

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL KİLYOS (KUMKÖY) BÖLGESİNİN RÜZGAR KAYNAKLI
ENERJİLER AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet Emre HAKYEMEZ**

Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Haziran 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL KİLYOS (KUMKÖY) BÖLGESİNİN RÜZGAR KAYNAKLI
ENERJİLER AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet Emre HAKYEMEZ
(301071018)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Bihrat ÖNÖZ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sedat KABDAŞLI (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)**

Haziran 2011

ÖNSÖZ

Farklı şekilleri arasında çevrime uğraması ile yeryüzünde hayatın sürdürülmesini sağlayan başlıca etmen olan enerjiye ulaşmak tarih boyunca insanlığın birinci önceliği olma özelliğini korumuştur. Bütün savaşların ana nedeni çeşitli formlardaki enerjiyi elde etme temelli olmuş, ülke politikaları enerjinin kolay ulaşımı ve çeşitliliği prensipleriyle şekillenmiştir.

Yaşamın sürmesini sağlayan güneş enerjisi, kimyasal enerji ve mekanik enerji kaynaklarının yanında, insanoglunun yaşam şartlarının hızla değişmesi ile sanayileşme ve şehirleşmenin etkileri, fosil yakıtların ve bir ikincil enerji kaynağı olan elektrik enerjisinin de vazgeçilmezlerimiz arasında yer almasına neden olmuştur.

Ancak, hem hızla tükenmekte olması ve yaşam alanımızda geri dönüşü imkansız olumsuz etkilere yol açması nedenleri ile fosil yakıtların çekiciliğinin her geçen gün azalması, hem de dışa bağımlı olmayan ve ucuz enerji elde etme istediğinden dolayı ülkeler için enerji üretiminde çeşitliliğin önemi, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına rağbet edilmesini sağlamış ve bu kaynaklar aracılığıyla enerji elde edilmesinin yaygınlaşması yönünde doğru politikaların oluşturulabilmesi açısından, konuyla ilgili çalışmaların artarak devam etmesi gerekliliğini doğurmuştur.

Bu tez çalışması ile böylesine önemli bir konuda benim de bir katkı olmasını sağlayan ve bu süreç boyunca yardımlarını ve anlayışını asla eksik etmeyen tez danışmanım, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Ana Bilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Bihrat ÖNÖZ'e; tezle ilgili her ihtiyacım olduğunda esirgemedikleri bilgi ve desteklerinden dolayı Arş. Gör. Aslıhan ALBOSTAN ve Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU ile arkadaşlarım Bahadır BULUT ve Barış GÜZEL'e; gösterdikleri ilgi ve sabır için iş arkadaşlarıma; başından sonuna kadar her an desteklerini ve sevgilerini hissettirerek bana güç veren ailem ve nişanlım Elif Seda SULUOĞLU'na; temiz ve yenilenebilir enerji teknolojilerine hakettiği önemi ve desteği vererek "Başka Bir Dünya"nın mümkün olabileceğini düşünen herkese sonsuz teşekkürler.

Mayıs 2011

Mehmet Emre HAKYEMEZ

Çevre Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR VE ENERJİ	3
2.1 Rüzgar Enerjisi	5
2.1.1 Rüzgar Gücü Potansiyelinin Belirlenmesinde Temel Denklemler	6
2.1.2 Rüzgar Türbini	10
2.1.3 Rüzgar Gücünden Enerji Üretimini Etkileyen Faktörler	12
2.1.3.1 Rüzgar Özelliğinden Kaynaklanan Etkiler.....	12
2.1.3.2 Bölgenin Yapısından Kaynaklanan Etkiler.....	13
2.1.3.3 Rüzgar Türbininden Kaynaklanan Etkiler.....	15
2.1.4 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	16
2.1.5 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi.....	18
2.1.5.1 Dünyada Rüzgar Enerjisi.....	18
2.1.5.2 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi.....	21
2.2 Dalga Enerjisi	25
2.2.1 Dalga Gücü Potansiyelinin Belirlenmesinde Temel Denklemler	27
2.2.2 Dalga Türbini	28
2.2.3 Dalga Gücünden Enerji Üretimini Etkileyen Faktörler	30
2.2.4 Dalga Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	30
2.2.5 Dünyada ve Türkiye’de Dalga Enerjisi.....	32
2.2.5.1 Dünyada Dalga Enerjisi.....	32
2.2.5.2 Türkiye’de Dalga Enerjisi.....	33
3. RÜZGAR VERİLERİNİN ANALİZİ	35
3.1 Çalışmanın Yeri ve Bölgenin Genel Özellikleri.....	35
3.2 Veri Toplama.....	37
3.3 Rüzgar Verilerinin Değişkenliği	38
3.4 Veri Analizi	40
3.4.1 Rüzgar Gülü	40
3.4.2 Mevsimsellik Analizi	45
3.4.2.1 Hız - Süreklilik Çizgisi.....	45
3.4.2.2 Mevsimsellik Hesabı.....	51
3.4.3 WAsP	55
3.4.3.1 OWC Sihirbazı.....	56
3.4.3.2 Vektör Harita.....	59

3.4.3.3 Rüzgar Atlası Oluşturma.....	61
4. ENERJİ ÜRETİMİ VE MALİYET HESABI	65
4.1 Rüzgar Enerjisi Üretimi.....	65
4.1.1 Türbin Yerleştirme (Mikro Konuşlandırma).....	65
4.1.2 Türbinlere Göre Yıllık Rüzgar Enerjisi Üretim Miktarları	67
4.1.3 Kapasite Faktörü ve Maliyet Analizi	69
4.2 Dalga Enerjisi Üretimi.....	74
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR.....	85
EKLER.....	89

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Ar-Ge	: Araştırma-Geliştirme
BAP	: Bilimsel Araştırma Projeleri
CERC	: Coastal Engineering Research Center
C	: Santigrad
Ct	: Thrust Coefficient
CO₂	: Karbon Dioksit
D	: Doğu
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri
DWIA	: Danish Wind Industry Association
EWEA	: European Wind Energy Association
GSM	: Global System For Mobile Communications
GW	: Gigawatt
HSE	: Hız-Süreklilik Eğrisi
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
K	: Kuzey
Km	: Kilometre
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt Saat
MATLAB	: Matrix Laboratory
MÖ	: Milattan Önce
MW	: Megawatt
MWh	: Megawatt Saat
OWC	: Observed Wind Climate
Pa	: Pascal
REPA	: Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası
RES	: Rüzgar Enerjisi Santrali
SWT	: Siemens Wind Turbine
TW	: Terawatt
UK	: United Kingdom
UTM	: Universal Transverse Mercator
V	: Volt
W	: Watt
WAsP	: Wind Atlas Analysis and Application Program
WMO	: World Meteorological Office
€	: Euro
\$: Dolar

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bölge Özelliğine Göre Pürüzlülük Katsayıları.....	9
Çizelge 2.2 : 2009 ve 2010 Yıllarında Rüzgar Gücü Kapasitesi'ne Göre İlk 10 Ülke.....	21
Çizelge 2.3 : Türkiye'de İşletmedeki Rüzgar Elektrik Santralleri.....	24
Çizelge 3.1 : Farklı Göbek Yükseklikleri İçin Zamanın Belirli Yüzdelerindeki Rüzgar Hızları.....	49
Çizelge 3.2 : Türbinlerin Enerji Ürettiği Sürelerin Toplam Ölçüm Sürelerine Oranları.....	49
Çizelge 3.3 : Yıllık Teorik Enerji Üretim Değerleri (MWh).....	51
Çizelge 3.4 : OWC Wizard Hesap Sonuçları (1984-1998 DMİ Verileri).....	57
Çizelge 3.5 : OWC Wizard Hesap Sonuçları (2007-2010 İTÜ Verileri).....	58
Çizelge 4.1 : Yıllık Enerji Üretimleri (MWh).....	68
Çizelge 4.2 : Türbinlerin Yıllık Kapasite Faktörleri (%).....	69
Çizelge 4.3 : DMİ Verilerine Göre Enerji Üretiminin Maliyet Değerleri.....	71
Çizelge 4.4 : İTÜ Verilerine Göre Enerji Üretiminin Maliyet Değerleri.....	71
Çizelge 4.5 : DMİ ve İTÜ Verilerine Göre Enerji Üretiminin Fayda Değerleri.....	72
Çizelge 4.6 : DMİ ve İTÜ Verilerine Göre Yatırımların Toplam Yıllık Maliyetleri, Toplam Yıllık Gelirleri ve Geri Ödeme Süreleri.....	72
Çizelge 4.7 : Türbin Aksamaları ve İmalatlarının Yurt İçinde Gerçekleşmesi Durumunda Elektrik Satış Fiyatında Sağlayacakları Artışlar.....	73
Çizelge 4.8 : Yurt İçi İmalat Varsayımına Göre Fayda/Maliyet Durumu ve Geri Ödeme Süreleri.....	73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Koriolis Kuvvetinin Küresel Rüzgarlara Etkisi.....	4
Şekil 2.2 : Türbine Gelen Rüzgar Hızındaki Değişim.....	6
Şekil 2.3 : Güç verimi - Rüzgar hızı oranı eğrisi.....	7
Şekil 2.4 : Farklı Şekil Parametrelerinde Weibull Dağılımı.....	10
Şekil 2.5 : Rüzgar Tarlası.....	11
Şekil 2.6 : Rüzgar Türbinin Genel Yapısı.....	11
Şekil 2.7 : Pour La Cour Tarafından Yapılan Rüzgar Türbini.....	17
Şekil 2.8 : Dünyada Toplam Kurulu Güç (MW).....	18
Şekil 2.9 : Dünya Rüzgar Atlası.....	19
Şekil 2.10 : Dünyada Teknik Rüzgar Potansiyel Dağılım Payları.....	20
Şekil 2.11 : 2007-2010 Yılları Arasında Kıtalarla Göre Kurulu Güç Dağılımı.....	20
Şekil 2.12 : Türkiye Rüzgar Hız Dağılımı (30m).....	22
Şekil 2.13 : Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası.....	23
Şekil 2.14 : Türkiye 1998-2009 Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü.....	24
Şekil 2.15 : Kurulu Rüzgar Gücünde En Yüksek Artış Oranına Sahip 10 Ülke.....	25
Şekil 2.16 : Deniz Yüzey Dalgalarının Enerjilerinin Yaklaşık Dağılımı ve Dalgaların Sınıflandırılması.....	26
Şekil 2.17 : Dalgada Depolanmış Kinetik ve Potansiyel Enerji.....	27
Şekil 2.18 : Salınımlı Dalga Kolonu (Solda) ve Nokta Sönümlenmeli (Sağda) Dalga Enerjisi Dönüştürücüleri.....	29
Şekil 2.19 : Zayıflatıcı Araçlar (Solda) ve Üstten Aşan Araçlar (Sağda).....	29
Şekil 2.20 : Dalga Terminolojisi.....	30
Şekil 2.21 : Dünya Kıyılarında Dalga Enerjisi Potansiyeli (kW/m).....	33
Şekil 2.22 : Dalga Tahminlerinin Yapıldığı Bölgelerin Yıllık Ortalama Enerjileri (kWh/m.yıl).....	34
Şekil 3.1 : Kilyos (Kumköy)'un İstanbul İli Üzerindeki Yerinin Uydu Görüntüsü...35	35
Şekil 3.2 : Kilyos (Kumköy)'un Uydu Görüntüsü.....	36
Şekil 3.3 : İstanbul'da Rüzgar Hızı Dağılımı (50m).....	36
Şekil 3.4 : İTÜ BAP Kapsamında Kilyos'ta Kurulan Anemometre ve Rüzgar Kayıt Ünitesi.....	37
Şekil 3.5 : DMİ Kilyos Meteoroloji Gözlem İstasyonu.....	38
Şekil 3.6 : Kilyos Bölgesinde Ölçülen Rüzgar Verileri Standart Sapma Değerleri... 40	40
Şekil 3.7 : 1984-1998 Arası DMİ Verileri Kış Ayları: (a) Aralık. (b) Ocak. (c) Şubat.....	42
Şekil 3.8 : 1984-1998 Arası DMİ Verileri İlkbahar Ayları: (a) Mart. (b) Nisan. (c) Mayıs.....	42
Şekil 3.9 : 1984-1998 Arası DMİ Verileri Yaz Ayları: (a) Haziran. (b) Temmuz. (c) Ağustos.....	42
Şekil 3.10 : 1984-1998 Arası DMİ Verileri Sonbahar Ayları: (a) Eylül. (b) Ekim. (c) Kasım.....	42

Şekil 3.11 : 2007-2010 Arası İTÜ Verileri Kış Ayları: (a) Aralık. (b) Ocak. (c) Şubat.....	43
Şekil 3.12 : 2007-2010 Arası İTÜ Verileri İlkbahar Ayları: (a) Mart (b) Nisan. (c) Mayıs.....	44
Şekil 3.13 : 2007-2010 Arası İTÜ Verileri Yaz Ayları: (a) Haziran. (b) Temmuz. (c) Ağustos.....	44
Şekil 3.14 : 2007-2010 Arası İTÜ Verileri Sonbahar Ayları: (a) Eylül. (b) Ekim. (c) Kasım.....	44
Şekil 3.15 : 1984-1998 Yılları Arasında DMİ Tarafından Kumköy’de Ölçülen Rüzgar Hızı Verilerinin Hız-Süreklilik Eğrisi.....	47
Şekil 3.16 : 2007-2010 Yılları Arasında İTÜ Enerji Enstitüsü Tarafından Kumköy’de Ölçülen Rüzgar Hızı Verilerinin Hız-Süreklilik Eğrisi.....	48
Şekil 3.17 : DMİ Rüzgar Hızı Verileri (1984-1998), Hız (m/s) - Esme Süresi (Saat) Grafiği.....	50
Şekil 3.18 : İTÜ Enerji Enstitüsü Rüzgar Hızı Verileri (2007-2010), Hız (m/s) - Esme Süresi (Saat) Grafiği.....	50
Şekil 3.19 : DMİ Rüzgar Hızı Verileri (1984-1998), Zamanın %1’inde Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.....	52
Şekil 3.20 : DMİ Rüzgar Hızı Verileri (1984-1998), Zamanın % 5’inde Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.....	52
Şekil 3.21 : DMİ Rüzgar Hızı Verileri (1984-1998), Zamanın % 95’i ile % 100’ü Arasında Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.....	53
Şekil 3.22 : İTÜ Enerji Enstitüsü Rüzgar Hızı Verileri (2007-2010), Zamanın % 5’inde Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.....	53
Şekil 3.23 : İTÜ Enerji Enstitüsü Rüzgar Hızı Verileri (2007-2010), Zamanın % 95’i ile % 100’ü Arasında Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.....	54
Şekil 3.24 : OWC Sihirbazı Tarafından Çizilen Rüzgar Gülü ve Hız-Zaman (%) Grafiği (DMİ verileri).....	57
Şekil 3.25 : OWC Sihirbazı Tarafından Çizilen Rüzgar Gülü ve Hız-Zaman (%) Grafiği (İTÜ verileri).....	58
Şekil 3.26 : Kilyos Sayısal Vektör Haritası.....	59
Şekil 3.27 : Kilyos’ta Farklı Pürüzlülük Özelliği Gösteren Arazilerin Dağılımı.....	60
Şekil 3.28 : 1984-1998 DMİ Verileri İçin 60 m Yükseklikteki Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımını Veren Rüzgar Atlası.....	61
Şekil 3.29 : 2007-2010 İTÜ Verileri İçin 60 m Yükseklikteki Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımını Veren Rüzgar Atlası.....	62
Şekil 3.30 : 1984-1998 DMİ Verileri İçin 60 m Yükseklikteki Ortalama Güç Yoğunluğu Dağılımını Veren Rüzgar Atlası.....	62
Şekil 3.31 : 2007-2010 İTÜ Verileri İçin 60 m Yükseklikteki Ortalama Güç Yoğunluğu Dağılımını Veren Rüzgar Atlası.....	63
Şekil 4.1 : WAsP Paket Programında Verilen Türbin Güç Eğrileri İçin Bir Örnek (Vestas V80 2MW).....	66
Şekil 4.2 : Meteoroloji Gözlem İstasyonu ve Rüzgar Türbininin Rüzgar Atlası Üzerinde Görünümü.....	67
Şekil 4.3 : Türbinlerin Yıllık Enerji Üretimlerinin (MWh) DMİ ve İTÜ Verilerine Göre Karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.4 : Türbinlerin Yıllık Maksimum Enerji Üretim Potansiyelleri.....	69
Şekil A.1 : Farklı Türbin Yükseklikleri İçin Hız-Süreklilik Çizgileri (DMİ Verileri): (a) 50 m. (b) 60 m. (c) 67 m. (d) 80 m.....	91

Şekil A.2 : Farklı Türbin Yükseklikleri İçin Hız-Süreklilik Çizgileri (İTÜ Verileri):
(a) 50 m. (b) 60 m. (c) 67 m. (d) 80 m.....93

İSTANBUL KİLYOS (KUMKÖY) BÖLGESİNİN RÜZGAR KAYNAKLI ENERJİLER AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

İnsan faaliyetleri sonucu, kendini yenilemesi için yeterli vakit tanınmadan kirletilen dünya gezegeni üzerinde yaşam alanlarının hızla azalması ve bunda da başrolün fosil yakıtlarda olması, alternatif enerji kaynakları ile ilgili gelişmelerin hayati öneme sahip olduğu konusunda şüphe bırakmamaktadır.

Fosil yakıtların çevresel açıdan neden oldukları olumsuzluklar ve atom enerjisinin (nükleer) radyasyon tehlikesi sebebiyle dünya kamuoyunda oluşturduğu olumsuz imajın yanı sıra, tükenmekte olan hammaddelere sahip oldukları gerçeği sebebiyle de gelecekle ilgili endişelerin odak noktasında bu iki enerji kaynağı vardır. Bu nedenle yenilenebilir enerji teknolojilerinin artık “alternatif” enerji teknolojileri olarak görülmemesi ve konvansiyonel sistemlere göre bazı dezavantajlarını (Emre amade olmayışları, yüksek maliyetleri, bilgi ve veri yetersizliği vb.) ortadan kaldırmaya yönelik çalışmaların arttırılması gerekmektedir.

Çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları arasından rüzgar kökenli iki enerji kaynağı: Rüzgar Enerjisi ve Dalga Enerjisi üzerinde durulmuştur. Her iki enerji kaynağı hakkında temel bir bilgi edinimi sağlamak amacıyla literatür taraması sonucu derlenen bilgilerin sunulmasının ardından; Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün Kilyos'taki gözlem istasyonunun ölçümlerinden alınan, 1984-1998 yılları arasındaki saatlik rüzgar verileri ile İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nün Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında bölgede ölçülen 2007-2010 yılları arasındaki 15 dakikalık rüzgar verileri kullanarak bölgenin rüzgar istatistikleri oluşturulmuş ve mevsimsellik analizi yapılmıştır. Kilyos için oluşturulmuş olan rüzgar profilinin ve WAsP paket programının yardımıyla söz konusu durum için farklı türbin tiplerine göre rüzgar enerjisi üretim potansiyelinin hesaplanması, fayda/maliyet durumunun değerlendirilmesi ve Türkiye'deki dalga enerjisi potansiyelini belirlemek üzere gerçekleştirilmiş olan “Türkiye Kıyılarında Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi” adlı çalışmanın Kilyos için aynı veriler kullanılarak ulaşılan sonuçlarının da aktarılmasının ardından, söz konusu enerji kaynakları bakımından bölge için çeşitli sonuçlara varılmış ve öneriler geliştirilmiştir.

ASSESSMENT OF ISTANBUL KILYOS (KUMKOY) REGION IN TERMS OF WIND ORIGINATED ENERGY SOURCES

SUMMARY

The rapid shrink of living spaces on the planet earth as a result of being polluted by human activities without giving time for self reformation, which are mostly originated by fossil fuels, leaves no doubt about the fact that the development in alternative energy sources is very essential.

Fossil fuels and atomic (nuclear) energy are at the focus of concerns about the future due to running out and creating negative image on public opinion with the adverse effects such as the impacts of fossil fuels on environment and radiation risk of atomic energy. Therefore, sustainable energy technologies shouldn't be considered as "alternative" energy technologies anymore, and the studies for eliminating the disadvantages (Unavailability period, high costs, inadequate information and data etc.) compared to conventional systems, are required to be enhanced.

In this study, two wind originated sustainable energy sources -Wind Energy and Wave (Ocean) Energy- have been addressed. Wind statistics have been generated via the hourly data between 1984-1998 gathered from observation station of Turkish State Meteorological Service in Kilyos and 15 minute data between 2007-2010 measured under the scope of Istanbul Technical University Energy Institute scientific research projects; and seasonality analysis have been performed after presenting the compiled information from literature review with the purpose of basic knowledge acquisition. Furthermore, energy production potential of different turbine types have been calculated via WAsP with the help of the wind profile created for Kilyos, cost-benefit analysis have been performed and the relevant results of a study on the wave energy potential of Turkey's coasts have been submitted. The suggestions and comments, on the other hand, specified as the conclusion.

1. GİRİŞ

Dünyadaki enerji talebi, nüfusun artışı ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte hızla artarken; uzun yıllardır bu talebi karşılamakta kullanılan fosil yakıtlar da aynı hızla tükenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına göre yegane belirgin üstünlükleri emre amadelik ve oturmuş sistemleri olan fosil yakıtların tükeniyor olmaları, sürekli artan maliyetleri, belirli ülkelerin kontrolünde olmaları ve hava kirliliği, su kirliliği, küresel ısınma gibi en temel çevresel sorunların başlıca sebebi olmaları, yaşanabilir bir dünya için yenilenebilir enerjinin şart olduğu konusundaki bilincin günden güne artmasına neden olmuştur.

Yapılan çalışmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya enerji talebini teorik olarak karşılayabileceğini gösterse de, uygulamadaki bazı zorluklar ve bu alandaki gelişmelerin konvansiyonel enerji kaynaklarına göre çok yeni olması, dünyadaki enerji üretim ve tüketiminde halen fosil yakıtların en büyük paya sahip olmasına yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji eldesinin uygulamadaki en büyük sorunu, kaynaklara erişimin doğanın inisiyatifinde olmasıdır. Rüzgar esmediğinde rüzgar türbininden güç eldesi mümkün olmazken; bir termik santral, kendisini besleyen fosil yakıtlar tamamen tükenene kadar her ihtiyaç duyulduğu anda güç üretebilecektir. Bu durumda rüzgar türbininin yerleştirildiği bir bölgedeki türbinler, türbini çalıştırmaya yetecek rüzgarın esmediği her dakika ölü yatırım olarak değerlendirilecektir ve bu süre arttıkça türbin maliyetleri doğrultusunda maddi zarar artacaktır. Her ne kadar çevre sorunları dünyanın geleceğini tehdit edecek boyutlara erişmekte olsa da, enerji üretiminde halen maliyetlerin ön planda olduğu günümüzde bu durum, yenilenebilir enerjinin aleyhine bir durumdur. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarına erişim imkanlarının bölgelere göre en iyi şekilde analiz edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Fosil yakıtlar bakımından neredeyse tamamen dışarı bağımlı olan ülkemizde yapılan araştırmalar, yenilenebilir enerji potansiyelinin, bu enerji kaynaklarında başı çeken birçok ülkeye göre daha fazla olduğunu göstermektedir.

Ancak, konuyla ilgili araştırma ve uygulamaların yetersiz oluşundan dolayı ülkemizde bu kaynaklardan yeterince yararlanılamamaktadır. Ülkemizde enerji ihtiyacı, yoğun sanayileşme ve şehirleşme ile birlikte nüfus artışının da etkisi ile katlanarak artmakta ve özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde mevcut kaynakların orta ve uzun vadede yeterli olmayacağı ortadadır. Çalışmanın amacı, ülkenin enerji tüketiminde en büyük paya sahip olan İstanbul şehrinin rüzgar gücü açısından en verimli bölgelerinden biri olan Sarıyer'in Kilyos (Kumköy) sahilinde ölçülen rüzgar hızlarının analizi ile bölgede bir rüzgar santrali kurulması durumunun projeksiyonunu oluşturmaktır.

Çalışmada analiz edilmek üzere, çalışma bölgesi olarak seçilen Kilyos'ta, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nce 1984-1998 yılları arasında ölçülen saatlik rüzgar hız ve yön verileri ile İTÜ Enerji Enstitüsü'nün, BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) kapsamında, Kilyos bölgesini pilot bölge seçerek hazırladığı "Türkiye Kıyılarında Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi" adlı çalışma için yapılan ölçümlerinden alınan 15 dakikalık rüzgar hız ve yön verilerinin 2007-2010 yılları arasındaki iki buçuk yıllık bir bölümü kullanılmıştır. Öncelikle MATLAB programı ile bir saatlik ve 15 dakikalık rüzgar verileri, yılın 12 ayı için ayrı ayrı "Rüzgar Gülleri" çizilmiş ve çeşitli hızlardaki rüzgarlar, yönleri ile birlikte aynı grafiklerde gösterilmiştir. Daha sonra aynı veriler, bu kez mevsimsellik açısından incelenmiş, MATLAB ve Excel programları yardımı ile Hız-Süreklilik Eğrileri ve Mevsimsellik Grafikleri çizilerek "Mevsimsellik Analizi" yapılmıştır. Mevsimsellik analizinin ardından son aşama olarak, bölgenin vektörel haritası yardımıyla veWASP paket programı aracılığıyla -arazi özelliklerinin de göz önünde bulundurulduğu- ayrıntılı bir analiz yapılmış, farklı türbin çeşitlerine göre bölgedeki yıllık enerji üretim potansiyelleri hesaplanmış ve bu üretimin fayda/maliyet durumu incelenmiştir. Aynı zamanda İTÜ Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında aynı bölge için dalga enerjisi açısından ulaşılmış olan sonuçlar da aktarılarak, bölgede bu iki yenilenebilir enerji kaynağına yönelik sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir.

2. RÜZGAR VE ENERJİ

Üretilmeyen ama mevcut bir formdan diğerine dönüştürülebilen enerji; Yunanca "energia" sözcüğünden alınmış olup; "etkiyen kuvvet" anlamına gelmektedir (Url-1). Enerji tanımı konusunda tam bir birliktelik sağlanamamıştır. Enerjinin en basit tanımı, "iş yapabilme gücü"dür. Ancak enerji sadece iş şeklinde değil; ısı, elektrik, kimyasal ve nükleer enerji gibi değişik şekillerde de mevcuttur (Yavuz ve Meriçboyu, 2008). En genel ve kapsamlı bir şekilde ise; bir sisteme eklendiğinde ya da çıkartıldığında sistem parametrelerinden herhangi birinde değişikliklere neden olan etken olarak tanımlanabilir (Onaygil ve Güler, 2008).

Dünyamızın yuvalandığı Samanyolu'nda egemen enerji kaynağı Güneş'tir. Güneş, tükenen ve tükenmeyen tüm enerji sistemlerinin ana kaynağıdır. Güneş'ten gelen enerjinin yaklaşık %2'lik bir kısmı ise rüzgar enerjisine dönüşmektedir (Yerebakan, 2001). Rüzgarlar, atmosferin potansiyel enerjisinin, basınç kuvvetleri etkisiyle kinetik enerjiye dönüşümünün bir sonucudur (WMO, 1981) Yani rüzgar enerjisi, kinetik enerjiye dönüşmüş güneş enerjisi olarak görülebilir. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde aynı ölçüde ısıtmamasının sonucu olarak sıcaklık ve basınç farkları meydana gelir. (Dinçer ve Aslan, 2008). Hava basıncındaki bu farklar, atmosferik gazların yüksek hava basınçlı bölgeden, alçak hava basıncı bölgesine doğru akışını sağlar ve böylece rüzgar oluşur (Johnson, 2001).

Rüzgarın davranışı, atmosferde ve yerküredeki dört temel faktörün etkisi altındadır;

Basınç Gradiyan Kuvveti: Rüzgar oluşumundaki ana etkendir. Ekvator ve çevresi, güneş ışınlarının yer yüzeyine geliş açılarındaki farklılıklardan dolayı, güneş tarafından diğer enlemlere göre daha çok ısıtılır. Farklı ısınma ve farklı sıcaklık derecesi sebebiyle meydana gelen basınç gradyenti, hava dolaşımını başlatmış olur. Sıcak hava, soğuk havadan daha hafiftir. Isınma sonucunda sıcak hava yukarı doğru yükselir. Bu yükselme, yaklaşık olarak 10 km yüksekliğe kadar uzanır. Yükselen hava bu yükseklikte kuzeye ve güneye doğru ayrılır. Ayrılan hava kutuplara yaklaştıkça tekrar soğuyarak aşağı çöker ve ekvatora doğru hareket etmeye çalışarak bir çevrim oluşturur ve böylece rüzgarlar meydana gelir. Rüzgar,

oluşumunu bu olayla gerçekleştirir ve küresel etkilerle (Koriolis, Merkezkaç) farklı biçimler kazanır (Şen, 2002; Burton, 2001; Wizelius, 2007). Dünya üzerindeki eş basınç eğrileri (izobarlar) birbirlerine yakın olduğunda, yani basınç farklılıkları daha kısa mesafelerde olduğunda, basınç gradyanı etkisi ve dolayısıyla rüzgar hızı artar.

Koriolis Kuvveti: Bu kuvvet, dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi sonucu oluşan kuvvettir. Hareket eden her şeyin hareketini saptırma özelliğine sahiptir ve saptırdığı şey ne kadar hızlıysa, kuvvetin etkisi de o kadar fazla olur (Aguado ve Burt, 2007). Eğer bu kuvvet var olmasaydı, yukarıda bahsedilen basınç değişimlerinin sebep olduğu hava hareketleri tekdüze olacaktı. Fakat bu kuvvetin etkisi ile, ısınarak kutuplara doğru hareket eden havanın 30° enlemlerden daha yüksek enlemlere hareketi önlenerek kuzeye ve güneye doğru saptırılır. Fransız matematikçisi, Gustave Gaspard Coriolis'in keşfettiği bu olay sayesinde, havada bulunan tüm partiküller ivmelenir ve dairesel bir hareket yapar. Kuzey yarımküre ile güney yarımkürede bu etki terstir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere Koriolis kuvveti sebebi ile hava akımları dairesel bir hareket halini alırlar (Şen, 2002; Burton, 2001; Wizelius, 2007).



Şekil 2.1 : Koriolis Kuvvetinin Küresel Rüzgarlara Etkisi.

Merkezkaç Kuvveti: Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesinden kaynaklanan ve rüzgar hareketlerine etki eden bir diğer etki ise merkezkaç kuvvetidir (Şen, 2002). Rüzgarlar genelde bir merkez etrafında dolanırlar. Bu hareketin neticesi olarak da kendilerini dolanım merkezlerinden uzaklaştırmak isteyen bir kuvvetin (merkezkaç kuvveti) etkisi altında bulunurlar. Merkezkaç kuvveti, hareket eden havanın birim

kütlesine tesir eden ivmesi; rüzgar hızının karesinin, rüzgarın dolanım yarıçapına oranı ile belirlenir.

Sürtünme Etkisi: Bu etki rüzgarın meydana gelmesinde değil, rüzgarın karakterinde etkilidir. Rüzgar hızını yavaşlatmaya çalışan bu kuvvetin tesiri yere yaklaştıkça artar. Rüzgarın yeryüzüne sürtünmesinden doğan bu kuvvetin, yer üstünde 450-600 metrelere kadar rüzgar hızını yavaşlatması mümkün olmaktadır (Yavuzcan, 1962).

Bütün bu etkiler altında oluşan rüzgarlar ise kendisini oluşturan etkilere ve esme şekillerine göre sınıflandırılmışlardır. Kutuplar ile ekvator arasındaki hava hareketlerine ve dünya yüzeyi üzerindeki basınç farklılıklarına bağlı olarak meydana gelen rüzgarlara “Küresel Rüzgarlar” denirken; Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerinin etkisi altında; kara-deniz etkileşimi, gündüz-gece etkileşimi, topoğrafik yapı ve kanal etkisi gibi yersel faktörlerden etkilenecek oluşan rüzgarlar, “Yerel (Bölgesel) Rüzgarlar” adını alırlar. Küresel rüzgarlar başlığı altında; tropik rüzgarlar, musonlar, orta enlem rüzgarları ve kutup rüzgarlarını sayabiliriz. Yerel rüzgarlar ise; kara ve deniz meltemleri, dağ ve vadi rüzgarları gibi esintilerdir (Durak ve Özer, 2008).

Rüzgar adı verilen ve basınç kuvvetlerinin etkisiyle oluşan kinetik enerjinin, enerji üretimi açısından iki şekilde değerlendirildiği görülmektedir. Bunlar; doğrudan rüzgarın kendi gücünden ve rüzgarın denizlerdeki etkisi ile oluşan dalgaların gücünden faydalanılması olarak karşımıza çıkar.

Çalışmada, bu bölgede ölçülen rüzgar verilerinden yararlanılarak dalga enerjisi üretim potansiyelinin belirlendiği BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) çıktıları da verilmiştir.

2.1 Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi; rüzgarı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket (kinetik) enerjisidir. Havanın hızlı yer değiştirmesi ile içindeki parçacıkların hareketi de hızlı olur. Havanın bu özelliği, yararlı olan mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Url-2).

Bir doğa olayı olan rüzgarın esmesi ile oluşan bu kuvvetten enerji üretimi, rüzgar türbinleri vasıtası ile gerçekleşir ve bu çevrim (hızın (m/s) güce (W) dönüşümü) aşağıda verilen teorik hesaplamalar ile ifade edilir.

2.1.1 Rüzgar Gücü Potansiyelinin Belirlenmesinde Temel Denklemler

Bilindiği gibi, hareket halindeki her cisim bir kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar da hareket halinde bir hava akımı olduğu için rüzgar gücü de kinetik enerji formülüne dayanılarak hesaplanır. “m” kütleli ve “v” hızına sahip havanın kinetik enerjisi:

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

formülü ile hesaplanır.

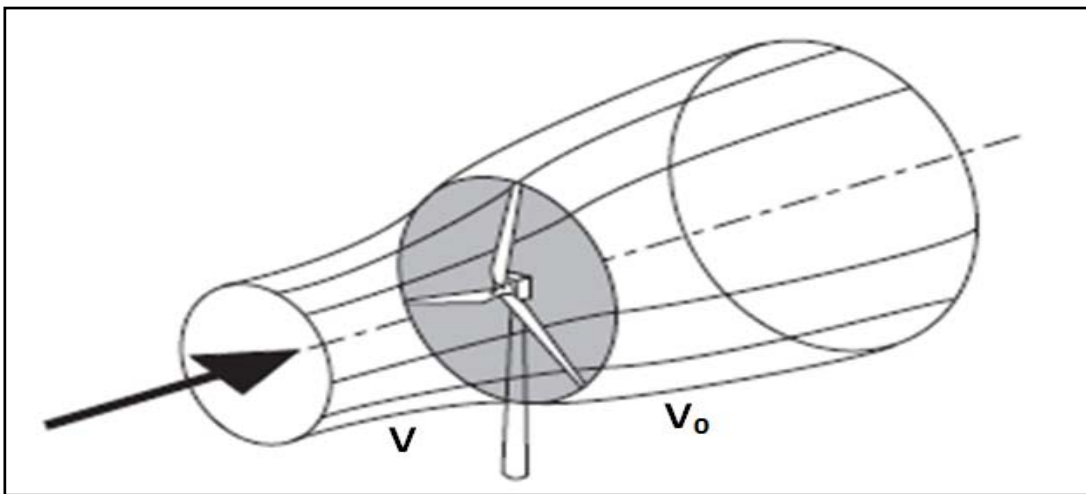
Hareket halindeki havanın gücü ise kinetik enerjinin saniye başına akış oranıdır. m =Hava kütlesinin saniye başına akış oranı ise; ρ =özellik kütle (kg/m^3), A =Rotor kanatlarının süpürdüğü alan (m^2), v =Havanın hızı (m/s) olduğu durumda güç formülü aşağıdaki gibi olacaktır:

$$P = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 \quad (2.2a)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.2b)$$

Rüzgardan elde edilebilecek asıl güç ise yukarıda verilen teorik formülde bulunacak olandan biraz farklıdır. Rotor bıçakları (kanatları) tarafından elde edilen gerçek güç (P_0), kanat yönündeki ile aksi yöndeki güçlerin farkıdır. Bu bağlamda, (2.2b) formülünde, Şekil 2.2’de görülen V (rotor bıçaklarına giren rüzgar hızı) hızından V_0 (rotor bıçaklarını terk eden rüzgar hızı) hızını çıkarırsak (2.3) eşitliğine ulaşırız.

$$P_0 = \frac{1}{2}m(v^2 - v_0^2) \quad (2.3)$$



Şekil 2.2 : Türbine Gelen Rüzgar Hızındaki Değişim (Barutçu, 2008).

Havanın debisi, ortalama hız ile kütlenin çarpımına eşit olduğu için ise kütleli debinin (Belli bir zamanda, belli bir yüzeyden geçen kütle - kg/s);

$$\dot{m} = \rho A \frac{V+V_0}{2} \quad (2.4)$$

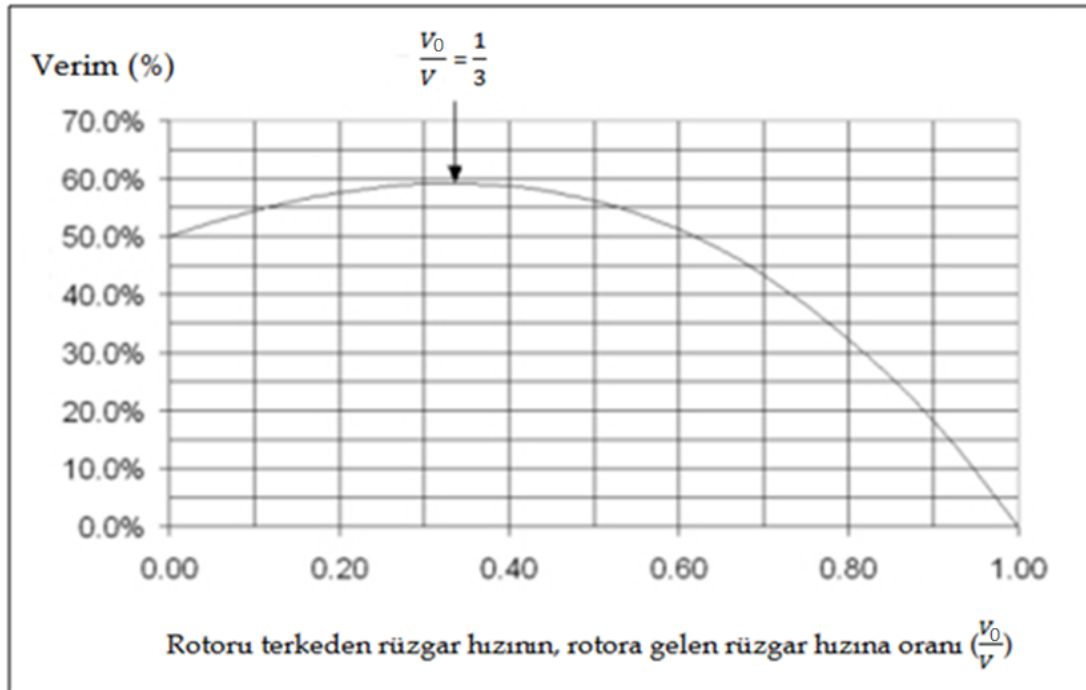
olduğu görülür. Buradan \dot{m} değeri (2.3) formülünde yerine konulduğunda;

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A \frac{V+V_0}{2} (v^2 - v_0^2) \quad (2.5a)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \frac{\left(1 + \frac{V_0}{v}\right) \left[1 - \left(\frac{V_0}{v}\right)^2\right]}{2} \quad (2.5b)$$

formülü elde edilir. Burada; v^3 'ün arkasından gelen kısım, C_p ile gösterilen, “güç katsayısı” veya “rotor verimi” olarak adlandırılan ve kanat yönündeki rüzgar hızının aksi yöndeki rüzgar hızına oranına bağlı olarak değişen değerdir.

Güç katsayısının (C_p) v_0/v oranına bağlı olarak çizilmiş verim eğrisi, maksimum verimin %59 olduğunu ve bu değer v_0/v oranı $1/3$ 'e eşitken ulaşıldığını gösterir (Şekil 2.3) ve bu değer “Betz Limiti” olarak adlandırılır (Mukund, 1999; Barutçu, 2008).



Şekil 2.3 : Güç verimi - Rüzgar hızı oranı eğrisi (Url-3).

Bu koşul altında;

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho A v^3 0.59 \quad (2.6)$$

ampirik formülü elde edilir, fakat C_p 'nin teorik maksimum değeri 0.59 olmasına karşın, pratikte maksimum değer, 2 kanatlı türbinler için 0.50'nin altında iken; daha fazla bıçaklı türbinler için 0.2 ile 0.4 arasındadır. Eğer maksimum değer için 0.50 alınırsa rüzgar türbini maksimum çıkış gücünün hesaplanması daha da basit bir hal alırve;

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \rho A v^3 \quad (2.7)$$

bağıntısı ile yaklaşık olarak bulunabilir. Bu denklemde elde edilecek güç, Watt (W) cinsindedir. Bu bağıntıdan yola çıkarak, rüzgardan enerji elde edilmesindeki anahtar faktörlerin; rüzgar hızındaki değişkenlik, havanın özgül kütlesi, Betz Limiti, rotor kanatları tarafından taranan bölgenin çapı ve rüzgar hızıdır olduğu söylenebilir.

Enerjisi eldesi için kullanılacak olan türbine henüz karar verilmemiş ve dolayısıyla rotor alanı bilinmiyorsa bu formül;

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \rho v^3 \quad (2.8)$$

olarak yazılır ve maksimum rüzgar gücü potansiyeli (P_{\max}), W/m^2 cinsinden gösterilir.

Bu bağıntılarda kullanılacak olan rüzgar hızı değeri, ölçüm yapılan yükseklikten, türbinin kanatlarına gelecek olan rüzgarın estiği yüksekliğe uyarlanmak istendiğinde ise;

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \quad (2.9)$$

formülü kullanılır. Burada;

h_1 : rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik (m),

h_2 : rüzgar hızının hesaplanmak istendiği yükseklik (m),

v_1 : h_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı (m/s),

v_2 : h_2 yüksekliği için hesaplanacak olan teorik rüzgar hızı (m/s),

α : pürüzlülük katsayısıdır (ölçümün yapıldığı bölgenin özelliklerine göre 0,0 - 1,0 arasında değişir - Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 : Bölge Özelliğine Göre Pürüzlülük Katsayıları (Barutçu, 2008).

Arazi Özellikleri	Pürüzlülük Katsayısı (α)
Göl, deniz ve engebesiz arazi	0,10
Çalılık, çayır, çimen bulunan vs. arazi	0,15
Uzun saplı bitkiler, bodur ağaçlar, çitler vs. bulunan arazi	0,20
Ağaçlık alan, köy yeri vs.	0,25
Ağaçlık alan, küçük belde, kasaba vs.	0,30
Yüksek binaların bulunduğu şehir bölgesi	0,40

Rüzgar hızı, güçle kübik ilişkisi olduğu için, herhangi bir sahanın güç potansiyelini değerlendirirken kullanılan en önemli parametredir. Herhangi bir sahadaki rüzgar asla sabit kalmaz. Rüzgar hızı; hava sistemi, yüzeyden yükseklik ve araziye bağlı olarak değişimler gösterir. Rüzgar hızı her dakika, saat, gün ve mevsim için farklılık gösterdiğinden dolayı, yıllık ortalama rüzgar hızının güvenilir şekilde hesap edilebilmesi için en az 10 yıllık izleme periyodu gerekir. Bu süre, herhangi bir sahanın enerji potansiyelini değerlendirmede güveni artırır. Buna karşın, uzun süreli ölçümler pahalıdır ve projeler çoğunlukla bu kadar uzun süreyi bekleyemezler. Bu gibi durumlarda, örneğin bir yıllık izleme süresi için toplanmış veri, benzer özelliklere sahip ve daha uzun süre için izleme verilerine sahip saha ile kıyaslanır ve böylece ilgili sahanın rüzgar hızı tahmin edilebilir.

Rüzgar oluşumunda güneş ve mevsimler ana etken olduğu için, rüzgar paterni genellikle bir yıllık periyotlarla tekrar eder. Rüzgar hızı değişimleri herhangi bir periyot için “olasılık dağılım fonksiyonu” ile tanımlanır. Rüzgar hızındaki değişimler en iyi şekilde tanımlayanı ise “Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu”dur (Mukund, 2008).

Weibull dağılımı iki parametreye bağlı bir dağılımdır. Bunlar şekil (k) ve ölçek (c) parametreleridir. Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.10)$$

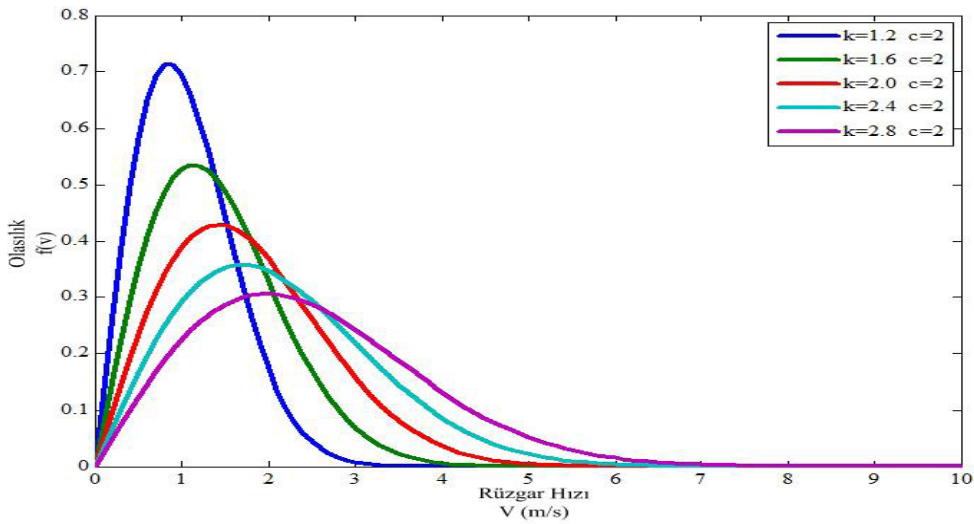
Yukarıdaki denklemde v = rüzgar hızı (m/s); k = şekil parametresi (boyutsuz); c = ölçek parametresidir (m/s) ve Weibull dağılımının rüzgar potansiyeli hesaplamalarında kullanılabilmesi için k ve c parametrelerinin belirlenmesi gereklidir (Mathew, 2006).

Weibull dağılım fonksiyonunun ölçek parametresi (c) rüzgar ortalaması ile doğru orantılıdır. Bu durum bir rüzgar istasyonunun rüzgar karakteristiğinin belirlenmesinde ölçek parametresinin önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Weibull dağılım fonksiyonunun şekil parametresi (k) ise rüzgarın ortalaması ile doğru, fakat standart sapması ile ters orantılıdır. O halde ortalama rüzgar şiddetinin ve standart sapmanın bilinmesi durumunda k ve c parametreleri bulunabilir (Menteş, 2009).

Weibull dağılımı, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olasılığı '1'dir. Weibull dağılımı eğrisi simetrik değil, çarpıktır. Bu eğriyi oluşturan her bir hız frekansı, ortalama hızın bulunmasını da sağlar.

Şekil ve ölçek parametrelerinin tahmininde rüzgar şiddetinin ortalaması ve standart sapma değerleri önem taşır. Özellikle standart sapma ve çarpıklık katsayısı türbülans ifade eden büyüklüklerdir. Bunun yanında, standart sapma esaslarına bağlı olarak risk ve güvenilirlik hesaplamaları da yapılabilmektedir.

Weibull şekil parametresi, rüzgar sürekliliği ile doğrudan ilgilidir. Şekil 2.4'te de görüldüğü üzere, şekil parametresinin yüksek değerleri için rüzgar hızı kararlılığı yüksek, düşük değerleri için rüzgar hızı kararlılığı düşüktür.



Şekil 2.4 : Farklı Şekil Parametrelerinde Weibull Dağılımı (Barutçu, 2008).

2.1.2 Rüzgar Türbini

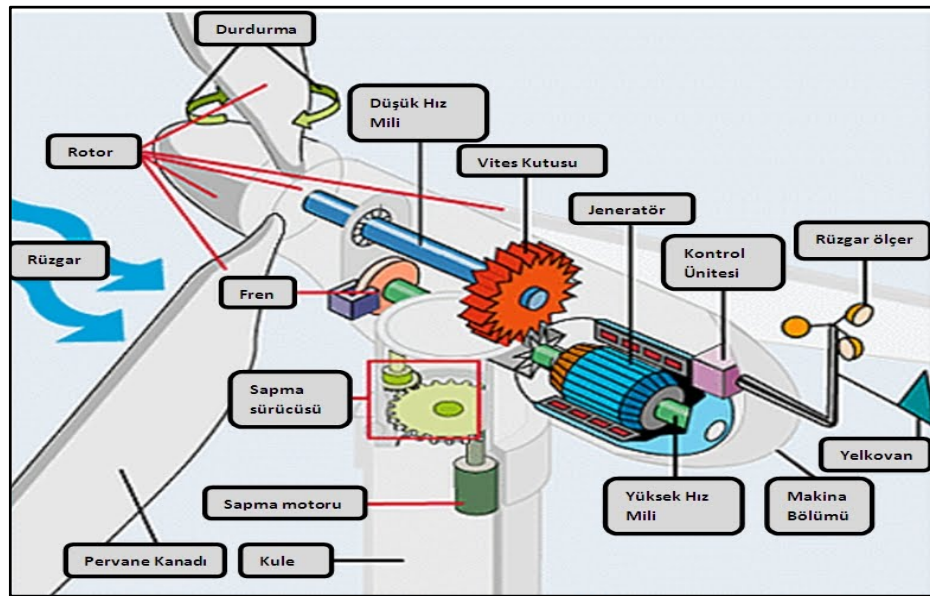
Tahrik edilen kısmı dönme hareketi yapan ve bir akışkanda bulunan enerjiyi, milinde mekanik enerjiye dönüştüren makinalara türbin denir. Rüzgar türbinleri için yapılan en genel tanımlamada ana bileşenler; pervane kanatları, pervane göbeği ve pervane

mili şeklindedir (Çetin ve diğ., 2001). Dıştan bakıldığında bir rüzgar türbini; pervane, motor, pervane ile motoru bağlayan bir göbek ve bu sistemi taşıyan bir kuleden oluşur (Kurt, 2009). Şekil 2.5'te birçok türbinden oluşan bir rüzgar tarlasının genel görünümü, Şekil 2.6'da ise türbinin makina bölümü yer almaktadır.



Şekil 2.5 : Rüzgar Tarlası (Eriksson, 2011).

Pervane mili, dişli kutusuna bağlıdır. Dişli kutusunu generatöre bağlayan mile de rotor mili denir. Bunların tümü, kule tarafından taşınır. Kule ile yer bağlantısı da temel aracılığı ile sağlanır. Tüm bu elemanlara en genel halde “rüzgar enerjisi tesisi” ya da “rüzgar türbini” denir (Çetin ve diğ., 2001).



Şekil 2.6 : Rüzgar Türbinin Genel Yapısı (Url-4).

Rüzgar türbinlerinin çalışma prensibi iki temel enerji dönüşümüne dayanır: İlk olarak rüzgar pervanelere çarpar ve pervaneler dönmeye başlar. Böylece, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji mekanik enerjiye çevrilmiş olur. Pervaneler dönerek, kendisine bağlı dişlileri harekete geçirir. Dişli sisteminin yardımıyla pervanelerden alınan mekanik güç artarak üretilen enerjiye iletilir. Üretimin içinde bulunan mıknatısların dişlilerden aldıkları mekanik kuvvet tarafından döndürülmesiyle indüksiyon akımı oluşur. Bu akım, trafo gibi çeşitli enerji çeviricileri ile istenilen voltaja, akım düzeyine ve türüne dönüştürülür. Oluşturulan elektrik enerjisi, bataryalarda depolanabileceği gibi, kullanılmak üzere doğrudan şebekeye de dağıtılabilir.

Daha önceki bölümde bahsedildiği üzere, rüzgar hızında oluşan küçük bir değişim bile rüzgar gücünü çok etkileyecektir. Bu sebepten ötürü rüzgar türbinleri, tepeler gibi etrafı açık, vadiler gibi rüzgarı toplayıcı yerlere yapılmaktadır. Ayrıca, dünyada örnekleri görüldüğü üzere, karaya kurulan rüzgar türbinlerinin (onshore wind turbine) yanısıra, deniz gibi geniş su birikintilerine de rüzgar türbinleri (offshore wind turbine) kurulmaktadır. Denizlere kurulan rüzgar türbinleri en az karalarda bulunanlar kadar elektrik enerjisi sağlayabilir. Sular neredeyse pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğundan, engeller karada olduğu gibi rüzgarın hızını azaltmaz. Ayrıca deniz, göl gibi geniş su kitlelerinde günlük sıcaklık farkına bağlı olarak sürekli meltemler oluşur ve denizlerde kurulan rüzgar türbinleri bu özelliklerden de yararlanmaktadır (Kurt, 2009).

Rüzgar türbinleri; direnç ve kaldırma kuvvetinden yararlanmalarına göre, pervane ekseninin yatay ya da düşey olmasına göre veya aynı rüzgar hızındaki devir sayılarına göre de sınıflandırılabilirler. Direnç kuvvetinden yararlanan türbinlere rüzgar, yüzeye belirli bir açıyla gelir ve yüzeye etkiyen hava hızının doğrultusunda dik olarak oluşan kaldırma kuvveti, dönme hareketine dönüşür. Yüzey öncesinde yüksek basınç, yüzey arkasında ise alçak basınç oluşmaktadır. Rüzgar türbinleri, nominal güçlerine göre de; küçük güçlü ve büyük güçlü rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılır (Çetin ve diğ., 2001).

2.1.3 Rüzgar Gücünden Enerji Üretimini Etkileyen Faktörler

2.1.3.1 Rüzgar Özelliğinden Kaynaklanan Etkiler

Rüzgar Hızı: Denklem (2.7)'de görüldüğü gibi, kanatlar yönünde rüzgardaki güç, kanatları süpüren havanın özgül kütlesiyle lineer olarak artarken, rüzgar hızının

küpüyle orantılıdır. Örneğin, rüzgar hızı iki katına çıktığında; güç üretimine etkisi ikinin küpü, yani sekiz kat artar. Bu da rüzgardan güç elde etmede en önemli faktörün hız olduğunu açıkça gösterir.

Rüzgar Sürekliliği: Rüzgar türbinlerinin çalışma prensiplerinden dolayı, rüzgar enerjisinden güç üretiminde rüzgarın esme sürekliliği büyük öneme sahiptir. Rüzgar hızının bir bölgede düzenli olması, güç üretimi açısından bir artıdır. Söz gelimi, iki farklı bölgede ikişer saat boyunca saatlik rüzgar hızları ölçümü yapıldığında birinci bölgede hızlar 10 m/s ve 12 m/s olarak; ikinci bölgede ise 20 m/s ve 2 m/s ölçülmüş ise her iki bölgede de ortalama rüzgar hızının 11 m/s olması söz konusudur. Ancak, türbinlerin kontrol sistemlerinin devreye girip çıkması, belli bir hızın altında güç üretememeleri gibi sebeplerden dolayı birinci bölgede üretim daha verimli olacaktır. Bunun yanı sıra, düzenli rüzgar hızı gözlenen bölge, diğerine göre daha güvenilir olacağı ve çeşitli sürprizlerle karşılaşılma olasılığının bu bölgede daha az olacağından yatırımcı için daha cazip olacaktır.

Havanın Özgül Kütlesi: Yine (2.7) numaralı formülden görüldüğü gibi, havanın özgül kütlesindeki artış ile güç üretiminde artış görülür. Havanın özgül kütlesi; irtifanın yükselmesi ve sıcaklık artışı ile düşer, atmosfer basıncı artışı ile artar.

Yükseklik: Rüzgar enerjisi uygulamalarında 10 km civarında etki alanı olan ve yerden 40-100 m yükseklikleri arasında esen mikro ölçekli rüzgarlar dikkate alınır. Bu rüzgarlar yüzey koşullarından etkilenirler. Rüzgar profili yükseklikle değişim göstermektedir. Rüzgar hızı başlangıçta artmakta daha sonra belli bir yükseklikten sonra sabitlenmektedir (Barutçu, 2008; Durak ve Özer, 2008).

2.1.3.2 Bölgenin Yapısından Kaynaklanan Etkiler

Pürüzlülük: Her bölgenin kendisine öz yüzey şekilleri vardır. Dolayısıyla yüzey sınır tabakasında meydana getirdiği türbülans ve rüzgar düşey hız profili bu şartlara göre belirir. Teorik olarak hiçbir yörenin yüzey pürüzlülük şartları ve değerleri bir diğerine benzemez, ancak çalışmalarda kolaylık sağlamak açısından belirli sınıflara ayrılmıştır. 1989 yılında yayınlanmış olan Avrupa rüzgar Atlası'na göre gerekli hesaplamalarda bu sınıflar;

- Sınıf 0 (Engebesiz sahil şeridi, göl, deniz vs.) : 0.0002 m
- Sınıf 1 (Çalılıklar, hafif engebeli arazi vs.) : 0.03 m
- Sınıf 2 (Binaların veya ağaçların seyrek olduğu alanlar) : 0.1 m

- Sınıf 3 (Şehir, orman vs.) : 0.4 m

olarak alınmaktadır (Troen ve Peterson, 1989).

Bir yerdeki pürüzlülük, göz önünde tutulan alanın içindeki doğal ve yapay yüzey şekillerine bağlıdır. Mantıksal olarak çok düz yüzeylerde ve özellikle serbest su yüzeylerinde sınır tabakasındaki pürüzlülük çok küçük; yüksek dağlık, engebeli ve çarpık şehirleşme alanlarında ise büyüktür. Pürüzlülük, rüzgar hızını yavaşlatıcı etki gösterir. Rüzgar enerjisi hesaplarında esas olarak kullanılan parametre, pürüzlülük elemanının yüksekliği ile pürüzlülük oluşturan bölgenin kesit alanı arasındaki bağıntıya dayalı olarak hesaplanan “Pürüzlülük Uzunluğu”dur. Pürüzlülük uzunluğu;

$$Z_0 = 0,5 \frac{hS}{Ah} \quad (2.11)$$

formülü ile hesaplanır. Formülde;

Z_0 : Pürüzlülük uzunluğunu,

h : Pürüzlülük elemanının yüksekliğini,

S : Rüzgara karşı gelen dikey kesit alanını,

A_h : Arazi üzerindeki ortalama kesit alanını

ifade eder (WAsP, 2009).Pürüzlülük uzunluğu yüksek olan alanlarda rüzgar hızı, yükseklikle önemli miktarda artış gösterir; fakat pürüzlülük uzunluğunun az olduğu alanlarda bu değişim miktarı daha azdır.

Türbülans: Türbülans, akışkanın akımındaki ani ve belirsiz değişimler olarak tanımlanabilir. Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi, rüzgar türbinleri için de sorun teşkil etmektedir. Türbülans sonucu ani ve değişken yükler oluşmasından dolayı türbinlerin ömründe azalma olduğu gibi, hava akımının düzensizliğinden dolayı da işletme süresince istenen verimin alınmaması söz konusudur (Burton, 2001).

Tepe Etkisi: Rüzgar türbinlerini yerleştirmenin yaygın bir şekli de, tepe üstüne veya tepenin çevreye bakan yamacına konumlandırılmaktır. Bunun sebebi, hakim yönden esen rüzgarın tepe üzerine geldiği zaman sıkışması, hareket eden havanın sabit olacağını kabul edersek, hacmin daralması ve hızın artması ile telafi edilecektir. Dolayısıyla tepe üzerinde her zaman rüzgar hızları artar. Ancak burada unutulmaması gereken bir durum vardır ki, o da türbülanstır. Araştırmalar

göstermiştir ki, yamaç eğimi 40°'den az olan ve pürüzsüz tepeler,rüzgar enerjisi üretmek için ideal yerlerdir (Wizelius, 2007).

Tünel Etkisi: Yüksek binalar arasından veya dağ geçitlerinden geçerken hava akımlarında bir takım etkilerin olduğu fark edilir. Hava akımlarının, binaların veya dağların aralarından geçerken sıkışmalarından kaynaklanan bu etkiye tünel etkisi adı verilir. Rüzgar hızını da arttıran bu etki, arazi içerisinde uygun ve düzgün alanlarda rüzgar türbinlerinin konumlandırılması sırasında dikkate alınır, enerji üretimi açısından fayda sağlar. Düzenli olmayan tünel etkisi yaratan alanlar ise daha çok türbülans yaratacağı için dezavantaj oluşturur ve türbinde yorulma, yırtılma, çatlama gibi fiziksel hasarlar oluşturarak türbin ömrünü azaltır (DWIA, 2009).

Engeller: Arazi üzerinde ve çevresinde yer alan doğal (ağaçlar, çalılar vb.) ve insan yapımı (binalar, kaleler vb.) engeller, oluşturdukları türbülans etkisi nedeniyle, rüzgar enerjisi üretimine olumsuz yönde etki eder. Bu sorunu en aza indirmek için türbin konumlandırmasının rüzgar üstü bölgesinde, bina yüksekliğinin iki katından daha fazla mesafede; rüzgar altı bölgesinde, minimum bina yüksekliğinin en az 10 katı mesafede; eğer türbin zorunlu olarak binanın rüzgar altı bölgesinde konumlandırılırsa, bina yüksekliğinin en az iki katı yükseklikte konumlandırılması gerektiği, yapılan araştırmalar sonucunda belirlenmiştir (Wegley ve diğ.,1980).

2.1.3.3 Rüzgar Türbininden Kaynaklanan Etkiler

Güç Kontrol Sistemleri: Rüzgar türbinleri, sistemin güvenliği açısından -bölgenin özelliğine göre- belirli bir hız aralığında güç üretmek için tasarlanırlar ve rüzgar türbininin zarar görebileceği hızlarda (duruş hızı) sistem kendini kapatarak türbinin herhangi bir zarar görmesini engeller. Bu da güç üretiminde türbine bir sınırlama getirir (Wizelius, 2007).

Park (İz) Etkisi: Ekonomi ve uygulama kolaylıkları açısından rüzgar türbinleri mümkün olduğunca birbirlerine yakın konumlandırılmaya çalışılır. Ancak, rüzgar türbinleri, akış yönünde enerjiyi dönüştürdükten sonra-enerjinin korunumu ilkesi gereğince- arkalarında daha düşük kinetik enerjili bir iz oluştururlar. İz etkisi, rüzgar çiftliği alanlarında, türbinlerin arkalarına daha yavaş bir rüzgar hızı aktarmaları nedeniyle enerji üretimine yapacakları etki olarak tanımlanmaktadır ve bu etki enerji verimliliğini düşürür (EWEA, 2008). Bu etkinin en aza indirilmesi için türbinlerin

arasında, hakim rüzgar yönüne paralel yönde 3D ($D = \text{Rotor çapı}$); dik yönde ise 8D aralık bırakılmalıdır.

2.1.4 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgar gücünden yararlanmanın tarihi beş bin yıl öncesine kadar dayanmaktadır. 20. yüzyılın başlarına kadar rüzgardan, su pompalamak (su değirmenleri) veya tanecik öğütmek (yel değirmenleri) için gerekli mekanik gücü sağlamak amacıyla yararlanılıyordu (Ackermann ve Söder, 2000). Rüzgardan faydalanma, insanlık tarihinin önemli bir bölümünde sadece mekanik güç elde etmek amaçlı olmuştur. Mezopotamya'da sulama amaçlı ilk uygulamaları MÖ 2800'lerde Babil'de yapılmıştır. Yel değirmenlerine ise ilk olarak İskenderiye'de rastlanılmıştır. Türklerin ve Perslerin 7.yy'da yel değirmeni kullandıkları, tarih kitaplarında yer almıştır. Avrupalılar ise yel değirmenini, Haçlı seferleri sırasında görmüşlerdir ve 12.yy'da Avrupa ülkelerinde de yel değirmenleri kullanılmaya başlanmıştır (Ackermann ve Söder, 2002).

İlk defa rüzgar enerjisinden elektrik üretilmesine ise 19. Yüzyılın sonlarında başlanmıştır. Bunların örneklerinden bazıları, Charles F. Brush tarafından Cleveland, Ohio'da kurulan 17 m rotor çapına sahip 12 kW'lık, dünyadaki ilk otomatik rüzgar türbini olarak bilinen makinedir. Amerika'nın elektrik endüstrisinde kurucularından olarak bilinen Brush, yaptığı bu rüzgar türbinini 20 yıl kadar kendi evindeki bataryaları şarj etmek için kullanmıştır (DWIA, 2003a). Öte yandan, okyanusun diğer kıyısında, elektrik üretmek için kurulan ilk rüzgar türbinini (Şekil 2.7) Dane Paul LaCour, 1891'de gerçekleştirmiş (Ackermann ve Söder, 2002) ve Askov'da ilk rüzgar türbini deneme istasyonunu kurmuştur (Yavuzcan, 1962). Birinci ve ikinci dünya savaşları sırasında Danimarkalı mühendisler teknolojiyi geliştirip, enerji sıkıntılarını gidermişlerdir. Danimarkalı F.L. Smidth tarafından 1941-42 yıllarında kurulan rüzgar türbinleri, modern türbinlerin öncülüğünü yapmıştır. Smidth türbinleri, aerodinamik bilgisini kullanan ilk hava levhalı modern türbinlerdir. Aynı zamanlarda Amerikalı Palmer Putnam, 53m çaplı, o zamana kadar üretilen en büyük ve en yüksek üretim gücüne sahip rüzgar türbinini kurmuştur (Ackermann ve Söder, 2002). İkinci dünya savaşı sonrasında Fransa ve İngiltere'de yapılan çeşitli rüzgar türbini projeleri bulunmaktadır (Heier, 1998). Takip eden yıllarda rüzgar enerjisi oldukça popülerleşmiş ve U.Hütter, L.Darrieus, L.Contantin, L.Andreau, G.Lacroix,

R.Vezzani, Honnef, Bedman, Scheller, Kleinhenz, Meyer, Champly, A.Betz, Van Heys, E.W.Golding gibi isimler de bu alanda yaptıkları önemli çalışmalarla rüzgar enerjisi kullanımının gelişmesinde katkıda bulunmuşlardır (Yavuzcan, 1962).



Şekil 2.7 : Pour La Cour Tarafından Yapılan Rüzgar Türbini (DWIA, 2003b).

Sanayi devrimine bağlı olarak endüstriyel ilerlemenin başlangıcı ile fosil yakıt (petrol, kömür vb.) tüketiminin ve elektrik üretiminin büyük oranlara ulaşması ve yüksek verimin elde edilmesi, rüzgar enerjisini bir kenara atmıştır (Ackermann ve Söder, 2000). Ancak, 1970'li yıllardaki petrol krizi ve yükselen yakıt fiyatları sonucu, rüzgar enerjisi tekrar hatırlanmış ve bu alanda yatırımlar artmıştır. Özellikle 1980'li yıllardaki gelişmeler sonucunda seri olarak üretilen ve yaygın olarak kullanılan rüzgar türbini nominal güçleri; 600 kW, 750 kW, 1000 kW, 1500 kW ve 2000 kW'lara ulaşmıştır. (Özdamar, 2000). 1994 yılında İspanya'nın Madrid kentinde gerçekleştirilen "Madrid Deklarasyonu"nda alınan kararlar ve belirlenen hedeflerin ardından rüzgar enerjisi konusundaki ilerleme çok ciddi boyutlara ulaşmıştır (Yerebakan, 2001).

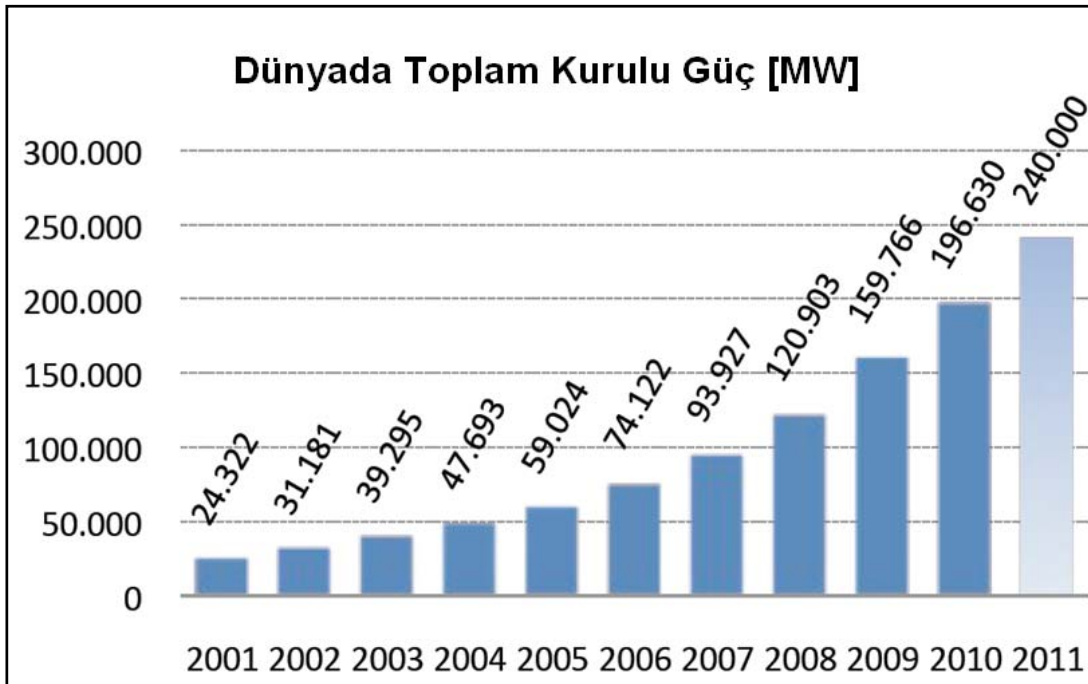
Günümüzde; yenilenebilir olması, ham madde ihtiyacı duymaması ve sıfır emisyon gibi üstünlükleri nedeniyle rüzgar enerjisine bağlı yatırımlar ve dolayısıyla gelişmeler -başta yukarıda bahsedilen öncü ülkelerde olmak üzere- hızlı bir artış göstermektedir ve bu artışla ilgili veriler "Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi" başlıklı bölümde gösterilecektir.

2.1.5 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

2.1.5.1 Dünyada Rüzgar Enerjisi

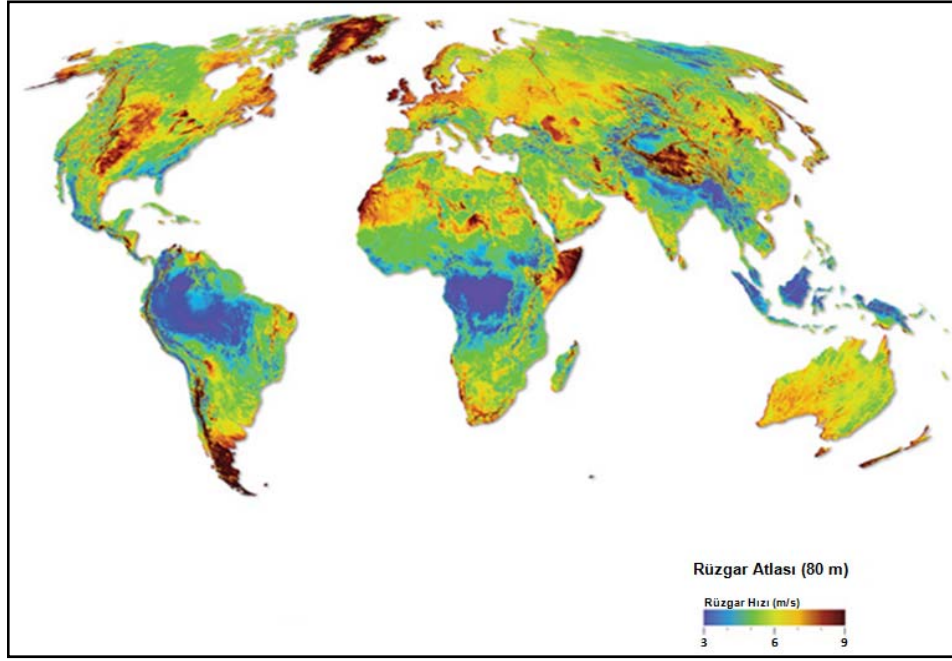
Birinci bölümde, rüzgar enerjisinin üstünlüklerinden ve öneminden bahsedilmişti. Bu bağlamda, gelişmiş sanayi ve yaşam şartlarına sahip ülkeler başta olmak üzere, birçok dünya devletinin bu konuyu ne derece ciddiye aldığını ve özellikle son yıllarda ne kadar üzerine gittiğini tahmin etmek zor olmamaktadır.

Yapılan araştırmalar, rüzgar gücünün şu anda dünyada en hızlı yayılan enerji kaynaklarından biri olduğunu göstermektedir (Mukund, 1999). Şekil 2.8’de dünyadaki toplam rüzgar enerjisi kurulu gücü, 2000’li yıllardaki hızlı artışı ile birlikte gösterilmiştir ve bu konudaki eğilimin ne denli hızlı geliştiğini grafiksel olarak gözler önüne sermektedir.



Şekil 2.8 : Dünyada Toplam Kurulu Güç (MW) (WWEA, 2011).

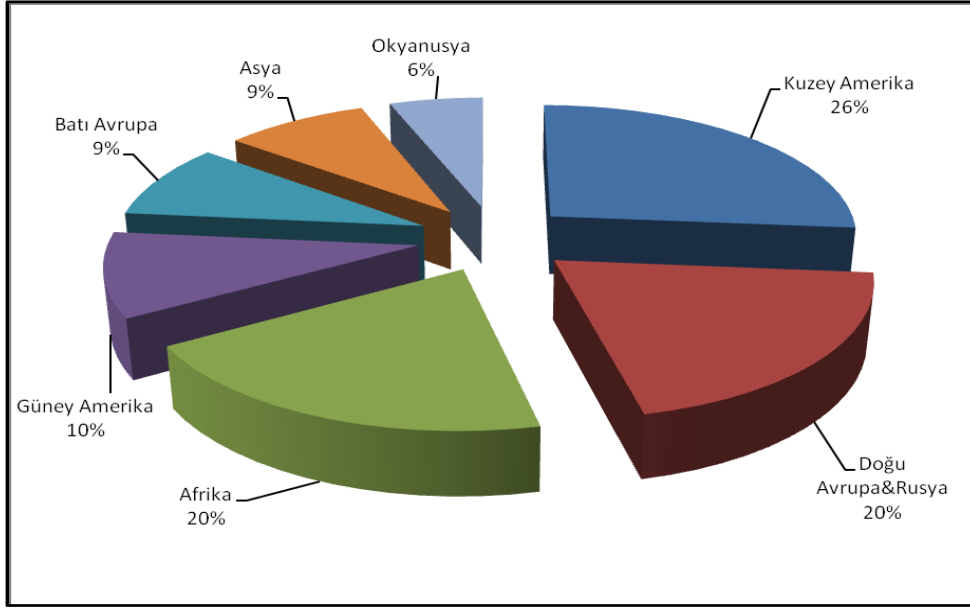
Dünya genelinde, rüzgar gücü üretiminde en önemli faktör olan rüzgar hızının gözlemlenmesi (Ölçüm, izleme ve değerlendirme), hangi bölgelerde bu enerjiden yeterince faydalanılabileceği hakkında fikir vermektedir. Yalnız bu bilgi bize sadece rüzgar gücü üretiminin teorik potansiyelini belirlememizde yardımcı olur. Şekil 2.9’da dünya genelinin rüzgar hızı ortalamalarına göre renklendirilmiş haritası (Rüzgar Atlası) gösterilmiştir. Soğuk renklere sıcak renklere doğru rüzgar hızı ortalamasının arttığı bir gösterimdir.



Şekil 2.9 : Dünya Rüzgar Atlası (Url-5).

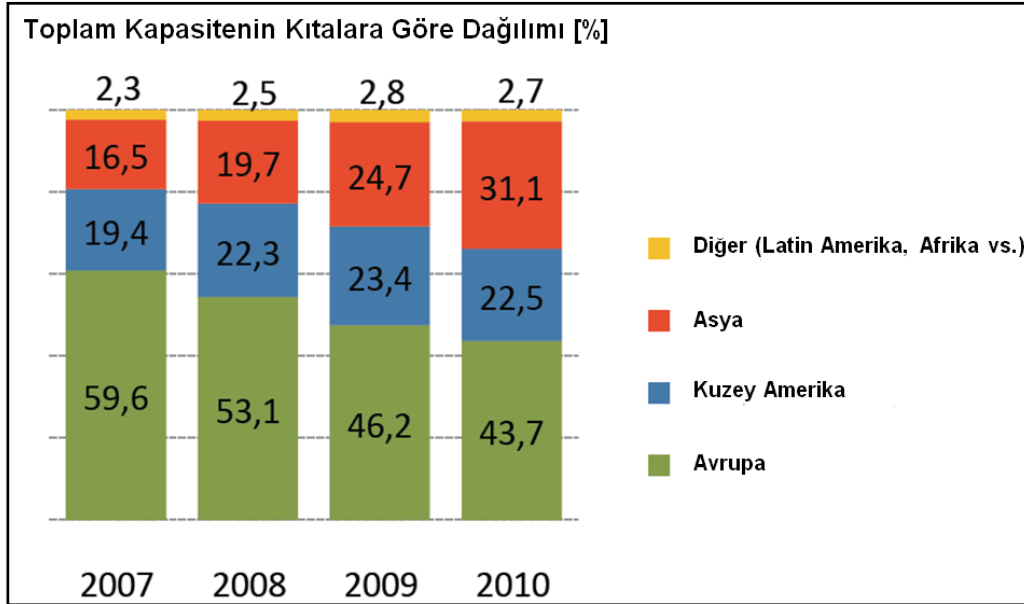
Şekil 2.9'daki görüntüye bakılacak olduğunda, rüzgar hızının en yüksek olduğu yerler; Grönland (Danimarka), Güney Amerika'nın en güney ucu (Arjantin ve Şili'nin güneyi), Afrika'nın doğusunun Arap yarımadasının güneyinde kalan kısmı (Somali, Etiyopya, Kenya), kuzeybatısı (Fas, Batı Sahra) ve güneyi (Güney Afrika), İrlanda Cumhuriyeti ve Birleşik Krallık'ın batı kıyıları, ABD'nin orta bölgeleri ve Alaska eyaleti, Yeni Zelanda, Çin'in doğusu ve Norveç kıyıları olduğu görülse de rüzgar enerjisinden elde edilen güce ülkeler bazında bakıldığında aynı tablo oluşmamaktadır. Bu durumun altında yatan sebepler arasında, rüzgardan güç elde edilmesinde tek etkenin rüzgar hızı olmamasının yanı sıra, rüzgar enerjisine yapılan yatırımların rüzgar potansiyelleriyle doğru orantılı olmaması vardır.

Yapılan çalışmalarda, dünyadaki teknik rüzgar potansiyelinin yılda 53.000 TWh olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu 53.000 TWh'lik teknik potansiyelin 14.000 TWh'lik kısmı Kuzey Amerika'da, 10.600 TWh'lik kısmı Doğu Avrupa ve Rusya'da, 10.600 TWh'lik kısmı Afrika'da, 5.400 TWh'lik kısmı Güney Amerika'da, 4.800 TWh'lik kısmı Batı Avrupa'da, 4.600 TWh'lik kısmı Asya'da, 3.000 TWh'lik kısmı ise Okyanusya'da yer almaktadır. Şekil 2.10'da dünya teknik rüzgar potansiyelinin kıtalara göre dağılım payları gösterilmiştir (Akalin, 2009).



Şekil 2.10 : Dünyada Teknik Rüzgar Potansiyel Dağılım Payları (Akalın, 2009).

Ancak, Afrika ülkelerinin, dünyadaki potansiyelin %20'sine sahip olmasına rağmen, toplam üretimdeki payları % 0,5'te kalırken (WWEA, 2011); potansiyeli, dünyadaki toplam potansiyelin % 9'u olan Batı Avrupa, rüzgar enerjisinden güç üretiminde hem öncü olmuş hem de toplam üretimde halen lokomotif görevini -her geçen yıl hızla azalarak olsa da- sürdürmüştür (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : 2007-2010 Yılları Arasında Kıtalara Göre Kurulu Güç Dağılımı (WWEA, 2011).

Kurulu rüzgar gücünün fazlalığı açısından değerlendirildiğinde dünyada ilk on ülke Çizelge 2.2'de sıralanmaktadır.

Çizelge 2.2 : 2009 ve 2010 Yıllarında Rüzgar Gücü Kapasitesi'ne Göre İlk 10 Ülke (WWEA, 2011).

Sıralama	Ülke	2009 Sonu Toplam Kapasite (MW)	2010'da Eklenen Kapasite (MW)	2010 Sonu Toplam Kapasite (MW)
1	Çin	25.810	18.923	44.733
2	ABD	35.159	5.021	40.180
3	Almanya	25.777	1.438	27.215
4	İspanya	19.149	1.527	20.676
5	Hindistan	11.807	1.259	13.065,8
6	İtalya	4.850	947	5.797
7	Fransa	4.574	1.086	5.660
8	Birleşik Krallık	4.092	1.112	5.203,8
9	Kanada	3.319	689	4.008
10	Danimarka	3.465	269	3.734
	Diğer	21.211	5.146	26.357
Toplam		159.213	37.417	196.630

Çizelge 2.2'de de görüldüğü üzere, 2010 yılında, dünya genelinde 37,4 GW'lık bir kapasite artışı meydana gelmiştir. Bu artışta en büyük pay, gerçekleştirdiği 18.923 MW'lık patlama ile Çin'e aittir. Çin, bu atılımla -daha önce liderliği uzun yıllar elinde tutan- ABD'yi geride bırakmıştır. Bu on ülke arasında, Çin'in ardından en büyük atılım yapan ikinci ülke ünvanı ise 5021 MW ile ABD'dedir. Avrupa'nın lider üreticileri olan Almanya, İspanya, İtalya, Fransa gibi ülkeler birbirlerine yakın bir gelişme gösterirken; rüzgar enerjisinin en önemli öncü ülkesi olarak gösterilen Danimarka, potansiyeli doğrultusunda yeterince gelişmeyi çok uzun zaman önce göstermiş olmasından dolayı, 2010 yılında da diğer öncü ülkelere göre düşük bir atılım göstermiştir. Buna karşılık, ülkelerin toplam elektrik üretiminde rüzgar gücü paylarına bakıldığında, % 21 ile Danimarka halen en yüksek yüzdeye sahip olan ülke konumundadır. Bu alanda Danimarka'yı % 18 ile Portekiz, % 16 ile İspanya ve % 9 ile Almanya izlemektedir. Toplam üretimde ilk iki sırayı paylaşan Çin ve ABD'de ise rüzgar enerjisinin toplam enerji üretimindeki payları, sırasıyla; % 1,2 ve % 2 gibi düşük seviyelerde izlemektedir. Alan başına (kW/m²) ve kişi başına (kW/kişi) üretimlerde ise yine Danimarka başı çekerken, Çin ve ABD çok gerilerde kalmaktadır (WWEA, 2011).

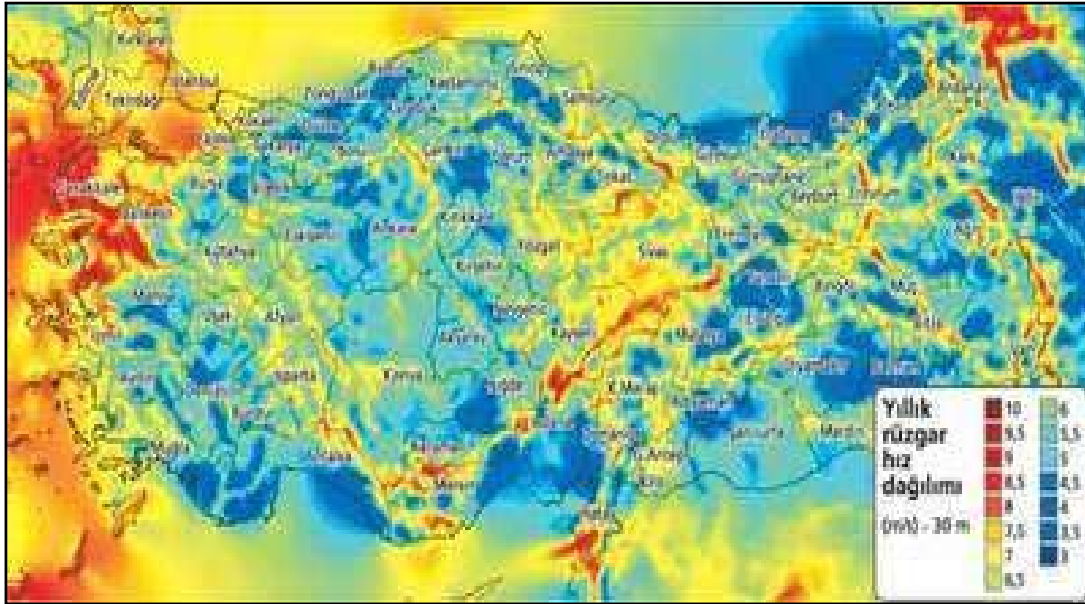
2.1.5.2 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Türkiye'nin toplam rüzgar enerjisi potansiyeli 40.000 ile 80.000 MW düzeyindedir. Devlet meteoroloji istasyonu verilerine göre Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgar hızı, 10 metre yükseklikte, 2,54 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğu, 24 W/m² olarak belirtilmiştir. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli, bölgelere göre

değerlendirildiğinde Marmara ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin rüzgar gücü yoğunluğubakımından diğer bölgelere göre daha zengin olduğu görülmektedir.

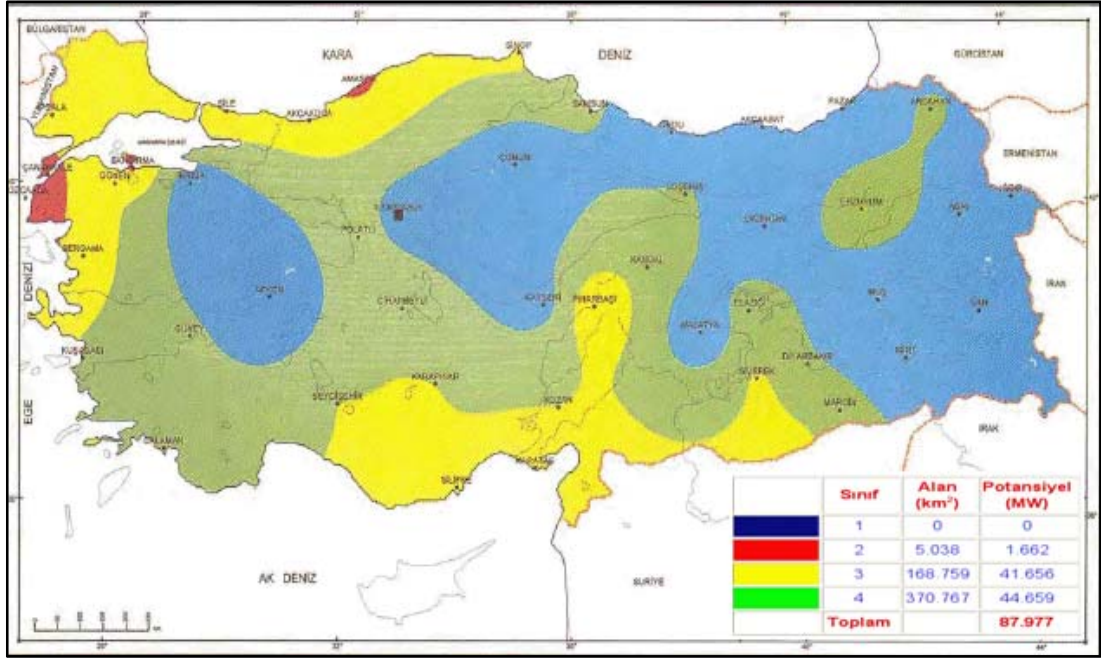
Marmara Bölgesi, özellikle İstanbul ve İstanbul Boğazı'nın rüzgar paternleri üzerine, kara topografyası ve açık su yüzeyleri doğrudan etkide bulunur. İstanbul Boğazı'nın etrafındaki topografya yapısı, kuzeyli rüzgarların güneye doğru akışı esnasında daha da kuvvetlenmesine sebep olur. Yıl boyunca bu bölgelerde kuzeydoğulu rüzgarlar etkisini gösterir. Bu rüzgarların esme sıklıkları %60 kadardır. Güneybatılı rüzgarlar, %20'lik bir sıklıkla ikinci dereceden bir rüzgar sistemini teşkil ederler. Günlük ortalama rüzgar hızı 4 m/s'dir. Zaman zaman rüzgar hızlarının 8-25 m/s'ye ulaştığı yerler, daha ziyade Boğaziçi'nin Karadeniz'e çıkan yanlarında ortaya çıkar ve 16 saat süre ile devam eder. Yaz mevsimlerinde ortalama kuzeydoğulu ve güneybatılı rüzgarlarda yaygın bir şekilde ortaya çıkar (Şen, 2002).

Şekil 2.12'deki haritadan (Türkiye Rüzgar Atlası) da görüldüğü gibi, Türkiye'nin en hızlı rüzgarlarının estiği, dolayısıyla en yüksek rüzgar gücü potansiyeline sahip bölgeleri Gökçeada, Çanakkale, Balıkesir ve Hatay civarıdır.



Şekil 2.12 : Türkiye Rüzgar Hız Dağılımı (30m) (Url-6).

Şekil 2.13'te ise bu atlas, güç potansiyelleri ile birlikte verilmiştir. 2007 yılında gerçekleştirilmiş olan Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) ile ülkemizde yıllık rüzgar hızı 8,5 m/s ve üzerinde olan bölgelerde en az 5.000 MW, 7,0 m/s'nin üzerindeki bölgelerde ise en az 48.000 MW büyüklüğünde rüzgar enerjisi potansiyeli bulunduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.13 : Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (DMİ, 2010).

2004 yılı itibariyle sadece 18 MW düzeyinde olan rüzgar enerjisinin kurulu gücünün artırılmasında aşama kaydedilmiştir. 2009 yılı sonu itibariyle rüzgar kurulu gücümüz 802,8 MW düzeyine ulaşmıştır. Yenilenebilir Enerji Kanunu'nun yürürlüğe girmesinden sonra, 3363 MW kurulu gücünde, 93 adet yeni rüzgar projesine lisans verilmiştir. Bu projelerden, yaklaşık 1100 MW kurulu güçteki santrallerin yapımı devam etmektedir (Url-7).

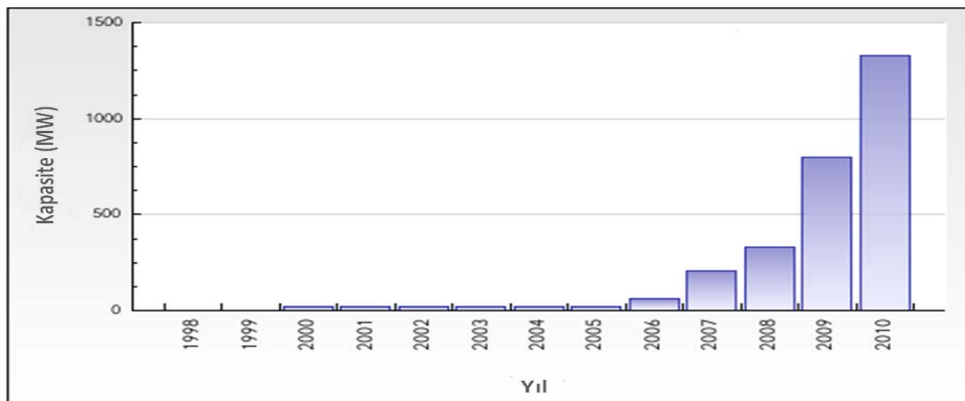
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca açıklanan hedefler ise 2010 yılında 2979 MW, 2020 yılında 7849 MW ve cumhuriyetimizin 100. kuruluş yıldönümü olan 2023'te ise 9733 MW olarak gösterilmiştir (Ültanır, 1999). Çizelge 2.3'te, Türkiye'de işletme halinde olan santraller gösterilmiştir.

Bunların yanı sıra, yine aynı bölgelerde olmak üzere, yaklaşık 500 MW kurulu güç kapasine ulaşan ve inşaatı devam eden projeler ile yaklaşık 650 MW kapasiteye ulaşması beklenen ve inşaat planlaması aşamasında olan projeler bulunmaktadır (Durak, 2010). Görüldüğü üzere, kurulan santraller, rüzgar atlasında görülen potansiyele zıt düşmemiş; en yüksek hızlı rüzgarların estiği bölgeler öncelikli olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 2.3 : Türkiye’de İşletmedeki Rüzgar Elektrik Santralleri (Durak, 2010).

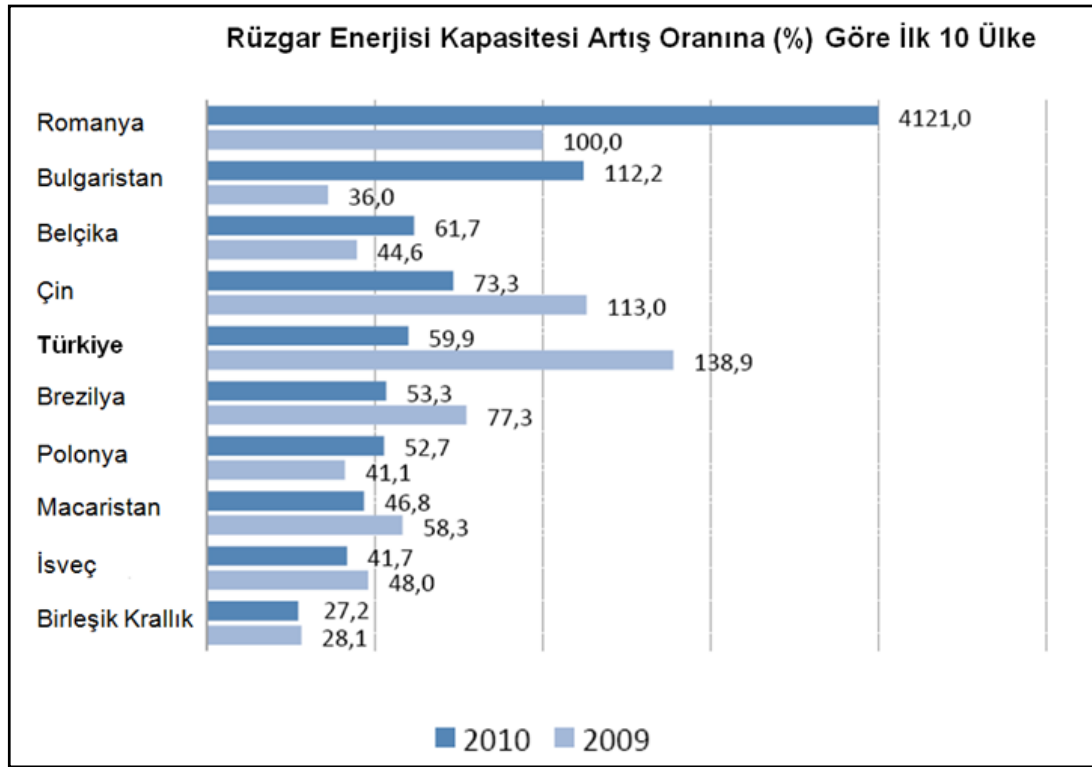
Mevki	Kurulu Güç (MW)	Üretime Geçiş Yılı
İzmir - Çeşme	1.50	1998
İzmir - Çeşme	7.20	1998
İstanbul - Hadımköy	1.20	2003
Balıkesir - Bandırma	30.00	2006
İzmir - Çeşme	39.20	2006
İstanbul - Silivri	0.85	2007
Çanakkale - İntepe	30.40	2007
Manisa - Akhisar	10.80	2007
Çanakkale - Gelibolu	14.90	2007
Manisa - Sayalar	34.20	2008
İstanbul - Çatalca	60.00	2008
İzmir - Aliğa	57.50	2008
İstanbul - Gaziosmanpaşa	24.00	2008
Muğla - Datça	29.60	2008
Hatay - Samandağ	30.00	2008
Aydın - Didim	31.50	2009
Balıkesir - Şamlı	90.00	2009
Hatay - Belen	30.00	2009
Tekirdağ - Şarköy	28.80	2009
İzmir - Urla	15.00	2009
Çanakkale - Ezine	20.80	2009
Balıkesir - Susurluk	20.70	2009
İzmir - Bergama	15.00	2009
İzmir - Çeşme	30.00	2009
Balıkesir - Bandırma	15.00	2009
Balıkesir - Bandırma	45.00	2009
Osmaniye - Bahçe	95.00	2010
Manisa - Soma	49.50	2010
Balıkesir - Bandırma	24.00	2010
Mersin - Mut	33.00	2010
Çanakkale - Bozcaada	10.20	2010
İzmir - Aliğa	90.00	2010
Edirne - Enez	15.00	2010
Toplam Kapasite	1029.85	

Bu verilerden çıkarılabilecek sonuç, Türkiye’de rüzgar enerjisinin son yıllarda (2005’ten sonra - Şekil 2.14) üzerine düştüğü, fakat halen potansiyelin çok altında kalındığıdır.



Şekil 2.14 : Türkiye 1998-2009 Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü (Url-8).

Dünya Rüzgar Enerjisi Raporu'na göre Türkiye, 2008 yılı sonu itibari ile toplam kurulu rüzgar gücü bakımından dünyada 25. iken; 2009 yılı sonunda 19. Sıraya (WWEA, 2010), 2010 yılı sonunda ise 1274 MW kurulu güç ile 17. sıraya yükselmiştir (WWEA, 2011). Raporda 2006 yılı sonundaki kurulu gücün yalnızca 64.6 MW olduğunun görülmesi (WWEA, 2010), ülkemizde bu konuda önemli bir ivmelenmenin gerçekleşiyor olduğunu müjdelemektedir. Yine aynı raporda yer alan, Türkiye'nin, 2009 yılında kendi kurulu gücünü, bir önceki yıla göre yüzde olarak (% 138,9) en çok arttıran ikinci ülke olduğu bilgisi de bunu desteklemektedir. 2010'da ise % 60'lık bir artışla, aynı kategoride 5. Sırada (Şekil 2.15) yer almaktadır (WWEA, 2011).



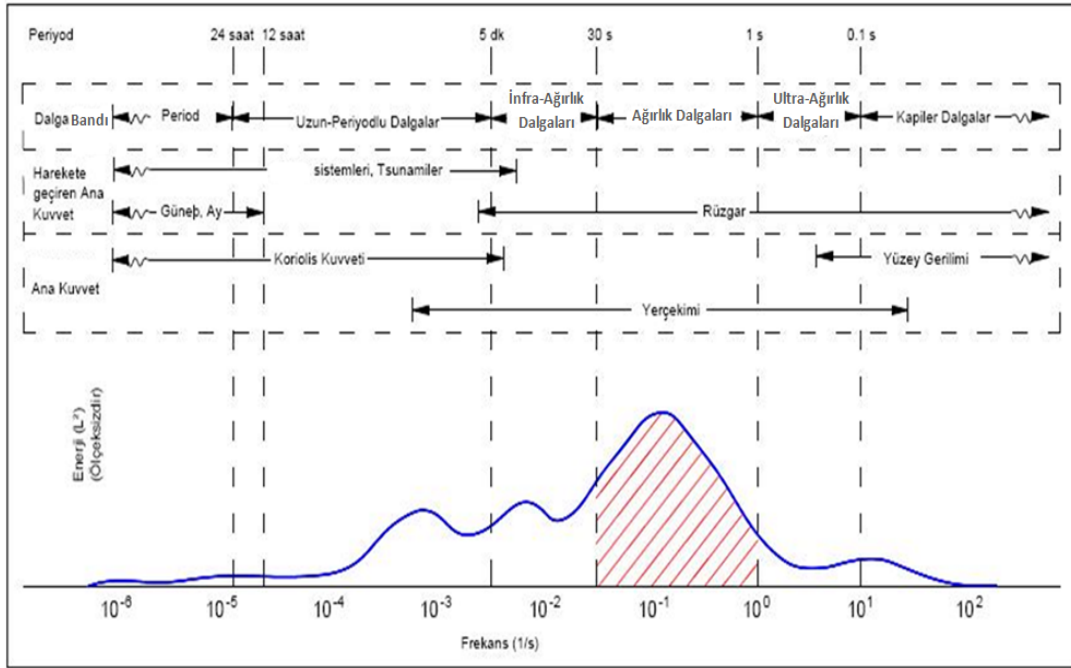
Şekil 2.15 : Kurulu Rüzgar Gücünde En Yüksek Artış Oranına Sahip 10 Ülke (WWEA, 2011).

2.2 Dalga Enerjisi

Rüzgarın deniz ve okyanus yüzeylerindeki hareketleri ile meydana gelen dalgalar da birer enerji birimi olarak karşımıza çıkmaktadır. Rüzgarların sınır tabakasındaki sürtünme dolayısı ile ortaya çıkardıkları dalgalar, deniz yüzeyinin tamamen rastgele iniş ve çıkışlara sahip olmasına neden olmaktadır (Dinçer ve Aslan, 2008).

Archimedes prensibi ve yerçekimi arasında ortaya çıkan büyük güç, dalga enerjisidir. Dalga enerjisi, sadece büyük bir enerji kaynağı değil, aynı zamanda bir çok yenilenebilir enerji kaynağından daha güvenilir bir kaynaktır. Güneş ve rüzgar, birçok yerde zamanın %20-30'u civarında temin edilebilirken, bu sayı dalga enerjisi için %90'lardadır (Url-9).

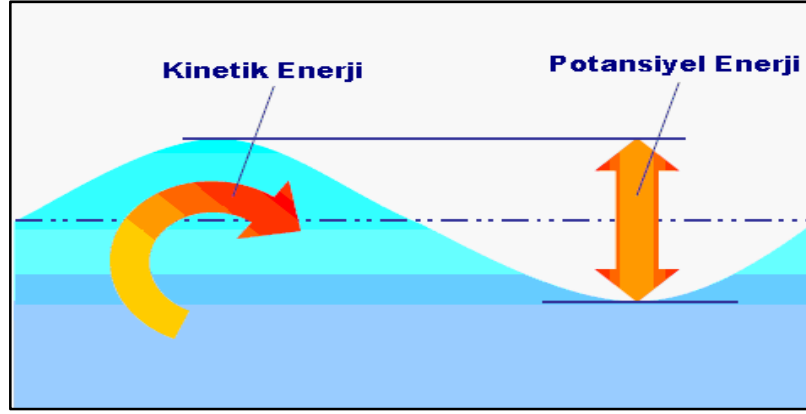
Dalga enerjisinin oluşumunun temelinde, dünya üzerindeki deniz ve karaların farklı ısınması sonucu oluşan rüzgarların deniz yüzeyinde esmesi yatmaktadır. Bu süreçte rüzgar, sahip olduğu kinetik enerjiyi deniz yüzeyine aktarmaktadır. Aktarılan enerji, deniz yüzeyinde, dalga formunda depolanmakta ve çok az bir kayıpla kilometrelerce öteye iletelebilmektedir. Şekil 2.16'da deniz yüzeyine etki ederek dalgaları oluşturan etkenler gösterilmiştir (Önöz ve diğ., 2010).



Şekil 2.16 : Deniz Yüzey Dalgalarının Enerjilerinin Yaklaşık Dağılımı ve Dalgaların Sınıflandırılması (Önöz ve diğ., 2010).

Dalgalarda enerji, kinetik ve potansiyel enerji olmak üzere iki şekilde depolanmaktadır.

Kinetik enerji, deniz yüzeyindeki parçacıkların dairesel hareketi, potansiyel enerji ise dalganın deniz seviyesinden yükselmesinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.17). Lineer bir dalganın ortalama kinetik enerjisi, potansiyel enerjisine yaklaşık olarak eşit olup; bir dalga ile taşınan enerji akısı, dalganın yüksekliğine ve periyoduna bağlıdır (Önöz ve diğ., 2010).



Şekil 2.17 : Dalgada Depolanan Kinetik ve Potansiyel Enerji (Önöz ve diğ, 2010).

Rüzgar etkisi ile oluşan ağırlık dalgaları, rüzgarların oluştukları bölgede yarattıkları fırtına süresince giderek gelişen, enerjisi artan ağırlık dalgaları ve rüzgar etkisi sona erdikten sonra -oluşum bölgesinin dışında- enerjisi taşımaya devam eden ölü deniz dalgaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ölü deniz dalgalarının periyotları 30 saniyeden daha uzun iken, aktif ağırlık dalgalarının periyotları 1~15 saniye arasında gerçekleşmektedir. Bu açıdan bakıldığında, dalga enerjisinde ana kaynak, rüzgar etkisi altında meydana gelen ağırlık dalgaları olup, bu bölümde dalgatılımı ile ağırlık dalgaları tanımlanmaktadır. Ağırlık dalgalarının doğal enerji dengesi içindeki işlevleri, rüzgar etkisi ile atmosferden aldıkları enerjisi kıyıya kadar taşıyarak ve sahilde kara ile etkileşim sonucunda ısı ve ses enerjisine dönüştürerek, etkin enerji formundan çıkarmak -hidrodinamik tanımlamayla-harcanmasını sağlamaktır.

Diğer taraftan, dalgalar tarafından kıyıya taşınan enerji, insan yaşamını olumsuz etkileyen fakat doğal yaşama katkı yapan önemli bir etkidir. Dalga enerjisinden yararlanma yönündeki araştırmalar, kıyıya ulaşan ve sonunda harcanan bu önemli enerji kaynağını, kullanılabilir enerji türlerine dönüştürerek, dünyanın enerji talebinin belirli miktarının temiz enerji sistemleri ile karşılanmasına katkıda bulunmaktadır (Önöz ve diğ, 2010).

2.2.1 Dalga Gücü Potansiyelinin Belirlenmesinde Temel Denklemler

En yaygın ölçüm yöntemine göre dalga gücü (P);

$$P \text{ (W/m)} = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot T \cdot H^2}{32\pi} \quad (2.12)$$

formülü ile hesaplanır. Burada; ρ = deniz suyunun yoğunluğu (kg/m^3), g = yerçekimi ivmesi (m/s^2), T = dalga periyodu (s) ve H = dalga boyudur (m) (Url-10).

Lineer Dalga Teorisine göre; deniz yüzeyindeki yerçekimi dalgalarının birim alanlarındaki ortalama enerji yoğunluğu; dalga yüksekliğinin (H) karesi ile orantılıdır. Birim yatay alandaki ortalama enerji yoğunluğunun (J/m²) hesaplanması için;

$$E = \frac{1}{16} \rho \cdot g \cdot H_{m0}^2 \quad (2.13)$$

şeklinde verilen formülde belirgin dalga yüksekliği (H_{m0}), deniz suyunun özgül kütlesi (ρ) ve yerçekimi ivmesi (g) değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu, birim yatay alandaki potansiyel ve kinetik enerji yoğunluklarının toplamıdır. Birkaç desimetrenin üzerindeki okyanus dalgalarında yüzey gerilimi ihmal edilebilir.

Sinüsoidal dalgalarda ise;

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot \alpha^2 \quad (2.14)$$

olan formül, dalga genliğinin (α), dalga boyunun yarısı (H/2) olmasından dolayı;

$$E = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir.

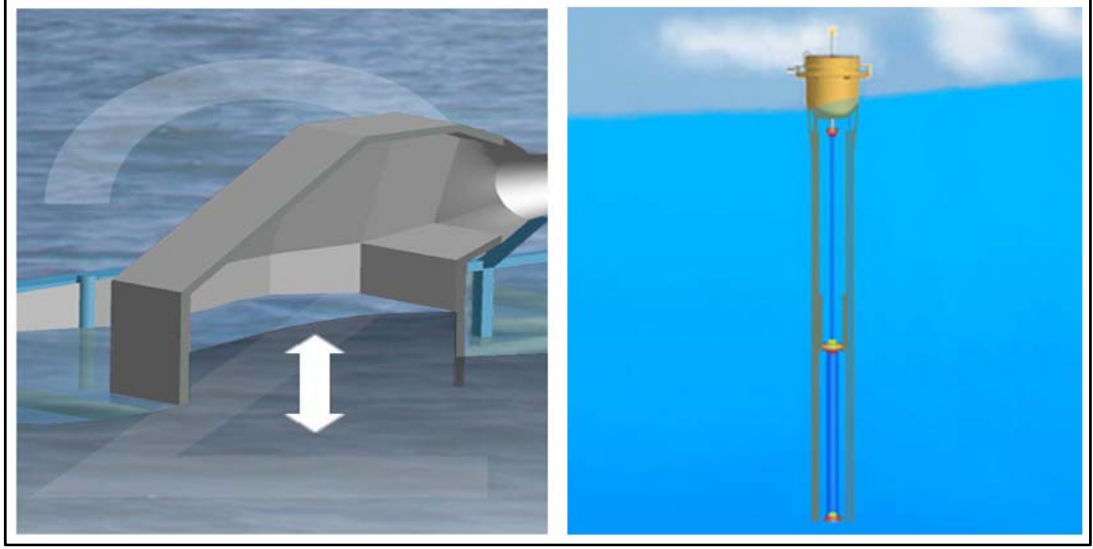
Dalgalar çoğaldığında enerjileri birbirine aktarılır. Enerjinin nakledilme hızı, “grup hızı (C_g)” olarak ifade edilir ve (2.13) no’lu formülle çarpılması ile dalga yayılma doğrultusuna dik birim genişliğin düşey düzlem boyunca “dalga enerji akısı” bulunmuş olur (Phillips, 1977; Holthuijsen, 2007);

$$P = E \cdot C_g \quad (2.16)$$

2.2.2 Dalga Türbini

Salınımlı Dalga Kolonu (Terminator): Dalga yönüne dik uzanırlar ve dalganın gücünü tutar veya yansıtır. Cihazlar, tipik olarak karaya veya sahile yakın konumlandırılır. Su, çember denin bölümün altından girerek üst taraftaki havayı sıkıştırır ve suyun yukarı aşağı hareketinden dolayı sıkışıp gevşeyen hava, türbini döndürmeye zorlanmış olur (Url-11).

Nokta Sönümlmeli (Point Absorber): Dalga hareketine göre hareket eden bir eleman ile deniz tabanına bağlı, suyun üzerinde yüzen bir yapıdır. Bu hareket, türbinde bulunan elektromekanik veya hidrolik enerji dönüştürücüleri çalıştırır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 : Salımlı Dalga Kolonu (Solda) ve Nokta Sönümlmeli (Sağda) Dalga Enerjisi Dönüştürücüleri (Url-10).

Zayıflatıcı Araçlar (Attenuator): Uzun, çok bölümlü (multisegment), dalga yönüne paralel konumlandırılmış, su üzerinde yüzen yapılardır. Farklı boylardaki dalgaların cihaz boyunca bölümler arasında oluşturduğu yükseklik farkları, bölümlerin birleştiği kısımlarda esnemeye (bükülme) neden olur ve bu hareket, hidrolik piston veya başka dönüştürücülere bağlıdır (Şekil 2.19).

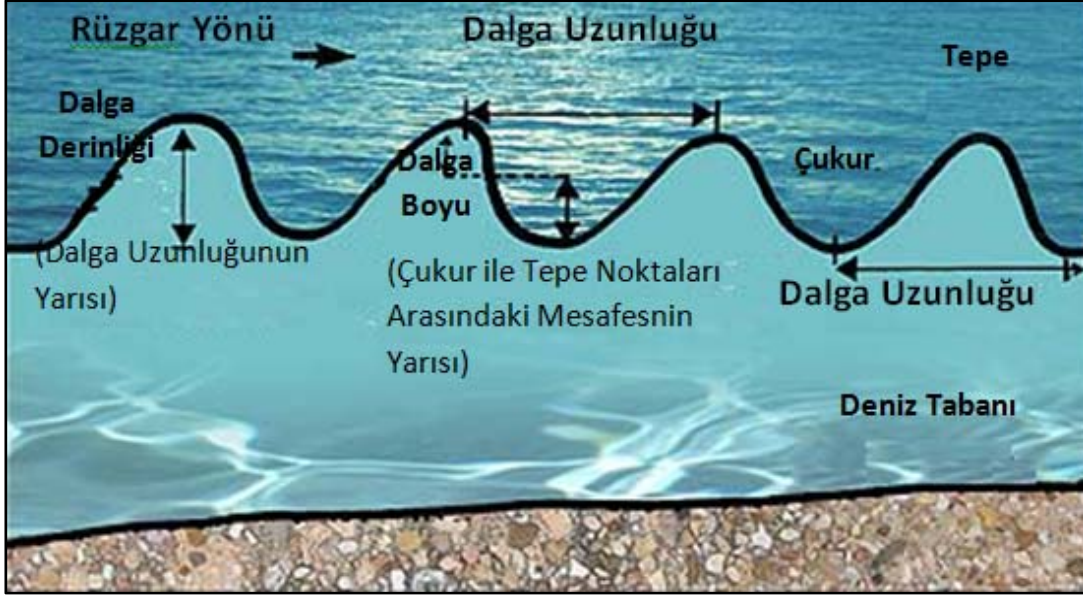
Üstten Aşan Araçlar (Overtopping Device): İçine giren dalga ile doldurulan, baraj göletine benzer bir depo durumundadır. Su seviyesinin, bir süre için kendisini çevreleyen denizinkinden daha yüksek duruma gelmesinin ardından, suyun serbest kalarak alçalması ile oluşturduğu enerji, su çarkını çevirmekte kullanılır (Url-11).



Şekil 2.19 : Zayıflatıcı Araçlar (Solda) ve Üstten Aşan Araçlar (Sağda) (Url-11).

2.2.3 Dalga Gücünden Enerji Üretimini Etkileyen Faktörler

En güçlü rüzgarlar en yüksek dalgaları, en yüksek dalgalar da en fazla enerjiyi meydana getirir (Url-12). Şekil 2.20’de dalgalardan enerji üretiminde etkili olan boyutlarla ilgili terimler gösterilmektedir.



Şekil 2.20 : Dalga Terminolojisi (Url-12).

Bunun yanı sıra, rüzgarın yönü, dalga enerjisinde en önemli etkenlerdendir. Dalga oluşumu için rüzgarın su yüzeyi boyunca esmesi gerekir. Kıyıya paralel esen rüzgarlar dalga oluşturmaz.

Enerji açısından verimli dalgalar, büyük (dalga boyu yüksek) dalgalardır ve büyük dalgaların oluşumundaki başlıca faktörler; rüzgar hızı, rüzgar sürekliliği ve feç (rüzgarın su yüzeyinde kat ettiği mesafe) uzunluğudur. Enerji açısından verimli dalganın oluşumu; uzun feç oluşturan, hızlı ve uzun süre esen rüzgarların olması durumunda mümkündür. Hızlı esen, feç uzunluğu fazla olan ama kısa süreli rüzgarlar ve hızlı, uzun süreli esen fakat feç uzunluğu az olan rüzgarlar, yeterince büyük dalgalar oluşturmaz (Karleskint ve diğ, 2010).

2.2.4 Dalga Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Geleneksel enerji üretim metotları çevre kirliliğine yol açtığı için artık bir çok ülke temiz enerji kaynaklarına yönelmek zorunda kalmıştır. Enerji sektörü penceresi yenilenebilir enerji kaynaklarına açılan, devrim niteliğindeki bir sürece doğru sürüklenmektedir (McCormick, 1981).

Yenilenebilir kaynaklar içerisinde büyük bir potansiyele sahip olan dalga enerjisi, küresel ısınmaya karşı önemli bir güç olarak görülmektedir. Özellikle okyanus kıyılarındaki ülkeler dalga enerjisine özel bir önem vermektedirler. Dalgalar esas olarak rüzgar tarafından üretilirler ve oluşumlarından sönmölenmelerine kadar geçen sürede enerjii binlerce kilometre uzağı etkin bir şekilde taşırlar. Bu özelliğinden dolayı, dalga enerjisi yenilenebilir kaynaklar içerisinde dikkat çekmektedir (Önöz ve diğ., 2010).

Teknolojisinin yeni olması ve rüzgar enerjisi gibi belli bir seviyeye gelmiş teknolojilerle rekabet edememesi gibi olumsuzluklara rağmen, bu enerji türüne birçok ülke tarafından artan bir ilgi vardır. Deniz dalgalarının en önemli özelliğı, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Deniz dalga enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürölmesi birçok araştırmacı tarafından irdelenmiştir. Bir çok dalga enerjisi dönüştürücüsü tasarlanmış ve model ölçeğinde test edilmiştir (McCormick, 1981).

Dalga enerjisinin kullanılabilir enerji haline dönüştürölmesi fikri yeni değildir. Bu konu üzerine ilk patentin alınma tarihi 1799 yılına kadar uzanmaktadır (Clement ve diğ., 2002). 1909 yılında, Kaliforniya Dalga Gücü şirketi, dalga enerjisini rıhtımlardaki lambalar için kullanmıştır. Aynı yıllarda, Sorrento (Melbourne, Avustralya) yakınlarında bir elektrik topu kurulmuştur (Url-12). Dalgalar üzerine son yüz yılda değişik bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Dalga enerjisinin kullanımı düşüncesi, 1970 sonrası enerji krizinin ortaya çıkması ile daha da belirgin hale gelmiştir (Dinçer ve Aslan, 2008). Japonya, İsveç, Norveç ve ABD bu krizden sonra dalga enerjisi ile ilgili programlar yürütmüşlerdir (Url-12).

Avrupa'da dalga enerjisine yöneliş, 1973 yılında petrol fiyatlarının aşırı derecede yükselmesinden sonra başlamıştır. Önemli bir dalga enerjisi potansiyeline sahip Avrupa ülkeleri, bu enerjii muhtemel güç kaynakları arasında görmüş ve bu konu ile ilgili yeni araştırma projeleri başlatmıştır. Orta ve uzun vadede İngiltere, Portekiz, Norveç ve Danimarka gibi ülkeler, dalga gücü dönüştürme teknolojileri üzerinde o zamandan beri çalışmaktadırlar. Dalga enerjisi dönüşümünün araştırılması ve geliştirilmesi için harcanan çaba, 1986'dan beri dalga enerjisi konusunda gelişmeleri takip eden Avrupa Birliğı Komisyonu tarafından destek görmektedir. Komisyonun araştırma programları 1994'te dördüncü çerçeve programı ile başlamıştır ve 1993'ten bu yana, üniversite, ulusal araştırma merkezleri ile endüstrinin içinde bulunduğu

bütün Avrupa'da yürütülen faaliyetlere katkıda bulunan, bir seri uluslararası konferans (Edinburgh, UK, 1993, Lisbon, Portugal, 1995, Patras, Greece, 1998 and Aalborg, Denmark, 2000), yine bu komisyon tarafından desteklenmektedir. Son 25 yılda, dalga enerjisi çeşitli süreçlerden geçmiştir. Bazen şevkli çalışmalar, bazen de hayal kırıklıkları yaşanmıştır. Bununla birlikte, Ar-Ge çalışmaları ve bugüne kadar birikmiş olan deneyim, dalga gücü tekniklerini geliştirmiş ve önceye göre ticari kullanıma daha yakın hale getirmiştir. Zor işletim şartlarında geniş bir ölçekte uygulanabilen ticari amaçlı birkaç tesis, Avrupa ve Avustralya' da faaliyetini sürdürmektedir. Diğer dönüştürücülerin başarılı bir uygulama için Ar-Ge projelerinin son aşamasında oldukları bilinmektedir. Bunun yanında, küresel enerji pazarında rekabeti sağlamak ve mevcut teknolojilerin gelişimini sağlamak için hem kuruluş hem de uygulama safhasında Ar-Ge çalışması devamlı bir surette gerekmektedir.

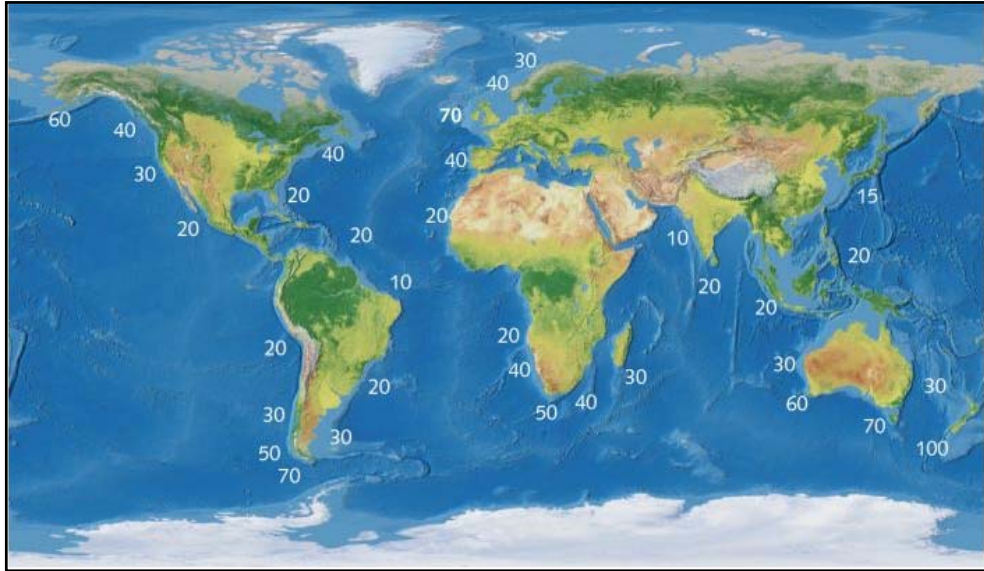
2.2.5 Dünyada ve Türkiye'de Dalga Enerjisi

2.2.5.1 Dünyada Dalga Enerjisi

Dünya çapında sahillere vuran dalgalar tarafından ortaya çıkarılan potansiyel dalga gücü miktarı 1 TW (1 terawatt) mertebesinde tahmin edilmektedir. Eğer açık okyanusta çalışılırsa, sürtünme ve dalga kırılması sebebiyle kaybedilen enerjiden de faydalanma imkanı olacaktır. Bu durumda ortaya çıkarılabilecek dalga gücü bir mertebe daha artırılabilir (yaklaşık 10 TW). Bu miktar, yaklaşık olarak dünyanın şu anda tükettiği toplam enerji miktarına eşdeğerdir. Bu rakam, Güneş'ten ve rüzgardan elde edilebilecek enerjinin küçük bir bölümüne karşılık gelse de, dalga enerjisi devasa bir yenilenebilir enerji kaynağıdır (McCormick, 1981). Ancak, dünyada henüz elektrik enerjisi üretiminin yüzde 0,1'inden daha azı dalgadan üretilen enerji kaynaklıdır (Url-12).

Dalga enerjisi aslında, rüzgarın deniz yüzeyinde esmesiyle meydana gelir. Su yüzeyi yakınında rüzgar enerjisinin doğal yoğunlaşmış şekli olarak karşımıza çıkar. Bir kere oluşturulduklarında, çok az bir enerji kaybı ile binlerce kilometre gidebilirler. Mesela, Atlantik Okyanusu'nun Amerika tarafında dalgalar, batı rüzgarlarının da etkisiyle, batı Avrupa kıyılarına kadar gelir. Derin denizlerde oluşan enerji akışı oldukça büyüktür. Bir dalganın gücü, genliğinin karesi ve periyodu ile doğru orantılıdır. Bu yüzden, uzun periyodlu (7-10 s), büyük genlikli (2 m), dalga birim tepe genişliği için 40-70 kW/m gibi bir enerji akışına sahiptir (McCormick, 1981).

Sahile doğru yaklaştıkça, deniz tabanı ile sürtünmeden dolayı mevcut enerji azalacaktır. Sahile yakın kısımdaki enerji harcanımı, enerjinin yoğunlaşmasına (hot spots) neden olan kırılma ve yansıma gibi doğal olaylar vasıtasıyla telafi edilir. Atlantik 'in uzun ve fırtınalı feçin sonunda bulunan Batı Avrupa kıyılarında, hatırı sayılır bir enerji mevcuttur. Kutupların etrafında cereyan eden fırtınalardan dolayı, Güney Amerika' nın güney kıyıları ve Avustralya oldukça enerjik dalga iklimine sahiptir (Pontes ve diğ, 1998). En güçlü rüzgarlar, özellikle 40° ve 60° arası enlemlerde meydana geldiği ve Avusturalya bu enlemler arasında kalan kıyılara sahip olduğu için en yüksek dalga enerjisi potansiyeline sahip bölgedir (Şekil 2.22) (Url-12). Şimdiki çalışmalar, yaklaşık olarak 290 GW dalga gücü kaynağına sahip kuzey-doğu Atlantik'te (Kuzey Denizi'ni de kapsamakta) yapılmaktadır (Pontes ve diğ.,1998).



Şekil 2.21 : Dünya Kıyılarında Dalga Enerjisi Potansiyeli (kW/m) (Url-14).

2.2.5.2 Türkiye’de Dalga Enerjisi

Türkiye kıyılarının %20’sinden yararlanılarak sağlanabilecek dalga enerjisi teknik potansiyelinin, 18,5 milyar kWh dolaylarında olduğu tahmin edilmektedir. Bu oran, Türkiye’nin enerji ihtiyacının yaklaşık %13’üne karşılık gelmektedir. Açık deniz kıyıları 8 bin 200 km’yi bulan ülkemizin gündemine henüz girmeyen dalga enerjisini en kısa zamanda kullanma ve değerlendirme yoluna gidilmesi büyük önem arz etmektedir. Ülkemizden daha az kıyı şeridi ve daha az dalga potansiyeli bulunan Norveç’in okyanus kıyılarında öncü santraller kurulmuş durumdadır (Dinçer ve Aslan, 2008).



Şekil 2.22 : Dalga Tahminlerinin Yapıldığı Bölgelerin Yıllık Ortalama Enerjileri (kWh/m.yıl) (Önöz ve diğ, 2010).

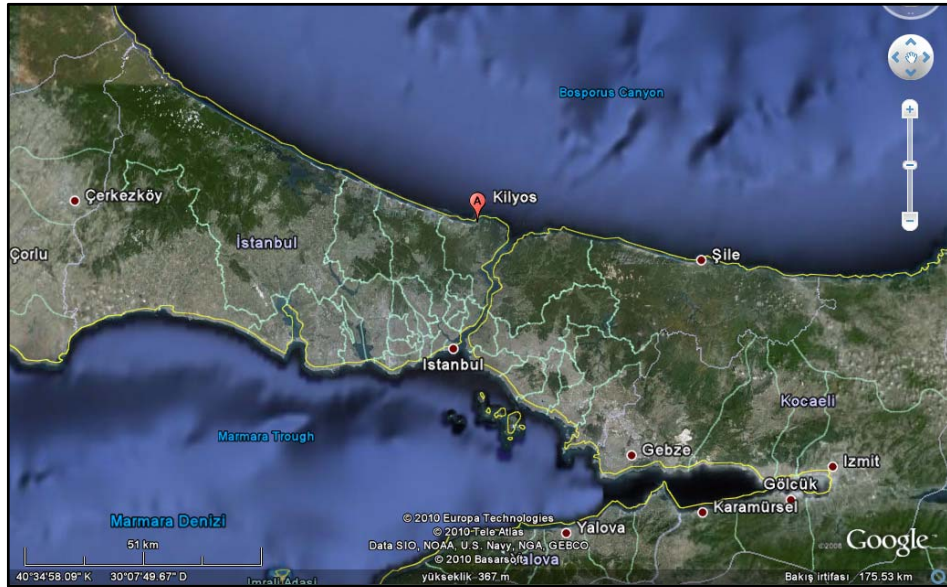
Şekil 2.22’de görüldüğü gibi, ülkemizde dalga enerjisi açısından gerçek potansiyele sahip -başta Batı Karadeniz Bölgesi olmak üzere- kıyı alanları bulunmaktadır. Birbirine yakın kıyı alanlarında bile oldukça farklı dalga enerjisi potansiyellerinin olduğu görülmekte olup; dalga enerjisi üretimi için yapılacak yatırımlar öncesinde mikro ölçekte yer seçiminin, özellikle dalga ölçümleri yapılarak gerçekleştirilmesinin gerektiği sonucuna varılmıştır. Bir diğer önemli husus ise, dalga enerjisi üretim sisteminin mevcut veya planlanan liman ve benzeri amaçlarla inşa edilecek kıyı yapıları ile birlikte tasarlanmasıdır. Bu takdirde yatırım maliyetinin minimize edilmesinin de mümkün olabileceği düşünülmektedir (Önöz ve diğ, 2010).

3. RÜZGAR VERİLERİNİN ANALİZİ

3.1 Çalışmanın Yeri ve Bölgenin Genel Özellikleri

Kilyos (Kumköy), İstanbul'un Sarıyer ilçesine bağlı, Boğaz'ın Karadeniz girişinin yaklaşık 7 km batısında yer alan bir sahil köyüdür (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Bölgede ortalama sıcaklık 13,7°C, ortalama basınç 1012,0 Pa, ortalama nem % 77,6 ve yıllık toplam yağış ortalaması 799,2 mm'dir (Url-16). Yapılaşma sahile yakın alçak kesimlerde gelişirken, en fazla 90 m civarına ulaşan yüksekliğe sahip güney kesimleri genellikle ormanlıktır.

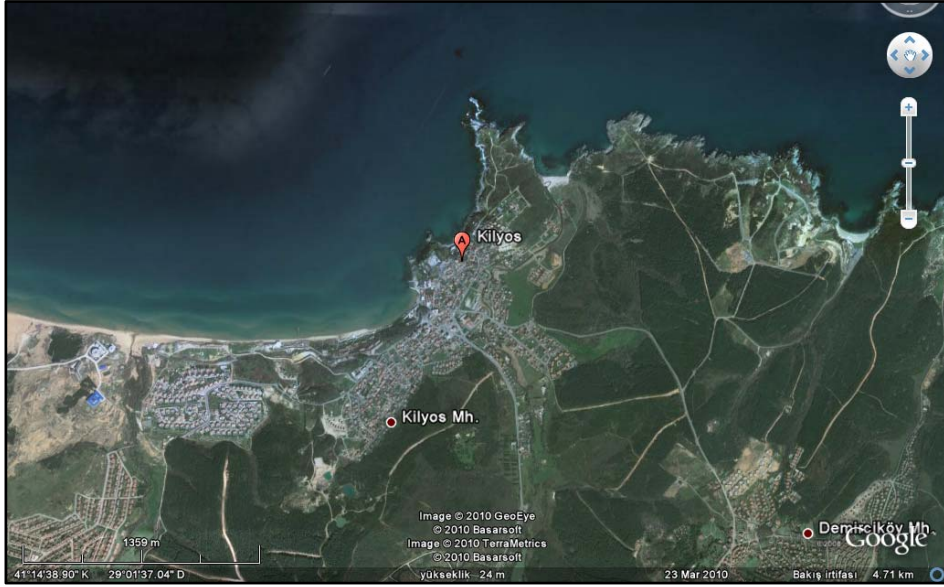
Bölgenin rüzgar ve dalga enerjileri bakımından değerlendirilmesi, İstanbul'un en çok rüzgar alan bölgelerinden biri olması ve aynı zamanda dalgalı oluşuyla tanınan Karadeniz kıyısında olması nedenleri uygun görülmektedir.



Şekil 3.1 : Kilyos (Kumköy)'un İstanbul İli Üzerindeki Yerinin Uydur Görüntüsü.

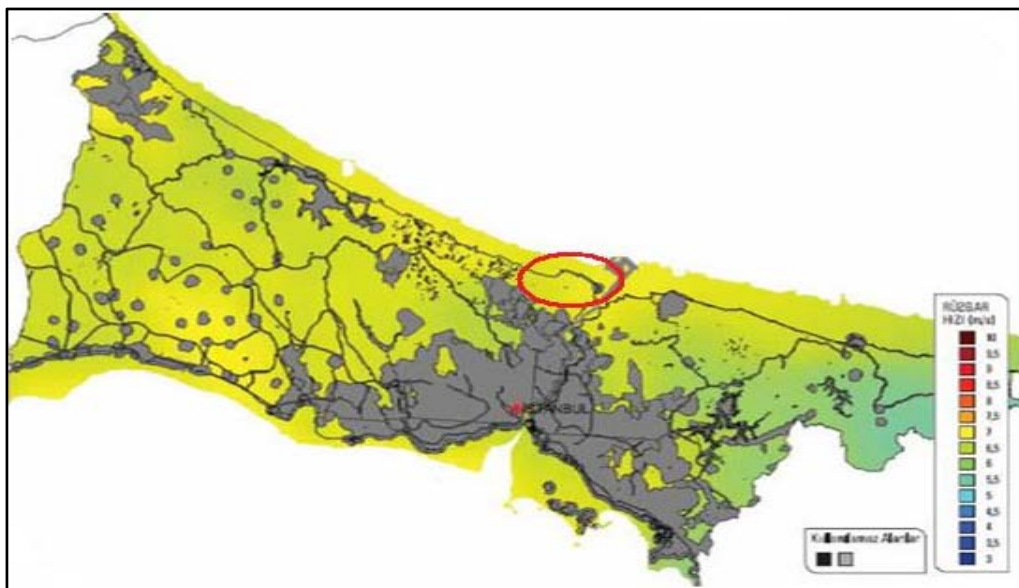
Bölge, İstanbul gibi, enerji ihtiyacı çok yüksek boyutlarda olan bir şehrin en fazla rüzgar alan Karadeniz sahilinde yer alan ve hakim rüzgar yönüne göre konumu bakımından da rüzgar alma açısından avantajlı olan bir bölgedir. Yerleşik nüfusun çok yoğun olmadığı, sahip olduğu uzun sahil nedeniyle insan yoğunluğunun yaz

aylarında aşırı bir artış gösterdiği bir tatil beldesi hüviyetine sahip olan, düzensiz enerji ihtiyacı ve buna bağlı olarak kurulu şebekenin zaman zaman yetersiz kalabildiği Kilyos, enerji santrali kurulumunun uygunluğu açısından incelenmelidir.



Şekil 3.2 : Kilyos (Kumköy)'un Uydu Görüntüsü.

Çalışmada, bu bölgede bir rüzgar ve/veya dalga santrali kurulması durumunun yalnızca teknik ve ekonomik açılarından değerlendirilmesi yapılmış olup; verimli ve ekonomik bulunduğu takdirde böyle bir projenin gerçekleştirilebilirliği, çevresel ve sosyal açılarından da değerlendirilmelidir. Şekil 3.3'te, İstanbul ili rüzgar hızı dağılımı haritası üzerinde Kilyos bölgesi -kırmızı daire içerisinde alınarak- işaretlenmiştir.



Şekil 3.3 : İstanbul'da Rüzgar Hızı Dağılımı (50m) (Url-15).

3.2 Veri Toplama

İstanbul Teknik Üniversitesi'nin Bilimsel Araştırma Projesi çerçevesinde ölçülen ve 2007-2010 yılları arasındaki ölçümlerin çalışmada kullanıldığı rüzgar kayıtları için 10 m taşıma kulesinde montajı yapılmak üzere, CR800 Datalogger (12V akü) alınmıştır. Sistemde Model 03001 rüzgar hız ve yön sensörü, 20W güneş paneli ile GSM modem bulunmaktadır (Şekil 3.4). On beş dakikalık aralıklarla veri alınmaktadır. Ölçümler, GSM modem sistemi ile İTÜ Hidrolik Laboratuvarındaki bir merkezdeki veri tabanına aktarılmaktadır (Önöz ve diğ, 2010).



Şekil 3.4 : İTÜ BAP Kapsamında Kilyos'ta Kurulan Anemometre ve Rüzgar Kayıt Ünitesi (Önöz ve diğ, 2010).

Yukarıda detayları verilen anemometre, Kilyos Kıyı Tahlisiye Bölgesi'nde daha önce de aynı amaçla kullanılmış olan bir direğe monte edilmiştir. Yerden yüksekliği 10 m olan direk konumu itibari ile rüzgar kayıtlarını etkileyecek herhangi bir yapı vb. oluşum etkisinde bulunmamaktadır. Cihazın rüzgar kayıtlarını kaydetme aralıkları amaca göre ayarlanabilmekte olup, dalga hesaplarına yönelik olarak 15 dakikalık ölçüm aralığına ayarlanmıştır (Önöz ve diğ, 2010).

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınan, 1984-1998 yılları arası saatlik veriler ise, İstanbul Bölge Müdürlüğü'ne ait Kumköy (Kilyos) Meteoroloji Gözlem İstasyonunda ölçülmüş olan verilerdir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, İstanbul Bölge Müdürlüğü'nün gözlem istasyonularından biri olan

Kumköy (Kilyos) Meteoroloji Gözlem İstasyonu (Şekil 3.5),1954 Yılında Rasat Hizmetlerine başlanmıştır, 1963 yılında 3160 metre kare üzerine idare binası kurulmuştur.



Şekil 3.5 : DMİ Kilyos Meteoroloji Gözlem İstasyonu (Url-16).

3.3 Rüzgar Verilerinin Değişkenliği

Rüzgar, yersel ve zamansal değişim gösteren bir enerji kaynağıdır. Yersel değişimler, yerel coğrafi şartlara bağlıdır. Rüzgar enerjisi çalışmalarında ve özellikle rüzgar türbininin yerleşim alanının belirlenmesinde, rüzgarın karakteristiklerinin ve bu karakteristiklerin zaman içindeki dağılımının hassasiyetle belirlenmesi gerekir. Verilen herhangi bir yerde rüzgarın zaman içindeki değişimi yıllar arası, yıllık, günlük ve kısa periyotlu olmak üzere dört sınıfa ayrılır:

Yıllar arası rüzgar değişimi: Hava veya iklim parametrelerinin uzun dönem tespiti için yaklaşık 30 yıllık verinin gerektiği kabul edilmektedir. Bir istasyon için kabul edilebilir yıllık ortalama rüzgar şiddeti değerini dikkate almak için yaklaşık 5 yıllık bir veri gerekir. Ortalama değerler üzerinde, yıl sayısı kadar bir bölgede bulunan istasyon sayısı da önem taşır. Birbirine yakın istasyonlar arasında da büyük farklar mevcut olabilir. Bir türbinden üretilen güç rüzgar şiddetinin küpü ile doğru orantılıdır. Bu nedenle yıllık ortalama güç çıktısı veya yıllık enerji çıktısı (kWh/yıl) rüzgar şiddetine göre yıldan yıla daha büyük bir değişim gösterir. Örneğin

rüzgarşiddetindeki %15'lik bir değişimdurumunda, 100.000 kWh/yıl üretmesi beklenen bir türbin, 61.000 ile 150.000 kWh/yıl arasında üretim yapılabilir.

Yıllık rüzgar şiddeti değişimi: Bir bölgede türbin kurmak veya bölgeler arasında en uygun alanı seçmek için yıllık ortalama rüzgar şiddeti en önemli faktörlerden biridir. Yıllık ortalama rüzgar şiddeti 10m yükseklikte, 1-2 m/s gibi küçük bir değer olabildiği gibi, yüksek bir değer de olabilir. Rüzgar enerjisi açısından 5 m/s'lik bir değer, bir türbin için kabul edilebilir bir değerdir. Yıllık rüzgar şiddet değişimi, analiz için önemli bir faktördür. Rüzgar şiddetimevsimsel veya aylık olarak da analiz edilebilir.

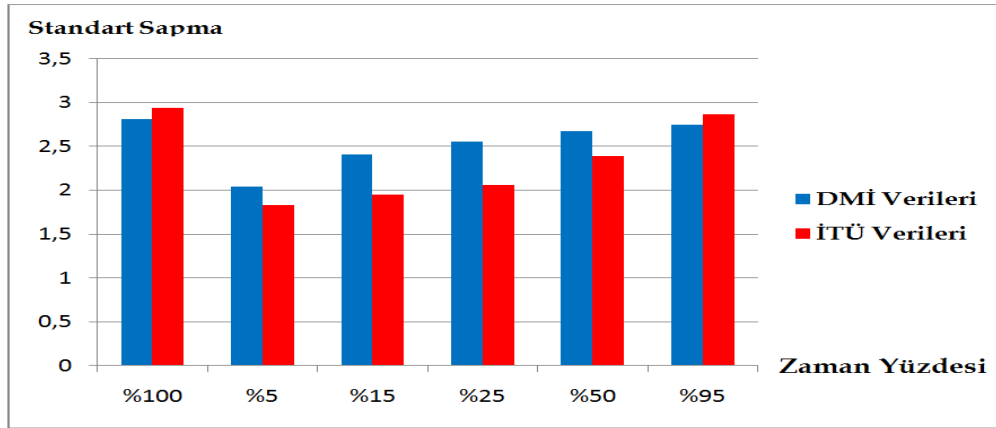
Günlük rüzgar şiddeti değişimi: Yer yüzeyinin farklı ısınması nedeniyle günlük rüzgar şiddeti değişimleri meydana gelir. Gece yarısından güneş doğuşuna kadar olan saatler boyunca rüzgar şiddeti en düşükdeğerinde iken, gün boyunca artış gösterir (Özellikle yazın ve karasal bölgelerde). Bu günlük değişim, yer yüzeyinin üzerindeki daha yüksek seviyelerde farklı olabilir. Rüzgarın gün içindeki davranışında yıldan yıla olan farklar, özellikle rüzgarlı bölgelerde önemli olabilir. Her ne kadar günden geceye günlük çevrimin temel özellikleri tek bir yıllık data ile tanımlanabilse de, günlük salınımların genliği ve gün içinde maksimum rüzgarın olduğu zaman gibi daha detaylı karakteristikler belirlenemeyebilir. Rüzgar şiddetinin mevsimsel ve günlük değişimleri ve rüzgar gücü, rüzgar türbininin kurulmasına karar vermeden önce dikkatle analiz edilmelidir.

Kısa süreli rüzgar şiddeti değişimleri: Rüzgar şiddeti değişiminde genellikle iki aralık vardır: On dakika ve üç saniye. İlkinde, 1 s civarındaki bir örnekleme periyodu kullanılarak tahmin edilir ve 10 dakikalık aralık için ortalaması alınır. On dakikalık aralık ortalaması, enerji çıktısı vasıtası ile rüzgar türbininin performansını tahmin etmek için kullanılır. Diğer taraftan, 3 saniyelik bir aralıktaki kısa süreli rüzgar şiddeti değişimleri, pik hamle (gust) ve türbülans datasını verir. Rüzgardaki türbülans, rüzgar türbinlerinin özellikle kanatlardaki yorulma süresini tahmin etmek için kullanılır. Gust, türbülans içinde süresiz bir olaydır. Bir "gust"un dört karakteristiği vardır. Bunlar; genliği, devam süresi, maksimum gust değişimi ve değişim süresidir. Gust yapısı, bir rüzgar türbininin davranışını etkiler. Örneğin, bir gust genliğinden, bir rüzgar türbini için ihtiyaç duyulan yapısal gerilmeler tahmin edilebilir. Bir ekstrem gust olayı, türbinin kanat gibi bir elemanının veya tüm yapının dayanıklılığını belirler. Sisteme giriş bu nedenle süreklilikten çok ayırıktır.

Aşırıyüklemeler, bir türbin elemanının muhtemel bir kullanılabilir yaşam süresini sağlayan şiddetli gust değerine duyarlılığını belirleyerek, analiz edilir (Burton, 2001).

3.4 Veri Analizi

Herhangi bir bölgedeki rüzgar enerjisi potansiyelinin doğru hesaplanması için rüzgar ölçüm sistemine uygun bir yer seçilmeli ve ölçüm süresi en az bir yıl olmalıdır. Rüzgar ölçüm istasyonları ile belirli bir yükseklikten alınan rüzgar hız verilerinin frekans dağılımları elde edilerek veri analiz işlemleri yapılır. Bu frekans dağılımı yardımıyla hangi rüzgar hızı değerlerinin sık gözlemlendiği belirlenebilir. Rüzgar hızı verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s arasında olmalıdır. Herhangi bir alandaki standart sapmanın küçük olması, o alandaki rüzgar rejiminin düzenli olduğunu gösterir (Kurban ve diğ., 2006). Çizelge 3.1’de, uygulama bölgesinde ölçülen verilerin -zamanın çeşitli yüzdeleri için- standart sapma değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Kilyos Bölgesinde Ölçülen Rüzgar Verileri Standart Sapma Değerleri

Şekil 3.6, hız değerlerinde standart sapmanın 0-3 arasında olduğunu, dolayısıyla bölgedeki rüzgar rejiminin düzenli olduğunu göstermektedir. Çalışmada veri analizi, aşağıdaki üç ayrı başlık altında yapılmıştır.

3.4.1 Rüzgar Gülü

Rüzgar hızlarının dağılımlarını ve değişken rüzgar yönlerinin frekansını göstermek için rüzgar gülü adı verilen çizimler yapılır. Bu çizimler, rüzgar yönlerinin ve hızlarının meteorolojik olarak gözlenmesine dayanmaktadır (Yerebakan, 2001).

Pusula 22,5 derecelik 16 sektöre ayrılmıştır. Sektörler, yönleri gösterir. Sıfır ve 360 dereceler kuzeyi temsil ederken; 90 derece doğuyu, 180 derece güneyi ve 270 derece

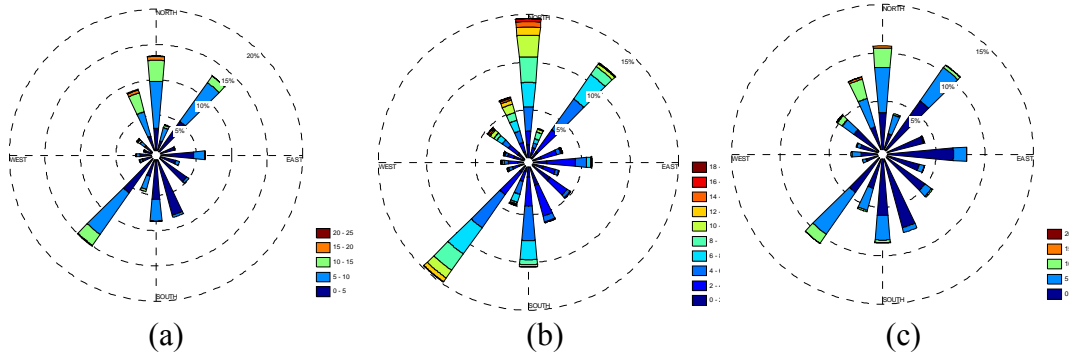
de batıyı göstermektedir. Diğer açılar ise ara yönleri belirtirler. Oluşan parçaların yarıçapları, rüzgar yönünün bağıl frekansını vermektedir, yani rüzgarın o yönden zamanın yüzde kaçında estiğini gösterir. Söz konusu yönlerdeki rüzgar hızları ise farklı renklerle gösterilerek belirtilmiştir.

Rüzgar gülleri, bir bölgeden diğerine geçerken değişiklik gösterir. Gerçekte bir meteorolojik parmak izi formudurlar. Komşu bölgelerden elde edilen rüzgar gülleri çoğu kez birbirine benzerdir. Dolayısıyla çevredeki gözlemler sonucu oluşturulan rüzgar güllerinden bir ortalama almak da güvenli sonuç verebilir. Dağlar, ovalar ve farklı bölgelerde farklı sahillere oluşmuş karmaşık alanlar için bu tip bir kestirim yapılamaz.

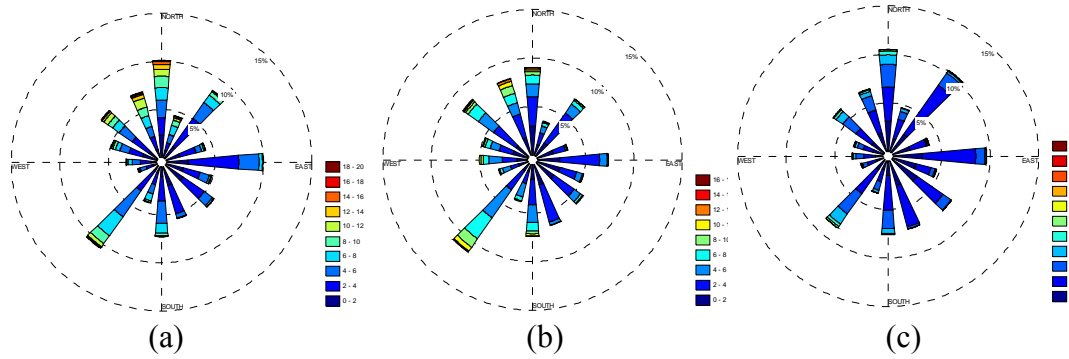
Rüzgar türbinlerinin konumlandırılması için rüzgar gülü kullanımı oldukça faydalıdır. Şayet rüzgar enerjisinin büyük bir kısmı belirli bir yönden geliyorsa, rüzgar türbinlerini bölgeye yerleştirmek için mümkün olduğu kadar az engel olan ve o yöndeki düz bir bölge tercih edilmelidir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta da rüzgarın yıldan yıla değiştiğidir. Bu durumda, enerji kapasitesi de yıllara göre değişiklik gösterecektir. Güvenilir bir ortalama elde etmek için birkaç yıl gözlem yapmak gereklidir. Bu rüzgar parkı planlayıcıları bir yıl boyunca yerel ölçümler yapmakta, ardından çevredeki meteoroloji istasyonundan alınan uzun dönemli meteorolojik gözlemleri kullanarak, uzun dönemli bir ortalama elde etmek için, ölçümlerini uyarlamaktadırlar (Yerebakan, 2001).

Söz konusu bölgede dalga enerjisinden faydalanılmak isteniyorsa, rüzgar gülü yine önemli bilgiler sunmaktadır. Enerji üretimi açısından faydalı olan yüksek ve güçlü dalgaların oluşması için kuvvetli rüzgarların denizden karaya doğru esiyor olması gerekmektedir ve bu yüzden dalga enerjisi üretim santrali kurulması düşünülen bölgelerde de rüzgar güllerinden elde edilecek bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

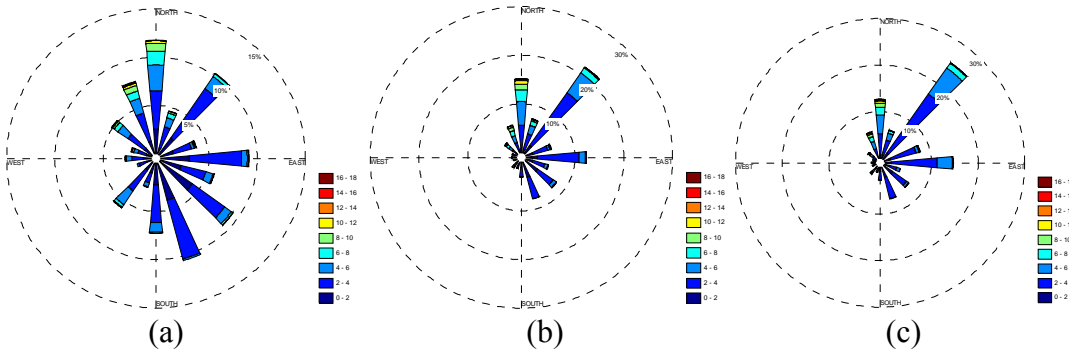
Çalışmada kullanılan rüzgar gülleri; İstanbul Kilyos'ta, Devlet Meteoroloji İşleri tarafından 1984-1998 yılları arasında (15 yıl) ölçülmüş saatlik rüzgar hızı ve yönü bilgileri ile İTÜ tarafından bölgenin dalga enerjisi potansiyelinin incelenmesine yönelik bir Bilimsel Araştırma Projesi yürütmek amacıyla ölçülmekte olan, Eylül 2007-Mayıs 2010 arası 15'er dakikalık rüzgar hızı ve yönü bilgileri kullanılarak, MATLAB programı ile çizilmiştir. Çalışma boyunca kullanılan rüzgar verileri ile çizilmiş olan rüzgar gülleri aşağıdaki şekillerle verilmiştir.



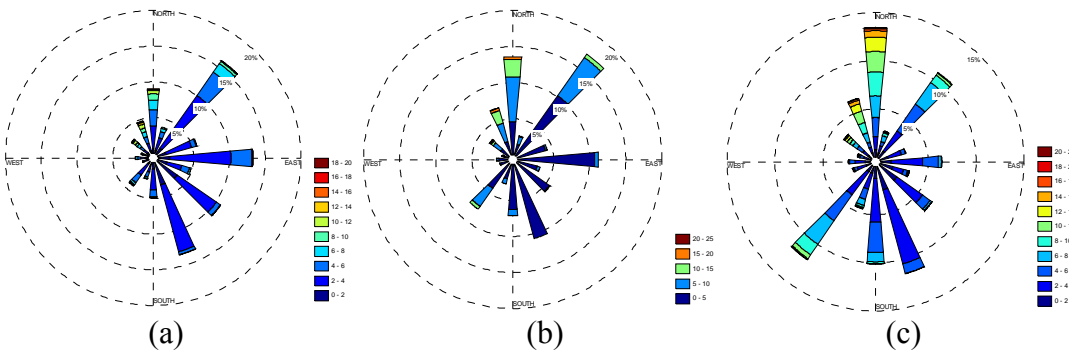
Şekil 3.7 : 1984-1998 Arası DMİ Verileri Kış Ayları: (a) Aralık. (b) Ocak. (c) Şubat.



Şekil 3.8 : 1984-1998 Arası DMİ Verileri İlkbahar Ayları: (a) Mart. (b) Nisan. (c) Mayıs.



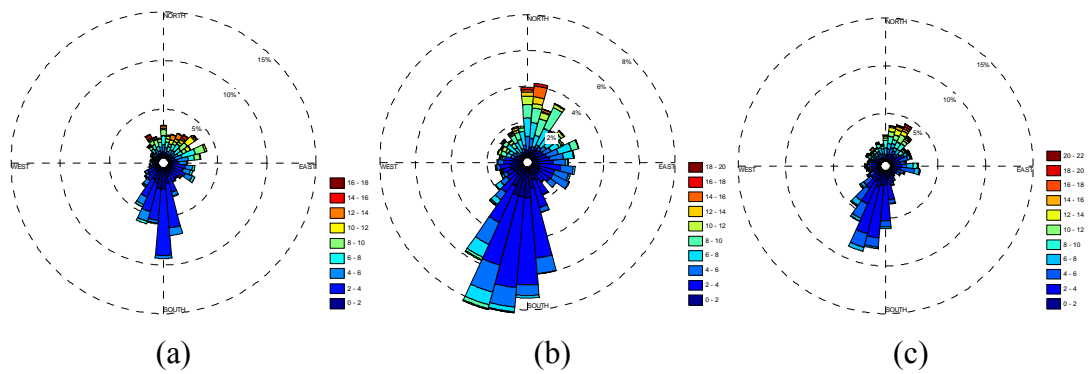
Şekil 3.9 : 1984-1998 Arası DMİ Verileri Yaz Ayları: (a) Haziran. (b) Temmuz. (c) Ağustos.



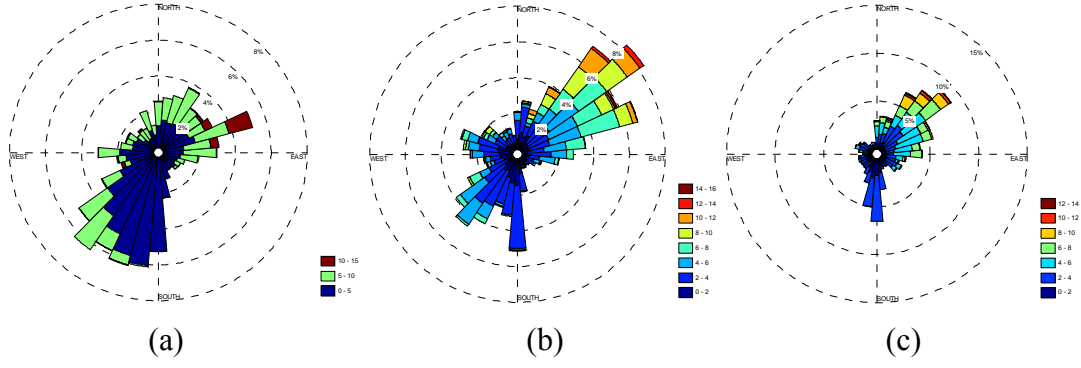
Şekil 3.10 : 1984-1998 Arası DMİ Verileri Sonbahar Ayları: (a) Eylül. (b) Ekim. (c) Kasım.

Rüzgar yönleri 16 sektör olarak verildiği için DMİ verilerindeki açılar ortalama olarak girilmiştir. Şekillere bakıldığında kış aylarında (Şekil 3.7) hakim rüzgar yönlerinin kuzey, kuzeydoğu ve diğerlerine göre daha az baskın olmakla birlikte güneybatı olduğu görülmektedir. En yüksek rüzgar hızları ise 20-25 m/s arasında değişmektedir. Bahar aylarında (Şekil 3.8) da hakim rüzgar yönleri çok büyük farklılıklar göstermez. Yalnız Mart ve Mayıs aylarında bu yönlere ek olarak doğu yönlü esen rüzgarların çokluğu da dikkat çekmektedir. Rüzgar hızları ise düşük göstermektedir. Yaz aylarında (Şekil 3.9) hakim rüzgar yönünün, haziran ayında görülen kuzey yönlü rüzgarların baskınlığı dışında, kuzeydoğu olduğu açık şekilde görülürken; en yüksek rüzgar hızları 16-18 m/s aralığında kalmıştır. Sonbahar aylarında (Şekil 3.10) hakim rüzgar yönü yine açık bir şekilde kuzeydoğuyu gösterirken; yaz ayları içinde Haziran ayında görülen uyumsuzluğun bir benzeri de sonbahar ayları için Kasım ayında gerçekleşmiştir ve yalnızca Kasım ayında hakim yön kuzeydir. Rüzgar hızları ise 25 m/s'lere kadar yükselir. En belirgin baskınlık ise Temmuz ve Ağustos aylarında, kuzeydoğu yönlü rüzgarlar ile görülmüştür. Rüzgar hızlarının bir hayli düştüğünün görüldüğü bu aylarda rüzgarın, zamanın % 25'i civarında aynı yönde estiği tespit edilmiştir.

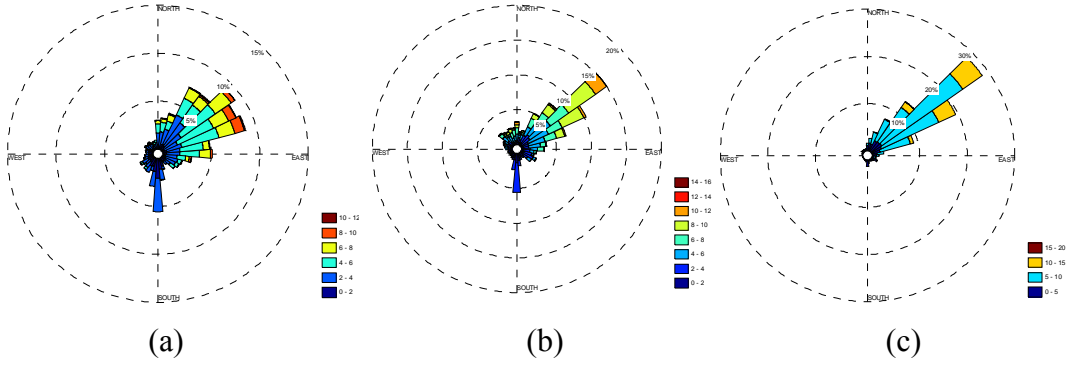
İTÜ Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında hazırlanan “Türkiye Kıyılarında Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi” adlı raporda kullanılmak üzere ölçülmüş olan veriler için çizilen rüzgar gülleri ise; Şekil 3.11 (Kış ayları), Şekil 3.12 (İlkbahar ayları), Şekil 3.13 (Yaz ayları) ve Şekil 3.14 (Sonbahar ayları)'te gösterilmiştir.



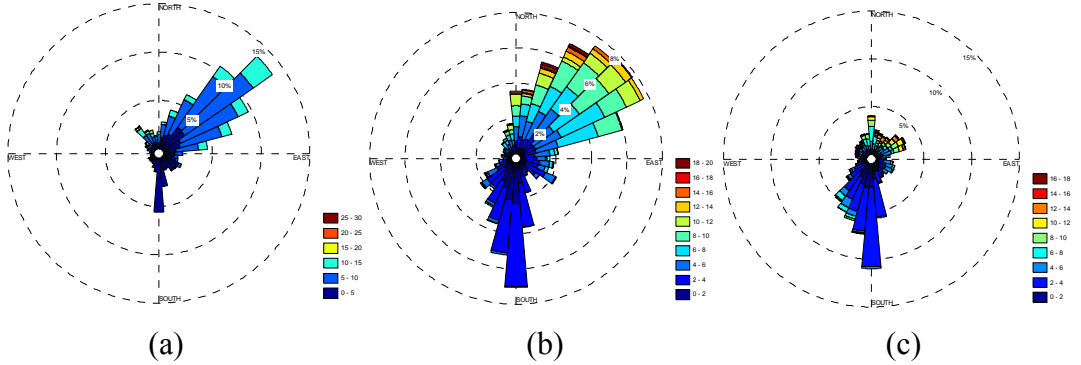
Şekil 3.11 : 2007-2010 Arası İTÜ Verileri Kış Ayları: (a) Aralık. (b) Ocak. (c) Şubat.



Şekil 3.12 : 2007-2010 Arası İTÜ Verileri İlkbahar Ayları: (a) Mart (b) Nisan. (c) Mayıs.



Şekil 3.13 : 2007-2010 Arası İTÜ Verileri Yaz Ayları: (a) Haziran. (b) Temmuz. (c) Ağustos.



Şekil 3.14 : 2007-2010 Arası İTÜ Verileri Sonbahar Ayları: (a) Eylül. (b) Ekim. (c) Kasım.

DMİ'den alınan verilerin en son yılı ile arasında yaklaşık 10yıl bulunan ve daha düşük bir rakımda yapılan İTÜ Bilimsel Araştırma Projesi ölçümlerinden alınan veriler ile çizilen rüzgar güllerinde ise hakim rüzgar yönlerinde özellikle kış aylarında önemli değişiklikler gözlenmektedir. Kasımdan başlayarak, mart ayına kadar hakim rüzgar yönünün baskın bir şekilde güneybatı ve güney olduğu görülürken; diğer aylarda, DMİ verilerinde olduğu gibi, kuzeydoğudur. En yüksek rüzgar hızlarında ise genel olarak bir miktar düşüş olduğu gözlenmektedir. En

yüksek hızlar, soğuk dönemlerde 20 m/s civarından yükseğe çıkmazken, sıcak aylarda 14-16 m/s civarlarına kadar gerilemektedir.

Dalga enerjisi üretimi açısından verimli rüzgarların, sahile dik olarak esen rüzgarlar olduğundan daha önceki bölümde bahsedilmişti. Rüzgar gülleri bize, İstanbul'un kuzey sahilinde yer alan ve kuzeydoğu yönüne doğru bakan Kilyos sahillerinin dalga enerjisi açısından da oldukça verimli olabileceğini göstermektedir. Genel olarak hakim rüzgar yönü olan kuzeydoğu yönlü rüzgarlar, Kilyos sahillerine dik olarak esen rüzgarlardır ve dalga oluştururlar. Hakim rüzgar yönü olmasının dışında en yüksek hızların görüldüğü yön de genellikle kuzeydoğu, daha sonra da kuzey yönü, yani yine sahilde dalga oluşturabilecek yönlerdir.

3.4.2 Mevsimsellik Analizi

Mevsimselliğinin belirlenmesinde birçok yöntem kullanılabilir. Bu yöntemlerden; yönsel istatistik analizde, çeşitli hızların oluşma zamanları gün cinsinden ifade edilip, bu günler esme hızı karakterlerine göre mevsimsellik uzayında belirlenebilmektedir. Mevsimsellik uzayında ise; farklı hızların yılın hangi zaman diliminde oluşabileceği rahatlıkla gözlenebilmektedir. Mevsimsellik ölçümleri sayesinde:

- Rüzgar hızının, zamanın ne kadarında ve yılın hangi dönemlerinde güç üretimi açısından verimli olduğu belirlenebilir.
- Rüzgar hızının, zamanın ne kadarında ve yılın hangi dönemlerinde türbinler açısından tehlikeli hızlarda olduğu belirlenebilir.
- Mevsimsellik incelemesi ile belirlenebilecek olan bölge benzerlikleri ile ölçüm yapılmamış olan bölgeler için tahminler yapılabilir ve/veya eksik veriler tamamlanabilir.

Mevsimsellik hesabı yapılırken ilk olarak “Hız-Süreklilik Grafiği” çizilmelidir.

3.4.2.1 Hız - Süreklilik Çizgisi

Rüzgar zaman serisinden hareketle, rüzgar hızının belli bir değere eşit ya da ondan büyük olduğu zaman yüzdesi hesaplanıp; düşey eksene rüzgar hızı, yatay eksene zaman yüzdeleri taşınırsa, hız süreklilik eğrisi (HSE) elde edilir. HSE'yi elde ederken mümkün olduğu kadar uzun bir gözlem periyoduna ait rüzgar verisini

kullanmak gerekir. HSE'lerden yararlanarak zamanın belli bir yüzdesinde aşılan rüzgar hızı grafikten okunabilir. HSE, rüzgar hızı rastgele bir değişken olarak ele alındığında elde edilen toplam olasılık eğrisine benzer (Yerebakan, 2001).

Hız-Süreklilik Eğrisi, bir bölgede belirli bir zaman yüzdesinde hızın bulunma olasılığını göstermektedir. Bölgede yıldan küçük zamandaki rüzgar hızları istatistik olarak zamanla değişen bir süreç gösterirler. Bu sebeple, ortalama, standart sapma, çarpıklık katsayısı gibi istatistik özellikleri zamanla değişkendir ve günlük hız değerlerinin belirli bir değeri aşma olasılığı, yıl içinde bulunan güne bağlıdır.

Hız-Süreklilik Eğrisi üzerinde, aşılma olasılıkları %0 - %5 (Yüzdeler; bölgedeki rüzgar profili, türbin çeşidi gibi değişkenler doğrultusunda farklılıklar gösterebilir) arasında kalan bölge ve üzerinde kalan hız değerleri yüksek hızlardır, ancak zamanın çok küçük bir döneminde meydana gelmektedirler. Zamanın düşük bir yüzdesinde oluşması sebebiyle, hızların oluşma tarihleri düzenli bir davranış sergileyebilmektedir. Bu bölgedeki hızlar, türbinlerin mukavemetleri ve kurulu güç hesapları açısından önem taşır. Bu bölgeden hesaplanan kurulu güçler çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Ülkemizin enerji gereksinimi göz önünde bulundurulduğunda, zamanın çok küçük bir kısmında da olsa bu büyük güçlere ulaşmak günümüzde projelendirilen tesislerde daha çok tercih edilmektedir. Aynı zamanda, türbinlerdeki bazı aksamaların zarar görme ihtimalinden dolayı, türbin bakımlarının bu hızların görülme olasılığının yüksek olduğu dönemlerin öncesine denk getirilmesi ve böylece türbinlerin bu dönemlerden önce sağlamlaştırılması da düşünülebilir.

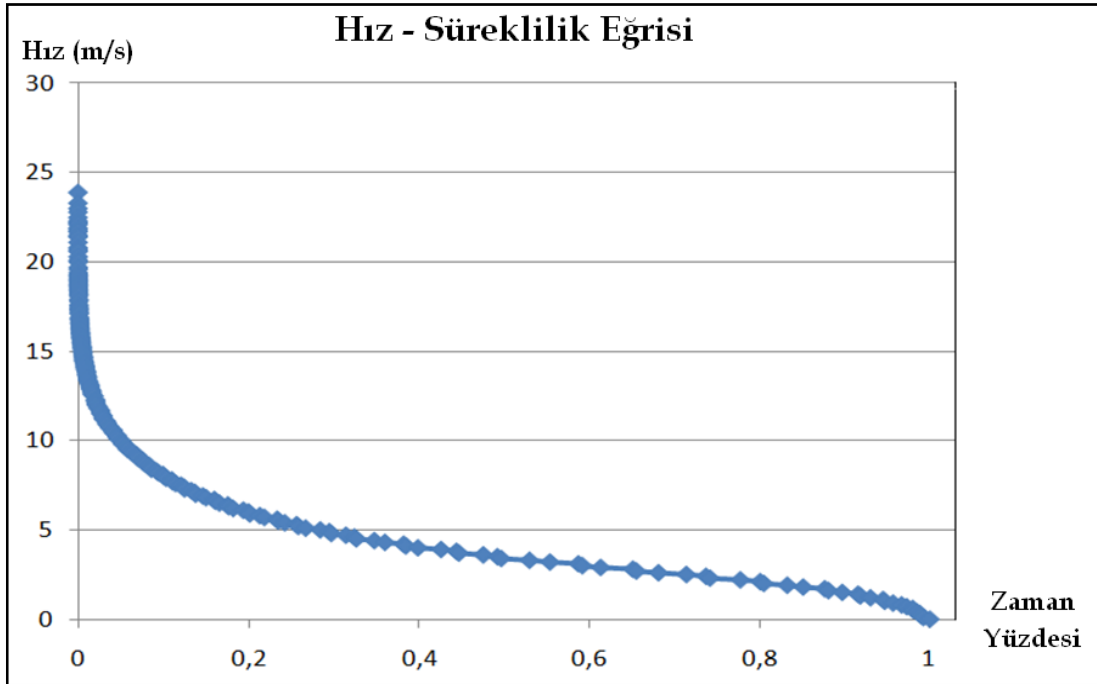
%5-%95 arasında kalan ikinci bölgede ise hızlar ilk bölgeye göre daha kararlı davranış sergilemektedir. Zamanın büyük bölümünde oluşan bu bölgede, rüzgar karakterleri birinci bölgeye göre daha karardır fakat zaman içindeki dağılımı daha değişkendir.

Zamanın %95'i ve %95'inden küçük hızların oluşturduğu 3. kısım ise; rüzgardan verim alınamayacağı, güç üretiminin gerçekleşmeyeceği zaman dilimini gösteren bölgedir. Rüzgar santrallerinin güvenilir enerji miktarının belirlenmesinde bu bölgedeki hızlar dikkate alınmalıdır. Türbinlerden verim alınamayacak olan bu dönem, türbin bakımı süreci için değerlendirilebilir.

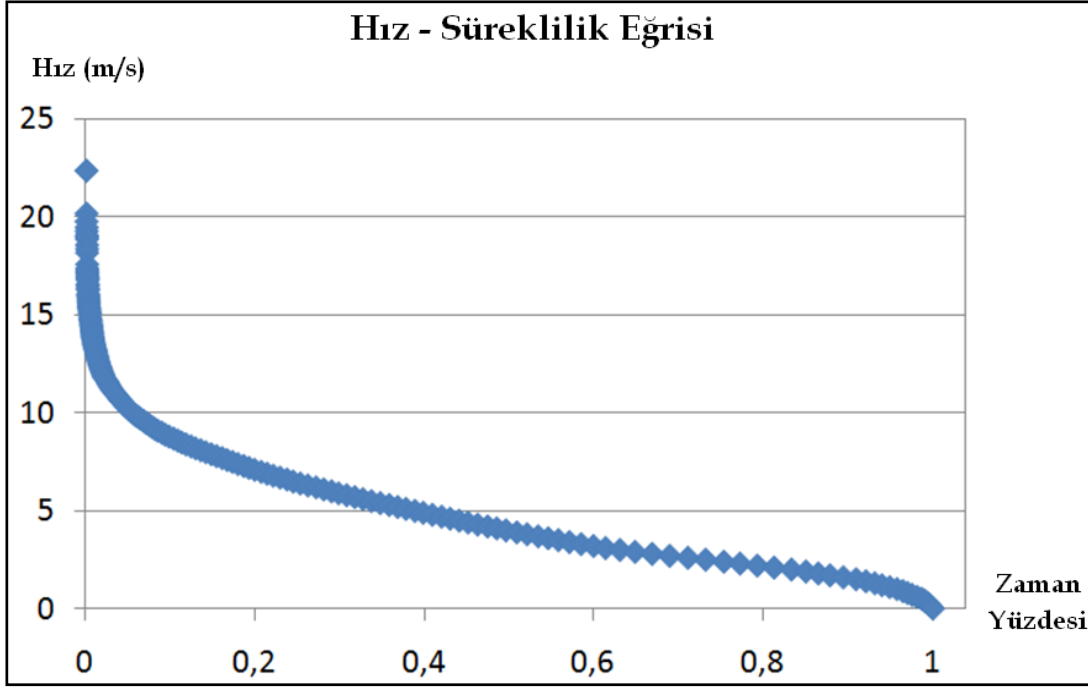
Görüldüğü üzere; “Hız-Süreklilik Eğrisi”nin rüzgar enerjisi açısından çeşitli kullanım şekilleri mevcuttur. Belirli uygulama bölgesi üzerinde bölgeselleştirme yapılırken Hız-Süreklilik Eğrisi üzerinden çalışmanın daha verimli sonuçlar vereceği söylenebilir (Albostan, 2007).

Bu grafik için öncelikle, ölçüm süresi içinde gerçekleşmiş olan farklı hız değerlerinin kaçar defa tekrarlandığının bulunması için gerekmektedir ve çalışmada bu işlem MATLAB programı ile yapılmıştır. Alınan sonuçlar doğrultusunda değişik hız değerleri ve gerçekleşme sayıları kümülatif olarak MS Excel programına işlenir ve bu program vasıtasıyla elde edilen grafikten, zamanın değişik yüzdeleri için hangi hız değerlerinin ele alınacağına saptanması ve çeşitli yüzdeler için “mevsimsellik grafiği”ni elde etme imkanı sağlanmış olur. Aynı değerler, gerçekleşme sayıları kümülatif olarak değil de ayrı ayrı işlendiğinde -her bir gerçekleşme sayısı 1 saati ifade ettiği için- “Hız (m/s) - Gerçekleşme Süresi (saat)” histogram grafiğini elde etme imkanı da verir.

Aşağıdaki şekillerde, 1984-1998 yılları arası DMİ ölçüm verileri (Şekil 3.15) ve 2007-2010 yılları arasında İTÜ Bilimsel Araştırma Projesi ölçüm verileri (Şekil 3.16) için çizilmiş olan “Hız-Süreklilik Grafikleri” gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : 1984-1998 Yılları Arasında DMİ Tarafından Kumköy’de Ölçülen Rüzgar Hızı Verilerinin Hız-Süreklilik Eğrisi.



Şekil 3.16 : 2007-2010 Yılları Arasında İTÜ Enerji Enstitüsü Tarafından Kumköy’de Ölçülen Rüzgar Hızı Verilerinin Hız-Süreklilik Eğrisi.

DMİ’nin Kilyos Klimatolojik Gözlem İstasyonu’nda ölçülmüş olan veriler ile oluşturulan grafikte, ölçüm yapılan 15 yıl boyunca zamanın yüzde beşinde 10 m/s ve üzeri hızlar, yüzde ellisinde 3,4 m/s ve üzeri hızlar, yüzde doksan beşinde 1 m/s ve üzeri hızlar meydana gelmiş; günümüz rüzgar türbinlerinin çoğu ile enerji üretimi açısından verimli olabilecek en düşük rüzgar hızı olarak kabul edilen 4 m/s ve üzeri hızlar ise zamanın % 40’ında gerçekleşmiştir. İTÜ Enerji Enstitüsü tarafından farklı yıllarda ölçülmüş veriler için bu değerler; zamanın yüzde beşi için 10,2 m/s ve üzeri, zamanın yüzde ellisi için 3,9 m/s ve üzeri, zamanın yüzde doksan beşi için 1,1 m/s ve üzeri olarak tespit edilirken; 4m/s üzeri hızların gerçekleşme yüzdesi ise bu kez % 49 olarak tespit edilmiştir. Fakat bu değerler, rüzgar hızları, türbin yüksekliğine göre hesaplandığında farklılıklar göstermektedir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde (Bölüm 4) enerji üretimi açısından incelenen türbinlerin göbek (hub) yüksekliklerine göre çizilen ve EK-A.1 ile EK-A.2’de gösterilen Hız-Süreklilik Eğrilerine göre zamanın belirli yüzdelerinde aşılacak rüzgar hızları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Farklı Göbek Yükseklikleri İçin Zamanın Belirli Yüzdelerindeki Rüzgar Hızları.

Zaman Yüzdesi	% 5		% 50		% 95	
	İTÜ	DMİ	İTÜ	DMİ	İTÜ	DMİ
50 m	≥10,92 m/s	≥10,20 m/s	≥4,18 m/s	≥3,43 m/s	≥1,18 m/s	≥1,01 m/s
60 m	≥11,43 m/s	≥10,68 m/s	≥4,37 m/s	≥3,60 m/s	≥1,23 m/s	≥1,06 m/s
67 m	≥11,75 m/s	≥10,98 m/s	≥4,49 m/s	≥3,70 m/s	≥1,27 m/s	≥1,09 m/s
80 m	≥12,29 m/s	≥11,48 m/s	≥4,70 m/s	≥3,86 m/s	≥1,33 m/s	≥1,14 m/s

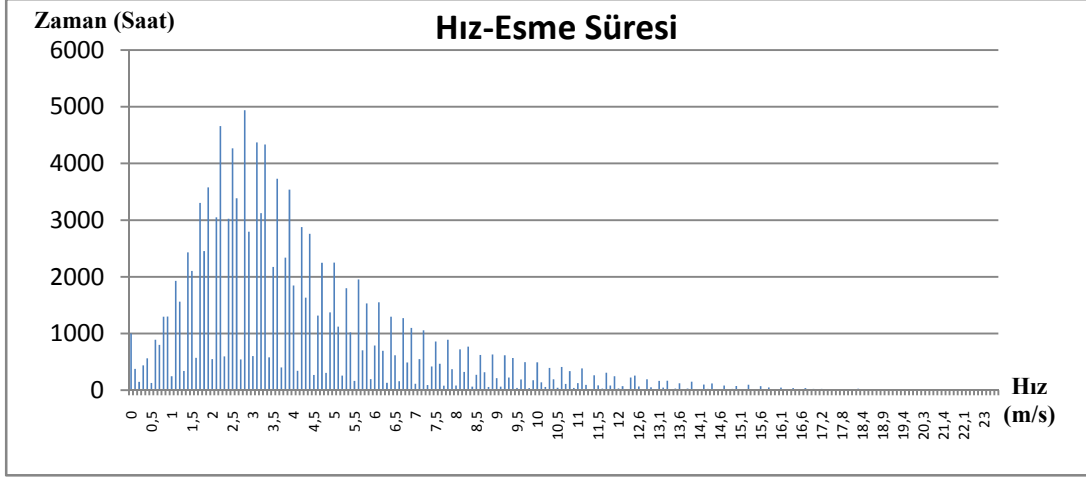
Hızların, türbin göbek yüksekliklerine göre değişimi (2.9) numaralı formül ile hesaplanırken, formüldeki α (Pürüzlülük Katsayısı) değeri, gözlem istasyonlarının hafif ağaçlık bir bölgede ve alçak binalardan oluşan yerleşim yerine yakın olmalarından dolayı 0,25 (Çizelge 2.1) olarak kabul edilmiştir. Bulunan sonuçların ardından, türbinlerin -ölçüm süresi boyunca- enerji üretebilecekleri zaman yüzdeleri de hesaplanmış ve Çizelge 3.2’deki şekilde oluşmuştur.

Çizelge 3.2 : Türbinlerin Enerji Ürettiği Sürelerin Toplam Ölçüm Sürelerine Oranları.

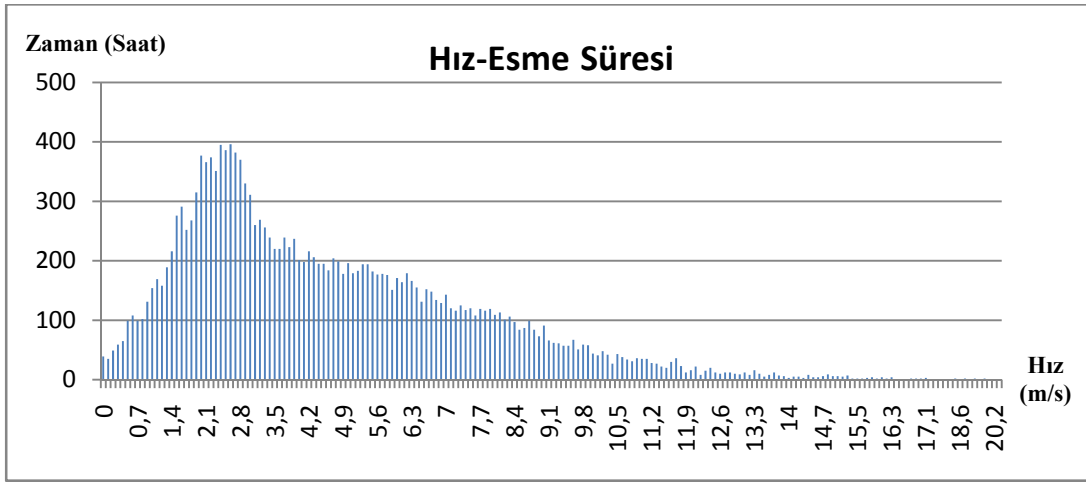
Türbin Adı	Türbin Göbek Yüksekliği (m)	Enerji Üretilen Hız Aralığı (m/s)	Enerji Üretilen Zaman Yüzdesi (%)	
			DMİ	İTÜ
SWT 3,6 MW	80	3-25	67	73
Vestas V90 3 MW	80	4-25	49	58
Vestas V80 2 MW	67	4-25	45	57
Bonus 2 MW	60	4-25	44	56
SWT 1,3 MW	60	3-25	63	69
Nordex 1,3 MW	50	4-25	40	53

Aşağıdaki histogramlarda da görüleceği üzere, en uzun süre ölçülen rüzgar hızlarının 3 m/s civarında olduğu Kilyos bölgesinde, türbinin devreye alma hızının 4 m/s yerine 3 m/s olmasının, enerji üretilen zaman yüzdesi açısından önemli bir fark yarattığı görülmektedir.

Bölgede ölçülmüş hız değerlerinin ölçüm süresi boyunca gerçekleşme sürelerini veren ve hızların gerçekleşme sürelerini saat olarak gösteren “Hız-Gerçekleşme Süresi Histogramları” ise, DMİ verileri için Şekil 3.17; İTÜ verileri için Şekil 3.18.’de verilmiştir.



Şekil 3.17 : DMİ Rüzgar Hızı Verileri (1984-1998), Hız (m/s) - Esme Süresi (Saat) Grafiği.



Şekil 3.18 : İTÜ Enerji Enstitüsü Rüzgar Hızı Verileri (2007-2010), Hız (m/s) - Esme Süresi (Saat) Grafiği.

Bu diyagramlara göre 15 yıllık DMİ verilerinde en uzun süre görülen hız değeri, 4939 saat ile 2,8 m/s; İTÜ Enerji Enstitüsü verilerine göre ise 396 saat ile 2,6 m/s'dir. Her iki data serisi için çizilen histogramlar şekil olarak benzerlik göstermektedir ve ölçüm süreleri boyunca en uzun süre görülen rüzgar hızları; 1,5 m/s ile 3,5 m/s aralığında öne çıkmaktadır.

Bütün bu bulgulardan yola çıkarak, inceleme konusu olan herhangi bir türbinin, inceleme bölgesinde zamanın ne kadarında çalışacağı, dolayısıyla rüzgarın söz konusu türbin için ne ölçüde sürekli olduğu hakkında fikir elde edilmiş olur.

Çalışmada incelenen her türbinin yüksekliğine göre ayrı ayrı uyarlanmış olan rüzgar hız verileri; her türbinin kendi rotor çapı, havanın özgül kütlesi ve üç kanatlı türbinler için ortalama türbin güç katsayısı (C_p) değeri olan 0,4 ile birlikte 2.6 no'lu

formülde yerine konduğunda, türbinlerin Kilyos bölgesindeki teorik enerji üretim değerleri Çizelge 3.3'teki gibi oluşur.

Çizelge 3.3 : Yıllık Teorik Enerji Üretim Değerleri (MWh)

Gözlem İstasyonu ve Ölçüm Yılları	SWT 3,6 MW	Vestas 3 MW	Vestas 2 MW	Bonus 2 MW	SWT 1,3 MW	Nordex 1,3 MW
DMİ Kilyos Gözlem İstasyonu (1984-1998)	5683	3912	2697	2240	1537	1202
İTÜ BAP Gözlem İstasyonu (2007-2010)	8129	5659	3906	3238	2193	1756

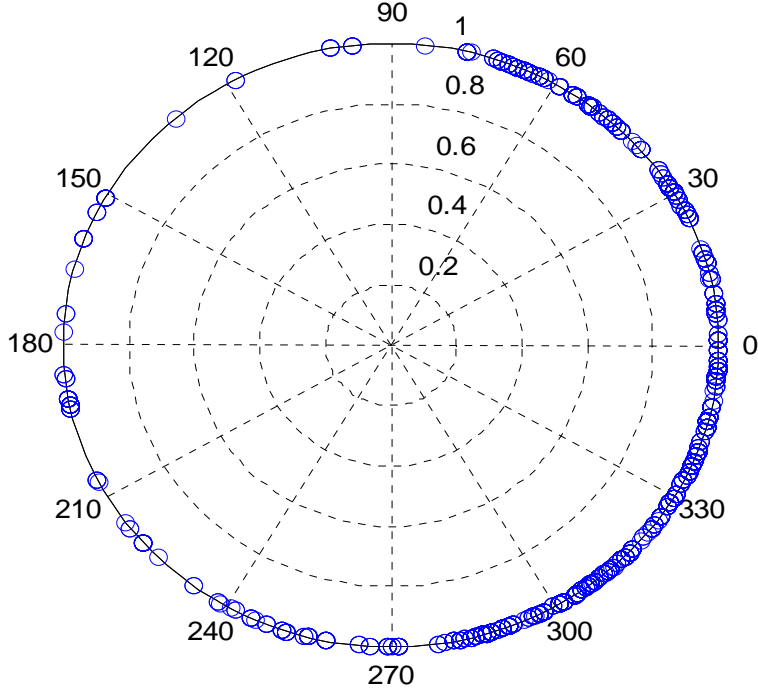
Ortaya çıkan bu değerler; pürüzlülük uzunlukları, bölgenin topografik yapısı, türbinlerin gerçek C_P (Güç Katsayısı) değerleri gibi bilgilere dayanmadan oluşturulduğu için bölgede üretilecek gerçek enerji miktarlarını vermekten uzak olmakla birlikte, yatırımcıya yalnızca türbin seçiminde -ayrıntılı bir analiz öncesinde- fikir verme özelliğindedir.

3.4.2.2 Mevsimsellik Hesabı

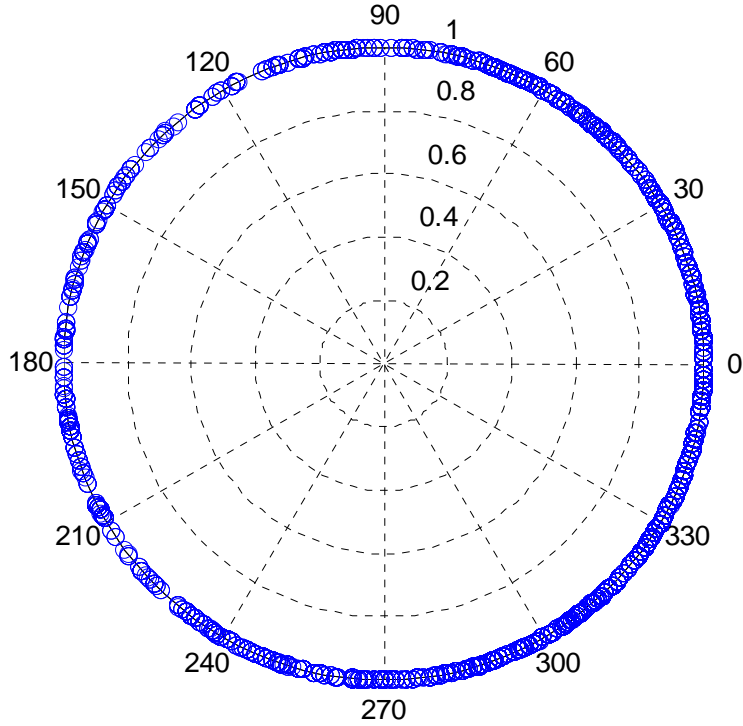
Mevsimsellik grafiği için birinci derecede önemli olan bilgi, zamanın belli yüzdelerinde gerçekleşme ihtimali olan hız değerlerinin, ölçümlerin çizelge halinde tutulduğu matrisin hangi satırında olduğudur. Yine MATLAB programı kullanılarak bulunan bu satır değerleri -her satırın bir günü ifade ettiği bilindiği için- MS Excel programında tarihlere çevirilir ve hangi hız değerine hangi yıllarda ve yılın hangi günlerinde tanıklık edildiği bulunmuş olur. Bu tarih bilgilerinden yola çıkılarak "Juldate" adı verilen değer bulunur. Bu değer, gözlenen hız değerinin yılın hangi gününde gerçekleştiğinin, dolayısıyla hangi mevsime denk geldiğinin bilgisini verir. Mevsimsellik analizinde, hızların oluşma tarihleri önemli olduğu için bu bilgi, mevsimsellik analizi için istenen bilgidir fakat MATLAB programı vasıtasıyla, günlerin açısız değerleri kullanılarak çizilen mevsimsellik grafiği için "juldate" denilen günlerin radyan cinsinden değerlerinin bulunması gerekmektedir (3.1).

$$\theta = (JULDATE) \times \frac{2 \times \pi}{365} \quad (3.1)$$

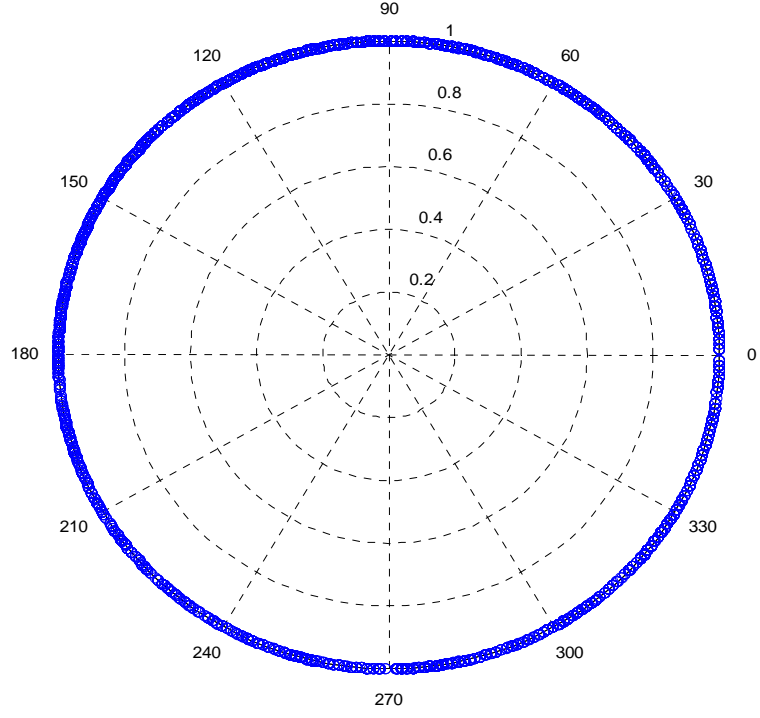
Bulunan açısız (radyan) değerler MATLAB'te polar grafiğe işlendiğinde "Mevsimsellik Grafiği" ortaya çıkar. Günler, açısız değerler ile daire üzerinde sembolize edileceği için bir yıl 365 yerine 360 gün olarak kabul edilmelidir.



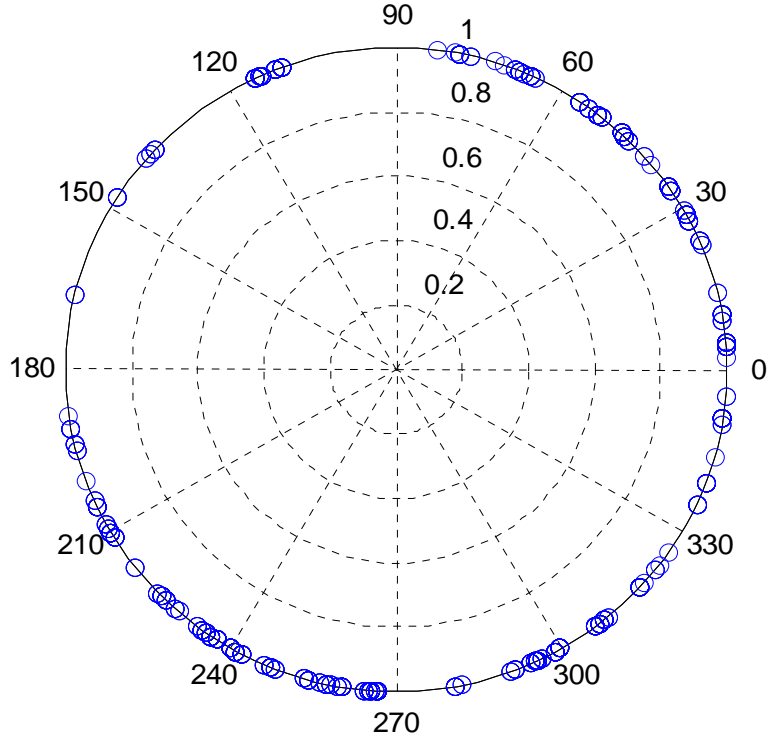
Şekil 3.19 : DMİ Rüzgar Hızı Verileri (1984-1998), Zamanın %1'inde Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.



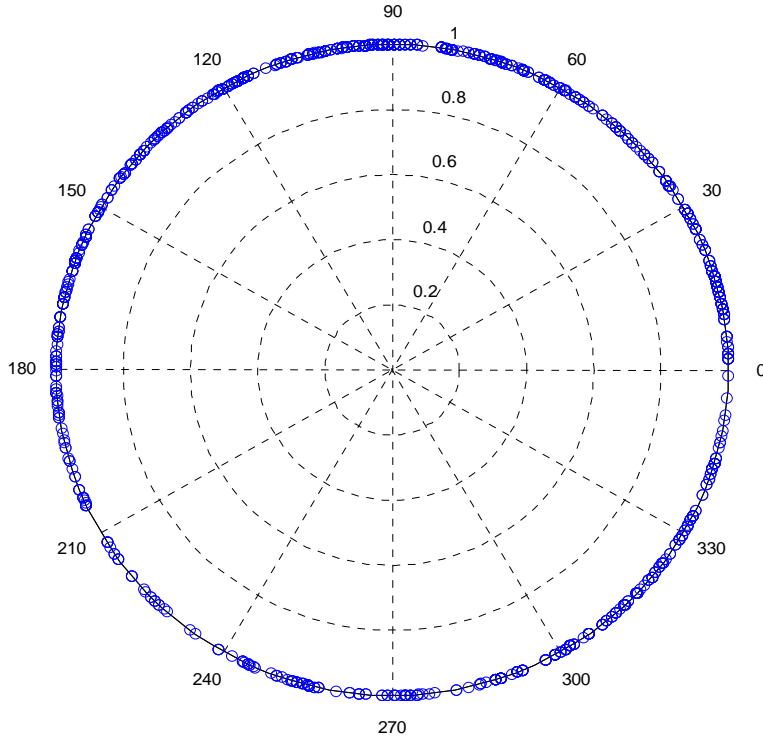
Şekil 3.20 : DMİ Rüzgar Hızı Verileri (1984-1998), Zamanın % 5'inde Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.



Şekil 3.21 : DMİ Rüzgar Hızı Verileri (1984-1998), Zamanın % 95'i ile % 100'ü Arasında Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.



Şekil 3.22 : İTÜ Enerji Enstitüsü Rüzgar Hızı Verileri (2007-2010), Zamanın % 5'inde Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.



Şekil 3.23 : İTÜ Enerji Enstitüsü Rüzgar Hızı Verileri (2007-2010), Zamanın % 95'i ile % 100'ü Arasında Gerçekleşmesi Muhtemel Hızlar İçin Mevsimsellik Grafiği.

Burada her bir çeyrek daire bir mevsimi sembolize eder. Açıların 0-90 ($\pi/2$) arasındaki bölümü birinci bölge kabul edilir ve bölgeler saat yönünde ilerletilirse;

1. Bölge: Kış
2. Bölge : Sonbahar
3. Bölge: Yaz
4. Bölge: İlkbahar

mevsimlerini sembolize eder. Bu da, Şekil 3.19'da öncelikle sonbahar (2. bölge) ve sonra kış (1. bölge) aylarında yoğunluk olduğu bilgisini verir. 15 yıllık DMİ verilerinin çokluğundan dolayı zamanın %5'inde gerçekleşmesi muhtemel hızların, grafiğin hemen hemen her tarafına dağılmış olmaları nedeniyle şematik olarak mevsimselliğin belirlenememesinden dolayı söz konusu data serisi için zamanın %1'inde gerçekleşmesi muhtemel yüksek hızları gösteren bir grafik daha çizilmiştir. Bölgedeki zamanın %5'inde oluşan rüzgar hızlarının türbinlere zarar verecek düzeylere çıkmıyor olması zamanın %1'i için elde edilecek sonuçları yeterli kılmaktadır. Bunun yanı sıra, zamanın %5'i için elde edilen sonuçlar, şematik olarak olmasa da, grafiğin oluşturulduğu açı değerlerinin listesinden elde edilebilir. Şekil

3.19’da analiz edilen hızlar, zamanın %1’inde gerçekleşmesi muhtemel olan hızlar, dolayısıyla ölçüm yapılan yerde ve zamanda gerçekleşen en yüksek hızlar olduğuna göre, bölgedeki en yüksek hızların sonbahar (2. bölge) mevsiminde gerçekleştiği bilgisini çıkarabiliriz. Şekil 3.22’de ise İTÜ Enerji Enstitüsü tarafından ölçülen veriler için zamanın %5’inde gerçekleşmesi muhtemel olan hızlar, yani yine ölçüm yapılan yerde ve zamanda gerçekleşen en yüksek hızların olduğu aralık için mevsimsellik grafiği gösterilmiştir. Grafiğe göre bu kez yoğunluk, sonbahar (2. bölge) ve kış (1. bölge) ayları dışında, yaz (3. bölge) aylarına da dağılmış durumda. Şekil 3.21, DMİ verileri için; Şekil 3.23 ise İTÜ verileri için, zamanın %95’i ve %100’ü arasında gerçekleşen rüzgar hızlarını, yani düşük rüzgar hızlarını gösterir. Her iki data serisi için de çizilen mevsimsellik grafiklerinde homojen bir dağılım gözlenmektedir ve bu nedenle çok iyi anlaşılabilir. Ancak, İTÜ Enerji Enstitüsü tarafından ölçülen verilerin sayısı, DMİ verilerinin sayısından daha az olduğu için biraz daha belirgin olan mevsimsellik grafiğinden, en düşük hızlı rüzgarların yaz (3. bölge) ve sonbahar (2. bölge) aylarında, diğer aylara oranla daha az görüldüğü söylenebilir. Düşük hızlı rüzgarların en yoğun olarak görüldüğü bölge ise kış (1. bölge) ve ilkbahar (4. bölge) aylarının birleştiği bölgede, yani Şubat, Mart ayları civarındadır. DMİ verilerinde ise grafiği oluşturan sayısal veriler ışığında yaz (3. Bölge) ve ilkbahar (4. Bölge) aylarında yavaş rüzgarların daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. Yavaş rüzgarların en yoğun olduğu bölge, bu kez 1 ve 2. Bölgelerin birleştiği Kasım ve Aralık ayları civarındadır.

3.4.3 WAsP

WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), Danimarka Risø Ulusal Laboratuvarı Meteoroloji ve Rüzgar Enerjisi Bölümü’nde geliştirilmiş olan ve rüzgar enerjisi analizleri için tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bir paket programdır. Türkçe karşılığı, “Rüzgar Atlas Analiz ve Uygulama Programı” olan WAsP; rüzgar hız ve yön bilgileri, rüzgar gözlem istasyonu çevresindeki engeller, arazi yüzey pürüzlülüğü ve arazinin topoğrafik özellikleri bilgilerinden yola çıkarak bölgesel rüzgar atlas istatistiklerinin ve enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Program, kendisine veri olarak girilen dört temel bilgiyi (Proje sahasının topoğrafik haritası, Rüzgar verileri, Bölgenin pürüzlülük haritası, Çevredeki engel bilgileri) değerlendirerek bölgenin rüzgar atlasını oluşturur. Ancak WAsP, karmaşık yapıdaki arazilerde önemli oranlarda tahmin hatası yapmaktadır.

Programın doğruya yakın tahminler yapabilmesi için, söz konusu saha ile ilgili olarak; referans saha (ölçüm noktası) ve tahmin edilen sahanın (türbin noktası) genel itibariyle aynı rüzgar rejimine sahip olması, her iki nokta için rüzgar rejiminin dengeli ve istikrarlı olması, yapılan ölçümlerin standartlara uygun (güvenilir) olması, arazinin mümkün olduğu kadar az eğimli ve düz olması, kullanılan haritaların yeterli güvenilirlikte olması gibi parametrelerin WAsP performans kriterleridahilinde olması gerekmektedir (Url-17).

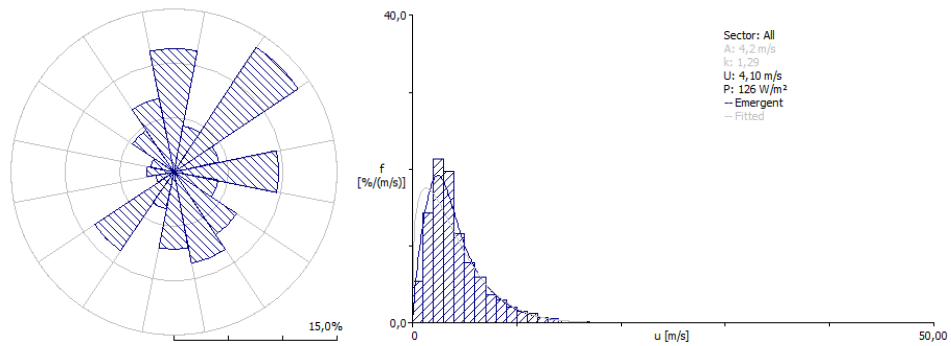
3.4.3.1 OWC Sihirbazı

WAsP, bir bölgedeki verilerle rüzgar atlası hesaplarırken meteorolojik verilerin zaman serisini kullanmaz. Bunun yerine -ham datalar halinde- rüzgar hızları ve bu hızlara karşılık gelen rüzgar yönleri girildiğinde, Gözlenen Rüzgar İklim Dosyası (Observed Wind Climate) adı altında, çizelge halinde bir özet sunar. Burada, zaman serisi olarak girilen hız ve yön verileri, bölgenin rüzgar hız ve yön özelliklerinin zamandan bağımsız özetini gösteren bir tabloya çevrilir. Bu özet bir veya birden fazla ham veri dosyası ile oluşturulabilir. Dosyaların formatları ve verilerin ölçüldüğü cihazlar farklı olabilir fakat ölçüm yapılan yer ve ölçüm cihazı yüksekliği farklı olmamalıdır (Url-18). OWC Sihirbazının çalıştırılması oldukça basittir. İlk olarak bölgenin koordinat bilgileri (Derece) ve anemometre yüksekliği (m) girildikten sonra, tek sütunlar halinde hız (m/s) ve yön (Derece) bilgileri girilerek işlem tamamlatılır. İşlemler sonunda WaSP, bütün yönler (16 sektör) için; hız ve yön frekansları (%), ortalama rüzgar hızı (m/s), ortalama güç yoğunluğu (W/m²), Weibull-A (m/s) ve Weibull-k dağılımları gibi bilgileri hesaplar. Programı kullanarak, 1984-1998 yılları arasında DMİ tarafından tespit edilmiş olan rüzgar verileri (hız ve yön) ile aşağıdaki çizelge ve şekiller oluşturulmuştur. Çizelge 3.4'te DMİ; Çizelge 3.5'te ise İTÜ Enerji Enstitüsü tarafından ölçülen veriler için her yönde esen rüzgarların frekansları, Weibull parametreleri, ortalama hızları, güç yoğunlukları ve hızlarındaki değişimler verilmiştir.

Çizelge 3.4 : OWC Wizard Hesap Sonuçları (1984-1998 DMİ Verileri).

Sektör	Yön		Weibull-A	Weibull-k	Ortalama	Güç	Hız
	Açısı [°]	Frekans [%]			Hız [m/s]	Yoğunluğu [W/m ²]	Değişimleri [%]
1	0	11,3	6,9	1,73	6,15	321	-1,70%
2	22,5	4,3	4,8	1,59	4,34	125	-2,37%
3	45	13,7	4,4	1,68	3,95	88	-5,49%
4	67,5	4,3	3,1	1,7	2,76	30	-0,61%
5	90	9,6	3,5	2,29	3,07	30	0,24%
6	112,5	4,2	3,1	1,75	2,74	28	0,77%
7	135	6,9	2,9	1,78	2,57	22	-0,16%
8	157,5	8,6	2,9	2,58	2,55	16	2,20%
9	180	7,1	4,2	1,77	3,7	68	-1,59%
10	202,5	3,4	4,6	1,79	4,09	90	1,26%
11	225	8,7	5,9	1,95	5,26	174	-0,99%
12	247,5	1,7	3,6	1,74	3,23	46	1,31%
13	270	2,5	4,1	1,66	3,67	72	0,06%
14	292,5	2,2	3,8	1,36	3,51	84	0,37%
15	315	4,6	5,4	1,34	4,93	238	-2,38%
16	337,5	6,9	7,2	1,69	6,39	369	1,03%
Toplam			4,5	1,41	4,10	126	

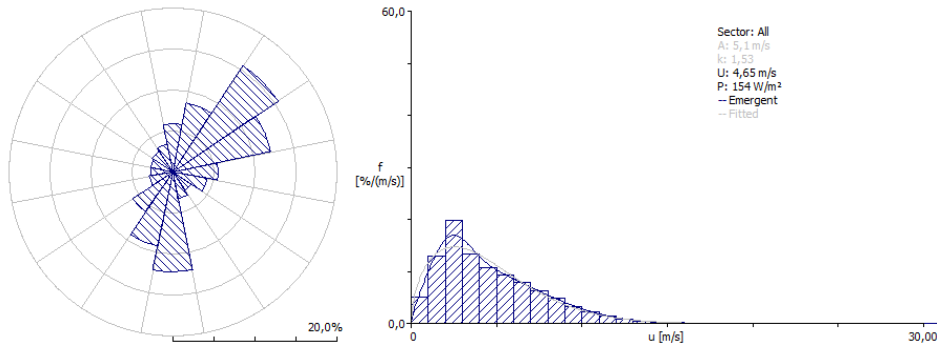
Şekil 3.24'te ise, girilen verilerin (DMİ Verileri) tamamı için OWC Wizard tarafından çizilmiş olan rüzgar gülü (solda) ve hız değerlerinin yüzdelerini gösteren grafik (sağda) bulunmaktadır. Görüldüğü gibi, hakim rüzgar yönü - "matlab"te çizilen rüzgar güllerinin genelinde olduğu gibi - kuzeydoğudur. Ancak o yöndeki rüzgar hızı ortalaması, genel ortalamanın bile altındayken, en hızlı rüzgarların 6,39 m/s ile kuzey kuzeybatı ve 6,15 ile kuzey yönlü rüzgarlar olduğu; en düşük hızlı rüzgarların ise 2,55 m/s ile güney güneydoğu yönlü rüzgarlar olduğu görülmüştür. Rüzgar hızlarının oluşma yüzdelerini veren grafikte ise, 2-3 m/s arasındaki hızların %21,3 ile bölgede en çok görülen rüzgar hızı değerleri olduğu; ortalama rüzgar hızınının 4,10 m/s ve buna bağlı teorik güç yoğunluğunun ise 126 W/m² olduğu görülmektedir.



Şekil 3.24 : OWC Sihirbazı Tarafından Çizilen Rüzgar Gülü ve Hız-Zaman (%) Grafiği (DMİ verileri).

Çizelge 3.5 : OWC Wizard Hesap Sonuçları (2007-2010 İTÜ Verileri).

Sektör	Yön	Frekans [%]	Weibull-A [m/s]	Ortalama		Güç Yoğunluğu [W/m ²]	Hız Değişimleri [%]
	Açısı [°]			Weibull-k	Hız [m/s]		
1	0	5,8	6,7	1,91	5,91	254	1,20%
2	22,5	8,5	7,2	1,88	6,38	324	1,41%
3	45	15,5	7,6	2,55	6,73	290	1,31%
4	67,5	12,2	6,9	2,49	6,15	225	0,12%
5	90	5,5	5,1	2,38	4,49	91	2,21%
6	112,5	4,2	3,9	2,41	3,5	42	1,63%
7	135	2,7	3	2,04	2,62	21	0,93%
8	157,5	3,4	2,5	2,1	2,22	12	1,78%
9	180	12,1	2,7	2,81	2,44	13	1,64%
10	202,5	9,2	3	1,53	2,66	30	-5,59%
11	225	5,9	4	1,98	3,51	51	0,27%
12	247,5	3	3,5	1,37	3,2	63	-2,20%
13	270	2,7	3,8	1,49	3,42	67	0,92%
14	292,5	2,8	4,5	1,35	4,17	143	-1,03%
15	315	3,1	6,2	1,64	5,54	251	0,08%
16	337,5	3,4	6,7	1,89	5,91	257	0,50%
Toplam			5,2	1,53	4,65	154	



Şekil 3.25 : OWC Sihirbazı Tarafından Çizilen Rüzgar Gülü ve Hız-Zaman (%) Grafiği (İTÜ verileri).

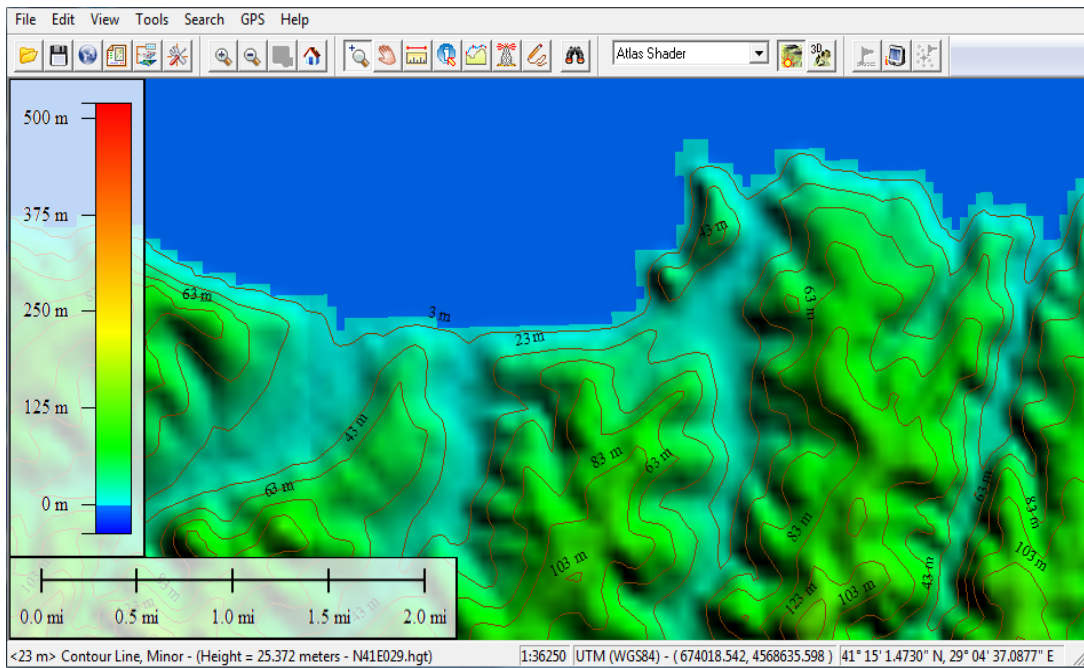
Şekil 3.25'e bakıldığında, 2007-2010 yılları arasında İTÜ Enerji Enstitüsü tarafından ölçülen rüzgar verileri için OWC Wizard tarafından oluşturulan rüzgar gülünün de matlab programı yardımıyla oluşturulan rüzgar gülleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Hakim rüzgar yönleri yine kuzeydoğu ve güney yönleri olarak öne çıkmaktadır. Böylece her iki data serisinde de en baskın rüzgar yönünün kuzeydoğu olduğu görülürmüş, ancak bu baskınlık DMİ verilerinde zamanın %13,7'si iken, İTÜ verilerinde % 15'ine çıkmıştır. Ayrıca DMİ verilerinin aksine, İTÜ verilerinde hakim yöndeki rüzgar hızı ortalaması, 6,73 m/s ile tüm sektörler arasındaki en yüksek ortalamadır. Yine Şekil 3.25'teki grafikte de en çok görülen rüzgar hızlarının -DMİ verilerinde olduğu gibi- 2-3 m/s arasında olduğu, ancak bu hızların bu kez %19,8'lik

bir oranda kaldığı; ortalama rüzgar hızının bir miktar artarak 4,65 m/s'ye, bu hızla bağlı teorik güç yoğunluğunun ise 154 W/m² olduğu görülmektedir.

3.4.3.2 Vektör Harita

Vektör harita bir çeşit sayısal harita olmakla birlikte; arazi yüzey kotlarının eş yükselti eğrileriyle, pürüzlülüğün ise pürüzlülük değişim çizgileriyle temsil edildiği (WASP, 2009), bilgisayar ortamındaki haritalardır.

WASP-daha önce belirtildiği gibi- rüzgar verilerinin yanı sıra; topografik harita, pürüzlülük haritası ve eğer varsa engel bilgilerinin girilmesini gerektirir. Bu nedenle program, OWC Sihirbazı ile oluşturduğu ve bir önceki başlıkta gösterilmiş olan veri tabanı yardımıyla bir rüzgar atlası oluşturmak için bölgenin vektörel haritasına ihtiyaç duyar. Bunun için, bölgeye ait koordinatları içeren 1/25000 ölçekli haritalar, “Global Mapper” adlı program yardımıyla sayısallaştırılmıştır (Şekil 3.26).

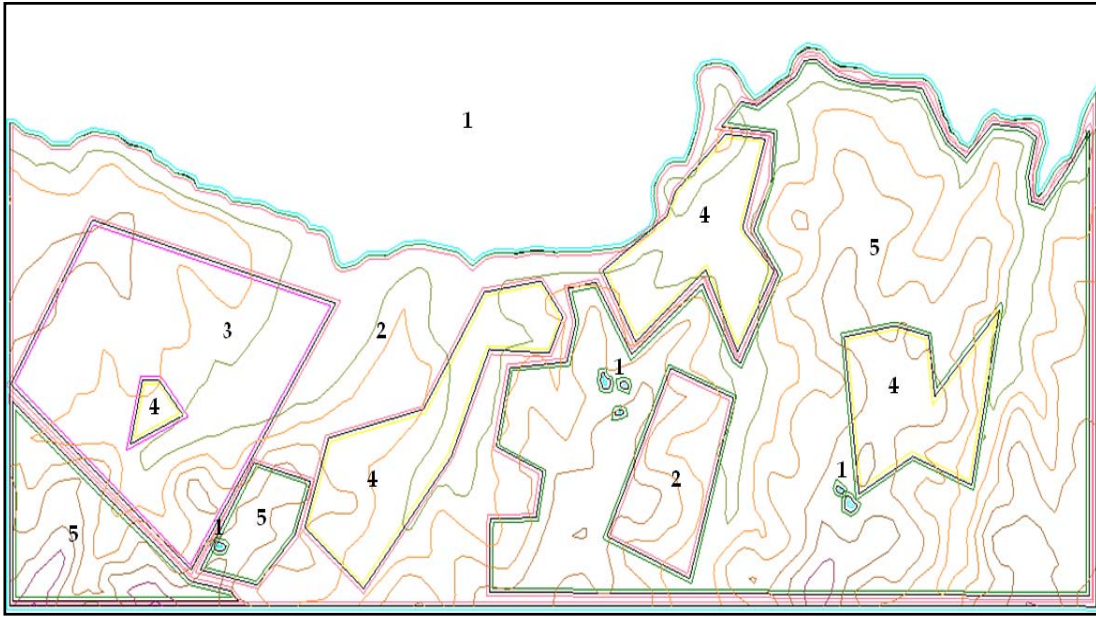


Şekil 3.26 : Kilyos Sayısal Vektör Haritası.

Sayısallaştırma işleminin ardından “.map” uzantılı dosya olarak WASP’a aktarılan haritada pürüzlülük katsayılarını belirlemek gerekmektedir. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi pürüzlülük, rüzgar hızını azaltıcı etki yapmaktadır ve pürüzlülüğün fazla olduğu bir bölgede, yükseklik ile rüzgar hızındaki artış -düz bir arazidekine göre- çok daha yüksektir. Bu nedenlerle, rüzgar enerjisi üretim potansiyeli belirlemede önemli bir yere sahip olan pürüzlülük için “WASP Map Editor”

yardımla pürüzlülük alanları harita üzerinde belirlenir ve pürüzlülük uzunlukları belirtilir.

Bu aşamada WASP, bazı arazi tiplerine göre pürüzlülük sınıfları ve pürüzlülük uzunluklarının (bkz. 2.1.3.2) kombinasyonunu veren bir tablo sunmaktadır ve haritadaki pürüzlülük alanları, en basit şekliyle bu tablo yardımıyla çizilebilmektedir (Şekil 3.27).Bölgedekifarklı arazi tipindeki alanları tespit etmek içinise uydu görüntülerinden faydalanılmıştır.



Şekil 3.27 : Kilyos'ta Farklı Pürüzlülük Özelliği Gösteren Arazilerin Dağılımı.

Şekilde yapılan numaralandırma, WASP'ın bir özelliği olmayıp, çalışma bölgesinde görülen beş ayrı arazi çeşidini ifade etmek amacıyla yapılmıştır. Buna göre;

- 1: Su yüzeylerini,
- 2: Yer yer ağaçlık ve çalılık bölgeleri,
- 3: Tarlaların ve çiftlik yapılarının bulunduğu bölgeleri,
- 4: Küçük ve orta ölçekte yerleşim birimlerini (Belde, kasaba, köy vb.),
- 5: Orman arazilerini

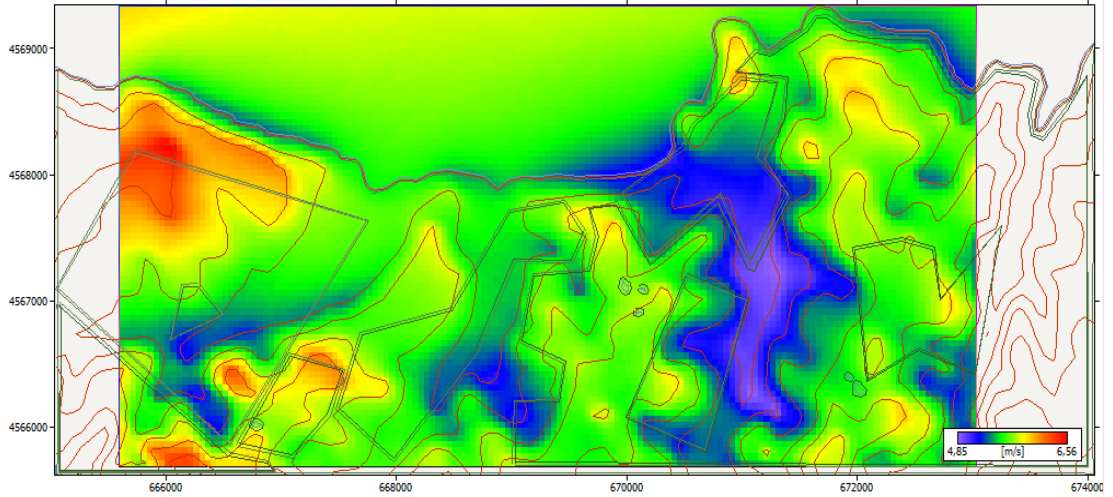
temsil etmektedir.

Bölgede, bu alanların dışında, özel olarak engel oluşturacak bir yapının tespit edilmemesi nedeniyle herhangi bir engel bilgisi girilmemiştir.

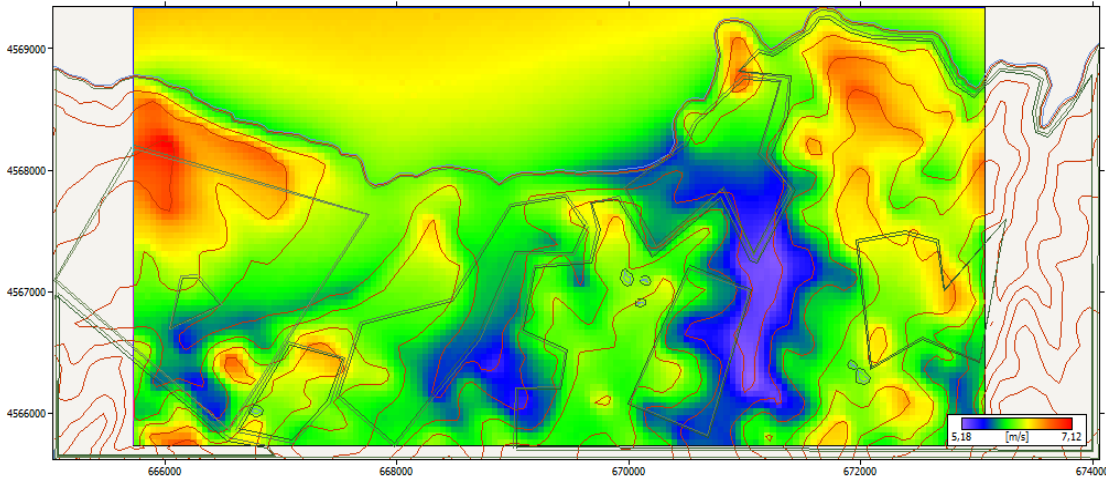
3.4.3.3 Rüzgar Atlası Oluşturma

Harita üzerinde gerekli bilgilerin oluşturulmasının ardından, WASP paket programındaki aşamalar izlenerek, OWC Sihirbazı ile hazırlanan veri tabanı ve söz konusu harita, aynı çalışma alanında (workspace) birleştirilir. Bunun ardından gözlem istasyonunun yeri, harita üzerinde belirtilir ve çeşitli parametreler için rüzgar atlaslarının oluşturulması sağlanır. Oluşturulan atlaslar aracılığı ile bölgenin; güç yoğunluğu, ortalama hızı, Weibull-A ve Weibull-k dağılımları, pürüzlülük değişimleri vb. bilgilerini, bölgenin haritası üzerinde-her yön sektörü için- elde etmek mümkündür. Çeşitli türbinler yerleştirmek suretiyle bölgedeki yıllık enerji üretiminin hesaplanmasını hedefleyen bu çalışmada özellikle incelenen bilgiler, bölgenin ortalama hız dağılımını ve ortalama güç yoğunluğunu gösteren atlaslardır. Bu atlaslar, bölgede rüzgar hızı ortalamasının ve enerji yoğunluğunun en fazla olduğu, dolayısıyla rüzgar enerjisi üretimi bakımından en verimli olacağı öngörülen alanların kolaylıkla tespiti için kullanılır.

Şekil 3.28’de DMİ verilerinin; Şekil 3.29’da ise İTÜ verilerinin 60 m yükseklik ve tüm yön sektörlerinin ortalaması için ortalama hız değerlerinin dağılımını veren rüzgar atlasları verilmiştir.



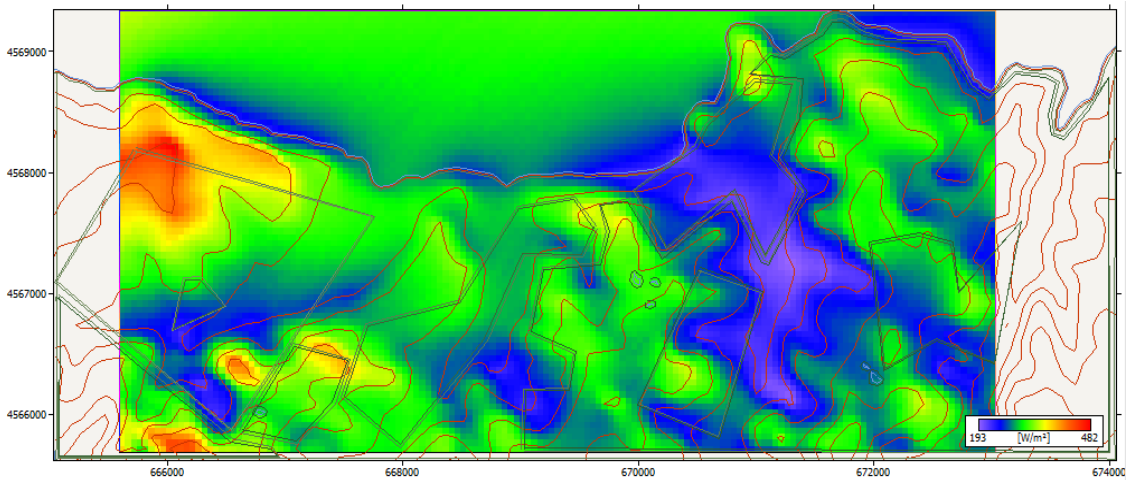
Şekil 3.28 : 1984-1998 DMİ Verileri İçin 60 m Yükseklikteki Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımını Veren Rüzgar Atlası.



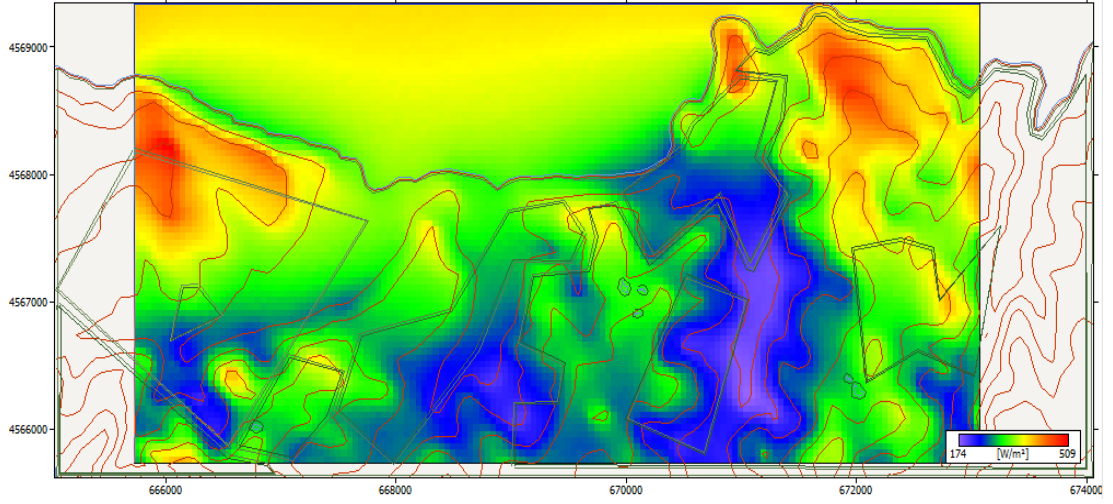
Şekil 3.29 : 2007-2010 İTÜ Verileri İçin 60 m Yükseklikteki Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımını Veren Rüzgar Atlası.

Şekillerdeki dikey ve yatay eksenler, Evrensel Enlem Merkatörü (UTM) cinsinden koordinatları göstermekte, sağ alt köşedeki skala ise haritadaki renk dağılımına göre hız değerlerini belirtmektedir.

Şekillerden anlaşılacağı üzere, İTÜ verilerindeki ortalama hızların özellikle denizde ve bölgenin orta kısımlarında daha yüksek olduğu göze çarpmakla birlikte, söz konusu atlaslarda rüzgar hızının en fazla olduğu kısımların, bölgenin en doğu ve en batı kısımları olduğu görülmektedir. Ancak, türbin yerleştirme işleminde asıl olarak “güç yoğunluğu” dağılımını gösteren atlasların dikkate alınacağı unutulmamalıdır. Şekil 3.30’da DMİ verilerinin; Şekil 3.31’de ise İTÜ verilerinin 60 m yükseklik ve tüm yön sektörlerinin ortalaması için ortalama güç yoğunluğu dağılımını veren rüzgar atlasları verilmiştir.



Şekil 3.30 : 1984-1998 DMİ Verileri İçin 60 m Yükseklikteki Ortalama Güç Yoğunluğu Dağılımını Veren Rüzgar Atlası.



Şekil 3.31 : 2007-2010 İTÜ Verileri İçin 60 m Yükseklikteki Ortalama Güç Yoğunluğu Dağılımını Veren Rüzgar Atlası.

Bekleneceği üzere, diğer bütün koşulların aynı olduğu durumda güç yoğunluğu atlası, ortalama hız atlası ile -iki data serisi arasındaki farkın biraz daha farkedilir hale gelmesi dışında- hemen hemen aynı sonuçları vermiştir.

Aynı bölge için fakat iki ayrı data serisi ile oluşturulmuş olan rüzgar atlaslarında oluşan gözle görülür farklılığın nedeni olarak ise; İTÜ verilerinin, DMİ verilerine göre -daha alçak bir konumdaki bir ölçüm istasyonundan alınmış olmasına rağmen- daha yüksek bir güç yoğunluğu ortalaması vermesi ve rüzgar sürekliliğinin daha fazla olması gösterilebilir. Rüzgar davranışının, ölçüm yeri ve zamana bağlı olarak aynı bölge için bile önemli değişiklikler arz edebiliyor olmasının (bkz. 3.3) yanı sıra; söz konusu rüzgar atlasları, 15 dakika ara ile ölçülmüş İTÜ verilerinin-DMİ verilerinde olduğu gibi- saatlik ortalamaları alınarak oluşturulduğunda, aralarındaki farkın bir miktar azalıyor olması da oluşan bu farklılığın nedenini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bölgenin öncelikle en batı kısmında geniş sayılabilecek bir alan ve ikinci olarak da en doğu kısmında kalan daha küçük bir alan, güç yoğunluğunun fazlalığı bakımından göze çarpmaktadır. Uydu görüntüleri yardımıyla veya saha gezisi sonucunda uygun bulunması halinde türbinlerin bu bölgelerde konumlandırılması, onlardan alınacak verim açısından en doğrusu olacaktır.

4. ENERJİ ÜRETİMİ VE MALİYET HESABI

4.1 Rüzgar Enerjisi Üretimi

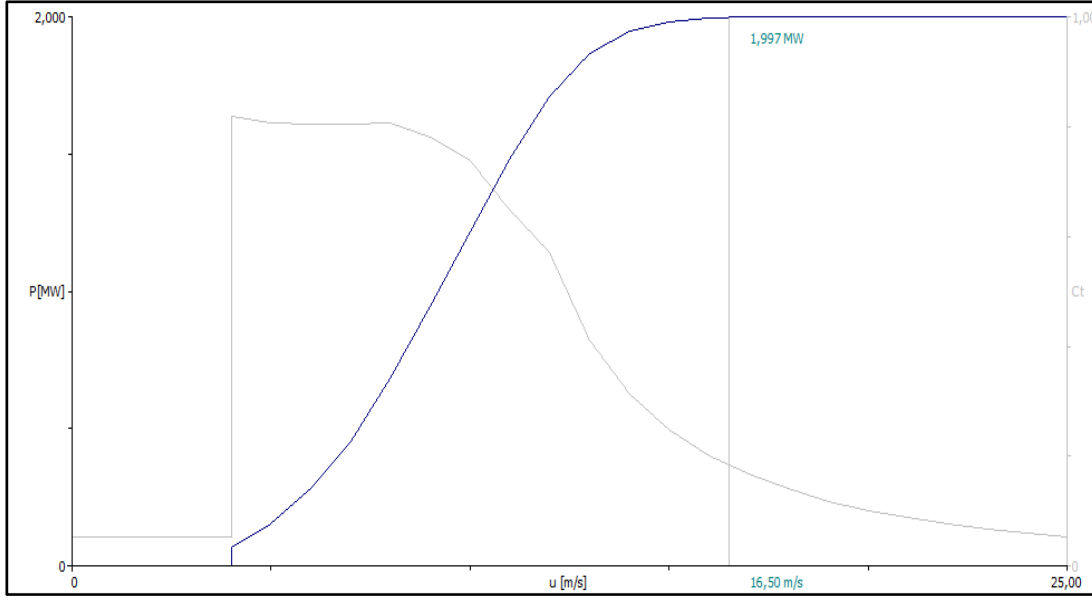
Rüzgar gücünden elektrik üretiminin, türbin yapısına bağlı olan en önemli değişkenleri, güç üretiminin genel formülünde (2.7) yer alan değişkenler olan; kule yüksekliği ve rotorun süpürdüğü alandır. Ancak, formülde kullanılmalarına olanak olmayan; dönme eksenini, kanat sayısı, malzeme kalitesi ve hatta üretici firmadan kaynaklanan değişkenler de aynı rüzgar hızlarında farklı güç üretimlerine sebep olabilen etkenlerden bazılarıdır. Bu kısımda incelenecek olan, aynı bölgede konuşlandırılacak olduğu varsayılan6 farklı rüzgar türbininden elde edilecek güçler ile bir yıl içinde üretilebilecekleri enerji miktarlarının ve buna bağlı olarak fayda ve maliyetlerinin değerlendirilmesidir.

4.1.1 Türbin Yerleştirme (Mikro Konuşlandırma)

Çalışmada, Kilyos bölgesinde birkaç farklı türbin yerleştirilmesi durumunda türbinlerden elde edilecek ortalama yıllık enerji miktarlarının hesaplanması ve buna bağlı olarak da fayda/maliyet durumunun değerlendirilmesi hedeflenmiş, bunu gerçekleştirebilmek için yapılması gereken son aşama olan türbin yerleştirme işlemi ise bu bölümde açıklanmıştır.

Gerekli hesaplamaların, bir önceki ana başlık altında bahsedilmiş olan rüzgar atlaslarının oluşturulmasının ardından, tek aşamada yapılması mümkündür. WAsP paket programı bünyesinde güç eğrileri bulunan veya programın “Turbine Editor (Türbin Düzenleyicisi)” aracı kullanılarak güç eğrisi oluşturulan herhangi bir türbinin, harita üzerinde herhangi bir noktaya yerleştirilmesi sonucunda program, söz konusu türbin için istenilen bilgileri hesaplamaya hazır hale gelmektedir. Yalnız atlasın bu kez, enerji üretim hesabı yapılmak istenen türbinin göbek (hub) yüksekliğine göre oluşturulması gerekmektedir.

“Güç Eğrisi”, herhangi bir türbinin, değişik hızlara (m/s) karşılık gelen güç üretim değerlerini MW bazında vermektedir. Şekil 4.1’de, programda verilen türbin güç eğrileri için bir örnek gösterilmektedir.

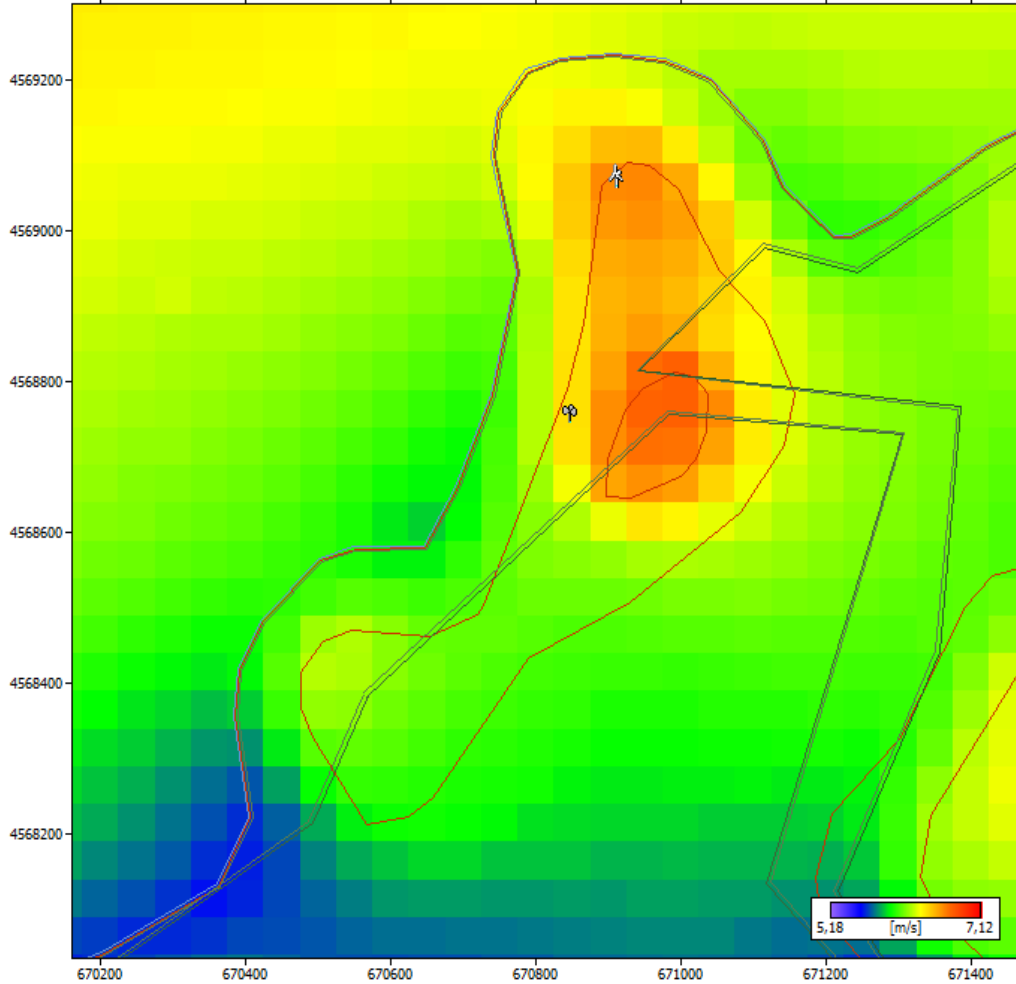


Şekil 4.1 : WASP Paket Programında Verilen Türbin Güç Eğrileri İçin Bir Örnek (Vestas V80 2MW).

Şekilde yatay eksen hız (m/s) değerini, dikey eksen güç (MW) değerini, mavi eğri güç (P) değişimini, gri eğri ise itme katsayısı (Ct) değişimini göstermektedir. Program, bu eğrideki değerlerden yola çıkarak ve programa daha önceden girilmiş olan rüzgar verileri ile bölgenin arazi özellikleri (topografya, pürüzlülük, orografi vb.) doğrultusunda "Yıllık Enerji Üretimi"ni vermektedir.

Yıllık enerji üretimleri hesaplanmadan önce, bir rüzgar türbini ile enerji üretimi açısından bölgedeki en uygun konumun belirlenmesi gerekmektedir ve bahsedilen uygunluk, yalnızca güç yoğunluğunun fazlalığına bağlı olmayıp, türbin yeri seçiminde arazi kullanımının da dikkate alınması gerekliliğini ifade etmektedir. Rüzgar atlasında en yüksek güç yoğunluğunu temsil eden kırmızı rengin Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de en geniş alanda görüldüğü yerler bölgenin batı kısmında kalmasına karşın, söz konusu bölgenin tamamen yerleşim birimleri ve tarım arazilerinden oluşuyor olması, türbin yeri seçimi için rotanın doğu kısmındaki kırmızılıklara kaydırılması gerekliliğini doğuracaktır. Ancak, atlasın doğusundaki güç yoğunluğu fazla bölgelerde de uydu görüntüleri ile tespit edilebilen bazı kısıtlayıcı faktörler ile karşılaşılmış, bu alanlardan bazılarının yine yerleşim birimleri içinde, bazılarının ise orman arazisi içinde kaldığı tespit edilmiştir. Bunlar arasında, Kilyos Burnu'nda yer alan ve hem arazi kullanımı açısından uygun hem de güç yoğunluğu, rüzgar gücü bakımından verimli görünen diğer alanlara göre çok büyük farklılık göstermeyen bir bölge; yüksekliğinin daha az olması, ulaşımının daha kolay olması, gözlem

istasyonlarına yakınlığı ile çalışma bölgesi olan Kilyos'u daha iyi temsil etmesi ve diğer alanlara oranla daha seyrek ağaç bulunan bir arazi olması gibi sebeplerden dolayı daha uygun bulunmuştur.



Şekil 4.2 : Meteoroloji Gözlem İstasyonu ve Rüzgar Türbininin Rüzgar Atlası Üzerinde Görünümü.

Böylece, türbinlerin teker teker yerleştirilerek yıllık enerji üretimlerinin hesaplanacağı nokta ($41^{\circ}15'16''$ K $29^{\circ}2'24''$ D) belirlenmiştir ve türbinler şekilde (Şekil 4.2) görüldüğü gibi atlasa yerleştirildikten sonra bu hesaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

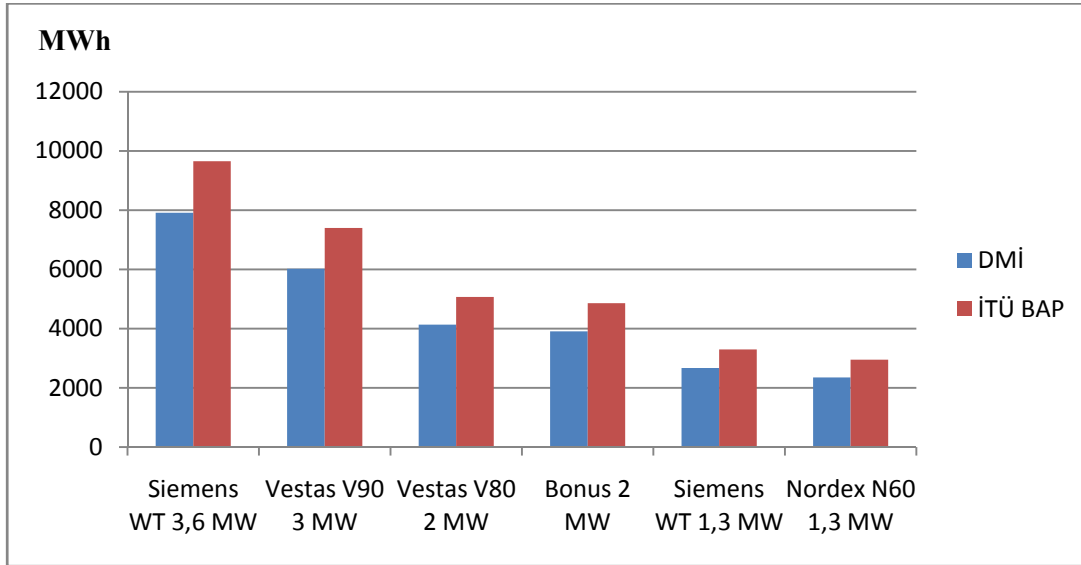
4.1.2 Türbinlere Göre Yıllık Rüzgar Enerjisi Üretim Miktarları

Çalışmada, Türkiye şartlarında kullanımı olan büyüklüklerde seçilen 6 adet türbin modeli için WAsP paket programının -yukarıda bahsedilen aşamaların ardından- hesapladığı yıllık enerji üretimi miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Yıllık Enerji Üretimleri (MWh)

Gözlem İstasyonu ve Ölçüm Yılları	SWT 3,6 MW	Vestas 3 MW	Vestas 2 MW	Bonus 2 MW	SWT 1,3 MW	Nordex 1,3 MW
DMİ Kilyos Gözlem İstasyonu (1984-1998)	7911	6022	4135	3910	2671	2353
İTÜ BAP Gözlem İstasyonu (2007-2010)	9654	7401	5072	4859	3295	2952

Üretim miktarlarına bakıldığında, normal olarak, üretim miktarının, türbinin nominal gücü ile birlikte arttığı görülmektedir. Aynı nominal güce sahip türbinlerin birbirlerine göre durumuna bakıldığında ise 1,3 MW'lık türbinlerde Siemens marka türbinin, Nordex marka türbine; 2 MW'lık türbinlerde ise Vestas marka türbinin, Bonus marka türbine üstünlük sağladığı söylenebilir. İki farklı data serisinin, yıllık enerji üretimleri açısından karşılaştırılması ise şematik olarak Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Türbinlerin Yıllık Enerji Üretimlerinin (MWh) DMİ ve İTÜ Verilerine Göre Karşılaştırılması.

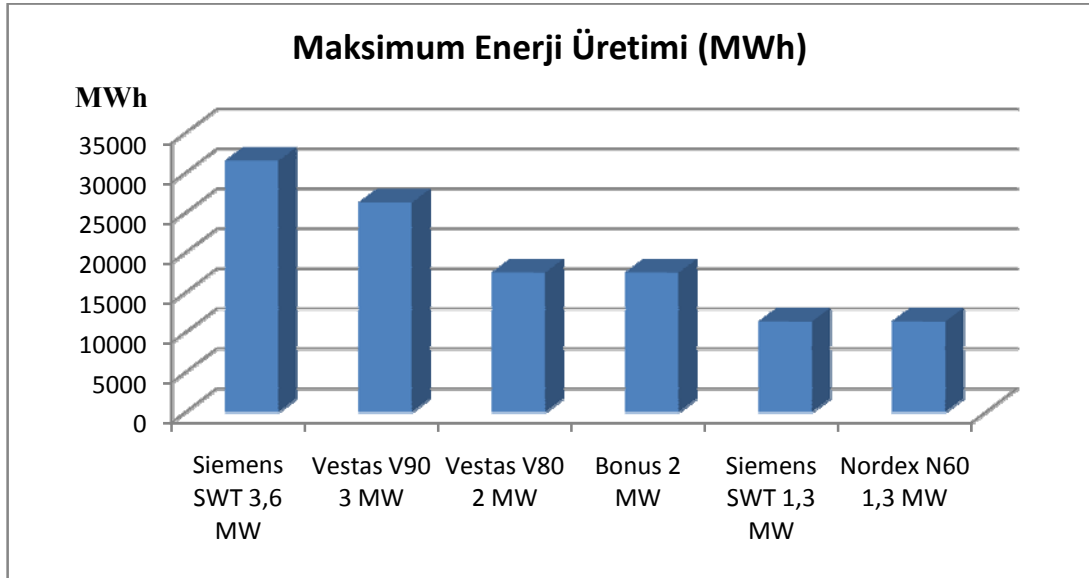
Rüzgar atlaslarında gözlemlenen durum göz önünde bulundurulduğunda sonuç şaşırtıcı olmamış, İTÜ Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında yapılan ölçümler ile elde edilen sonuçlar bir miktar daha yüksek çıkmıştır.

Türbin kapasitesi, kule yüksekliği ve rotor çapı arttıkça elde edilecek enerjinin artması olağan bir durumdur. Sonuçlar incelendiğinde de bunun aksine bir durumun söz konusu olmadığı görülmektedir. Ancak Kilyos gibi; ortalama rüzgar hızının türbini devreye sokacak en düşük rüzgar hızlarına (~3-5 m/s) yakın olduğu, zamanın ortalama %40'ı (Çizelge 3.2) gibi bir bölümünde hızın türbini devreye almaya

yetmediği, yüksek güçlerin üretildiği fırtınaların ise çok sık görülmediği bölgelerde böylesine yüksek maliyetli türbinlerin tercihi, geri ödeme süresi ve verim açısından olumlu sonuçlar doğurmayabilir. Bu gibi bir durumda “kapasite faktörü” ve “maliyet analizi” devreye girmelidir.

4.1.3 Kapasite Faktörü ve Maliyet Analizi

Kapasite faktörü, bir türbinin bir yılda ürettiği enerjinin, aynı türbin ile bir yılda elde edilebilecek maksimum enerjiye bölünmesi ile bulunur. Maksimum enerji ise, türbinin nominal gücünün bir yıldaki saat sayısı (8760 saat) çarpılması ile bulunur (Şen, 2003). Çalışmada karşılaştırılan 6 adet türbinin her birinin yıllık maksimum enerji üretimleri Şekil 4.4 ve yıllık ortalama kapasite faktörleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Türbinlerin Yıllık Maksimum Enerji Üretim Potansiyelleri.

Çizelge 4.2 : Türbinlerin Yıllık Kapasite Faktörleri (%)

Gözlem İstasyonu ve Ölçüm Yılları	SWT 3,6 MW	Vestas 3 MW	Vestas 2 MW	Bonus 2 MW	SWT 1,3 MW	Nordex 1,3 MW
DMİ Kilyos Gözlem İstasyonu (1984-1998)	25,1	22,9	23,6	22,3	23,5	20,7
İTÜ BAP Gözlem İstasyonu (2007-2010)	30,6	28,2	28,9	27,7	28,9	25,9

Seçilecek türbinin enerji verimliliğinin belirlenmesi açısından kapasite faktörü önemli bir parametredir. Kapasite faktörü analizinde dünya ortalaması %20 civarındadır ve ancak bu oranın üzerine çıktığı durumlarda türbinin bir bölge için

enerji üretimi açısından verimli olduğu söylenebilmektedir (Şen, 2003). Değerlendirmesi yapılan 6 adet türbinin Kilyos bölgesindeki kapasite faktörleri, ölçüm yapılan süreler içerisinde dünya ortalamasının üzerinde seyretmiştir. Bu durum, bölgede söz konusu türbinler için dünya ortalamasının üzerinde bir verim bekleneceğini gösterir. Türbinler, kapasite faktörleri açısından birbirleri ile karşılaştırıldıklarında ise, söz konusu 6 türbin arasında, Kilyos bölgesi için en yüksek verimi sağlayacak olan türbinin, aynı zamanda içlerinde en yüksek kapasiteye sahip olan, Siemens SWT 3,6 MW model türbin olduğu ortaya çıkmıştır.

Ancak, kurulacak türbine karar verilmesinde kapasite faktörü tek başına kriter olamaz. Bir fayda/maliyet analizi yapılması her durumda gereklidir ve çalışmada incelenen farklı nominal güce sahip türbinlerin fayda/maliyet açısından birbirleri ile karşılaştırılması amacıyla basit bir fayda/maliyet analizi yapılması düşünülmüştür.

Rüzgar türbini ile enerji üretiminin fayda/maliyet açısından değerlendirilebilmesi için en basit haliyle; üretilen enerjiden elde edilecek gelir ve enerjiyi üretmek için yapılacak toplam harcamanın bilinmesi gerekmektedir.

Gerekli olan bu bilgiler, Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği'nin "The Economics of Wind Energy" adlı raporundaki miktarlar baz alınarak öngörülmüş ve türbinin ilk yatırım maliyeti (türbin, kurulum, şebeke bağlantısı, danışmanlık ücreti, nakliye yolu, kontrol sistemleri vs.): 1200 €/kW; yıllık bakım ve onarım maliyeti: ilk 2 yıl 0 c€/kWh (Garanti kapsamında), 2-6 yıl arası 0,3 c €/kWh, 6-10 yıl arası 0,6 c€/kWh, 10 yıldan sonrası 1 c€/kWh olmak üzere, ortalama 0,68 c€/kWh; elektriğin satış fiyatı: 5,5 c€/kWh ve Karbondioksit Emisyonu satış fiyatı: 35 €/t olarak alınmıştır (EWEA, 2009).

Fayda/Maliyet hesabında, "ilk yatırım maliyeti"nin;

$$\frac{A}{P} = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (4.1)$$

formülü yardımıyla yıllık maliyete çevrilmesi ve yıllık ortalama enerji üretimleri (kWh) ile kWh başına yıllık maliyet değerlerinin çarpılması ile elde edilen, "yıllık bakım-onarım maliyetleri" ile toplanması sonucu her türbin için "toplam yıllık maliyet"; toplam yıllık maliyetin, yıllık ortalama enerji üretimine bölünmesi ile de "birim enerji maliyeti (€/kWh)" bulunmuştur. Maliyet miktarları DMİ verileri için Çizelge 4.3'te; İTÜ verileri için Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : DMİ Verilerine Göre Enerji Üretiminin Maliyet Değerleri.

Türbin	Yıllık Ortalama Enerji Üretimi (kWh)	İlk Yatırım Maliyeti (€)	İlk Yatırım Maliyeti (€) (Yıllık Değer)	Yıllık Bakım/İşletme Masrafı (€)	Yıllık Toplam Maliyet (€)	Birim Enerji Maliyeti (€/kWh)
SWT (3,6 MW)	7911000	4320000	257866,1	53794,8	311660,9	0,039
Vestas V90 (3 MW)	6022000	3600000	214888,4	40949,6	255838,0	0,042
Vestas V80 (2 MW)	4135000	2400000	143258,9	28118,0	171376,9	0,041
Bonus (2 MW)	3910000	2400000	143258,9	26588,0	169846,9	0,043
SWT (1,3 MW)	2671000	1560000	93118,3	18162,8	111281,1	0,042
Nordex N60 (1,3 MW)	2353000	1560000	93118,3	16000,4	109118,7	0,046

Çizelge 4.4 : İTÜ Verilerine Göre Enerji Üretiminin Maliyet Değerleri.

Türbin	Yıllık Ortalama Enerji Üretimi (kWh)	İlk Yatırım Maliyeti (€)	İlk Yatırım Maliyeti (€) (Yıllık Değer)	Yıllık Bakım/İşletme Masrafı (€)	Yıllık Toplam Maliyet (€)	Birim Enerji Maliyeti (€/kWh)
SWT (3,6 MW)	9654000	4320000	257866,1	65647,2	323513,3	0,034
Vestas V90 (3 MW)	7401000	3600000	214888,4	50326,8	265215,2	0,036
Vestas V80 (2 MW)	5072000	2400000	143258,9	34489,6	177748,5	0,035
Bonus (2 MW)	4859000	2400000	143258,9	33041,2	176300,1	0,036
SWT (1,3 MW)	3295000	1560000	93118,3	22406,0	115524,3	0,035
Nordex N60 (1,3 MW)	2952000	1560000	93118,3	20073,6	113191,9	0,038

Burada; N = Proje Ömrü (Yıl), i = İskonto Oranını sembolize etmektedir ve N , rüzgar türbinlerinin ortalama ömrü olan 20 yıl (EWEA, 2009); i (iskonto oranı) ise, maliyetler “euro” para birimi üzerinden hesaplandığı için, “Avrupa Merkez Bankası”nın iskonto oranı olan %1,75 (Url-20) olarak alınmıştır.

“Yıllık enerji geliri” ise, her türbinin ortalama yıllık enerji üretim miktarları (kWh) ile elektrik satış fiyatı (c€/kWh) değerlerinin çarpılması ile bulunmuştur. Ancak, unutulmamalıdır ki fosil yakıtların kullanıldığı santraller ile elektrik enerjisi eldesi sırasında açığa çıkan CO₂ emisyonunun rüzgar santrallerinde oluşmaması, çevre açısından bir avantaj olmasının yanısıra, “Karbon Ticareti” göz önünde bulundurulduğunda, ekonomik olarak da bir getiri olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda, fosil yakıtlar ile üretilen kWh enerji başına ortalama 690 g CO₂ emisyonu (EWEA, 2009) salınırken, rüzgar santrali ile enerji eldesi sırasında hiç emisyon salınmadığından yola çıkılarak, üretilen her kWh enerjiden 2,415 c€ (0,0035 c€/g) kâr elde edileceği hesaplanmıştır.

Hesaplanan bu kârın, yıllık enerji üretimi (kWh) ile çarpılması ile bulunan “yıllık emisyon geliri”nin “yıllık enerji geliri” ile toplanması sonucunda “toplam yıllık gelir” de bulunmuş olur (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 : DMİ ve İTÜ Verilerine Göre Enerji Üretimine Fayda Değerleri.

Türbin	Yıllık Enerji Geliri (€)		Yıllık CO ₂ geliri (€)		Yıllık Toplam Gelir (€)	
	DMİ	İTÜ	DMİ	İTÜ	DMİ	İTÜ
SWT (3,6 MW)	178614,2	181577,0	78427,8	79728,8	257042,0	261305,8
Vestas V90 (3 MW)	113522,8	116759,5	49846,8	51268,0	163369,6	168027,5
Vestas V80 (2 MW)	107544,6	110632,5	47221,9	48577,7	154766,5	159210,2
Bonus (2 MW)	62565,1	65491,3	27471,8	28756,6	90036,8	94247,9
SWT (1,3 MW)	46408,2	48771,3	20377,4	21415,0	66785,6	70186,3
Nordex N60 (1,3 MW)	16861,8	18381,0	7403,9	8070,9	24265,6	26451,9

Toplam yıllık maliyetlerin türbin ömrü ile çarpılıp, yıllık toplam gelire bölünmesi sonucunda ise her türbin için “geri ödeme süresi” hesaplanmıştır. Geri ödeme süresi, bir yatırım yapılırken göz önünde bulundurulmuş en önemli faktörlerden biridir. Planlanan bir yatırım için yapılacak harcamaların, yatırımdan sağlanan gelirlerle ne kadar sürede amorti edileceği, dolayısıyla ne kadar süre sonra yatırımdan kâr elde edilmeye başlanacağına ifadesidir ve mümkün olduğunca düşük olması, yatırımcılar için tercih sebebidir.

Çalışma bölgesindeki tüm verilere göre incelenen 6 türbin için toplam yıllık maliyetler, toplam yıllık gelirler ve bunlara bağlı geri ödeme süreleri Çizelge 4.6.’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : DMİ ve İTÜ Verilerine Göre Yatırımların Toplam Yıllık Maliyetleri, Toplam Yıllık Gelirleri ve Geri Ödeme Süreleri.

Türbin	Yıllık Toplam Maliyet (€)		Yıllık Toplam Gelir (€)		Geri Ödeme Süresi (Yıl)	
	DMİ	İTÜ	DMİ	İTÜ	DMİ	İTÜ
SWT (3,6 MW)	311660,9	323513,3	626155,65	764114,1	9,95	8,47
Vestas V90 (3 MW)	255838,0	265215,2	476641,3	585789,15	10,74	9,05
Vestas V80 (2 MW)	171376,9	177748,5	327285,25	401448,8	10,47	8,86
Bonus (2 MW)	169846,9	176300,1	309476,5	384589,85	10,98	9,17
SWT (1,3 MW)	111281,1	115524,3	211409,65	260799,25	10,53	8,86
Nordex N60 (1,3 MW)	109118,7	113191,9	186239,95	233650,8	11,72	9,69

Sonuçlara göre, incelenen bütün türbinlerin geri ödeme süreleri birbirine yakın olmakla beraber; türbinler için birim fiyat değerinin aynı alınmasından dolayı, geri ödeme sürelerine göre oluşan verimlilik sırası ile Çizelge 4.2’deki kapasite faktörlerine göre oluşan verimlilik sırası aynıdır. En yüksek kapasite faktörüne sahip olan türbin (Siemens SWT 3,6 MW), az bir farkla da olsa, en düşük geri ödeme süresine de sahip olan türbindir.

Yukarıda hesaplanan sonuçlara bakıldığında, bölge için ortalama 10 yıl civarında bir geri ödeme süresi söz konusu olduğu görülür ki bu değerler, proje tamamen çevreci

bir yaklaşımla değerlendirilmediği sürece, yatırımcıları bu bölgede bir rüzgar santrali kurmaya yeterince teşvik etmeyebilir. Aynı hesaplamalar, bu kez yenilenebilir kaynaklara dayalı üretimin teşvikini amaçlayarak değiştirilen (29.12.2010) “Yenilenebilir Enerji Kanunu (Url-19)”nundaki fiyatlandırmalara (Çizelge 4.7) göre ve üretim tesisindeki bütün aksamaların yerli üretim olduğu varsayılarak tekrar yapıldığında, Çizelge 4.8’de gösterilmiş olan daha iyimser tablo oluşmaktadır.

Çizelge 4.7 : Türbin Aksamları ve İmalatlarının Yurt İçinde Gerçekleşmesi Durumunda Elektrik Satış Fiyatında Sağlayacakları Artışlar.

Yurt İçinde Gerçekleşen İmalat	Yerli Katkı İlavesi (c\$/kWh)
Kanat	0,8
Jeneratör ve Güç Elektroniği	1,0
Türbin Kulesi	0,6
Rotorve Nasil Gruplarındaki Mekanik Aksamın Tamamı (Kanat Gruubu ile Jeneratör ve Güç Elektroniği İçin Yapılan Ödemeler Hariç)	1,3

Bu hesaplamalar sırasında elektriğin satış fiyatı, aynı kanunda verilen satış fiyatı olan 7,3 c\$/kWh (5 c€/kWh) üzerine yukarıdaki çizelgedeki miktarlar eklendiğinde ortaya çıkan toplam satış fiyatı olan 12,4 c\$/kWh (7,55 c€/kWh) olarak alınmıştır.

Çizelge 4.8 : Yurt İçi İmalat Varsayımına Göre Fayda/Maliyet Durumu ve Geri Ödeme Süreleri.

Türbin	Yıllık Toplam Maliyet (€)		Yıllık Toplam Gelir (€)		Geri Ödeme Süresi (Yıl)	
	DMİ	İTÜ	DMİ	İTÜ	DMİ	İTÜ
SWT (3,6 MW)	311660,9	323513,3	788861,2	962667,9	7,90	6,72
Vestas V90 (3 MW)	255838,0	265215,2	600495,8	738005,5	8,52	7,19
Vestas V80 (2 MW)	171376,9	177748,5	412329,8	505764,6	8,31	7,03
Bonus (2 MW)	169846,9	176300,1	389893,5	484524,9	8,71	7,28
SWT (1,3 MW)	111281,1	115524,3	266344,1	328567,5	8,36	7,03
Nordex N60 (1,3 MW)	109118,7	113191,9	234634,1	294364,6	9,30	7,69

Görüldüğü üzere, teşvikler doğrultusunda hesaplanan sonuçlara göre geri ödeme süreleri daha kabul edilebilir miktarlara düşmüş, bölgeye yerleştirilecek olan yalnızca bir adet türbin için bile ortalama 7 yıl içinde kâr edilmeye başlanacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Yıllık toplam maliyet değerlerine ve yıllık toplam gelir değerlerine bakıldığında ortaya çıkan tablolar şaşırtıcı olmamakta, nominal güç ve enerji üretim miktarı düştükçe hem maliyet hem de gelir miktarları düşmektedir. Ancak bu düşüş lineer olarak gerçekleşmediği için, fayda/maliyet oranlarını gösteren geri ödeme sürelerinde

farklar oluşmakta ve oluşan bu farklar, türbinler arasında kıyaslama yapma imkanı vermektedir.

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.8’de görüldüğü üzere, geri ödeme süreleri her iki data serisi için de en düşük olan türbin, aynı zamanda kapasite faktörü en yüksek olan Siemens SWT 3,6 MW model türbindir. İlk bakışta, ortalama rüzgar hızının 4-5 m/s civarında kaldığı Kilyos bölgesi için düşük maliyetli, dolayısıyla düşük kapasiteli bir türbinin daha avantajlı olabileceği düşünülse de; zamanın kısa bir bölümünde de olsa oldukça yüksek hızlı rüzgarların görülebildiği bölgede, bu kısa süreler içinde önemli miktarlarda enerji üretme potansiyeline sahip olan türbin, bu özelliği ile analizde öne çıkmıştır.

4.2 Dalga Enerjisi Üretimi

Bu bölümde, Türkiye kıyılarındaki dalga enerjisi potansiyeli ile ilgili olarak daha önce BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü tarafından gerçekleştirilen “Türkiye Kıyılarında Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi” adlı çalışmanın Kilyos bölgesi ile ilgili sonuçları aktarılmıştır.

Kilyos istasyonunun, 1984-1998 yılları arasındaki hız-esme süresi verilerinin istatistik analizi yapılmıştır. İlk olarak esme süresi incelenmiştir. Esmeye sürelerine frekans analizi yapılmıştır. Esmeye süresinin (1,2,3,.....saat) gözlemler içerisindeki sayıları bulunmuş ve bu değerler, saatleri ile çarpılarak frekans grafiği elde edilmiştir. Esmeye süresi 1-16 saat arasında olan fırtınaların frekansları toplandığında, toplam esme süresinin 0,50’sini oluşturduğu görülmüştür. Enerji üretiminde anlamlı dalgaları üretebilecek rüzgar hızlarının 5 m/s’den büyük olduğu kabulü ile hızın bu değerin üzerindeki esme süresi analizi benzer şekilde yapılmış; bu durumda da 1-16 saat arasında olan fırtınaların toplam esme sürelerinin 0,42’sini oluşturduğu görülmüştür. Daha uzun süreli fırtınalar, daha büyük esme hızlarında biraz daha yüksek sıklıkla görülmektedir.

Kilyos verileri, aylar bazında da incelenmiştir. Nisan, Mayıs ve Haziran ayları, esme süresinin en az olduğu aylar iken; Ekim, Kasım, Aralık ve Ocak aylarının ise esme süresi açısından çok yüksek potansiyele sahip oldukları görülmektedir. Yine

Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında rüzgarpotansiyeli yüksektir. Bu değerler enerji üretiminin sürekliliği açısından önemlidir.

Tüm esme süreleri için elde edildikten sonra, her ay için esme süresinin 3 saatten büyük olanlarının toplamının frekans grafiği elde edilmiştir. Aylar bazında önemli bir değişim görülmemektedir. Bu grafikler, üretilecek enerjinin güvenilirliği ve diğer enerji kaynakları ile planlama açısından önem kazanmaktadır.

Halihazırda, Türkiye'nin dalga enerjisi potansiyelini belirlemek amacıyla İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Enerji Enstitüsü ve İnşaat Fakültesi Hidrolik Anabilim dalı bünyesinde bir araştırma projesi yürütülmüş olup, bu projede ülkemiz kıyıları boyunca dalga ölçümleri bulunmadığından, tüm kıyıları temsil edebilecek biçimde 31 meteoroloji gözlem istasyonunun rüzgar verileri kullanılmıştır. Bu rüzgar verileri, 1984 yılı başından 1998 yılı sonuna kadar olan 15 yıllık süreyi kapsamaktadır. Her bir veri seti, ait olduğu bölgenin coğrafi konumuna bağlı olarak; enerji üretilebileceği düşünülen dalgaları oluşturabilecek yönler, hızlar ve esme süreleri dikkate alınarak ayıklanmıştır. Düzenlenen bu fırtına verileri kullanılarak, oluşacak dalgaların karakteristikleri olan H_s (Belirgin dalga boyu) ve T_m (Dalga periyodu) değerleri hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen dalga verileri, belirgin dalga yükseklikleri ve periyodlarına göre gruplandırılmış ve her bir grubun toplam esme süreleri belirlenmiştir. Burada, yüksek dalga potansiyeline sahip bölgelerimizden biri olan Karadeniz bölgesindeki Kumköy (17059 numaralı) meteoroloji gözlem istasyonu, örnek olarak seçilmiştir. Bu istasyon için, açıkdeniz koşulları nedeniyle, dalga enerjisinin yönden bağımsız olarak hesaplanmasının yeterli olacağı düşünülmüştür. Elde edilen dalga karakteristikleri ile birim boya karşı gelen güç (J , W/m) hesaplanmıştır. Her gruptaki tüm fırtınaların birim boya gelen güçleri hesaplanıp, bunlar da fırtınanın süresi ile çarpılarak fırtınaların 15 yıllık toplamda birim boya gelen enerjileri kWh/m olarak belirlenmiştir. Bölgede kıyıya gelen dalga enerjisinin yaklaşık %93'ü 1m ile 6m, %70'i 1m ile 5m ve %50'si 1m ile 4m arasında belirgin dalga yüksekliğine sahip dalgalar tarafından taşınmaktadır. Bu aralıktaki dalgaların ortalama yıllık toplam enerjileri yaklaşık 32.500 kWh/m.yıl yapmaktadır. Günümüzde uygulanan teknolojiler ile dalga enerji dönüştürücülerinin net verimlerinin %50 civarında olduğu kabul edilirse, bölgede kurulacak bir enerji dönüşüm tesisinin bir metrelik boyu başına yaklaşık 10 kişilik eşdeğer nüfusun yıllık toplam elektrik ihtiyacını karşılayabileceği tahmin edilmektedir.

Diğer taraftan, Kilyos'ta proje kapsamında yapılan rüzgar ölçümlerinden yararlanılarak yapılan dalga enerjisi hesapları, DMİ istasyonunda elde edilenle yapılan hesaplardan varılan sonuçlarla önemli farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle ülkemizdeki dalga enerjisi ile ilgili yatırımlarda yerinde ölçümlerin yapılması gereği açıkça ortaya çıkmaktadır. Kıyı bölgelerimizde bulunan meteoroloji istasyonlarının rüzgar verileri kullanılarak -yukarda açıklanan yöntem ile- her bir istasyon için dalga tahminleri yapılarak enerji potansiyelleri hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen araştırmanın sonuçları, ülkemizde başta Batı Karadeniz bölgesi olmak üzere dalga enerjisi potansiyeline sahip kıyı alanlarının bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ülkemizde dalga enerjisinin sağlıklı hesaplanabilmesi açısından en önemli eksikliklerden biri, sürekli ve sağlıklı dalga ölçümlerinin alındığı istasyonların tam olarak hayata geçirilememiş olmasıdır. Bu yöndeki çalışmaların hızlandırılması gerektiği açıktır.

Ülkemizin dalga enerjisi potansiyeli, benzer özelliklere sahip ülkelerin potansiyeli ile karşılaştırıldığında, ülkemizin çok önemli sayılabilecek bir potansiyele sahip olduğu görülmekle birlikte; bu konudaki araştırma, planlama ve yatırım faaliyetleri açısından aynı seviyede olduğunu söylemek zor olmaktadır. Ülkemizdeki dalga enerjisi potansiyelinin hızla harekete geçirilebilmesi için yatırımcı kuruluşlarla araştırmacı kuruluşların işbirliğini sağlayacak organizasyonların teşvik edilmesinde yarar bulunmaktadır.

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de dalga enerjisi potansiyelinin yeterli düzeyde kullanıma sunulamamış olmasının önemli nedenlerinden bir diğeri, belki de en önemlilerinden biri, sahip olunan temel bilgi birikiminin yatırımcı kuruluşlara yeterli düzeyde aktarılamamış olmasıdır. Bu eksikliğin giderilebilmesi için başta üniversiteler olmak üzere, ilgili kuruluşların; bilimsel toplantılar, seminerler ve benzeri faaliyetlerle katkı sağlaması gerekmektedir.

Diğer taraftan, dalga enerjisinden yararlanmak üzere geliştirilen teknolojilerin, kıyıdan açık deniz koşullarına kadar geniş deniz alanında farklılıklar göstermesi nedeni ile Türkiye'de kullanılabilecek yöntemlerin belirlenebilmesi için mikro ölçekte çalışmalar yapılarak, kıyılarımızın hangi kesimlerinde dalga enerjisinden, hangi yöntemler kullanılarak, en üst seviyede yararlanılabileceği de ortaya konulmalıdır. Türkiye kıyılarının, hem %90'ına yakınının deniz taşımacılığı yolu ile

yapıldığı dış ticaret açısından hem de turizm faaliyetleri açısından yaşamsal öneme sahip olduğu bilinmektedir. Bu faaliyetlerin sürdürülebilmesi ve geliştirilebilmesi için ülkemizde büyük ticari liman ve yat limanı yatırımlarının giderek arttığı bilinmektedir. Her limanın bir dalgakırana sahip olması da kaçınılmazdır. Bilindiği gibi dalgakıranlar açık denizden gelen dalgalara karşı korunmak amacı ile yapılmaktadırlar ve yapısal özelliklerine göre dalga enerjisini sönmülemekte veya geri yansıtmaktadırlar. Başka bir ifade ile, aslında kullanılabilmesi mümkün olan dalga enerjisine karşı savaşılmaktadırlar. Konuya bu açıdan bakıldığında, Türkiye’de liman dalgakıranları ile birlikte veya doğrudan dalgakıran olarak inşa edilecek dalga enerjisi üretim tesislerin geliştirilmesi halinde, bu tesislerin ilk yatırım maliyetlerinin minimize edilebileceği ve çok geniş bir dalga enerjisi kullanım oranına ulaşılabileceği kolaylıkla söylenebilir.

Ülkemizde kıyıların önemli özelliklerinden biri, nüfusumuzun % 70’inden fazlasının bu bölgelerde yaşıyor olması ve sanayi tesislerinin de deniz ulaşımına yakın olması nedeni ile yine kıyı şeridinde yer almasıdır. Başka bir ifade ile, halihazırdaki enerji tüketiminin çoğu kıyılarda olmaktadır. Dolayısı ile dalga enerjisinin kullanılması halinde tüketim bölgelerinde üretimin gerçekleştirilebilmesi olanağının ortaya çıkacak olması, dalga enerjisinin diğer enerjilerle rekabet etmesinde büyük avantaj sağlayacaktır.

Sonuç olarak, dalga enerjisinin ülkemiz için çok önemli bir enerji kaynağı olduğu tartışılmaz bir gerçektir ve mevcut potansiyelin kullanılması halinde -Türkiye’nin dünyanın 17. büyük ekonomisi olduğu dikkate alındığında- enerjide arz güvenliğinin sağlanmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasının önemli katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Nitekim, 2023 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji içindeki oranının %25 olması hedeflenmekte ve bu yönde yeni teşviklerin hazırlanmakta olduğu bilinmektedir. Halihazırda Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının yenilenebilir enerji kaynakları içine dalga enerjisi potansiyelini dahil etmemiş olması, ülkemizin yenilenebilir enerji potansiyeli açısından önemli bir eksiklik olup, bunun sebebinin dalga enerjisi konusunda yeterli araştırmanın bulunmaması olduğu söylenebilir. Bu nedenle dünya dalga enerjisi ile ilgili gelişmelerin gerisinde kalmamak, yüksek verimli ve düşük enerji maliyetli yöntemleri geliştirerek orta ve uzun vadede son jenerasyon cihazları kullanabilir

duruma gelmek amacıyla, ÷lkemizde bu konuda Ar-Ge faaliyetlerine zaman kaybedilmeden başlanılması gerekmektedir.

Bu araştırma projesi ile dalga enerjisi konusunda bir bilgi birikimi edinilmiş ve geniş bir literatür taraması yapılarak alt yapı oluşumu sağlanmıştır. Mevcut alt yapı oluşumu ile farklı kıyılarda dalga ölçümü yapılarak gerçek enerji üretim potansiyeli belirleme çalışmaları hedeflenmektedir (Önöz ve diğ, 2010).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hızla tükenmekte olan ve tüketilirken de çevreye geri dönüşü mümkün olmayan zararlar veren enerji kaynaklarının yerine, güneş doğdukça ve dünya var oldukça asla tükenmeyecek olan ve çevreye hemen hemen hiçbir olumsuz etkisi olmayan rüzgar kaynaklı enerjilerle ilgili araştırma eksikliğini gidermek üzere yapılan çalışmalara bir yenisini eklemek üzere; enerjiye en çok ihtiyaç duyulan dünya şehirlerinden biri olan İstanbul'un en çok rüzgar alan bölgelerinden biri olduğu bilinen Sarıyer Kilyos (Kumköy)'ta ölçülen rüzgar hız ve yön verilerinin analiz edilmesi ile ulaşılan sonuçlar bu bölümde özetlenmiştir.

Bir bölgedeki rüzgar verilerinin; ölçüm yapılan zaman ve ölçüm istasyonunun yeri gibi değişkenlere bağlı olarak önemli farklılıklar gösteriyor olmasından dolayı, birbirinden çok uzak dönemlerde, çok uzun zaman aralıkları boyunca, iki farklı istasyonda toplanmış veriler kullanılarak bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Analiz boyunca, 1984-1998 yılları arasında DMİ'nin gözlem istasyonunda toplanan veriler ve 2007-2010 yılları arasında İTÜ Enerji Enstitüsü tarafından yerleştirilen anemometre ile toplanan veriler arasında gözle görülür farklılıklar ortaya çıkmış fakat Kilyos bölgesi için ulaşılan sonuçlarda genel olarak önemli bir değişikliğe yol açmamıştır.

Çizilen rüzgar güllerine göre; 15 yıllık DMİ verilerine göre bölgede, 1984-1998 yılları arasında, hakim rüzgar yönünün mevsimlere göre büyük farklılıklar göstermediği; kuzey ve kuzeydoğu yönlerinin baskın olduğu görülmektedir. En yüksek rüzgar hızları; Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında, o aylarda gözle görülür biçimde baskın olan kuzeydoğu değil; kuzey yönlü oluşurken, diğer aylarda hakim yönlerde oluşmuştur.

İki buçuk yıllık İTÜ verilerinde ise aynı bölgede 2007-2010 yılları arasındaki rüzgar yönlerine bakıldığında iki ölçüm istasyonu ve iki ölçüm dönemi arasında, benzerliklerin yanı sıra, önemli farklılıkların da olduğu görülmüştür. Kasım ayını takiben, kış aylarında ve daha sonra da Mart ayında hakim rüzgar yönlerinin, DMİ verilerinin aksine; güney, güneybatı ve ikisinin arası olduğu açıkça görülürken; Nisan ayından itibaren Kasım'a kadar hakim rüzgar yönünün, 180 derecelik bir

dönüşle ve oldukça kararlı biçimde, kuzeydoğu ve çevresinde (Doğu ve kuzeye doğru) yer aldığı tespit edilmiştir. Yalnızca Ekim ayı, hem kuzeydoğu hem de güneybatı yönlü rüzgarların baskınlığı altında bütün yılın ortalaması görünümündedir, fakat hızlı rüzgarlar bu ayda da yine kuzeydoğu ve civarındaki sektörlerde görülmüştür. Rüzgar hızlarının mevsimlere göre dağılımları, DMİ verilerinde ulaşılan sonuçlarla fazla farklılık göstermezken, en hızlı rüzgarlar; Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ekim aylarında hakim yönde; diğer aylarda ise genelde tam aksi yönlerde dir.

Bu sonuçların ardından, “Hız-Süreklilik Eğrisi” ile ölçüm süresi boyunca çeşitli rüzgar hızlarının zamanın ne kadarında oluştuğu, “Mevsimsellik Grafiği” ile de bölgede esen rüzgarların mevsimlere göre dağılımları incelenmiştir.

Hız-Süreklilik eğrilerine göre, bölgede DMİ verilerine göre zamanın %5’inde 10 m/s ve üzeri hızlar, %50’inde 3,4 m/s ve üzeri hızlar, %95’inde ise 1 m/s ve üzeri hızlar meydana gelmiştir. İTÜ verilerinde bu değerler biraz daha yüksek olmakla birlikte, çok büyük farklılıklar göstermemektedir. Zamanın %5’inde 10,2 m/s ve üzeri, %50’inde 3,9 m/s ve üzeri, zamanın %95’inde 1,1 m/s ve üzeri olan hızlar oluşmuş; yine DMİ verilerinde olduğu gibi, yüksek hızlar olarak gösterilen, zamanın %5’indeki hızların, türbinlerin devreden çıktığı hızlara çok uzak hızlardan başladığını, ölçüm zamanlarının yarısı boyunca görülmüş hızların da çalışmada karşılaştırılan 6 türbinden 4 tanesini devreye sokmaya yetmeyeceği hızlarda olduğunu göstermektedir. Ancak bu değerler, türbin yüksekliklerine göre uyarlandığında bölgede kurulacak bir rüzgar santrali konusuna biraz daha iyimser yaklaşılabilir sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlara dayanarak, çalışmada değerlendirilmiş olan türbinler için zamanın ne kadarında üretim gerçekleştirilebileceği ve bu süre içerisinde ne miktarda enerji üretilebileceği de teorik olarak hesaplanmıştır ve bulguların enerji üretimi açısından kesin sonuçlar olmadığı bilirse de, ayrıntılı bir rüzgar atlas analizi öncesinde, türbin seçimi ile ilgili fikir sahibi olunmasına katkı sağlayabileceği tespitinde bulunulmuştur.

Mevsimsellik Grafiği; 15 yıllık DMİ verileri için bölgede en yüksek hızlı rüzgarların en çok oluştuğu dönemleri; öncelikle sonbahar, daha sonra kış mevsimleri olarak göstermiştir. Grafikte hızlı rüzgarlar, sonbahar ve kış aylarını temsil eden bölgelerde (2. Bölge ve 1. Bölge) yoğunlaşmıştır. İki buçuk yıllık İTÜ verileri için de en yüksek hızlar yine sonbahar (2. Bölge) ve kış (1. Bölge) mevsimlerinde yoğunlaşmış

olmakla birlikte, bu kez yaz (3. Bölge) aylarında da gözle görülür bir yoğunluk oluşmuştur. Ölçüm süreleri boyunca tespit edilen en düşük hızlı rüzgarların grafikte yoğunlaşma durumlarına bakıldığında ise; DMİ verilerinin 3. ve 4. Bölgelerde, İTÜ verilerinin ise 1. ve 4. Bölgelerde daha çok görüldüğü söylenebilir.

Verilerin analizi için kullanılan bir başka araç olan WASP paket programında yapılan hesaplamalar için öncelikle, programa ait “OWC Sihirbazı” adlı dosya kullanılmış ve söz konusu araç ile elde edilen sonuçlarda, ölçüm süresi boyunca hakim rüzgar yönleri; DMİ verileri için kuzeydoğu, kuzey ve doğu; İTÜ verileri için ise kuzeydoğu, kuzey kuzeydoğu ve güney yönlerinde çıkarak rüzgar gülleri ile elde edilen sonuçları doğrulamıştır. İlgili bölümde, söz konusu program ile her yön sektörü (16 sektör) için hız ve yön frekansları (%), ortalama rüzgar hızı (m/s), ortalama güç yoğunluğu (W/m^2), Weibull-A (m/s) ve Weibull-k dağılımları parametreleri; DMİ ve İTÜ Enerji Enstitüsü ölçüm istasyonları için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Bu sonuçlara göre, İTÜ Bilimsel Araştırma Projesi çerçevesinde ölçülen verilerinin, çalışmada kullanılan 2007-2010 yılları arasındaki 2,5 yıllık bölümündeki rüzgar hızı ortalaması ve buna bağlı olarak güç yoğunluğu değerleri -en yüksek rüzgar hızlarının daha düşük değerlerde olduğu görülmesine rağmen- 1984-1998 DMİ verilerine göre daha yüksektir. Weibull dağılımları da yine DMİ verilerine oranla bir miktar farklılık göstermektedir. İTÜ verilerinde daha yüksek olan Weibull dağılımları, bu verilerdeki rüzgar sürekliliğinin daha fazla olduğunu gösterir.

DMİ ve İTÜ Bilimsel Araştırma Projesi’ne ait hız ve yön verilerinin OWC Sihirbazı yardımıyla analiz edilmesinin ardından, WASP paket programında değişik türbin çeşitlerine göre yıllık enerji üretimlerinin hesaplanması amacıyla Kilyos bölgesinin önce sayısal haritası; sayısal haritanın yardımıyla darüzgar atlası oluşturulmuştur. Aynı bölge için iki farklı data serisine dayanarak oluşturulan atlara bakıldığında, İTÜ verileri kullanılarak oluşturulmuş olan atlasta görülen rüzgar hızı ve enerji yoğunluğu, DMİ verileri kullanılarak oluşturulan atlasla göre daha yüksek görünmektedir. Bunun nedeninin ise ölçüm yeri, ölçüm zamanı verileri toplama şekli (İTÜ verileri 15 dakikalık, DMİ verileri ise 1 saatlik verilerdir) arasındaki farklılıklar olduğu sonucuna varılmıştır. Söz konusu iki farklı atlasla göre bölgenin, rüzgar enerjisi açısından en verimli kesimleri tespit edilmiş, bunlar arasından da arazi koşulları ve arazi kullanım özellikleri açısından en uygun olduğu görüşüne varılan

bir noktada;Siemens SWT 3,6 MW, Vestas V90 3 MW, Vestas V80 2 MW, Bonus 2 MW, Siemens SWT 1,3 MW ve Nordex N60 1,3 MW model rüzgar türbinlerinin konumlandırılması durumu değerlendirilmiştir.

Kule yüksekliği, rotor çapı ve kapasite ile artış gösteren enerji üretimi miktarı, bölgede kullanılmak üzere yapılacak türbin seçimi açısından en önemli faktörlerden biri olmasına rağmen; rüzgar hızının, zamanın önemli bir bölümünde türbinlerden güç elde edilebilecek en düşük hız değerinin altında kaldığı Kilyos bölgesinin, rüzgar verisi analizine ve türbin giderlerine göre kapasite faktörü hesaplaması ve bir maliyet analizi değerlendirmesi yapılmadan karar verilemeyeceği düşünülmüştür.

Ancak, kapasite faktörlerinin hesaplanmasının ardından, az bir farkla da olsa, bölge için en verimli türbinin, yine en yüksek üretim miktarına sahip olan türbin -Siemens SWT 3,6 MW- olduğu görülmüştür.

“Fayda/Maliyet Analizi”nde de durum değişmemiştir ve en düşük geri ödeme süresi yine, karşılaştırılan türbinler içerisinde en yüksek nominal güce (3,6 MW) sahip Siemens marka türbine aittir.

Bu durum, rüzgar hızı ortalamaları çok yüksek değerlerde olmasa da, yüksek hızlı rüzgarların zaman zaman görülebildiği bölgelerde en yüksek kârın yine en büyük türbinler ile elde edilebileceği fikrini vermektedir. Fakat sayısız değişkene bağlı olan ve proje bazlı olarak değişen türbin, kurulum ve bakım-onarım maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, yaklaşık birim fiyatlar üzerinden yapılmış olan bu değerlendirme kesin bir ölçüt olamamaktadır. Özellikle birbirinden farklı nominal kapasitelere sahip türbinler için kesin fiyatlara sahip olmadan yeterince sağlıklı bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir.

“Türkiye Kıyılarında Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi” adlı raporda, özellikle -Kilyos’un da bulunduğu- Karadeniz kıyılarında önemli bir dalga enerjisi potansiyeli olduğu, son yıllardaki hızlı gelişmeler doğrultusunda da maliyetlerin büyük oranda düşeceğinin öngörüldüğü belirtilmiştir. Rüzgar enerjisine göre enerji yoğunluğuve güvenilirliği daha yüksek olan; toplam maliyeti diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından daha az olan dalga enerjisi, bu bölge için önemli bir fırsat durumundadır ve ciddi şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, dalga enerjisi gibi, kısıtlı alanlarda (yalnızca sahillerde) faydalanılabilen bir enerji kaynağı için Türkiye’ye oranla çok daha az potansiyele sahip olan birçok

ülkenin yapmış olduğu yatırımlara bakıldığında, bölgenin önemi daha da dikkat çekici hale gelmektedir.

Aynı zamanda, bölgede denizüstü (offshore) rüzgar türbinleri ve dalga dönüştürücülerinden birlikte faydalandığı bir hibrit sistem de düşünülebilir. Kanatlarına zarar gelmemesi açısından türbinlerin kendilerini devre dışı bıraktığı fırtınalı dönemler, dalga enerjisi üretiminin en yüksek seviyeye çıktığı dönemlerdir. Bunun yanı sıra, rüzgarın aniden yavaşladığı dönemlerde dalgalar bir süre daha oluşmaya devam eder. Kıyıya paralel estiği için dalga oluşturmayacak olan rüzgarlar ise türbinler tarafından değerlendirilir. Enterkonnekte şebeke bulunmayan bölgelerde ise bu sistem, bir sıvı doğal gaz tankının da denizin içine yerleştirilmesi suretiyle, rüzgar ve dalganın aynı zaman zarfında enerji üretimine yeterli olmayacak kadar zayıf kaldığı dönemlerde devreye girerek, üretilen enerji miktarını sabit kılan bir sıvı doğal gaz jeneratörünün entegre edilmesine de imkan vermektedir. Söz konusu sistem Meksika Körfezi'nde inşa aşamasında olup; Kaliforniya, New Jersey ve New England (A.B.D'nin kuzeydoğu kıyı şeridi) açıkları için öneri aşamasındadır (Url-21).

Şebeke bağlantısı maliyetini en aza indirerek, alan kaybına neden olmadan temiz ve güvenilir enerji üretimi sağlayacak olan böyle sistemler; fosil yakıtların pahalılığı ve tükenmekte olduğu gerçekleriyle yüzleştığımız, çevre kirliliği ve küresel ısınmanın Dünya'nın en önemli sorunu olduğu yönündeki bilincin yerleştiği bu dönemde; konvansiyonel yakıtlar bakımından büyük oranda dışa bağımlı olan ve enerji ihtiyacı yıldan yıla hızla artan ülkemizde mutlaka değerlendirilmelidir. Çağın gerisinde kalınmaması ve gelişmiş ülkelerdeki temiz enerji trendinin, maddi açıdan zarara uğramadan yakalanabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik detaylı ve uzun soluklu araştırma ve analizlerin artırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Ackermann, T. and Söder, L.**, 2002. An overview of wind energy status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **Vol 6**, pp 67-128, Pergamon Press.
- Ackermann, T. Söder, L.**,2000. “Wind Energy Technology and Surrent Status: a Review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **Vol. 4**, pp. 315-374,
- Aguado, E. and Burt, J. E.**, 2007. Understanding Weather and Climate, 4th Edition, New Jersey USA.
- Akalın, A.**, 2009.Temiz ve Yenilenebilir Enerji Potansiyeli ve Stratejileri, *Uluslararası Enerji Kongresi*, Ankara.
- Albostan, A.**, 2007. Yüksek ve Düşük Akımların Mevsimselliği Orta Fırat Havzası Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Barutçu, B.**, 2008. Wind Energy&Conversion Technology Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Burton, T.**, 2001. Wind Energy Handbook. West Sussex.
- Clement, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M.T., Schild, P., Sjöström, B.O., Sorensen, H.C. ve Thorpe, T.**, 2002.Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives, *Renew. and Sust. Ener. Rev.*
- Çetin, Numan, S., Özdamar, A., Kara, Ö.**, “Rüzgar Gülü Dişli Kutusu Optimum Çevrim Oranı Üzerine Bir Araştırma”, *VI. Türk-Alman Enerji Sempozyumu*, 21-24 Haziran 2001, İzmir.
- Dinçer, M., Aslan, Ö.**, 2008. Sürdürülebilir Kalkınma, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Hidrojen Enerjisi: Türkiye Değerlendirmesi, İstanbul Ticaret Odası.
- DMİ**, 2010.Rüzgar Enerjisi Tahmin Sistemi (RETS), Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara. www.dmi.gov.tr/FILES/tahmin/RETS-kitapcik.pdf.
- Durak, M.**, 2010.TÜREB (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği), Türkiye’deki RES Projeleri. <http://www.ruzgarenerjisibirliigi.org.tr/>
- Durak, M., Özer, S.**, 2008. Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama, İmpress Basım, Ankara.
- DWIA**, 2003. Charles F. Brush, A Turbine Pioneer. <http://guidedtour.windpower.org/en/pictures/brush.htm>.

- DWIA**, 2003. The Wind Energy Pioneer Poul La Cour.
<http://guidedtour.windpower.org/en/pictures/lacour.htm>.
- DWIA**, Danish Wind Industry Association, 2009, Guided Tour.
<http://www.talentfactory.dk/en/tour.htm>.
- Eriksson, J.**, 2011. Renewable Power News, Southwest Windpower Reveals Its Latest Wind Turbine.
<http://www.renewablepowernews.com/archives/2125>.
- EWEA**, 2008. Wind Energy The Facts, Brussels.
- EWEA**, 2009. The Economics of Wind Energy.
- Heier, S.**, 1998. Translated Waddington, R., Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley&Sons, ABD.
- Holthuijsen, L.H.**, (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters, Cambridge University Press.
- Johnson, G. L.**, 2001. Wind Energy Systems, Electronic Edition, Manhattan, KS
- Karleskint, G., Turner, R., Small, J.**, 2010. Introduction To Marine Biology, Third Edition, Graphic World Inc., Canada.
- Kurban, M., Kantar, Y., Hocaoglu F.**, 2006. "Rüzgar Enerji Potansiyelinin Araştırılmasında Weibull ve Rayleigh Dağılımları'nın Kullanılması", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **Cilt 10-1**.
- Kurt, N.**, 2009. Bilkent İEEE Öğrenci Kolu E-Dergisi, http://iee.bilkent.edu.tr/teknoloji101/index.php?active=haber&no=2&vol=24092009&baslik=R%C3%BCzgar_T%C3%BCrbinleri.
- Mathew, S.**, 2006. Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics with 137 Figures and 31 Tables. Springer. Hollanda
- McCormick, M.**, 1981. Ocean wave energy conversion, Wiley, Annapolis, Maryland.
- Menteş, S.**, 2009. Rüzgar Enerjisi ve Sistemleri Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Meriçboyu, A., Yavuz, N.**, 2008 Enerji, Çevre ve Hukuku Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Mukund R.**, 1999. Wind and Solar Power System, CRC Press, New York
- Onaygil, S., Güler, Ö.**, 2008. Enerji Ekonomisi ve Politikaları Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Önöz, B., Kabdaşlı, S., Yeğen, B., Yılmaz, A., Babaç, G., Albostan, A., Varol, E.**, 2010. Türkiye Kıyılarında Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü.
- Özdamar, A.**, 2000. Dünya ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **Cilt: 6, Sayı: 2-3**.
- Phillips, O. M.**, 1977. The Dynamics of The Upper Ocean (2nd ed.), Cambridge University Press.

- Pontes M., Athanassoulis, G., Barstow, S., Bertotti, L., Cavaleri, L., ve Holmes, B.,** 1998. The European Wave Energy Resource, 3rd EWEC, Patras, Greece.
- Şen, Ç.,** 2003. Gökçeada'nın Elektrik İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Şen, Z.,** 2002. Temiz Enerji ve Kaynakları, İstanbul.
- Troen, I., Peterson, E. L.,** 1989. European Wind Atlas, Risø, Denmark for Commission of The European Communities.
- Url-1**<http://enerji2023.org/index.php?option=com_content&view=article&id=20:yenleneblr-enerj&catid=11:yenleneblr&Itemid=43>, Alındığı Tarih:13.11.2010
- Url-2** <<http://ytam.marmara.edu.tr/icerik/8>>, Alındığı Tarih: 13.11.2010
- Url-3** <<http://www.wind-power-program.com/betz.htm>>, Alındığı Tarih: 13.11.2010
- Url-4** <<http://www.ksrenergy.com/ruzgar.asp>>, Alındığı Tarih: 18.02.2011
- Url-5**<<http://www.smartplanet.com/business/blog/smart-takes/infographic-where-solar-and-wind-power-work-best/4353/>>, Alındığı Tarih: 14.11.2010
- Url-6**<http://www.emo.org.tr/ekler/5237d34f69ddac7_ek.pdf>, Alındığı Tarih: 14.11.2010
- Url-7**<<http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=ruzgar&bn=231&hn=&nm=384&id=40696>>, Alındığı Tarih: 14.11.2010
- Url-8**<<http://www.thewindpower.net/country-datasheet-34-turkey.php>>, Alındığı Tarih: 11.06.2011
- Url-9**<www.emo.org.tr/ekler/6a781dbfd8e524b_ek.pdf>, Alındığı Tarih: 15.11.2010
- Url-10**<http://ocsenergy.anl.gov/documents/docs/OCS_EIS_WhitePaper_Wave.pdf>, Alındığı Tarih: 09.04.2011
- Url-11**<<http://ocsenergy.anl.gov/guide/wave/index.cfm>>, Alındığı Tarih: 09.04.2011
- Url-12**<http://worldofenergy.com.au/factsheet_water/07_fact_water_ocean.html>, Alındığı Tarih: 16.11.2010
- Url-13**<<http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energyresources/ocean.shtml>>, Alındığı Tarih: 16.11.2010
- Url-14**<<http://www.oceanenergy.ie/markets/international.html>>, Alındığı Tarih: 16.11.2010
- Url-15**<<http://www.eie.gov.tr/duyurular/YEK/YEKrepa/ISTANBUL-REPA.pdf>>, Alındığı Tarih: 17.11.2010
- Url-16**<<http://www.istanbul.dmi.gov.tr/merkezler-tanitim.aspx?m=14>>, Alındığı Tarih: 15.04.2011
- Url-17** <<http://www.wasp.dk/index.htm>>,Alındığı Tarih: 17.11.2010
- Url-18**<<http://www.wasp.dk/support/FAQ/WebHelp/OWCWizard001.htm>>,Alındığı Tarih: 17.11.2010
- Url-19** <<http://www.tbmm.gov.tr/kanunlar/k6094.html>>, Alındığı Tarih: 09.04.2011

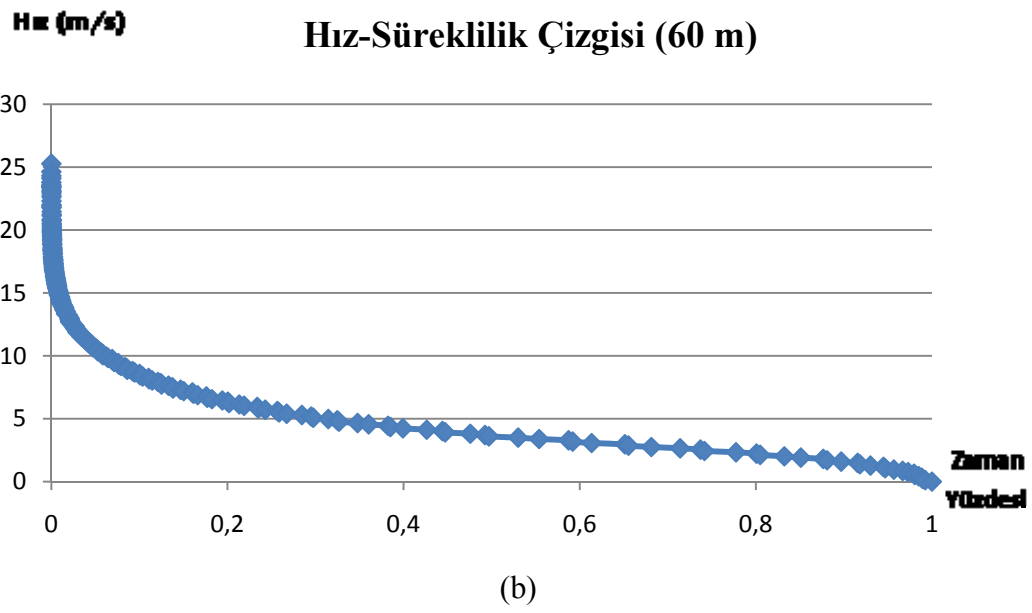
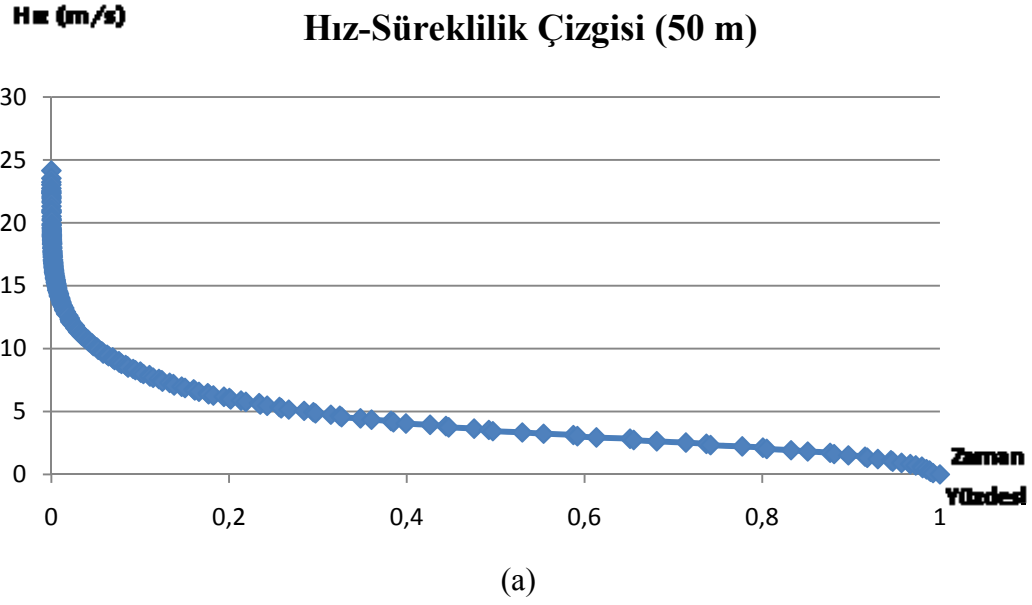
- Url-20**<<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2207.html>>, Alındığı Tarih: 04.05.2011
- Url-21**<<http://graysharboroceanenergy.com/hybridpower.htm>>, Alındığı Tarih: 29.04.2011
- Ültanır, M.**,1999. An Otherview of Turkey’s Energy Strategy on The Eve of The 21st Century, TÜSİAD Publication, Lebib Yalkın Yayınları, İstanbul.
- Wizelius, T.**, 2007. Developing Wind Power Projects, London.
- Wegley, H., L., Ramsdel, J., J., Orgill, M., M., Drake, R., L.**,1980. A Sitting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems, U.S. Department of Energy, Report **PNL-2521**.
- World Meterological Office**, 1981. Meteorological Aspects of The Utilization of Wind As An Energy Source, WMO-No: **575**, Geneva.
- Yavuzcan, G.**, 1962. Türkiye Rüzgar Enerjisi ve Türkiye’de Kullanılan Rüzgar Türbünleri Üzerinde Bir Araştırma. Köy İşleri Bakanlığı Topraksu Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Yerebakan, M.**, 2001. Rüzgar Enerjisi. İstanbul Ticaret Odası, Ankara.
- WAsP**, 2009. Program Help Files, Denmark
- Wizelius, T.**,2007. Developing Wind Power Projects, London.
- WWEA**, 2010. World Wind Energy Report 2009, World Wind Energy Association. http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf.
- WWEA**, 2011. World Wind Energy Report 2010, World Wind Energy Association. http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf.

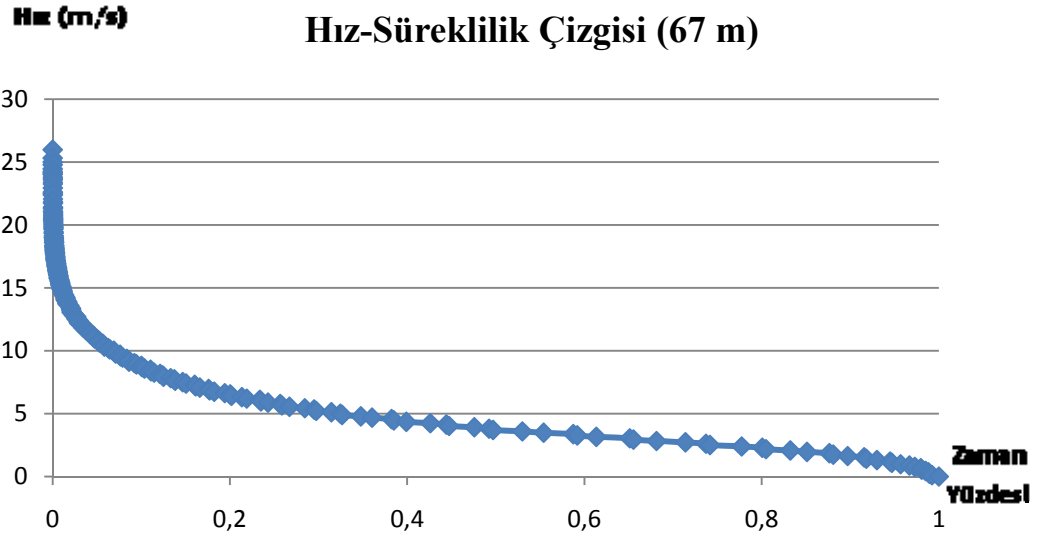
EKLER

EK A.1 : Farklı Türbin Yükseklikleri İçin Hız-Süreklilik Çizgileri (DMİ Verileri)

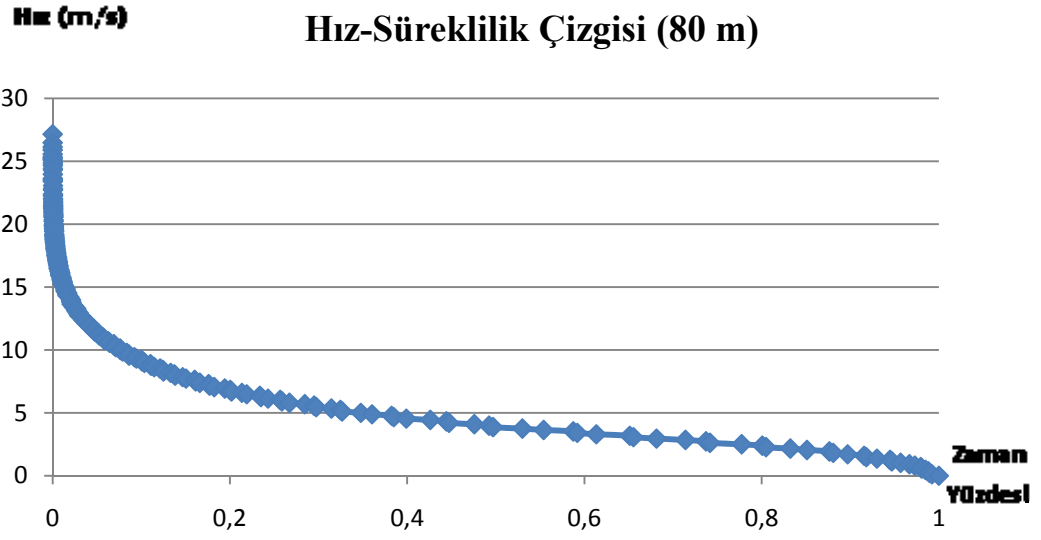
EK A.2 : Farklı Türbin Yükseklikleri İçin Hız-Süreklilik Çizgileri (İTÜ Verileri)

EK A.1





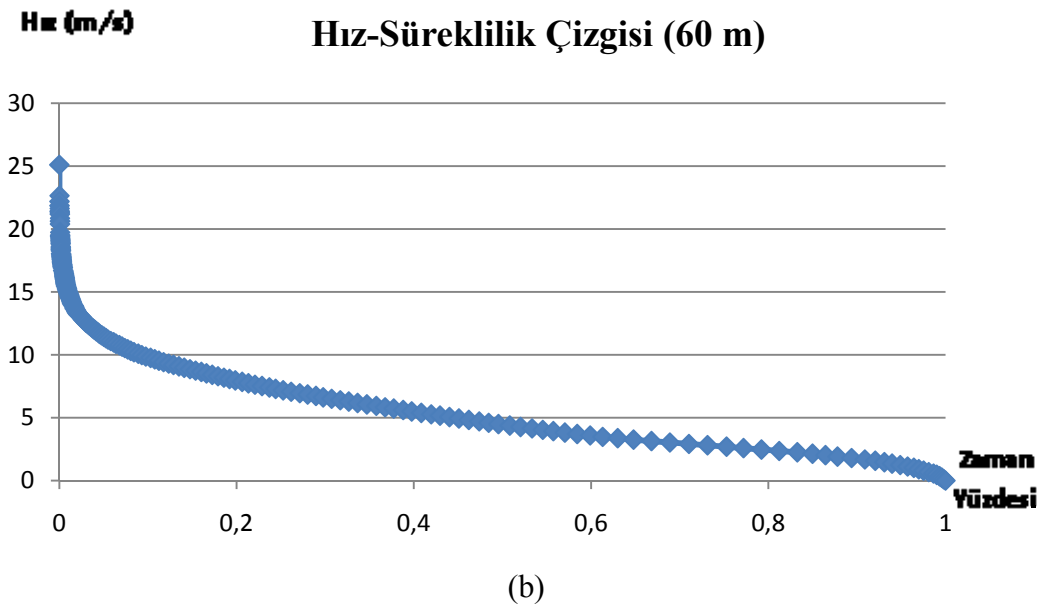
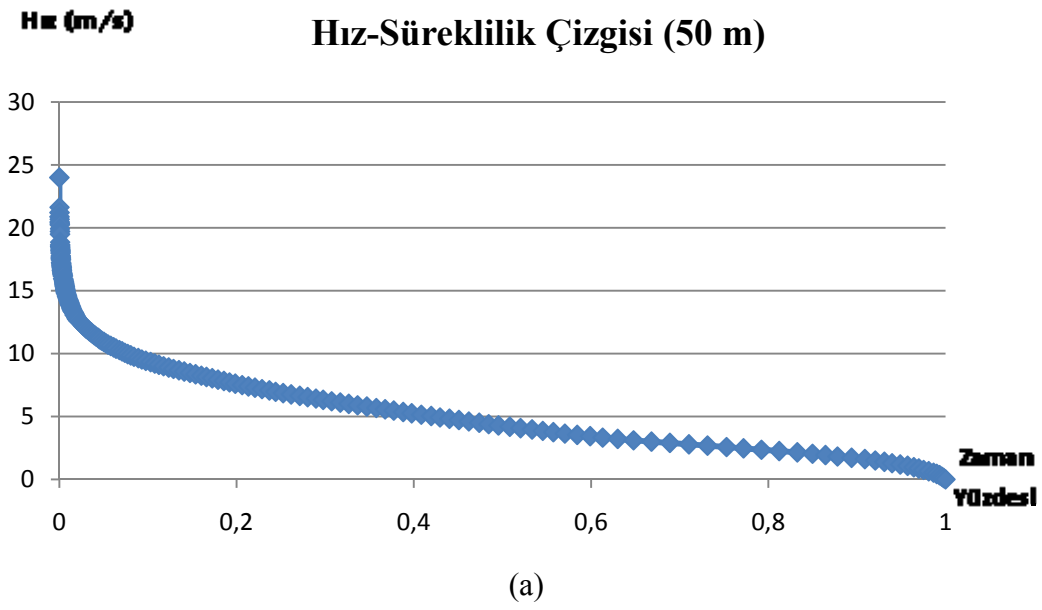
(c)

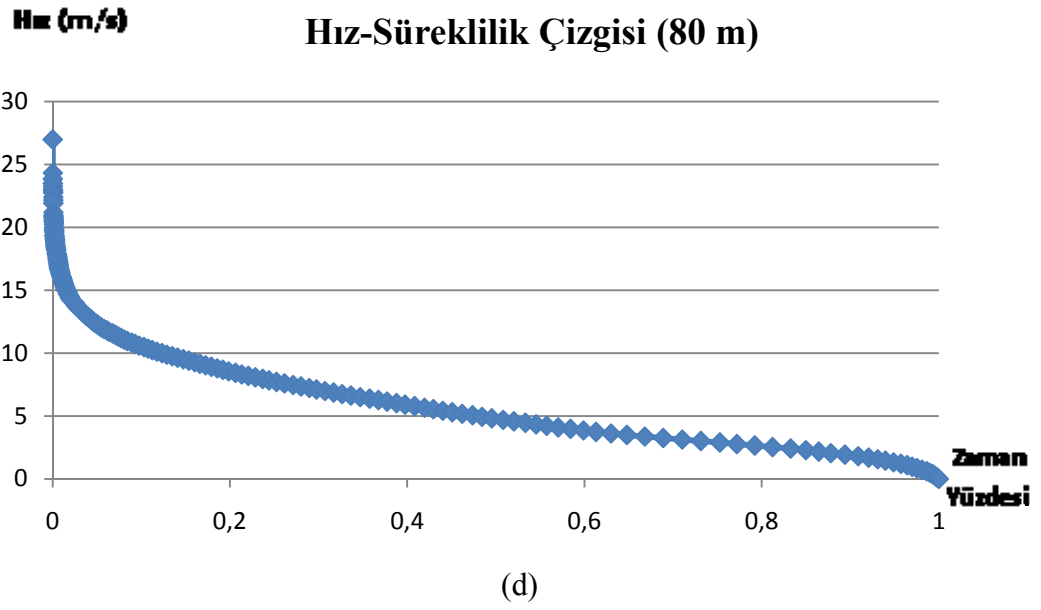
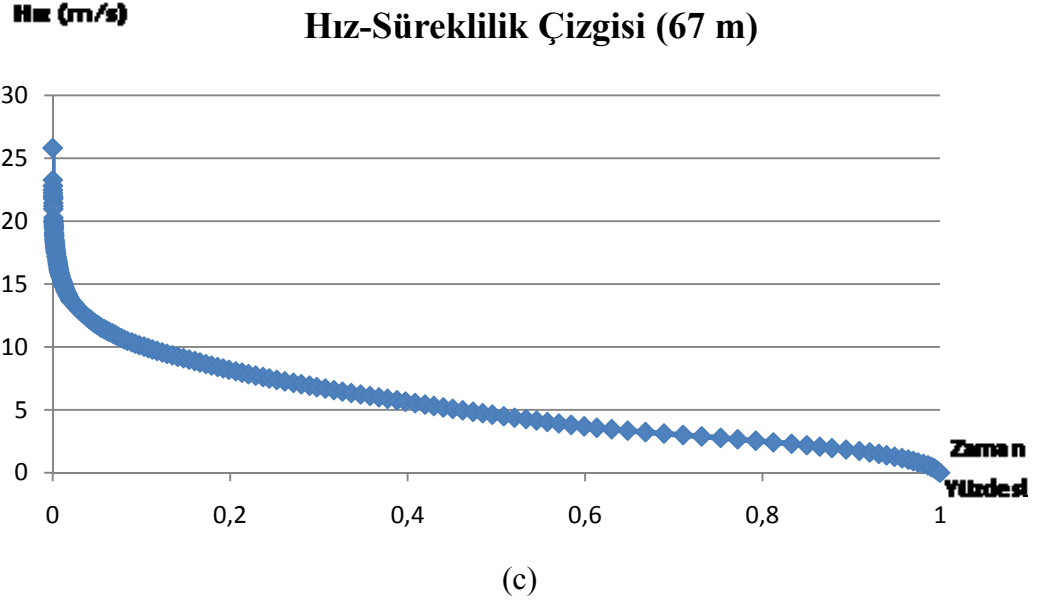


(d)

Şekil A.1 : Farklı Türbin Yükseklikleri İçin Hız-Süreklilik Çizgileri (DMİ Verileri):
(a) 50 m. (b) 60 m. (c) 67 m. (d) 80 m.

EK A.2





Şekil A.2 : Farklı Türbin Yükseklikleri İçin Hız-Sürekli Çizgileri (İTÜ Verileri):
(a) 50 m. (b) 60 m. (c) 67 m. (d) 80 m.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mehmet Emre HAKYEMEZ

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 05.06.1984

Adres: ELC Group Mühendislik ve Müşavirlik Ltd. Şti. Kavacık
Mah. Şehit Mustafa Yazıcı Sokak No:20
Beykoz/İSTANBUL

Lisans Üniversitesi: Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği