerden öne çıkanların 2013-2014 yıllarına ait kurulu kapasiteleri ve ait olduğu kıtaların toplam kapasiteleri Çizelge 2.2, Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'te incelenebilir.

Çizelge 2.2. 2014 sonu Afrika ve Ortadoğu bazında kurulu kapasiteler [MW]  
(GWEC,2014)

AFRICA & MIDDLE EAST		End 2013	New 2014	Total (End 2014)
Morocco		487	300	787
South Africa		10	560	570
Egypt		550	60	610
Tunisia		255	-	255
Ethiopia		171	-	171
Cape Verde		24	-	24
Other <sup>1</sup>		115	14	129
<b>Total</b>		<b>1,612</b>	<b>934</b>	<b>2,545</b>

Çizelge 2.3. 2014 sonu Asya ve Avrupa bazında kurulu kapasiteler [MW] (GWEC,2014).

<b>ASIA</b>				
PR China*		91,412	23,351	114,763
India		20,150	2,315	22,465
Japan		2,669	130	2,789
Taiwan		614	18	633
South Korea		561	47	609
Thailand		223	-	223
Pakistan		106	150	256
Philippines		66	150	216
Other <sup>2</sup>		167	-	167
<b>Total</b>		<b>115,968</b>	<b>26,161</b>	<b>142,119</b>
<b>EUROPE</b>				
Germany		34,250	5,279	39,165
Spain		22,959	28	22,987
UK		10,711	1,736	12,440
France		8,243	1,042	9,285
Italy		8,558	108	8,663
Sweden		4,382	1,050	5,425
Portugal*		4,730	184	4,914
Denmark		4,807	67	4,845
Poland		3,390	444	3,834
Turkey		2,958	804	3,763
Romania		2,600	354	2,954
Netherlands		2,671	141	2,805
Ireland		2,049	222	2,272
Austria		1,684	411	2,095
Greece		1,866	114	1,980
Rest of Europe <sup>3</sup>		5,715	835	6,543
<b>Total Europe</b>		<b>121,573</b>	<b>12,820</b>	<b>133,969</b>
of which EU-28 <sup>4</sup>		117,384	11,791	128,752

Çizelge 2.4. 2014 sonu Dünya'nın geri kalanı ve Dünya toplamı bazında kurulu kapasiteler [MW] (GWEC,2014).

LATIN AMERICA & CARIBBEAN				
	Brazil**	3,466	2,472	5,939
	Chile	331	506	836
	Uruguay	59	405	464
	Argentina	218	53	271
	Costa Rica	148	50	198
	Nicaragua	146	40	186
	Honduras	102	50	152
	Peru	2	146	148
	Caribbean <sup>5</sup>	250	-	250
	Others <sup>6</sup>	55	28	83
	<b>Total</b>	<b>4,777</b>	<b>3,749</b>	<b>8,526</b>
NORTH AMERICA				
	USA	61,110	4,854	65,879
	Canada	7,823	1,871	9,694
	Mexico	1,859	522	2,381
	<b>Total</b>	<b>70,792</b>	<b>7,247</b>	<b>77,953</b>
PACIFIC REGION				
	Australia	3,239	567	3,806
	New Zealand	623	-	623
	Pacific Islands	12	-	12
	<b>Total</b>	<b>3,874</b>	<b>567</b>	<b>4,441</b>
	<b>World total</b>	<b>318,596</b>	<b>51,477</b>	<b>369,553</b>

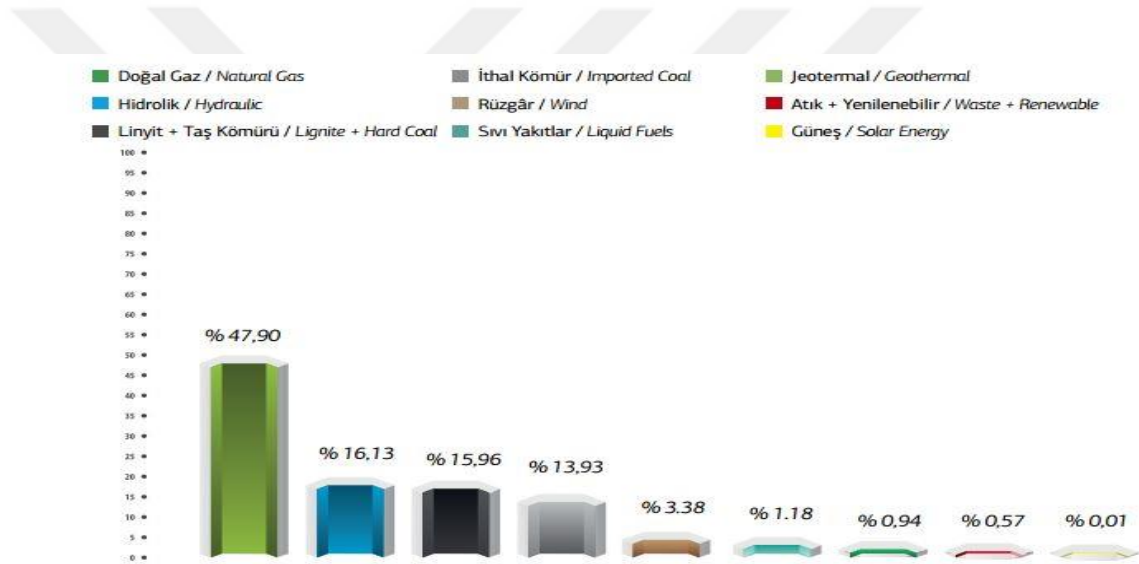
Source: GWEC

Rüzgâr enerji sektörü geliştikçe çeşitli yeni eğilimler de türemektedir. Bunlardan birisi eski türbinlerin revize edilerek güçlerinin artırılmasıdır. Bu eğilim Almanya'da başlamıştır ve 2010'da topla 183 MW Kurulu gücünde makine eskileriyle değiştirilmiştir. Bu trendin yakın gelecekte büyümesi öngörülmektedir. Diğer bir eğilim ise halka ait rüzgâr tarlaların anavatanı olan Danimarka'da başlamıştır ve halkın rüzgâr türbini sahibi olması konusunda yeni teşvikler yürürlüğe girmiştir (WWEA, 2014). Japonya'daki nükleer felaket ve Meksika Körfezi'ndeki petrol kaçağı rüzgâr enerjisine olan olumlu bakış açısını haklı olarak pekiştirmiştir. Gün geçtikçe daha fazla hükümet rüzgâr enerjisinin daha fazla kullanımı için destek vermektedir. Fakat halen gelişmekte olan birçok ülkede büyük bir yönetmelik açığı bulunmaktadır, piyasa altyapısında yeterli stabilite ve güvenilirlik bulunmamaktadır ve finansal kaynaklar açısından sıkıntı vardır. Bu ülkelerden biri de Türkiye'dir.

### 2.3.2 Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

Kaynaklar açısından bakıldığında; Türkiye 2014 yılı sonu itibariyle, toplam elektrik üretiminin %16,13’ü hidrolik kaynaklardan, %47,9’u doğalgazdan, %29,89’u kömürden, %1.18’i sıvı yakıtlardan, %5.17’si çok yakıtlılardan (multi-fueled), %3,38’i rüzgârdan ve %0.94’ü jeotermal ve biyogazdan, %0,57’si atık ve yenilenebilir kaynaklardan, %0,01’i güneş enerjisinden sağlanmaktadır.

2014 yılı itibariyle, Fosil enerji kaynakları açısından ithalatçı konumunda olan Türkiye’de 2014 yılında enerji ihtiyacının petrolde %92, doğalgazda %99, taş kömüründe % 95 olmak üzere toplamda %73,4’lük bölümü ithalat ile karşılanmıştır (EÜAŞ, 2013).



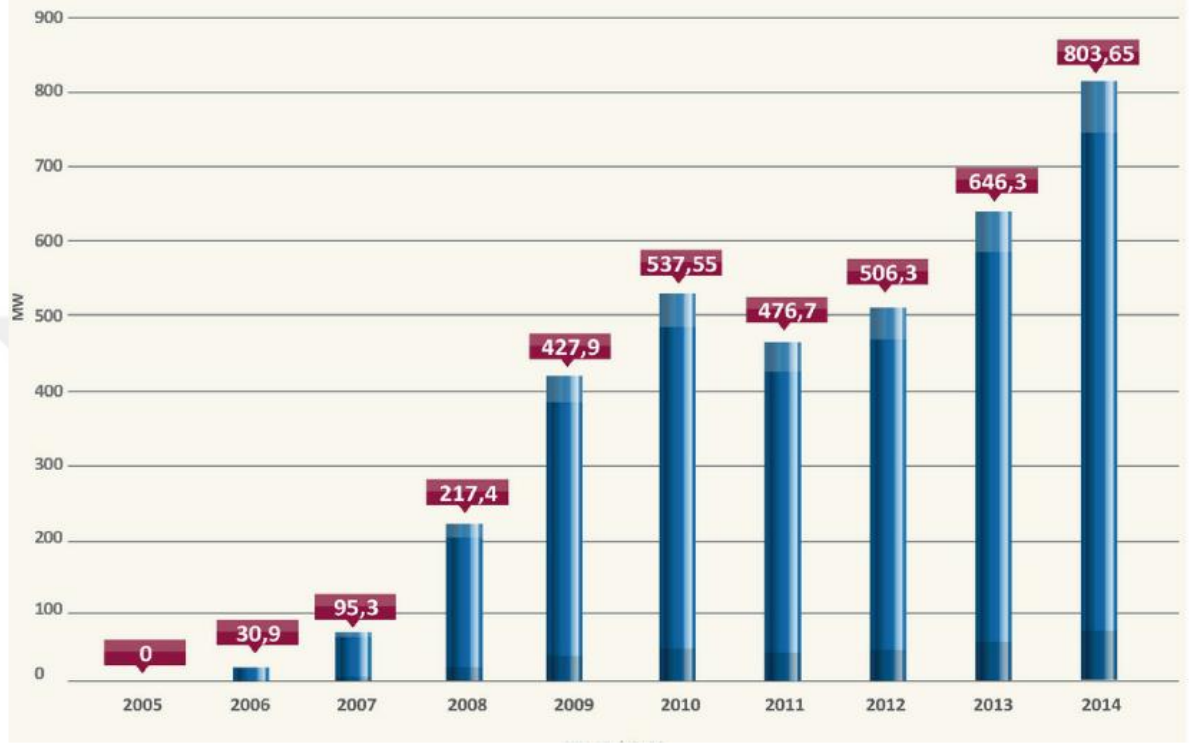
Şekil 2.8. 2014 yıl sonu Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı

Bu tablo enerji talebi bakımından önemli bir yüzde ile dışa bağımlı olduğumuzu göstermektedir. Her yıl büyüyen bir ekonomiye sahip olan Türkiye enerjiye aç bir ülke durumdadır. Enerji politikalarında öncelik arz güvenliği olmalıdır ve bunu sağlamanın yolları kendi kaynaklarımıza yönelmek ile enerji kaynaklarımızı çeşitlendirmektir. Bölüm 2.1 ve Bölüm 2.3.1’de de belirtildiği üzere rüzgâr enerjisi bu ihtiyaçları karşılama açısından lider yenilenebilir enerji kaynaklarındandır. Türkiye’de rüzgâr enerji potansiyeli ele alındığında, bu konuyla ilgili Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), yerden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr süratine sahip alanlarda kilometrekare için 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilerek, Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyelinin 48.000 MW olduğunu bildirilmiştir. EİE, meteorolojik verilerin, küresel





toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü giderek artmış ve 2014 son çeyreği itibariyle 3397 MW'a ulaşmıştır. Bu değerler ile Türkiye dünyada kurulu kapasite açısından 17. sırada bulunmaktadır (Altuntaşoğlu, 2011; Url-2).



Şekil 2.10. Türkiye'deki Rüzgâr enerjisi santralleri için yıllık kurulum (TREİR,2015)

EPDK'dan alınan verilere göre toplamda 9630 MW'lık RES lisansı verilmiştir fakat işletmede olan toplam kurulu güç 3397 MW'tır. İşletme halindeki RES'ler Çizelge 2.5'te kurulu güç açısından büyükten küçüğe şekilde incelenebilmektedir (Url-5). REPA incelendiğinde RES kurmak için elverişli bölgeler çoğunlukla tüketimin düşük olduğu kıyı alanlarıdır ve bu alanların şebeke kapasiteleri düşüktür. Dolayısıyla bu alanlarda şebekeye kapasitesi yüksek bir RES kurulması ancak elektriksel altyapının güçlendirilmesi ya da altyapısı uygun bir noktaya kadar kablo hattı döşenmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca RES'in bağlanacağı noktada sistemin kısa devre gücünün en fazla yüzde 5'ine kadar kurulu kapasiteye izin verilmektedir, bu kapasite Türkiye toplamında 11.422 MW'tır.(URL-7)

Çizelge 2.5. Türkiye’de işletmedeki RES’ler ve kurulu güçleri (Ur1-5)

Unvan	Tesis İli	Tesis İlçesi	Kurulu Gücü (MW)	İnşa Halindeki Kapasite (MW)	İşletmedeki Kapasite (MW)
AL-YEL ELEKTRİK	KIRŞEHİR		150	0	150
ENERJİSA ENERJİ	BALIKESİR		143	0	143
SOMA ENERJİ	MANİSA	SOMA	240,1	100	140,1
ROTOR ELEKTRİK	OSMANİYE	BAHÇE	135	0	135
LODOS	İZMİR	KARABURUN	223	103	120
BAKİ ELEKTRİK	BALIKESİR		126,5	12,3	114,2
GALATA WIND	BALIKESİR	BANDIRMA	105	12	93
BİLGİN RÜZGÂR	MANİSA		120	30	90
BERGAMA RES	İZMİR	ALİAĞA	120	30	90
ZİYARET RES	HATAY	SAMANDAĞ	75	0	75
AKSU TEMİZ	KAYSERİ	YAHYALI	72	0	72
OLGU ENERJİ	AFYONKAR.	DİNAR	115	46	69
SUSURLUK ENERJİ	BALIKESİR	SUSURLUK	72,5	12,5	60
BANDIRMA ENERJİ	BALIKESİR	BANDIRMA	89,7	29,7	60
SANKO	İSTANBUL		100	40	60
AKHİSAR ENERJİ	MANİSA		55	0	55
POYRAZ ENERJİ	BALIKESİR	KEPSUT	54,9	0	54,9
DOĞAL ENERJİ	BALIKESİR		54,2	0	54,2
ARNAZ RES	UŞAK	BANAZ	54	0	54
ÜTOPYA ELEKTRİK	İZMİR	BERGAMA	51,5	0	51,5
HASANBEYLİ	OSMANİYE	HASANBEYLİ	50	0	50
BALABANLI	TEKİRDAĞ		50	0	50
ZEYTİNELİ RES	İZMİR	ÇEŞME	49,5	0	49,5

Çizelge 2.5. (Devamı) Türkiye’de işletmedeki RES’ler ve kurulu güçleri (Url-5)

BELEN ELEKTRİK	HATAY	BELEN	48	0	48
SİLİVRİ ENERJİ	İSTANBUL	SİLİVRİ	45	0	45
BOYDAK ENERJİ	İSTANBUL	SİLİVRİ	45	0	45
KANGAL ELEKTRİK	SİVAS		128	86	42
MERZİFON ENERJİ	AMASYA	MERZİFON	75	35	40
TOKAT ENERJİ	TOKAT		85	45	40
MARE MANASTIR ENERJİSA ENERJİ	İZMİR	ÇEŞME	56,2	17	39,2
	MERSİN	SİLİFKE	39	0	39
CAN ENERJİ	BİLECİK	BOZÜYÜK	50	11	39
GARET ENERJİ	MANİSA	AKHİSAR	35	0	35
YAPISAN ELEKTRİK	BALIKESİR	BANDIRMA	50	15	35
DOĞAL ENERJİ	İZMİR		34,5	0	34,5
GALATA WIND	MERSİN		34	0	34
DOĞAL ENERJİ	İZMİR	URLA	32,2	0	32,2
AYEN ENERJİ	AYDIN		31,5	0	31,5
ANEMON ENERJİ	ÇANAĞKALE		55,7	25,3	30,4
BRİZA RÜZGÂR	BALIKESİR	MERKEZ	50	19,75	30,25
EDİNCİK ENERJİ	BALIKESİR	BANDIRMA	56,4	26,4	30
ABK ENERJİ	AYDIN		30	0	30
DORUK ENERJİ	İZMİR		37	7	30
YAPISAN ELEKTRİK	İZMİR	ÇEŞME	55	25	30
EOLOS RÜZGÂR	HATAY	MERKEZ	29,784	0	29,784
DARES DATÇA	MUĞLA	DATÇA	41,6	12	29,6
BAKRAS ENERJİ	HATAY	BELEN	28,937	0	28,937
Z. T ENERJİ	HATAY	İSKENDERUN	52,991	25,101	27,89
ALİZE ENERJİ	TEKİRDAĞ	ŞARKÖY	41,5	13,8	27,7
ENERJİSA ENERJİ	ÇANAĞKALE	EZİNE	29,9	2,3	27,6

Çizelge 2.5. (Devamı) Türkiye’de işletmedeki RES’ler ve kurulu güçleri (Url-5)

YENİ BELEN ENERJİ	HATAY	BELEN	27	0	27
GERES ELEKTRİK	MANİSA	KIRKAĞAÇ	27	0	27
ALİZE ENERJİ	MANİSA	KIRKAĞAÇ	50,1	24,8	25,3
TEKTUĞ ELEKTRİK	ADİYAMAN	SİNCİK	25	0	25
GARET ENERJİ	ÇANAKKALE	EZİNE	27,5	2,75	24,75
AYEN ENERJİ	İZMİR	SEFERİHİSAR	24	0	24
BURSA TEMİZ	BALIKESİR	BANDIRMA	40	16	24
SABAŞ ELEKTRİK	AYDIN	ÇİNE	24	0	24
ALENKA ENERJİ	KIRKLARELİ	VİZE	27	3	24
KAPIDAĞ RÜZGÂR	BALIKESİR	ERDEK	34,85	10,85	24
LODOS ELEKTRİK	İSTANBUL	GAZİOSMAN.	34	10	24
ALİZE ENERJİ	ÇANAKKALE	EZİNE	20,8	0	20,8
ALİZE ENERJİ	BALIKESİR	SUSURLUK	29,9	9,2	20,7
MANRES RÜZGÂR	BALIKESİR		27,5	7,5	20
ÖRES ELEKTRİK	İZMİR	KARABURUN	20	0	20
KIROBA ELEKTRİK	AYDIN	ÇİNE	19,5	0	19,5
KORES KOCADAĞ	İZMİR	ÇEŞME	22,5	5	17,5
AKSA ENERJİ	HATAY		30	14	16
ALİZE ENERJİ	BALIKESİR	HAVRAN	16	0	16
AYSU ENERJİ	KIRKLARELİ	MERKEZ	15	0	15
BOREAS ENERJİ	EDİRNE	ENEZ	20	5	15
AKENERJİ	BALIKESİR		15	0	15
DOĞAL ENERJİ	ÇANAKKALE		14,9	0	14,9
ÇANRES ELEKTRİK	EDİRNE	KEŞAN	33	19,25	13,75
KARDEMİR	İZMİR	ALİAĞA	12	0	12
DENİZ ELEKTRİK	MANİSA	AKHİSAR	10,8	0	10,8
BORES BOZCAADA	ÇANAKKALE		10,2	0	10,2

Çizelge 2.5. (Devamı) Türkiye’de işletmedeki RES’ler ve kurulu güçleri (Url-5)

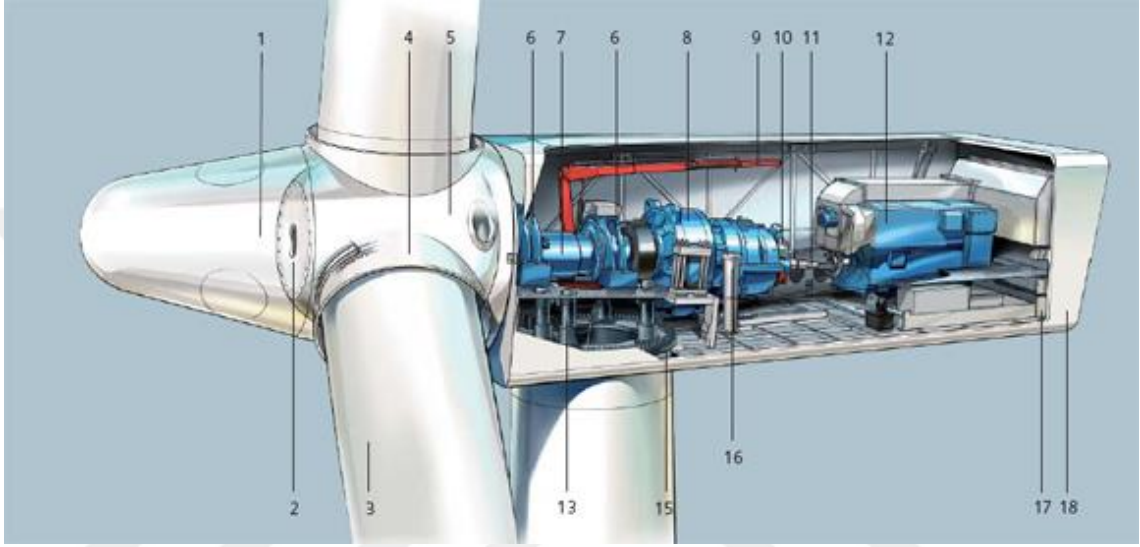
ELFA ELEKTRİK	BALIKESİR	DURSUNBEY	10	0	10
DENİZ ELEKTRİK	HATAY		60	50	10
TAN ELEKTRİK	İZMİR	ALİAĞA	9,6	0	9,6
AYRES	ÇANAKKALE		4,998	0	4,998
SARAY DÖKÜM	TEKİRDAĞ	ÇERKEZKÖY	4	0	4
İNNORES ELEKTRİK	İZMİR	ALİAĞA	60	57,5	2,5
ALİZE ENERJİ	İZMİR	ÇEŞME	10,7	9,2	1,5
SUNJÜT SUN’İ JÜT	İSTANBUL		1,2	0	1,2
TEPERES ELEKTRİK	İSTANBUL	SİLİVRİ	6,85	6	0,85
RK RÜZGÂR ENERJİ	BALIKESİR	ERDEK	0,8	0	0,8
<b>TOPLAM</b>			<b>4428,81</b>	<b>1031,201</b>	<b>3397,609</b>

Yerli üretim olarak çeşitli marka türbinlerin kuleleri ve kanatları yabancı firmalar ile ortak olarak yurt içi piyasada üretilmektedir fakat daha ileri yerli rüzgâr endüstrisi gelişimine yönelik yeterli politika bulunmamaktadır. 2011 yılı başında yapılan yönetmelik değişikliği ile yerli üretimin desteklenmesine ilişkin ek alım garantisi umut vaat etmektedir Ayrıca Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi (MİLRES) hakkında çalışmalar devam etmektedir.

#### 2.4. Rüzgâr Türbini ve Bileşenleri

Rüzgâr türbini rüzgârdaki gücü elektriğe dönüştüren bir makinedir. Buna rüzgârın gücünü mekanik güce dönüştüren yel değirmenlerinin değişmiş hali de denilebilir. Elektrik jeneratörleri olarak rüzgâr türbinleri elektrik şebekesine bağlanırlar. Bu şebekeler bataryayı şarj eden bir devre, yerleşim alanı ölçekli bir güç sistemi, izole bir şebeke ya da genel elektrik şebekesi olabilir. Rüzgâr türbinlerinde enerji dönüşümü temel aerodinamik kuvvetin kanatlar aracılığıyla dönen bir shafta tork uygulamasıyla önce mekanik enerjiye sonra da jeneratör vasıtasıyla elektriğe çevrilmesi şeklinde gerçekleşir.

Günümüzde en yaygın rüzgâr türbini tasarımı yatay eksenli rüzgâr türbinidir; bu dönme ekseninin yere paralel olması anlamına gelmektedir. Yatay eksenli türbinler kendi içinde rotor yönü (rüzgâr altı ve rüzgâr üstü), rotor kontrolü (pitch ve stall kontrolü), kanat sayısı (genellikle üç ya da iki) ve rüzgâra göre nasıl yön değiştirdiğine (serbest sapma veya aktif sapma) göre sınıflandırılır (Hau, 2006).



Şekil 2.11. Modern bir türbinin bileşenleri (Url-6).

Yatay eksenli rüzgâr üstü bir rüzgar türbininin temel yapısı hariç parçaları Şekil 2.11’de görülebilmektedir. Buradaki parçalar numaraları ile birlikte; 1.Rotor başlığı, 2. Rotor başlığı desteği, 3. Kanat, 4. Kanat rulmanı, 5. Rotor göbeği, 6. Ana şaft yatağı, 7. Ana şaft, 8. Dişli kutusu, 9. Servis vinci, 10. Fren diski, 11. Bağlantı, 12. Jeneratör, 13. Rota dişlisi, 14. Kule, 15. Rota halkası, 16. Yağ filtresi, 17. Jeneratör fanı, 18. Kanopi (Nacelle)’dir (Url-6). Tipik bir yatay eksenli türbinin ana bileşenleri aşağıda incelenmiştir; Rotor: Rotor gövdesi (hub) ve kanatlardan oluşmaktadır. Bunlar hem performans hem de maliyet açısından en önemli parçalardır. Günümüzdeki türbinlerin çoğu rüzgâr üstü ve üç kanatlıdır. İki kanatlı ve rüzgâr altı modeller ise daha seyrek olarak kullanılmaktadır. Geçmişte tek kanatlı tasarımlar olduysa da günümüzde üretilmemektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte türbinlerin kurulu gücü artmaktadır, bu temel olarak kanat boyu ile sağlanmaktadır. Elbette kanatlar büyüdükçe ağırlık sorunu oluşmaktadır. Kanatlar genellikle kompozit malzemedен üretilmektedir; bunlar fiberglas ile kuvvetlendirilmiş plastikler, ahşap/epoksi laminatlar ya da karbon fiber/epoksi

kompozisyonları olabilmektedir (Johnson, 2001; Burton, 2001). Modern türbinler, aşırı yüksek rüzgâr hızlarında zarar görmemek için stall veya pitch kontrol mekanizmalarıyla üretilmektedir. Stall kontrol, kanat tasarımının belirli bir rüzgâr hızından sonra kaldırma etkisini karşılayacak bir basma etkisi yaratacak şekilde yapılmasını kapsar. Pitch kontrol ise türbin üzerinde bulunan anemometre aracılığıyla ölçülen rüzgâr hızında belirli bir eşiğin geçilmesi durumunda devreye girer ve rotor gövdesinde, kanatların bağlantı noktalarında bulunan elektromekanik sistemle kanadın açısı değiştirilir (URL-6). Aktarma Aksamları: Nacelle kutusunun içindeki hareketli parçaları kapsar. Bunlar temel olarak rotor tarafındaki düşük hız mili, dişli kutusu ve jeneratör tarafındaki yüksek hız milinden oluşur. Ek olarak rulmanlar ve yataklama, kaplinler, fren sistemi ve jeneratörün hareketli parçaları da dâhildir. Dişli kutusunun amacı rotorun dönme hızını düşük devirden (18-50rpm civarı) jeneratöre uygun devire (ortalama 1500rpm) yükseltmektir. Doğrudan tahrikli türbinlerde dişli kutusu bulunmamaktadır (Hau, 2006; Burton, 2001).

Jeneratör: Rüzgâr türbinlerinde senkron, asenkron ve doğru akım jeneratörleri kullanılır. Asenkron jeneratörler rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan bir jeneratör tipidir. Avantajları arasında basit mekanik yapı, büyük boyutlarda üretilebilme, şebekeyle senkronize edilebilmeleri, üretim ve bakım maliyetinin düşük olması ve dayanıklı olmaları bulunmaktadır. Rüzgâr hızının ani değişimlerinde meydana gelen tork titreşimlerini çok başarılı bir şekilde azaltabilmektedir. Senkron jeneratörler ise daha etkili oldukları için tercih edilebilmektedirler. Şebekeye direkt bağlanabildikleri gibi bir inverter aracılığıyla da bağlanabilirler. Fakat şebekeyle senkronize olabilmeleri için ek donanım gerekmektedir. Doğru akım jeneratörleri ise şebekeden bağımsız olarak kurulan küçük güçteki rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Hız kontrolleri kolay olmasına rağmen bakım gerektirirler ve güvenilirlikleri düşüktür (Hansen, 2001).

(Yaw) Sistemi: Bu kategori türbin gövdesi, mekanik donanım yatağı ve sapma yönlendirme sistemini içerir. Mekanik donanım yatağı nacelle'in içindeki aktarma aksamları ve diğer ekipmanların düzgün yerleşimini sağlar. Nacelle kutusu ise tüm ekipmanları dış etkilerden korur. Rota mekanizması ise rotoru rüzgârın esme yönüne ayarlanmış olarak tutmaya yarar. İki tip rota mekanizması vardır; rüzgâr altı türbinlerde kullanılan serbest rota sistemi ve rüzgâr üstü türbinlerde kullanılan aktif rota sistemi. Aktif rota sistemleri sensor-motor-dişli ekipmanları kullanarak otomatik olarak işlerken, serbest rota sistemi rüzgar altı türbinlerin aerodinamik özelliğinden yararlanarak



kendiliğinden çalışmaktadır (Hansen, 2001).

**Kule ve Temel:** Bu kategorideki ekipmanlar türbin dâhilinde hem statik hem dinamik en fazla yüke maruz kalanlardır. Kule nacelle kutusunun içindeki tüm ekipmanlara ve rüzgâr kuvvetine, temel de kule dâhil tüm ekipmanların yüküne dayanmalıdır. Kulelerin yüksekliği kanat boyunun yaklaşık 2-3 katına denk gelmektedir. Çelik, beton, kafes ve teller ile desteklenmiş olmak üzere birçok kule tipi mevcuttur. En çok kullanılan tip çelik kulelerdir; bunlar 2-4 segmentten oluşur ve belirli bir açıyla daralarak yükselir. Temellerde ise genellikle beton dolgu kullanılır. Toprağın yumuşak olduğu durumlarda ise derine kazıklarla çakılı plaka temeller kullanılabilir (Johnson, 2001; Hau, 2006).

## 2.5. Rüzgâr Enerjisi Belirlenmesinde Temel Denklemler

Rüzgârdan enerji elde etmek temel olarak hareket halindeki havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek gerçekleştirir. “m” kütlesine ve “v” hızına sahip olan hareket halindeki havanın kinetik enerjisi aşağıdaki formüldeki gibi hesaplanır:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.1)$$

Havanın “v” hızıyla belirli bir “A” kesit alanından geçerken oluşturduğu hacimsel debi “ $\dot{V}$ ”;

$$\dot{V} = v A \quad (2.2)$$

olarak gösterilir. Havanın yoğunluğu “ $\rho$ ” hacimsel debi ile birlikte kütleli debiyi oluşturur;

$$\dot{m} = \rho v A \quad (2.3)$$

Bu denklemde kütleli debi “ $\dot{m}$ ”, birim zamanda bir noktadan/alandan geçen kütleyi ifade eder.

Birim zaman başına düşen enerji güce (P) eşittir, dolayısıyla (2.1) denklemindeki kütle, kütleli debi (2.3) ile yer değiştirildiğinde sırasıyla

$$P = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 \quad (2.4a)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.4b)$$

güç formülü elde edilir.



Bu denklem göz önünde bulundurulduğunda, teorik olarak maksimum güç  $v_2$  sıfır değerinde olduğunda elde edilecektir. Fakat fiziksel olarak bu sonuç mantıksal değildir; çıkış akım hızı  $v_2$  sıfırsa rotordan önceki giriş akım hızı da sıfır olmalıdır, bu da rotordan daha fazla bir akım geçmeyeceğini ima eder. Fiziksel olarak mantıklı bir sonuç, belirli bir  $v_2/v_1$  oranında maksimum güce ulaşılmasıdır. Bu da rotorun mekanik gücünü ifade eden başka bir eşitlik gerektirir. Momentumun korunumu kanunu kullanıldığında havanın rotora etki ettiği kuvveti aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (2.8)$$

Etki tepki prensibine göre bu itme kuvveti, rotorun hava akımına yaptığı eş bir kuvvetle dengelenmelidir. İtme kuvveti, rotorun akım düzlemindeki hava kütle hızıyla iter. Bunun için gerekli güç:

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (2.9)$$

Böylece, hava akımından elde edilen mekanik enerji, bir yandan rotordan önce ve sonraki güç farkıyla, diğer yandan itme kuvveti ve akım hızıyla bulunabilir. Bu iki denklem  $v'$  için birbirine eşitlendiğinde:

$$\frac{1}{2}\dot{m}(V_1^2 - V_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (2.10a)$$

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 - v_2) \quad (2.10b)$$

Dolayısıyla rotordan geçen akım hızı  $v_1$  ve  $v_2$  nin aritmetik ortalamasına eşittir:

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.10c)$$

Kütlesel debi böylece;

$$\dot{m} = \rho Av' = \frac{1}{2}\rho A(v_1 + v_2) \quad (2.11)$$

Halini alır.

Rotordan elde edilen mekanik güç aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$P = \frac{1}{4}\rho A(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \quad (2.12)$$

Bu güç eldesine bir referans oluşturmak için, aynı kesit alanından geçen mekanik güç elde edilmemiş serbest hava akımının gücüyle karşılaştırılır:

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho Av_1^3 \quad (2.13)$$

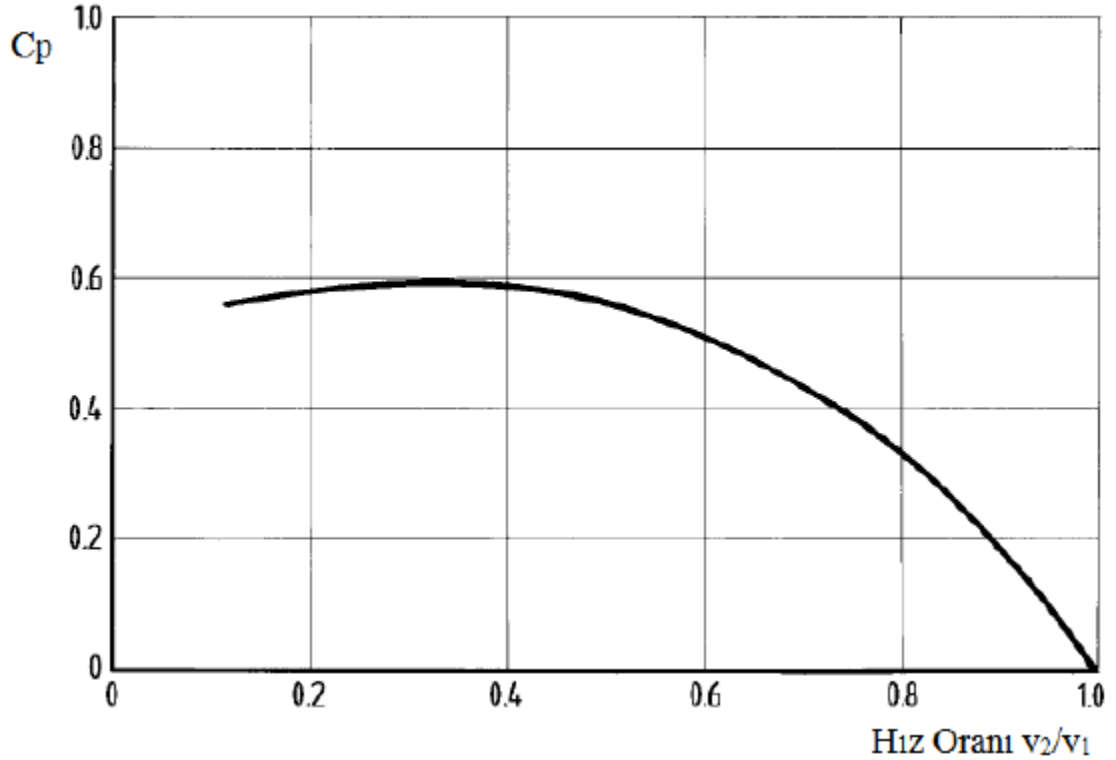
Rotorun elde ettiği mekanik güç ve rotorun önündeki serbest hava akımına ait gücün oranına “güç katsayısı” denir ve  $c_p$  ile gösterilir:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho(v_1+v_2)(v_1^2-v_2^2)}{\frac{1}{2}\rho Av_1^3} \quad (2.14a)$$

Birkaç düzenleme sonunda, güç katsayısı direkt olarak  $v_2/v_1$  hız oranının bir fonksiyonu olarak belirtilebilir:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (2.14b)$$

Güç katsayısının rotor öncesi ve sonrası hız oranlarıyla olan ilişkisi grafiksel olarak analiz edildiğinde güç katsayısının belirli bir hız oranında maksimum değere çıktığı kolayca görülebilir (Manwell ve ark.,2002) (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Güç katsayısı – hızlar oranı ilişkisi grafiği.

$$\frac{v_2}{v_1} = 1/3 \text{ olduğunda, maksimum ideal güç katsayısı } c_p \text{ aşağıdaki sonuca ulaşır}$$
$$c_p = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (2.15)$$

Albert Betz bu önemli değeri ilk bulan kişidir ve bu yüzdendir ki bu değer literatürde Betz faktörü olarak geçmektedir.

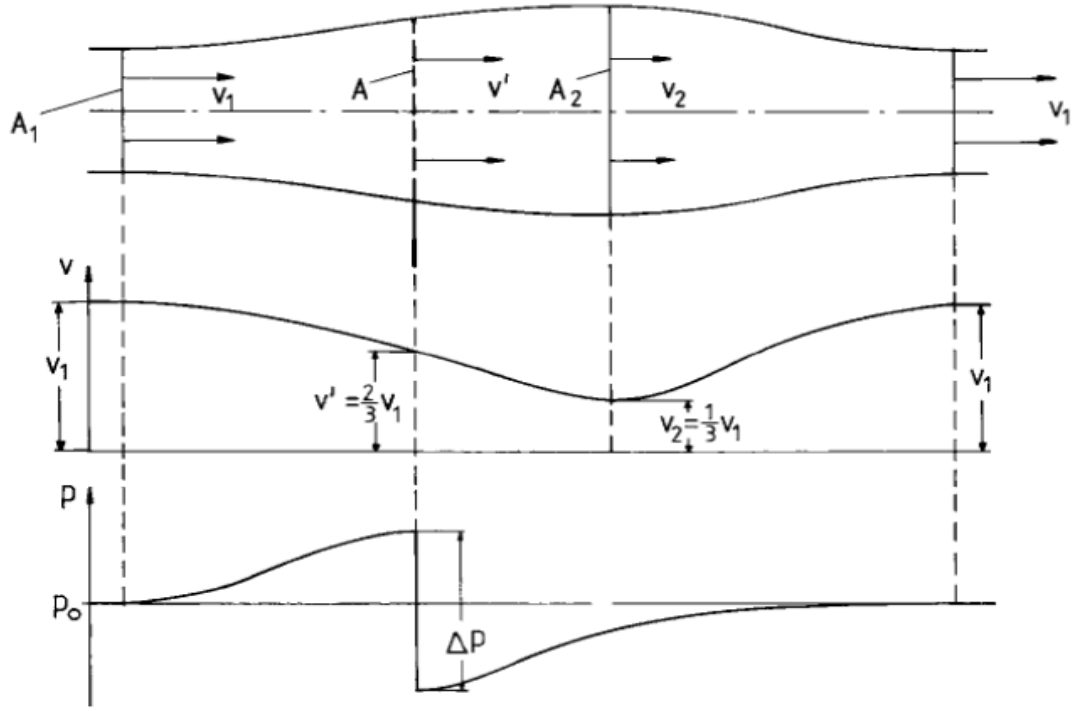
İdeal güç katsayısının  $v_2/v_1 = 1/3$ 'te maksimuma ulaştığını bilerek, akım hızı  $v'$

$$v' = 2/3v_1 \quad (2.16a)$$

ve hava akımının rotordan geçtikten sonraki düşmüş hızı  $v_2$  aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$v_2 = \frac{1}{3}v_1 \quad (2.16b)$$

Şekil 2.14 rotor ve çevresindeki akımın durumunu daha detaylı olarak göstermektedir. Akım çizgilerine ek olarak ilgili akım hızlarının ve basınç yüksekliğinin değişimleri de görülebilmektedir. Rotora yaklaşırken hava yavaşlar, rotordan geçtikten sonra ise daha düşük bir hıza iner. Akış çizgileri akım tüpünün daha büyük bir çapa genişlediğini gösterir ki bu da hızın azalması anlamına gelmektedir. Türbine yaklaşırken basınç yüksekliği artar, aniden düşük bir değere atlama yapar, daha sonra türbinin arkasında basınç eşitlenmesinden dolayı ortam (atmosfer) basıncına geri döner. Akım hızı da türbinden uzakta ilk değerine geri döner ve çapı artmış akım çizgileri yok olur.



Şekil 2.14. Rotor ve çevresine ait akım koşulları (Hau, 2006).

## 2.6. Rüzgârın İstatiksel Özellikleri ve Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu

Yıllık ortalama rüzgâr hızlarının yıldan yıla değişmesi tahminlerini güç kılrsa da, yıl içindeki rüzgâr hızı değişimleri bir olasılık dağılım fonksiyonu ile karakterize edilebilir. Weibull olasılık dağılım fonksiyonu saatlik ortalama rüzgâr hızlarının değişimini bulmakta birçok tipik saha için uygun bir fonksiyondur. Fonksiyon aşağıdaki gibidir:

$$F(v) = \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2.17)$$

Burada “F(v)” saatlik ortalama rüzgâr hızının “v” değerini geçtiği zamanın oranını göstermektedir. Fonksiyon iki parametre ile şekillenmektedir; ölçek parametresi “c” ve şekil parametresi “k”. k, ortalamanın değişkenliğine, c ise yıllık ortalama rüzgâr hızına bağlıdır;

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.18)$$

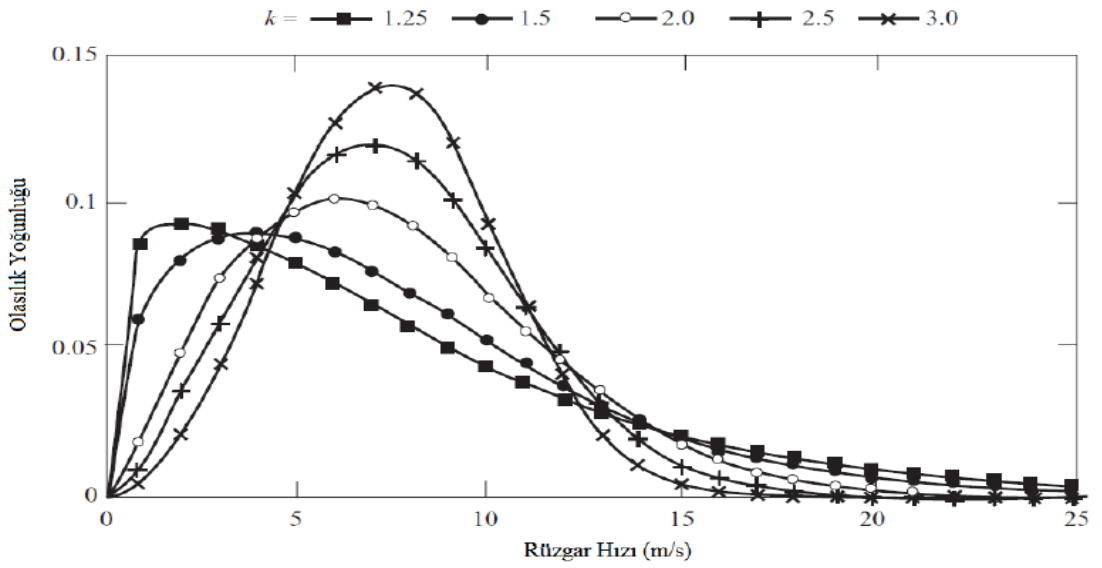
$\Gamma$  gama fonksiyonunu göstermektedir. Bu fonksiyon olasılık yoğunluğu fonksiyonundan türetilebilir:

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2.19)$$

Ortalama rüzgâr hızı aşağıdaki denklemle elde edilir:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} vf(v)dv \quad (2.20)$$

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonuna ait örnekler Şekil 2.15'te görülebilmektedir. Değişik k değerlerine göre eğri de değişmektedir; k değeri arttıkça eğri daha dik bir tepe noktasına sahip olmaktadır, bu da daha düşük rüzgar hızı değişimini belirtmektedir (Manwell ve ark., 2002; Mukund, 1999).



Şekil 2.15. Weibull olasılık dağılım fonksiyonu.

## 2.7. Rüzgâr Enerjisini Etkileyen Faktörler

Rüzgârdan elde edilen gücü etkileyen ana faktörler güç formülüne dayanmaktadır. 2.4b formülünde belirtildiği gibi ( $P= 1/2 \rho Av^3$ ) üretilen güç, havanın yoğunluğu, rotorun taradığı alan ve rüzgârın hızının küpüyle doğru orantılıdır. Aynı zamanda güç üretimini güç katsayısı ( $c_p$ ) de etkilemektedir. Rüzgâr hızı çevresel faktörlere, rotor tarama alanı ve güç katsayısı ise tasarımsal faktörlere göre değişiklik göstermektedir. Bu faktörler aşağıda incelenmiştir:

Rüzgâr Rejimi: Rüzgârdan enerji üretiminde üretilen enerji rüzgâr hızının küpüyle doğru orantılı olduğundan dikkat edilmesi gereken en önemli nokta rüzgârın hızı ve değişkenliğidir. Rüzgâr hızındaki ufak bir artış bile güç formülüne bağlı olarak katlanarak üretimde etkisini gösterir. Rüzgâr hem küresel iklimsel bölgelere göre hem de

yerel coğrafyaya göre yüksek derecede değişkenlik gösterir. Bu değişkenlik enlemlere, kara ve deniz alanlarının büyüklüğüne, topografyaya ve bitki örtüsüne bağlıdır ve dakikaya, saate, güne, mevsime ve yıla göre farklılık gösterir. Rüzgâr güneş ve mevsimlere göre şekillendiğinden, rüzgâr rejimi genellikle yıllık olarak kendini tekrar eder. Dolayısıyla bir rüzgâr türbininin ya da rüzgâr tarlasının ekonomik açıdan fizibil olup olmadığını anlamak için uzun süreli yıllık ortalama rüzgâr hızı bilgileri bilinmelidir.

Lokal Coğrafya: Rüzgâr türbini kurulması planlanan yerdeki rüzgâr profiline etki eden en önemli faktör yerel coğrafyadır. Rüzgâr hızı yerden yükseklik arttıkça, yer yüzeyinden kaynaklanan sürtünme kuvvetinden kurtulur ve artış gösterir. Rüzgâr hızının yükseklikle olan bağıntısı aşağıdaki gibidir:

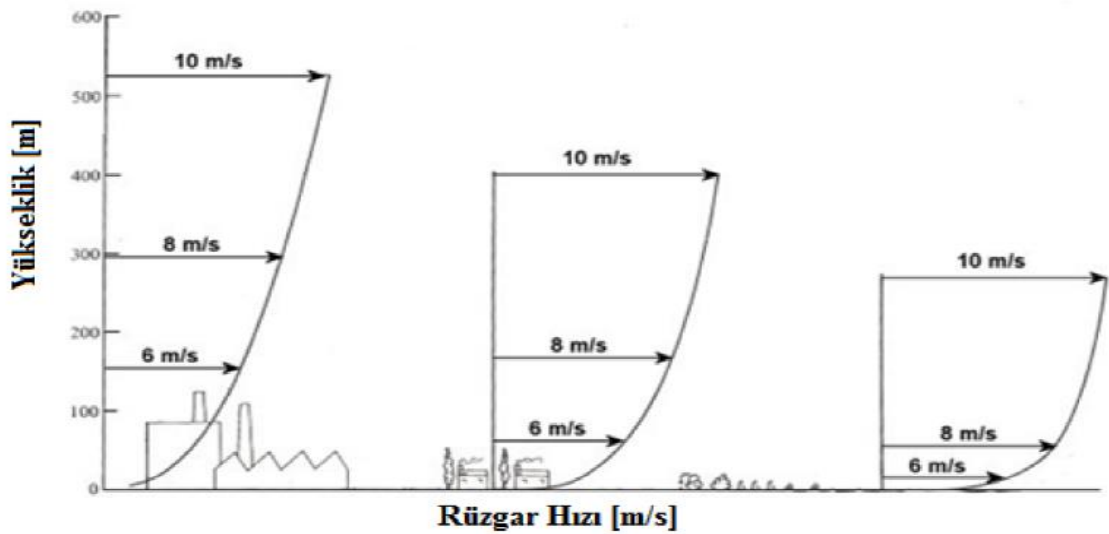
$$v_2 = v_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{z_0} \quad (2.21)$$

$v_2 = h_2$  yüksekliğindeki hesaplanan rüzgâr hızı

$v_1 = h_1$  yüksekliğindeki referans rüzgâr hızı

$z_0$  = zemine ait pürüzlülük uzunluğu

Çeşitli zemin pürüzlülüğüne ait rüzgâr hızı – yükseklik profilleri Şekil 2.16’da görülebilmektedir. Burada önemli olan, pürüzlülük uzunluğu büyük olan bölgelerde rüzgârın belirli bir hıza ulaşması çok daha yüksekte olurken, pürüzlülük uzunluğu küçük bölgelerde rüzgâr hızı daha düşük yüksekliklerde aynı değerlere ulaşmaktadır. Rüzgâr türbini yerleşimi yapılırken bu göz önünde bulundurulacak en önemli etkenlerdendir.



Şekil 2.16. Rüzgâr hızının yükseklik ile değişimi.



Diğer topografik etkiler ise tünel etkisi ve tepe etkisidir. Tünel etkisine dağlık bölgelerde ve derin vadilerde rastlanılır; iki tepe arasında ya da vadinin iki yamacının arasında sıkışan rüzgâr, yüksek basınçtan alçak basınca doğru hızlanarak ilerler. Bu durumda sıcaklık farkının da etkisi vardır. Tepe etkisinde ise hava akımı tepeyle karşılaştığında sıkışma gerçekleşir, tepenin üstüne ve ardına geçtiğinde tekrar düşük basınç alanında genişler. Basınç yüksekliğinde düşüş hız yüksekliğinde bir artışa sebebiyet verir ve dolayısıyla rüzgâr hızı artar. Her iki etkide de rüzgâr hızları artmaktadır; bu üretilen enerjiyi arttırır fakat iki durumda da hava burgacı oluşmaktadır.

Türbülans türbin üzerine ek yükler getirerek ömrünü kısaltmakta ve işletim sırasında arızalara sebep olabilmektedir. Rüzgâr profiline etki eden topografik etmenler dışındaki yerel coğrafi temel etmenler pürüzlülük ve engellerdir. Pürüzlülük bahsi geçen bölgedeki yer yüzeyinin pürüzlülüğünü belirtir ve arazinin yapısı (su yüzeyi, düz toprak, kayalık, vb.), bitki örtüsü (çalılıklar, yüksek orman, vb.), yerleşime göre farklı değerler ile gösterilir. Bu değerler genellikle “pürüzlülük uzunluğu” parametresiyle belirtilir:

$$z_0 = \frac{1}{2} (hS)/A_h \quad (2.21)$$

Burada,  $z_0$  pürüzlülük uzunluğu parametresini,  $h$  pürüzlülük elemanının yüksekliğini,  $S$  rüzgâra dik gelen yüzey alanını,  $A_h$  ise yatay iz düşüm alanını belirtir. (WaSP, 2011) Pürüzlülük, rüzgâr profilinin yatay bileşeninin Şekil 2.15’teki gibi artan yükseklikle olan bağıntısını etkileyeceği gibi, hava burgacı ve kesme kuvveti yaratarak dikey rüzgâr profilini de etkiler. Çeşitli pürüzlülük sınıfları ve bunlara ait pürüzlülük uzunlukları Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Pürüzlülük sınıfları ve uzunlukları.

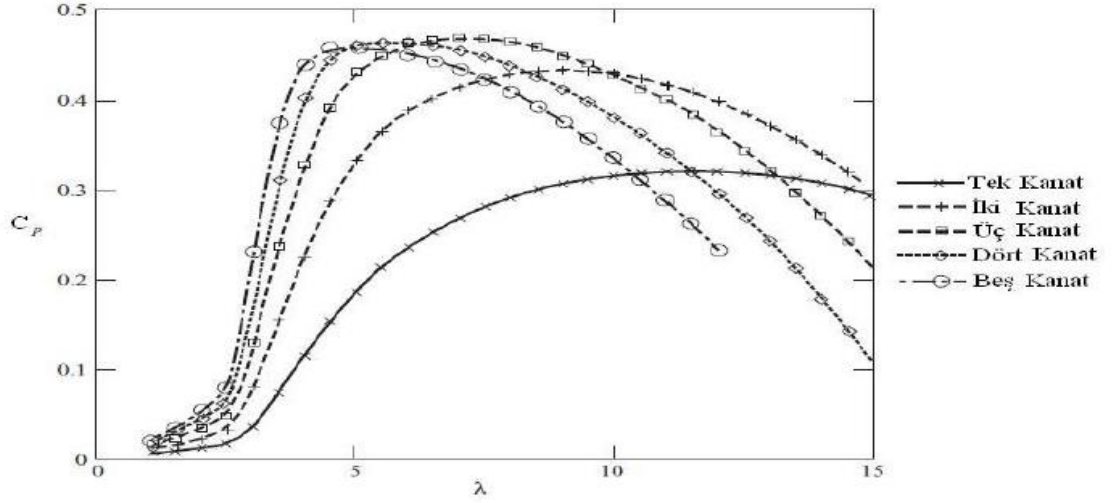
<b>Pürüzlülük Sınıfı</b>	<b>Pürüzlülük Değeri, <math>z_0</math> (m)</b>
Sınıf 0 (su yüzeyleri)	0,0002
Sınıf 1 (çok seyrek bitki örtüsüne sahip düz araziler)	0,03
Sınıf 2 (seyrek yerleşim veya ağaca sahip araziler)	0,1
Sınıf 3 (yoğun orman veya şehir yapıları)	0,4

Ağaçlar, kaya formasyonları ve binalar gibi engeller ise rüzgâr hızını azaltabileceği gibi, yönünün değişmesine ve türbülansa da yol açabilmektedir. Pürüzlülük daha geniş bir alanda rüzgâr profilini etkilerken engeller daha limitli bir alanda etki gösterirler.

Hava yoğunluğu: Rüzgârdan elde edilen güç rotordan geçen havanın yoğunluğuyla doğru orantılıdır. Havanın yoğunluğu ise gaz kanununa göre basınç ile doğru ve sıcaklık ile ters bağımlıdır. Basınç ise rakım arttıkça azalmaktadır. Dolayısıyla deniz seviyesine yakın ve sıcaklığı düşük bölgelerde enerji üretimi daha verimlidir.

Kule Yüksekliği: Önceki maddelerde de belirtildiği üzere yerden yükseklik arttıkça rüzgâr hızı belirli bir artış gösterecektir. Artan rüzgâr hızından yararlanmanın en temel yollarından biri türbin kulelerinin yüksekliğidir. Yüksek kulelerin bir diğer avantajı da çevredeki pürüzlülük ve engellerin yaratacağı istenmeyen etkilerden kaçınmaktır. Fakat artan yükseklik yanında artan maliyetleri de getirmektedir, bunun için enerji eldesiyle maliyet arasında optimum bir ilişki fizibilite çalışması ile belirlenmelidir. Kanat

Boy ve Sayısı: Teorik olarak, rotor tarama alanı arttığında, enerji üretimi de doğru orantılı olarak artacaktır, rotor tarama alanı da kanat boyunun karesiyle bağımlıdır. Fakat kanat boyunun büyük olması her zaman pozitif bir getiri sağlamamaktadır. Önemli olan rüzgâr rejimine göre teknik ve ekonomik açıdan optimumu yakalamaktır. Kanatlar uygun rüzgâr hızı ve türbülansa göre tasarlanmalıdır. Eski tip rotolarda tork gerektiren su pompalama işlemi için çok sayıda kanat kullanırken, elektrik üretiminde rotor yüksek hızlarda dönmelidir. Kanat sayısının güç katsayısıyla ilişkisi şekil 2.17'de görülebilmektedir.



Şekil 2.17. Kanat sayısı – güç katsayısı – kanat ucu hızı oranı grafiği.

Şekilde  $\lambda$  kanat ucundaki teğetsel hızın rüzgâr hızına oranını göstermektedir. Yüksek kanat ucu hızı oranına sahip rotorlarda belirli bir zaman aralığında daha fazla hava kanatlarla temas ederek dönüşüme katkı sağlayacaktır. Yüksek oran tercih sebebidir çünkü rotor şaftının daha hızlı dönmesini sağlayarak jeneratörün daha verimli çalışmasını sağlar.

Grafik incelendiğinde yüksek kanat ucu hızı oranı ve büyük güç katsayısı bileşimini iki ve üç kanatlı rotorların sağladığı görülebilmektedir. Modern türbinlerin rotorlarında çoğunlukla üç kanat, bazen de iki kanat kullanılmaktadır. Kanatlar kulenin hizasından geçerken hava burgacı oluşmaktadır ve iki kanatlı türbinlerde bu yükü dengeleyecek bir kanat kalırken üç kanatlı türbinlerde kalan iki kanat daha sorunsuz bir işletim sunmaktadır.

Türbin yerleşimi: Bölüm 2.5'te de belirtildiği üzere rotordan geçtikte sonra hava akımının basıncı, hızı ve taşıdığı enerji düşer. Aynı zamanda türbülanslı bir yapıya giren hava akımı belirli bir yol kat ettikten sonra eski haline döner. Bu duruma iz (wake) etkisi denir. Birden fazla türbinin bulunduğu rüzgâr tarlalarında arka sıralarda kalan türbinler iz etkisine maruz kaldığında hem üretilecek enerji düşecek, hem de türbülansın dolaylı ek yükler ve yorulma meydana gelecektir.

Dolayısıyla rüzgâr tarlalarında türbin yerleşimi yapılırken iz etkisini minimize etmek için türbinler arası belirli bir mesafe bırakılmalıdır. Bu mesafe zemine, hâkim rüzgâr yönüne, rüzgâr hızına ve türbin kapasitesine göre değişir. Yapılan çalışmalarda

uygun değer mesafe rüzgâra karşı yanal dizilimde 2-5 rotor çapı, dikey dizilimde 8-12 rotor çapı olarak saptanmıştır (Hau, 2006; Mukund, 1999; Ragheb, 2011).

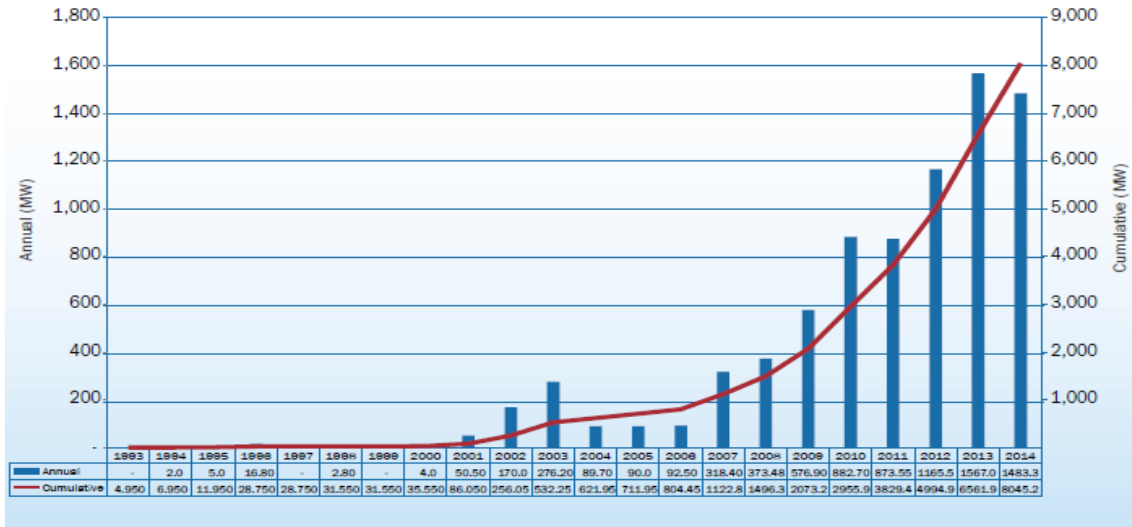


### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Off-Shore (Deniz Üstü) Rüzgâr Enerjisi

Off-Shore, kelime anlamı olarak açık deniz, kıyı ötesi manasına gelmektedir ve rüzgâr enerjisi literatüründe karanın 10km ve fazlası açığında denizde olan rüzgâr türbinleri için kullanılır. Bir diğer benzer terim olan near-shore ise kıyıya maksimum 3km uzaklıkta kara üzeri ve karaya maksimum 9km uzaklıkta deniz üzeri kurulum için kullanılır. Günümüzde en yaygın kullanılan rüzgâr türbinleri olan onshore türbinler ise kıyıya minimum 3 km uzaklıkta kara üzeri kurulumuna verilen addır. Fakat literatürde böyle geçmesine rağmen sektörde çoğunlukla yakın kıyı (near-shore) terimi kullanılmayıp, deniz ve diğer su kütlelerinde kurulan tüm türbinler Açık Deniz, karada kurulan tüm türbinler de off-shore olarak sınıflandırılmaktadır.

Son on üç yılda, rüzgâr enerjisi sektörü büyük bir hızla gelişerek elektrik üretiminde sağlam bir yer edindi. İlerleyen teknoloji ve imkânlarla, ilk başta sadece deneysel olan su yapıları üzerindeki rüzgâr türbini kavramı günümüzde 3 GW'ın üzerinde kurulu kapasiteye ulaşmıştır. Şekil 3.1'de incelendiğinde, 2000li yıllardaki test amaçlı düşük kurulum ve son yıllardaki hızlı artış dikkat çekmektedir.



Şekil 3.1. 1993-2014 Yıllık ve Toplam Açık Deniz Kurulu Kapasitesi (EWEA, 2014).

Açık Deniz rüzgâr türbinlerinin tercih edilmesinin ve hızla yayılmasının birçok nedeni vardır fakat temel etken su kütleleri üzerinde rüzgârdan elde edilecek enerjinin çok daha fazla olması ve bu potansiyelden yararlanılabilecek alanların enerji ihtiyacını fazlasıyla karşılayacak kadar geniş olmasıdır. Açık Deniz rüzgâr enerjisini etkileyen birçok faktör vardır; bunlar sahaya göre avantaj veya dezavantaj sağlayabilmektedir ve tamamı alt bölümlerde detaylıca ele alınmıştır.

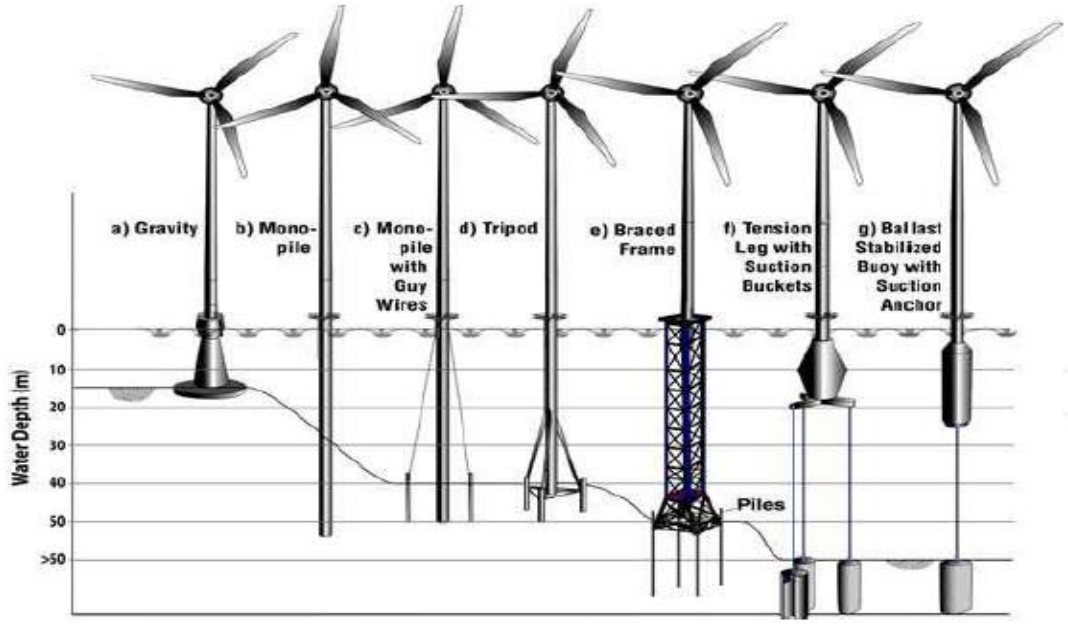
### **3.1.1 Açık deniz rüzgâr enerjisi temel faktörleri**

#### **3.1.1.1 Rüzgâr profili, enerji üretimi ve kapasite faktörü**

Denizdeki rüzgârlar karadakilere göre genellikle daha yüksek hızlı ve daha az değişkendir. Bunun sonucunda, türbinler zamanın daha geniş bir kısmında maksimum kapasitelerinde çalışırlar ve rüzgâr hızının az değişken yapıda olması türbinin daha az yorulmasına ve elektrik şebekesine daha sabit bir güç iletimine yol açar. Rüzgâr hızındaki artış Açık Deniz türbinlerinde elektrik üretimde %150'lik bir artışa ve rüzgar tarlasının kapasite faktöründe %25'ten %40'a bir yükselişe yol açar (Dhanju, 2010).

#### **3.1.1.2 Su derinliği, zemin yapısı ve temeller**

Güncel teknolojiler belirli bir derinliğe kadar türbin kurulumuna izin vermektedir. Derinlik arttıkça temel için gerekli malzeme ve iş gücü de artacağından maliyet yükselmektedir. Günümüzde 50 metreye kadar Açık Deniz türbin kurulumu yapılmaktadır.(Yüzen türbinler 1000 metreye kadar)



Şekil 3.2. Açık Deniz Türbin Temelleri (Malhotra, 2010).

Açık Deniz rüzgâr türbinlerini karaya kurulan (onshore) türbinlerden ayıran en temel bileşenleri temel yapılarıdır. Onshore türbinlerde çelik destekli beton dolgu inşaat temelleri kullanılırken Açık Deniz türbinlerde kullanılan temeller su derinliği ve zemin yapısına göre farklılık göstermektedir. Açık Deniz rüzgâr türbinlerinde kullanılan temel tipleri Şekil 3.2’de görülebilmektedir. Burada a) ağırlık, b) tek kazık, c) üç ayak, d) jacket, e) yüzer tip temeli göstermektedir (Markard ve ark., 2009).

30 m ve daha sığ sularda iki tip temel yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar ağırlık temeli ve tek kazık (monopile) temelidir. Ağırlık temeli adından da anlaşılacağı üzere kendi ağırlığını kullanarak türbini sabitleyen temel tipidir. Derinliğe, türbin büyüklüğüne ve ortam koşullarından kaynaklanan yüklerle göre ağırlığı 500 ila 1400 ton arasında değişmektedir ve betonarmeden yapılmaktadır. Ağırlık temelleri daha çok sığ sularda ve diğer temel tiplerini yerleştirmek için delme veya çakma yapılamayacak kaya tipi sert zeminlerde tercih edilmektedir. 15 m üstü derinliklerde maliyetleri aşırı artmaktadır ve fizibil olamamaktadırlar (ODE, 2007; Malhotra, 2010).

Tek kazık temeli tüm Açık Deniz kurulumlarında en yaygın olarak kullanılan temel tipidir ve 3-6 m çapında, yaklaşık 150mm et kalınlığında tek bir borudan oluşmaktadır. Deniz zeminine koşullara göre 10 ila 30m özel şahmerdanlarla

çakılmaktadır ya da önceden delinmiş deliklere sabitlenmektedir. Tek kazık temeller ağırlık olarak 175-1000 ton arasında değişmektedir. Bu kadar geniş bir aralığa sahip olmasının nedeni en sığ suların 30m derinliğe kadar hem yumuşak hem de sert toprak tiplerinde kullanılabilmesi olmasıdır. (EON, 2010; Malhotra, 2010)

Sığ sularda kullanıma uygun bir diğer temel tipi de vakumlu kesondur. Açık Deniz rüzgar türbinleri için daha deneme aşamasında olan bu temel tipi, tek yüzü açık bir çelik kasaya benzemektedir. Açık uç zemine denk gelecek şekilde batırılıp yerleştirildikten sonra içindeki su boşaltılır ve basınç farkı sayesinde emniyetli bir şekilde sabitlenmiş olur. İçindeki su boşaltıldıkça zemine daha çok gömüleceğinden yumuşak tip toprakta kullanılması gerekmektedir. Avantajları basit kurulum ve söküdür (Malhotra, 2010; ODE, 2007).

Daha derin sularda kullanılan temeller jacket, üç ayak (tripod) ve deneysel aşamadaki yüzer temel tipleridir. Jacket ve üç ayak esasen çoklu tek kazık yapısında temellerdir ve tek kazığın kullanılmadığı derinliklerde tercih edilmektedir. Üç ayak tasarımında tek bir boru üç farklı boruya bağlanarak piramitsi bir yapı oluşturmaktadır. Her ayak zemine çakılmaktadır. Ağırlığı türbin yüküne ve derinliğe göre 125-700 ton arasında değişmektedir. Güncel olarak 45 metre derinliğinde kullanılmaktadır ve 60 metre derinliğe kadar kullanılabilir olduğu bilinmektedir. Jacket temel tipi 40 metre üzeri derinliklerde kullanılan, koşullara göre 200 ila 500 ton arasında ağırlığı olan bir temeldir. Üretimi diğer temel tiplerine göre daha komplekstir, birçok çelik boru birbirine kaynak yapılmalıdır. Deniz zeminine dört ayak temas etmektedir ve her ayak çakılmalıdır. Yüzer temeller deneme aşamasındadır fakat gelecek için ümit vaat etmektedirler. Bu temeller Açık Deniz petrol ve gaz platformlarında kullanılmaktadır ve rüzgar sektöründe de kendini kanıtlarsa derinlik kısıtlamaları ortadan kalkacak, çok daha fazla enerji üretimine olanak sağlayacaktır. An itibariyle Norveç'in 12 km güneydoğusunda 220m su derinliğinde 2,3 MW gücünde Siemens türbini deneme amaçlı Hywind projesinde elektrik üretimine devam etmektedir (EON, 2010; SWEP, 2009).



### **3.1.1.3 Kurulum, yerleşim ve konum Geniş Kurulum Alanı**

Açık Deniz rüzgar türbinlerinin kurulumu için uygun çok geniş alanlar mevcuttur. Karadaki yolların sınırlamasının aksine, nakliye ve kurulum denizde yapıldığından türbinler için neredeyse boyut sınırlaması yoktur. Açık Deniz petrol ve doğal gaz endüstrisi için geliştirilmiş deniz vinçleri karadakilere kıyasla daha büyük parçaların taşınarak daha büyük türbinlerin kurulmasına izin vermektedir. Aynı zamanda büyük parçaların denizde nakliyesi çok daha kolaydır.

#### **Yerleşimi Etkileyen Faktörler**

Her ne kadar Açık Deniz türbin yerleşim alanları çok geniş de olsa, derinliğin dışında da bazı faktörler kurulum yapılabilecek alanları limitlemektedir. Bunlar; deniz taşıtları rotaları ve demirleme alanları, askeri bölgeler, canlı yaşam ve göç bölgeleri, mayın, kimyasal atık ve kum çıkarımı gibi diğer bölgeler. Ayrıca turistik bölgeler ve toplum tarafından kurulum için karşı çıkılan bölgeler de sayılabilmektedir. Projelendirme yapılırken kurulum yapılacak alanlar bu bölgeleri kapsamayacak şekilde düzenlenmelidir. Genellikle bir tarladaki türbinler 500-1000 metre aralıkla yerleştirilir ve kanatların en alçak noktası su seviyesinden en az 20 metre yukarıda olur. Dolayısıyla deniz taşıtları bir rüzgar tarlasından sorun olmadan geçebilir. Tek problem demirlemedir, çapaların su altı kablolarına takılma veya kablo üstündeki zemini deforme etme riski bulunmaktadır (Cockerilla ve ark., 2001; Dua ve ark., 2007).

#### **Kıyıya Uzaklık ve Konum**

Kıyıya uzaklık kurulum, işletim ve bakım maliyetlerini arttırmaktadır. Kurulum sırasında gemiler kıyı ve kurulum alanı arasında bir çok sefer yapmak zorundadırlar ve kıyıya uzaklık artıkça gerekli süre ve dolayısıyla maliyet de artar. Dahası, kıyıya uzaklık döşenmesi gereken iletim hattını ve maliyetini de doğru oranda etkilemektedir. İşletim sırasında bakım ekibi temelleri ve türbinleri kontrol etmek amacıyla rüzgar tarlasına düzenli ziyaretlerde bulunmalıdır.

Onshore rüzgar tarlaları genellikle enerji ihtiyacının fazla olduğu büyük yerleşim ve sanayi merkezlerine yakın olmamaktadır. Bunda yerleşim yapılarının pürüzlülük etkisi, türbin yerleşimi için gerekli boş alan ve yüksek hızdaki rüzgarlara kırsal kesimde

daha sık rastlanmasının etkisi vardır. İnsanlar binlerce yıldır medeniyetlerini su kaynaklarına göre ayarlamış, besin temini, ulaşım ve nakliye için buraları tercih etmiştir. Açık Deniz rüzgar tarlaları da büyük yerleşim merkezilerine yakın olarak kurulabilmektedir. Bu sayede maliyeti yüksek iletim hatları ve kabloların kullanımı azalmaktadır (Gaudiosi, 1999).

### **Deniz Koşulları, Kurulum ve Bakım**

Açık Deniz rüzgar türbinleri başta denizler olmak üzere su kütlelerine kurulmaktadır. Bu ortamlar hem suyun kendi yapısından hem de su içinde çözünmüş maddelerden (özellikle tuzdan) dolayı aşırı derecede korozyiftir. Dolayısıyla Açık Deniz rüzgar türbinlerinin korozyif ortama dayanıklı olacak şekilde tasarlanması ve gerekli önlemlerin alınması gereklidir. Bu nedenle katodik koruma ve nem koruması için nacelle'e özel bir iklimlendirme sistemi konulması şarttır. Aynı zamanda temeller dalga ve akıntılara karşı tasarlanmalı ve soğuk iklimlerde buzlanma göz ardı edilmemelidir.

Açık Deniz ortam personelin kara ve türbinler arası gidip gelmesini gerektirir, bu da ekipman, zaman ve artan riskle birlikte sigorta maliyetlerini artırır. Açık Deniz da çalışmak bakım ve kurulum zamanını etkileyen fırtınaları da beraberinde getirir, bu da sonuç olarak yatırım ve işletim maliyetlerini artırır. Orta boyutta dalgalar (2 metre üzeri) kurulumu geciktirebilir ve bakım ekiplerinin türbinlere ulaşımını aksatabilir. Bütün bunlar türbinin emre amadelikliğini negatif olarak etkilemektedir. Emre amadelikle başa çıkanın bir yolu ise türbin bileşenlerinin güvenilirliğinin yüksek olarak imal edilmesidir. Bu sayede bakım ve tamirat için türbinlere ulaşım ihtiyacı azalacaktır. Elbette güvenilirliği yüksek ürün üretmek için belirli bir ar-ge çalışması, Ar-Ge çalışması için de zaman ve yatırım gereklidir (Dhanju ve ark., 2007; Dua ve ark., 2007).

Açık Deniz rüzgar projelerinin yatırım harcamalarından biri de kurulum ve bakım için kullanılan şileplerin fiyatlarına bağlıdır ve günlük kiralar değişkendir. Açık Deniz rüzgar tarlalarının hızla artması ilerleyen yıllarda şilep sıkıntısına yol açabilir. Bakım masraflarını Açık Denizde uygulamak onshore'a göre başlıca yüksek vinç şilep fiyatları ve kötü havalardaki bekleme süreleri nedeniyle 5-10 kat daha pahalıdır (Cockerilla ve ark., 2001; Gaudiosi, 1999).

#### **3.1.1.4 Çevre ve canlılara olan etki**

Açık Deniz rüzgar türbinlerini deniz kuşlarının yuvalarının yakınına kurmak ekolojik olarak tehlikelidir. Proje sahiplerinin hem etik olarak hem de ileride yaşanacak izin problemleriyle karşılaşmamak için bu bölgeleri yerleşim dışı bırakmaları önemlidir. Açık Deniz türbinlerin kuş ölüm oranları onshore türbinlerle aynı, belki daha düşüktür (türbin başına 0,01-23, MW başına 0,95-11,67 ölüm). Göçen kuşlar besin ihtiyacı için kara üzerinden göç etmektedir ve Açık Deniz türbinler genellikle sadece deniz kuşları ile karşılaşmaktadır. Elbette bu sahaya göre değişmektedir (Snyder, 2009).

Birçok deniz memelisi akustik sinyaller kullanarak iletişim kurmaktadır ve dolayısıyla yüksek seslerle zarar görebilecek işitme duyularına sahiptirler. Açık Deniz rüzgar türbinlerinin temel kurulumunda genellikle şahmerdanların çakma sesi ya da özel matkapların delme sesi deniz memelilerinde işitme kaybına sebebiyet verebilmektedir ve bu ses kaynağından 1,8 km uzağa kadar etki edebilmektedir. Benzer bir durum balıklar için de geçerlidir, kurulum esnasında geçici olarak bölgeyi terk edebildikleri gibi ölümlere de rastlanabilmektedir. Türbinler çalışırken çıkardıkları ses ise ses kaynağından 1km uzaklığa kadar fark edilebilmektedir. Diğer bir etki ise su altına döşenen yüksek gerilim kablolarının oluşturduğu manyetik ve elektrik alanlarıdır. Avlanmak ve yön bulmak için bu alanları algılayan bazı deniz canlıları olumsuz olarak etkilenebilmektedir (Snyder, 2009; Dhanju ve ark., 2007).

Sonuç olarak çakılarak kurulumu yapılan temel tipleri yakın çevredeki balık ve deniz memelilerini olumsuz olarak etkilemektedir. Buna bir çözüm ağırlık temeli veya vakumlu keson gibi sessiz kurulumlu temel tipleri kullanmaktır. Bu temel tiplerinin 3 boyutlu yapıları sayesinde diğer temel tiplerinin aksine balık ve diğer organizmalara yuva görevi yaptığı Açık Deniz petrol ve gaz endüstrisinden de bilinmektedir. Diğer radikal bir çözüm ise su altına hava pompalayarak ses dalgalarını sönmüleyen hava kabarcıklarından bir perde oluşturmaktır (Snyder, 2009; Malhotra, 2010).

#### **3.1.1.5 Görsellik, ses ve tasarım**

Açık Deniz rüzgar endüstrisinde türbinlerin işletim sırasında çıkardığı ses ve görsel estetiği onshore rüzgar endüstrisindeki gibi önemli değildir. Bu da Açık Deniz türbinlerin tasarımında daha kaba fakat efektif tasarımlara gitmek için bir kapı oluşturur. İnsanlardan uzakta ses rahatsızlık vermeyeceği için tasarımda daha sesli çalışan rüzgar altı rotorlar

kullanılabilir. Bu tip rotorlar rüzgarda daha stabildir ve daha kolay bir rota sistemi kullanmayı mümkün kılar. Rüzgar üstü rotorlarda yüksek rüzgar hızlarında kanatlar esneyerek kuleye çarpmasın diye sert yapıda olmalıdırlar ve bu da hem ağırlığı hem de maliyeti arttırmaktadır. Rüzgar altı türbinlerde kanatlar kulenin gerisinde olduğundan kuleye çarpma riski yoktur ve daha ucuz esnek malzemeden üretilebilirler. Kanat ucu hızı oranı yüksek ve daha esnek tasarımlar kullanılarak kanatların üzerindeki yükler azaltılabilir, aynı mekanik yük daha verimli bir şekilde elde edilebilir. Görseelliğin daha az önem taşıması ile estetiği düşük fakat Açık Deniz koşullara uygun kaba tasarımlar uygulanabilir. Karada kullanılan estetik tubular kuleler yerine daha az malzeme gerektiren dolayısıyla daha hafif ve daha ucuz olan kafes tip kuleler kullanılabilir (Breton, 2009; Markard ve ark., 2009).

### **3.1.2 Açık deniz rüzgar enerjisi güncel durumu**

Bu bölümde Açık Deniz rüzgar enerjisinin dünyadaki güncel durumu ve uygulamadaki teknolojiler ele alınır. Bölüm 3.1.1’de belirtilen faktörler ışığında, yüksek rüzgar hızları ve aşırı geniş yerleşim yapılabilecek alan ile Açık Deniz rüzgar enerjisinin inanılmaz bir potansiyeli olduğu göze çarpmaktadır. Sadece Avrupa kıyılarındaki Açık Deniz rüzgar enerjisi potansiyeli Avrupa’nın elektrik ihtiyacının 7 katını karşılamaktadır. Çizelge 3.1 incelendiğinde 2008 sonu – 2011 Temmuz aralığına ait global Açık Deniz rüzgar enerjisi kurulu kapasiteleri görülebilir. Açık Deniz rüzgar enerjisini Dünyada 13 ülke kullanmaktadır, bunların 10’u Avrupa’dadır, diğer üçü ise Güney Kore, Çin ve Japonya’dır. Çizelgede ülkeler güncel kurulu kapasitelerine göre büyükten küçüğe sıralanmıştır. Listede başı çeken İngiltere ve Danimarka’nın 2008 ve 2009’da toplam kapasiteleri birbirine yakınken İngiltere 2010’da neredeyse %100 lük bir büyüme oranı göstererek açık ara farkla Açık Deniz rüzgar enerjisine en fazla yatırımı yapan ülke konumuna gelmiştir. Bazı ülkelerin kurulu gücünde hiç veya çok az büyüme gözükürken bazılarında ise yüksek oranlarda büyüme gerçekleşmiştir. Toplam global Açık Deniz rüzgar enerjisi kurulu kapasitesi 2011 Temmuz itibari ile 3595,2 MW’a ulaşmıştır. Avrupa’da toplam 2844 MW gücünde 11 rüzgar tarlasının kurulumu devam etmektedir. Bunların dışında onaylanmış ve kuruluma başlanacak toplam 19,000 MW’lık proje bulunmaktadır (WWEA,2011; EWEA, 2011; Url-8).

Çizelge 3.1 : Açık deniz rüzgar enerjisinin toplam kurulu kapasitesi (WWEA,2011; Url-8).

		<b>2011*</b> <b>Toplam</b> <b>Kapasite</b>	<b>2011*</b> <b>Büyüme</b>	<b>2010</b> <b>Toplam</b> <b>Kapasite</b>	<b>2010</b> <b>Büyüme</b> <b>Oranı</b>	<b>2009</b> <b>Toplam</b> <b>Kapasite</b>	<b>2009</b> <b>Büyüme</b> <b>Oranı</b>	<b>2008</b> <b>Toplam</b> <b>Kapasite</b>
1	İngiltere	1585,8	18,3	1341	94,9	688	19,9	574
2	Danimark	867,8	1,6	854	28,7	663,6	55,6	426,6
3	İsveç	253,4	54,5	164	0,0	164	22,4	134
4	Hollanda	249	0,0	249	0,8	247	0,0	247
5	Almanya	211,6	95,4	108,3	50,4	72	500,0	12
6	Belçika	195	0,0	195	550,0	30	0,0	30
7	Çin	130	5,7	123	434,8	23	1050,0	2
8	Finlandiy	32,3	7,7	30	0,0	30	0,0	30
9	Japonya	31	93,8	16	1500,0	1	0,0	1
10	İrlanda	25	0,0	25	0,0	25	0,0	25
11	İspanya	10	0,0	10	0,0	10	0,0	10
12	Norveç	2,3	0,0	2,3	0,0	2,3	230,0	0
13	Güney	2	0,0	0	0,0	0	0,0	0
	<b>Toplam</b>	<b>3595,2</b>	<b>15,3</b>	<b>3117,6</b>	<b>59,4</b>	<b>1955,9</b>	<b>31,1</b>	<b>1491,6</b>

Açık Deniz rüzgar enerjisinin toplam rüzgar enerjisine oranı 2009 için %1,2 iken, 2010'da %1,6'ya çıkmıştır. Bu oran düşüktür fakat son 3 yılın kapasite büyüme oranları incelendiğinde, 2009 büyüme oranı %31,1, 2010 büyüme oranı %59,4, 2011 ilk çeyreği büyüme oranı ise %15,3'tür. Bu değerler onshore rüzgar enerjisi büyüme oranlarının çok üstündedir; bu da Açık Deniz rüzgar enerjisinin ne kadar hızlı bir şekilde gelişip yaygınlaştığını göstermektedir. Açık Deniz projelerinin büyüklüğü göz önünde bulundurulduğunda yakın gelecekte onshore ile rekabet halinde olup daha ileride ise geride bırakması kaçınılmazdır (WWEA,2014; EWEA, 2014).

Güncel teknolojiler ve uygulamalar ele alındığında istatistiksel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Ortalama rüzgar tarla kurulu gücü 2009'da 72,1MW iken 2010 sonunda 155,3 MW olmuştur.
- 2011 yılının ilk yarısı itibarı ile ortalama türbin gücü 3,4 MW'tır.
- Son iki yılda 33 üretici 44 yeni Açık Deniz kullanıma özel türbin modeli geliştirip piyasaya sürmüştür. Ar-Ge çalışmaları sayesinde 7,5 MW gücünde Açık Deniz türbin üretilmiş, 10 MW gücünde türbin çalışmaları ise devam etmektedir.
- 2010 sonu itibarıyla türbinlerin kurulduğu ortalama su derinliği 17,4 m olarak saptanmıştır. Bu değer 2009 sonu ortalamasından 5,2m daha derindir. Ayrıca kurulumu devam eden projelerin ortalama su derinliği 25,5 m olarak saptanmıştır.
- Günümüzde kullanılan temellerin % 65'i tek kazık, %25'i ağırlık ve %8'i jacket tiptir.
- 2010 sonu itibarıyla toplam kurulu Açık Deniz rüzgar türbinlerinin kıyıya olan ortalama uzaklığı 27,1km'dir. Bu değer bir önceki seneye kıyasla 12,7km artmıştır. Kurulumu devam eden projelerin ortalama uzaklığı ise 35,7km'dir (WWEA, 2014; EWEA, 2014).

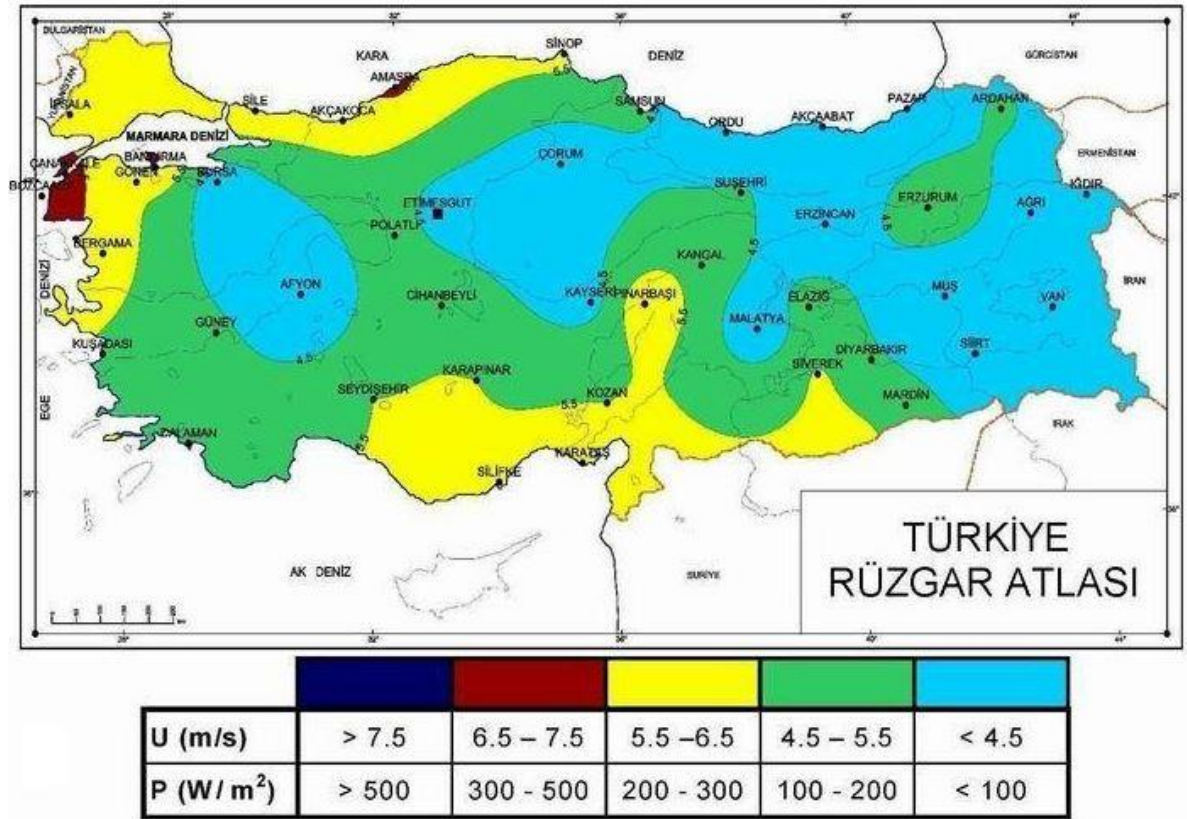
Günümüzde birçok Açık Deniz projesinde 5MW ve civarında büyük türbinler kurulmaktadır. Derinlikler, kıyıya uzaklık ve proje toplam kapasiteleri artmaktadır. Tüm bunlar beraberinde yüksek maliyetleri getirmektedir. Yüksek maliyetlerine rağmen genel çerçeveye bakıldığında Açık Deniz projeleri aksamadan finanse edilebilmekte ve hayata geçirilen proje sayısı hızla artmaktadır. Ayrıca Açık Deniz rüzgar tarlalarının çoğunun bulunduğu Kuzey Denizi çevresindeki ülkelerin rüzgar ve diğer yenilenebilir

enerji kaynaklarının bağlanacağı bir entegre süper şebeke kurulması için önemli adımlar atılmıştır ve çalışmalar devam etmektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda Açık Deniz rüzgar enerjisinin potansiyeli yüksek bir geleceğe sahip olduğu açıkça görülmektedir.

### 3.1. Off-Shore Rüzgâr Enerjisi Fizibilite Adımları

#### 3.2.1 Rüzgar atlasına göre bölge seçimi

Herhangi bir rüzgâr enerjisi projesinde olduğu gibi Açık Deniz rüzgar enerjisi projelerinde de öncelikle çeşitli kurumların ülke veya belirli bölgeler genelinde oluşturduğu rüzgar atlasları ele alınmalıdır. Bu atlasların güvenilirliği oluşturulurken kullanılan veri ve enstrümantasyona göre değişmektedir.



Şekil 3.3 : DMİ Türkiye Rüzgar Atlası (DMİ, 2015).

DMİ'nin 2002 yılında oluşturduğu atlas ülke genelinde bulunan DMİ istasyonlarına ait saatlik veriler ile hazırlanmıştır (Şekil 3.3). Fakat DMİ istasyonları ölçüm aletleri yerden 10 metre yükseklikte bulunmaktadır ve veri sürekliliği sorgulanır. Dolayısıyla her iki atlas da sadece ilk fikir edinme ve daha ileri çalışmanın yürütüleceği bölgeyi ya da aday bölgeleri seçmek için kullanılmalıdır. Atlaslardaki renk skalalarına göre sarıdan kırmızıya doğru olan renkler yüksek hızları göstermektedir. Potansiyeli yüksek bölgelerden ilk göze çapanlar Ege Denizi ve Çanakkale civarındır. Diğer önemli bölgeler Ege kıyıları, Hatay ve Manisa açıklarıdır.

### 3.2.2 Rüzgâr ve coğrafya verilerinin temini

İdeal rüzgâr veri sıklığı çevre meteoroloji istasyonlarına ait 10 yıllık saat başı verilerden ve seçilen bölgeye kurulan minimum 30 metre yüksekliğinde bir ölçüm direğine ait en az bir yıllık saat başı verilerden oluşmalıdır. Bu rüzgâr verileri rüzgar hızını, rüzgar yönünü, mümkünse sıcaklığı ve nemi de içermelidir. Ölçüm direği ideal olarak analizi yapılmak istenen bölgede denize kurulmalıdır. Ölçüm direği dışında dışarıdan temin elde edilecek veriler için ölçüm noktası denize ne kadar yakınsa ve ölçüm yüksekliği ne kadar yüksekse analiz o kadar isabetli olur. Bu veriler DMİ'den, EİE'den ve bölgedeki RES'leri işleten firmalardan talep edilebilir.

Diğer temin edilmesi gereken veri tipi ise coğrafi verilerdir. Rüzgâr verilerinin istenilen yüksekliğe ekstrapolasyonu ve yerleşim analizi yapılacak rüzgar atlasını oluşturulması için bölgenin topografik haritası ve pürüzlülük bilgileri elde edilmelidir. Pürüzlülük ve yükselti bilgileri denklem 2.21'de kullanılarak rüzgar hızı taşınabileceği gibi bu geniş ve kompleks yapıdaki alanlarda sağlıklı bir yöntem değildir. İdeal yöntem hazırlanmış rüzgar verileri ile sayısal bir haritayı uygun programlarda birleştirip bölgenin rüzgar atlasını elde etmektir. Bunun içinde topografik harita ve pürüzlülük değerleri dijitalleştirilerek sayısal bir harita elde edilmelidir. Harita dijitalleştirme özel tabletler veya fare ile topografik harita üzerinden izdüşümlenerek hazırlanabileceği gibi dijital uydu verilerini uygun formatlara dönüştürerek de yapılabilir.



### 3.2.3 Rüzgâr analizi ve rüzgâr atlası oluşturma

Rüzgâr analizi için toplanan rüzgâr verileri derlenmeli ve aday bölgenin RES kurulumu için uygun olup olmadığı kontrol edilmelidir. Bölge uygunsa eldeki verilerle bölgenin rotor yüksekliğine ait rüzgâr atlası oluşturulur. Ölçüm direği düşünülen rotor yüksekliğinde değilse ve hali hazırda çalışmakta olan RES işletmelerden temin edilmediği sürece toplanan ölçülmüş rüzgâr verilerinin yükseklik ekstrapolasyonunun yapılması gereklidir. Bu işlem formülasyonlarla yapılabilmektedir fakat hem çok uzun sürebilmekte hem de hatalar oluşabilmektedir. Dolayısıyla ideal yöntem rüzgâr enerjisi analizi için oluşturulmuş paket programlar kullanmaktır. Bu programlara rüzgar verileri ve sayısal haritalar girdi olarak işlenmekte ve program dahilindeki modüller ile istenilen yüksekliğe ait rüzgar atlası elde edilebilmektedir. Bu programlarda toplanan rüzgar verileri uygun formatta girildiğinde bölgeye ait hakim rüzgar yönü, ortalama rüzgar hızı, Weibull dağılımı detaylı olarak oluşturulmaktadır. Kimi programların yazılımları sayesinde topografik haritalar sayısallaştırılabildiği gibi, farklı yollarla oluşturulmuş veya temin edilmiş sayısal haritalar da programa aktarılabilmektedir.

Rüzgâr atlası oluşturmada önce sayısal harita üzerinde pürüzlülük değerleri işlenir. Pürüzlülük değerleri kimi ülkelerde sayısal harita olarak temin edilebilmektedir fakat ne yazık ki ülkemizde uydu görüntüleri veya saha ziyaretleri sonucu oluşturulan bilgiler manüel olarak işlenmelidir. Tüm girdiler aktarıldıktan sonra programlar geri kalan işlemi kendileri yapmaktadır. Bahsi geçen özel programlara örnek olarak WaSP, WindPRO ve WindFarmer yaygın kullanılmakla birlikte WaSP hem diğer programların modülünde bulunarak hem de en çok tercih edilen program olarak öne çıkmaktadır.

### 3.2.4 Harici ve dahili alanların belirlenmesi

Rüzgâr atlası oluşturulduktan sonra türbin yerleşimi için uygun bölgeler rahatlıkla belirlenebilmektedir. Fakat denizde yerleşim yapılmadan önce dikkat edilmesi gereken ve değerlendirme dışı bırakılması gereken bazı unsurlar vardır. Bu unsurlara ait bilgiler ve veriler rüzgâr atlası üzerinde işlenerek yerleşim için uygun alanlar sınırlandırılmalıdır.

#### **3.2.4.1 Batimetri haritası**

Güncel teknolojiler RES'lerin Açık Deniz kurulumunu belirli bir su derinliğine kadar uygulanabilir kılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan temeller tipleri 30 metreye kadar uygulanabilmekte, 30 metreden sonra ise daha maliyetli ve özel temel tipleri tercih edilmektedir. İşletmede olan Açık Deniz RES'lerdeki en derin uygulama 45 metrededir. Derin sularda uygulanan temellerin 60 metreye kadar uygulanabilir olduğu belirtilmektedir ve ayrıca 220 metre derinliğinde yüzer tip temel denenmekte ve enerji üretmektedir. Yine de ekonomik olarak bir fizibilite çalışması için uygulanabilir derinlik 45 metre ile sınırlandırılmalıdır.

Rüzgâr atlasında sınırlama yapabilmek için bölgenin batimetri haritası temin edilmelidir. Çeşitli ülkelerde sayısal batimetri haritaları devlet kurumlarından temin edilebilirken Türkiye'de basılmış olarak ya da raster formatında resim dosyası olarak temin edilebilmektedir. Sayısal batimetri haritasının avantajı rüzgâr atlası üzerine Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS) programlarıyla kopyalanarak yerleşim analizini basite indirgemesidir. Türk sularına ait batimetri haritaları Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'ndan temin edilebilmektedir.

#### **3.2.4.2 Askeri ve milli sınırlar**

Uluslararası kanunlara göre denize kıyısı olan kara parçalarının 6 deniz mili karasu sınırı bulunmaktadır. Türkiye ve rüzgâr hızı yüksek Açık Deniz alanlar ele alındığında, 6 millik karasuyu sınırı Akdeniz ve Karadeniz'de sorun oluşturmamaktadır. Fizibilite çalışmasında türbin yerleşimi yapılırken bu milli sınırlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'ndan temin edilen batimetri haritaları incelendiğinde belirli alanların askeri tatbikat ve top atış sahası olarak belirlendiği ve bu alanlara girişin yasak olduğu görülebilir. Türbin yerleşim analizinde bu alanlar da kapsam dışı bırakılmalıdır. Ayrıca RES'lerin radyo sinyallerini etkileyebildiği bilinmektedir, bu konuyla ilgili askeriyeyle temas kurulmalı ve RES kurulması planlanan bölgenin sinyaller üzerinde bir etkisi soruşturulmalıdır.

### **3.2.4.3 Deniz ulaşım hatları**

Türkiye üç tarafı denizlerle kaplı bir coğrafyada bulunmaktadır. Etrafı ve bünyesinde birçok yarımada ve ada vardır. Bu adalara ve yarımadalara, diğer denize kıyısı olan ülkelere ve Türkiye içinde birçok bölgeye deniz yolu ile ulaşım sağlanmaktadır. Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'ndan temin edilen batimetri haritalarında deniz ulaşım yolları ve gemi demirleme sahaları belirtilmiştir. Bu ulaşım yolları ticari, özel ve kamu araçları tarafından kullanılmaktadır ve bu yollar Başbakanlık Denizcilik Müsteşarlığı, Ulaştırma Bakanlığı Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü, Deniz Ticareti Genel Müdürlüğü ve Sahil Güvenlik Komutanlığı'nca düzenlenmekte ve kontrol edilmektedir. Dolayısıyla bu kurumlarla temasa geçilip Açık Deniz RES'in kurulması planlanan bölge için teyit alınmalıdır.

### **3.2.4.4 Canlı yaşam – göç alanları**

Açık Deniz RES'lerin kurulumunda temel hazırlama işlemleri sırasında yüksek desibellerde su altında ses yayılmaktadır. Bu ses bazı deniz memelilerinde işitme kaybına ve davranış değişikliğine sebebiyet vermektedir. Ayrıca RES'in işletimi sırasında ve kabloların etrafında elektromanyetik dalgalar oluşmaktadır. Bu dalgalar bazı balık cinslerinin yön bulma yetilerini etkilemektedir. Açık Deniz RES kurulacak bölge, bu gibi işletim ve kurulum sırasında zarara maruz kalabilecek canlı cinslerinin yaşam ve göç alanlarına göre incelenmelidir ve bu alanların bölge içinde kalan kısmı elenmelidir. Aynı durum deniz kenarında yuvası olan ve göç alanları deniz üzerinden geçen kuş türleri için de geçerlidir. Bu kuş türleri belirlenip planlanan kurulum alanı ile kesişen alanlar ileriki incelemeler için kapsam dışı bırakılmalıdır. Bu konularla ilgili Avrupa ülkelerini kapsayan, canlı yaşam ve göç alanlarını gösteren Natura 2000 programı maalesef ülkemizi kapsamamaktadır. Türkiye'ye ait hali hazırda detaylı bir kuş göç haritası bulunmamaktadır fakat hem kuşlar hem de deniz canlıları için Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı'ndan ve WWF Türkiye, Doğa Derneği, Kuş Araştırmaları Derneği gibi sivil toplum kuruluşlarından bilgi edinilebilir.

### **3.2.4.5 Kum çıkarım, mayın ve diğer alanlar**

Denizde belirli alanlardan plaj rehabilitasyonu ve diğer amaçlar için kum çıkarılmaktadır. Bu bölgelere ve yakınına RES kurulumu temel yapısının stabilitesini tehlikeye atacağından güvenli değildir. Ayrıca bazı bölgelerde savaş zamanından kalma mayınlar bulunabilmektedir. Bu mayınlar Sahil Güvenlik Komutanlığı'ndan öğrenilip sakınılabılır.

### **3.2.4.6 Toplumsal – turistik harici alanlar**

RES'ler çoğu bölgelerde toplum tarafından benimsenmekte ve desteklenmektedir fakat kimi bölgelerde de karşı çıkılmaktadır. Karşı çıkılmasına neden olarak çeşitli faktörler öne sürülmektedir. Bunlardan bazıları; dönen kanatların göz alması, jeneratör ve kanatların dönüş sesi, kanatların bıraktığı hareketli gölgenin göze etkisi, türbin ve jeneratörün elektromanyetik dalgası..vb etkilerdir. Bu etkiler üzerine yapılan araştırmalar kesin bir sonuç vermemekle ciddi bir hasarın söz konusu olmadığı, olayın daha çok psikolojik olarak bir tepkiden kaynaklandığı belirtilmektedir. Elbette fizibilite çalışması yapılan RES karaya belirli bir uzaklıkta Açık Deniz ortama kurulacağından toplumun karşı çıkması minimuma inmektedir. Yine de her RES projesinde yapıldığı gibi bölge halkını bilgilendirme toplantısı yapılmalıdır. Ayrıca yoğun turistik bölgelerin açığına kurulması planlanan Açık Deniz RES'lerin yerleşimi analizinden önce bölgedeki yetkili kuruluşlar ile Kültür ve Turizm Bakanlığı'na danışılması önemlidir. Yapılan bazı çalışmalarda ise RES'lerin turizme katkı sağladığı gözlenmiştir.

### **3.2.5 Türbin ve temel seçimi**

İdeal bir fizibilite çalışmasında birkaç farklı senaryo üretilip bu senaryoda kullanılan türbinler, temeller, maliyet ve üretilen güç karşılaştırılmalıdır. Türbinler bölgedeki rüzgar rejimine uygun güç eğrlisine sahip türbinlerden seçilmelidir. Kurulu gücü yüksek türbinler daha fazla enerji üretmektedir fakat bölgede bu tip türbinlerin optimum çalışma hızına denk bir rüzgar rejimi yoksa daha düşük hızlarda verimli olan daha küçük güce sahip türbinler seçilmelidir.

Temel tipleri derinlik ve deniz zemini yapısına göre değişiklik göstermektedir. Tek kazık ve ağırlık temelleri 30 metreye kadar kullanılabilirken 30 metreden sonra üç ayak ve jacket tip temeller kullanılmalıdır. Ağırlık temelleri 15 metreden sonra çok malzeme gerektirdiği için fizibil olamamaktadırlar. Aynı durum tek kazık temelinde akıntı ve yüklere dayanım olarak kendini göstermekte ve 30 metreden sonra kullanılmamaktadır. Jacket ve üç ayak tip temellerin üretimi daha maliyetlidir ve 30 metreden sonra kullanılması ekonomiktir. Zemin yapısının yumuşak ya da sert oluşu ve kullanılacak türbinin boyutu ve ağırlığı da temelde kullanılacak malzeme miktarını etkilemektedir.

### **3.2.6 Türbin yerleşimi**

Tüm harici alanlar belirlendikten ve yerleşim planı için rüzgar atlasından elendikten sonra geriye kalan alanlardan en verimli noktaları belirlenmeli ve buralara türbin yerleşimi yapılmalıdır. Bu noktalara ya bir program ile ya da manüel olarak iz etkisi hesaplanarak belirli adette türbin yerleşimi yapılır. Türbinler arası mesafe iz etkisini %8'i geçirmeyecek şekilde yapılmalıdır. Bu ise literatürde belirtildiği üzere rüzgara karşı yanal dizilimde 2-5 rotor çapı, dikey dizilimde 8-12 rotor çapı olarak yapılmalıdır. Türkiye'de yapılacak RES başvuruları için 9 Kasım 2008 tarihli Resmi Gazete'de yayınlanan Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Rüzgâr Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularının Teknik Değerlendirilmesi Hakkında Yönetmeliğinin Ek-3'ünde belirtildiği üzere yanal dizilimde en az 3 rotor çapı, dikey dizilimde en az 7 rotor çapı bırakılmalıdır. Ayrıca fizibilite çalışmasındaki her senaryo için aynı yerleşim noktaları kullanılmalıdır ki karşılaştırma aynı koşullar altında olsun.

### **3.2.7 Güç üretimi hesaplanması**

Türbin yerleşiminden sonra her senaryo için toplam güç üretimi hesaplanmalıdır. Bu üretim hesaplanırken türbinlerin yıllık çalışır durum saatleri belirlenip bu sayıya göre üretim çıkarılmalıdır. Her coğrafya ve türbine göre çalışma saati değişim göstermektedir. Bu saat belirlenirken yıllık fırtına, buzlanma, yüksek dalga ortalaması saptanmalı ve bu türbinin bakım ve olası durma halleriyle birleştirilmelidir. Literatürdeki bazı çalışmalarda türbinlerin çalışmama durumları genel bir zaman yüzdesiyle belirtilmiş ve hesap buna

göre yapılmıştır. Fizibilite çalışmasında güç üretimi Weibull dağılımı, güç eğrisi, çalışma zaman yüzdesi ve güç üretim formülasyonlarıyla yapılmalıdır ve kompleks bir işlemdir. Pratik ve güvenilir bir yol ise WaSP ve benzeri paket programları kullanmaktır.

### 3.2.8 Maliyet hesaplanması

Fizibilite çalışmasının en önemli adımlarından biri de maliyeti hesaplamaktır. Maliyet düzgün hesaplanmalıdır ki her senaryo için enerji maliyeti, ilk yatırım maliyeti ve geri ödeme süresi net olarak saptanıp düzgün bir karşılaştırmayla hangi projenin fizibil olduğu belirlenebilsin. Maliyetin birçok alt faktörü vardır, bunları sırasıyla ele almak gerekirse;

Türbin ve temel maliyeti: Toplam yatırım maliyetinin en büyük kısmını türbin ve temel oluşturmaktadır. Türbin ve temel maliyeti batimetreye, deniz jeolojisine, temel tipine ve türbin büyüklüğüne göre çok değişmektedir. Açık Deniz RES'lerde türbin ve kule toplam kurulum maliyetinin yaklaşık %35-%55'ini, altyapı ve temel toplam kurulum maliyetinin yaklaşık %20-%45'ini oluşturmaktadır. Türbin, kule ve temelin deniz ortamının tuzlu korozif ortamına dayanımlı üretilmiş olması gerekmektedir ve bu da maliyeti yükseltmektedir. Türbin gücü yükseldikçe tüm maliyet artmaktadır ama enerji maliyeti (kWh/€) düşmektedir. Ayrıca derinliğe ve temel tipine göre maliyet çok değişmektedir. 30 metre ve daha derin sularda temellerin maliyet yüzdesi türbinleri geçebilmektedir. Düzgün bir hesaplama için kullanılacak temel tipleri derinliğe ve deniz jeolojisine göre belirlenmelidir.

İzin, lisans ve proje maliyeti: İzin, lisans ve proje maliyetleri hesaplanması zor bir maliyet parametresi olmakla beraber projenin büyüklüğüne göre değişmektedir. Literatürdeki çoğu çalışmalarda bu maliyet genel kurulum maliyetinin bir yüzdesi olarak kabul edilmiştir.

Elektrik elektronik altyapı maliyeti: Elektrik elektronik altyapı maliyeti karada olduğundan daha yüksektir çünkü altyapının anti-korozif malzemeden yapılacak olması, deniz altına kablo döşenmesi, trafoların ve dağıtım merkezlerinin deniz üzerine kurulması maliyeti ciddi biçimde arttırmaktadır. Literatürdeki bazı çalışmalarda bu maliyet genel kurulum maliyetinin bir yüzdesi olarak kabul edildiği gibi MW başına ya da km başına maliyetler de bulunmaktadır.

İşletme ve bakım maliyeti: İşletme ve bakım maliyetinin hesaplanması için öncelikle RES'in çalışma saati ve bakım ihtiyacı öngörülmalıdır. Yıl boyunca oluşabilecek fırtına, buzlanma, yüksek dalga sıklığı ve ağır bakım halinde kullanılacak vinçli şilep fiyatları bu maliyeti etkileyen ana faktörlerdir. Bazı sert hava ve deniz koşullarında türbine ulaşım sağlanamamakta ve bakım ekibi ve şilebin bekleme süresiyle türbinin güç üretmemesi istenmeyen masrafları arttırmaktadır. Tüm bunlar net bir maliyet çıkarımına izin vermemektedir fakat genellikle faktörler göz önünde bulundurularak genel bir maliyet yüzdesi çıkarılabilmektedir.

### **3.2.9 Fizibilite değerlendirmesi**

Fizibilite değerlendirmesinde tüm sonuçlar masaya yatırılır. Her senaryo için güç üretimi ve maliyet kullanılarak enerji maliyeti hesaplanır. Güncel elektrik satış fiyatları üzerinden yıllık kar ve geri ödeme süresi hesaplanarak genel bir karşılaştırma yapılır. Yatırımcı ilk yatırım maliyetleri elverdiği sürece geri ödeme süresi en kısa olan senaryo ile geri ödemesi bittikten sonraki toplam karı en fazla olan senaryo arasında tercih yapar.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1 Metodoloji

Antakya Körfezi örnek çalışmalarında WaSP (Wind Atlas Analysis and Application Program) programı kullanılmıştır. WaSP, rüzgar veri analizi, rüzgar atlası üretimi, rüzgar iklimi hesaplaması, rüzgar tarlası yerleşimi ve hesaplaması yapabilen, ilk olarak 1987’de Danimarka’daki Riso Ulusal Laboratuvarının Rüzgar Enerjisi ve Atmosfer Fizik Bölümü’nce geliştirilmiş bir programdır. Rüzgar enerjisi tarihi incelendiğinde kapasitesi yüksek ilk ticari türbin kurulumlarının 1980 ve sonrasında gerçekleştiği görülebilir. WaSP, rüzgar enerjisi pazarının ihtiyaçlarına ve teknolojik gelişmelere göre günümüze kadar geliştirilmiştir. An itibarı ile rüzgar enerjisi fizibilite ve mühendislik çalışmalarının çok büyük bir çoğunluğunda WaSP kullanılmaktadır.

WaSP, belirli girdileri analiz ederek rüzgar ikliminin yatay ve dikey ekstrapolasyonu ile istenilen bölgenin rüzgar atlasını çıkarmaktadır. Aynı zamanda programın içinde bulunan güncel türbin tipleri ile vektör harita üzerinde rüzgar tarlası yerleşimi yapabilmek için bu tarlanın detaylı analizini sonuç olarak verebilmektedir. Tüm bu işlemler için çeşitli modüller programın içinde yüklüdür. Konsept olarak WaSP in metodolojisi beş ana işlem bloğundan oluşur:

1.Ham Veri Analizi: Herhangi bir zaman serisine (dakikalık, saatlik..vb) sahip rüzgar ölçüm verilerinin analizi yapıp istatistiksel sonuçları çıkartılır. Bu analiz program ile birlikte sunulan WaSP Climate Analyst iklimlendirme sihirbazı ile program dışında yapılmaktadır. Analiz sonucunda ortaya çıkan veri seti Gözlenmiş Rüzgar İklimidir ve “Observed Wind Climate (OWC)” olarak kaydedilir.

2.Rüzgar Atlası Oluşturma: Analizi yapılmış rüzgar verileri bölgesel bir rüzgar iklimine dönüştürülür. WaSP Climate Analyst’te analiz edilen veriler OWC olarak ana programa aktarılır. Topografik ve pürüzlülük açısından işlenmiş bir vektör harita da programa aktarıldıktan sonra WaSP, OWC’deki ölçüm sahası etkileri olan



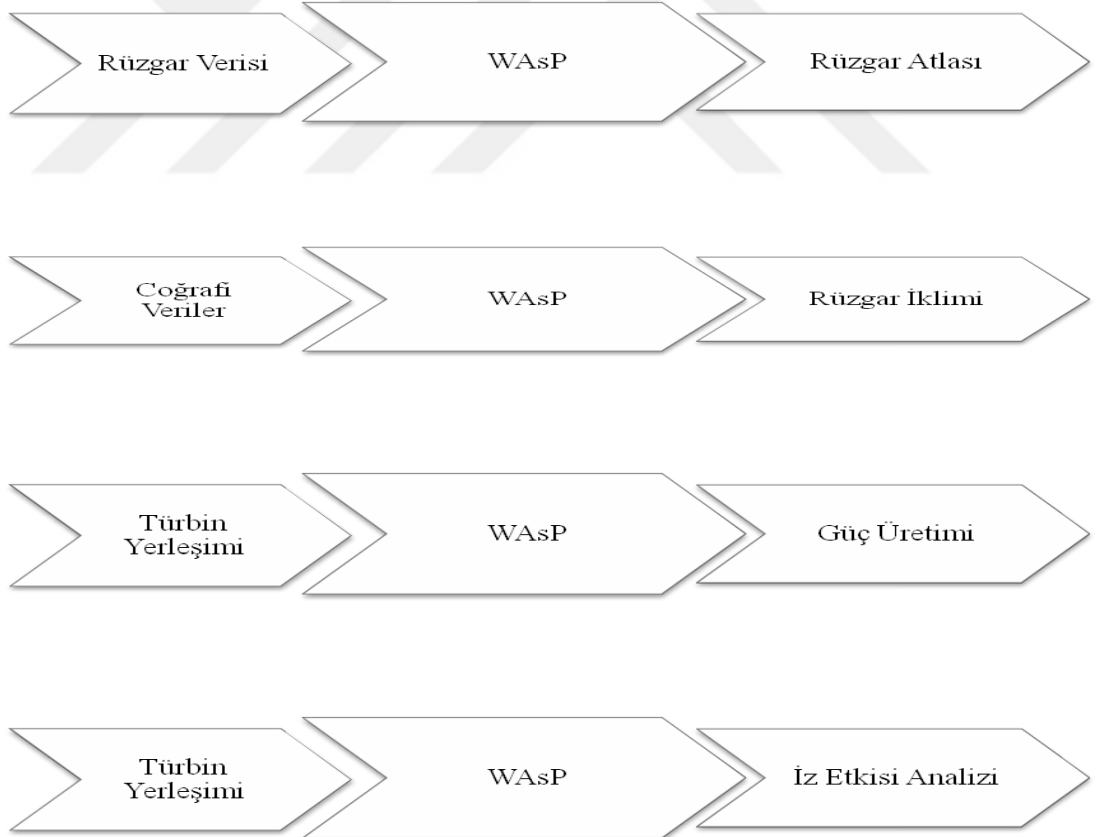
pürüzlülük ve topografik etkileri verilerden temizler. Sonuç olarak ölçüm sahasından bağımsız bir rüzgar atlası veri seti ortaya çıkar.

3.Rüzgar İklimi Oluşturma: WaSP tarafından oluşturulmuş ya da başka bir kaynaktan temin edilmiş rüzgar atlasını ve vektör haritayı kullanarak, program harita üzerinde istenilen herhangi bir noktadaki/bölgedeki rüzgar iklimini oluşturabilir. Bu rüzgar iklimi mevcut ve beklenen değerleri kapsamaktadır.

4.Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Oluşturma: Rüzgar iklimi dahilindeki detaylı istatistiksel değerler ile güç yoğunluğu hesaplanır. Ayrıca WaSP dahilindeki türbinlere ait güç eğrileri ile istenen türbine ait yıllık enerji üretiminin harita üzerinde dağılımı hesaplanabilir.

5.Rüzgar Tarlası Üretimi Hesaplama: Türbine ait itme katsayısı ve güç eğrisi ve harita üzerinde yapılan rüzgar tarlası yerleşimi ile WaSP her türbin için iz(wake) etkisini hesaplayıp hem tüm tarlaya hem de her türbin için ayrı olarak net yıllık enerji üretimini hesaplar.

WaSP programının girdi ve çıktılarını aşağıdaki diyagramla özetleyebiliriz:



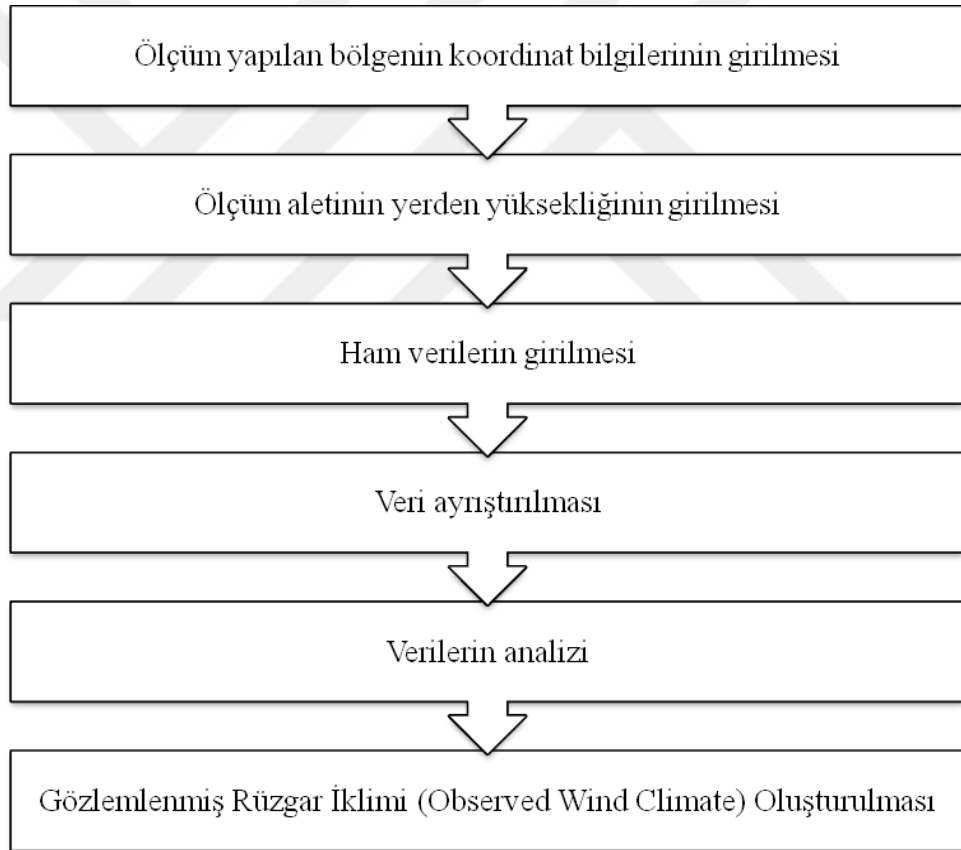
**Şekil 4.1:** WaSP program girdi ve çıktıları.

WaSP programı ile birlikte gelen yan programlar ve bunların veri analiz detayları aşağıdaki gibidir:

#### 4.1.1 Ham rüzgar verilerinin analizi

Ham rüzgar verilerinin analizinde WaSP Climate Analyst programı kullanılmıştır. WaSP Climate Analyst, belirli zaman serilerine sahip ham rüzgar verilerinin analizini yapıp, bunu ana programa (WaSP) gözlenmiş rüzgar iklimi girdisi olarak aktarılacak formata dönüştüren güçlü bir yan programdır. Program önceki WaSP versiyonlarındaki OWC Wizard programının yerine geliştirilmiş daha kapsamlı bir pakettir.

Programın işlem sırası ve işleyişi aşağıdaki gibidir:

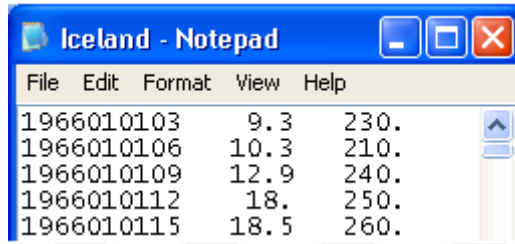


Şekil 4.2 : WaSP Climate Analyst program işleyişi şeması.

Programı “.dat”, “.txt”, “.prn”, “.csv” formatında ASCII dosyaları girdi olarak

aktarılabılır. Dosyalar içindeki veriler her kategoriye (tarih, hız, yön)ait ayrı sütunda alt alta dizili olmalıdır.

Şekil 4.3'teki "Iceland" örneğinde ilk sütunda tarih verileri sıralanmıştır. "1966010103", verilerin 1966 yılında Ocak ayının (01) ilk gününde (01) 3 saat aralıklarla alınmaya başladığını göstermektedir. "9.3 , 10.3 , 12.9..." rüzgar hızlarını belirtmektedir. "230,210,240.." ise 360 derecelik bir skalada rüzgar yönlerini göstermektedir.



File	Edit	Format	View	Help
1966010103		9.3	230.	
1966010106		10.3	210.	
1966010109		12.9	240.	
1966010112		18.	250.	
1966010115		18.5	260.	

Şekil 4.3: Wind Climate Analyst programına aktarılacak ham veri örneği (WaSP, 2010).

Şekil 4.4'teki "Jamaica.dat" ham verisi incelendiğinde bir öncekinden daha karmaşık olduğu farkedilmektedir. Bu veri incelenmek amacıyla notepad ile açılmıştır. İlk dikkat çeken dosyada veriler başlamadan önce üstbilgi (header) bulunmasıdır. Üstbilgiden de anlaşılacağı üzere veriler 3 farklı sensörden toplanmıştır. "Data Information" başlığı altında "Spd1, Spd2, Spd3" üç farklı ortalama rüzgar hızını, "SD1, SD2, SD3" üç farklı standart sapmayı (program bu bilgiyi kullanmamaktadır), "Dir 1, Dir 2, Dir 3" ise üç farklı ortalama rüzgar yönünü belirtmektedir.

```

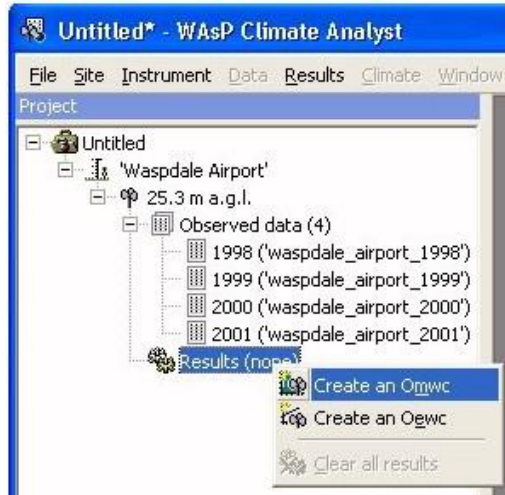
Jamaica.dat - Notepad
File Edit Format View Help
DL9210 Version 07 Filename = Jamaica.dat Metric 12:52:19 06-20-2003
----- Site Information -----
Site Number :1508 # of Sensors :3
Serial Number :1134 Interval :10
Model Number :9210 Chip Socket :1
Firmware Version :03 Left Socket (1):32k chip
Chip ID :00 Right Socket (2):32k chip
SPD 1: Scale = 0.760000, offset = 0.350000, m/s/Hz, m/s
SPD 2: Scale = 0.760000, offset = 0.350000, m/s/Hz, m/s
SPD 3: Scale = 0.760000, offset = 0.350000, m/s/Hz, m/s
DIR 1: Scale = 1.406250, offset = 0.000000, Degrees
DIR 2: Scale = 1.406250, offset = 0.000000, Degrees
ANLG : Scale = 1.000000, offset = 0.000000, Counts
----- Start/Stop Information -----
Start Time :10:47 Stop Time :09:00
Start Date :05/05/03 m/d/y Stop Date :05/24/03 m/d/y
Start Voltage :8.7 Stop Voltage :8.4
----- Gust Information -----
Speed SPD 1 SPD 2 SPD 3
Direction : 000 Degrees 78 m/s 21 m/s
Time : 10:40 190 Degrees 190 Degrees
Date : 05/05/03 m/d/y 10:40 10:40
Raw Header Information
08 15 34 11 10 92 03 00 47 10 05 05 03 6F AE DE
00 40 10 05 05 03 CC 87 40 10 05 05 03 36 87 40
10 05 05 03 00 09 24 05 03 A8 01 FF FF FF FF FF
FF FF FF FF FF FF FF 55
----- Data Information -----
Spd1, SD1, Dir1, Spd2, SD2, Dir2, Spd3, SD3, Dir3, Gust, Time, Date
8.40, 0.71, 11, 6.41, 0.64, 193, 5.86, 0.64, 172, 85, 1040, 050503
10.66, 0.55, 8, 7.95, 0.52, 191, 7.05, 0.74, 171, 12, 1050, 050503
10.28, 0.55, 7, 7.50, 0.59, 188, 6.64, 0.74, 170, 12, 1100, 050503

```

Şekil 4.4: Wind Climate Analyst programına aktarılabacak kompleks ham veri örneği (WaSP, 2010).

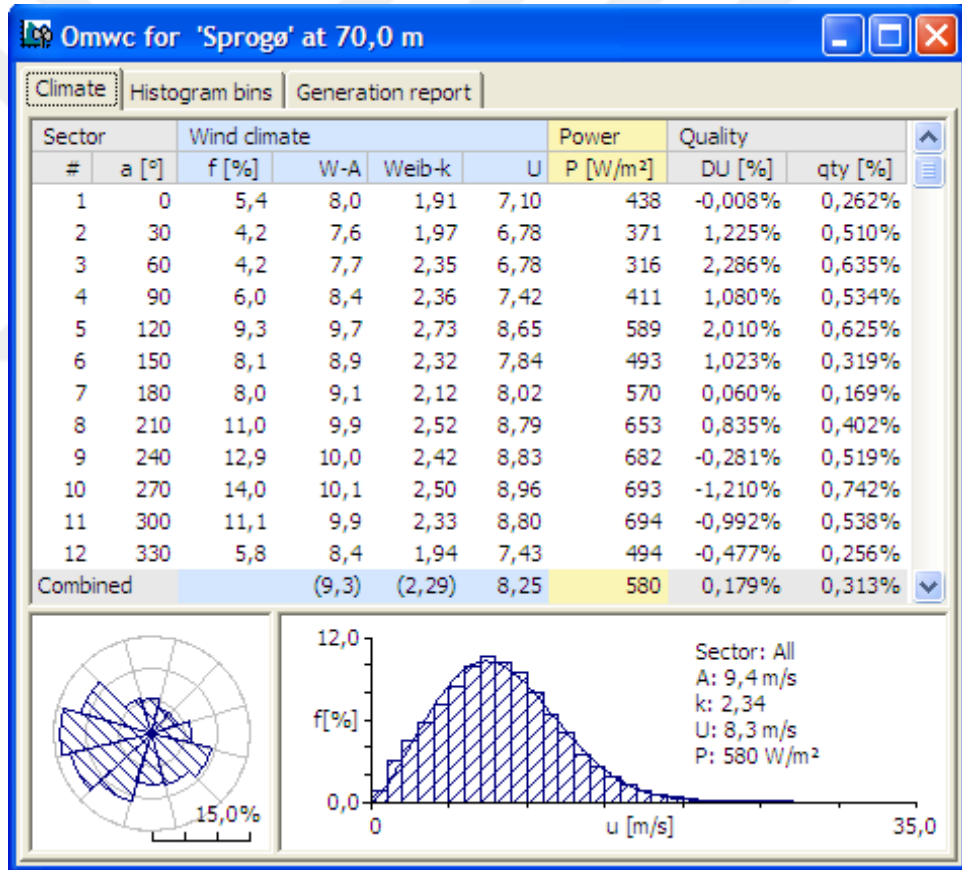
Program içindeki modül ile dosyaları analiz edip, verileri ölçüm zamanı, hız ve yön sütunları olarak kolayca ayrıştırabilmektedir. Üstbilgiler, programın kullanmadığı veriler (standart sapma, vb.) ayrıştırma sırasında belirlenip analiz dışı bırakılmaktadır. Zaman ayrıştırması isteğe ve veriye göre yıl, ay, gün, saat, dakika ve saniye hassasiyetinde yapılabilmektedir. Yukarıdaki örneklerde incelendiği gibi veriler basit ya da kompleks yapıda olabilmektedir. “Jamaica.dat” verisindeki 3 farklı sensöre ait veriler protokol ile analize aynı bölge (site) içinde farklı aletler (instrument) olarak ayrı ayrı eklenmektedir. Ayrıştırma ham veriyle birlikte gelen verinin içine işlenmiş bir protokol otomatik olarak ya da kullanıcı tarafından özel olarak ayarlanacak şekilde yapılabilmektedir. Özel ayrıştırma ayarlandıktan sonra protokol olarak kaydedilip aynı veya benzer kaynaktan elde edilen diğer verilerin ayrıştırılmasında kolaylık sağlanabilmektedir.

Programa veriler diziler halinde aktarılmaktadır. Bu diziler genellikle yıllık veriler halinde olmaktadır. Elbette eksik veri ya da daha kısa bir zaman aralığında bu aktarılırken belirtilebilmektedir. Böylece eksik verilerin yokluğu giderilememesine rağmen program analiz yaparken verilerin hangi zaman aralığına ait olduğunu bilip hata payını minimize etmektedir.



Şekil 4.5: Wind Climate Analyst Programında veri dizileri girildikten sonra sonuçların elde edilmesi (WaSP, 2010).

Şekil 4.5'te de görüldüğü üzere tüm veri dizilerini –örnekte 1998-2001 arası 4 veri dizisi vardır- girdikten sonra “Gözlenmiş Ortalama Rüzgar İklimi”(OMWC) ya da “Gözlenmiş Ekstremler Rüzgar İklimi”(OEWK) hesaplanır. Hesaplama kısmında isteğe bağlı olarak sektör sayısı belirlenir. Genellikle 30° üzerinden 12 sektör kullanılmaktadır. OMWC sonucunda tek tek ve tüm sektörler için Weibull A ve Weibull k parametrelerini içeren rüzgar hızı dağılımı histogramı, yön dağılımı rüzgar gülü ve istatistik raporlar oluşturulur (Şekil 4.6). OEWK ise verileri girilen bölgenin 50 yıllık ekstrem rüzgar iklimini tahmin eden ve bunu grafiksel ve istatistiksel olarak raporlayan bir sonuç modülüdür.



Şekil 4.6: OMWC sonuç sayfası (WaSP, 2010).

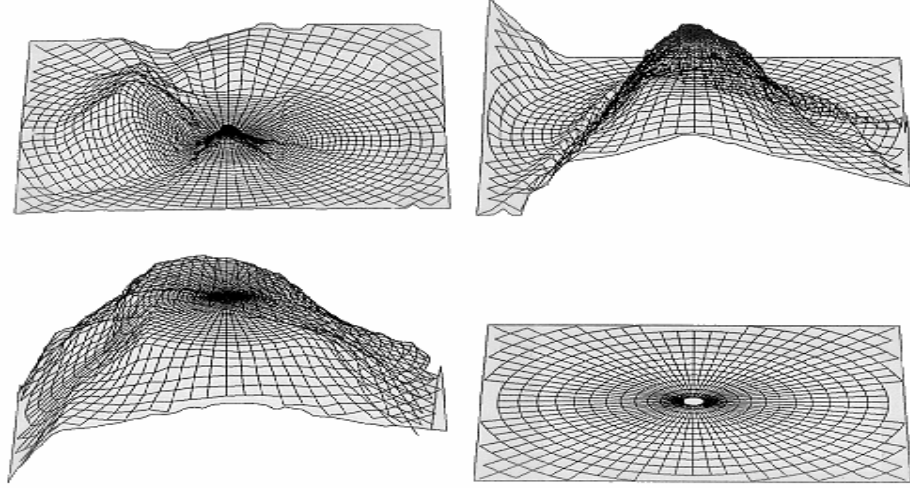
#### 4.1.2 Vektör harita işlenmesi

Vektör haritalar, bir coğrafyaya ait eş yükselti eğrilerinin ve pürüzlülük bölgelerinin dijital verilerini barındıran topografik sayısal haritalardır. WaSP Map Editor, WaSP paket programının vektör haritaları incelemek, kontrol etmek, değiştirmek ve pürüzlülük eğrileri oluşturmak için kullanılan bir yan programıdır. WaSP programının ana işlevi olan rüzgar iklimi oluşturmak ve türbin yerleştirip güç analizi yapmak için vektör haritalar şarttır. Bu haritalar dışarıdan temin edilebileceği gibi özel dijitalleştirme tabletlerinde kağıt harita üzerinde tablet kalemi kullanarak, resim dosyası olarak taranmış haritayı uygun programlarda fare ile izdüşümleyerek de oluşturulabilir.

Map Editor girdi olarak .bna (Surfer ve Didger harita programı formatı), .dxf (Autocad grafik formatı) ve .map (WaSP formatı) dosyalarını işleyip kaydedebilmektedir. Ayrıca Flexible header haritalar (çizgi/kontur başlıkları kullanıcı tarafından belirlenen haritalar), Header-less haritalar (çizgi/kontur başlığı olmayan haritalar), XYZ-haritaları (her nokta x,y,z olarak belirlenmiş, çizgi/konturlara sahip haritalar), Mat-lab haritaları, NTF haritaları (İngiliz, İrlanda Ordnance survey haritaları), USGS Coastline haritaları (Amerikan Jeolojik İnceleme birimi tarafından hazırlanan kıyı haritaları), BLN haritalar (Surfer programınca üretilen boş harita dosyaları), Shape-file haritalar (yükseklik konturları ve pürüzlülük çizgileri içerebilen ESRI haritaları) programa aktarılabilir. Yalnız bu ek formatlı haritaların programa girdisi inceleme amaçlıdır ve haritaların işlenmesi ve WaSP'a aktarılacak şekilde kayıt edilmesi sınırlıdır. Dolayısıyla WaSP programında hesaplama yapabilmek için en sağlıklı yöntem .map, .bna ve .dxf formatlarını kullanmaktır.

Dijital harita elde etmenin bir diğer yöntemi ise Digital Elevation Model (DEM) modellerini çeşitli programlarla uygun formata dönüştürmektir. DEM çoğunlukla uydu aracılığıyla oluşturulmuş, kare ağlardan oluşan 3 boyutlu arazi yüzey modelleridir. Surfer, Global Mapper ve benzeri programlarda bu modeller .bna ya da .map formatına dönüştürülebilir.

WaSP programının dijital harita üzerinde akış hesaplamaları Troen'in (1990) BZ- model'ine dayanmaktadır. Bu model yüksek çözünürlüklü bir kutupsal ağ (polar grid) uygulamaktadır. Bu ağa ait bir önizleme Şekil 4.7'e gösterilmiştir.



Şekil 4.7: WaSP programının B-Z modeli önizlemesi (WaSP, 2010).

Şekilde sol üst köşede programla birlikte gelen örnek proje Waspdale'in 25x25 km lik bir kısmı görülmektedir. 27km'lik bir çapa sahip olan ağın merkez noktasının yaklaştırılmış görüntüleri sırasıyla sağ üstte 5x5km, sol altta 1x1km ve sağ altta 200x200m olarak görülebilmektedir. Modelin merkezindeki çözünürlük 4m'dir. Kutupsal ağın merkezinde çözünürlük çok daha yüksek iken ağın sınırlarına doğru giderek azalmaktadır. Ağın merkezindeki hücre boyutuyla harita çapı arasındaki bağıntı Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Dairesel ağ boyutu hücreler merkezden uzaklaştıkça her sırada %6 oranında büyümektedir.

Çizelge 4.1. WaSP B-Z Modeli çözünürlük kıyaslaması (WaSP, 2010).

Harita Çapı (km)	5	10	20	50	100
Hücre Boyutu (m)	1,3	2,7	5,3	13,3	26,6

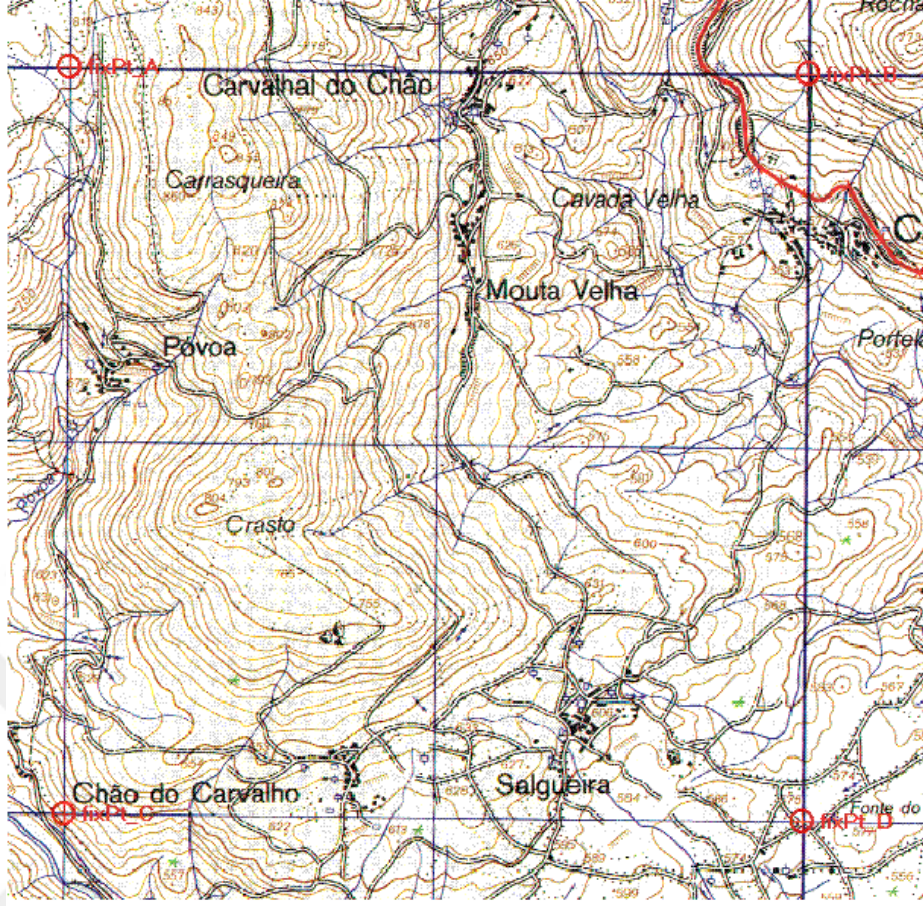
WaSP'ın hesaplama modüllerinin bazı limitleri bulunmaktadır. Vektör haritalar için harita üzerindeki noktaların sayısı ile çizgilerin sayısının üç katının toplamı 1.000.000'u geçmemelidir. Analiz için ideal bir harita 10 x 10km'lik bir alanı kaplamalı, yükseklik eğrilerinin aralığı 20m veya daha az olmalıdır. Ayrıca WaSP'ın minimum



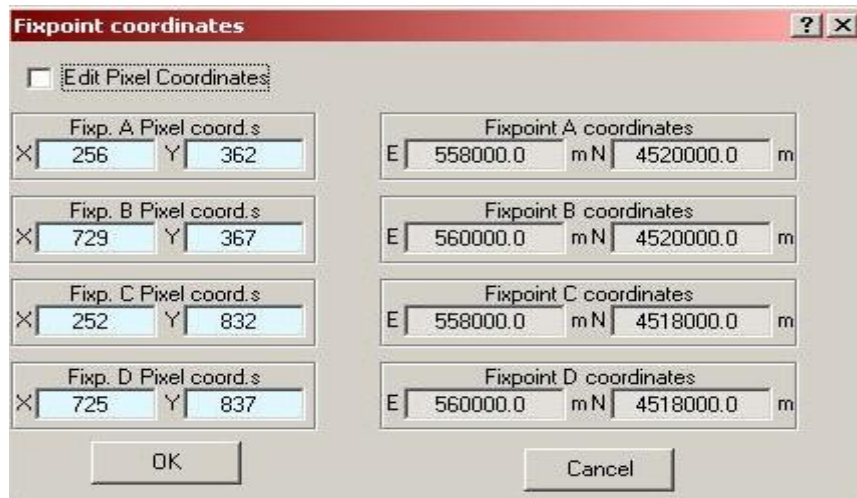
hatayla tahmin yapabilmesi için haritaların büyük ölçekli olması gerekmektedir. 1/25.000 veya 1/50.000 uygun ölçekli haritalardır. DEM'lerde ise ağ hücreleri 50m'den küçük olması durumunda sağlıklı bir hesaplama yapılabilir.

Map Editor, aktarılan haritalardaki eşyükselti çizgilerini düzenleyebilmektedir. Bu düzenleme otomatik olabildiği gibi manüel olarak da yapılabilir. Otomatik düzenlemede toplam nokta sayısını, böylelikle harita boyutunu ve işlem süresini azaltmaya yarayan çizgi inceltme işlemi ve ayrılmış ya da birbirine yakın olan çizgileri birleştiren çizgi birleştirme işlemi yapılabilir. Manüel düzenlemede otomatik düzenlemedeki çizgi birleştirme ve çizgi inceltmenin yanı sıra çizgilerin tek tek seçilerek yerinin değiştirilmesi, istenilen noktada iki ayrı çizgi olacak şekilde kesilmesi, pürüzlülük çizgilerinin oluşturulması ve değiştirilmesi, ayrıca arka plan haritası üzerinde yeni eşyükselti çizgilerinin çizilmesi yapılabilir.

Map Editor'un bir diğer özelliği de vektörel haritayı doğrulamak ve yeni eşyükselti çizgilerinin oluşturulabilmesi sağlamak için arka plan haritası yükleyebilmesidir. Bu özellik işlenecek bölgenin topografik haritasının bilgisayar ortamında resim dosyasını gerektirmektedir. Bu resim dosyası ilgili yerlerden temin edilen kağıt paftaların tarayıcıdan geçmiş hali de olabilir. Programa aktarılabilecek formatlar .bmp, .wmt, .emt, .jpeg ve .jpg'dir. Elbette ki verifikasyon için paftanın düzgün bir ölçeği ve projeksiyonu olmalıdır. Arka plan haritası programa aktarıldıktan sonra kalibrasyonu yapılmalıdır. Kalibrasyon için öncelikle en az 3 adet sabit nokta belirlenmelidir (Şekil 4.8). Bu noktaların pafta üzerindeki metrik koordinatları (UTM koordinatları) bir kenara not edilir, programa arka plan haritası yüklendikten sonra önceden belirlenen noktalar fare ile seçilir ve Şekil 4.9'daki ekrana sırayla girilerek kalibrasyon tamamlanır. Dijital olarak temin edilmiş resim formatındaki haritaların kalibrasyon dosyaları da bulunabilir. Böyle bir durumda Map Editor kalibrasyon işlemini otomatik yapmaktadır.



Şekil 4.8. Map Editor’da arkaplan haritası için pafta üzerinde belirlenen sabit noktalar (WaSP, 2010).



Şekil 4.9. Map Editor’da arkaplan haritası için sabit noktaların kalibrasyonu.

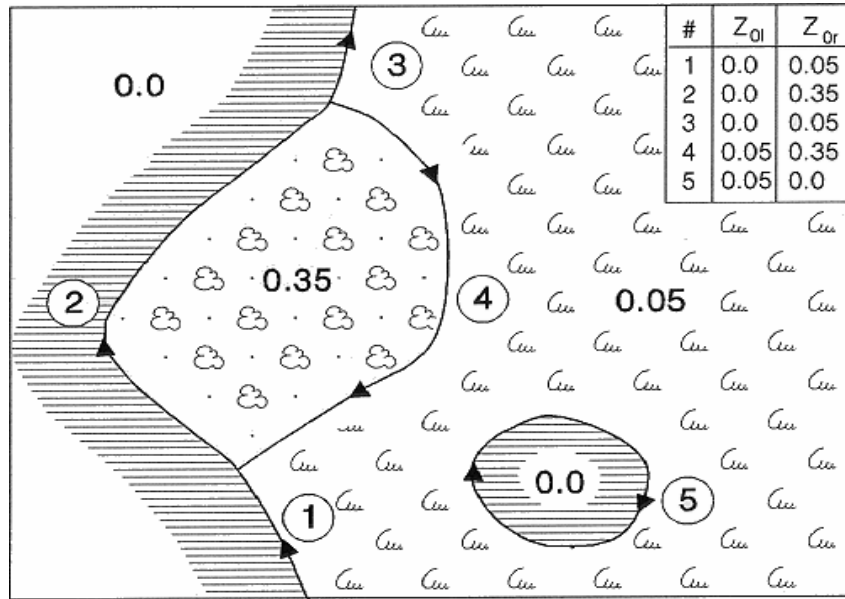
Pürüzlülük çizgileri farklı pürüzlülüğe sahip alanların sınırlarını belirten ve programın hesaplaması için tanıtan çizgilerdir. WaSP'ın baz aldığı pürüzlülük değerleri ve karşılıkları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. WaSP'ın baz aldığı pürüzlülük değerleri ve karşılıkları (WaSP, 2010).

Fiziksel z0 (m)	Arazi Yüzey Karakteristiği	Pürüzlülük Sınıfı	WaSP'taki z0 (m)
1.5		4 (1.5 m)	1.5
> 1	Yüksek ağaçlı orman		> 1
1.00	Şehir		1.00
0.80	Orman		0.80
0.50	Dış mahalle		0.50
0.40			0.40
0.30	Rüzgar kıran	3 (0.40 m)	0.30
0.20	Birçok ağaç ve/veya çalı		0.20
0.10	Sık görünümlü çiftlik alanı	2 (0.10 m)	0.10
0.05	Açık görünümlü çiftlik alanı		0.05
0.03	Seyrek binalı/ağaçlı çiftlik alanı	1 (0.03 m)	0.03
0.02	Bina ve ağaçlı havaalanı		0.02
0.01	Havaalanı pisti		0.01
0.008	Biçilmiş çim		0.008
0.005	Açık toprak (düzgün)		0.005
0.001	Kar yüzeyi (düzgün)		0.003
0.0003	Kum yüzeyi (düzgün)		0.003
0.0002	(Atlata su yüzeyi için kullanılmaktadır)	0 (0.0002 m)	0.0
0.0001	Suyüzeyi(göl, fiyort, açık deniz)		0.0

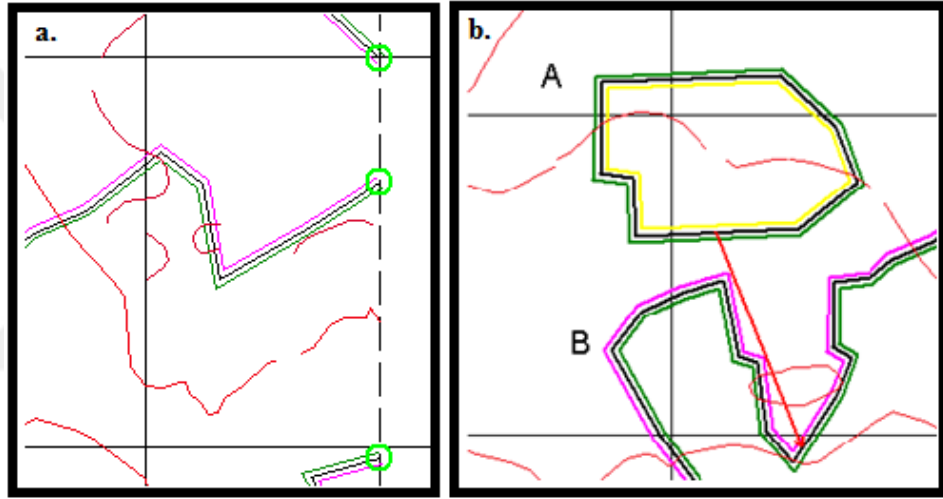
Bu tabloda fiziksel  $z_0$  Bölüm 2.7’de bahsi geçen pürüzlülük uzunluğunu, pürüzlülük sınıfı WaSP’ın tanıdığı pürüzlülük sınıflarını, WaSP’taki  $z_0$  ise pürüzlülük analizinin yapılması için WaSP’a girilmesi gereken değeri temsil etmektedir. Bilindiği üzere yüzey her daim arazi pürüzlülüğü açısından rüzgarı etkilemektedir. Bu yüzden en basit analiz sahaları için bile pürüzlülük değerleri belirlenmeli ve programa işlenmelidir. WaSP pürüzlülük değerleri atanmamış tüm alanlar için ön tanımlı olarak 0,03 m değerini baz almaktadır.

Map Editor’da pürüzlülük çizgilerinin işlenmesi çizginin dışında ve içinde ya da sağında ve solunda kalan alanın pürüzlülük katsayısının çizgi değerlerine eklenmesi ile yapılır. Şekil 4.10 incelendiğinde  $z_{0l}$ , solda kalan pürüzlülük değerini,  $z_{0r}$  ise sağda kalan pürüzlülük değerini göstermektedir. Buna göre; 1 numaralı çizginin sol tarafında 0 değerine sahip su yüzeyi, sağ tarafında 0,05 değerine sahip açık görünümlü çiftlik alanı, 2 numaralı çizginin sol tarafında 0 değerine sahip su yüzeyi, sağ tarafında 0,35 değerine sahip rüzgar kıran, 3 numaralı çizginin sol tarafında 0 değerine sahip su yüzeyi, sağ tarafında 0,05 değerine sahip açık görünümlü çiftlik alanı, 4 numaralı çizginin sol tarafında 0,35 değerine sahip rüzgar kıran, sağ tarafında 0,05 değerine sahip açık görünümlü çiftlik alanı ve 5 numaralı çizginin içinde 0 değerine su yüzeyi, dışında 0,05 değerine sahip açık görünümlü çiftlik alanı bulunmaktadır.



Şekil 4.10. WaSP için örnek pürüzlülük eğrileri (WaSP, 2010).

Pürüzlülük değerlerini çizgilere atarken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar bulunmaktadır. Çizgilerin ya kapalı bir halka oluşturmalıdırlar ya da uçları bir diğer pürüzlülük çizgisinin düğümüne veya sınır düğümüne bağlanmalıdır (Şekil 4.11.a). Aksi halde kör uç hatası oluşmaktadır ve bu hesaplamalarda hataya yol açmaktadır. Bir diğer önemli nokta ise Line Face Rougness (LFR) hatalarıdır. Bunlar karşılıklı yüzleri birbirine bakan pürüzlülük çizgilerinin aynı değeri belirtmemeleridir. Şekil 4.11.b'deki örnekte A çizgisinin dış pürüzlülük değeri 0,4m'dir ve yeşille gösterilmektedir, B çizgisinin dış pürüzlülük değeri ise A çizgisinin dış değeri ile aynı alanı göstermesine rağmen 0,06m'dir ve pembe renkle gösterilmiştir.



Şekil 4.11. a)Pürüzlülük çizgilerinin uçları b) LFR hatası örneği (WaSP, 2010).

### 4.1.3 Türbin yerleşimi ve hesaplamalar

Vektör harita hazırlandıktan sonra Climate Analyst'te hazırlanan gözlenmiş rüzgâr iklimi ile birlikte WaSP ana programına aktarılıp oluşturulan sonuçlar üzerinde yerleşim ve değerlendirme yapılır. Program işlem ağacı belirli bir sıraya yürümektedir ve girdiler de buna göre aktarılmalıdır.

Program işlem ağacında ilk olarak bir rüzgâr atlası oluşturulur. Rüzgâr atlasının alt menüsünde meteoroloji istasyonu otomatik olarak yerini alır. Bu meteoroloji istasyonuna Climate Analyst'te oluşturulan gözlenmiş rüzgâr iklimi aktarılır. Rüzgâr atlası oluşturmak için gerekli son veri vektör haritasıdır. Vektör haritasının aktarılması sayesinde meteoroloji istasyonunun konumu ve çevresindeki coğrafik özellikler rüzgâr atlası oluşturmada kullanılır. Climate Analyst'te oluşturulan gözlenmiş rüzgâr iklimi meteoroloji istasyonunun ölçüm sahasına ait coğrafi etkileri taşımakta iken rüzgar atlası ölçüm sahasından bağımsızdır.

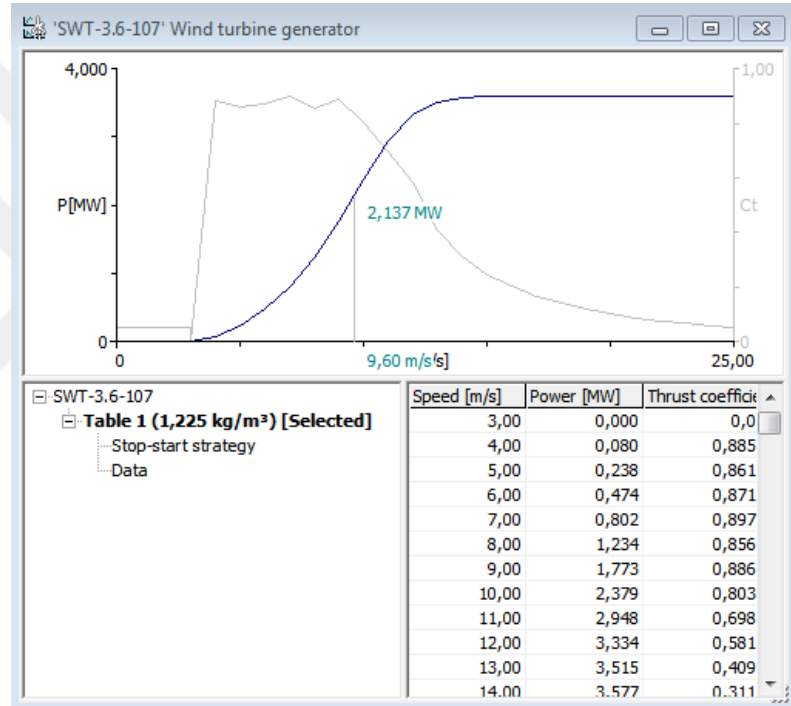
Vektör harita ve rüzgâr ölçüm verileri WaSP için iki hayati faktördür. Bu faktörler sorunsuz olarak işlendikten ve aktarıldıktan sonra türbin sahası belirlenebilir, rüzgâr tarlası oluşturulabilir, ortalama hız, güç yoğunluğu, yıllık enerji üretimi, Weibull-A ve Weibull-k dağılımları, sektör frekansı, yükselti ve pürüzlülükten kaynaklanan değişimleri gösterebilen veri haritası (resource grid) oluşturulabilir.

Veri haritası da türbin sahası da ilk olarak oluşturulabilir fakat önce veri haritasını oluşturup, daha sonra rüzgâr hızını ya da güç yoğunluğunu gösteren harita üzerinde yerleşim yapılması verimi yüksek ve zamandan tasarruf eden bir yerleşim sağlayacaktır. WaSP kara üzerinde analiz yapmak amacıyla geliştirilmiş bir program olup, teknoloji ve güncel koşullar ile birlikte açık deniz talebinin ve uygulamasının artması sonucu açık deniz analiz yapabilecek şekilde düzenlemelere tabi tutulmuştur. Haritanın sınırlarının genişletilmesi ile birlikte kıyıdan daha uzak noktalara da yerleşim yapılabilmektedir

WaSP ara yüzünde bir çalışma alanı (workspace) bulunmaktadır ve bu çalışma alanı altında istenilen sayıda proje yaratılabilmektedir. Girdiler ve hesaplamalar projeler altında olmaktadır. Her projeye bir adet meteoroloji istasyonu ve bu istasyona ait bir rüzgâr atlası ve istenildiği kadar veri haritası işlenebilmektedir. Fakat bir çalışma alanında ne kadar fazla proje bulunursa işlem ve kayıt süresi de doğru oranda uzun

sürmektedir. Aynı şekilde bir proje içinde ne kadar çok eleman ve rüzgâr tarlasında ne kadar çok türbin bulunursa işlem süresi uzamaktadır.

WaSP türbinlerin ürettiği enerjiyi hesaplarken program içinde bulunan türbin güç eğrilerini, hesaplanan hız değerleri ve Weibull olasılık dağılım fonksiyonunu kullanmaktadır. Program dahilinde bulunan güç eğrilerinden bir örnek Şekil 4.30'da görülmektedir. Bu şekilde türbine ait iki adet grafik bulunmaktadır. Biri y eksenini pencerenin solunda bulunan Güç – rüzgâr hızı grafiğidir. Diğeri ise y eksenini pencerenin sağında bulunan İtme katsayısı – rüzgar hızı grafiğidir.



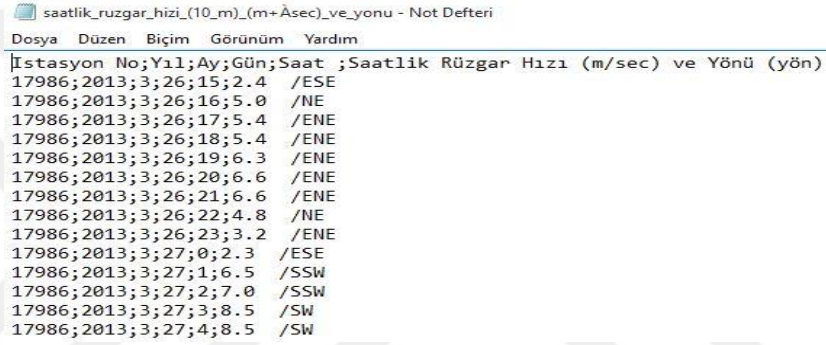
Şekil 4.12. Siemens'in 3,6 MW gücündeki türbinine ait güç eğrisi (WaSP, 2010).



## 4.2 Samandağ Örnek Çalışması

### 4.2.1 Rüzgâr verilerinin analizi

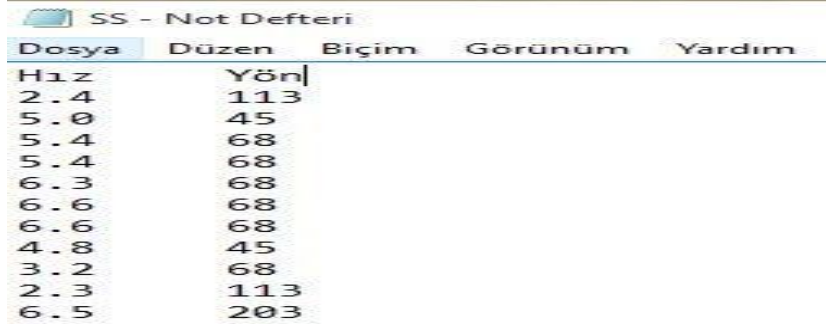
Örnek çalışmalar için MGM'den Samandağ/Hatay meteoroloji istasyonlarının 2013-2015 tarihleri arasındaki saatlik rüzgâr hızı ve yönü verileri temin edilmiştir. Veriler DMI'den alındığı haliyle programa aktarılmaya müsait olmadığı için makro kullanılarak Şekil 4.13'den Şekil 4.14'teki haline dönüştürülmüştür.



saatlik\_ruzgar\_hizi\_(10\_m)\_(m+Åsec)\_ve\_yonu - Not Defteri

Dosya	Düzen	Biçim	Görünüm	Yardım
[Istasyon No;Yıl;Ay;Gün;Saat ;Saatlik Rüzgar Hızı (m/sec) ve Yönü (yön)]				
17986;2013;3;26;15;2.4			/ESE	
17986;2013;3;26;16;5.0			/NE	
17986;2013;3;26;17;5.4			/ENE	
17986;2013;3;26;18;5.4			/ENE	
17986;2013;3;26;19;6.3			/ENE	
17986;2013;3;26;20;6.6			/ENE	
17986;2013;3;26;21;6.6			/ENE	
17986;2013;3;26;22;4.8			/NE	
17986;2013;3;26;23;3.2			/ENE	
17986;2013;3;27;0;2.3			/ESE	
17986;2013;3;27;1;6.5			/SSW	
17986;2013;3;27;2;7.0			/SSW	
17986;2013;3;27;3;8.5			/SW	
17986;2013;3;27;4;8.5			/SW	

Şekil 4.13. DMI'den temin edilen rüzgâr verilerinin formatı.



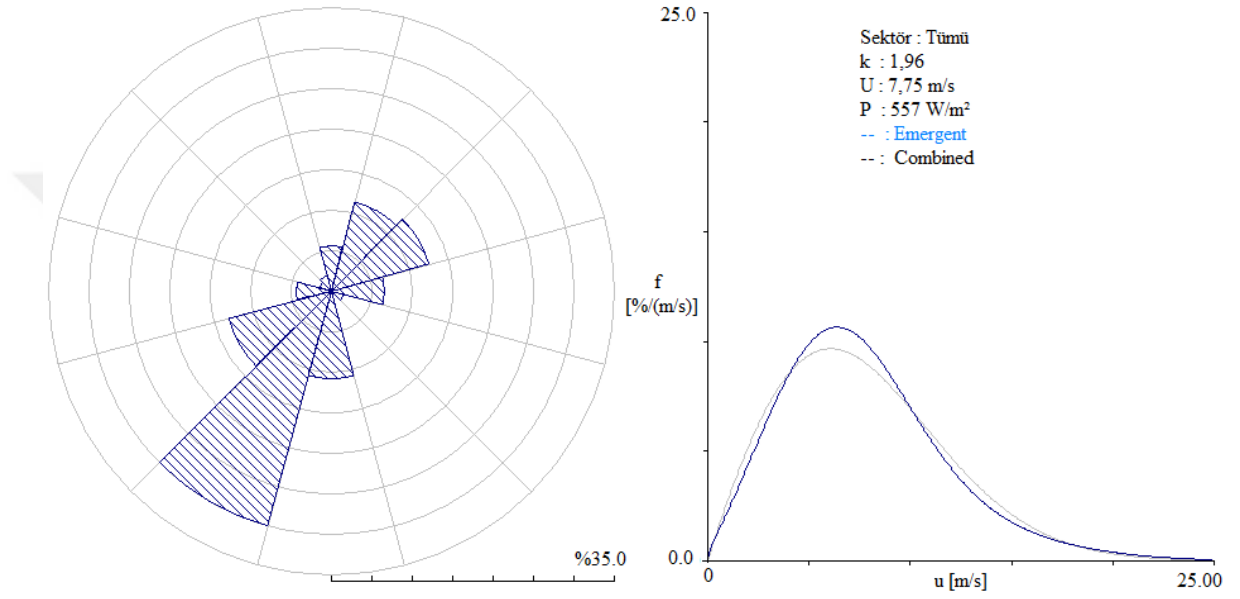
SS - Not Defteri

Dosya	Düzen	Biçim	Görünüm	Yardım
Hız			Yön	
2.4			113	
5.0			45	
5.4			68	
5.4			68	
6.3			68	
6.6			68	
6.6			68	
4.8			45	
3.2			68	
2.3			113	
6.5			203	

Şekil 4.14. Makro ile düzenlenmiş rüzgâr verileri.



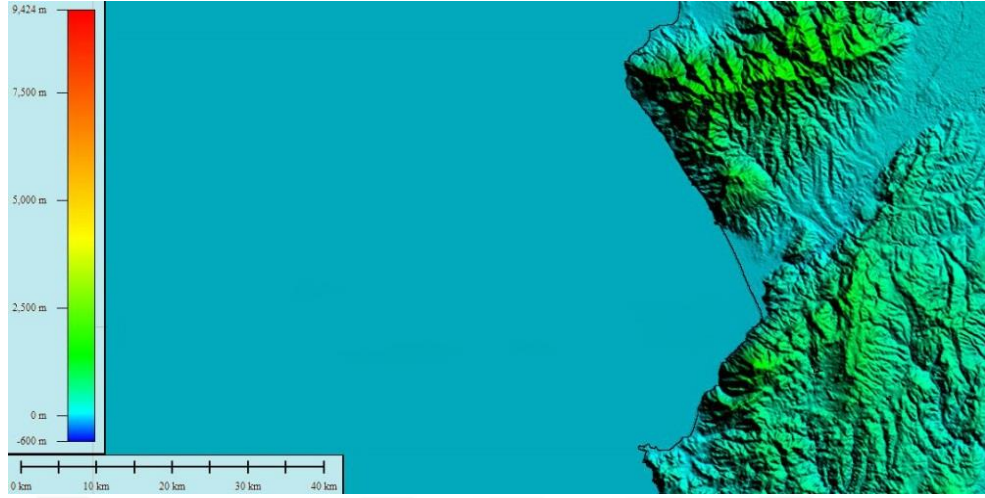
Programın rüzgâr verileri analizinden sonra ortaya çıkan sonuç Şekil 4.16'da görülebilir. Bu sonuca göre Samandağ'da hakim rüzgar yönü 8. Sektör ( $240^{\circ}$ ) olan güneybatıdır. Tüm sektörlerin ortalaması için rüzgâr hızı 7,75 m/s, güç yoğunluğu ise  $557 \text{ W/m}^2$  dir.



Şekil 4.15. Samandağ için Wasp Climate Analyst rüzgâr iklimi sonuçları.

#### 4.2.2 Sayısal harita analizi

Samandağ için vektör haritalar Shuttle Radar Topography Mission (STRM) DEM haritalarından dönüştürülmüştür. STRM, NASA tarafından oluşturulmuş, uydu ile dünyanın  $56^{\circ}$  güney  $60^{\circ}$  kuzey enlemleri arasındaki 3 arc saniye çözünürlüğündeki dijital topografik haritalarıdır. İnternette ücretsiz olarak temin edilebilmektedir. Dosyalar .hgt formatındadır ve Global Mapper programı aracılığıyla düzenlenip WaSP harita (.map) formatına çevrilmiştir. Global Mapper vektör, raster, ağ ve DEM gibi birçok dijital harita ve modeli düzenleyebilen güçlü bir coğrafi bilgi sistemi (GIS) programıdır. STRM dosyalarının Global Mapper programına aktarılmış hali Şekil 4.17'de görülebilmektedir.



Şekil 4.16. STRM dosyalarının Global Mapper'daki hali.

Programaya ayrıca STRM Water Body (su kütleleri) dosyaları da yüklenmiştir. Su kütleleri dosyaları deniz, göl ve okyanus gibi suya sınırı olan tüm kara parçalarının dijital sınırlarını içermektedir ve tez çalışmasının amacı olan Açık Deniz uygulaması deniz üzerinde yapılacağından bu dosyaların temini büyük kolaylık sağlamaktadır. Kullanılan dosyalar Samandağ için “e035n35e” ve “e036n36e”dir ve dosyalar .shp formatındaki şekil dosyalarıdır. Tüm bu dosyalar programa aktarıldıktan sonra WaSP ve Map Editor için projeksiyon Enlem/Boylam'dan UTM (Universal Transverse Mercator) projeksiyonuna çevrilmiştir. Kuşak olarak 35 (24° doğu - 30° doğu, kuzey yarım küre) seçilmiş, WGS 84 koordinat standardı baz alınmıştır. Birim ise metre olarak seçilmiştir. Daha sonra her ada ve çevresi sınırlandırılıp “generate contours”

komutu ile eşyüksekti eğrileri türetilmiştir. Türetme işlemi sırasında yükselti aralığı 10 m seçilmiş ve programa interpolasyon yaptırılmıştır. İşlemlerin sonunda dosya WaSP harita formatı olan .map olarak kaydedilmiştir.

Tez çalışması deniz üzeri yapılmaktadır ve güncel teknolojiler belirli bir su derinliğine kadar fizibildir. WaSP'ta türbinleri yerleştirmek harita üzerinde yapıldığından derinliklerin yerleşim aşamasında görülebilir olması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için Map Editor'un arka plan haritası özelliğinden yararlanılmıştır. Arka plan haritaları olarak Seyir ve Oşinografi Dairesinin batimetri haritaları programa aktarılmıştır. Samandağ için 2136 numaralı harita kullanılmıştır. Arka plan haritasının kalibrasyonu tamamlandıktan sonra 20 m ve 45 m derinlik çizgileri, askeri eğitim ve atış sahaları, yasak sahaları, gemi trafik ve demirleme alanları değersiz (non attribute) çizgiler olarak harita üzerinde dijitalleştirilmiştir.

#### 4.2.3 Rüzgar atlası ve veri haritaları

WASP programı sayesinde herhangi bir yükseklikteki güç yoğunluğunu kullanarak istenilen yükseklikteki güç yoğunluğunu hesaplanabilir. Şekil 3'deki rüzgâr atlasında 10, 25, 50, 100 ve 200 metrelerdeki rüzgâr hızları ve güç yoğunlukları çeşitli pürüzlülük katsayılarına göre gösterilmiştir. Su yüzeyleri için pürüzlülük katsayısı 0'dır (WASP, 2010). Kurulması planlanan tesis deniz üstünde olduğundan bölge pürüzlülük değerinde R=0,000 değerine dikkat edilmelidir.

		R-class 0 (0,000 m)	R-class 1 (0,030 m)	R-class 2 (0,100 m)	R-class 3 (0,400 m)	R-class 4 (1,500 m)
Height 1 (z = 10 m)	U [m/s]	7,75	5,61	4,86	3,79	2,51
	P [W/m <sup>2</sup> ]	557	230	151	73	21
Height 2 (z = 25 m)	U [m/s]	8,47	6,66	5,95	4,95	3,77
	P [W/m <sup>2</sup> ]	714	364	264	156	69
Height 3 (z = 50 m)	U [m/s]	9,07	7,60	6,90	5,92	4,79
	P [W/m <sup>2</sup> ]	857	503	385	252	136
Height 4 (z = 100 m)	U [m/s]	9,78	8,81	8,06	7,05	5,93
	P [W/m <sup>2</sup> ]	1073	725	564	390	238
Height 5 (z = 200 m)	U [m/s]	10,65	10,49	9,59	8,45	7,26
	P [W/m <sup>2</sup> ]	1400	1189	925	655	422

Şekil 4.17. Çalışma bölgesindeki rüzgâr hızlarının ve güçlerinin yükseklik ve pürüzlülük katsayılarına göre değişimi

#### 4.2.4 Türbin seçimi ve mikro-konuşlandırma

Tez çalışmasında için seçilen türbin ve özellikleri; Vestas V90; 3,0 MW nominal güç, 90m rotor çapı şeklindedir.

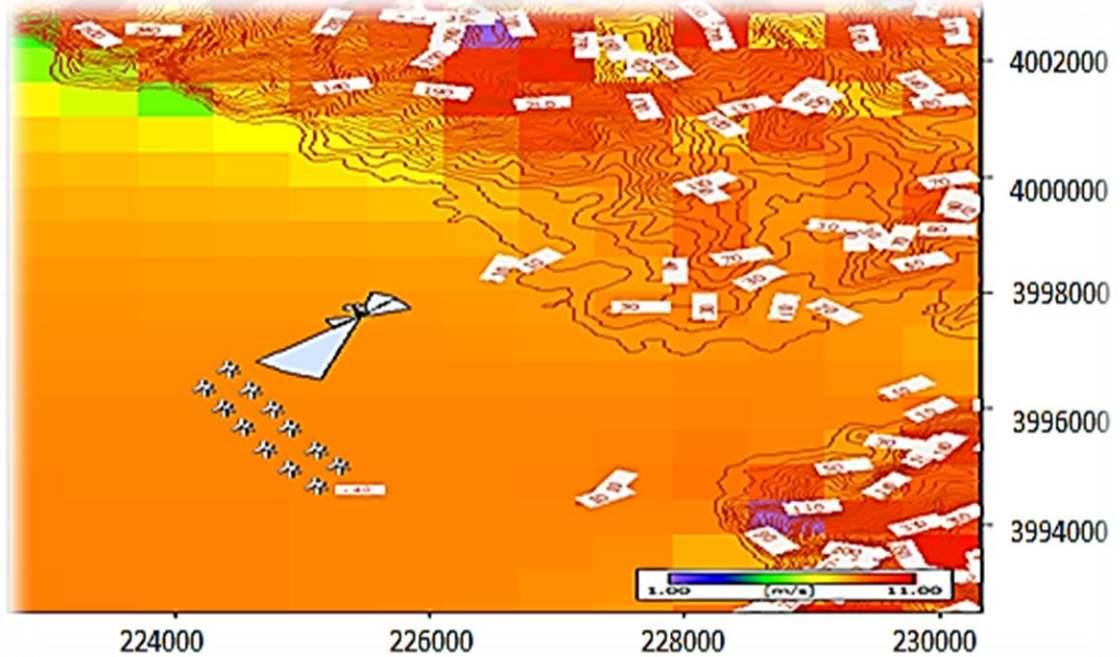
Çizelge 4.3. Vestas V90-3,0 MW rüzgâr türbini özellikleri

Rüzgâr Türbini Özellikleri	
<b>Model</b>	Vestas V90-3,0 MW
Kapasite	3,000 kW
Hub yüksekliği	80 m
Kanat genişliği	44 m
<b>Rotor</b>	
Çapı	90 m
Tipi	Upwind
Dönüş yönü	Saat yönünde
Kanat sayısı	3
Süpürme alanı	6,362 m <sup>2</sup>
Rotor hızı	Değişken 8,6-18,4 tur/dakika
<b>Jeneratör</b>	4 kutup asenkron değişken hızlı
Başlama hızı	3,5 m/s
Kesme hızı	25 m/s
Nominal rüzgâr hızı	15 m/s

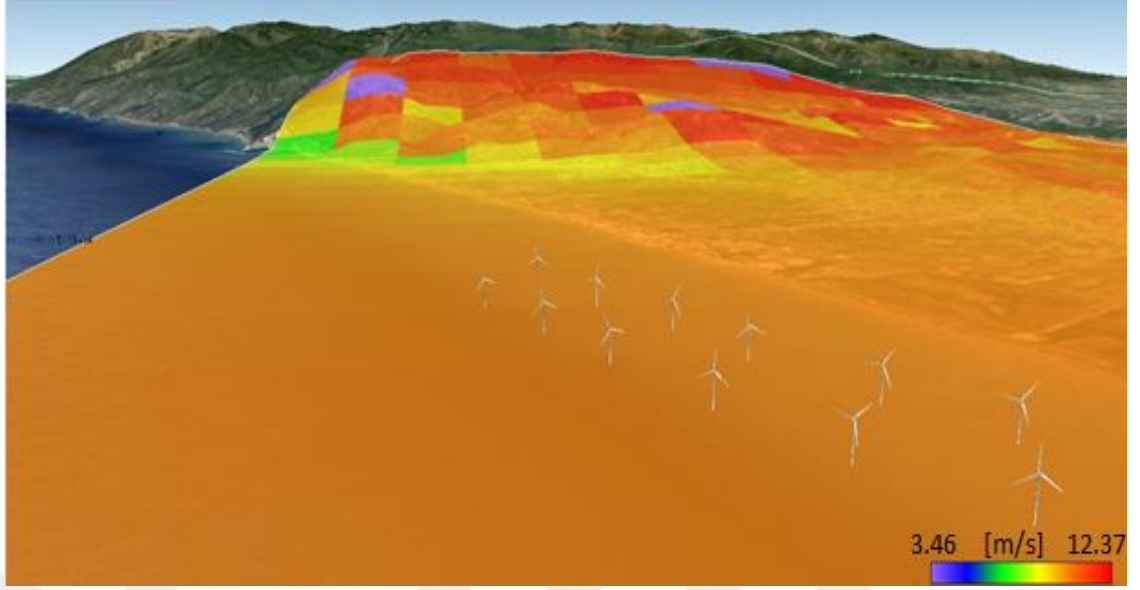
Samandağın rüzgâr profili gayet iyidir ve türbinlerin gücü ve rotor çapı ne kadar büyük olursa enerji eldesi ve fayda/maliyet oranı o kadar fazla olacaktır.

Türbin yerleşimi yapılırken rüzgâr tarlası menüsündeki iz değerleri ve veri haritası eş zamanlı olarak kullanılıp, hem türbin sayısı hem de türbin başına düşen enerji üretimi optimize edilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda Bölüm 3.2.6’da belirtilen türbinler arası olması gereken mesafe göz önünde bulundurularak, türbinler iz etkisini minimize ederek üretimi arttırmak için rüzgâra karşı yanal dizilimde 5 rotor çapı, dikey dizilimde 10 rotor çapı mesafeyle dizilmiştir. Türbin yerleşimi yapılırken hakim rüzgar yönleri ayrı ayrı incelenmiş, isabetli yerleşim yapabilmek için haritadaki ağ hücreleri yakınlaştırılmış ve düşük rüzgar hızına sahip hücrelerden kaçınılmıştır. Şekil 4.24’te 20-45m derinlik aralığında sular için yapılan türbin yerleşimi görülebilmektedir. Bu kategoride toplam 12 adet türbin bulunmaktadır.

Çalışmada muhtemel toplam enerji üretimini hesaplayabilmek için Çizelge 1’de özellikleri gösterilen Vestas marka V90 model 3 MW gücündeki 12 adet rüzgâr türbini kullanılmıştır. Güncel teknolojiler belirli bir derinliğe kadar türbin kurulumuna izin vermektedir. Derinlik arttıkça temel için gerekli malzeme ve iş gücü de artacağından maliyet yükselmektedir. Günümüzde ekonomik olarak 45 metreye kadar Açık Deniz türbin kurulumu yapılmaktadır (Malhotra, 2010).



Şekil 4.18. Antakya körfezine ait rüzgâr hızları haritası ve eş yükselti eğrileri



Şekil 4.19. Antakya körfezi olası türbin yerleşimi Google Earth izdüşümü

Türbin yerleşimi yapılırken deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali menüsündeki iz değerleri ve veri haritası eş zamanlı olarak kullanılıp, hem türbin sayısı hem de türbin başına düşen enerji üretimi optimize edilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda türbinler arası olması gereken mesafe göz önünde bulundurularak, türbinlerin iz etkisini minimize ederek üretimi arttırmak için rüzgâra karşı yanal dizilimle 5 rotor çapı, dikey dizilimle 10 rotor çapı mesafeye dizilmiştir.

#### 4.2.5 Enerji üretimi ve enerji geliri

Optimum türbin yerleşim noktaları belirlendikten sonra her türbin senaryosu için yıllık üretilen güç WaSP aracılığı ile hesaplanmıştır. Fizibilite çalışmasında en önemli iki kriter elde edilen net gelir ve toplam maliyettir. Enerji geliri hesaplanırken mevcut senaryo için üretilen güç, elektrik piyasası satış fiyatları ile çarpılıp, bakım ve işletme masrafları çıkarıldıktan sonra net gelire dönüştürülmektedir.

Elektrik piyasası satış fiyatı olarak Yenilenebilir Enerji Kanunu'nda belirtilen 5,5c€/kWh baz alınmıştır (Altuntaşoğlu, 2011). Rüzgar türbinleri ve parçalarının yerel imla edilmesi durumunda bu fiyat Çizelge 4.3'te belirtilen teşviklere göre artmaktadır. Bu ilaveler Euro bazında eklenince yerel imalat toplam fiyatı 7,55c€/kWh'a ulaşmaktadır. Net gelir hesaplanırken yerli üretim ve standart üretim olarak iki farklı

senaryo daha göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 4.4. Yerel imalat rüzgar türbinin ve bileşenlerine ait teşvik alım fiyatları  
(Altuntaşoğlu, 2011).

<b>Yerel İmalatı Yapılan Bileşen</b>	<b>Teşvik İlavesi (c\$/kWh)</b>
Kanat	0,8
Jeneratör ve Güç Elektronikliği	1,0
Türbin Kulesi	0,6
otor ve Nacelle Gruplarındaki Mekanik Aksamın1,3 Tamamı (Kanat Grubu ile Jeneratör ve Güç Elektronikliği İçin Yapılan Ödemeler Hariç)	

İşletim ve bakım masrafları Dünya'daki Kurulu Açık Deniz rüzgâr tarlalarının ortalamalarına göre 1,2c€/kWh belirlenip, üretilen enerji üzerinden hesaplanarak brüt gelirden çıkartılmıştır. Atlanmaması gereken bir diğer nokta ise Karbon emisyonu geliridir. Rüzgâr enerjisi kullanılarak elde edilen CO<sub>2</sub> salınım azaltması, aynı kurulu güce sahip bir kömür yakıtlı termik santrale kıyasla 860g/kWh olarak belirlenmiştir. Bu miktar güncel karbon emisyonu satış fiyatı olan 35€/ton üzerinden 3,01c€/7kWh.yıl olarak saptanmış ve bu değer üretilen enerji miktarı ile çarpılarak o senaryoya ait Karbon emisyonu geliri elde edilmiştir.

Optimum türbin yerleşim noktaları belirlendikten sonra türbin senaryosu için yıllık üretilen güç WAsP aracılığı ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5 Türbin bölgesine uyarlanmış veriler

Yerleşim	Lokasyon [m]	Türbin	H [m]	Rakım [m]	A [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]	h[m]	NetAEP [GWh]	W.loss [%]
Samandağ 1	(224453,9, 3996570,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,6	2,3	8,52	646	80	9,509	11,33
Samandağ 2	(224617, 3996199)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,6	2,3	8,54	652	80	9,504	11,89
Samandağ 3	(224797,3, 3995861,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,56	656	80	9,739	10,11
Samandağ 4	(224932,5, 3995545,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,58	661	80	9,733	10,55
Samandağ 5	(225135,4, 3995162,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,59	663	80	9,665	11,38
Samandağ 6	(225315,7, 3994892,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,6	664	80	9,687	11,34
Samandağ 7	(224247,8, 3996225,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,6	2,3	8,54	652	80	10,399	3,58
Samandağ 8	(224409,3, 3995887,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,56	656	80	10,379	4,15
Samandağ 9	(224555,5, 3995556,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,58	660	80	10,429	4,05
Samandağ 10	(224732,5, 3995171,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,59	663	80	10,52	3,54
Samandağ 11	(224924,8, 3994833,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,6	665	80	10,432	4,53
Samandağ 12	(225132,5, 3994540,0)	Vestas V90 (3 MW)	100	-40	9,7	2,3	8,61	666	80	10,551	3,58

Çizelge 4.6 Kurulacak rüzgâr türbinlerinden elde edilebilecek yıllık net ve brüt enerji miktarı

Parametre	Toplam	Ortalama	Minimum	Maximum
<b>NET AEP [GWs]</b>	120,546	10,046	9,504	10,551
<b>Brüt AEP [GWs]</b>	130,315	10,86	10,724	10,943



#### 4.2.6 Maliyet analizi

Güncel ve doğru değerleri içeren bir maliyet analizi yapabilmek için detaylı bir literatür taramasına gidilmiştir. Literatürdeki çalışmaların çoğunda değerler kurulu güç başına maliyet (€/M, vb.) cinsinden verilmiştir. Bu değerler hal hazırda kurulu Açık Deniz rüzgar tarlalarının maliyetlerinin güçlerine oranlanmasıyla elde edilmektedir. Türbin ve kule maliyet hesaplamalarında MW başına değerler isabetli sonuçlar vermekteyken, temel ve kablolama maliyetleri kıyıya uzaklık ve derinliğe bağlı olarak çok değişmekte ve MW başına maliyet değerlerini kullanarak hesaplama yapmak sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Proje, mühendislik, çevre analizi ve diğer maliyetlerin hesaplanmasında ise bu çalışma benzeri fizibilite analizlerinde detaylı hesaplamalar yapılması mümkün olmayıp MW başına değerlerin kullanılması normaldir.

Rüzgâr enerjisi hali hazırdaki üretim teknolojileri kullanılarak Watt başına yüksek sermaye gerektiren fakat işletme gideri düşük olan bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr türbinlerinin Watt başına kurulu güç maliyeti 0.9-1.1 €/W'dır (EWEA, 2015). Çalışmada bu değer ortalama 1.0 €/W olarak işleme alınmıştır. Büyük güçlü rüzgâr türbinlerinde maliyet dağılımı ve kurulması düşünülen rüzgâr türbini tesisine uyarlanmış hali Çizelge 4 'de gösterilmiştir (EÜAŞ, 2013).

Çizelge 4.7. Maliyet analizi tablosu

Elemanlar	Toplam Maliyetteki [%]	Payı	Toplam Kurulu Güç [kW]	Birim Maliyeti €/kW	Enerji Kurulum Maliyeti €	Toplam Maliyet €
Türbin	78				28.080.000,00 EUR	
Temel	3				1.080.000,00 EUR	
Elektrik Bağlantısı	7				2.520.000,00 EUR	
Şebeke Bağlantısı	5	36.000	1.000		1.800.000,00 EUR	36.000.000,00 EUR
Danışmanlık	1				360.000,00 EUR	
Arazi	3				1.080.000,00 EUR	
Finansal Maliyetler	2				720.000,00 EUR	
Yol Yapımı	1				360.000,00 EUR	

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin 5346 numaralı kanun ile belirtildiği üzere rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerince üretilen elektriğin devlet tarafından alım garantisi Watt başına 0.055 Euro cent'dir (Altuntaşoğlu, 2011).

Temel maliyet hesaplamaları temel tiplerine göre ağırlıklar su derinliği, zemin yapısı ve türbin ağırlığına göre hesaplanıp üretim maliyetleriyle çarpılarak her senaryo için ayrı ayrı yapılmıştır. Samandağ deniz formasyonu iri taneli çakıl taşları ve çoğunlukla kumdan oluşmaktadır (Yıldız ve Toker, 2001). Bu zemin yapısı yumuşak tip zemin kategorisine girmektedir ve temellerin stabil olması için daha fazla çelik kullanımı gerekmektedir. Literatür araştırması sonucu su derinliği-türbin gücü- temel ağırlığı ilişkisini gösteren Şekil 4.35'teki grafik oluşturulmuştur. Bu grafik yumuşak tip zeminde tek kazık ve üç ayak temellerini kapsamaktadır. Tek kazık tip temeller 20m'den derin sularda yeterli mukavemet ve sertliği sağlayamamaktadırlar, bu da kulenin doğal frekansıyla rotorun 1 devrinin frekansıyla eşleşip büyük ve kabul edilemez titreşimlere yol açmaktadır (Borgen, 2010). Dolayısıyla 20m-45m arası derinlikler için üç ayak tip temeller tercih edilmiştir.

Senaryodaki türbin yerleşim noktaları ve batimetri haritaları Surfer adlı programda eşleştirilerek her türbinin yerleşimi yapılan derinliği tespit edilmiştir. Şekil 4.35'te belirtilen değerler bu çalışmadaki senaryolara ait türbinlere ve yerleşim noktalarına göre interpolasyonu yapılarak her türbinin temel ağırlığı belirlenmiştir. Her senaryoya ait temel maliyeti o senaryonun türbin gücüne ve türbin sayısına özel toplam ağırlığın üretim maliyeti olan 1,75€/kg ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır. Elde edilen maliyete kurulum maliyeti, her türbin için 3,5 gün kurulum süresi, 2 adet vinçli şilep günlük kirası olan 139.200€ değerleriyle hesaplanarak eklenmiştir (ODE, 2007).

#### 4.2.7 Fizibilite değerlendirmesi

Senaryo için üretim gelirleri ve maliyetler hesaplandıktan sonra fayda maliyet analizi ile senaryoların fizibilitesi yapılmıştır. Bölüm 4.2.5 ve 4.2.6’da hesaplanan yıllık toplam maliyet, türbinlerin yerli ve standart imalat olması durumuna göre satış fiyatları ve enerji üretimi üzerinden hesaplanan yıllık gelirlere bölünerek geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Geri ödeme süreleri fizibilite çalışmasında sonucu etkileyen en önemli faktörlerden biridir fakat göz önünde bulundurulması gereken diğer önemli bir nokta geri ödeme süreleri tamamlandıktan sonra türbinlerin ömürlerini tamamlayıncaya kadar elde edecekleri toplam gelirdir.

Çizelge 5’deki geri ödeme süresi hesabında işletme maliyeti 0.01 €/kWs olarak alınmıştır (Ertuğrul, 2007). Yapılan hesaplamalar sonucunda türbinleri geri ödeme sürelerinin 6.3 ile 7 yıl arasında değiştigi gözlenmiştir. Geri ödeme oranı %100 olarak hesaba katılmış ve geri ödeme süresi hesaplanırken aşağıdaki formülden yararlanılmıştır.

$$\text{Geri Ödeme Süresi (YIL)} = \frac{\text{Türbin Başına Maliyet}}{\text{Yıllık Gelir} - \text{Yıllık İşletme Maliyeti}}$$

Çizelge 4.8. Rüzgâr Türbini Tesisi Geri Ödeme Süresi Hesapları

Türbin Adı	Toplam Maliyetteki Yüzdesi [%]	TürbinBaşına Maliyet [€]	Üretilen Yıllık Enerji [kWh]	BrimSatış Fiyatı [€/kWh]	Yıllık Gelir [€]	İşletme Maliyeti [€/YIL]	Geri Ödeme Süresi [YIL]
Samandağ 1	8,30%	3.000.000,00 EUR	9509000	0,055	522.995,00 EUR	95.090,00 EUR	7
Samandağ 2	8,30%	3.000.000,00 EUR	9504000	0,055	522.720,00 EUR	95.040,00 EUR	7
Samandağ 3	8,30%	3.000.000,00 EUR	9739000	0,055	535.645,00 EUR	97.390,00 EUR	6,8
Samandağ 4	8,30%	3.000.000,00 EUR	9733000	0,055	535.315,00 EUR	97.330,00 EUR	6,8
Samandağ 5	8,30%	3.000.000,00 EUR	9665000	0,055	531.575,00 EUR	96.650,00 EUR	6,9
Samandağ 6	8,30%	3.000.000,00 EUR	9687000	0,055	532.785,00 EUR	96.870,00 EUR	6,9
Samandağ 7	8,30%	3.000.000,00 EUR	10399000	0,055	571.945,00 EUR	103.990,00 EUR	6,4
Samandağ 8	8,30%	3.000.000,00 EUR	10379000	0,055	570.845,00 EUR	103.790,00 EUR	6,4
Samandağ 9	8,30%	3.000.000,00 EUR	10429000	0,055	573.595,00 EUR	104.290,00 EUR	6,4

Samandağ 10	8,30%	3.000.000,00 EUR	10520000	0,055	578.600,00 EUR	105.200,00 EUR	6,3
Samandağ 11	8,30%	3.000.000,00 EUR	10432000	0,055	573.760,00 EUR	104.320,00 EUR	6,4
Samandağ 12	8,30%	3.000.000,00 EUR	10551000	0,055	580.305,00 EUR	105.510,00 EUR	6,3



## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, rüzgâr enerjisi kapasitesinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan WAsP programı hakkında bilgi verilmiş ve örnek uygulama olarak Hatay Samandağ'da bulunan Meteoroloji ölçüm istasyonunda ait saatlik periyotlarla ölçülmüş ve kaydedilmiş rüzgâr yönleri ve hız verileri kullanılarak Antakya körfezi için rüzgâr türbini simülasyonu yapılmıştır. Uygulama sonucu olarak rüzgâr türbinine ait olası yıllık enerji üretimi 120,546 GW saat olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucu türbinlerin ortalama 6.6 yılda kendini amorti ettiği anlaşılmıştır. Türkiye'deki rüzgâr enerjisi ve diğer yenilenebilir enerjiye yönelik alım teşvikleri arttırıldığı takdirde bu geri ödeme süreleri belli oranda azalma gösterecektir. Yapılan bu çalışma sonucunda bölgenin rüzgâr türbini kurulması açısından hem rüzgâr potansiyeli hem de kurulum alanı bakımından uygun olduğu görülmüştür.

Türkiye, gerek konumu gerek coğrafi yapısı ile rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi yapan tesislerin tatbiki için uygun durumdadır. Özellikle Hatay ilinin güney batısı yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir. Bu bölge haricinde kalan diğer bölgelerde de uygun rüzgâr enerjisi potansiyeli mevcuttur. Bu potansiyelden fayda sağlanabilmesi, gerekli fizibilite çalışmalarının yapılmasına ve devlet teşviklerinin arttırılmasına bağlıdır.

Bu çalışmanın deniz üstü rüzgâr enerjisi üretimine bir örnek olarak Antakya körfezinde gerçekleştirilen fizibilite çalışmasının bu alanda yapılacak yatırımlara yol gösterici olacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Altuntaşoğlu, Z.T., 2011. “Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi, Mevcut Durum, Sorunlar”, **Mühendis ve Makina** Cilt: 52 Sayı: 617, s. 56-63
- Borgen, E., 2010. Floating Wind Power in Deep Water –Competitive with Shallow- Water Wind Farms?. **Modern Energy Review** Vol.2 Issue 1. London
- Breton, S.P., Moe, G., 2009. Status, Plans and Technologies for Offshore Wind Turbines in Europe and North America. Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology. Norveç
- Burton, T., 2001. **Wind Energy Handbook**. West Sussex.
- Camporeale, C., 2006. Offshore Wind Farms in Italy: **The Sicily Case**. Rome
- Cockerilla, T.T., Kühn, M., van Bussel, G.J.W., Bierboom, W., Harrison, R., 2001. Combined Technical and Economic Evaluation of The Northern European Offshore Wind Resource. Renewable Energy Centre, School of Sciences, University of Sunderland. İngiltere. Tacke Windenergie GmbH, Almanya. Institute for Wind Energy, Delft University of Technology, Hollanda.
- Dhanju, A., 2010. **Offshore Wind Energy** : Its Place in the US Power Mix. Bureau Of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement
- DMİ, 2015. **Rüzgar Enerjisi Tahmin Sistemi (RETS)**, Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara. [www.dmi.gov.tr/FILES/tahmin/RETS-kitapcik.pdf](http://www.dmi.gov.tr/FILES/tahmin/RETS-kitapcik.pdf).
- Dua, M., Manwell, J.F., McGowan, J.G., 2008. **Utility Scale Wind Turbines on a Grid-Connected Island**: A Feasibility Study. Department of Mechanical and Industrial Engineering, Renewable Energy Research Laboratory (RERL), University of Massachusetts. ABD
- E.ON, 2010. **E.ON Offshore Wind Energy Factbook**- E.ON Climate & Renewables EPDK, 2015. <http://lisans.epdk.org.tr/epvys-web/faces/pages/lisans/elektrikUretim/elektrikUretimOzetSorgula.xhtml>  
Alındığı Tarih :11.04.2015
- EÜAŞ, 2014. **Elektrik Üretim Sektör Raporu**, Elektrik Üretim Anonim Şirketi
- EWEA, 2014. **The European Offshore Wind Industry Key Trends and Statistics 2014**, European Wind Energy Association. <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-European-Offshore-Statistics-2014.pdf>
- Gaudiosi, G., 1999. **Offshore Wind Energy Prospects**. ENEA, Department of Energy. İtalya
- GWEC, 2014. **Global Wind Report** – Annual Market Update, 2014. [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/02/GWEC\\_GlobalWindStats2014\\_FINAL\\_10.2.2015.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/02/GWEC_GlobalWindStats2014_FINAL_10.2.2015.pdf)
- GWEO, 2014. **Global Wind Energy Outlook, 2014**. [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014\\_WEB.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014_WEB.pdf)
- Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U., Eskildsen, K., 2001. **Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines**. Industrial Electronics Society, IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE 29 Nov.-2 Dec. 2001, Vol. 3, pp.2000 – 2005.
- Hau, E., 2006. **Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics** 2nd Edition With 552 Figures and 101 Tables. Springer. Almanya.
- Johnson, G. L., 2001. **Wind Energy Systems**, Electronic Edition, Manhattan, KS
- Malhotra, S., 2010. **Design and Construction Considerations for Offshore Wind Turbine Foundations** New York Issue No. 65
- Malkoç, Y., 2008. **Rüzgar Enerjisi Kaynaklarımız**, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel

- Müdürlüğü. (EİE)
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., 2002. **Wind Energy Explained- Theory, Design and Application**, John Wiley & Sons Ltd University of Massachusetts, Amherst, USA.
- Markard, J., Petersen, R., 2009. **The Offshore Trend: Structural Changes In The Wind Power Sector. Cirus - Innovation Research in Utility Sectors**, Eawag, Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology. İsviçre
- Mukund R. Patel, 1999. **Wind and Solar Power System**, CRC Press, New York  
- A Report to the Renewables Advisory Board (RAB) & DTI
- ODE, 2007. **Study of The Costs of Offshore Wind Generation-** A Report to the Renewables Advisory Board (RAB) & DTI
- Özemre, A.Y., 1993. Konvansiyonel Ve Alternatif Enerji Kaynakları Açısından Dünya'nın Geleceği.
- Snyder, B., Kaiser, M.J., 2009. Ecological and Economic Cost-Benefit Analysis of Offshore Wind Energy. LSU Center for Energy Studies, Energy Coast and Environment Building. ABD
- SWEP, 2009. San Francisco Offshore Wind Farm Analysis Preliminary Report Stanford Solar and Wind Energy Project Stanford University
- TREİR, 2015. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği – **Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu**. 2015.  
<[http://www.tureb.com.tr/attachments/article/420/T%C3%BCrkiye%20R%C3%BCzgar%20Enerjisi%20C4%B0statistik%20Raporu\\_Ocak%202015.pdf](http://www.tureb.com.tr/attachments/article/420/T%C3%BCrkiye%20R%C3%BCzgar%20Enerjisi%20C4%B0statistik%20Raporu_Ocak%202015.pdf)>
- Url-1 <<http://www.oil-price.net/>>, Alındığı Tarih: 11.04.2015
- Url-2 <[http://wwindea.org/webimages/WWEA\\_WWER2013\\_Countries.pdf](http://wwindea.org/webimages/WWEA_WWER2013_Countries.pdf)>, Alındığı Tarih: 11.04.2015
- Url-3 <<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=427&t=3>> Alındığı Tarih: 11.04.2015
- Url-4 <[http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/REPA- duyuru\\_01.html](http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/REPA- duyuru_01.html)> Alındığı Tarih: 11.04.2015
- Url-5 <<http://lisans.epdk.org.tr/epvys-web/faces/pages/lisans/elektrikUretim/elektrikUretimOzetSorgula.xhtml>> Alındığı Tarih : 11.04.2015
- Url-6 <[http://www.siemens.com.tr/web/1885-13816-1-%201/siemens\\_urunler%20cozumler/enerji/ruzgar\\_turbinleri/swt-3\\_6-107](http://www.siemens.com.tr/web/1885-13816-1-%201/siemens_urunler%20cozumler/enerji/ruzgar_turbinleri/swt-3_6-107)> Alındığı Tarih: 11.04.2015
- Url-7 <<http://www.tureb.com.tr/attachments/artcile/2013/1.%20ICCI>>
- Url-8 <<http://www.lorc.dk/Knowledge/Offshore-renewables-map/Offshore-wind-farms?sortby=Country&sortby2=&sortorder=asc>> Alındığı Tarih: 27.10.2011
- WAsP, 2010. Program Help Files, Denmark
- WWEA, 2014. World Wind Energy Half-Year Report 2014, World Wind Energy Association.  
[http://www.wwindea.org/webimages/WWEA\\_half\\_year\\_report\\_2014.pdf](http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf)



## ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1984 yılında Lefkoşe’de doğdu. İlkokulu İstanbul’da, Ortaokul ve Liseyi ise İskenderun İstiklal Makzume Anadolu Lisesinde tamamladı. Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü 2002 yılında kazandı. Lisansın ardından İtalya’nın Milan şehrine giderek burada European School Of Economics’de pazarlama ve işletme yüksek lisansını tamamladı. Eğitim sürecinin ardından yurda dönerek Mitsubishi Electric firmasında mühendis olarak 3 yıl çalıştıktan sonra kendi işini kurmak üzere Hatay İskenderun’a geldi. Halen Mekanik Tesisat üzerine SMM sahibidir ve bu konuda uzman mühendis olarak görevini sürdürmektedir.

