

Eskişehir ve Yöresinde Enerji Üretimi Amaçlı Rüzgar Hızlarının
Tespiti ve Kullanıma Uygunluğunun Araştırılması

Bahadır Kartal

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2010

Determining Wind Speed Of Eskişehir Region and
Investigating Availability For Energy Production Purpose

Bahadır Kartal

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

June 2010

Eskişehir ve Yöresinde Enerji Üretimi Amaçlı
Rüzgar Hızlarının Tespiti ve Kullanıma Uygunluğunun Araştırılması

Bahadır Kartal

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Ve Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Haydar ARAS

Haziran 2010

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Bahadır KARTAL'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Eskişehir ve Yöresinde Enerji Üretimi Amaçlı Rüzgar Hızlarının Tespiti ve Kullanıma Uygunluğunun Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Haydar ARAS

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Haydar ARAS

Üye: Prof. Dr. L. Berrin ERBAY

Üye: Doç. Dr. Veysel YILMAZ

Üye: Y. Doç. Dr. İrfan ÜREYEN

Üye: Y. Doç. Dr. M. Ertunç TAT

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ESKİŞEHİR VE YÖRESİNDE RÜZGAR HIZLARININ TESPİTİ VE ENERJİ ÜRETİMİ AMAÇLI KULLANIMA UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

BAHADIR KARTAL

ÖZET

Türkiye’de ve dünyada hızla artan enerji ihtiyacı, mevcut tükenbilir enerji kaynaklarındaki azalması sebebiyle, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını gündeme getirmiştir. Yenilenebilir, temiz, ucuz bir enerji olan rüzgar enerjisi de bu yeni enerji kaynaklarına birisidir.

Bu çalışmada Eskişehir ve Eskişehir’e bağlı Çifteler, Mahmudiye, Sivrihisar ilçelerinde bulunan Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nün (DMİ) istasyonlarından alınan 2007–2009 yılları arası üç yıllık saatlik rüzgar ölçüm verileri kullanılarak bu istasyonlar için gerçek ortalama rüzgar hızları ve enerji yoğunlukları hesaplanmıştır. Çalışma içerisinde, literatürde en fazla kullanılan moment, grafik, en yüksek olasılırlık yöntemi ve Weibull 7++ programı kullanılarak hesaplanan parametrelerin hata analizi yapılarak en uygun parametreler belirlenmiştir. (Bu parametreler boyutsuz şekil “k” ve ölçek “c(m/s)” dir

Bu parametreler 10, 30, 50 metreler için hesaplanarak bu yüksekliklerdeki güç yoğunluğu $P_w(W/m^2)$, en olası hız $v_{enolası}(m/s)$ ve en fazla enerjiyi taşıyan hız $V_{max,E}(m/s)$ değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca beş farklı rüzgar türbininin üçüncü dereceden türbin güç eğrileri bulunarak her bir bölgeye ait 50 metredeki Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile entegre edilmiş, yıllık her bir bölge için maksimum üretilebilecek enerjiler hesaplanmıştır

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, elektrik üretimi, Weibull dağılımı, Eskişehir

DETERMINING WIND SPEED OF ESKIŞEHİR REGION AND INVESTIGATING AVAILABILITY FOR ENERGY PRODUCTION PURPOSE

BAHADIR KARTAL

SUMMARY

The rapid increase in energy demands in Turkey and the world and also diminishes of energy sources drove the need for new and renewable energy sources. Wind energy, which is renewable, clean and cheap, is one of these new energy sources.

In this study, three year hourly wind speed measurements between year 2007-2009 were taken from The Meteorology Work General Directorate's stations established in Eskişehir and Eskişehir district's Çifteler, Mahmudiye and Sivrihisar were used to calculate real average wind speed and energy densities at these stations. In this study the most common methods in literature which are Moment, Graphic, Maximum Likelihood and Weibull 7++ program were used to determine the most suitable parameters and these were calculated by performing error analysis. These parameters are dimensionless shape parameter k and scale parameter c (m/s).

These parameters were calculated with respect to 10, 30, 50 meters to determine power density P_w (W/m²) values, the most probable speed $v_{\text{mostprobable}}$ (m/s) values and the speed that transport the most excessive energy $V_{\text{max,E}}$ (m/s) values. Also third order turbine power curves for five different wind turbines's were calculated and were integrated with Weibull probability density functions for all regions at 50 meters altitude and the maximum amount of energy that can be produced annually were calculated.

Keywords: Wind energy, electricity production, Eskisehir, Weibull Distribution

TEŞEKKÜR

Gerek derslerimde ve gerekse tez alıőmalarında, bana danıőmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan sevgili danışman hocam Doç. Dr. Haydar ARAS'a, teşekkür ederim.

Ayrıca, alıőma hayatımla birlikte yüksek lisans eğitimimi tamamlamamda gerekli kolaylığı sağlayan, hoőgürsünü ve manevi desteğini esirgemeyen 1 inci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı'nda görevli, İmalat Müdürü Hava Mühendis Yüzbaőı Muzaffer BAKI'ye teőekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tez çalıőmam süresince benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen eőime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Problemin Tanımı	1
1.2 Çalışmanın Amacı	1
1.3 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi İle İlgili Yapılan Akademik Çalışmalar.....	2
1.4 Çalışmanın Yöntemi	8
2. RÜZGAR ENERJİSİ	9
2.1 Rüzgar	9
2.2 Rüzgar Çesitleri ve Oluşumu	10
2.2.1 Küresel rüzgarlar.....	13
2.2.2 Yüzey rüzgarları.....	14
2.2.3 Yerel rüzgarlar.....	15
2.2.3.1 Deniz rüzgarları.....	15
2.2.3.2 Dağ rüzgarları	15
2.3 Rüzgar Enerjisi	16
2.4 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi	16
2.5 Dünyanın Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	22
2.6 Türkiye’nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	22
2.7 Dünyada Rüzgar Enerjisi Kullanımı	25
2.7.1 2001 yılından itibaren sektörün gelişimi	26
2.7.2 Rüzgar enerjisinde başı çeken ülkeler	27
2.7.3 Rüzgarın üretilen elektrik gücündeki payı	31

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.7.4 Denizüstü Kurulan Rüzgar Türbinleri	31
2.7.5 Rüzgar sektörü istihdamı	33
2.7.6 Bölgesel dağılım	34
2.7.7 Afrika	37
2.7.8 Asya	38
2.7.9 Avustralya(Okyanusya)	39
2.7.10 Avrupa	39
2.7.11 Latin Amerika	40
2.7.12 Kuzey Amerika	41
2.7.13 Dünyanın gelecekteki rüzgar enerjisi beklentileri	42
2.8 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Tarihi ve Kullanımı	48
2.8.1 Son gelişmeler	50
2.9 Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları	54
2.9.1 Rüzgar enerjisinin avantajları	54
2.9.2 Rüzgar enerjisinin dezavantajları ve bunlara ait çözüm önerileri	55
3. RÜZGAR ENERJİSİNDE KULLANILAN TEORİK BİLGİLER	57
3.1 Temel Yasa ve Kavramlar	57
3.2 Rüzgar Güç Profili Kanunu	60
3.3 Rüzgar Potansiyeli Hesaplama Yöntemleri	62
3.4 Weibull Dağılımı	62
3.4.1 Grafik yöntem (En küçük kareler yöntemi).....	64
3.4.2 Moment yöntemi	65
3.4.3 En Yüksek Olabilirlik yöntemi	67
3.5 Hata Analizi	68
3.6 Güç Yoğunluğunun Belirlenmesi	68
3.7 En Olası Hız Değeri	69
3.8 En Fazla Enerjiyi Taşıyan Hız	70
3.9 Rüzgar Türbinin Ürettiği Enerjinin Bulunması	70
3.10 Rüzgar Türbinlerini Güç Eğrileri	71

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.11 Kapasite Faktörünün Hesaplanması	72
4. ESKİŞEHİR VE YÖRESİNDE ENERJİ ÜRETİMİ AMAÇLI RÜZGAR	73
DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ	
4.1 Eskişehir İlinin Yeri	73
4.2 Çifteler İlçesinin Yeri	74
4.3 Mahmudiye İlçesinin Yeri	74
4.4. Sivrihisar İlçesinin Yeri	74
4.5 Eskişehir ve Yöresindeki Rüzgar Yönleri ve Rüzgar Hızları Ölçümleri ...	75
4.6 Eskişehir ve Yöresindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyellerinin	90
Hesaplanması	
4.6.1 Hata analizi sonuçları ile en uygun yöntemin seçilmesi	104
4.6.2 En olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğunun	109
hesaplanması	
4.6.3 Rüzgar türbinlerinin ürettiği enerjinin hesaplanması	111
5. SONUÇ ve TARTIŞMA	118

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Coriolis eğme kuvvetlerinin troposfer etkisi	13
2.2 Coriolis eğme kuvvetlerinin troposfer etkisi	14
2.3 Pers Uygarlığında görülen dikey eksen tipli yel değirmeni diyagramı	17
2.4 Pers Uygarlığında kullanılan bir başka yel değirmeni	17
2.5 Bir modern rüzgar enerjisi su pompalama sistemi resmi	18
2.6 Muhtemelen tipinin ilk örneği olan ve Belidor tarafından tasarlanan pervane tipi rüzgar türbini	19
2.7 Putnam rüzgar türbini	19
2.8 Türkiye’de 10 m. yükseklikte rüzgar hızı dağılımı	23
2.9 Türkiye’de 10 m. yükseklikte rüzgar potansiyeli dağılımı.....	24
2.10 Türkiye rüzgar atlası	25
2.11 2001-2009 yılları arası dünyada kurulan rüzgar gücü.....	26
2.12 Dünya rüzgar enerjisi piyasası büyüme hızı	27
2.13 2008 ve 2009 yılları rüzgar enerjisinde en çok büyüyen ilk 10 ülkenin büyüme hızları(%)	28
2.14 İlk 10 ülkenin toplam kapasiteleri	29
2.15 2009 yılı ülkelerin rüzgar enerjisi kapasite payları(%)	30
2.16 Ülkelerin toplamda kurulu güç payları	30
2.17 İlk 5 deniz üstü rüzgar enerjisi üreten ülkeler	32
2.18 Rüzgar enerjisi çalışan sayısı	34
2.19 Ana bölgeleri büyüme hızları	35
2.20 Kıtaların 2009 yılı kapasite payları	36
2.21 Kıtaların 2009 yılı rüzgar enerjisi artan kapasite payları	36
2.22 Yıllara sari Afrika’daki kurulu rüzgar gücü	37
2.23 Yıllara sari Asya’daki kurulu rüzgar gücü	38
2.24 Yıllara sari Avustralya’daki kurulu rüzgar gücü	39
2.25 Yıllara sari Avrupa’daki kurulu rüzgar gücü	40
2.26 Yıllara sari Latin Amerika’daki kurulu rüzgar gücü	41
2.27 Yıllara sari Kuzey Amerika’daki kurulu rüzgar gücü	42
2.28 Dünya toplam kurulu rüzgar gücü	48
3.1 Rüzgarın türbine girerken genişlemesi	58

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.2 Yavaşlatma faktörü değişimi	60
3.3 Yüzey farklılıklarının rüzgar hızına etkisi	61
4.1 Eskişehir ili haritası	73
4.2 Eskişehir üç yıllık rüzgar esme yönü grafiği	76
4.3 Çifteler üç yıllık rüzgar esme yönü grafiği	76
4.4 Mahmudiye üç yıllık rüzgar esme yönü grafiği	77
4.5 Sivrihisar üç yıllık rüzgar esme yönü grafiği	77
4.6 Eskişehir 2007-2009 yılları arası aylık ortalama rüzgar hızı değerleri	78
4.7 Eskişehir 2007-2009 yılları arası günlük ortalama rüzgar hızı değerleri	79
4.8 Eskişehir 2007-2009 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri	79
4.9 Çifteler 2007-2009 yılları arası aylık ortalama rüzgar hızı değerleri	81
4.10 Çifteler 2007-2009 yılları arası günlük ortalama rüzgar hızı değerleri	81
4.11 Çifteler 2007-2009 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri	82
4.12 Mahmudiye 2007-2009 yılları arası aylık ortalama rüzgar hızı değerleri	83
4.13 Mahmudiye 2007-2009 yılları arası günlük ortalama rüzgar hızı değerleri	84
4.14 Mahmudiye 2007-2009 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri	84
4.15 Sivrihisar 2007-2009 yılları arası aylık ortalama rüzgar hızı değerleri	86
4.16 Sivrihisar 2007-2009 yılları arası günlük ortalama rüzgar hızı değerleri	86
4.17 Sivrihisar 2007-2009 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri	87
4.18 Eskişehir ve yöresinde üç yıllık aylık ortalama rüzgar hızı değerleri	88
4.19 Eskişehir ve yöresinde üç yıllık günlük ortalama rüzgar hızı değerleri	89
4.20 Eskişehir ve yöresinde üç yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri	89
4.21 Grafik yöntem için akış diyagramı	92
4.22 En Yüksek Olabilirlik yöntemi için akış diyagramı	95
4.23 Eskişehir 10 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	97
4.24 Çifteler 10 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	98
4.25 Mahmudiye 10 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	98
4.26 Sivrihisar 10 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	99

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.27 Eskişehir 30 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	100
4.28 Çifteler 30 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	100
4.29 Mahmudiye 30 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	101
4.30 Sivrihisar 30 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	101
4.31 Eskişehir 50 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	102
4.32 Çifteler 50 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	103
4.33 Mahmudiye 50 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	103
4.34 Sivrihisar 50 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği	104
4.35 Dewind D4 rüzgar türbini güç eğrisi	113
4.36 Fuhrlander FL 30 rüzgar türbini güç eğrisi	113
4.37 Fuhrlander FL 100 rüzgar türbini güç eğrisi	114
4.38 Fuhrlander FL 250 rüzgar türbini güç eğrisi	114
4.39 Northern Power NW 100/19 rüzgar türbini güç eğrisi	115

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Beaufort cetveli kara kriterleri	11
2.2 Beaufort cetveli deniz kriterleri	12
2.3 Enlemlere göre hakim rüzgar yönü	14
2.4 Çeşitli ülkelerin tahmini rüzgar enerjisi potansiyelleri.....	22
2.5 Bölgelere göre rüzgar enerjisi potansiyeli.....	24
2.6 Denizüstü rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları	32
2.7 Rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları	43
2.8 Türkiye'deki kullanımda olan rüzgar santralleri	51
2.9 Türkiye'deki inşa halinde bulunan rüzgar santralleri	52
2.10 Türkiye'deki türbin tedarik sözleşmesi imzalı projeler	53
3.1 Yüzeysel farklılıklarının rüzgar hızına etkisi	61
3.2 COV değerine karşılık gelen k değerleri	66
4.1 10 metre yükseklik için k ve c değerleri	96
4.2 30 metre yükseklik için k ve c değerleri	96
4.3 50 metre yükseklik için k ve c değerleri	97
4.4 Eskişehir hata analizi sonuçları	105
4.5 Çifteler hata analizi sonuçları	106
4.6 Mahmudiye hata analizi sonuçları	107
4.7 Sivrihisar hata analizi sonuçları miktarı	108
4.8 10 metre yükseklikteki en olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğu	109
4.9 30 metre yükseklikteki en olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğu	110
4.10 50 metre yükseklikteki en olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğu	110
4.11 Rüzgar türbinlerinin özellikleri	112
4.12 Rüzgar türbinleri güç eğrileri katsayıları	115
4.13 Bölgelerde yıllık tüm türbin tipleri için üretilebilecek enerji miktarları	116
4.14 Bölgelerde 50 m. yükseklikteki tüm türbin tiplerinin kapasite faktörleri	117

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Alan
B	Batı
BGB	Batı güneybatı
BKB	Batı kuzeybatı
c	Weibull ölçek parametresi
C_f	Kapasite faktörü
C_p	Güç faktörü
CO ₂	Karbondioksit
COV	Değişme miktarı katsayısı (Coefficient of variance)
D	Doğu
DGD	Doğu güneydoğu
DKD	Doğu kuzeydoğu
E	Enerji
$E_{\text{Türbin}}$	Rüzgar türbininin belirli bir zaman aralığında ürettiği güç
$f(v)$	Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F(v)$	Weibull dağılımı birikimli(kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu
G	Güney
GB	Güneybatı
GD	Güneydoğu
GGB	Güney güneybatı
GGD	Güney güneydoğu
GWh	Giga watt saat
H	Yükseklik
k	Weibull şekil parametresi
K	Kuzey
KB	Kuzeybatı
KKB	Kuzey kuzeybatı
KD	Kuzeydoğu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

KKD	Kuzey kuzeydoğu
KE_r	Rüzgarın kinetik enerjisi
Kg	Kilogram
km	Kilometre
kW	Kilo watt
kWh	Kilo watt saat
L	Olabilirlik fonksiyonu
MW	Mega watt
MWh	Mega watt saat
m	Metre
\dot{m}	Kütlesel debi
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
N	Newton
n	Yavaşlatma faktörü
N	Rüzgar ölçüm sayısı
P	Basınç
P_r	Rüzgar gücü
P_T	Türbin gücü
$P_T(v)$	Rüzgar türbini güç eğrisi fonksiyonu
P_w	Güç Yoğunluğu
R	Çap
s	Saniye
TWh	Tera watt saat
V	Hız
$V_{enolası}$	En olası hız değeri
V_{maxE}	En fazla enerjiyi taşıyan hız
V_r	Rüzgar hızı
$V_Ç$	Çevresel hız

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

\bar{v}	Ortalama hız
π	Pi sayısı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
λ	Uç hız oranı
α	Helmann katsayısı
σ	Standart sapma
Π	Çarpım sembolü
x_i	i. Weibull dağılımı tahmin edilen rüzgar hızı değeri
y_i	i. gerçek rüzgar hızı değeri
\bar{y}	Gerçek rüzgar hızlarının ortalaması

Kısaltmalar Açıklama

ARES	Alaçatı rüzgar elektrik santrali
BORES	Bozcaada rüzgar elektrik santrali
COV	Değişme miktarı katsayısı (Coefficient of variance)
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
IRENA	Uluslar Arası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency)
M.Ö.	Milattan önce
M.S.	Milattan sonra
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NERSA	Güney Afrika Cumhuriyeti Ulusal Elektrik Düzenleme Kurulu (South African National Electricity Regulator)
RMSE	Kök ortalama kare hatası (Root mean squared error)
WASP	Rüzgar Atlas Analizi ve Uygulaması Programı (Wind Atlas Analysis and Application Program)

WECS	Rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (Wind energy cycle system)
WWAE	Dünya Rüzgar Enerji Ajansı (World Wind Eenergy Agency)
WVEC	Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği (World wind energy council)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımı

Enerji, insan hayatında büyük bir öneme sahiptir. Enerjisiz bir yaşam ise günümüz koşullarında neredeyse mümkün değildir. Enerji; nükleer, kimyasal, ısı, mekanik ve ışık enerjisi gibi değişik biçimlerde bulunabilir. Enerjinin en çok kullandığımız türü elektrik enerjisidir. Gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkan gereksinimlerden dolayı gün geçtikçe artan elektrik enerjisi sarfiyatı, insanoğlunu yeni enerji kaynakları aramaya itmiştir. Yenilenebilir, temiz ve ucuz bir enerji olan rüzgar enerjisi de bu yeni enerji kaynaklarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dünya, bilinçsizce kullanılan fosil yakıt enerji kaynakları sebebiyle hızla kirlenmekte ve bu durum Dünya üzerindeki yaşamı olumsuz etkilemektedir. Ayrıca yakın gelecekte bu fosil yakıt kaynakları tükenecektir. Bu enerji gereksinimi karşılamak için atılacak en önemli adım; yenilenebilir, temiz enerji kaynaklarına yönelmektir. Son yıllarda tüm Dünya’da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında bir artış gözlenmekte ve dolayısıyla rüzgar potansiyelinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde de rüzgar enerjisi potansiyeli yüksektir. Bu potansiyel, en kısa zamanda gerekli alt yapı oluşturularak kullanılmaya başlanmalıdır.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı; Eskişehir merkezinde ve Eskişehir’e bağlı Çifteler, Mahmudiye, Sivrihisar ilçelerinde bulunan Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünün (DMİ) istasyonlarından alınan 2007–2009 yılları arası üç yıllık saatlik rüzgar ölçüm verileri kullanılarak bu istasyonlar için gerçek ortalama rüzgar hızlarını ve enerji yoğunluklarını hesaplamaktır.

1.3 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi İle İlgili Yapılan Akademik Çalışmalar

Türkiye’de rüzgar enerjisi üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara ait bulgular aşağıda verilmiştir:

1998 yılında Öztopal, Şahin, Akgün, ve Şen’in yapmış olduğu çalışmada; Türkiye’de bulunan 42 rüzgar istasyonunun coğrafik konumları ve deniz seviyesinden yükseklikleri belirlenerek bu istasyonlardaki rüzgar hızlarının ölçümünün yerden 5 m (m) ve 50 m yüksekliğinde ölçülerek, ortalama rüzgar hızları ve bu hızlara karşılık gelen enerji yoğunlukları hesaplanmıştır.

Buna göre 5 m yükseklikte, ortalama en hızlı rüzgarın estiği bölge 6,2 m/s ile Bozcaada’dır. Bu hıza karşılık gelen enerji yoğunluğu ortalama 317 W/m²dir. 5 m’de rüzgarın en yavaş estiği bölge ise 1,2 m/s ile Köyceğiz’dir. Bu hıza karşılık gelen enerji yoğunluğu ortalama 5 W/m²dir. Ayrıca, potansiyel rüzgar enerji bölgelerinin Türkiye’nin Ege Denizi kıyıları boyunca kuzeybatı ve kuzey bölgelerinde olduğu tespit edilmiştir (Öztopal, Şahin, Akgün, Şen, 1998).

Durak ve Şen’in birlikte yaptığı çalışmada; Türkiye’nin 10 yerinde bulunan kurulu rüzgar santrallerinde ne kadarlık güç üretildiğine değinilmiş olup Ege Bölgesi’nde bulunan Akhisar, rüzgar enerji üretimin açısından değerlendirilmiştir. 1997 temmuz ayından 1998 sonuna kadar rüzgar ölçümleri yapılarak birim alana düşen rüzgar gücünün W/m² cinsinden değerleri hesaplanmıştır. Buna göre ortalama en yüksek rüzgar hızı eylül ayında 8,2 m/s olarak tespit edilip bu hızdan 501,15 W/m² güç yoğunluğu hesaplanmıştır. Aynı şekilde ortalama en düşük rüzgar hızı kasım ayında 3,2 m/s olarak tespit edilip bu hızdan 71,98 W/m² güç yoğunluğu hesaplanmıştır. Bölgeye 60 kW gücünde 20 adet rüzgar türbini kurulmuş, yılda 34906- 46117 MWh arası enerji elde edildiği tespit edilmiştir (Durak, Şen, 2002).

Şahin’in yaptığı çalışmada; 1993-1997 yılları arasında Türkiye’deki birbirinden farklı karakteristiğe sahip 68 rüzgar istasyonunda ne kadar 10, 12, 15 ve 20 m/s rüzgar hızını geçen değerler olduğu ölçülmüş, bunların yerleşim yerleri için risk durumları belirlenmiştir. Çalışmaya göre Bozcaada ve Çanakkale’nin bina, köprü ve rüzgar erezyonu açısından yüksek risk altında olmasına karşın rüzgar üretimi için güvenli

olduğu değerlendirilmiştir; ayrıca Giresun, Rize, Bolu, Çankırı, Sivas, Ağrı, Muş, Aydın, Urfa, Hakkari, Adana ve Antakya'nın bina, köprü ve rüzgar erezyonu açısından risk altında olmadığı belirlenmiştir (Şahin, 2003).

Karslı ve Geçit'in yaptığı çalışmada; Nurdağı/Gaziantep'in rüzgar enerji potansiyeli hesaplanmış ve neticede buradaki rüzgar hızının 10 m yükseklikte ortalama 7,3 m/s iken en yüksek 23,3 m/s olduğu tespit edilmiştir. Bölgedeki ortalama güç yoğunluğu 222 W/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç gelecekte buranın, rüzgar enerjisi üretimi için uygun olduğunu ortaya koymuştur (Karslı, Geçit, 2003).

Bilgili, Şahin, Kahraman'ın yaptığı çalışmada; Antakya ve İskenderun bölgelerinde 1997-2001 yılları arasında DMİ'den alınan saatlik rüzgar verileri kullanılarak bu bölgenin rüzgar enerjisi fizibilitesi yapılmıştır. Bu bölgeler için; hakim rüzgar yönleri, ortalama rüzgar hızları, frekans dağılımları ve rüzgar potansiyelleri elde edilmiştir. Antakya'nın bir çok yerinde ve İskenderun'un bazı bölgelerinde yeryüzeyinden 10 m yükseklikte rüzgar hızı 5 m/s'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Buna göre bu bölgeler, rüzgar türbini kurmak için umut vaat etmektedir. Antakya'da deniz seviyesinden 50 m yükseklikte ortalama rüzgar enerjisi yoğunluğu 300 W/m²den büyüktür. Antakya ve İskenderun'un bazı bölgelerinde ortalama enerji yoğunluğu 700 W/m²den büyüktür. Elde edilen değerlerin ışığı altında bu bölgelerin, rüzgardan elektrik enerjisi üretmek için uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Bilgili, Şahin, Kahraman, 2004).

Köse'nin yaptığı çalışmada; Kütahya'nın rüzgar enerji potansiyeli araştırılmıştır. 1 Temmuz 2001 – 28 Şubat 2003 yılları arasında yapılan ölçümler sonucunda ortalama rüzgar hızı 30 m yükseklik için 4,62 m/s hesaplanmış ve enerji yoğunluğu ise 36,62 W/m² olarak elde edilmiştir. Weibull-k parametresi 5,48 m/s, Weibull-c parametresi 1,67 m/s ve Rayleigh parametresi 4,89 m/s olarak hesaplanmıştır. 20 aylık yapılan ölçümlerin ışığı altında Kütahya'da rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin ekonomik olmayacağı, fakat gelişen teknoloji ile rüzgar türbinlerinin maliyetlerinin düşmesi halinde, uzun vadede, ekonomik olacağı uygun olarak değerlendirilmiştir (Köse, 2004).

Hepbaşlı ve Özgener'in yaptığı çalışmada, Ekim 2003 sonu itibariyle ülkemizdeki rüzgar enerjisindeki gelişmeler araştırılmıştır. 2002 yılında Dünya üzerinde rüzgar santrallerinin toplam gücü 32037 MW olduğu görülmüştür. 2002 yılının sonunda rüzgar

gücünün Dünya’da kurulu güce oranı %0,4’e ulaşmıştır.

Ulusal Akademik Bilgi Merkezi verilerine göre rüzgar enerjisi ile ilgili 1991-2002 yılları arasında 103’ü yüksek lisans, 9’u doktora olmak üzere toplam 112 çalışma yapılmıştır. 45 değişik istasyondan veriler toplanıp Türkiye’nin Rüzgar Atlası çıkarılmıştır.

Çalışmanın özeti olarak;

- Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz bölgeleri rüzgar enerjisi üretiminde gelecek vaat etmektedir.
- Türkiye’nin teorik rüzgar gücü 88000 MW’dır.
- 1998-2001 yılları arasında rüzgardan 104 GWh enerji üretilmiştir.
- Enerji Bakanlığı, 2020 yılı sonunda 78 GW kurulu rüzgar gücünü hedeflemektedir (Hepbaşlı, Özgener, 2004).

Akpınar ve Akpınar’ın yaptığı çalışmada, Maden/Elazığ’da rüzgar enerji potansiyeli araştırılmıştır. 1998-2002 yılları arasında saatlik rüzgar verileri analiz edilerek yüzey ve ölçek parametrelerini nümerik değerleri hesaplanmıştır. Yıllık k değeri, 1,51-1,70 arasında değişmekle beraber ortalama 1,60 olarak; c değeri, 5,54-6,12 m/s arasında değişmekle beraber ortalama 5,83 olarak bulunmuştur. Yıllık ortalama rüzgar hızı 5,63 m/s olarak elde edilmiş ve buna karşılık 244,65 W/m² enerji yoğunluğu hesaplanmıştır. Bu bilgiler ışığı altında Maden-Elazığ’ın rüzgardan enerji üretmeye elverişli olduğu değerlendirilmiştir (Akpınar, Akpınar, 2004).

Akpınar ve Akpınar’ın yapmış olduğu diğer bir çalışmada; Elazığ, Agin, Maden, Keban bölgelerindeki rüzgar ve rüzgar türbin karakteristiklerinin mevsimsel değişimi incelenmiştir. 1998-2003 yılları arasında ölçülen ortalama rüzgar hız verileri saatlik zaman serileri formatında istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bütün bölgelerdeki rüzgar enerji karakteristikleri, Weibull ve Rayleigh dağılımları kullanılarak hesaplanmıştır. Enerji hesaplamaları, rüzgar türbin karakteristikleri ve kapasite faktörleri değişik büyüklüklerdeki (300-2300 kW arası) rüzgar türbinleri için saptanmıştır. Bu türbin tipleri 2300, 2000, 1300, 1000, 600, 300 kW’lıktır. Bölgelere

bakıldığında; Maden’de en yüksek rüzgar ortalama hızı yazın 4.13 m/s olup bu mevsimde birim alana düşen güç yoğunluğu 321,30 W/m², en düşük rüzgar ortalama hızı sonbaharda 2,64 m/s olup bu mevsimde birim alana düşen güç yoğunluğu 176,83 W/m²dir. Agin’de en yüksek rüzgar ortalama hızı yazın 2,93 m/s olup bu mevsimde birim alana düşen güç yoğunluğu 144,77 W/m², en düşük rüzgar ortalama hızı kışın 1,82 m/s olup bu mevsimde birim alana düşen güç yoğunluğu 72,60 W/m²dir. Elazığ’da en yüksek rüzgar ortalama hızı yazın 2,17 m/s olup bu mevsimde birim alana düşen güç yoğunluğu 33,41 W/m², en düşük rüzgar ortalama hızı kışın 1,46 m/s olup bu mevsimde birim alana düşen güç yoğunluğu 40,67 W/m²dir. Keban’da en yüksek rüzgar ortalama hızı yazın 1,53 m/s olup bu mevsimde birim alana düşen güç yoğunluğu 19,10 W/m², en düşük rüzgar ortalama hızı baharda 1,10 m/s olup bu mevsimde birim alana düşen güç yoğunluğu 17,01 W/m² olarak hesaplanmıştır. Buna göre bu bölgelerden en yüksek rüzgar enerjisi üretmeye uygun bölge Maden’dir (Akpınar, Akpınar, 2005(a)).

Özerdem ve Türkeli’nin yapmış olduğu çalışmada, İzmir Teknoloji Enstitü Kampüsündeki rüzgar enerjisinin içeriği tahmin edilmeye çalışılmıştır. 16 ay boyunca yeryüzeyinden 10 m ile 30 m yüksekliklerinde rüzgar ölçümleri yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlere göre rüzgar hızının 10 m yükseklikte 7,03 m/s, 30 m yükseklikte ise 8,14 m/s olduğu ölçülmüştür. Mikro yerleştirme için kurulu olan 600-1500 kW’lık rüzgar türbinleri yıllık enerji üretimi hesaplarında kullanılmıştır. Mikro yerleştirme yapılmış 600 ve 1500 kW’lık rüzgar türbinlerinin yıllık enerji üretimi 100,3 ve 122,4 GWh olarak hesaplanmıştır. Buna göre Ege Denizi’ne kıyısı olan Batı Anadolu Bölgesi, gelecek için rüzgar enerjisi üretmek için gelecek vaat etmektedir (Özerdem, Türkeli, 2005).

Şahin, Bilgili ve Akıllı’nın yapmış olduğu çalışmada; 1992-2001 yılları arasında DMİ’den alınan saatlik rüzgar ölçüm verileri kullanılarak Akdeniz Bölgesi’nde bulunan Antakya, İskenderun, Karataş, Yumurtalık, Dörtyol, Samandağ, Adana’nın rüzgar enerji potansiyeli araştırılmıştır. Yapılan hesaplama sonucunda; Antakya, İskenderun, Karataş, Yumurtalık, Dörtyol, Samandağ, Adana’nın rüzgar akıları sırasıyla 29, 37, 25, 15, 2, 71, 3 W/m² olarak hesaplanmıştır. Bu bölgeden toplam üretilebilecek enerji miktarı yaklaşık olarak 32.000.000 kWh/yıl olarak saptanmıştır. Bu veriler ışığı altında rüzgar enerjisi açısından İskenderun, Samandağ ve Antakya’nın en çok umut vadeden bölgeler

olduğu anlaşılmıştır (Şahin, Bilgili, Akıllı, 2005).

Özerdem, Özer ve Tosun'un yapmış olduğu çalışmada; rüzgar tarlalarının teknik ve ekonomik değerlendirilmesi yapılmış, İzmir Teknoloji Enstitüsünün enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki kurulu güç ne kadar artarsa üretim maliyeti de o kadar düşmektedir. Çünkü 11,7 MW kurulu bir güç ile enerji, 2,68 sent/kWh'e mal olmuştur (Özerdem, Özer, Tosun, 2006).

Eskin, Artar ve Tolun'un yapmış olduğu çalışmada, Ege Denizi'nin kuzeyinde bulunan Gökçeada'nın dört değişik yerinde rüzgar verileri toplanmıştır. Veriler üç yıl boyunca Uğurlu ve Çınaraltı'dan, on yıl boyunca Aydıncık ve DMİ istasyonundan toplanmıştır. Rüzgar verileri, yüzeyden yüksekliği 10 ve 30 m'den alınıp 50 m'ye taşınmıştır. 1994-2002 yılları arasında Gökçeada/Aydıncık istasyonundan aylık saatlik rüzgar hız dağılımı alınmıştır. Buna göre ortalama rüzgar hızı 7,8 m/s olarak saptanmıştır. Ortalama rüzgar güç akısı; Aydıncık'ın 868 W/m², Uğurlu'nun 1155 W/m² ve DMİ istasyonunun ise 415 W/m² olarak hesaplanmıştır (Eskin, Artar, Tolun, 2008).

Güler'in yapmış olduğu çalışmada, Türkiye'nin kurulu elektrik güç kapasitesi ile elektrik enerji üretimi araştırılıp Türkiye'nin rüzgar enerjisi durumu değerlendirilmiştir. 2005 yılı sonunda Türkiye'nin kurulu gücü 38820 MW'dır. Türkiye Rüzgar Atlası'na göre 50 m yükseklikte rüzgar hızı; Marmara'da 6,0-7,0 m/s, Batı Karadeniz'de 4,5-5,0 m/s, Kuzeybatı Ege Kıyıları'nda 7,0-8,5 m/s olarak hesaplanmıştır. Türkiye'de 2005 yılı sonunda rüzgar enerjisinin tüm üretilen enerjiye oranı %0,035'tir. Dünya'da kurulu rüzgar gücü ise 58982 MW'dır. 2000-2005 yılları arasında Türkiye'de üretilen enerjideki doğalgazın % 40,8, hidroelektriğin %25,2, linyitin %21,3, fueloilin %6,3, kömürün %5,3 ve diğerlerinin %1,1 payı bulunmaktadır. Türkiye'de 2005 yılında kurulu rüzgar enerjisinin toplam rüzgar enerjisi potansiyeline oranı %0,22'dir. Lisans alma aşamasında olan projeler devreye girdiğinde rüzgar enerjisinin, toplam rüzgar enerjisi potansiyeline oranı %14,27 olacağı saptanmıştır (Güler, 2009).

Uçar ve Figen Balo'nun yaptığı çalışmada, 2000-2006 yılları arasında toplanan rüzgar hız verilerine göre Uludağ/Bursa'nın rüzgar karakteristiği ve rüzgar enerji potansiyeli araştırılmıştır. Rüzgar hız dağılımları eğrisi, Weibull ve Rayleigh olasılık fonksiyonları kullanılarak elde edilmiştir. Ortalama Weibull yüzey parametresi k ve

ölçek parametresi c , 1,78 ve 7,97 m/s olarak hesaplanmıştır. Yıllık ortalama rüzgar hızı 7,08 m/s olarak saptanmıştır. 600, 1000, 1500 ve 2000 kW'lık rüzgar türbinleri kullanılarak teknik ve ekonomiklik değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu türbinler kullanılarak yapılan hesaplamalarda enerji maliyeti 0,255\$/kWh ile 0,306 \$/kWh bulunmuştur (Uçar, Balo, 2009).

Erdoğan'ın yapmış olduğu çalışmada; yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli, doğa dostu ve sürdürülebilir olduğu vurgulanmıştır. Türkiye'nin 2006 yılı içerisinde doğalgazdan ürettiği enerji 72700 GWh olup bu enerjinin tüm üretilen enerjiye oranı %44,74'tür. Bunu sırasıyla 40800 GWh ve %25,11 oranla hidroelektrik enerjisi, 40700 GWh ve %25,05 oranla kömür, 8000 GWh ve %4,92 oranla petrol ve petrol türevleri, 150 GWh ve %0,09 oranla biokütle, 90 GWh ve %0,06 oranla jeotermal ve 60 GWh ve %0,04 oranla rüzgar enerjisi takip etmektedir. Bu enerji tiplerinin maliyetlerine bakıldığında 18,9 sent/KWh ile en pahalıya mal olan enerji hidroelektrik olup en ucuza mal olan enerji ise 5,4 sen/KWh ile doğalgazdır. Rüzgar enerjisinin maliyeti ise 7,8 sent/KWh'dir. Yıllara sari rüzgardan enerji üretimine bakıldığında 1998 yılında 23263 MWh olan üretim, 2007'de 40755 MWh'e yükselmiştir.

Türkiye'nin bölgeleri incelendiğinde rüzgar enerjisi akısı; Marmara Bölgesi'nde 51,9 W/m², Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde 29,3 W/m², Ege Bölgesi'nde 23,5 W/m², Akdeniz Bölgesi'nde 21,4 W/m², Karadeniz Bölgesi'nde 21,3 W/m², Orta Anadolu Bölgesi'nde 20,1 W/m², Doğu Anadolu Bölgesi'nde ise 13,2 W/m² olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak Türkiye'nin ortalama rüzgar enerji akısı 24,0 W/m² olarak saptanmıştır (Erdoğan, 2008).

Uçar ve Balo'nun yapmış olduğu diğer bir çalışmada, 2000-2006 yılları arasında Türkiye'nin 6 yerindeki (Erzurum, Elazığ, Bingöl, Kars, Manisa, Niğde) rüzgar istasyonlarından alınan rüzgar hız verileri ışığı altında rüzgar karakteristikleri analiz edilmiştir. Bu bölgelerde yeryüzeyinden 10 m yükseklikte ortalama rüzgar hızları Erzurum'da 8,7 m/s, Elazığ'da 8,5 m/s, Bingöl'de 5,9 m/s, Kars'da 6,9 m/s, Manisa'da 6,9 m/s, Niğde'de 8,0 m/s olarak saptanmıştır. Ortalama Weibull şekil parametresi k , 1,71-1,96 arasında değişirken; ölçek parametresi c , 6,81-9,71 m/s arasında değişmektedir. 600 kW, 1000 kW, 1500 kW, 2000 kW kapasitesindeki dört değişik

rüzgar türbinin teknik değerlendirmesi yapılmıştır. Türbinlerden yıllık elde edilebilecek enerji miktarı ve türbinlerin kapasite faktörleri hesaplanmıştır. Buna göre en yüksek k ve c değerleri, Elazığ ve Erzurum'dan elde edilmiştir. Yıllık ortalama güç akıları 70 m yükseklikte; Erzurum 65 W/m^2 , Elazığ 62 W/m^2 , Bingöl 42 W/m^2 , Kars 58 W/m^2 , Manisa 60 W/m^2 olarak hesaplanmıştır. Tüm bölgelerden en çok 2000 kW'lık rüzgar türbiniyle enerji elde edildiği saptanmıştır. Sonuçlar, en çok rüzgar enerjisi üretilebilecek bölgelerin Erzurum ve Elazığ olduğunu göstermiştir (Uçar, Balo, 2009).

1.4 Çalışmanın Yöntemi

Rüzgar enerjisi potansiyeli, çeşitli programlar kullanılarak belirlenebildiği gibi istatistik olarak da tespit edilebilmektedir. İstatistiksel olarak yapılan çalışmalarda rüzgar enerjisinin, Weibull dağılımı kullanılarak temsil etmenin çok iyi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Weibull dağılımının parametrelerini belirlemek için çeşitli yöntemler vardır. Bu çalışmada, literatürde en fazla kullanılan moment, grafik ve en yüksek olasılık yöntemi kullanılmış; ayrıca Weibull 7++ programından da yararlanılarak hesaplanan parametrelerin hata analizi yapılarak en uygun parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler, boyutsuz şekil “k” ve ölçek “c (m/s)” dir. Belirlenen bu parametreler; 10, 30, 50 m'ler için hesaplanarak bu yüksekliklerdeki güç yoğunluğu $P_w(\text{W/m}^2)$, en olası hız $v_{enolası}(\text{m/s})$ ve en fazla enerjiyi taşıyan hız $V_{max,E}(\text{m/s})$ değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca beş farklı rüzgar türbininin üçüncü dereceden türbin güç eğrileri bulunarak Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile entegre edilmiş, yıllık her bir bölge ve 50 m yükseklikte üretilebilecek enerjiler hesaplanmıştır.

BÖLÜM 2

RÜZGAR ENERJİSİ

2.1 Rüzgar

Türk Dil Kurumu tarafından yayımlanmış olan Türkçe Sözlük'e göre rüzgar, havanın yer değiştirmesinden oluşan yel olarak tanımlanmaktadır. Rüzgar, güneş enerjisinin yaratmış olduğu dünya yüzeyine yakın ve atmosfer içerisinde havanın doğal hareketleridir. Rüzgar, alçak basınçla yüksek basınç bölgesi arasında yer değiştiren hava akımıdır. İki bölge arasındaki basınç farkı ne kadar büyük olursa hava akım hızı o kadar fazla olur. Rüzgarlar, temel olarak basınç kuvvetlerinin etkisi ile potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün bir sonucudur. Rüzgar sahip olduğu hıza göre; tayfun, fırtına, hortum gibi isimler alır. Rüzgarın yönü, rüzgar gülü; hızı ise anemometre ile ölçülür. Anemometre, pervanenin dönüş hızından rüzgar hızını gösteren basit bir ölçü aletidir. Okyanuslardaki akımların ve dalgalarının meydana gelmesinde rüzgarların büyük rolü vardır. Ayrıca rüzgarlar, karaların şekillerinin değişmesine de sebep olur. Bilhassa çöllerde kimi tepeler, rüzgarlar sebebiyle devamlı değişir. Rüzgar gücünden yeldeğirmeni, yelkenli gemi işletmesinde istifade edilir. Rüzgar, yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına akarken;

- Dünya'nın dönüşü,
- Yüzey sürtünmeleri,
- Yerel ısı yayılması,
- Rüzgar önünde başka atmosferik hadiselerin oluşu,
- Toprağın topoğrafik yapısı sebebiyle şekillenir.

Rüzgar, alçak (siklon) ve yüksek (antisiklon) alanlarda farklı özellikler taşır. Siklon içerisinde;

- Basınç radyal olarak içe doğru,

- Santrifüj kuvvetler dışa doğru,
- Coriolis kuvvet dışa doğru etki eder.

Antisiklon içerisinde ise;

- Basınç değişmesi radyal olarak dışarıya doğru,
- Santrifüj kuvvet dışarıya doğru,
- Coriolis kuvvet içe doğru etki eder.

Bütün bunların etkisi sonucunda rüzgar, eşit basınç noktalarında yoluna devam eder. Bu hatların bir harita üzerinde çizilmesiyle meteoroloji haritaları elde edilir. Yüzey sürtünmeleri rüzgarın yönünü alçak basınç yönüne doğru çevirir. Denizlerde bu açı 20°, karalarda ise 30° ile 45° arasında değişir.

Atmosferin alt tabakalarında meydana gelen rüzgarlar, yerin ısı ve mekanik özelliklerinden dolayı türbülans meydana getirir. Türbülans meydana getirmeden, basınç alanları arasında dolaşan rüzgarlara “Meyilli Rüzgarlar” denir. Eğer rüzgar, hafif meyilli karadan denize doğru eserse logaritmik olarak alçalan bir spiral hat çizerek ilerler. Kuzey Yarım Küre’de bu spiralın dönüş yönü saat ibresinin dönüş yönüdür. Atmosferin üst tabakalarında rüzgar hızı saatte 400 km.'ye kadar çıkabilir (www.wikipedia.org).

2.2 Rüzgar Çeşitleri ve Oluşumu

Rüzgar için çeşitli kriterlere göre farklı sınıflandırmalar yapılabilir. Rüzgar hızının baz alındığı Beaufort Cetveli’ne göre kara ve deniz kriterleri ele alındığında Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’deki sınıflandırmalar ortaya çıkar.

Çizelge 2.1. Beaufort cetveli kara kriterleri (Karadeniz, 2002).

KARA KRİTERLERİ			
Beaufort Sayısı	Rüzgar Hızı (m/s)	Tanımı	Gözlenebilir Etkiler
0	0,0-0,4	Durgun	Duman dikey olarak yükselir.
1	0,4-1,8	Hafif	Duman yatay açılı yapacak şekilde yükselir.
2	1,8-3,6	Hafif	Rüzgar deride hissedilir, yapraklar hafif hareketlidir.
3	3,6-5,8	Hafif	Yapraklar hareketlidir, bayrak hafif dalgalanır.
4	5,8-8,5	Orta	Küçük dangler hareketlidir, toz kalkar, kitap sayfaları uçuşur.
5	8,5-11	Orta	Küçük ağaçlar hareketlidir, rüzgar hissedilir.
6	11-14	Güçlü	Büyük dallar hareketlidir, telefon telleri öter.
7	14-17	Güçlü	Bütün ağaçlar hareketlidir.
8	17-21	Fırtına	İnce dallar kırılır, yürümek güçleşir.
9	21-25	Fırtına	Küçük çaplı hasar oluşur.
10	25-29	Güçlü Fırtına	Ağaçlar köklerinden sökülür, yapılarda orta dereceli hasar oluşur .
11	29-34	Güçlü Fırtına	Geniş çaplı hasar oluşur.
12	34<	Kasırğa	Sadece tropikal iklimlerde meydana gelir, felakettir.

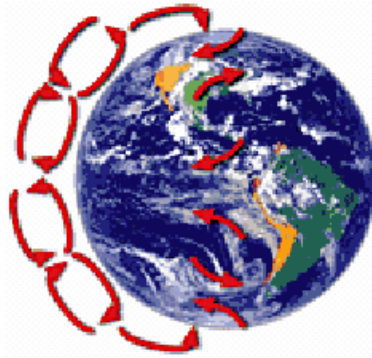
Çizelge 2.2. Beaufort cetveli deniz kriterleri (Ertürk, 1985).

DENİZ KRİTERLERİ			
Beaufort Sayısı	Rüzgar Hızı	Tanımı	Gözlenebilir Etkiler
0	0,0-0,4	Durgun	Deniz ayna gibidir.
1	0,4-1,8	Hafif	Dalga sırtı oluşmaksızın, kırıışıkların görülmesi ile şıprtılar oluşur.
2	1,8-3,6	Hafif	Küçük dalgalacıklar, kısa fakat belirgin kırıışıklar, dalga sırtları cam görünümü alır ve bozulmazlar.
3	3,6-5,8	Hafif	Büyük dalgalar, dalga sırtları bozulmaya başlar, cam görünümlü köpük oluşur, dalga sırtları köpürerek saçılabilir.
4	5,8-8,5	Orta	Küçük dalgalar daha çok uzar, oldukça sık beyaz köpükler oluşur.
5	8,5-11	Orta	Daha belirgin uzun ve orta büyüklükteki dalgalar, birçok beyaz köpük oluşur ve su saçılır.
6	11-14	Güçlü	Büyük dalgalar oluşmaya başlar, beyaz köpükleri ile dalga sırtları her yerde daha yoğun olarak görülür.
7	14-17	Güçlü	Su yukarı doğru sıçrar, rüzgarın yönü boyunca dalgaların kırılmasından oluşan beyaz köpükler, şeritler halinde patlak vermeye başlar.
8	17-21	Fırtına	Daha uzun boylu, oldukça yüksek dalgalar, dalgalar sırtlarının kenarları köpüklenerek şekilde kırılır, köpük rüzgarın yönü boyunca belirgin bir şekilde sürüklenir.
9	21-25	Fırtına	Yüksek dalgalar, rüzgarın yönü boyunca, yoğun köpük şekilleri, dalga sırtları dönmeye başlar, suyun saçılması görüşü etkileyebilir.
10	25-29	Güçlü Fırtına	Çok yüksek dalgalar, görüs nerdeyse sıfırdır.
11-12	29 <	Kasırga	Sadece tropikal iklimlerde meydana gelir, felakettir.

Ayrıca rüzgarlar oluşum bölgelerine göre; küresel rüzgarlar, yüzey rüzgarları ve yerel rüzgarlar olarak incelenebilir.

2.2.1 Küresel Rüzgarlar

Ekvator ve çevresi (0 derece enlemi), Güneş ışınlarının yeryüzüne geliş açılarındaki farklılıklardan dolayı Güneş tarafından diğer enlemlere göre daha çok ısıtılır. Böylelikle farklı ısınma ve farklı sıcaklık derecesi nedeniyle hava dolaşimleri başlamış olur. Sıcak hava, soğuk havadan daha hafif olduğundan ısınma sonucunda sıcak hava yukarıya doğru yükselir. Bu yükselme, yaklaşık olarak 10 m'ye kadar sürer. Yükselen hava, bu yükseklikte kuzeye ve güneye doğru ayrılır. Eğer Yerküre dönmemiş olsaydı yükselen hava, basit olarak kuzey ve güney kutuplara doğru gidecek, kutuplar da aşağılara çökecek ve yeniden Ekvator'a doğru hareket ederek sürekli çevrimine devam edecekti.



Şekil 2.1. Coriolis eğme kuvvetlerinin troposfer etkisi (Uçar, 2007).

Hava kütleleri Ekvator'da ısınarak yukarıya (atmosferin daha üst katmanlarına) doğru hareket eder. Belli bir yükseklikten sonra kuzeye ve güneye doğru hareketlerine devam eder. Her iki kürenin 30° enleminde “Coriolis Kuvveti” hava kütlelerinin daha yüksek enlemlere hareketini önleyerek kuzeye ve güneye doğru sapmasına neden olur. Hareket halindeki hava kütlesi, Dünya'nın dönüşünden dolayı Kuzey Yarım Küre'de

sağa, Güney Yarım Küre’de ise sola sapar. Sapmaya neden olan kuvvete “Coriolis Kuvveti” denir. Bu şekilde oluşan rüzgara da “Jeostrofik Rüzgar” denir.



Şekil 2.2. Coriolis eğme kuvvetlerinin troposfer etkisi (Uçar, 2007).

Aslında jeostrofik rüzgar, basınç gradyanı ve coriolis kuvvet arasındaki dengeden oluşan, yeryüzeyi ile etkileşmeyen kuramsal bir rüzgardır. Bu rüzgar izobarlara (eş basınç eğrileri) paraleldir. Gerçekte coriolis kuvvet, bir kuvvet değildir; yalnızca Dünya’nın belli bir yerindeki hava parselinin yatay olarak hareketine bir bakış açısı sağlar. Basınç gradyanları arasındaki akış, asıl rüzgarın hareket kuvvetidir. Hava kütleleri yüksek basınç alanlarından dolayı tekrar aşağıya doğru inmeye başlar. Kutuplarda da havanın daha soğuk olması nedeniyle yüksek basınç alanları oluşur. Coriolis kuvvetinden dolayı baskın rüzgar yönleri enlemlere göre aşağıdaki şekilde oluşur (Uçar, 2007).

Çizelge 2.3. Enlemlere göre hakim rüzgar yönü (Karadeniz, 2002).

Enlem	90-60 ⁰	60-30 ⁰	30-0 ⁰	0-30 ⁰	30-60 ⁰	60-90 ⁰
	Kuzey	Kuzey	Kuzey	Güney	Güney	Güney
Rüzgar Yönü	Kuzey-Doğu	Güney-Batı	Kuzey-Doğu	Güney-Doğu	Kuzey-Batı	Güney-Doğu

2.2.2 Yüzey rüzgarları

Rüzgarlar, 100 m’den düşük yüksekliklerde dünya yüzeyinin coğrafi yapısından dolayı olumsuz şekilde etkilenir. Çünkü yüzey pürüzlülüğü ve engeller, rüzgarları

yavaşlatıp onların yönlerinde değişmelere neden olur. Rüzgar türbinleri genelde 100 m'den daha az yükseklikte olduğundan, rüzgar enerjisi söz konusu olduğunda önemli olan rüzgar çeşidi “Yüzey Rüzgarları”dır (Şen, 2003).

2.2.3 Yerel rüzgarlar

Hakim rüzgar yönlerini küresel rüzgarlar belirlese de yerel iklim koşulları hakim rüzgar yönlerini etkiler. Yerel rüzgarları; deniz rüzgarları ve dağ rüzgarları olmak üzere iki başlık altında inceleyebiliriz.

2.2.3.1 Deniz rüzgarları

Karalar, denizlere göre daha çabuk ısınır ve soğur. Bu sebeple gündüzleri karadan yükselen sıcak hava, yüzeyde bir alçak basınç bölgesi oluşturur. Böylece deniz üzerindeki nispeten soğuk hava, karaya doğru yol alır. Bu şekilde oluşan rüzgarlara “Deniz Rüzgarları” denir. Akşamüzeri deniz ve kara sıcaklıkları arasındaki fark azalır, hava durgunlaşır. Gece ise karalar daha çabuk soğduğundan rüzgar karadan eser. Fakat deniz ve kara arası sıcaklık farkı gece daha az olduğundan rüzgar hızı da gündüze göre daha düşük olur (Şen, 2003).

2.2.3.2 Dağ rüzgarları

Gündüzleri ısınan hava, dağ yamacı boyunca yükselir. Geceleri ise hava zıt yönde hareket eder. Bu şekilde oluşan ve “Dağ Rüzgarları” olarak adlandırılan rüzgarlar çok güçlü olabilirler. Kuzey Yarım Küre için dağların güneye bakan eteklerinde (Güney Yarım Küre’de tam tersi) oluşan vadi rüzgarlar buna bir örnektir. Alpler’deki Foehn, Rocky Dağları’ndaki Chinook ve And Dağları’ndaki Zonda rüzgarlar bu türün en güçlü örneklerindedir (Şen, 2003).

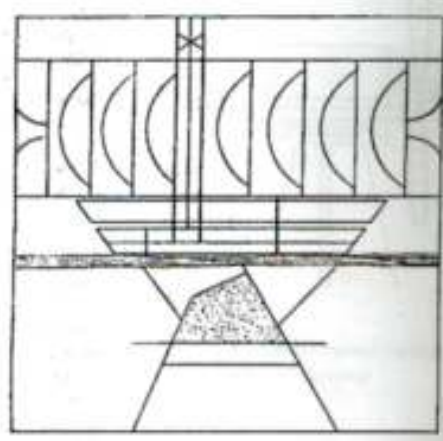
2.3 Rüzgar Enerjisi

Güneş'ten gelen ışınlar Dünya atmosferinde ısınmaya neden olmaktadır. Isınarak yoğunluğu azalan hava yükselmekte, bu havanın yerini soğuk hava doldurmaktadır. Bu hava akımı Dünya'nın kendi etrafında dönme hareketiyle de birleşince büyük oranda kinetik enerji taşıyan hava hareketleri oluşturmaktadır. Bu hava hareketleri de rüzgar enerjisini meydana getirmektedir (www.alternaturk.org).

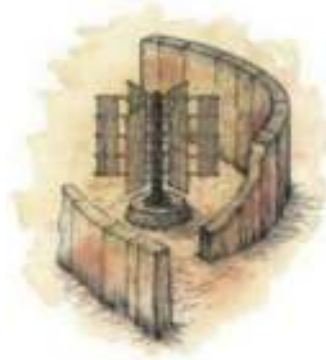
Havanın özgül kütlesi az olduğundan rüzgardan sağlanacak enerjinin miktarı, yine rüzgarın hızına bağlıdır. Rüzgarın hızı, yükseklikle; gücü ise, hızın küpü ile orantılı olarak artar. Sağlayacağı enerji; gücüne ve estiği süreye bağlıdır. Özgül rüzgar gücü, hava debisine dik olarak birim yüzeye düşen güçtür. Topoğrafik koşullara bağlı olarak, rüzgarın yerden 50 m yükseklikteki özgül gücü, rüzgarın hızı 3,5 m/s'den küçük iken 50 W/m²den az, 11,5 m/s'den büyük iken 1800 W/m²den çok olabilir. Dünya yüzeyinin %27'sinde yıllık ortalama rüzgar hızının, yerden 10 m yükseklikte 5,1 m/s'den büyük olduğu saptanmıştır. Bu alan, rüzgar enerjisi bakımından zengin olan bölgelerin toplamıdır (Turhan, 2009).

2.4 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi

Rüzgar enerjisi kullanımı, M.Ö. 2800'lü yıllarda Orta Doğu'da başlamıştır. M.Ö. 17. yüzyılda Babil Kralı Hammurabi Döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgar enerjisinin, aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Yel değirmenleri ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Türklerin ve İranlıların ilk yel değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın, Avrupalılar yel değirmenlerini ilk olarak Haçlı Seferleri sırasında görmüşlerdir. Fransa ve İngiltere'de yel değirmenlerinin kullanılmaya başlaması ise 12. yüzyıla rastlamaktadır (www.odevsitesi.com).



Şekil 2.3. Pers Uygarlığında görülen dikey eksen tipli yel değirmeni diyagramı (Yalçın, 1998).



Şekil 2.4. Pers Uygarlığında kullanılan bir başka yel değirmeni (www.newton.mec.edu).

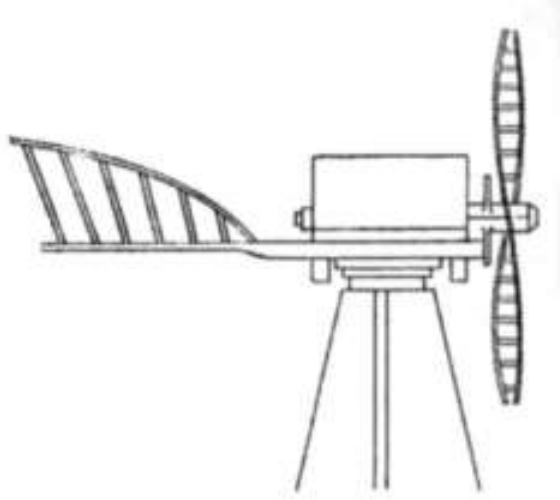
Avrupa, Haçlı Seferleri'nde kazandığı bu teknoloji ile Roma İmparatorluğu'nun kaçırdığı bir serveti yakalamıştır. Roma İmparatorluğu gücünün zirvesinde iken para basmak için gereken altın ve gümüşü Avrupa dışındaki eyaletlerinden sağlamıştır. Bu eyaletleri kaybettikten sonra Avrupa'daki fakir madenlerin işletilmesi denenmiş, fakat bu madenlerin yüzeysel kapasiteleri hızla tükenip derinlere inildikten sonra galerilerden su çıktığından madenler terk edilmiştir. Altın ve gümüş bulunamayınca paralara bakır katılmaya başlanmıştır. Giderek artan parasal ve ekonomik bunalımla birlikte, o dönemin yüksek hızlı enflasyonu Roma İmparatorluğu'nun sonunu getirmiştir. Avrupa'nın Orta Çağ karanlığından sıyrılmasındaki önemli etmenlerden birinin,

Romalıların terk ettikleri madenlerin yeniden işletmeye açılması olduğu söylenir. Avrupalılar bunu, yel değirmenleri yardımıyla galeri diplerindeki suları dışarıya pompalayarak, yani rüzgar enerjisini kullanarak başarmışlardır.



Şekil 2.5. Bir modern rüzgar enerjisi su pompalama sistemi resmi (www.newton.mec.edu).

Tarımsal ürünleri öğütmek, su pompalamak, hızar çalıştırmak gibi amaçlarla geliştirilen yel değirmenleri; Avrupa'da Endüstri Devrimi'ne kadar hızla yayılmıştır. 18. yüzyılın sonunda yalnızca Hollanda'da 10.000 yel değirmeni vardır. Buhar makinesinin yapılması ve odun, kömür gibi yakıtlardan kesintisiz enerji üretimine başlanması ile rüzgar enerjisi önemini yitirmeye başlamıştır. Bununla beraber rüzgar türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler, 1890'ların başlarında Danimarka'da yapılmıştır. Aynı dönemde, bu makinelerin geliştirilmesi için Almanya'da önemli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Rüzgar kuvvet makineleri yerlerini yakıtlı kuvvet makinelerine bırakırken rüzgar enerjisinin kullanımının sürmesi için yeni bir teknoloji de böylelikle başlamıştır. Ancak, 19. yüzyılda geliştirilen ilk rüzgar türbinlerinin verimi düşüktür.



Şekil 2.6. Muhtemelen tipinin ilk örneği olan ve Belidor tarafından tasarlanan pervane tipi rüzgar türbini (Yalçın, 1998).

1970 yılından önce 53 m çapında 1,25 MW'lık Smith Putnam Rüzgar Türbini 1939 yılında ABD, Vermont, Granpa's Knob'da kurulmuştur. Bu tasarım zamanın en iyi mühendisleriyle bilim adamlarını biraraya getirmiştir. Putnam Rüzgar Türbini 1980'li yılların megawattlık bazı makinelerinden daha uzun süre başarı ile çalışmış, teknolojik gelişmede bir dönüm noktası olmuştur.



Şekil 2.7. Putnam rüzgar türbini (www.newton.mec.edu).

Rüzgar türbini geliştirilmesinde bir sonraki dönüm noktası Gedser Rüzgar

Türbini'dir. Marshall Planı çerçevesinde savaş sonrası finansman yardımı ile 1956-57'de Danimarka'nın güneydoğusunda Gedser adasında 200 kW'lık 24 m çapında bir rüzgar türbini kurulmuştur. Bu makine 1958-1967 arasında %20 kapasite ile çalışmıştır.

1960'lı yılların başında Prof. Ulrich Hütter 100 kW'lık 34 m'lik 2 kanatlı, yüksek rüzgar hızlı kararsız pervanesi olan Hütter Allgaier Rüzgar Türbini'ni geliştirmiştir. Hütter'in yüksek hızlı esnek tasarım fikirleri Almanya'da ve diğer ülkelerde rüzgar türbini araştırmalarını derinden etkilemiştir.

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından 1945'te İngiltere'de başlatılan deneysel çalışmalar sonucunda, Enfeld'da 10 kW gücündeki Andreu Makinesi kurulmuştur. Bu rüzgar türbininin rotoru üç kanatlı olup çapı 15 m'dir. 1947 yılında Danimarka'da başlatılan ve modern yaklaşımlar içeren elektrik üretim amaçlı bir başka çalışmanın son ürünü ise, 1959 yılında işletmeye sokulan 200 kW'lık Gedser Türbini olmuştur. Bu makinenin 24 m çaplı rotoru üç kanatlıdır. Aynı dönemde Fransa'da yapılan makinelerden Noeget Le Roi'deki rüzgar türbini 300 kW gücündedir. Bu yıllardaki rüzgar enerjisine ilginin artmasının sebepleri şu şekilde sıralanabilir:

- Hızla artan elektrik enerjisi talebi karşısında ekonomik olarak geliştirilebilen hidroelektrik kaynakların yakıt tedarikinin yetersiz kalması,
- Hidroelektrik santrallerinin ve buhar türbinlerinin oluşturulmasında hem ilk yatırım sırasında hem de enerjinin iletilmesi esnasında hızla artan yüksek maliyetler,
- Savaş sonrasındaki zor ekonomik ve politik koşullar nedeniyle ülkelerin enerji üretiminde ithal yakıtlar yerine kendi öz kaynaklarına yönelmesi,
- Kömür ve petrol türevli kaynakların yakıt olarak kullanımının yüksek hızla artması ve dolayısıyla rezervlerin azalmaya başlaması,
- Savaş sırasındaki araştırma-geliştirme çalışmalarının sonucunda uçak konstrüksiyonlarında uygulanan aerodinamik bilgi birikiminin büyük bir oranda artması ve bu bilginin büyük rüzgar türbinlerinin konstrüksiyonu yolunda kullanılabilir olması,

- Yaygın enerji ağına farklı kaynaklardan enerji ve güç bağlanabilmesinin avantajlarının değerlendirilmesi,
- Rüzgar türbinleri ile ilgili denemelerin yapılması ve bu tip uygulamaların ekonomik bir tesis olarak başarılı olmamasına karşın, rüzgar enerjisinden faydalanarak elektrik üreten büyük tesislerin pratik olarak iyi bir performansla çalışabileceğinin kanıtlanmasıdır (Golding, 1955).

1961 yılında Roma'da Birleşmiş Milletler tarafından düzenlenen Enerjinin Yeni Kaynaklar Konferansı'nda ele alınan üç kaynaktan biri de rüzgar enerjisidir. Böylece çok eskiden bu yana tanınan rüzgar enerjisi teknolojik gelişmelerle ele alınmış, yeni ve yenilenebilir kaynaklar arasına sokulmuştur.

1970'lerde Danimarka'daki Gedser Türbini, gücü 650 kW olan büyük türbinlerle değiştiriliyordu. Bu dönemde rüzgar jeneratörleri üzerine İsviçre, Avusturya ve İtalya'da da teknolojik çalışmalar yapılmıştır. Amerika'da 1970'lerde büyük tip yatay eksenli makineler üzerinde yeniden çalışılırken dikey eksenli Darrieus tipi makineler üzerinde de çalışmalar başlatılmıştır. Ucuz petrol döneminde güncellik kazanamayan rüzgar enerjisi, 1974-1978 yılları arasındaki yapay petrol bunalımlarının ardından gündeme daha çok girmiştir.

Rüzgar enerjisinin gelişimine, 1980'li yıllarda Uluslar Arası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma-geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Artık eski tip rüzgar jeneratörleri yerine modern ve çağdaş rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (WECS) kurulmaktadır. Ayrıca rüzgar türbinleriyle beraber dizel motor ve güneş fotovoltaik jeneratörü içeren rüzgar-dizel-PV hibrid sistemler de geliştirilmiştir. Bir tüketiciyi besleyecek tek makine yerine birden çok türbin içeren rüzgar çiftlikleri ile elektrik şebekeleri için üretim yapılır olmuştur. ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç'in katkıları sonucunda deniz üstünde, kıyıdan uzakta rüzgar santralleri kurulmuştur (www.windenergy.org).

2.5 Dünyanın Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

NASA (National Aeronautics and Space Administration) yaptığı çalışmalarla dünyanın rüzgar enerjisi teknik potansiyelin yaklaşık 26.000 TWh/yıl olarak tahmin etmektedir. Bu değer, dünyanın elektrik enerjisi ihtiyacının çok üstündedir. Bu potansiyelin tamamının kullanımı ekonomik, estetik ve fiziksel kısıtlamalar nedeniyle mümkün değildir. Bulunan değerlerin %1'inin kullanılabilir hale getirildiği düşünülse bile, dünyanın elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %10'u karşılanabilir. Bu şartlar altında bile, dünyadaki rüzgar enerjisi potansiyeli göz ardı edilmeyecek kadar büyüktür (Ural, 1994). Çeşitli ülkelerin tahmini rüzgar enerjisi potansiyelleri çizelge 2.4.'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Çeşitli ülkelerin tahmini rüzgar enerjisi potansiyelleri (Ural, 1994).

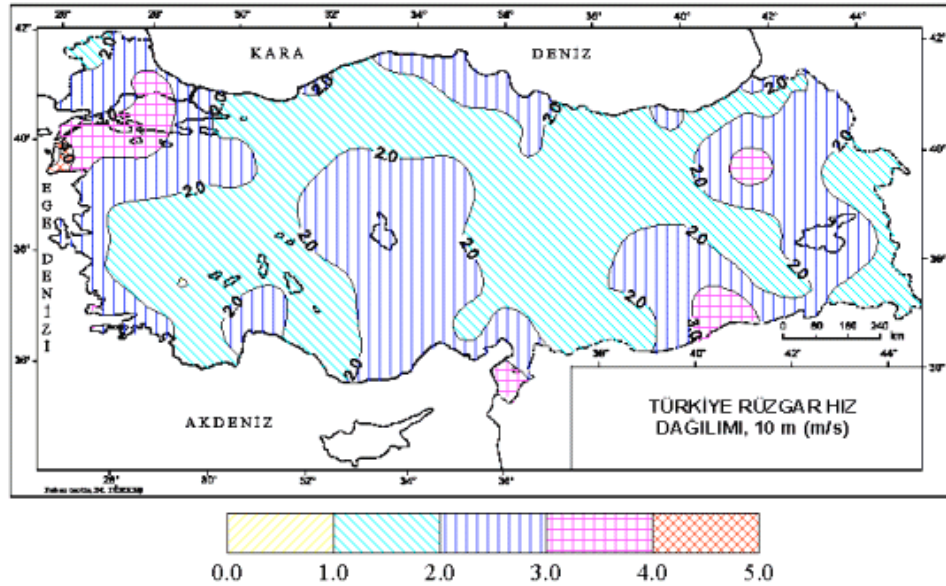
ÜLKE	TAHMİNİ KAYNAK
Finlandiya	7 TWh/yıl
İngiltere	114 TWh/yıl
Almanya	24 TWh/yıl
Yunanistan	44 TWh/yıl
Fransa	85 TWh/yıl
Rusya	2000 TWh/yıl

2.6 Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

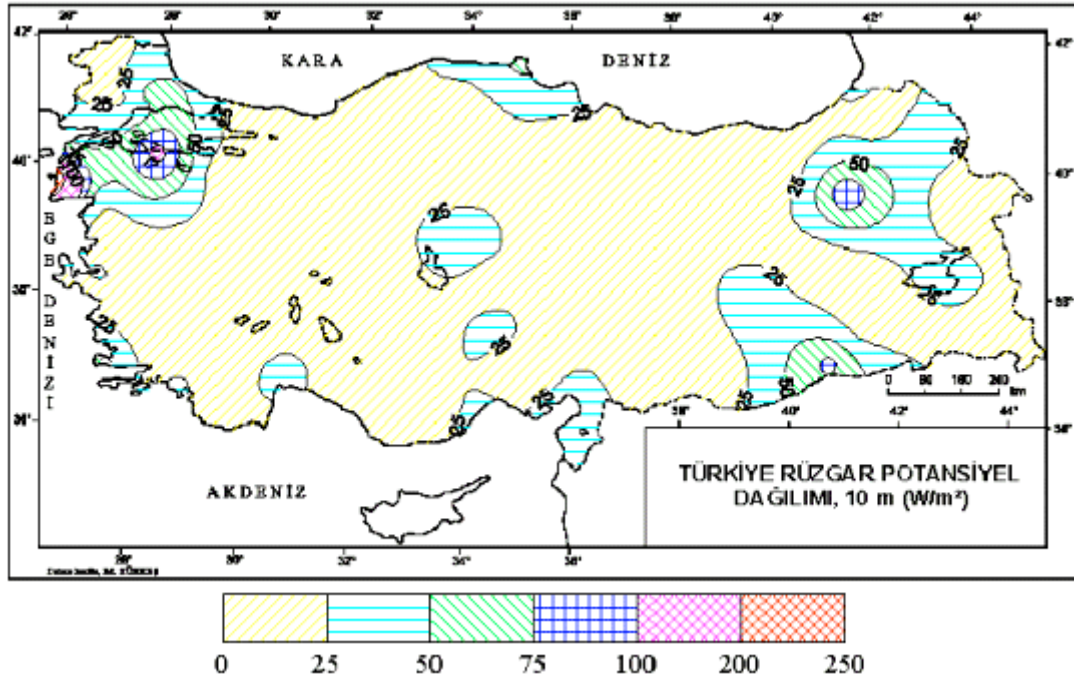
Türkiye, coğrafi konumu ve hüküm süren iklim koşulları itibariyle elektrik enerjisi talebinin tamamını rüzgar enerjisinden karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Şekil 8'de Türkiye'de 10 m yükseklikte rüzgar hız dağılımı ve Şekil 2.9'da 10 m. yükseklikte rüzgar potansiyel dağılımı verilmiştir (www.meteor.gov.tr). Alansal olarak Türkiye'nin %89,3'ünde yıllık ortalama rüzgar gücü yoğunluğunun 40 W/m^2 düzeyinin altında kalırken, %10,7'sinde 40 W/m^2 düzeyinin üzerine çıkmakta, %0,8'inde ise 100 W/m^2 'yi aşmaktadır. Bu değerlerin $294,1 \text{ W/m}^2$ 'ye ulaştığı yerler de mevcuttur. Türkiye'deki potansiyel rüzgar enerji alanları genellikle kuzey ve kuzeybatı bölgeleri ile

Ege Denizi'nin kıyı kesimlerinde uzanmaktadır. Diğer potansiyel alanlar ise, Orta Karadeniz Bölgesi ve Doğu Akdeniz alanları boyunca uzanmaktadır. Bunun yanısıra Güneydoğu Anadolu Bölgesi de rüzgar potansiyeli açısından zengindir (Aras, 2003). Türkiye'nin 50 m yükseklikteki Rüzgar Atlası Şekil 2.10'da verilmiştir (www.meteoroloji.gov.tr).

Türkiye'nin rüzgar enerjisi teknik potansiyeli yaklaşık olarak 88.000 MW olmasına karşın 2009 yılı sonu verilerine göre toplam kurulu gücü 831,55 MW'dır (www.rüzgarenerjisibirligi.org.tr).



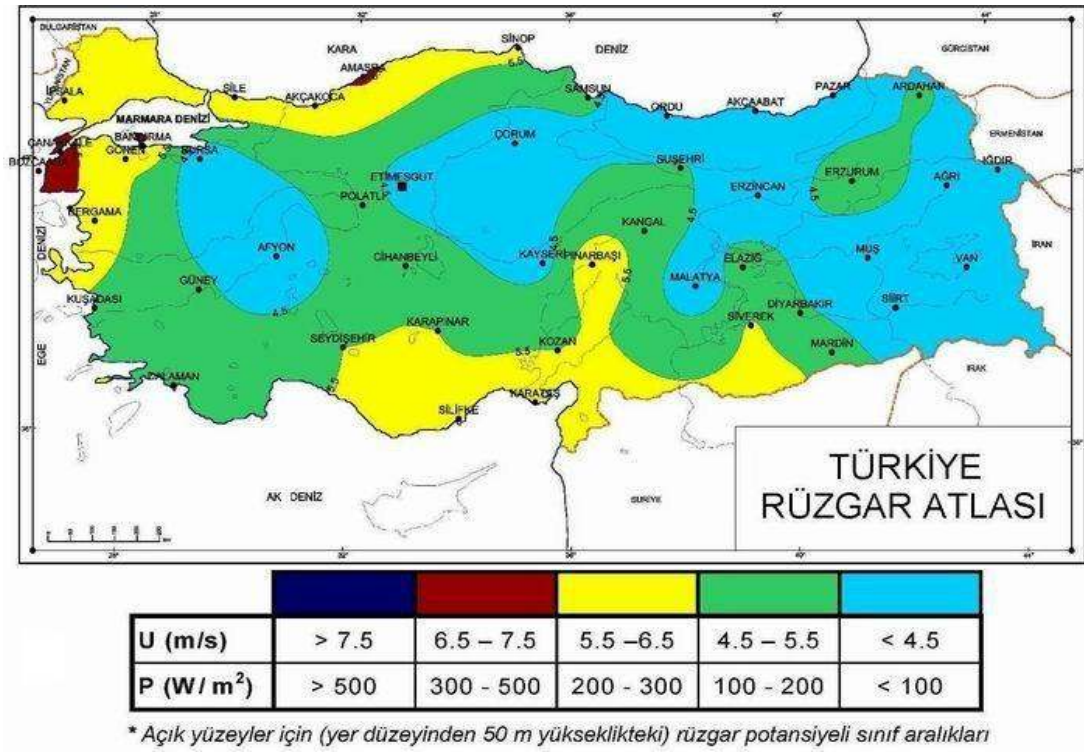
Şekil 2.8. Türkiye'de 10 m. yükseklikte rüzgar hızı dağılımı (www.meteor.gov.tr).



Şekil 2.9. Türkiye’de 10 m. yükseklikte rüzgar potansiyeli dağılımı (www.meteor.gov.tr).

Çizelge 2.5. Bölgelere göre rüzgar enerjisi potansiyeli (Ural, 1994).

Bölge	Yıllık Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m ²)	Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Akdeniz	21,36	2,45
İç Anadolu	20,14	2,46
Ege	23,47	2,65
Karadeniz	21,31	2,38
Doğu Anadolu	13,19	2,12
Güney Doğu Anadolu	29,33	2,69
Marmara	51,91	3,29

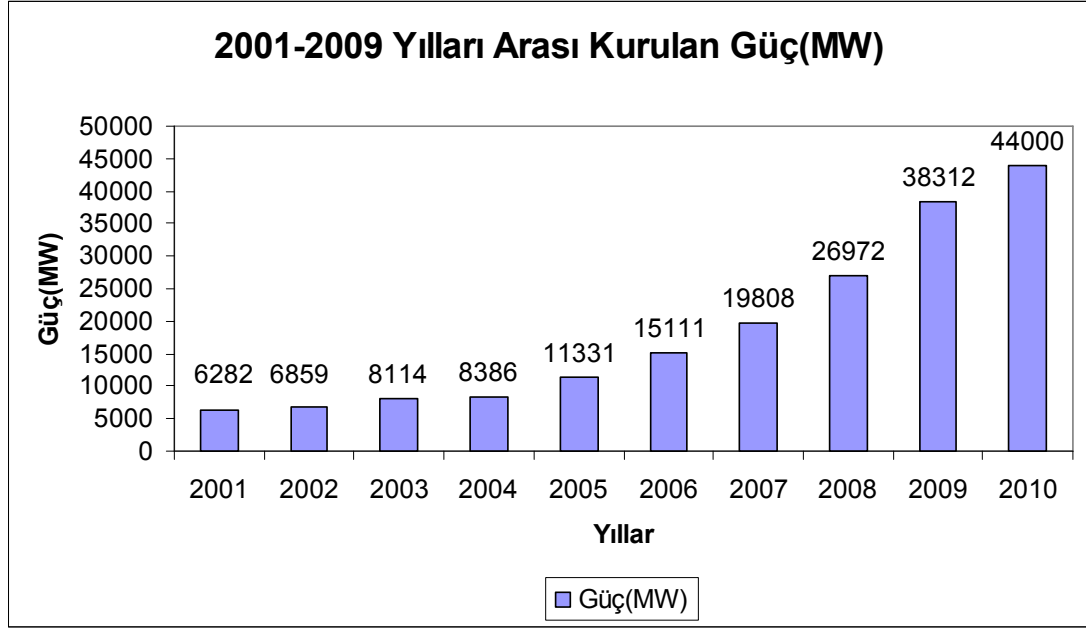


Şekil 2.10. Türkiye Rüzgar Atlası (www.meteoroloji.gov.tr).

Rüzgar enerjisi potansiyel değerleri tahmini bir büyüklüğü ifade etse de bu kapasiteden daha fazla yararlanılması amaçlanmalıdır. Bu hedef de ancak, rüzgar enerjisinin daha kolay kullanılabilir bir enerjiye dönüştürülebilmesi ile mümkündür. Bu dönüşüm, günümüz teknolojisinde gelişmiş rüzgar enerjisi tesislerinde olmaktadır.

2.7 Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı

Rüzgar gücü kapasitesi dünya genelinde 2009’da 159213 MW, 2008’de 120903 MW, 2007’de 93930 MW, 2006’da 74123 MW, 2005’te 59012 MW’a ulaşmıştır. Bu verilere göre küresel rüzgar gücü kapasitesi her üç yılda bir iki katına çıktığı görülmektedir.

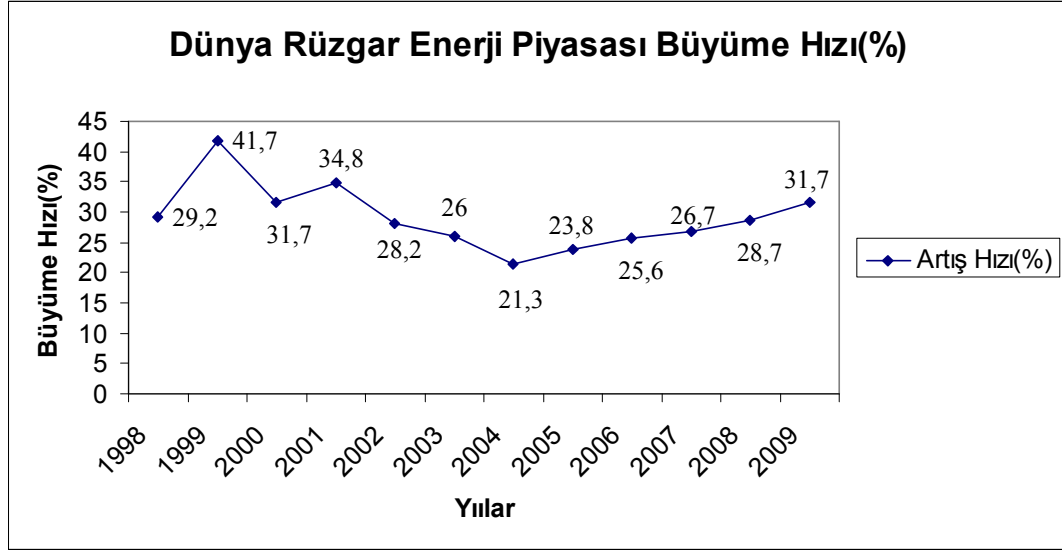


Şekil 2.11. 2001-2009 yılları arası dünyada kurulan rüzgar gücü (WWEC, 2009).

Rüzgar türbini satışları 2009'da %42,1 oranında artarak 38312 MW daha rüzgar kurulu gücü büyümüştür. Bu rakamlar 2008'de 26969 MW, 2007'de 19808 MW, 2006 yılında 15111 MW olarak gerçekleşmiş olup Şekil 2.11'de 2001-2009 yılları arası dünyada kurulan rüzgar gücü verilmiştir (WWEC,2009). 2008 yılında 40 milyar euro olan rüzgar enerjisi sektörü cirosu 2009 yılında 50 milyar euroya ulaşmıştır.

2.7.1 2001 yılından itibaren sektörün gelişimi

Büyüme oranı, bir önceki sene kurulu güç ile yeni kurulan gücün arasındaki orandır. Yıllık üretim oranı 2004 yılından beri büyüyerek 2009'da %31,7'ye çıkmıştır. 2008'de bu oran %29, 2007'de %26,6, 2006'da 25,6 ve 2005'te %23,8 olmuştur. 2009 yılında büyüme oranı Meksika'da %372 iken Türkiye'de %132'dir. Türkiye'yi %113 ile Çin ve %104 ile Fas takip etmiştir. Bu büyüme oranlarının Afrika ve Latin Amerika'da olması umut vericidir. Şekil 2.12'de Dünya Rüzgar Enerjisi Piyasası Büyüme Hızları(%) verilmiştir.

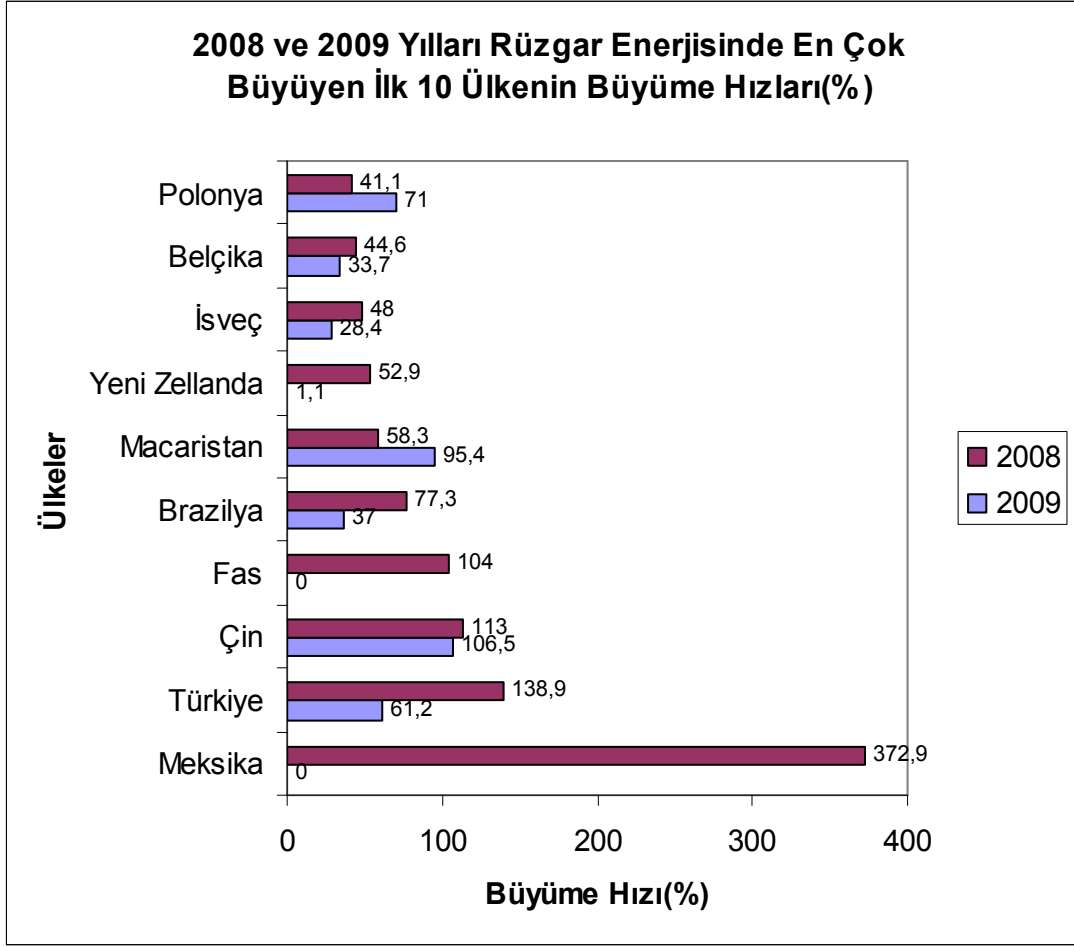


Şekil 2.12. Dünya rüzgar enerjisi piyasası büyüme hızı (WWEC, 2009).

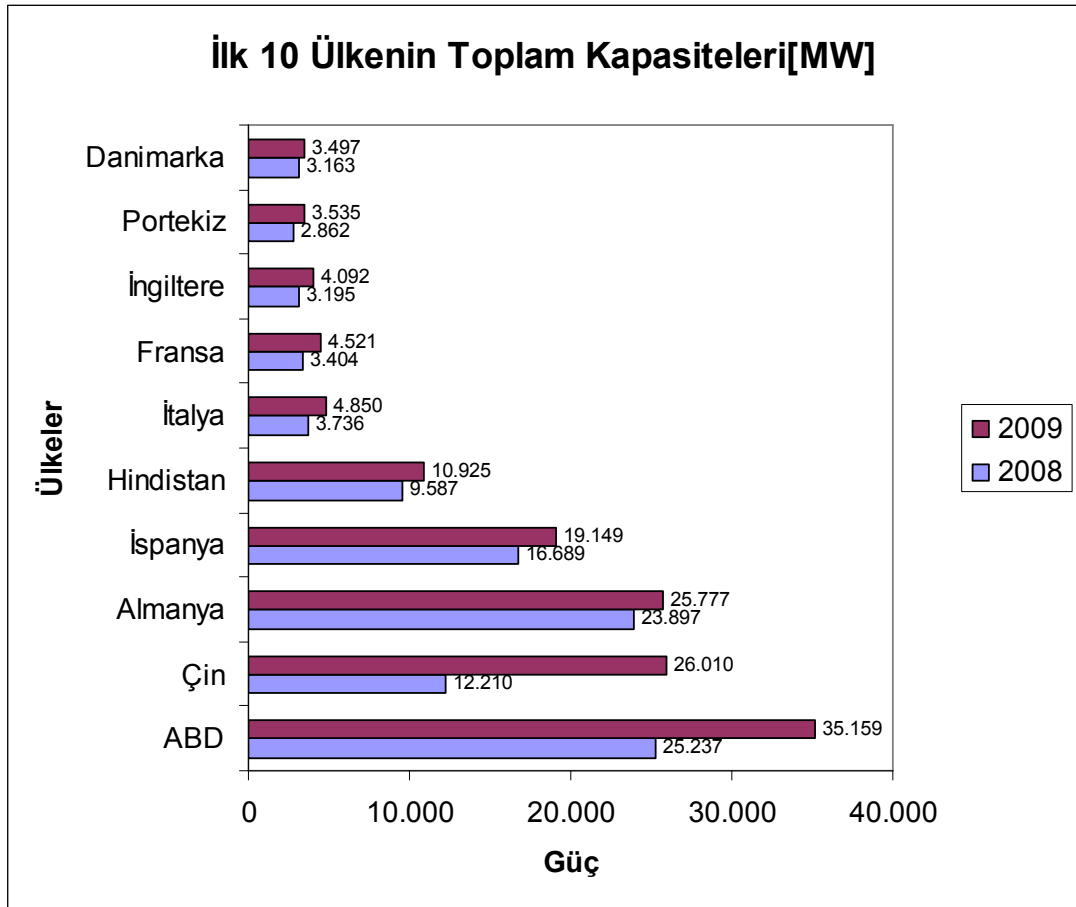
Bu rüzgar piyasalarının arasında Amerika %39,3, Kanada %40,1 ve Fransa %32,8 büyüme oranları ile ortalamanın üstündedir.

2.7.2 Rüzgar enerjisinde başı çeken ülkeler

2009 yılında 82 ülke rüzgar enerjisi kullanmış, bunların 49'unun kurulu gücünde artış olmuştur. Çin ve Amerika'daki kurulu güç toplamda, dünyanın %61,9'unu oluşturmuş, 2008 yılında bu oran %53,7 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 2.13'te 2008 ve 2009 yılları rüzgar enerjisinde en çok büyüyen ilk on ülkenin büyüme hızları (%) verilmiştir. Kurulu gücü en büyük olan ilk on ülke ise Şekil 2.14'te belirtilmiştir.



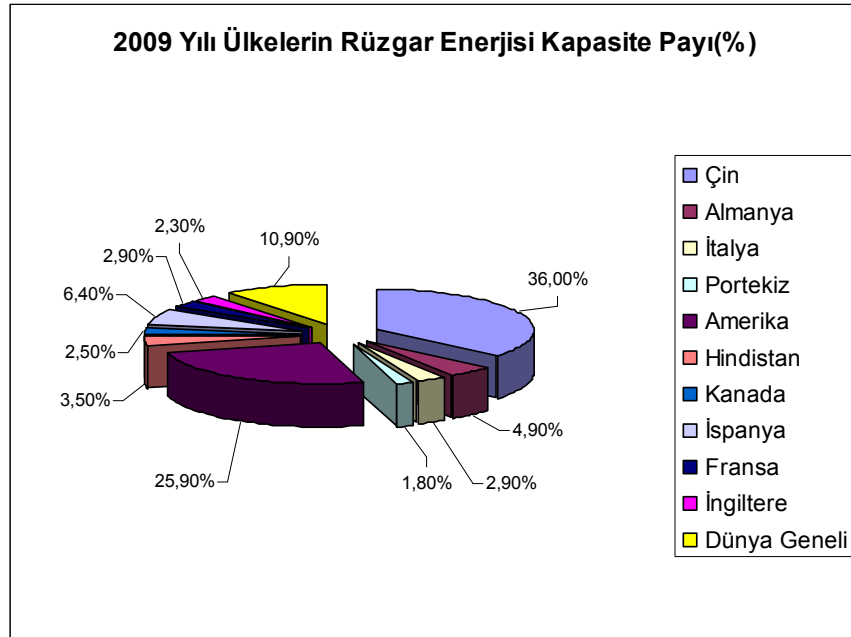
Şekil 2.13. 2008 ve 2009 yılları rüzgar enerjisinde en çok büyüyen ilk 10 ülkenin büyüme hızları (%) (WVEC, 2009).



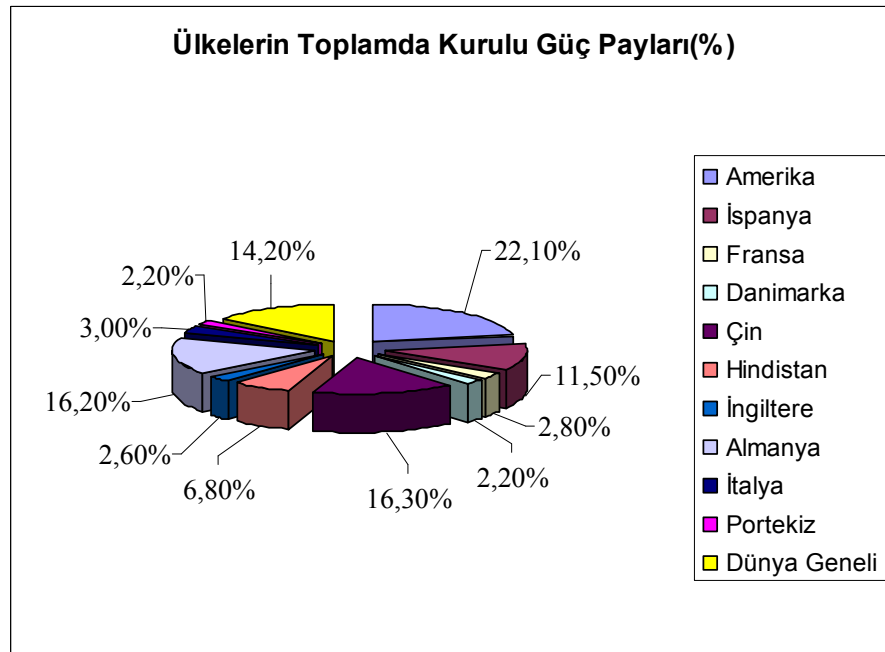
Şekil 2.14. İlk 10 ülkenin toplam kapasiteleri (WWEC, 2009).

ABD ve Çin, küresel rüzgar gücü kapasitesinin %38,4'ünü oluşturmaktadır. ABD, Çin, Almanya, İspanya ve Hindistan 2008 yılında dünya kurulu rüzgar gücünün %72,4'ünü oluştururken, 2009 yılında bu oran %72,9'a yükselmiştir. Şekil 2.15'te 2009 yılı ülkelerin rüzgar enerjisi kapasite payları(%) verilmiştir.

2009 sonunda 17 ülkenin kurulu gücü 1000 MW'yi aşmıştır. 2008 yılında bu sayı 16, 2007 yılında 13, 2006 yılında 11'dir. Dünya genelinde 35 ülke, 100 MW ve üzeri kurulu güce sahiptir. 2008 yılında 32 ülke ve 2005 yılında ise 24 ülke bu güce ulaşmıştır. Şekil 2.16'da ülkelerin toplamda kurulu güç payları (%) gösterilmiştir.



Şekil 2.15. 2009 yılı ülkelerin rüzgar enerjisi kapasite payları (%) (WWEC, 2009).



Şekil 2.16. Ülkelerin toplamda kurulu güç payları (WWEC, 2009).

2.7.3 Rüzgarın üretilen elektrik gücündeki payı

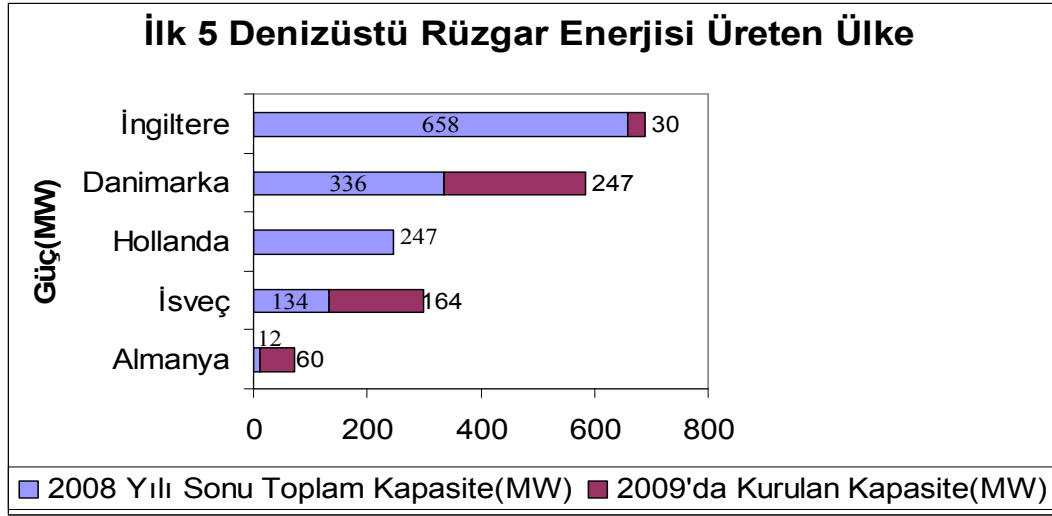
2009 yılında 340 TWh elektrik enerjisi üretilmiş olup bu enerji, küresel elektrik ihtiyacının % 2'sine tekabül etmektedir. Bu enerji miktarı İtalya'nın ihtiyacı olan elektrik enerjisine eşittir.

Bazı ülkelerdeki rüzgar enerjisi, o ülkenin en büyük enerji kaynağı haline gelmiştir. Bu ülkeler ve rüzgar enerjisinin payı aşağıdadır:

- Danimarka: % 20
- Portekiz : % 15
- İspanya : % 14
- Almanya : % 9

2.7.4 Denizüstü Kurulan Rüzgar Türbinleri

2009 yılında denizüstü kurulan rüzgar santral sayısı 12 ülkeye ulaşmıştır. Şekil 2.16'da ilk 5 denizüstü rüzgar enerjisi üreten ülkeler gösterilmektedir. Bu santrallerin 10 ülkesi Avrupa'da, diğerleri Çin ve Japonya'dadır. Toplam kurulu güç 2 GW olup dünya rüzgar günününün %1,2'sini oluşturmaktadır.



Şekil 2.17. İlk 5 denizüstü rüzgar enerjisi üreten ülkeler (WWEC, 2009).

2009 yılında 454 MW'lık rüzgar türbini daha kurulmuştur. Danimarka, İngiltere, Almanya, İsveç ve Çin'de yeni santraller kurulmuştur. Çizelge 2.6'da denizüstü rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları verilmiştir. Danimarka'da, Kuzey Denizi'nde 209 MW'lık denizüstü rüzgar santrali kurulmuştur. Çin'de Şanghai yakınlarında ilk büyük 21 MW'lık denizüstü rüzgar santrali kurulmuştur.

Çizelge 2.6. Denizüstü rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları (WWEC, 2009).

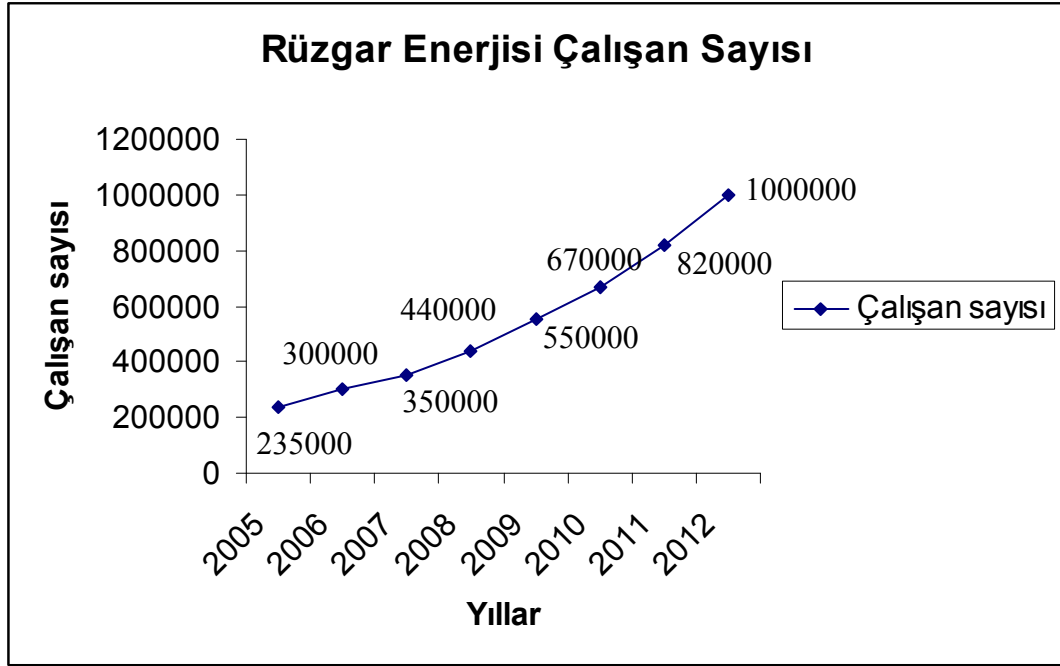
2009 Yılı Pozisyonu	Ülke Adı	2009 Sonu Kapasite(MW)	2009 Yılında Eklenen Kapasite(MW)	2008 Sonu Kapasite(MW)	Büyüme Hızı(%)
1	İngiltere	688	104	574	18,1
2	Danimarka	663,6	237	426,6	55,6
3	Hollanda	247	0	247	0
4	İsveç	164	30	134	22,4

Çizelge 2.6. Denizüstü rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları devamı (WWECC, 2009).

5	Almanya	72	60	12	500
6	Belçika	30	0	30	0
7	Finlandiya	30	0	30	0
8	İrlanda	25	0	25	0
9	Çin	23	21	2	1050
10	İspanya	10	0	10	0
11	Norveç	2,3	2,3	0	/
12	Japonya	1	0	1	0
Toplam		1955,9	454,3	1491,6	30,5

2.7.5 Rüzgar sektörü istihdamı

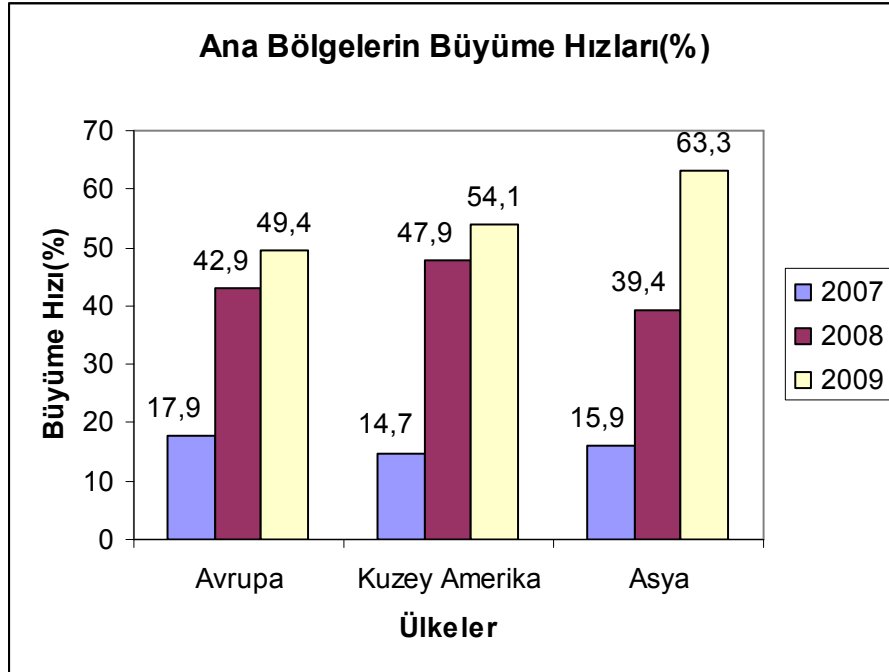
2009 yılı sonunda dünya genelinde rüzgar enerjisi sektöründe çalışan sayısı 550000'e ulaşmıştır. 2005'te bu sektörde çalışan sayısı bu sayının yaklaşık yarısı olan 235000'dir. 2010 yılı sonunda bu sektörde 670000 kişinin çalışacağı tahmin edilmektedir. 2012'de ise 1.000.000 kişilik bir istihdamın oluşacağı beklenmektedir. Yıllara sari rüzgar enerjisi sektöründe çalışan sayısı Şekil 2.18'de gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Rüzgar enerjisi çalışan sayısı (WVEC, 2009).

2.7.6 Bölgesel dağılım

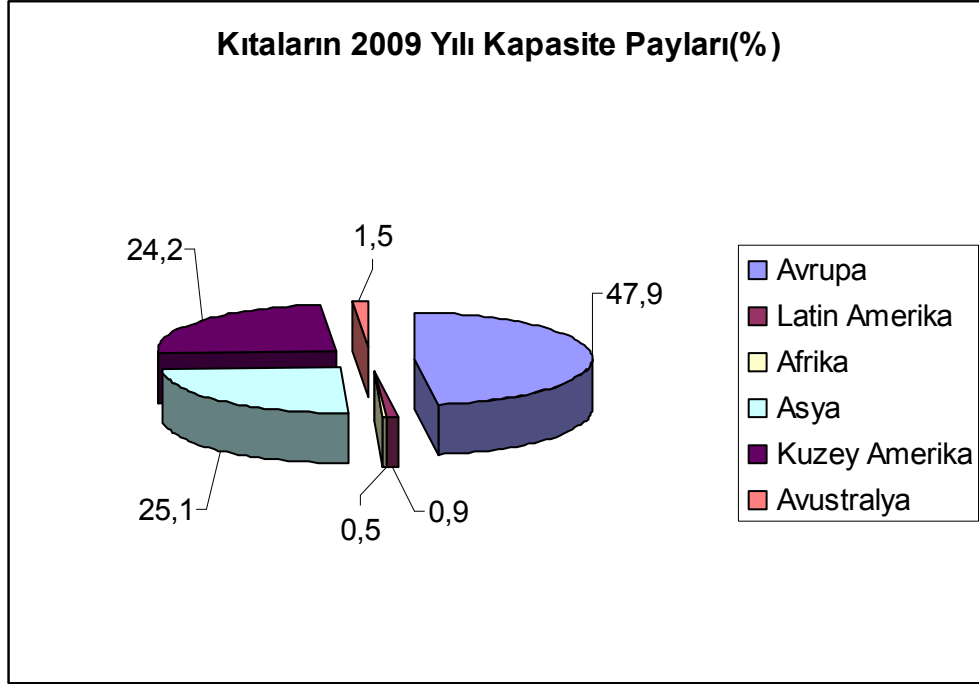
2009 yılında rüzgar enerjisi sektöründe en büyük ilerleme Asya'da olmuştur. Onu Kuzey Amerika ve Avrupa takip etmektedir. Şekil 2.19'da 2007, 2008 ve 2009 yılları ana bölgelerin büyüme hızları (%) gösterilmektedir.



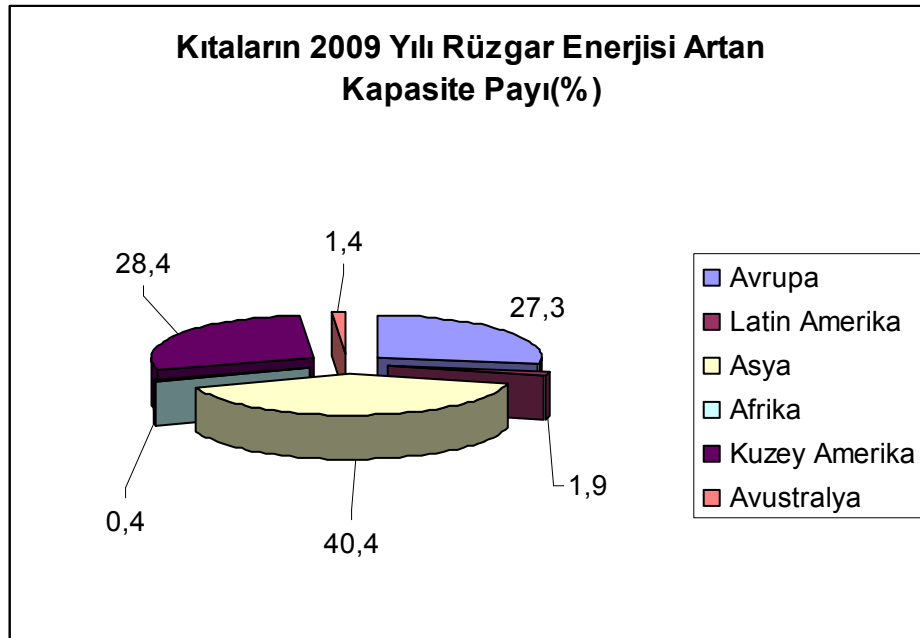
Şekil 2.19. Ana bölgeleri büyüme hızları (WWEC, 2009).

İlk defa Avrupa, 2009'da, tüm dünya kapasitesinin yarısının altına düşmüştür. Avrupa'nın rüzgar enerjisi payı 2006'da %65,5, 2007'de %61, 2008'de %54,6 ve 2009'da %47,9 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 2.20'de kıtaların 2009 yılı kapasite payları (%) gösterilmektedir.

2004'te Avrupa dünya rüzgar türbin pazarının %70,7'sine sahiptir. Fakat 2009 itibarıyla bu oran %27,3'e gerilemiştir. Asya % 40,4 payla bu pazarın lideridir. Şekil 2.21'de kıtaların 2009 yılı rüzgar enerjisi artan kapasite payları verilmiştir.



Şekil 2.20. Kıtaların 2009 Yılı Kapasite Payları(WWEC, 2009).

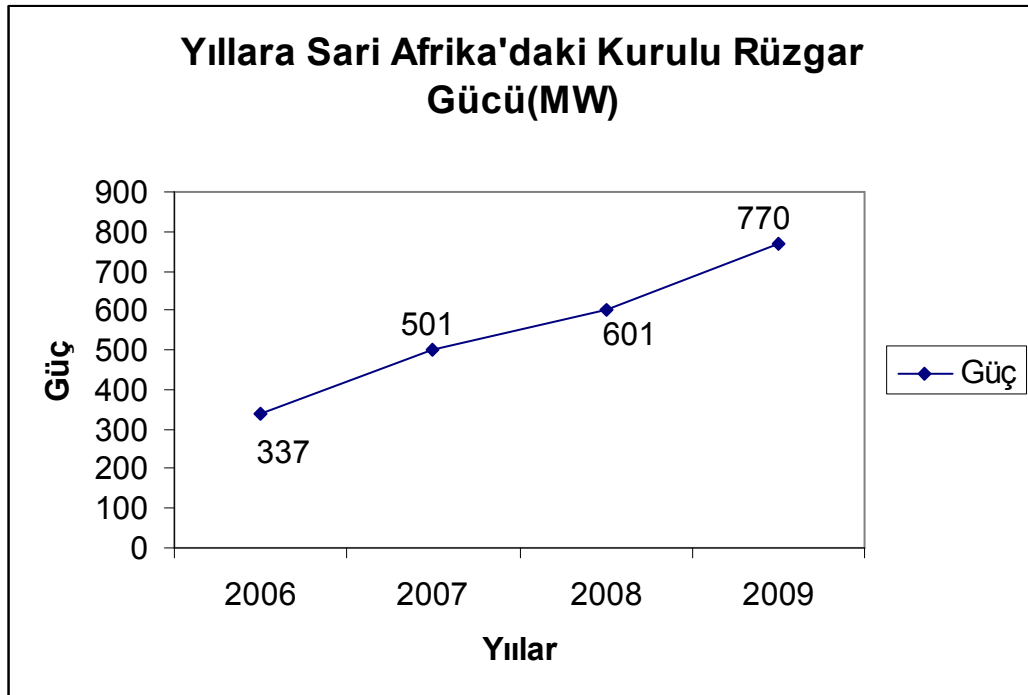


Şekil 2.21. Kıtaların 2009 yılı rüzgar enerjisi artan kapasite payları (%) (WWEC, 2009).

2.7.7 Afrika

Afrika'nın tümünde 2009 yılı itibariyle 770 MW (dünya kurulu gücünün %0,5'i) kurulu güç mevcuttur. 169 MW Mısır ve Fas'a kurulmuştur. Afrika'nın büyüme hızı; %31,6 olan küresel büyüme oranı ortalamasının altında, %28 olarak gerçekleşmiştir. Buna rağmen bir çok Afrika ülkesinde rüzgar enerjisi potansiyeline önem verilmiştir. Bununla ilgili Güney Afrika Cumhuriyeti Ulusal Elektrik Düzenleme Kurulu(NERSA) ilk atağını yaparak vergi düzenlemesine gitmiştir. Bu düzenlemelerle Güney Afrika bu bölgede başı çekerek diğer ülkelere liderlik edecektir.

Mısır ve Fas'ta yeni rüzgar projeleri ortaya konmuştur. Bununla birlikte Etopya, Kenya, Namibiya, Tunus'ta buna benzer projeler gündemdedir. Özellikle Mısır'da rüzgar türbini üretim ile ilgili gelecek vadeden çalışmalar vardır. Şekil 2.22'de yıllara sari Afrika'daki kurulu rüzgar gücü gösterilmektedir.



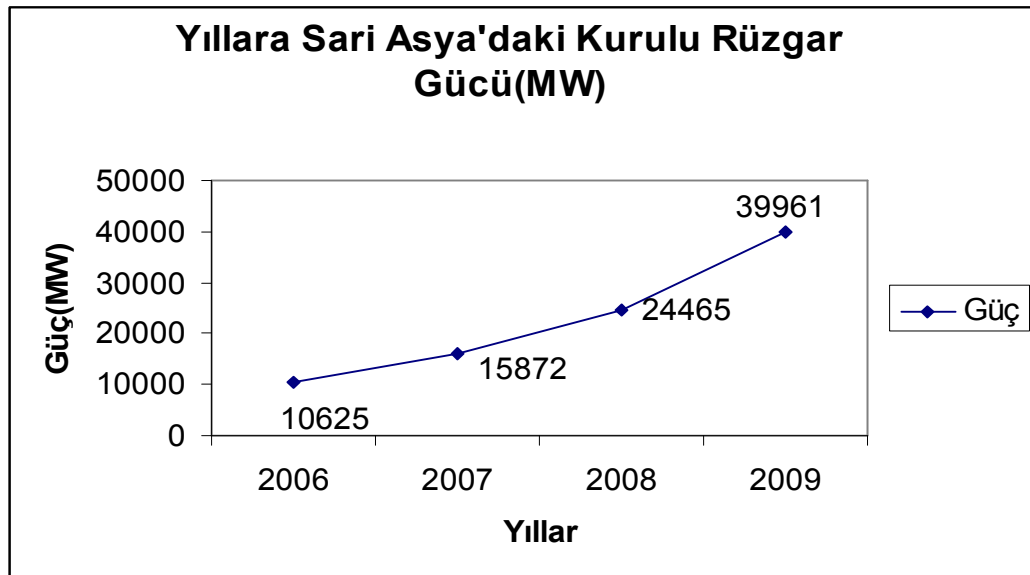
Şekil 2.22. Yıllara sari Afrika'daki kurulu rüzgar gücü (WVEC, 2009).

2.7.8 Asya

Asya 2009 yılında, rüzgar enerjisi sektöründe dünyanın lokomotifi konumuna Çin ve Hindistan sayesinde gelmiştir. Asya 40 GW kurulu rüzgar gücü kapasitesiyle dünya kurulu rüzgar gücü kapasitesinin %25,1'ini oluşturmaktadır. 2009 yılında 15,5 GW; %63,3 büyüme oranıyla kıtalar arasında ikinci büyüme hızına sahiptir.

Çin dört yıl boyunca 26 GW büyümeyle kurulu rüzgar gücünü iki katına çıkartmıştır. Çinli rüzgar türbini üreticileri ilk defa dünya genelinde rüzgar türbini pazar payında ilk beşe girmişlerdir. Bu yıl Çin rüzgar türbini ihracatının artacağı değerlendirilmektedir.

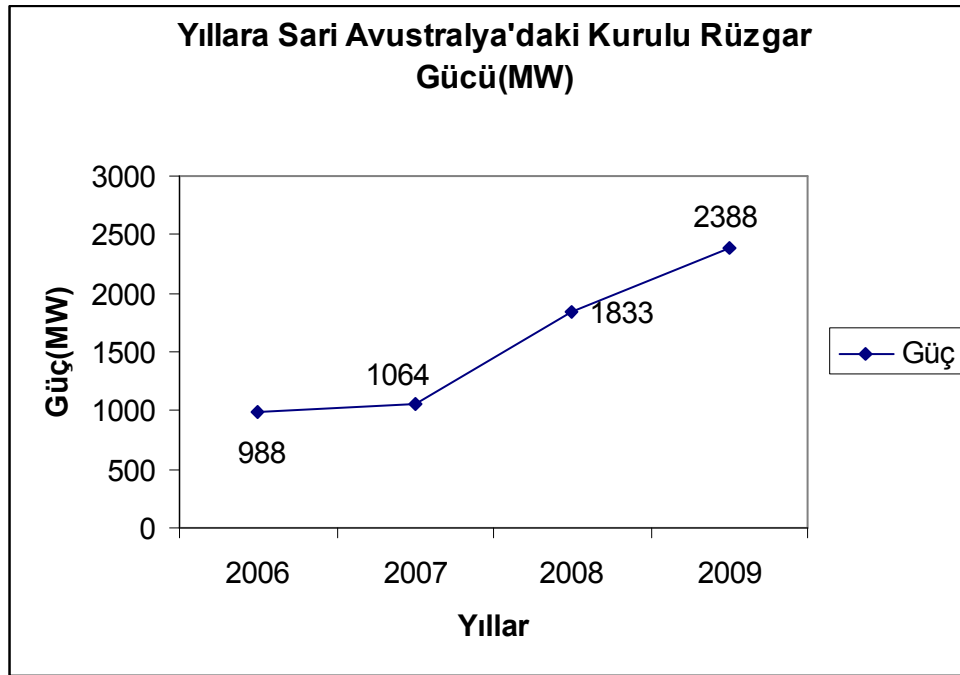
İkinci en büyük Asya piyasası Hindistan olarak devam etmektedir. Hindistan %14 büyüme oranıyla 11 GW kurulu güce ulaşmıştır. Üçüncü en büyük Asya piyasası Japonya olup 2 GW kurulu güce sahiptir. Tayvan 436 MW ve Kuzey Kore 364 MW kurulu güce ulaşmıştır. Potansiyel olarak İran, Pakistan, Filipinler, Vietnam, Ürdün ve Moğolistan umut verici bir şekilde pazar olma yolunda ilerlemektedirler. Şekil 2.23'te yıllara sari Asya'daki kurulu rüzgar gücü verilmiştir.



Şekil 2.23. Yıllara sari Asya'daki kurulu rüzgar gücü (WWEC, 2009).

2.7.9 Avustralya (Okyanusya)

Avustralya'da 2009 yılında 555 MW bir büyüme ile 2388 MW güce sahip olmuştur. Büyüme oranı %30,3 ile dünya ortalamasının altındadır. Özellikle Yeni Zelanda'da 511 MW kapasiteyle %50,8 oranında büyüme gerçekleşmiştir. Avustralya'da ise 1877 MW kapasiteyle %25,6 oranında büyüme olmuştur. Avustralya'nın 2020 yılı hedefi 45000 GWh olarak belirlenmiştir. Şekil 2.24'te yıllara sari Avustralya'daki kurulu rüzgar gücü gösterilmiştir.

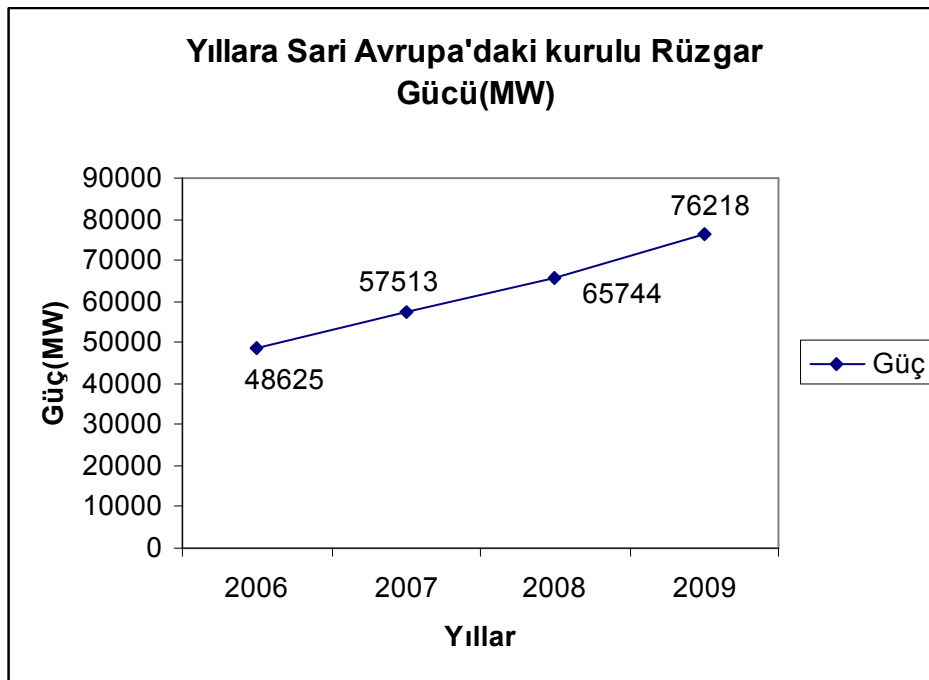


Şekil 2.24. Yıllara sari Avustralya'daki kurulu rüzgar gücü (WVEC, 2009).

2.7.10 Avrupa

Avrupa 2009 yılında %47,9 kurulu güç payıyla 10474 MW büyüme gerçekleştirmiştir. 2007 yılında 8607 MW, 2008 yılında 8928 MW büyümüştür. Almanya 2009 yılında 1880 MW büyümeyle 25770 MW kurulu güce ulaşmıştır. İspanya ise 2009 yılında 2460 MW büyümeyle 19149 MW kurulu güce ulaşmıştır. Bu ülkeleri 1114 MW büyüme ve 4850 MW kurulu güçle İtalya, 1117 MW büyüme ve

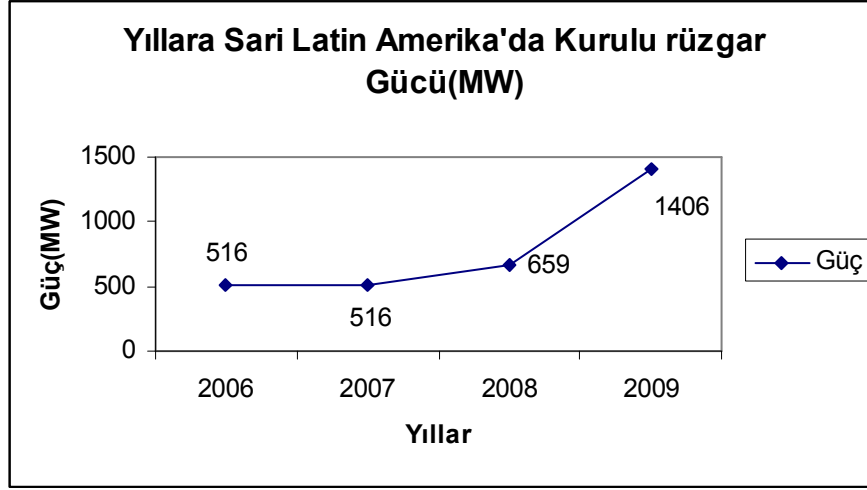
4521 MW kurulu güçle İspanya ve 894 MW büyüme ve 4092 MW kurulu güçle İngiltere takip etmiştir. Şekil 2.25'te yıllara sari Avrupa'daki kurulu rüzgar gücü gösterilmiştir. 142 MW kurulu güçle Estonya %81,8, 91 MW kurulu güçle Letonya %68, 201 MW kurulu güçle Macaristan %58,3 ve 666 MW kurulu güçle Polonya %41,1 oranında en hızlı büyümeleri gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte Avrupa denizüstü santrallerinin kurulu güç olarak %99'una sahiptir.



Şekil 2.25. Yıllara sari Avrupa'daki kurulu rüzgar gücü (WWEC, 2009).

2.7.11 Latin Amerika

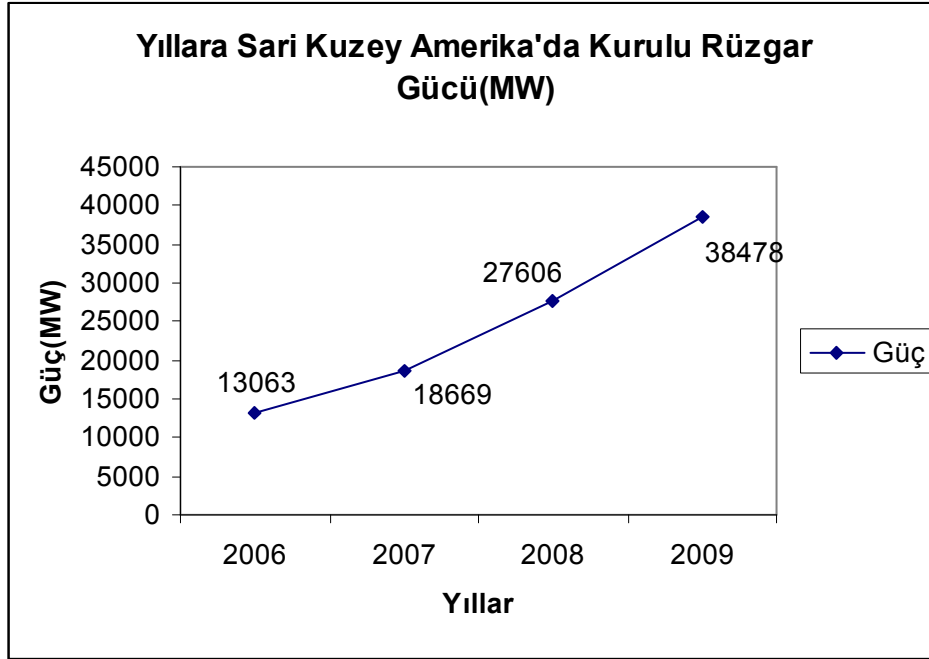
Latin Amerika %113,3 büyüme oranı ve 1406 MW toplam kurulu güçle, dünyanın en fazla rüzgar kurulu gücü büyümesini gerçekleştirmiştir. Yıllarca bu sektördeki durgunluğun ardından 600 MW güç ve %78,5 büyüme hızıyla Brezilya ve 402 MW güç ve %372,9 büyüme hızıyla Meksika, Latin Amerika'da başı çekmiştir. Büyük rüzgar çiftlikleri; Şili, Kostarika ve Jamaika'da kurulmuştur. Şekil 2.26'da yıllara sari Latin Amerika'daki kurulu rüzgar gücü verilmiştir.



Şekil 2.26. Yıllara sari Latin Amerika'daki kurulu rüzgar gücü (WWECC, 2009).

2.7.12 Kuzey Amerika

Kuzey Amerika 2009 yılında dünya ortalamasının üzerinde %39,4 büyüme hızıyla 38478 MW kurulu güce ulaşmıştır. Sadece Çin'in geçebildiği 9922 MW büyümeyle Amerika yeni bir rekor kırmış ve halen 35159 MW kurulu güçle dünyanın birinci sırasında yer almaktadır. Kanada 950 MW büyümeyle toplamda 3319 MW kapasiteye ulaşmıştır. Şekil 2.27'de yıllara sari Kuzey Amerika'daki kurulu rüzgar gücü gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Yıllara sari Kuzey Amerika'daki kurulu rüzgar gücü (WWEC, 2009).

2.7.13 Dünyanın gelecekteki rüzgar enerjisi beklentileri

Rüzgar enerji sektörü 2009 yılında da devam eden finansal krize rağmen etkileyici bir şekilde büyümüştür. Ekonomik, sosyal ve çevre bilincinin artmasıyla rüzgar enerjisinin cazibesi artmıştır. Çizelge 2.7'de rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları verilmiştir. Diğer bir pozitif faktör ise Uluslar Arası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) Ocak 2009'da kurularak 2010 yılında daha etkin hale gelmesidir. 143 üyesiyle IRENA Birleşmiş Milletler İklim Değişiklik Görüşmeleri'nde bir lobi oluşturarak uluslar arası karar verme mekanizmasında etkin rol oynamıştır.

İvmelenmiş bir şekilde büyüme oranları temel alınarak Dünya Rüzgar Enerji Ajansı (WWEA)'nın gelecek beklentisi 2020 yılında dünya toplam kurulu gücünün 1.900.000 MW'a ulaşacağıdır.

Çizelge 2.7. Rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları (WVEC, 2009).

2009 Yılı Poz.	ÜLKE/ BÖLGE	2009 Sonu Toplam Kapasite	2009 Sonu İlave Olan Kapasite	2009 Yılı Büyüme Hızı(%)	2008 Yılı Poz.	2008 Sonu Toplam Kapasite	2007 Sonu Toplam Kapasite	2006 Sonu Toplam Kapasite
1	ABD	35.159	9.922	39,3	1	25.237	16.823	11.575
2	Çin	26.010	13.800	113	4	12.210	5.912	2.599
3	Almanya	25.777	1.880	7,9	2	23.897	22.247,4	20.622
4	İspanya	19.149	2.460	14,7	3	16.689	15.145,1	11.630
5	Hindistan	10.925	1.338	14	5	9.587	7.850	6.270
6	İtalya	4.850	1.114	29,8	6	3.736	2.726,1	2.123,4
7	Fransa	4.521	1.117	32,8	7	3.404	2.455	1.567
8	İngiltere	4.092	897	28,1	8	3.195	2.389	1.962,9
9	Portekiz	3.535	673	23,5	10	2.862	2.130	1.716
10	Danimarka	3.497	334	10,6	9	3.163	3.125	3.136
11	Kanada	3.319	950	40,1	11	2.369	1.846	1.460
12	Hollanda	2.240	5	0,2	12	2.235	1.747	1.559
13	Japonya	2.056	176	9,4	13	1.880	1.528	1.309
14	Avusturalya	1.877	383	25,6	14	1.494	817,3	817,3
15	İsveç	1.579	512	48	16	1.066,90	831	571,2
16	İrlanda	1.260	233	22,7	15	1.027	805	746
17	Yunanistan	1.109	119	12	18	989,7	873,3	757,6
18	Avusturya	995	0	0	17	994,9	981,5	964,5
19	Türkiye	796,5	463,1	138,9	25	333,4	206,8	64,6

Çizelge 2.7. Rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları devamı (WVEC, 2009).

20	Polonya	666	194	41,1	19	472	276	153
21	Brezilya	600	261,5	77,3	24	338,5	247,1	236,9
22	Belçika	555	171	44,6	22	383,6	286,9	194,3
23	Yeni Zelanda	497	172	52,9	26	325,3	321,8	171
24	Çin Taypeyi	436	78	21,8	23	358,2	279,9	187,7
25	Norveç	431	2	0,5	20	429	333	325
26	Mısır	430	40	10,3	21	390	310	230
27	Meksika	402	317	372,9	34	85	85	84
28	Güney Kore	364,4	86,4	31,1	27	278	192,1	176,3
29	Fas	253	129	104	32	124	125,2	64
30	Bulgaristan	214,2	56,7	36	28	157,5	56,9	36
31	Macaristan	201	74	58,3	31	127	65	60,9
32	Çek Cum.	191	41	27,3	29	150	116	56,5
33	Fillandiya	147	4	2,8	30	143	110	86
34	Estonya	142,3	64	81,8	36	78,3	58,6	33
35	Kosta Rica	123	49,5	66,9	37	74	74	74
36	Litvanya	91	37	68	38	54,4	52,3	55
37	Ukrayna	90	0	0	33	90	89	85,6
38	İran	82	0	0	35	82	66,5	47,4
39	Şili	78	58	288,6	47	20,1	20,1	2
40	Nikaraguay	40	40	yeni	yeni	0	0	0

Çizelge 2.7. Rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları devamı (WVEC, 2009).

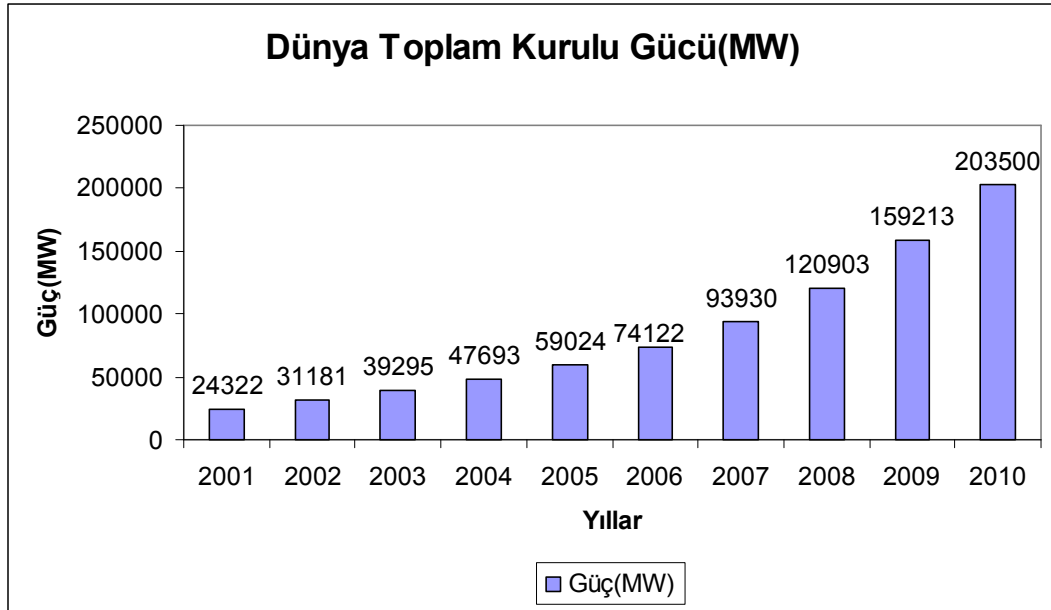
41	Lüks.	35,3	0	0	39	35,3	35,3	35,3
42	Filipinler	33	8	31,8	42	25,2	25,2	25,2
43	Arjantin	29,8	0	0	41	29,8	29,8	27,8
44	Jamaika	29,7	9	43,5	44	20,7	20,7	20,7
45	Litvanya	28,5	1,6	5,9	40	26,9	26,9	26,9
46	Hırvatistan	27,8	9,6	52,9	50	18,2	17,2	17,2
47	Hollanda Antileri	24,3	12	97,6	54	12,3	12,3	12
48	Güney Africa	21,8	0	0	43	21,8	16,6	16,6
49	Guadelup	20,5	0	0	45	20,5	20,5	20,5
49	Uruguay	20,5	0	0	46	20,5	0,6	0,2
51	Kolombiya	20	0	0	49	19,5	19,5	19,5
51	Tunus	20	0	0	48	20	20	20
53	İsviçre	17,6	4	29	52	13,8	11,6	11,6
54	Rusya	16,5	0	0	51	16,5	16,5	15,5
55	Romanya	14	7	100	56	7	7,8	2,8
56	Guyana	13,5	0	0	53	13,5	13,5	13,5
57	Vietnam	8,8	7,5	600	66	1,3	0	0
58	Küba	7,2	0	0	55	7,2	2,1	0,5
59	İsrail	6	0	0	57	6	6	7
60	Slovakya	6	0	0	58	6	5	5
61	Pakistan	6	0	0	58	6	0	0

Çizelge 2.7. Rüzgar santrallerine sahip ülkeler ve durumları devamı (WVEC, 2009).

62	Faroe Ad.	4,1	0	0	60	4,1	4,1	4,1
63	Kape Verde	2,8	0	0	62	2,8	2,8	2,8
64	Ekvador	2,5	0	0	61	4	3,1	0
65	Moğolistan	2,4	0	0	63	2,4	0	0
66	Nijerya	2,2	0	0	64	2,2	2,2	2,2
67	Belarus	1,9	0,9	77,3	68	1,1	1,1	1,1
68	Antartica	1,6	1	165	73	0,6	0	0
69	Ürdün	1,5	0	0	65	1,5	1,5	1,5
70	Endonesya	1,4	0,2	16,7	67	1,2	1	0,8
71	Martinik	1,1	0	0	68	1,1	1,1	1,1
72	Folkland A.	1	0	0	70	1	1	1
73	Eritre	0,8	0	0	71	0,8	0,8	0,8
74	Peru	0,7	0	0	72	0,7	0,7	0,7
75	Kazakistan	0,5	0	0	74	0,5	0,5	0,5
75	Namibiya	0,5	0	0	74	0,5	0,5	0,3
75	Suriye	0,5	0,1	22,5	76	0,4	0,3	0,3
78	Dominik	0,2	0	0	77	0,2	0	0
79	Dominik	0,2	0	0	77	0,2	0	0
80	Kuzey Kore	0,2	0	0	77	0,2	0	0
81	Cezayir	0,1	0	0	80	0,1	0	0
82	Bolivya	0,01	0	0	81	0,01	0,01	0,01
Toplam		159.213,	38.312	31,7		120.902,9	93.926,80	59.024,1

Özet olarak;

- Dünya rüzgar gücü kapasitesi 159213 MW ulaşmış olup bunun 38312 MW'sı 2009'da kurulmuştur.
- Rüzgar gücünde 2001 yılından bu yana en çok 2009'da %31,7 büyüme hızıyla artış olmuştur. Şekil 2.28'de dünya toplam kurulu rüzgar gücü gösterilmiştir (WWEC, 2009).
- Dünya üzerinde kurulu rüzgar santrallerinde 2009'da 340 TWh enerji üretilmiştir.
- 2009 yılı rüzgar enerjisi cirosu 50 milyar euro olmuştur.
- Rüzgar enerjisi sektörü 550000 çalışana ulaşmış olup 2012 yılı beklentileri 1 milyon çalışandır.
- Çin rüzgar enerjisi sektöründe büyüme hızıyla başı çekerek kurulu gücünü 13000 MW daha artırmıştır.
- En büyük kurulu güce Amerika sahip olup onu Çin ve Almanya takip etmiştir. Üçünde 2009'da toplamda 25000 MW daha kurulu güç büyümesi sağlanmıştır.
- Kurulu güç paylaşımında birinci Asya (%40,4), ikinci Kuzey Amerika (%28,4) ve üçüncü Avrupa'dır (%27,3).
- Brezilya ve Meksika başta olmak üzere Latin Amerika kurulu gücünü umut vaat edici bir şekilde iki katına çıkarmıştır.
- Dünyada rüzgar gücü kapasitesi 2010 yılında 200000 MW'yı aşması beklenmektedir.
- 2020 yılında küresel rüzgar gücü kapasitesi 1900000 MW olması tahmin edilmektedir (WWEC, 2009).



Şekil 2.28. Dünya toplam kurulu rüzgar gücü (WVEC, 2009).

2.8 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Tarihi ve Kullanımı

Türkiye’de rüzgar enerjisi her zaman önemli bir rol oynamıştır. Buna en eski belgelenen kanıt eski antik Truva şehridir. İlk rüzgar değirmenlerinin Anadolu’da kurulduğu bilinmektedir. Buna rağmen rüzgar değirmenlerinin dönüm noktası 14. yüzyılda olmuştur. 1389’da çizilmiş ilk deniz haritasında rüzgar değirmenlerinin İzmir Limanı’nın sığ ve kumsallık bölgelerinde olduğunu göstermektedir. (Hepbaşlı, Özgener, 2004).

Türkiye Cumhuriyeti tarihine baktığımızda 1940’larda Anadolu’nun değişik bölgelerinde rüzgar değirmenleri, tahıl ekili arazileri sulamak amacıyla kullanılmıştır. Tarım Bakanlığı’nın 1960-1961 yılları arasında yapmış olduğu çalışmada Anadolu’da 749 adet rüzgar değirmenin olduğu saptanmıştır. Bunların 708 adedi sulama amaçlı, 41 adedi elektrik üretim amaçlıdır. 1966-1967 ve 1978-1979 yılları arasında yapılan iki araştırmanın ilkinde, 309 adet ünitenin varlığı ve bunların ikisinin elektrik üretimi için olduğu; ikincisinde ise 894 adet ünitenin varlığı ve bunların 23 adedinin elektrik üretimi için olduğu ortaya çıkmıştır. Bu elektrik üretimi için kurulmuş olan rüzgar türbinlerinin kapasiteleri 1 KW’ın altındadır.

1960'tan beri bir çok üniversitede rüzgar enerjisiyle ilgili çalışmalar yapılmıştır (Yavuzcan 1961). 1980'den beri Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumunun Marmara Araştırma Merkezinde Türkiye Rüzgar Atlası çalışmaları başlamıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü bazı rüzgar ölçümleri yapmıştır.

Türkiye'de ilk rüzgar elektriği, 1986 yılında Çeşme Altinyunus Tesisleri'nde kurulan 55 kW nominal güçlü rüzgar türbininden elde edilmiştir (Hepbaşlı, Özdamar, Özalp, 2001). Bu türbinin göbek yüksekliği 24,5 m, pervane çapı 14 m olup nominal güce 12 m/s'lik rüzgar hızına erişmektedir. Çeşme şartlarında yılda ortalama 100000 kWh elektrik enerjisi üretmekte ve bu miktar tesis elektrik ihtiyacının %4'ünü karşılamaktadır (Hepbaşlı, Özdamar, Özalp, 2001). 1992 yılında ise Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin bir şubesi olarak kurulmuştur.

Türkiye'de uluslar arası boyutta ilk rüzgar elektriği, 21 Şubat 1998 tarihinde Çeşme Germiyan Köyü'nde üretilmiştir (Hanağasıoğlu, 1999). Bir Türk şirketi tarafından bir Alman firmasından alınan ve üç rüzgar türbininden oluşan bu rüzgar çiftliği, 1,7 MW kapasite ile üretime geçmiştir (Uyar 1999). Germiyan Rüzgar Çiftliği; 500 kW'lık nominal güce sahip ve pervane çapı 40,3 m, senkron jeneratörlü olup 14 m/s hızda nominal güce ulaşmaktadırlar. Germiyan Rüzgar Çiftliği, otoprodüktör sistemiyle kurulmuş olup yılda 4,5 milyon kWh elektrik elde edileceği tahmin edilmektedir.

Türkiye'de Yap-İşlet-Devret Modeli ile işletmeye açılan ilk rüzgar enerjisi tesisi, 28 Kasım 1998 tarihinde işletmeye açılan Alaçatı'daki ARES adlı 12 adet türbininden oluşan rüzgar çiftliğidir. Bu rüzgar türbinlerinin pervane çapı 44 m, göbek yüksekliği 45 m ve günde 100000 kWh'lik elektrik enerjisi elde edileceği tahmin edilmektedir. 8,5 milyon \$'lık yatırım ile kurulan rüzgar çiftliğinin kendisini 2,5 yılda amorti edeceği belirtilmektedir. TEDAŞ 1998 yılı faaliyet raporuna göre Alaçatı'daki 12 adet rüzgar türbininden kasım ayında 142210 kWh ve aralık ayında 1815590 kWh elektrik enerjisi satın alınmıştır (Hanağasıoğlu, 1999).

Türkiye'de Yap-İşlet-Devret modeliyle kurulmuş ve şu an Türkiye'nin en büyük rüzgar enerji santrali BORES (Bozcaada Rüzgar Enerji Santrali) 10,2 MW gücünde olup 25 Temmuz 2000'de Bozcaada'da kurulmuştur. Santral her biri 600 kW gücünde olan 17 adet rüzgar türbininden oluşmakta ve bir yıl boyunca 35 milyon kWh elektrik

üretimi gerçekleştirmiştir. Bozcaada Rüzgar Enerji Santrali'nin yatırım maliyeti 13 milyon \$ olup santralin kendisini yaklaşık altı yılda geri ödemesi beklenmektedir. Santralin ekonomik ömrü 30-35 yıldır. Üretilen enerjinin yaklaşık 1/17'si Bozcaada'da tüketilmekte, diğer kısmı ise denizaltındaki kablo ile Çanakkale bölgesine geçmektedir (Ecogeneration World, 2001).

2.8.1 Son gelişmeler

Türkiye'de rüzgar enerjisiyle ilgili çalışmaların başlangıç tarihi çok da eskilere dayanmamaktadır. Bu konudaki çalışmaları ilk başlatan kurum, 1980'li yılların ortalarında Elektrik İşleri Etüt İdaresi olmuştur. Türkiye'de rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının konu edildiği ilk kanun ise 2001'de yürürlüğü giren Elektrik Piyasası Kanunu'dur. Bu kanunla, devletin belirli bir fiyattan alım garantisinden vazgeçmesi, zaten düşük seviyede olan rüzgar enerjisi yatırımlarını durdurmuştur. Bu aşamada, az sayıda özel sektörün kendi enerjisini üretmek için gerçekleştirdiği projeler mevcuttur.

Rüzgar enerjisine verilen resmi önemin kanıtı olarak, ilk ciddi girişim ise 2005'te Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanunu'yla ortaya konmuştur. Bu kanunun sonrasında Bandırma, Çeşme Yarımadası, Hatay, Manisa ve Çanakkale'de gerçekleştirilen 150 megawatt gücündeki santraller, bunun ilk örnekleri olmuştur.

Son yıllarda Türkiye'de, rüzgar enerjisinde hızlı bir artışın başladığı görülmektedir. Örneğin; 2007 yılı sonunda istenen iş teklifleri ardında, toplamda 78 GW olan 751 projeden oluşan rekor sayıda başvuru bir günde Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu tarafından alınmıştır. O zamandan beri, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu rüzgar enerjisi üretimi için 5000 MW değerinde lisanslar yayımlamıştır.

2008 yılında, Türkiye'de 286 MW'lık yeni rüzgar enerjisi santralleri kurularak toplam rüzgar gücü 433 MW'a ulaşmıştır. Ayrıca 402 MW'lık kapasite yapım aşamasında ve 668 MW'lık kapasitenin rüzgar türbinleri için temin sözleşmeleri yapılmıştır. Kalan projeler hala türbinlerin elde edilmesi ve planlama izni bekleyenlerdir. Çizelge 2.8'de Türkiye'de kullanımda olan rüzgar santralleri, çizelge

2.9’da Türkiye’deki inşa halinde bulunan rüzgar santralleri ve çizelge 2.10’da Türkiye’deki türbin tedarik sözleşmesi imzalı projeler verilmiştir (www.eie.gov.tr). Bununla birlikte uzmanlar, Türkiye’nin yayılma altyapısının, böyle geniş ölçüde gelişmelerin güç şebekesine bağlanılmasına izin vermek için büyük oranda yenilenmeye ihtiyacı olduğunu ikaz etmektedir.

Çizelge 2.8. Türkiye’deki kullanımda olan rüzgar santralleri (www.eie.gov.tr).

Türkiye'deki Rüzgar Santralleri					
Şirket	Mevkii	Üretime Geç.Tar.	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin adet ve kapasitesi
Alize A.Ş.	İzmir-Çeşme	1998	1,50	Enercon	3 adet 500 kW
Güçbirliği	İzmir-Çeşme	1998	7,20	Vestas	12 adet 600 kW
Bores A.Ş.	Çanakkale-Bozc.	2000	10,20	Enercon	17 adet 600 kW
Sunjüt A.Ş.	İstanbul-Hadımköy	2003	1,20	Enercon	2 adet 600 kW
Yapısan A.Ş.	Balıkesir-Bandırma	I/2006	30,00	GE	20 adet 1.500 kW
Ertürk A.Ş.	İstanbul-Silivri	II/2006	0,85	Vestas	1 adet 850 kW
Mare A.Ş.	İzmir-Çeşme	I/2007	39,20	Enercon	49 adet 800 kW
Deniz A.Ş.	Manisa-Akhisar	I/2007	10,80	Vestas	6 adet 1.800 kW
Anemon	Çanakkale-İntepe	I/2007	30,40	Enercon	38 adet 800 kW
Doğal A.Ş.	Çanakkale-Gelibolu	II/2007	14,90	Enercon	13 adet 800 kW + 5 adet 900 kW
Deniz A.Ş.	Hatay-Samandağ	I/2008	30,00	Vestas	15 adet 2.000 kW
	Manisa-Sayalar	I/2008	30,60	Enercon	38 adet 800 kW
İnnores A.Ş.	İzmir-Aliğa	I/2008	42,50	Nordex	17 adet 2.500 kW
Lodos A.Ş.	İstanbul-Gaziosmanpaşa	I/2008	24,00	Enercon	12 adet 2.000 kW
Ertürk A.Ş.	İstanbul-Çatalca	I/2008	60,00	Vestas	20 adet 3.000 kW
Baki A.Ş.	Balıkesir-Şamlı	II/2008	90,00	Vestas	38 adet 3.000 kW
Dares A.Ş.	Muğla-Datça	II/2008	10,00	Enercon	27 adet 800 kW + 8 adet 900 kW
İşletmedeki Kapasite Toplamı			433,35		

Çizelge 2.9. Türkiye'deki inşa halinde bulunan rüzgar santralleri (www.eie.gov.tr).

Türkiye'deki İnşa halinde Bulunan Rüzgar Santralleri					
Şirket	Mevkii	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin adet ve kapasitesi
Ayen A.Ş.	Aydın-Didim	I/2009	31,50	Suzlon	2.100 kW
Ezse Ltd. Şti.	Hatay-Samandağ	II/2009	35,10	Nordex	900 kW
Ezse Ltd. Şti.	Hatay-Samandağ	II/2009	22,50	Nordex	2.500 kW
Rotor A.Ş.	Osmaniye-Bahçe	II/2009	135,00	GE	54 adet 2.500 kW
Mazı-3 Res Elk. Ür. A.Ş.	İzmir - Çeşme	II/2009	22,50	Nordex	9 adet 2500 kW
Kores A.Ş.	İzmir-Çeşme	II/2009	15,00	Nordex	2.500 kW
Soma A.Ş.	Manisa-Soma	II/2009	140,80	Enercon	176 adet 800
İnşa Halindeki Kapasite Toplamı			402,4		

Çizelge 2.10. Türkiye'deki türbin tedarik sözleşmesi imzalı projeler (www.eie.gov.tr)

Türkiye'deki Türbin Tedarik Sözleşmesi İmzalı Projeler					
Şirket	Mevkii	Üretime Geç.Tar.	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin adet ve kapasitesi
Alize A.Ş.	Balıkesir-Susurluk		19,00	Enercon	17 adet 800 kW ve 6 adet 900 kW
Borasco A.Ş.	Balıkesir-Bandırma		45,00	Vestas	15 adet 3000 kW
Alize A.Ş.	Tekirdağ-Şarköy		28,80	Enercon	14 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW
Alize A.Ş.	Balıkesir-Havran		16,00	Enercon	8 adet 2000 kW
Alize A.Ş.	Çanakkale-Ezine		20,80	Enercon	10 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW
Belen A.Ş.	Hatay-Belen		30,00	Vestas	10 adet 3000 kW
Alize A.Ş.	Manisa-Kırkağaç		25,60	Enercon	32 adet 800 kW
Boreas A.Ş.	Edirne-Enez		15,00	Nordex	6 adet 2.500 kW
Doruk A.Ş.	İzmir-Aliğa		30,00	Enercon	15 adet 2.000 kW
Yapısan İnş.	İzmir-Aliğa		90,00	Nordex	36 adet 2500 kW
Doğal A.Ş.	İzmir-Aliğa		30,00	Enercon	15 adet 2000 kW
Doğal A.Ş.	İzmir-Foça		30,00	Enercon	15 adet 2000 kW
Poyraz A.Ş.	Balıkesir-Kepsut		54,90	Enercon	61 adet 900 kW
Bilgin Elektrik Üretim A.Ş.	Manisa-Soma-Kırkağaç		90,00	Nordex	36 adet 2500 kW
Bares Elektrik Üretim A.Ş.	Balıkesir-Kepsut		142,50	Nordex	57 adet 2500 kW
Türbin Tedarik Sözleşmesi İmzalı Proj. Toplamı			667,60		

2.9 Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajlarından

Dünyamızın enerji ihtiyacı her yıl % 4-5 oranında artmaktadır. Buna karşılık bu ihtiyacı karşılayan fosil-yakıt rezervleri ise çok hızlı bir şekilde azalmaktadır. Ayrıca fosil yakıtlarının kullanımı sonucunda oluşan sera gazlarıyla Dünya'nın ortalama sıcaklığının son bin yılın en yüksek değerlerine ulaştığı bilinmektedir. Bu durum ise yoğun hava kirliliğinin yanı sıra milyonlarca dolar zarara yol açan sel, toprak kayması, fırtına, yangın gibi doğal afetlerin gözle görülür bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Artan Dünya ısıyla eriyen buzullar nedeniyle deniz seviyesi yükselmiştir. Bunun sonucu daha şimdiden dünyanın birçok yerindeki yerleşim alanlar boşaltılmıştır. En kısa zamanda önlem alınmazsa yakın gelecekte birçok yerleşim alanı daha sular altında kalacaktır. Sadece bu neden bile insanoğlunun artık fosil-yakıtlar yerine temiz enerji kaynaklarına yönelmesini gerekli kılmaktadır.

Alternatif ve temiz enerji kaynaklar günümüzde ve yakın gelecekte günlük yaşamımıza hakim olacaktır. Sınırsız ve sorumsuzca enerji tüketiminin yerini; bilinçli, çevreye saygılı ve ihtiyacı karşılamaya yönelik enerji kullanımı alacaktır. Böyle bir ortamda da refah düzeyini, en fazla enerjiyi tüketen yerine enerjiyi en verimli kullananlar belirleyecektir. Türkiye'de de benzeri bir anlayışın hakim olması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artacaktır.

2.9.1 Rüzgar enerjisinin avantajları

Rüzgar enerjisinin avantajları şunlardır:

- Rüzgar enerjisi tükenmez bir enerji çeşididir. Fosil yakıtlar gibi sınırlı değildir. Güneş var olduğu sürece devam edecek bir enerji kaynağıdır.
- Petrol, kömür ve doğal gaz gibi hammadde tüketimi olmadığından hammadde masrafı yoktur.
- Rüzgar santrallerinde hammadde ithali olmadığından sadece türbin ithali vardır. Bu da ilk yatırım maliyetlerine dahil olup bir defa yapılacak bir masraftır.

- Türbinlerin kurulumu ve bakımları için personel istihdamı sağlar. Türbin imalatı yerli imkanlarla sağlandığında buna bağlı bir çok yan sanayi de gelişecektir. Bu sebeple yerli sanayiye geliştirir.
- Rüzgar santralleri hidrolik santraller ve termik santraller gibi devreye alınması yıllarca sürmez. Yaklaşık altı ay gibi kısa bir sürede rüzgar santralleri kurulabilir.
- Rüzgar enerjisi temiz bir enerji kaynağı olduğundan çevreye zarar vermez. CO₂ ve NO₂ gibi fosil yakıtlardan enerji üretilirken ortaya çıkan gazlar rüzgar enerjisi üretilirken yoktur.
- Rüzgarı depolamak mümkün değildir, fakat rüzgardan üretilen enerjiyi depolamak mümkündür.
- Rüzgar türbinlerin oturduğu alan çok küçüktür ve türbinler arası alanların kullanımına olanak verir.
- Rüzgar türbinleri rüzgar gücünün elektriğe verimli dönüşümünü sağlar.
- Ömrü dolan türbinleri söküp kaldırmak kolaydır. Arazi yeniden kullanılabilir.

2.9.2 Rüzgar enerjisinin dezavantajları ve bunlara ait çözüm önerileri

Rüzgar enerjisinin dezavantajları ve bunlara ait çözüm önerileri aşağıda verilmiştir:

- Rüzgar enerjisi sürekli bir enerji kaynağı değildir. Bu yüzden rüzgarın hiç esmediği ya da düşük hızla estiği zamanlarda enerji üretimi olmaz. Rüzgar esme hızlarına göre rüzgar türbini seçmek gereklidir.
- Rüzgar tarlaları çok büyük alanları kaplar. Bunun sebebi türbinlerin birbirinden belli uzaklıkta bulunma zorunluluğudur. Bu uzaklık kanat çapının en az yedi katı olmalıdır. Bu suretle türbinler birbiri için rüzgar engeli oluşturmazlar. Ancak bu alanlar içersinde türbin temelleri dışında kalan alanlar boş olup tarım ve hayvancılıkta kullanılabilir (Toklu, 2002).

- Rüzgar türbinlerinde aerodinamik ve mekanik olarak iki tip gürültü oluşur. Aerodinamik gürültü, pervane kanat profiline sınır tabakasındaki türbülanslı hava ve kanat profiline çıkış uçlarında oluşan girdaptan dolayı meydana gelir. Pervane kanatlarının uç noktalarının profili uygun seçilerek bu gürültü azaltılabilir. Diğer gürültüler mekanik kaynaklı olup dişli kutusu, hidrolik pompalar ve jeneratör soğutma sistemi bu gürültülerin kaynağıdır. Gövde iç kısmından yalıtılarak bu gürültülerin azaltılması sağlanır. Rüzgar tarlaları, yerleşim birimlerine 1 km uzaklıkta olması gürültü problemini ortadan kaldırır (Özdamar, 2001).
- Hızla dönen türbin rotorları kuşların çarpmasıyla ölümlerine sebep olur. Fakat bölgede yaşayan kuşlar zamanla bu duruma alışacak ve kuş ölümlerinin ilk zamanlara göre azaldığı gözlemlenecektir.
- Malzeme yorulması sebebiyle kanat kopmaları olabilmektedir. Günümüzde kullanılan karbon takviyeli elyaf kanatlar ile malzeme yorulması ve kaza riski ortadan kalkmıştır.
- Geniş alanların yüksek türbin kuleleriyle kaplanması estetik açıdan hoş olmayan görüntülere sebep olmaktadır. Rüzgar tarlalarının yerleşim yerlerinin uzağına yapılması bu sıkıntıyı ortadan kaldırır.
- Elektromanyetik girişim diğer bir sorundur. Yapılan araştırmalarda, elektromanyetik girişim ile TV ve radyo yayınlarının, havacılık ve denizcilik haberleşmelerinin olumsuz etkilendiği ortaya çıkmıştır. Ancak radyo ve televizyon antenlerinin türbin yakınında olmadığı sürece birçok frekansın etkilenmediği gözlemlenmiştir. Türbinlerin elektromanyetik girişim etkisi, kanat büyüklüğü ve malzemesi ile ilişkili olarak değişmektedir. Metal malzemelerin kullanıldığı türbinlerde gürültü ve elektromanyetik girişim oranı yüksektir. Bu sorun polyster esaslı malzeme kullanılarak en aza indirilebilmektedir.
- İlk yatırım maliyeti (türbin, arazi kiralama veya satın alma, kurulum vb.) yüksektir. Bu maliyetlerde gün geçtikçe iyileşme sağlanmaktadır.

BÖLÜM 3

RÜZGAR ENERJİSİNDE KULLANILAN TEORİK BİLGİLER

3.1 Temel Yasa ve Kavramlar

Rüzgar türbinleri ile ilgili ilk teori 1926 yılında Göttingen Institute'de Dr. Albert Betz tarafından ortaya atılmıştır. Bu teoremden Betz rüzgar rotorunun ideal olduğu varsayılır. Diğer bir ifade ile rotor, havaya karşı sürüklenme direnci göstermeyen sonsuz sayıda kanattan oluşmaktadır. Bu şekilde, rüzgar rotorunun mükemmel bir enerji dönüştürücüsü olduğu varsayılmıştır. Bu teoriye göre;

Rüzgar hareket halinde hava olup sahip olduğu kinetik enerji,

$$KE_r = \frac{1}{2} m V_r^2 \quad (3.1)$$

bağıntısı ile verilir ve gücü, sahip olduğu kinetik enerjisinin zamana göre türevidir:

$$P_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m V_r^2 \right) \quad (3.2)$$

Bir başka ifadeyle,

$$P_r = \frac{1}{2} \dot{m} V_r^2 \quad (3.3)$$

olur. Buradaki kütleli debi ise,

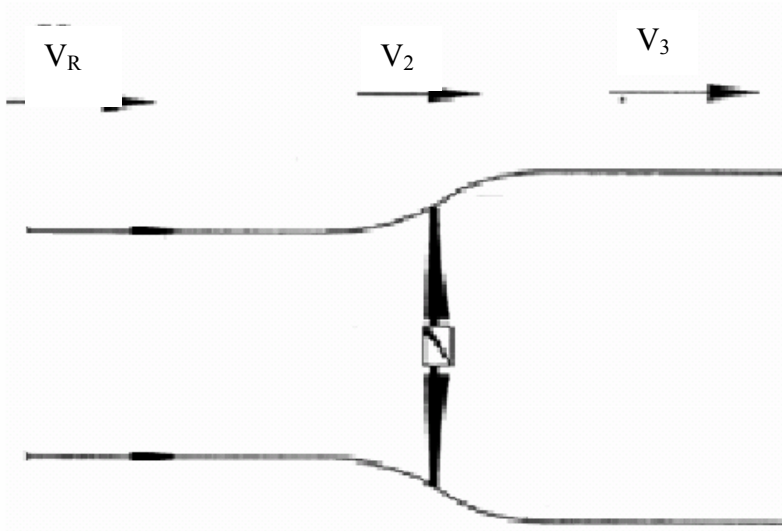
$$\dot{m} = \rho A V_r \quad (3.4)$$

bağıntısı ile verilir. Buradan hareketle rüzgarın gücü,

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \quad (3.5)$$

olarak hesaplanır.

Rüzgar, kinetik enerjisi nedeniyle doğal bir potansiyele sahiptir. Bunun bilinen fiziksel konular ve teknolojik imkanlar sayesinde yararlı enerjiye çevrilen miktarına “Rüzgar enerjisi teknik potansiyeli” denir.



Şekil 3.1. Rüzgarın türbine girerken genişlemesi (www.windpower.dk).

Bu durumda türbinin gücü,

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A V_2 (V_r^2 - V_3^2) \quad (3.6)$$

Froude- Rankie teoreminden ortalama türbin içindeki rüzgar hızı,

$$V_2 = \frac{(V_r + V_3)}{2} \quad (3.7)$$

olarak hesaplanır. Türbin gücü (3.6) formülünde V_2 yerine yazılırsa,

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A \frac{(V_r + V_3)}{2} (V_r^2 - V_3^2) \quad (3.8)$$

veya

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A V_r \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_3}{V_r}\right) \left(1 - \left(\frac{V_3}{V_r}\right)^2\right) \quad (3.9)$$

burada (3.3) denklemi (3.9) denkleminde yazılırsa,

$$P_T = P_r \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_3}{V_r}\right) \left(1 - \left(\frac{V_3}{V_r}\right)^2\right) \quad (3.10)$$

elde edilir. Burada güç faktörü $C_p = P_T/P_r$ ve yavaşlatma faktörü $n = V_3/V_r$ olarak tanımlanırsa (3.10) denklemi;

$$C_p = \frac{1}{2} (1+n)(1-n^2) \quad (3.11)$$

halini alır. Bu denklemde maksimum güç faktörü C_p 'yi bulmak için yavaşlatma faktörü n 'e göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse,

$$\frac{dC_p}{dn} = \frac{1}{2} \frac{d}{dn} (1-n^2 + n - n^3)$$

$$n_1 = 1/3, n_2 = -1$$

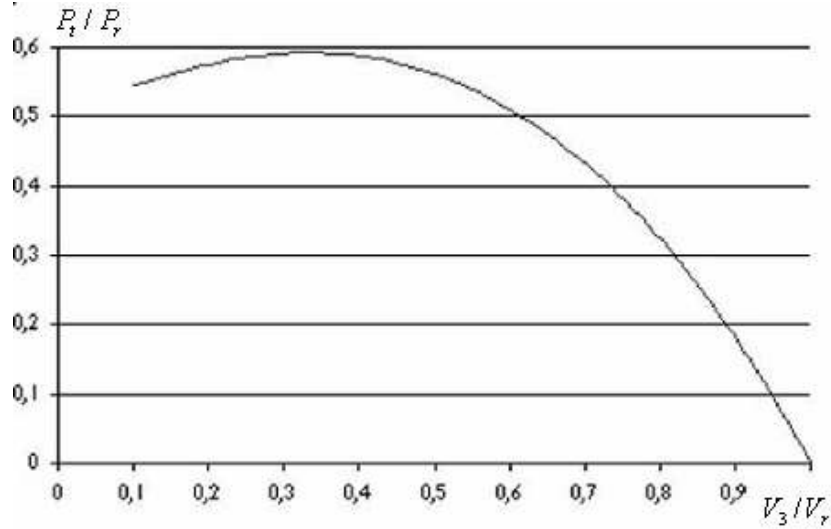
bulunur. Yavaşlatma faktörünün değişimi şekil 3.2.'de verilmiştir.

Yavaşlatma faktörü n , hiçbir zaman negatif değer olamayacağından $n = 1/3$ alınır ve (3.11) denkleminde yerine konursa,

$$C_p = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right)$$

$$C_{pmax} = 0.5926$$

serbest pervaneden alınacak maksimum verim olarak bulunur. Yani bir rüzgar türbiniyle rüzgarın tüm enerjisinden faydalanmak imkansızdır. Rüzgar, rüzgar türbininden, rüzgardan aldığımız enerji ölçüsünde yavaşlamış olarak çıkar. Eğer rüzgardaki tüm enerjiyi alabilseydik rüzgarın türbinden durgun halde çıkması gerekirdi. Fakat bu durumda da türbine rüzgarın diğer taraftan girmesi engellenir ve hiç enerji elde edilmezdi.



Şekil 3.2. Yavaşlatma faktörü değişimi (www.windpower.dk).

Çağdaş rüzgar türbinleri için C_p değeri yaklaşık olarak 0,40'tır. Bunun nedeni hava direnci, rotorun oluşturduğu türbülans ve aktarma organları ile elektrik sistemi gibi noktalardaki kayıplardır.

3.2 Rüzgar Güç Profili Kanunu

Rüzgar ölçümleri genelde 10-30 m aralığında yapılmaktadır, fakat günümüz büyük ve güçlü rüzgar türbinlerinin göbek yükseklikleri bu değerlerin çok üzerindedir. Bu nedenle belirli bir yükseklikte ölçülen rüzgar verileri, istenilen yükseklikteki değerinin bulunması için rüzgar güç profili kanunu kullanılmaktadır (Patel, 2006). Farklı yükseklikler için hız aşağıdaki denklem hesaplanır.

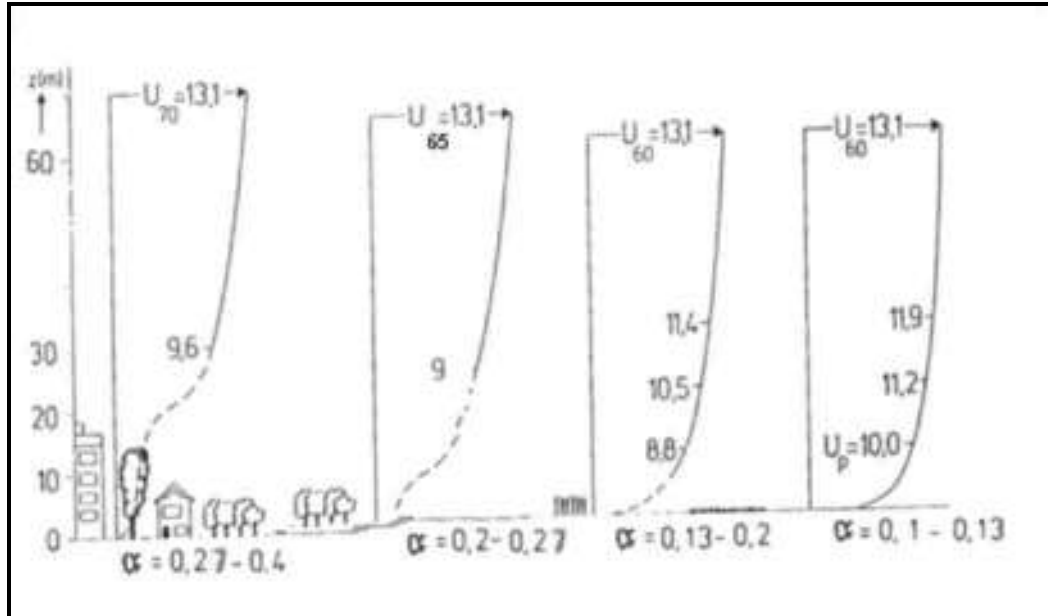
$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'de; v_1 ölçülmüş rüzgar hızını, v_2 belirlenmek istenen rüzgar hızını, v_1 hızının ölçüldüğü yükseklik h_1 , v_2 hızının belirlenmek istediği yükseklik ise h_2 , α ise Helman katsayısıdır ve rüzgar hızı ölçüm yerinin özelliklerine bağlıdır.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{3\alpha} \quad (3.13)$$

Denklem 3.13’de; h_1 yüksekliğinde hesaplanmış güç yoğunluğu P_1 , P_2 ise hesaplanmak istenen h_2 yüksekliğindeki güç yoğunluğudur.

Türbinler, genellikle kuleler üzerinde ortalama 50 m yüksekliğe yerleştirilir. Rüzgarın hızı, yerden yüksekliğe bağlı olarak belirgin bir değişkenlik gösterir. Yüzey farklılıklarının rüzgar hızındaki etkisi şekil 3.3’te ve çizelge 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Yüzey farklılıklarının rüzgar hızına etkisi (Yalçın, C., 1998, s.23).

Çizelge 3.1. Yüzey farklılıklarının rüzgar hızına etkisi (Özdamar, 2000).

Durum	α
Deniz Kıyısı Şeridi	0,1 – 0,13
Yeşil ve Ekili Alan	0,13 – 0,2
Ağaçlı Alan	0,2 – 0,27
Yüksek Bina ve Kentsel	0,27 – 0,4

3.3 Rüzgar Potansiyeli Hesaplama Yöntemleri

Herhangi bir bölgedeki rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanması ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi için uygun yer seçilmesi için rüzgar şiddeti ölçümlerinin en az bir sene zarfında yapılması, bölge potansiyeli hakkında yeterli doğrulukta bilgiye ulaşılması bakımından önemlidir. Bununla birlikte yapılan ölçümlerin pratikte uzun zaman yapılması yapılacak yatırımın fizibilite çalışmalarının daha doğru sonuçlar vermesini sağlayacaktır. Rüzgar enerjisi potansiyelini etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi rüzgarın şiddetidir. Rüzgarın şiddeti ise yeryüzünün topografik yapısından etkilenmektedir. Rüzgar enerjisi, rüzgarın hızının küpü ve havanın yoğunluğuyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle rüzgar ölçümlerinde yapılacak %1'lik bir hata enerji çıkışına %3 olarak yansiyabilmektedir. Rüzgar santralının kurulmasından önce yapılması gereken işlemlerden bir tanesi, bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasıdır. Rüzgar enerjisi tahmininde farklı yöntemler vardır. Atmosferik sınır tabakanın davranışlarını anlatan nümerik analizler sonucu incelenebileceği gibi bir rüzgar tüneli vasıtasıyla hava akımının modellenmesi yapılabilir. Diğer bir model ise amprik modellerdir (Karadeli, 2001). Bu modeller rüzgar rejiminin ve karakteristiğinin belirlenmesi için ekonomik bir metottur. Günümüzde ise rüzgar enerjisi potansiyeli WASP, Wind Pro, Alvin, RetScreen gibi yazılımların kullanılması ile hesaplanabileceği gibi uydu verileri aracılığı (Durak, Özer, 2008) ve istatistiksel olarak da hesaplanabilmektedir. İstatistiksel olarak yapılan çalışmalar, rüzgar şiddet dağılımının Weibull dağılımına uyduğunu göstermiştir (Akpınar, Akpınar, 2005(b)). Fakat her bölge için rüzgar davranışının hangi dağılıma uyduğunun incelenmesi gereklidir. Bununla birlikte WASP, Wind Pro, Alvin gibi yazılımlar hesaplamalarında Weibull dağılımını kullanmaktadır.

3.4 Weibull Dağılımı

Weibull dağılımı, boyutsuz şekil (k) ve rüzgar hızı ile aynı birime sahip ölçek (c) parametrelerinden oluşan iki parametrelili bir dağılımdır. İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Akpınar, Akpınar, 2005(b)).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (3.14)$$

Burada v rüzgar hızı(m/s), k ve c sırasıyla boyutsuz şekil ve ölçek (m/s) parametreleridir. Weibull dağılımını birikimli (kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (3.15)$$

Rüzgar verilerinin dağılımını göstermek için yapılan çalışmalar, Weibull dağılımının rüzgar verileri dağılımı için uygun olduğunu göstermiştir. Gerek ülkemizde gerekse diğer bölgelerde, bir çok çalışmada rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında Weibull dağılımı yaygın olarak kullanılmıştır (Karşlı, Geçit, 2003). Rüzgar verilerinin genelde bu dağılıma uyduğu bilinmektedir. Weibull dağılım parametrelerini hesaplamak için literatürde birçok yöntem geliştirilmiştir (Keçecioglu, 1993). Yapılan çalışmalar; Grafik Yöntem, En Yüksek Olabilirlik Yöntemi ve Moment Yöntemi'nin, şekil ve ölçek parametrelerini hesaplamada daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Grafik yöntem, En Yüksek Olabilirlik yöntemi ve Moment yöntemi kullanılarak Weibull dağılım parametrelerinin hesaplanmasında yaklaşık benzer sonuçlar çıkabilmektedir. Bu nedenle Weibull dağılım parametrelerini hesaplama yöntemleri sonuçlarının gerçek veri ile hata analizi yapılmalıdır. Böylelikle hangi yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği bulunacaktır. Weibull dağılımı rüzgar verilerine uygulandığı zaman, şekil parametresinin Ekvator yakınlarında 1 civarında, ılıman enlemler için ise 2 ve sürekli rüzgar alanları için ise 3 civarında olduğu bilinmektedir (Akdağ, Dinler, Menteş, 2007). Weibull dağılımında ölçek parametresinin 1 ve 2'ye eşit olduğu zaman, özel durumlar söz konusudur. Ölçek parametresinin 1'e eşit olması durumunda dağılım, Gaussian dağılıma benzemektedir; 2'ye eşit olması durumunda ise Rayleigh dağılımı olarak bilinen tek parametrelili bir dağılıma dönüşmektedir (Akpınar, Akpınar, 2005 (b)). Weibull dağılımının kullanılmasındaki bir sakınca 0-1 m/s gibi küçük hız verilerini bu dağılımın yeterince temsil edememesidir, fakat günümüz türbinlerinin enerji üretimine başlama hızları genelde 3-4 m/s arasında olması nedeni ile dağılımın kullanılması sonucundaki hata yok denecek kadar az olmaktadır.

3.4.1 Grafik yöntem (En küçük kareler yöntemi)

Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonunun her iki tarafının doğal logaritması alınırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\ln[-\ln[1-F(v)]] = k \ln v - k \ln c \quad (3.16)$$

$\ln[-\ln[1-F(v)]]$ 'nin $\ln x$ 'e göre grafiği uzayda doğruyu gösterir ve k parametresi bu doğrunun eğimidir. Başka bir ifadeyle denklem 3.16 aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Keçecioglu, 1993).

$$y = a + bx \quad (3.17)$$

Denklem 3.17'deki parametrelerin çözümleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$b = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (3.18)$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (3.19)$$

Burada;

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (3.20)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.21)$$

Denklem 3.17'deki parametreler;

$$y_i = \ln(\ln(1/(1 - F(v_i)))) \quad (3.22)$$

$$F(v_i) = \frac{i - 0,30685 - 0,3863 \left(\frac{i-1}{N-1} \right)}{N} \quad (3.23)$$

Denklem 3.23'teki i kaçıncı ölçüm olduğu, N toplam ölçüm sayısıdır.

$$x_i = \ln v_i \quad (3.24)$$

$$b = k \quad (3.25)$$

$$a = -k \ln c$$

$$c = e^{-\frac{a}{b}} \quad (3.26)$$

3.4.2 Moment yöntemi

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunda ortalama hız ve standart sapmanın karesi denklem 3.27 ve 3.28'deki gibi ifade edilebilir (Keçecioğlu, 1993).

$$\bar{v} = c \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) \quad (3.27)$$

$$\sigma^2 = c^2 \left[\Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{k} + 1\right) \right] \quad (3.28)$$

Rüzgar hızları kullanılarak denklem 3.27 ve 3.28 aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\bar{v} = \left(\sum_{i=1}^N v_i \right) / N \quad (3.29)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (v_i)^2 - N(\bar{v})^2}{N-1} \quad (3.30)$$

Burada N ölçüm sayısı, v_i rüzgar değerleridir. Değişme miktarı katsayısı (COV) standart sapmanın ortalama hıza oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki verilmektedir.

$$COV = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (3.31)$$

Değişme miktarı katsayısı hesaplanıp aşağıdaki Çizelge 3.2 ile k değerleri bulunarak denklem 3.27’de yerine konur ve c değeri hesaplanır (Keçecioglu, 1993).

Çizelge 3.2. COV değerine karşılık gelen k değerleri (Keçecioglu, 1993).

COV	k	COV	k	COV	k
429,8314	0,10	0,7238	1,40	0,3994	2,70
47,0366	0,15	0,7006	1,45	0,3929	2,75
15,8430	0,20	0,6790	1,50	0,3866	2,80
8,3066	0,25	0,6588	1,55	0,3805	2,85
5,4077	0,30	0,6399	1,60	0,3747	2,90
3,9721	0,35	0,6222	1,65	0,3690	2,95
3,1409	0,40	0,6055	1,70	0,3634	3,00
2,6064	0,45	0,5897	1,75	0,3581	3,05
2,2361	0,50	0,5749	1,80	0,3529	3,10
1,9650	0,55	0,5608	1,85	0,3479	3,15
1,7581	0,60	0,5474	1,90	0,3430	3,20
1,5948	0,65	0,5348	1,95	0,3383	3,25
1,4624	0,70	0,5227	2,00	0,3336	3,30
1,3529	0,75	0,5112	2,05	0,3292	3,35
1,2605	0,80	0,5003	2,10	0,3248	3,40
1,1815	0,85	0,4898	2,15	0,3206	3,45
1,1130	0,90	0,4798	2,20	0,3165	3,50
1,0530	0,95	0,4703	2,25	0,3124	3,55
1,0000	1,00	0,4611	2,30	0,3085	3,60
0,9527	1,05	0,4523	2,35	0,3047	3,65
0,9102	1,10	0,4438	2,40	0,3010	3,70
0,8718	1,15	0,4341	2,45	0,2974	3,75
0,8369	1,20	0,4279	2,50	0,2938	3,80

Çizelge 3.2. COV değerine karşılık gelen k değerleri devamı (Keçecioğlu, 1993).

COV	k	COV	k	COV	k
0,8369	1,20	0,4279	2,50	0,2938	3,80
0,8050	1,25	0,4204	2,55	0,2904	3,85
0,7757	1,30	0,4131	2,60	0,2870	3,90
0,7487	1,35	0,4062	2,65	0,2838	3,95

3.4.3 En Yüksek Olabilirlik yöntemi

Olayların meydana gelme olasılığı olabilirlik fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir (Elitok, 2006).

$$L = \prod_1^n f(v_i; k, c) \quad (3.32)$$

Denklem 3.32'nin açılımı denklem 3.33'tür.

$$L = \frac{k^n}{c^{nk}} \prod_i^n (v_i)^{k-1} e^{-\frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k} \quad (3.33)$$

Denklem 3.33'ün her iki tarafının ln ifadesi alınırsa;

$$\ln L = n \ln k - nk \ln c + (k-1) \ln \left(\prod_{i=1}^n (v_i) \right) - \frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k \quad (3.34)$$

elde edilir. Denklem 3.35'in k ve c'ye göre türevleri alındığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial c} = -\frac{nk}{c} + kc^{-(k+1)} \sum_{i=1}^n (v_i)^k = 0 \quad (3.35)$$

$$c = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial k} = \frac{n}{k} + \sum_{i=1}^n (v_i)^k - n \frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n (v_i)^k} = 0 \quad (3.37)$$

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} \quad (3.38)$$

3.5 Hata Analizi

Bu çalışmada kullanılan yöntemler iki farklı hata hesabı formülü ile analiz edilmiştir. Bunlar R^2 ve RMSE olup aşağıda ifade edilmiştir. n ölçüm sayısıdır. (Akpınar, 2006)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.39)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{0.5} \quad (3.40)$$

3.6 Güç Yoğunluğunun Belirlenmesi

Weibull dağılımına göre güç yoğunluğu aşağıdaki gibidir (Chang, Wu, Hsu, Chu, Liao, 2003).

$$P_w = \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \quad (3.41)$$

Denklem 3.41 Kinetik enerji = $1/2\rho Av^3$ ile entegre edilirse denklem 3.42 elde edilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c}\right)^k e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^2 k \left(\frac{v}{c}\right)^k e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (3.42)$$

Yapılan sadeleştirmeler ve Gamma fonksiyonu kullanılması ile aşağıdaki denklem elde edilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (3.43)$$

3.7 En Olası Hız Değeri

Weibull dağılımı fonksiyonunun hıza göre türevi alınıp sifıra eşitlenirse en olası hız değeri bulunmuş olur. Bununla ilgili yapılan işlemler aşağıda verilmiştir.

$$\frac{f(v)}{dv} = 0 \quad (3.44)$$

$$\frac{\left(\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}\right)}{dv} = 0 \quad (3.45)$$

$$\frac{f(v)}{dv} = \frac{k}{c} (k-1) \frac{v^{k-2}}{c^{k-1}} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} - \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} (k) c^{-k} (v)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} = 0 \quad (3.46)$$

$$(k-1) - (k) \left(\frac{v}{c}\right)^k = 0 \quad (3.47)$$

$$v_{enolası} = c \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.48)$$

3.8 En Fazla Enerjiyi Taşıyan Hız

Enerji zaman ile gücün çarpımı şeklinde ifade edilebilir.

$$E = Pf(v) \quad (3.49)$$

Weibull dağılımı fonksiyonunu kinetik enerji ile çarpılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$E = \frac{1}{2} \rho v^3 \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (3.50)$$

Denklem 3.50'nin türevi hıza göre alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$V_{maxE} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.51)$$

elde edilir.

3.9 Rüzgar Türbinin Ürettiği Enerjinin Bulunması

Rüzgar türbininin belirli bir zaman aralığında ürettiği gücün bulunması için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu türbin güç eğrisi ile entegre edilir (Chang, Wu , Hsu, Chu, Liao, 2003).

$$E_{türbin} = T \int_{v_1}^{v_0} P_T(v) f(v) dv \quad (3.52)$$

Türbin eğrisi fonksiyonu $P_T(v)$ parçalı bir fonksiyon olup aşağıdaki gibi ikiye parçalanabilir.

$$E_{türbin} = T \left(P_R \int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv + P_R \int_{v_R}^{v_0} \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv \right)$$

(3.53)

3.10 Rüzgar Türbinlerini Güç Eğrileri

Literatürde 3 yöntem ağırlıklı olarak kullanılır (Eskin, Artar, Tolun, 2008). Bunların birincisi;

$$P_T(v) = \begin{pmatrix} 0 \\ (a_1v^3 + a_2v^2 + a_3v + a_4)P_R \\ P_R \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.54)$$

İkincisi;

$$P_T(v) = \begin{pmatrix} 0 \\ (a_1v^2 + a_2v + a_3)P_R \\ P_R \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.55)$$

Üçüncüsü;

$$P_T(v) = \begin{pmatrix} 0 \\ P_R \frac{v^2 - v_1^2}{v_R^2 - v_1^2} \\ P_R \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.56)$$

Bu denklemlerde $P_T(v)$ değerleri için; ilk durumda $v < v_1$, ikinci durumda $v_1 \leq v < v_R$, üçüncü durumda $v_R \leq v < v_0$, dördüncü durumda $v \geq v_0$ olur.

Yapılan modelleme işlemini en iyi 3. dereceden bir denklemin yapabildiği tespit edilmiştir.

3.11 Kapasite Faktörünün Hesaplanması

Kapasite faktörü, rüzgar türbininin belirli bir zamanda aralığında ürettiği enerjinin üretmesi gereken enerji oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Chang, Wu , Hsu, Chu, Liao, 2003).

$$C_f = \frac{TP_R \left(\int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv + \int_{v_R}^{v_0} \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv \right)}{TP_R} \quad (3.57)$$

Denklem 3.57'in son hali aşağıdaki gibidir.

$$C_f = \int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv + \int_{v_R}^{v_0} \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv \quad (3.58)$$

BÖLÜM 4

ESKİŞEHİR VE YÖRESİNDE ENERJİ ÜRETİMİ AMAÇLI RÜZGAR DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ

4.1 Eskişehir İlinin

Eskişehir, İç Anadolu Bölgesi'nin kuzeybatısında yer alır. Kuzeyden Bolu, doğudan Ankara, güneyden Konya-Afyon, batıdan Kütahya-Bilecik illeri ile sınırlıdır. Eskişehir 29.58-32.04 doğu boylamları, 30.06-40.09 kuzey enlemleri arasındadır. Yüzölçümü 13.731 km²'dir. Bu alanıyla il, Türkiye topraklarının %1,8'ini kaplamaktadır. İl merkezinin denizden yüksekliği ise 792 m'dir. Yaklaşık %22'sini dağların oluşturduğu ilin, yeryüzü şekilleri içinde ovaların payı %26 dolayındadır (www.eskisehir.gov.tr).



Şekil 4.1. Eskişehir ili haritası (www.eskisehir.gov.tr).

4.2 Çifteler İlçesinin Yeri

Çifteler ilçesi; doğuda Sivrihisar, batıda Seyitgazi, güneybatıda Han, kuzeyde Mahmudiye, güneyde Afyon ile çevrilidir. Daha önce Çifteler Köyü olan ilçe, 1954 yılında çıkarılan 28 Haziran 1954 tarih ve 6821 sayılı kanunla Çifteler ilçe merkezi olmuştur. Yüz ölçümü 820 km² dir. Ortalama rakımı 875 m'dir. Yazları kurak ve sıcak, kışları soğuk ve kurak, ilkbahar ve sonbahar serin ve yağışlı geçer. İlçede 61.850 hektar tarım arazisinin 14.000 hektarında sulu tarım, 47.580 hektarında kuru tarım yapılmaktadır. 1755 hektarı ormanlıktır (www.eskisehir.gov.tr).

4.3 Mahmudiye İlçesinin Yeri

Mahmudiye, İç Anadolu coğrafi bölgesinin kuzeybatısında, Yukarı Sakarya Bölümü'nde ve Eskişehir'e bağlı bir ilçedir. Mahmudiye ilçesi kuzeyinde Alpu, kuzeydoğusunda Beylikova, doğusunda Sivrihisar, güneyinde Çifteler ve batısında Seyitgazi ilçeleri ile çevrelenmiştir. Komşusu olan ilçelerin tamamı Eskişehir'e bağlıdır. İlçenin merkezinden, kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda geçen Eskişehir - Konya karayolunun önemi büyüktür. Mahmudiye, Eskişehir'in güneydoğusunda ve 51 km. uzaklıkta, Konya asfaltı üzerinde 3,5 km. lik yol boyu yerleşimi şeklinde kurulan ilçedir. Mahmudiye ilçesi, Greenwich başlangıcına göre 30 derece 49 dakika ve 31 derece 10 dakika doğu boylamları ile 39 derece 23 dakika ve 39 derece 40 dakika kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. İlçenin yüzölçümü ise 676 km²dir (www.mahmudiye.gov.tr).

4.4 Sivrihisar İlçesinin Yeri

Sivrihisar ilçesi, doğuda Günyüzü ve Ankara, batıda Çifteler ve Mahmudiye, kuzeyde Beylikova ve Mihaliççık, güneyde ise Konya ve Afyon ile çevrilidir. İlçenin yüzölçümü ise 2987 km²dir (www.wikipedia.org).

4.5 Eskişehir ve Yöresindeki Rüzgar Yönleri ve Rüzgar Hızları Ölçümleri

Bu çalışmada DMI'nin Eskişehir merkezindeki 17126 numaralı ve Eskişehir'e bağlı 17723 numaralı Çifteler, 17899 numaralı Mahmudiye, 17726 numaralı Sivrihisar ilçelerindeki istasyonlarından alınan 2007, 2008 ve 2009 yıllarına ait saatlik rüzgar ölçüm verileri kullanılmıştır. İstasyonlardaki ölçümler 10 mde yapılmıştır. Aşağıda bölgelerin DMI'ye ait istasyonlarının deniz seviyesinden yükseklikleri, bu yükseklikteki hava yoğunluğu(ρ) ve istasyonların konumları verilmiştir.

Eskişehir rakımı 779 mdir. $\rho=1,1309 \text{ kg/m}^3$ alınmıştır.

K $39^\circ 47' 23''$ (enlem)

D $30^\circ 30' 47''$ (boylam)

Çifteler rakımı 875 mdir. $\rho=1,1219 \text{ kg/m}^3$ alınmıştır.

K $39^\circ 22' 44''$

D $31^\circ 02' 30''$

Mahmudiye rakımı 889 mdir. $\rho=1,1216 \text{ kg/m}^3$ alınmıştır.

K $39^\circ 29' 44''$

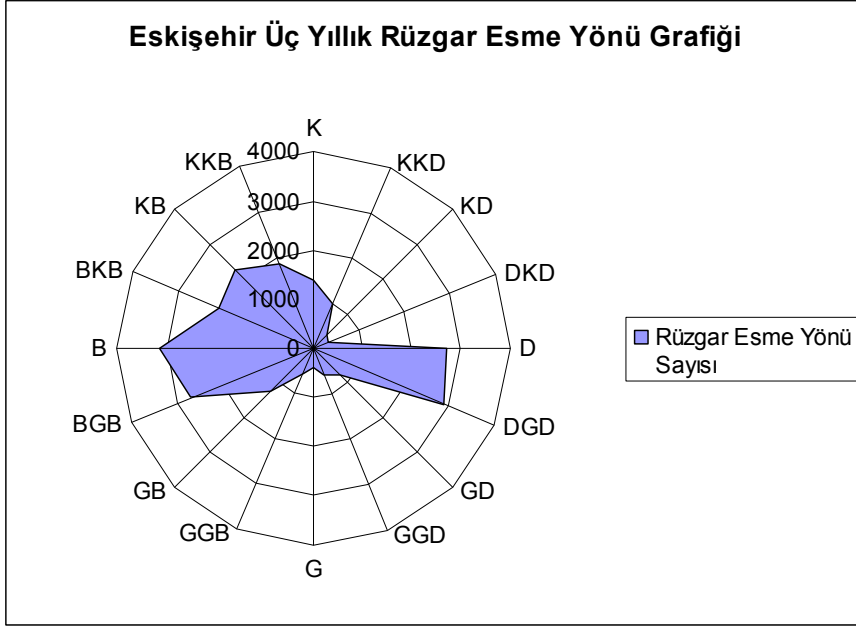
D $30^\circ 59' 08''$

Sivrihisar rakımı 1070 mdir. $\rho=1,0955 \text{ kg/m}^3$ alınmıştır.

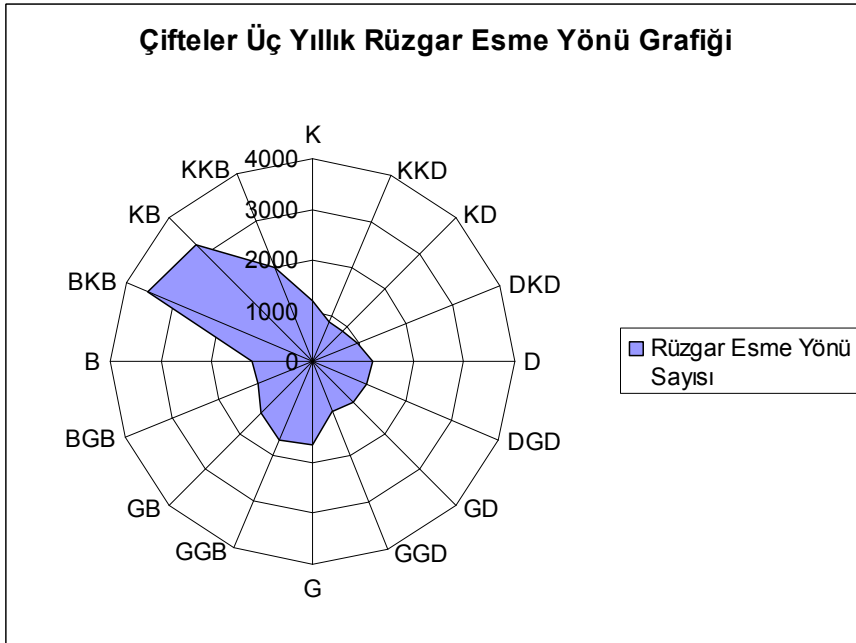
K $39^\circ 26' 39''$

D $31^\circ 32' 03''$

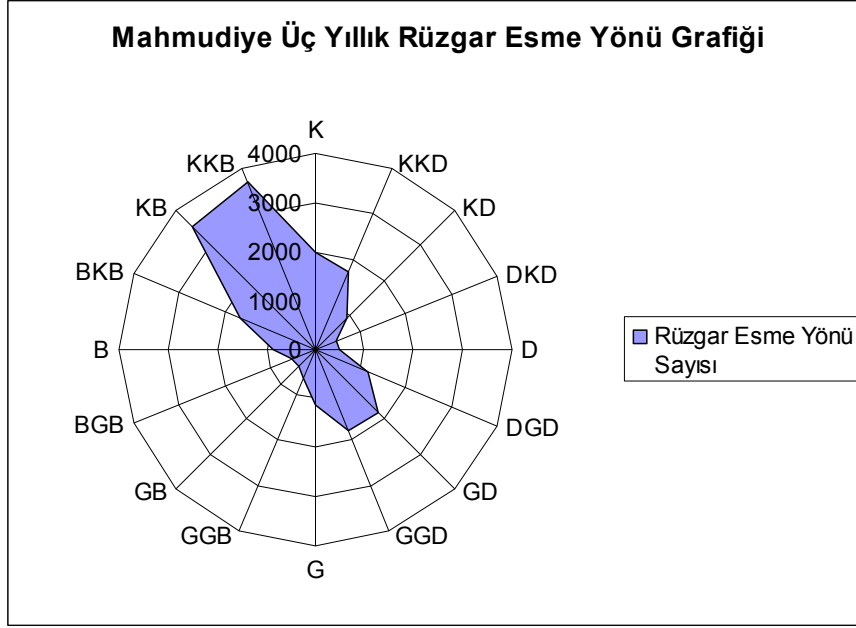
Her bölge için rüzgar gülü, rüzgar elektrik santrali kurulumu için yapılan ölçümlerde aralarında $22,5$ derecelik açılar bulunan 16 sektöre ayrılarak çizdirilmiştir. Bu dört istasyonda yapılan üç yıllık ölçüm sonuçlarına göre rüzgar esme sıklıkları her bölge için aşağıda verilmiştir.



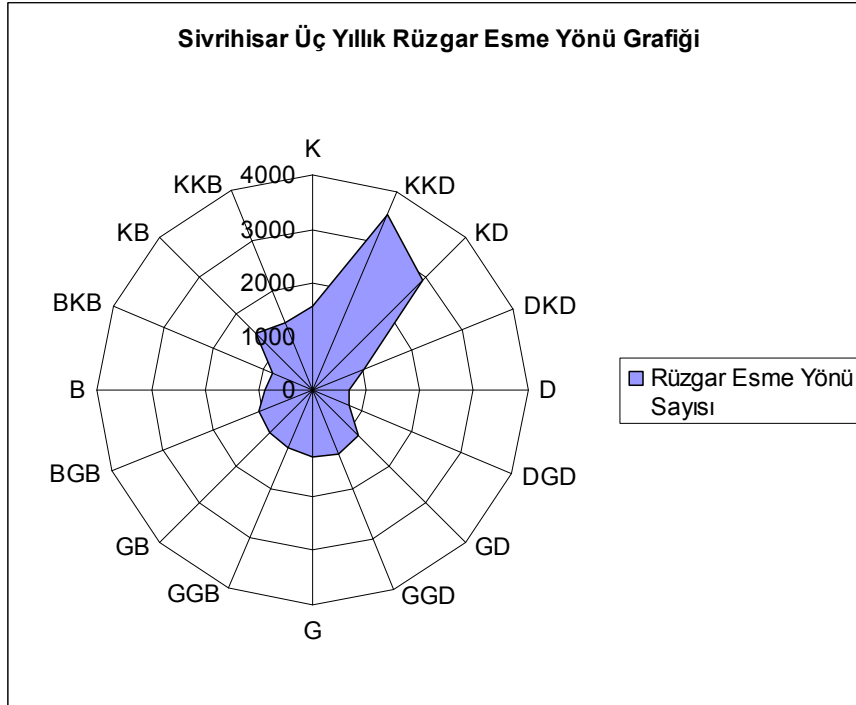
Şekil 4.2. Eskişehir üç yıllık rüzgar esme yönü grafiği hızları (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.3. Çifteler üç yıllık rüzgar esme yönü grafiği (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.4. Mahmudiye üç yıllık rüzgar esme yönü grafiği (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).

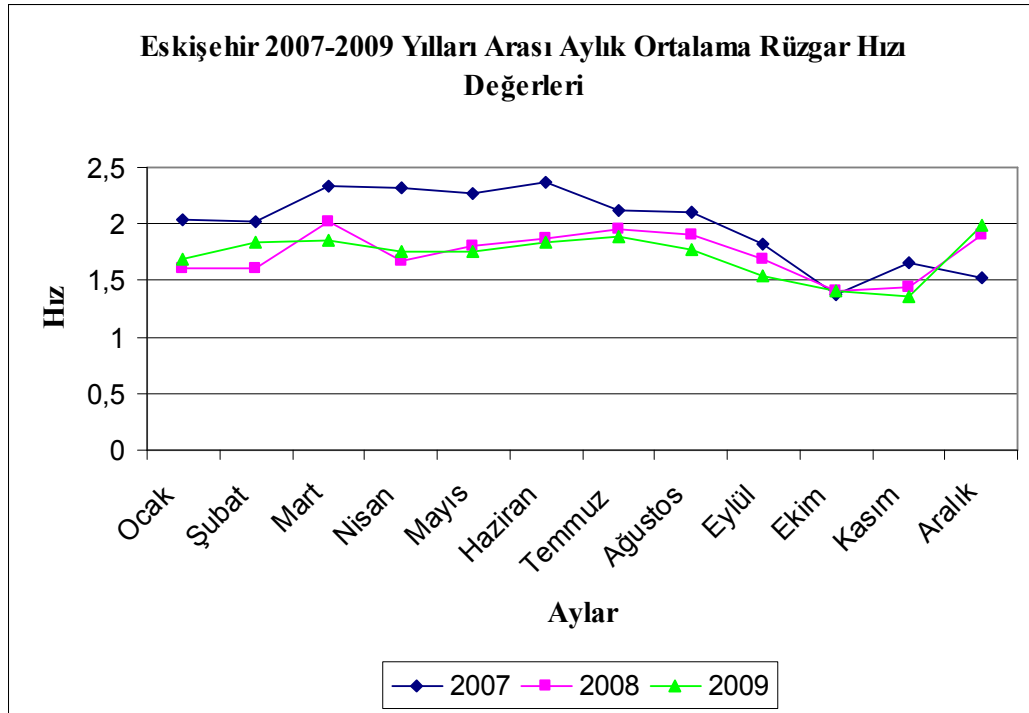


Şekil 4.5. Sivrihisar üç yıllık rüzgar esme yönü grafiği (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).

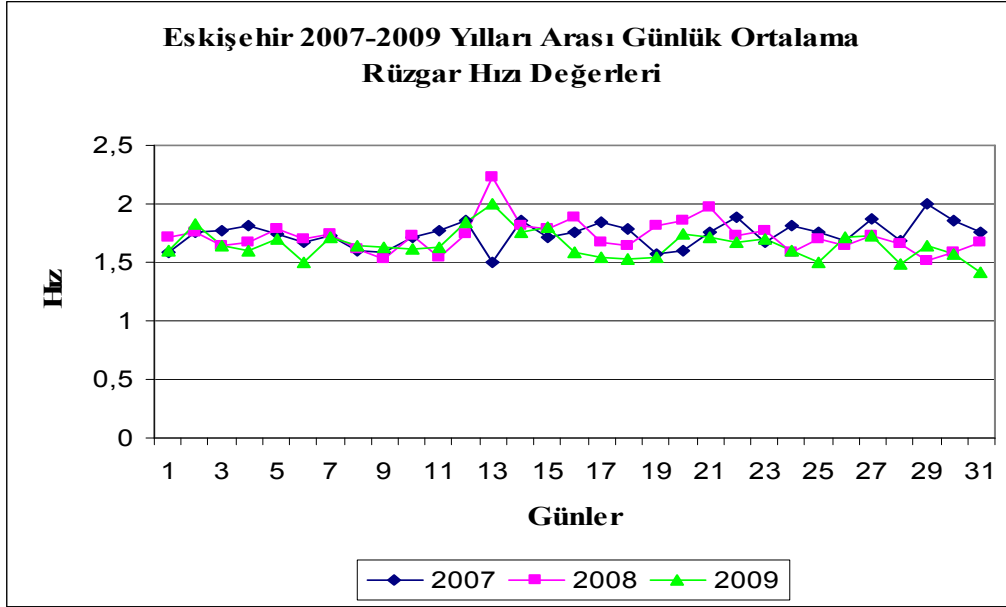
Bu grafikler incelendiğinde hakim rüzgar yönlerinin Eskişehir bölgesinde batı yönünde, Çifteler’de batı-kuzeybatı yönünde, Mahmudiye’de kuzey-kuzeybatı yönünde, Sivrihisar’da ise kuzey-kuzeydoğu yönünde olduğu görülmektedir.

Rüzgarın estiği yönlerin bilinmesi, rüzgar türbinlerin yerleştirilmesinde önemli bir rol oynar. Böylece birden fazla türbine sahip olan santrallerdeki türbinler, birbirini rüzgar yönünden gölgelememiş olurlar. Rüzgarın çoğu zaman aynı yönden esmesi, elde edilen enerjiyi artırır.

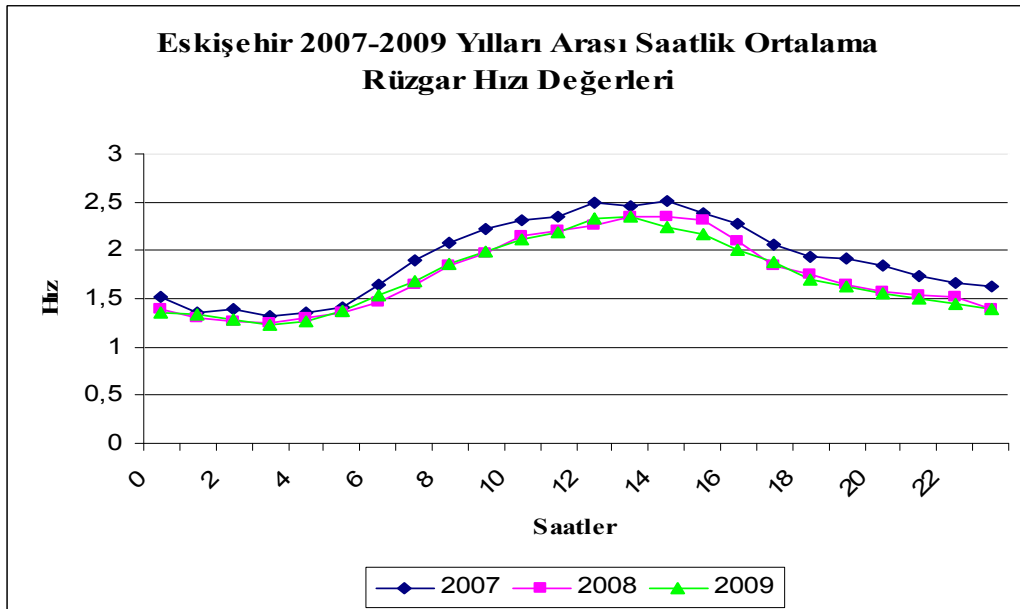
Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü verilerine göre Eskişehir’in 3 yıllık ortalama aylık, günlük ve saatlik rüzgar hızı değerleri Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.6. Eskişehir 2007-2009 yılları arası aylık ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.7. Eskişehir 2007-2009 yılları arası günlük ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.8. Eskişehir 2007-2009 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).

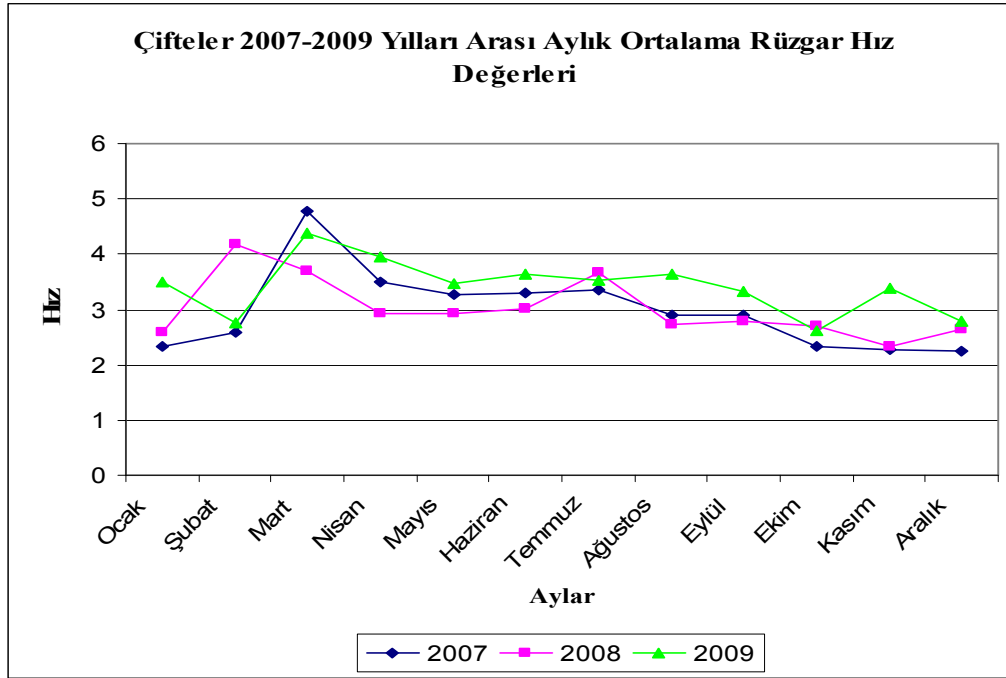
Şekil 4.6 incelendiğinde 2007 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 2,37 m/s ile haziran ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,52 m/s ile aralık ayında;

2008 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 2,01 m/s ile mart ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,40 m/s ile ekim ayında; 2009 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 1,99 m/s ile aralık ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,36 m/s ile kasım ayında estiği belirlenmiştir.

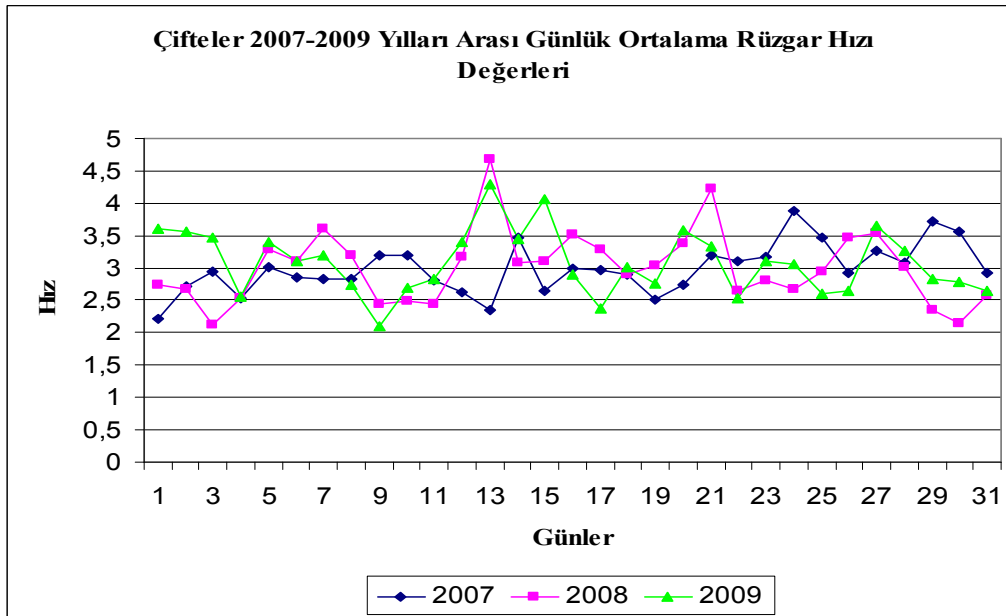
Şekil 4.7’de 2007 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 2,00 m/s ile her ayın on üçüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,59 m/s ile her ayın birinci gününde; 2008 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 2,00 m/s ile her ayın yirmi dokuzuncu gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,49 m/s ile her ayın on üçüncü gününde; 2009 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 2,22 m/s ile her on üçüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,51 m/s ile her ayın yirmi dokuzuncu gününde estiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.8’e bakıldığında 2007 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 2,50 m/s ile her günün on dördüncü saatinde, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 1,33 m/s ile her günün üçüncü saatinde; 2008 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 2,36 m/s ile her günün on üçüncü saatinde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,25 m/s ile her günün üçüncü saatinde; 2009 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 2,35 m/s ile her günün on üçüncü saatinde, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 1,23 m/s ile her günün üçüncü saatinde estiği görülmüştür.

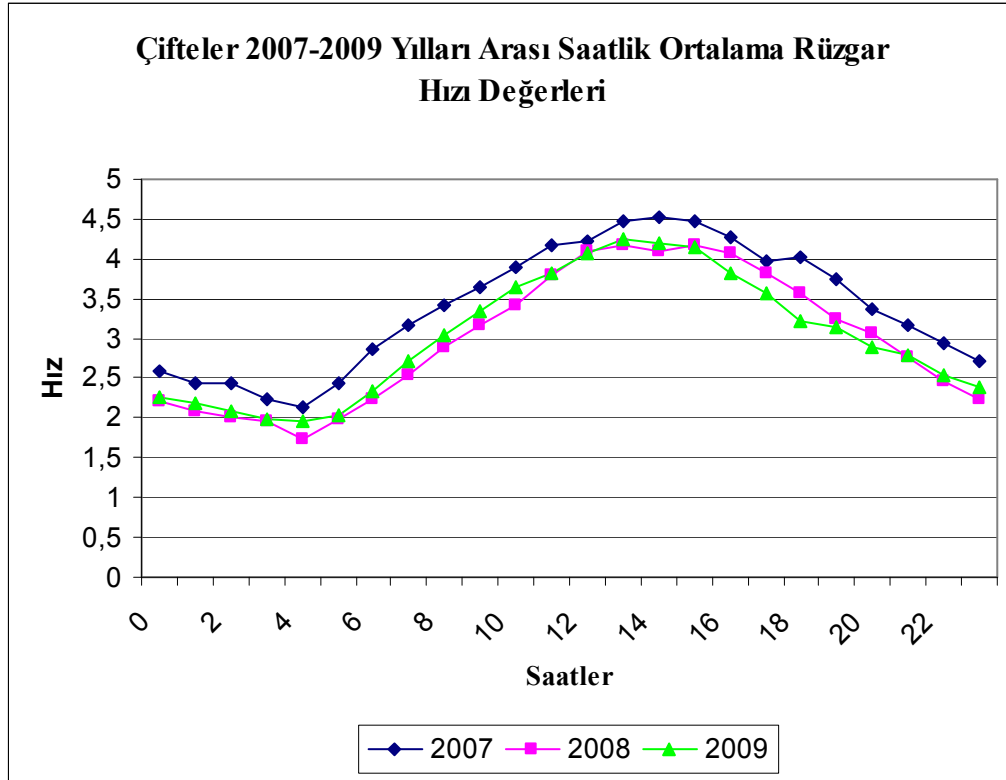
Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü verilerine göre Çifteler’in 3 yıllık ortalama aylık, günlük ve saatlik rüzgar hızı değerleri Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.9. Çifteler 2007-2009 yılları arası aylık ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.10. Çifteler 2007-2009 yılları arası günlük ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



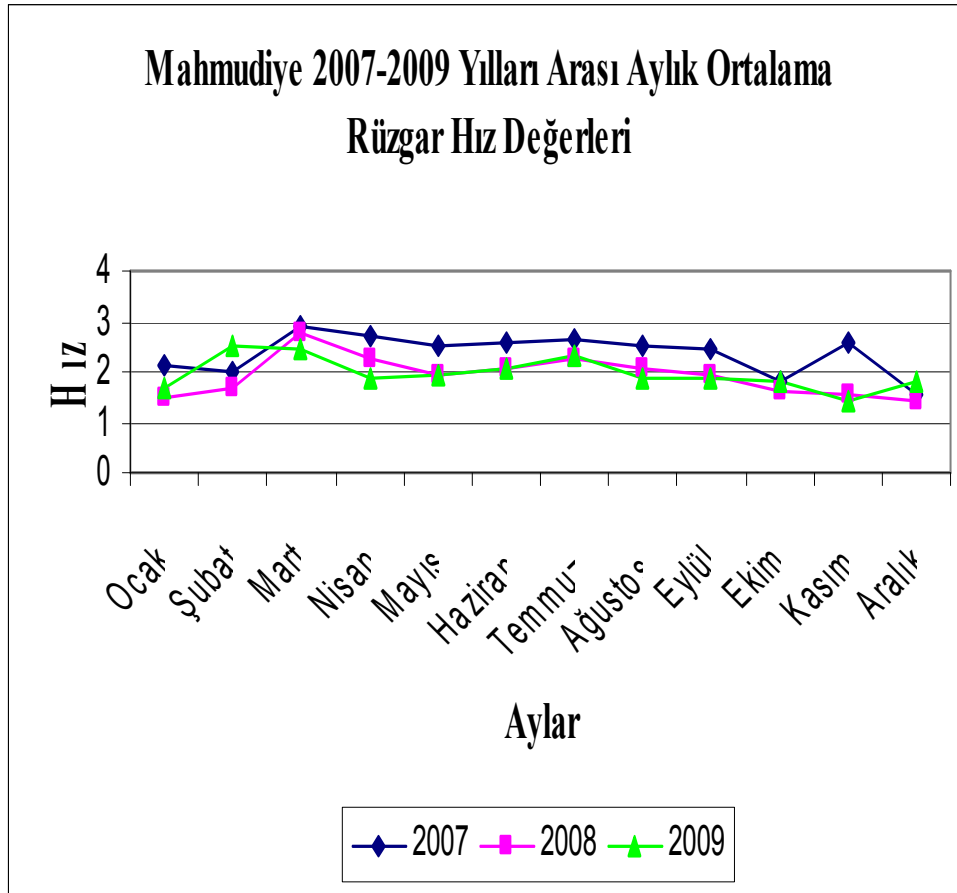
Şekil 4.11. Çifteler 2007-2009 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).

Şekil 4.9 incelendiğinde 2007 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 4,39 m/s ile mart ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 3,61 m/s ile ekim ayında; 2008 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 4,77 m/s ile mart ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 2,24 m/s ile aralık ayında; 2009 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 4,17 m/s ile şubat ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 2,34 m/s ile kasım ayında estiği belirlenmiştir.

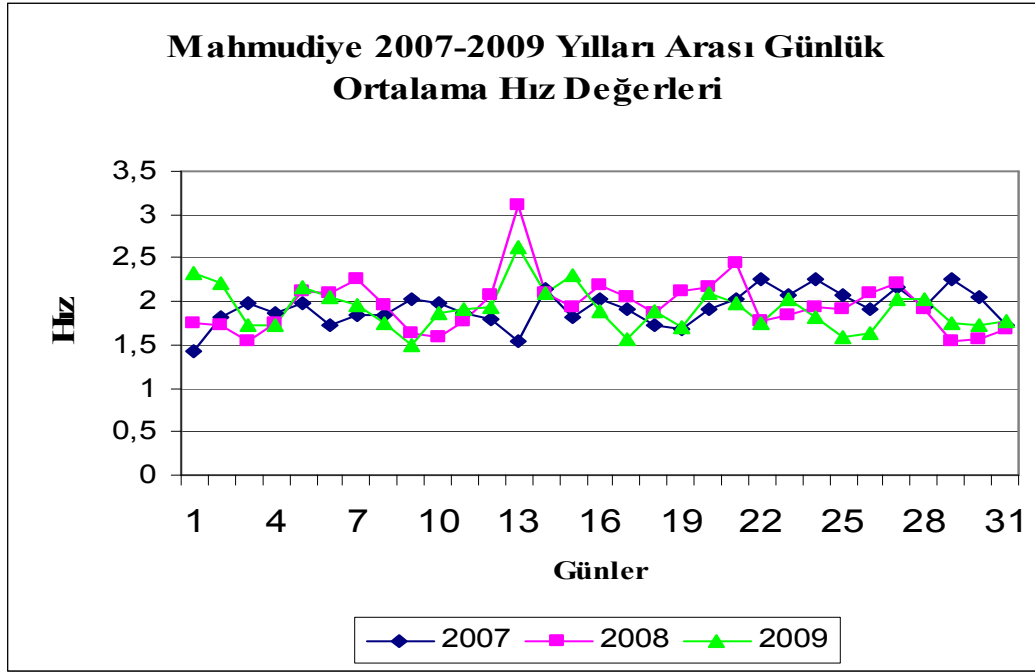
Şekil 4.10'da 2007 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 4,30 m/s ile her ayın on üçüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 2,10 m/s ile her ayın dokuzuncu gününde; 2008 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 3,87 m/s ile her ayın yirmi dördüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 2,22 m/s ile her ayın birinci gününde; 2009 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 4,69 m/s ile her on üçüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 2,13 m/s ile her ayın üçüncü gününde estiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.11'e bakıldığında 2007 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 4,51 m/s ile her günün on dördüncü saatinde, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 2,14 m/s ile her günün dördüncü saatinde; 2008 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 4,17 m/s ile her günün on beşinci saatinde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,74 m/s ile her günün dördüncü saatinde; 2009 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 4,25 m/s ile her günün on üçüncü saatinde, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 1,96 m/s ile her günün dördüncü saatinde estiği görülmüştür.

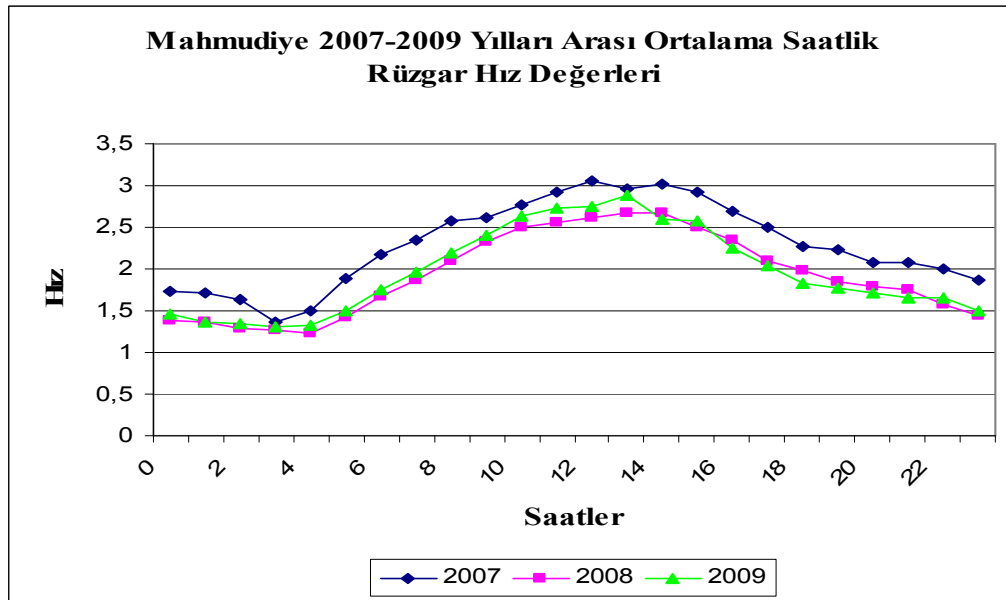
Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü verilerine göre Mahmudiye'nin 3 yıllık ortalama aylık, günlük ve saatlik rüzgar hızı değerleri Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.12. Mahmudiye 2007-2009 yılları arası aylık ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.13. Mahmudiye 2007-2009 yılları arası günlük ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



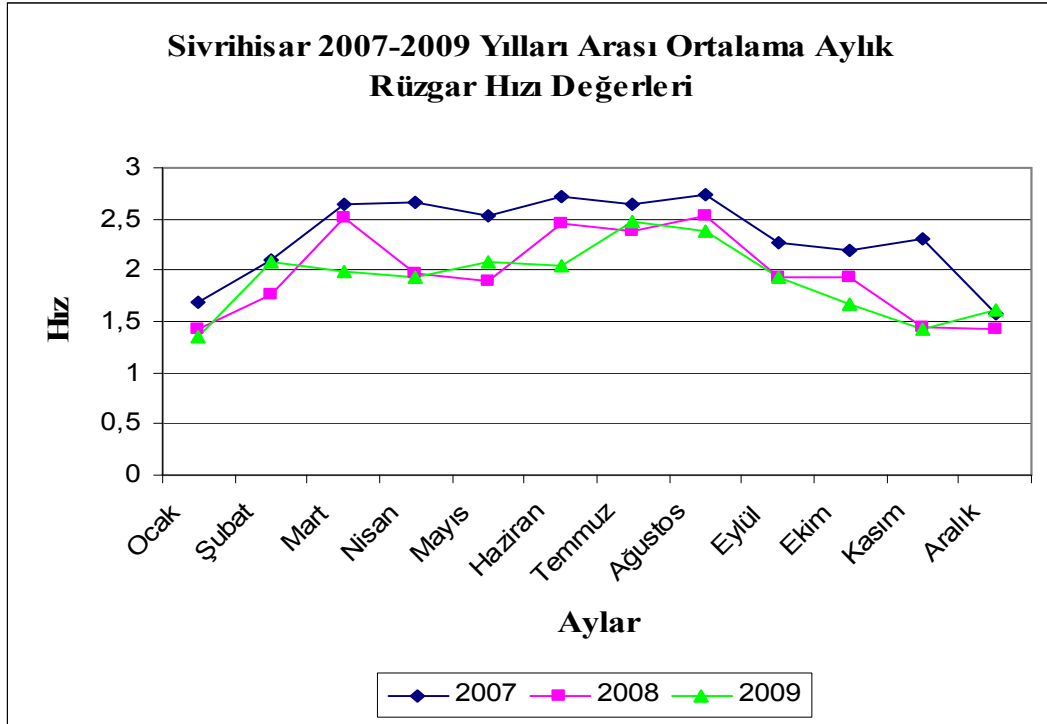
Şekil 4.14. Mahmudiye 2007-2009 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).

Şekil 4.12 incelendiğinde 2007 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 2,90 m/s ile mart ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,56 m/s ile aralık ayında; 2008 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 2,80 m/s ile mart ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,43 m/s ile aralık ayında; 2009 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 2,53 m/s ile şubat ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,45 m/s ile kasım ayında estiği belirlenmiştir.

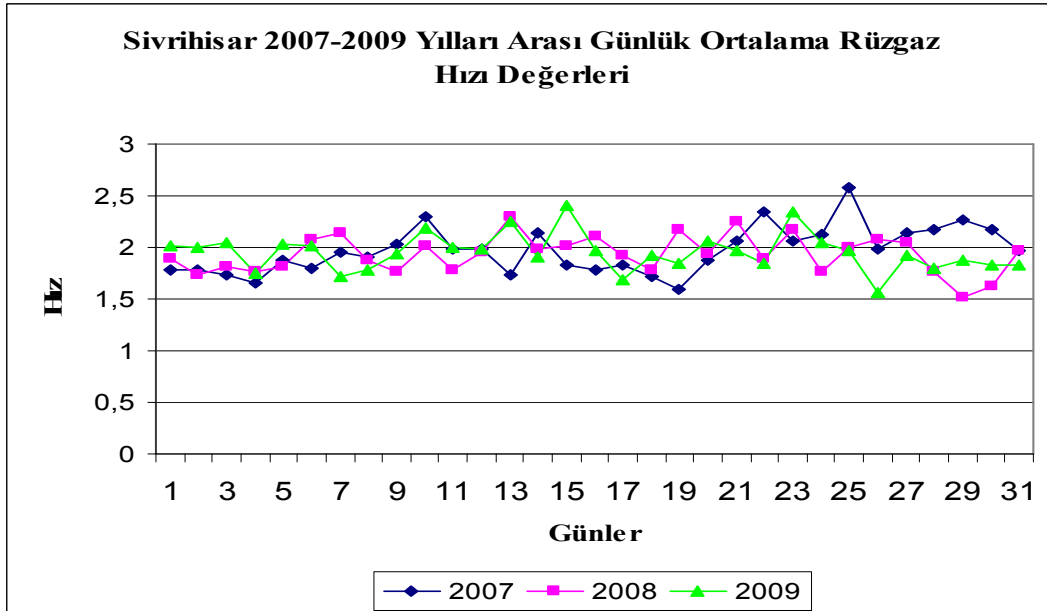
Şekil 4.13'te 2007 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 2,62 m/s ile her ayın on üçüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,50 m/s ile her ayın dokuzuncu gününde; 2008 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 2,26 m/s ile her ayın yirmi dördüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,42 m/s ile her ayın birinci gününde; 2009 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 3,11 m/s ile her on üçüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,54 m/s ile her ayın yirmi dokuzuncu gününde estiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.14'e bakıldığında 2007 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 3,10 m/s ile her günün on ikinci saatinde, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 1,37 m/s ile her günün üçüncü saatinde; 2008 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 2,67 m/s ile her günün on üçüncü saatinde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,23 m/s ile her günün dördüncü saatinde; 2009 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 2,88 m/s ile her günün on üçüncü saatinde, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 1,31 m/s ile her günün üçüncü saatinde estiği görülmüştür.

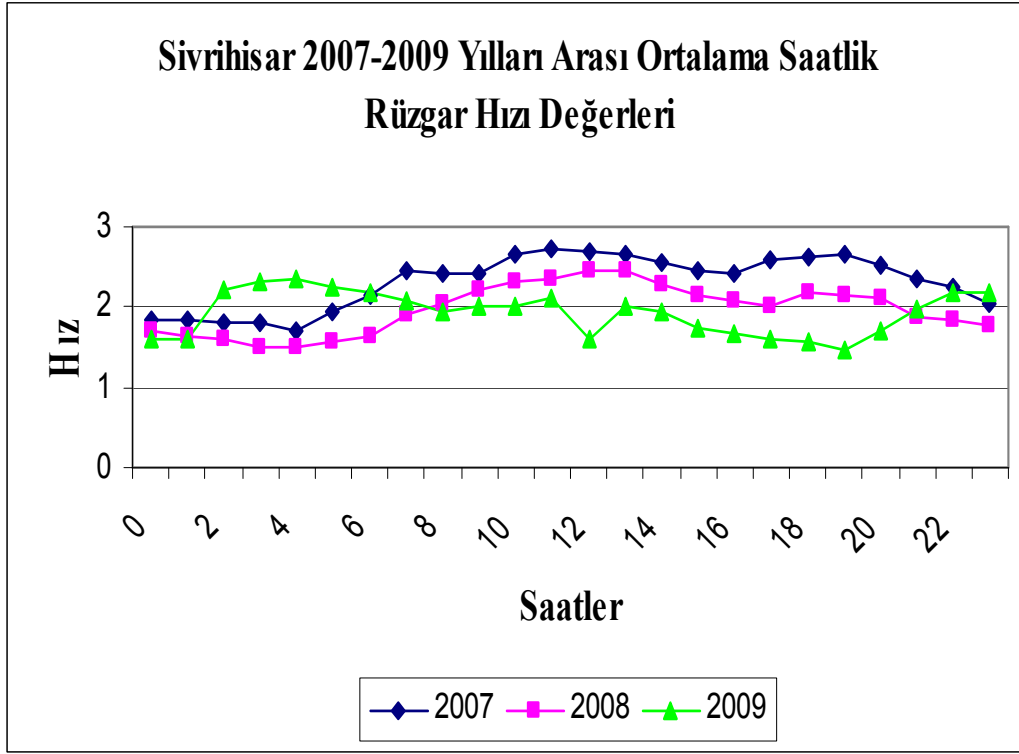
Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü verilerine göre Sivrihisar'ın 3 yıllık ortalama aylık, günlük ve saatlik rüzgar hızı değerleri Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Sivrihisar 2007-2009 yılları arası aylık ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.16. Sivrihisar 2007-2009 yılları arası günlük ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



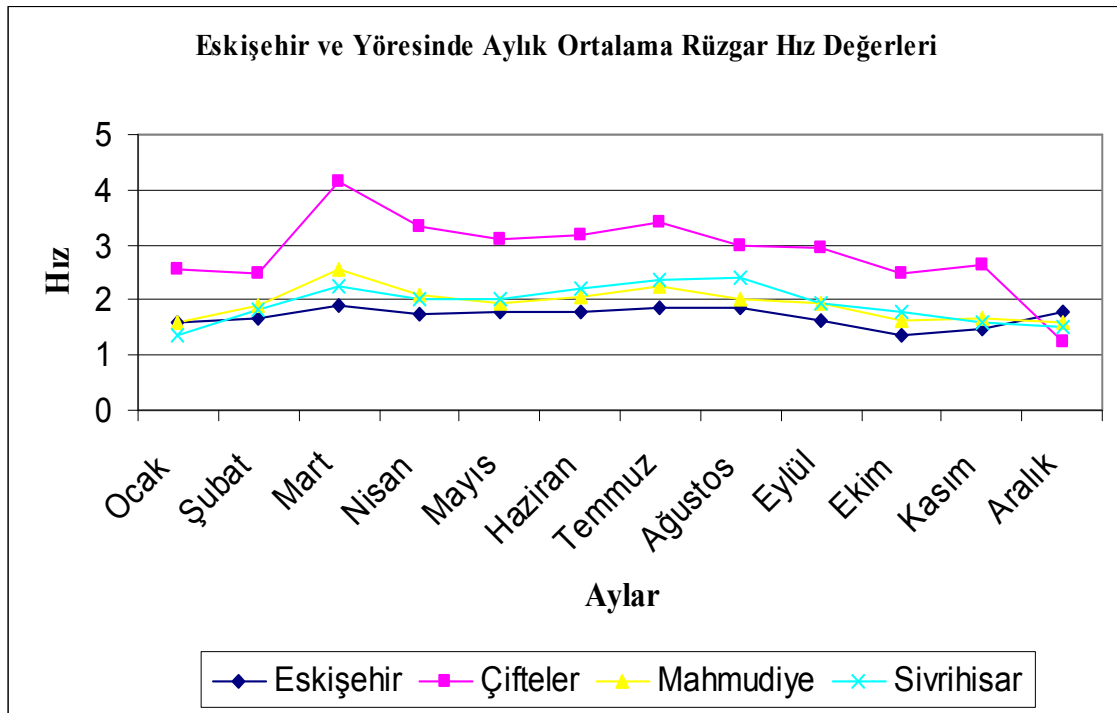
Şekil 4.17. Sivrihisar 2007-2009 yılları arası saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).

Şekil 4.15 incelendiğinde 2007 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 2,75 m/s ile ağustos ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,58 m/s ile aralık ayında; 2008 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 2,52 m/s ile ağustos ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,43 m/s ile ocak ayında; 2009 yılının en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 2,47 m/s ile temmuz ayında, en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,35 m/s ile ocak ayında estiği belirlenmiştir.

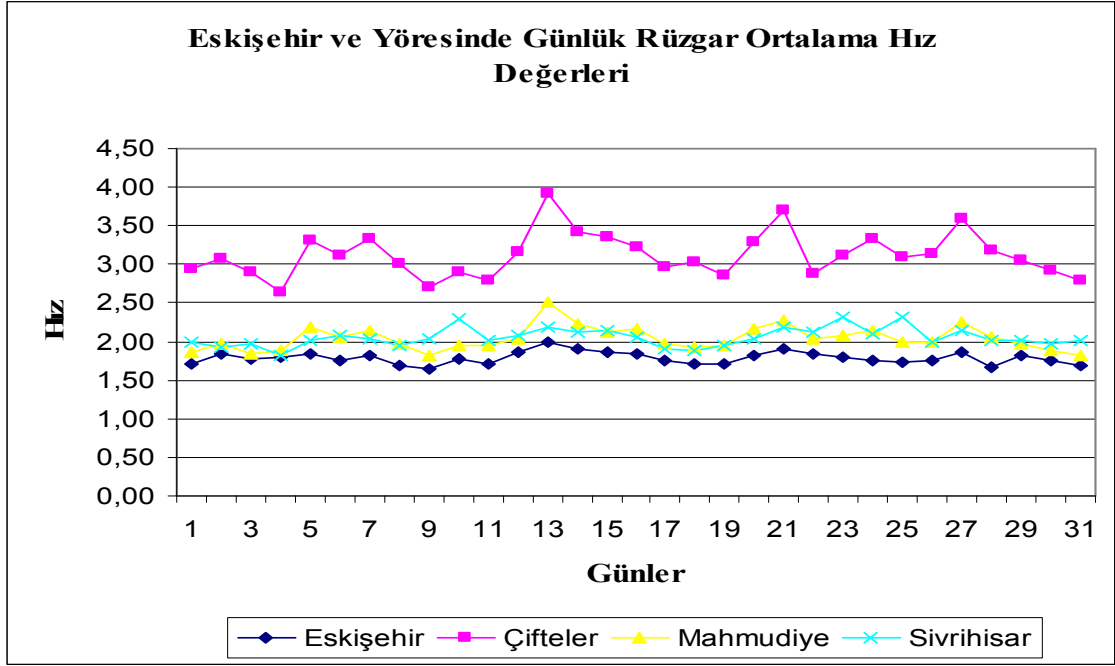
Şekil 4.16'da 2007 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 2,41 m/s ile her ayın on beşinci gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,57 m/s ile her ayın yirmi altıncı gününde; 2008 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 2,58 m/s ile her ayın yirmi beşinci gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,59 m/s ile her ayın on dokuzuncu gününde; 2009 yılının en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 2,30 m/s ile her ayın on üçüncü gününde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,52 m/s ile her ayın yirmi dokuzuncu gününde estiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.17'ye bakıldığında 2007 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 2,72 m/s ile her günün on birinci saatinde, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 1,72 m/s ile her günün dördüncü saatinde; 2008 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 2,47 m/s ile her günün on üçüncü saatinde, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,50 m/s ile her günün dördüncü saatinde; 2009 yılının en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 2,36 m/s ile her günün dördüncü saatinde, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 1,48 m/s ile her günün ondokuzuncu saatinde estiği görülmüştür.

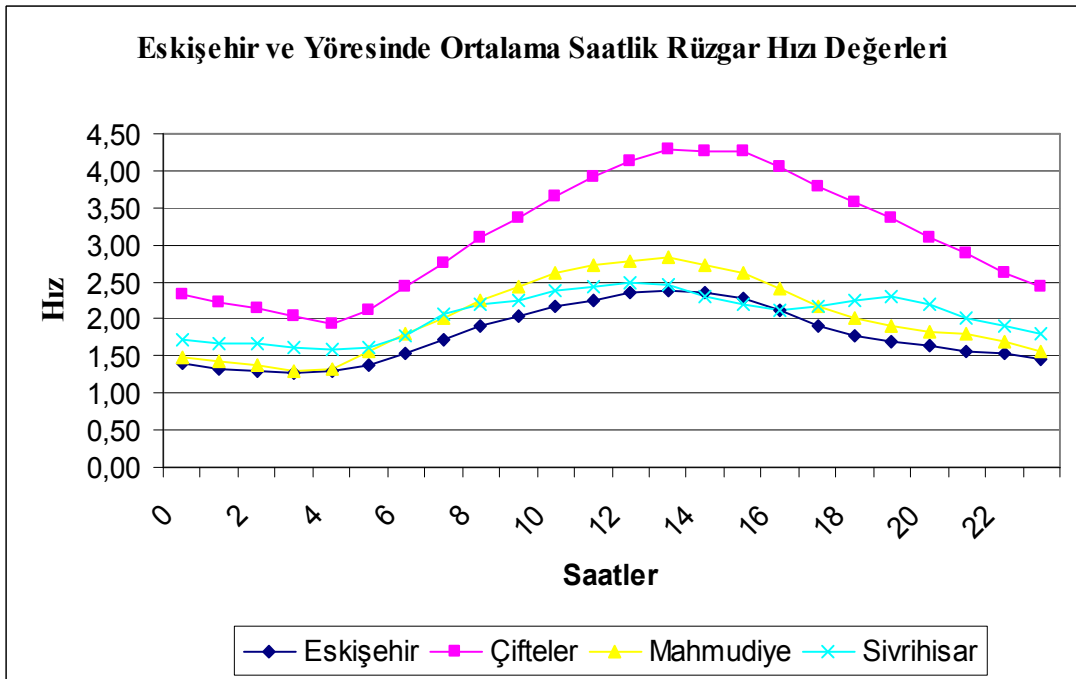
Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü verilerine göre Eskişehir ve yöresinde 3 yıllık ortalama aylık, günlük ve saatlik rüzgar hızı değerleri Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Eskişehir ve yöresinde üç yıllık aylık ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.19. Eskişehir ve yöresinde üç yıllık günlük ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).



Şekil 4.20. Eskişehir ve yöresinde üç yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009).

Şekil 4.18 incelendiğinde üç yıllık en yüksek ortalama aylık rüzgar hızının 4,15 m/s ile mart ayında Çifteler’de, üç yıllık en düşük ortalama aylık rüzgar hızının 1,37 m/s ile ekim ayında Eskişehir’de estiği görülmektedir.

Şekil 4.19’da üç yıllık en yüksek ortalama günlük rüzgar hızının 3,91 m/s ile her ayın on üçüncü gününde Çifteler’de, en düşük ortalama günlük rüzgar hızının 1,65 m/s ile her ayın dokuzuncu gününde Eskişehir’de estiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.20’ye bakıldığında üç yıllık en yüksek ortalama saatlik rüzgar hızının 3,91 m/s ile her günün on birinci saatinde Çifteler’de, en düşük ortalama saatlik rüzgar hızının 1,26 m/s ile her günün üçüncü saatinde Eskişehir’de estiği gözlemlenmektedir.

4.6 Eskişehir ve Yöresindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyellerinin Hesaplanması

Bu çalışmada Eskişehir ve yöresindeki Weibull ++7 programı, Grafik, Moment ve En Yüksek Olabilirlik metotları ile iki parametrelili Weibull dağılım parametreleri bölüm 3’te verilen formüllerle 10, 30, 50 m yükseklikler için hesaplanmıştır. Her bir bölge için üç yıllık/saatlik, yaklaşık 25000 adetlik rüzgar ölçüm değerleri kullanılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken rüzgar hızının sıfır olduğu veriler hatalı ölçüm olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada bölgelerdeki 30 ve 50 m yüksekliklerdeki hızları hesaplamak için denklem 3.12’de geçen Hellman katsayısı $\alpha = 0,2$ alınmış ve güç kanununun 100 mye kadar geçerli olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca hava yoğunluğunun yükseklik ve rüzgar hızı ile değişimi ihmal edilmiştir.

Çalışmada Grafik Yöntem ve En Yüksek Olabilirlik yöntemleri için FORTRAN programı kullanılarak k ve c değerleri hesaplanmıştır.

Grafik yöntem için Fortran programı kodu ve şekil 4.21’de akış diyagramı verilmiştir.

Fortran program kodu;

```

program grafikyontem !(Grafik Yöntem)

integer :: j

real :: ate, bate, b, a, toplam1, toplam2, toplam3, toplam4

real,dimension(25370):: x, y, f

open(unit=10,file="d:\esk.txt",status="old",action="readwrite") !(Rüzgar verilerinin
bulunduğu dosya açılır)

read (unit=10, fmt=*)f !(Rüzgar verilerinin bulunduğu dosya okunur)

toplam1=0.0

toplam2=0.0

toplam3=0.0

toplam4=0.0

do j=1,25370,1 !(Döngü içerisinde değerler hesaplanır, 25370 veri sayısıdır)

y(j)=alog(alog(1./(1.-((1./25370.)*(j-0.30685-(0.3863*((j-1.)/(25370.-1.))))))))

x(j)=alog(f(j))

toplam1=toplam1+y(j)

toplam2=toplam2+x(j)

toplam3=toplam3+x(j)**2

toplam4=toplam4+x(j)*y(j)

end do

b=(25370.0*toplam4-toplam1*toplam2)/(25370.0*toplam3-toplam2**2)

a=(toplam1/25370.0)-b*(toplam2/25370.0)

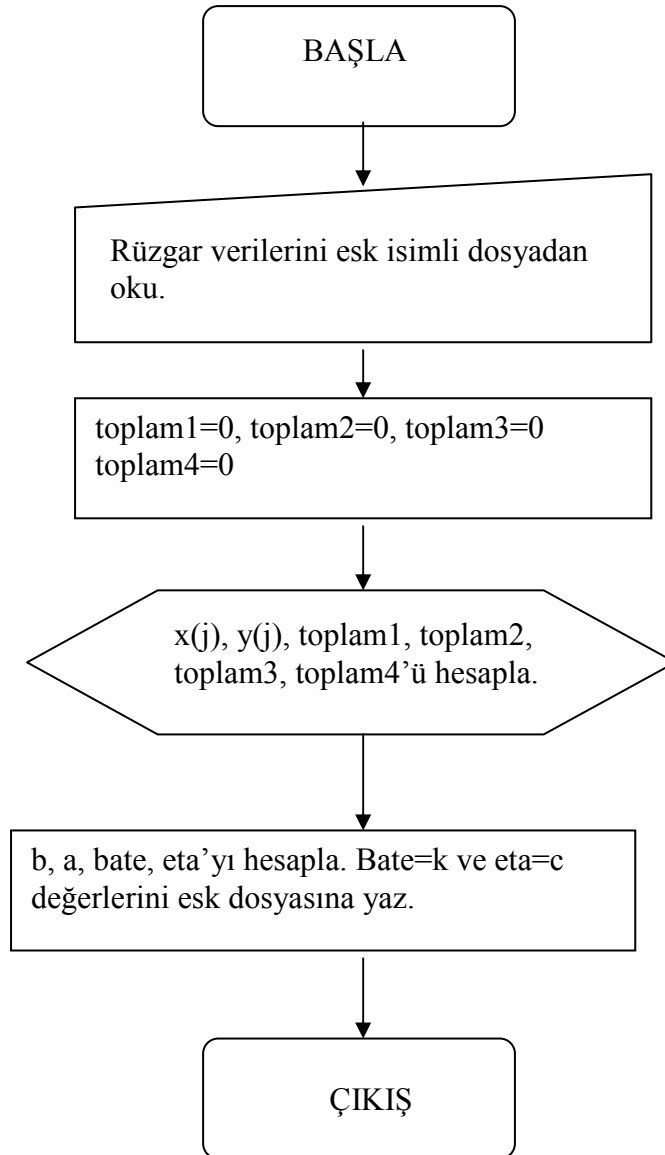
```

bate=b

ate=exp(-(a/b))

write(unit=10,fmt=*) bate, ate !(hesaplanan bate=k değeri ve ate=c değeri dosyaya yazılır)

end program grafikyontem



Şekil 4.21. Grafik yöntem için akış diyagramı.

En Yüksek Olabilirlik yöntemi için Fortran programı kodu ve şekil 4.22'de akış diyagramı verilmiştir.

Fortran program kodu;

```

program EYOY !(En Yüksek Olabilirlik Yöntemi)

integer :: j

real:: toplam1, toplam2, toplam3, toplam4 ,ate, bate, bateo, tb, tl, tat, plnt

real,dimension(25370):: f

open(unit=10,file="d:\cif.txt",status="old",action="readwrite") !(Rüzgar
verilerinin bulunduğu dosya açılır)

read (unit=10, fmt=*)f !(Rüzgar verilerinin bulunduğu dosya okunur)

bateo=1.5 !(bateo=k'ya rastgele bir değer atanır)

50  toplam1=0.0

    toplam2=0.0

    toplam3=0.0

do j=1,25370,1 !(Döngü içerisinde değerler hesaplanır, 25370 veri sayısıdır)

    tb=f(j)**bateo

    plnt=alog(f(j))

    tl=tb*plnt

    toplam1=toplam1+tb

    toplam2=toplam2+tl

    toplam3=toplam3+plnt

```

```
end do

bate=1.0/(toplaml2/toplam1-toplam3/25370.0) !(bate değeri hesaplanır)

write(unit=10, fmt=*) bate

      if((abs(bate-bateo))<=0.00001) then !(bate değeri karşılaştırılır ve
birbirleri arasındaki fark 0,00001 olana işlem devam ettirilir.)

      goto 300

      bateo=bate

      goto 50
300    toplam4=0.0

      end if

      do j=1,25370,1

tat=f(j)**bate

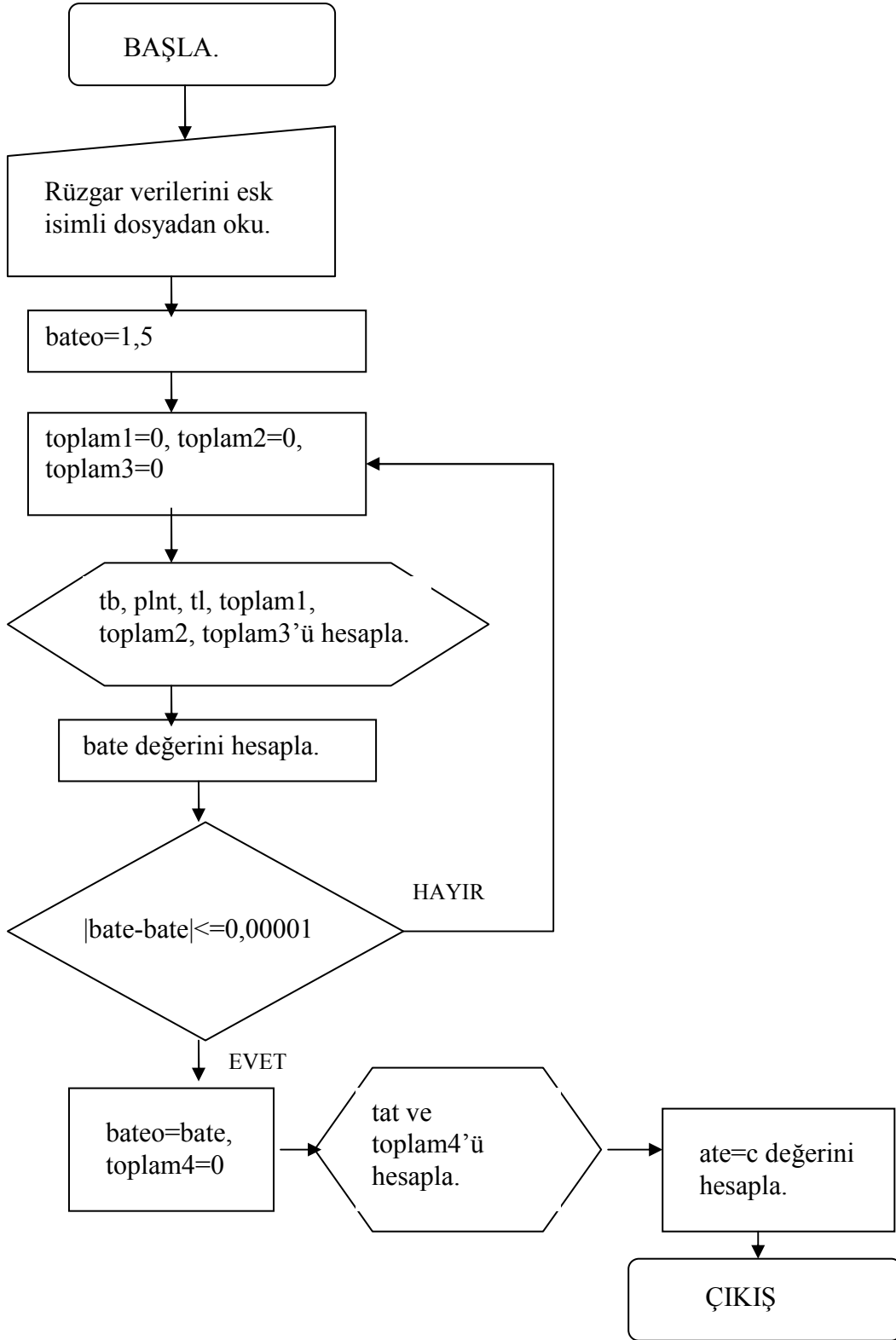
toplaml4=toplaml4+tat

end do

ate=(toplaml4/25370.0)**(1.0/bate) !(ate=c değeri hesaplanır)

write(unit=10, fmt=*) ate (hesaplanan ate=c değeri dosyaya yazdırılır)

end program EYOY
```

Şekil 4.22. En Yüksek Olabilirlik yöntemi için akış diyagramı.

Buna göre; Weibull ++7 programı, Grafik, Moment ve En Yüksek Olabilirlik Metotlarıyla iki parametrelili Weibull dağılım parametreleri Bölüm 3'te verilen formüllerle 10, 30, 50 m yükseklikler için hesaplanmasıyla aşağıdaki k ve c değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. 10 m yükseklik için k ve c değerleri.

BÖLGE	YÖNTEM TÜRÜ(10 m)							
	Weibull++7 Programı		Grafik Yöntem		Moment Yöntemi		En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	
	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)
Eskişehir Merkez	2,2358	1,9147	2,200835	1,922848	1,95467	1,938016	2,474642	2,058603
Çifteler	1,6845	3,2032	1,592564	3,267279	1,28852	3,280846	1,293397	3,274601
Mahmudiye	1,804	2,108	1,739707	2,133088	1,39977	2,14036	1,502057	2,175332
Sivrihisar	1,6599	2,1972	1,631024	2,210731	1,47893	2,216428	1,542892	2,23957

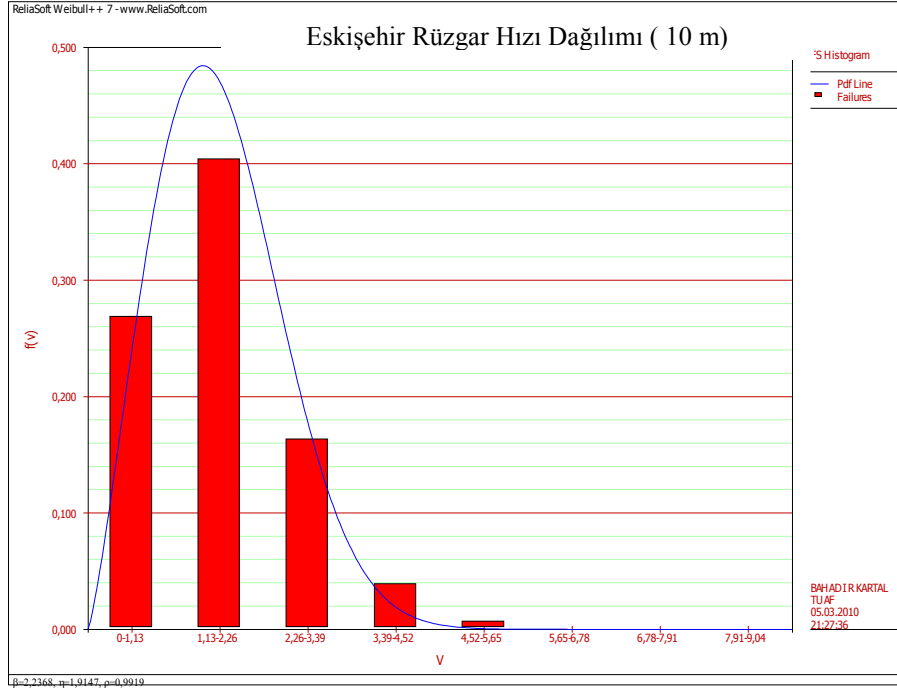
Çizelge 4.2. 30 m yükseklik için k ve c değerleri.

BÖLGE	YÖNTEM TÜRÜ(30 m)							
	Weibull++7 Programı		Grafik Yöntem		Moment Yöntemi		En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	
	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)
Eskişehir Merkez	2,2526	2,4957	2,200868	2,395309	2,06783	2,4165466	2,474841	2,564499
Çifteler	1,6951	4,1399	1,592956	4,069938	1,2859	4,085321	1,293388	4,079262
Mahmudiye	1,7891	2,7859	1,740042	2,657224	1,40103	2,6666901	1,502254	2,710078
Sivrihisar	1,6464	2,9036	1,631481	2,753869	1,47894	2,7610822	1,543093	2,790151

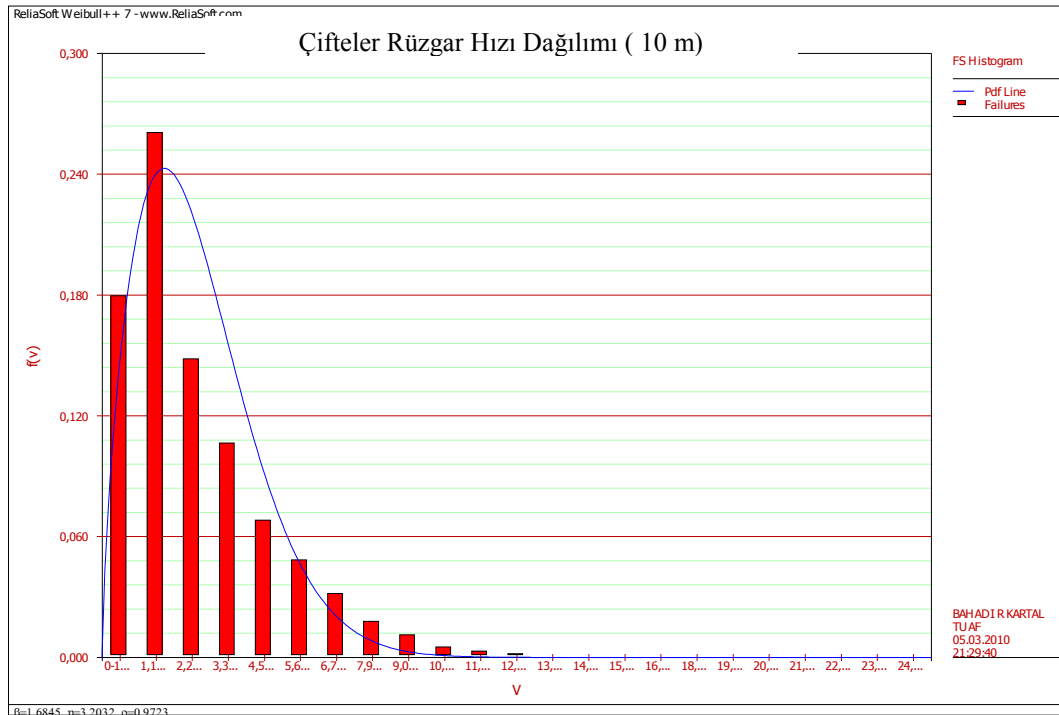
Çizelge 4.3. 50 m yükseklik için k ve c değerleri.

BÖLGE	YÖNTEM TÜRÜ(50 m)							
	Weibull++7 Programı		Grafik Yöntem		Moment Yöntemi		En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	
	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)
Eskişehir Merkez	2,2526	2,7641	2,201153	2,652978	1,945365	2,6736063	2,47518	2,84043
Çifteler	1,6951	4,5853	1,592434	4,507964	1,28852	4,526681	1,293377	4,518079
Mahmudiye	1,7891	3,086	1,739767	2,943098	1,401032	2,9535362	1,502264	3,001491
Sivrihisar	1,6464	3,2159	1,631216	3,050136	1,47984	3,0580817	1,543142	3,090244

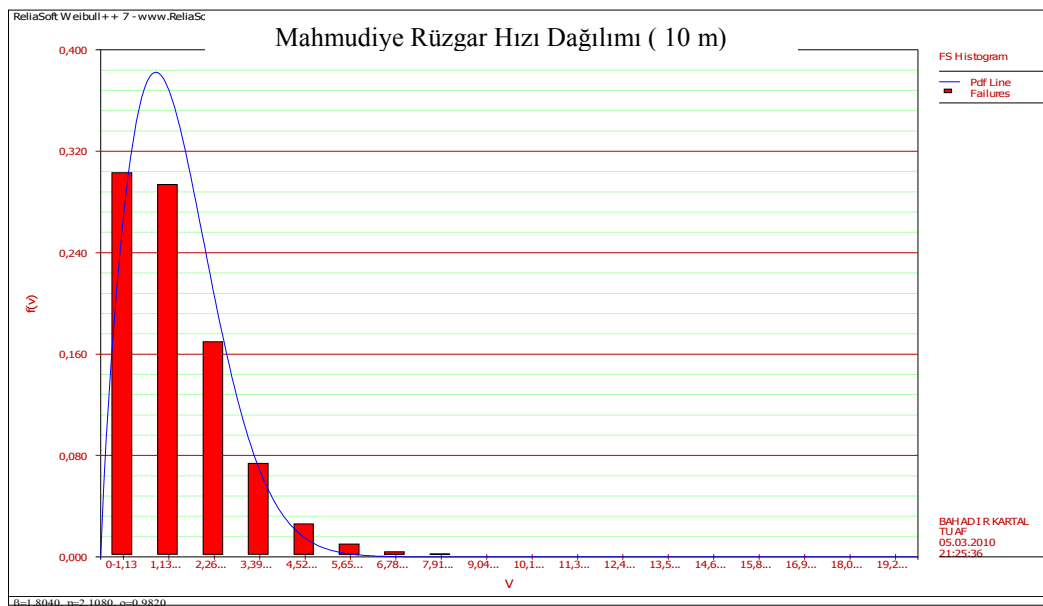
Weibull 7++ programıyla hesaplanan k ve c (m/s) değerleriyle bu programda çizdirilmiş her bir bölge için rüzgar hızı dağılımı grafikleri 10 m yükseklik için Şekil 4.23, 4.24, 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.



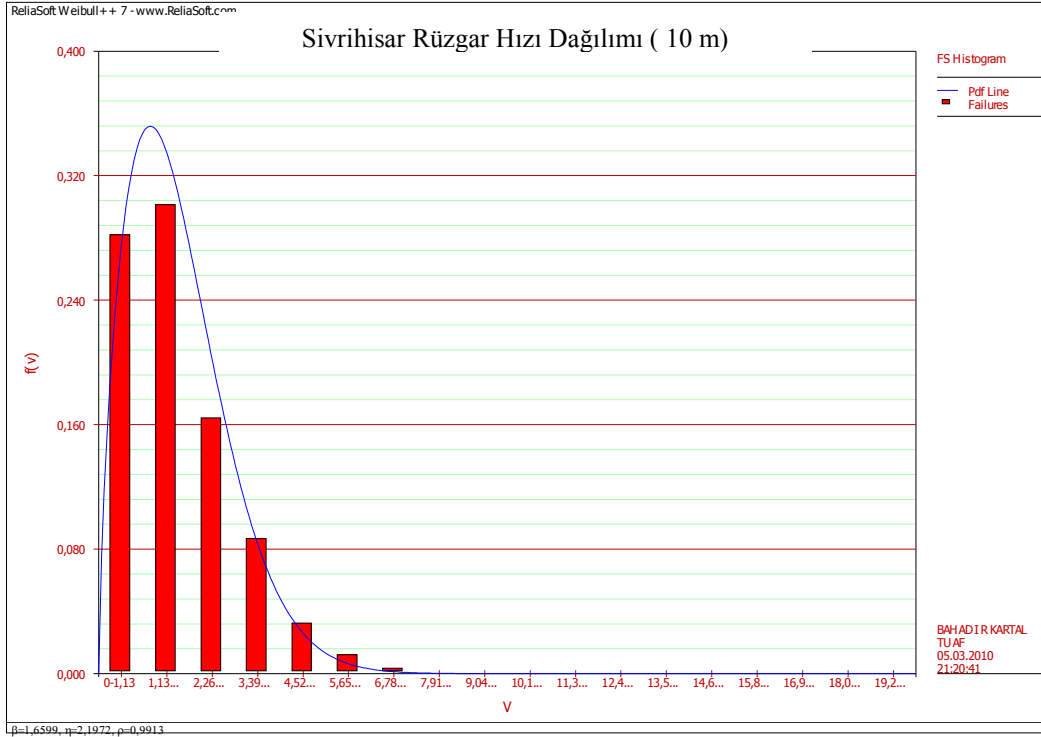
Şekil 4.23. Eskişehir 10 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.



Şekil 4.24. Çifteler 10 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.



Şekil 4.25. Mahmudiye 10 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.

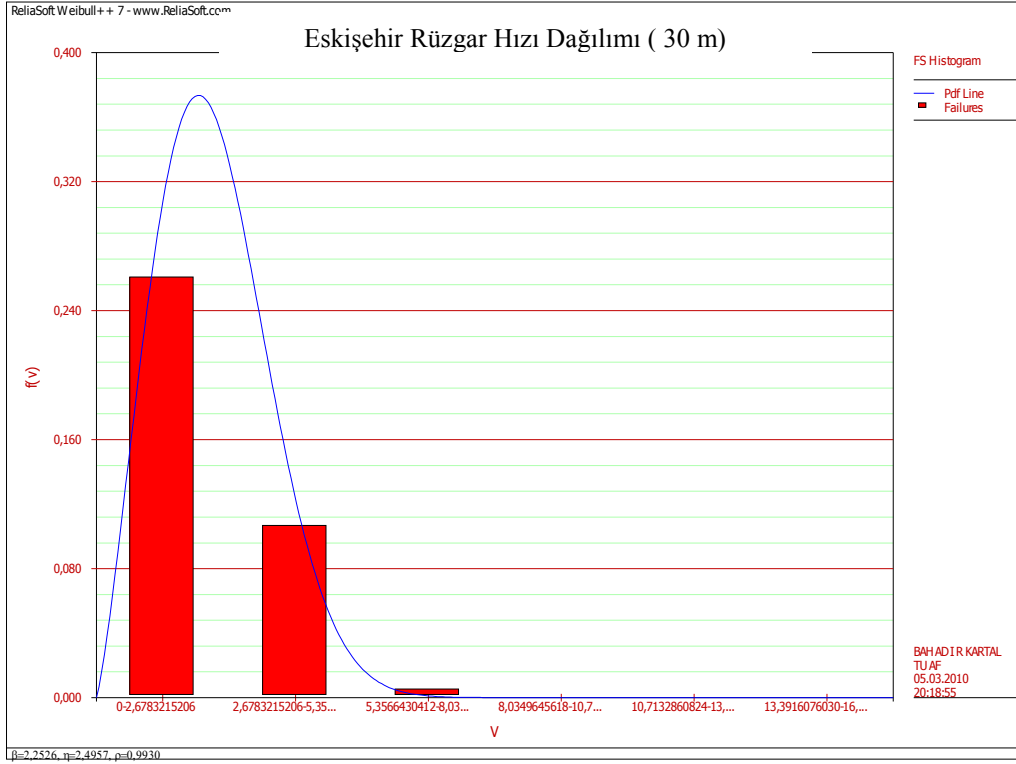


Şekil 4.26. Sivrihisar 10 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.

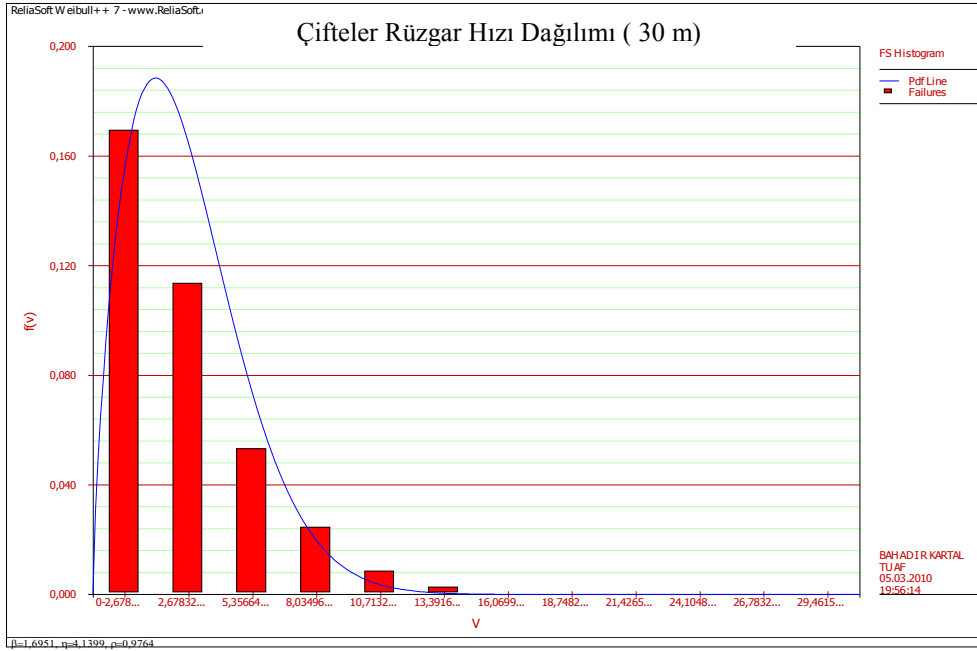
Şekil 4.23, 4.24, 4.25 ve 4.26 incelendiğinde;

- Eskişehir’de en çok rüzgar esme hızı olasılığının 1,13-2,26 m/s arasında,
- Çifteler’de en çok rüzgar esme hızı olasılığının 1,1-2,2 m/s arasında,
- Mahmudiye’de en çok rüzgar esme hızı olasılığının 0,-1,3 m/s arasında,
- Sivrihisar’da en çok rüzgar esme hızı olasılığının 1,13-2,26 m/s arasında olduğu görülmektedir.

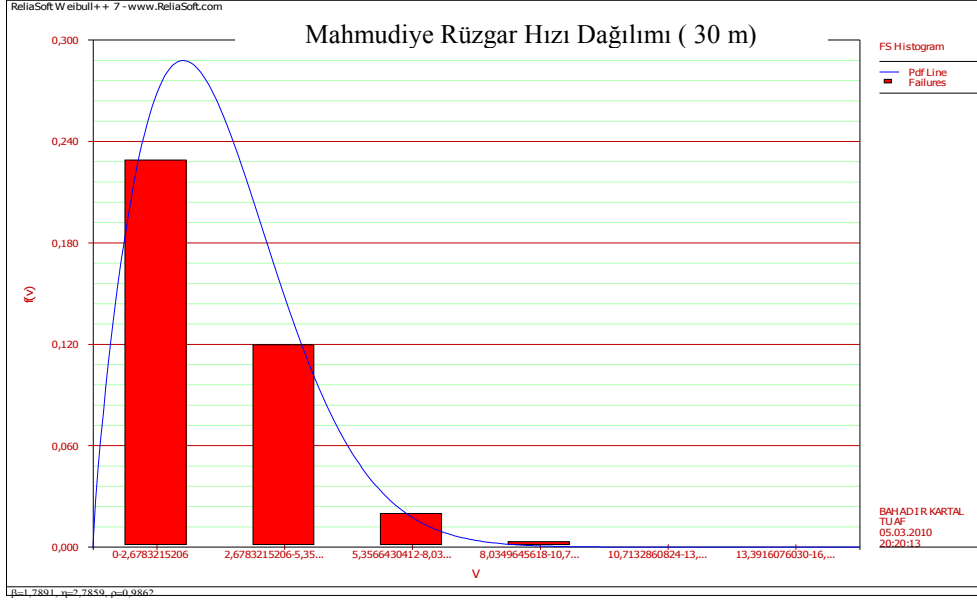
Weibull 7++ programıyla hesaplanan k ve c (m/s) değerleriyle her bir bölge için rüzgar hızı dağılım grafikleri 30 m yükseklik için şekil 4.27, 4.28, 4.29, 4.30’da verilmiştir.



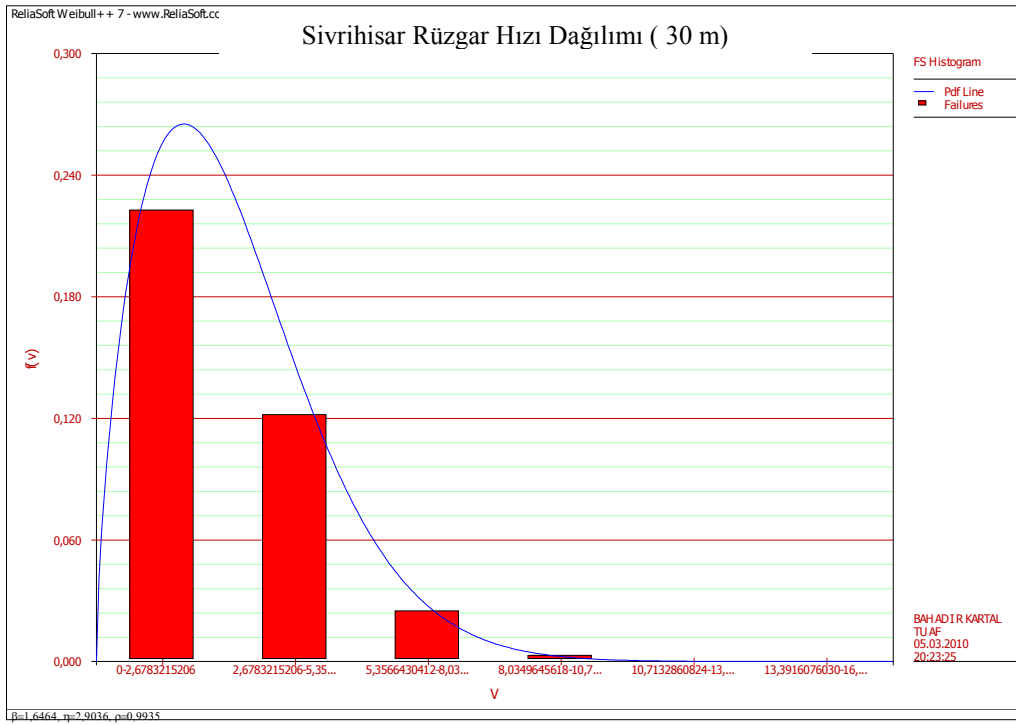
Şekil 4.27. Eskişehir 30 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.



Şekil 4.28. Çifteler 30 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.



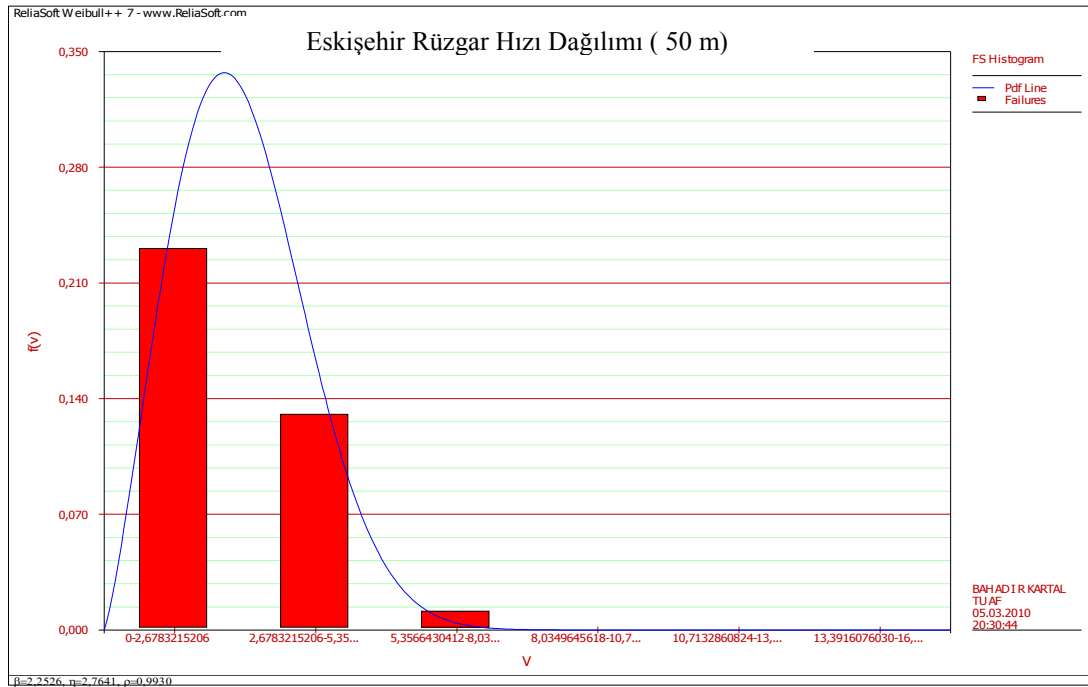
Şekil 4.29. Mahmudiye 30 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.



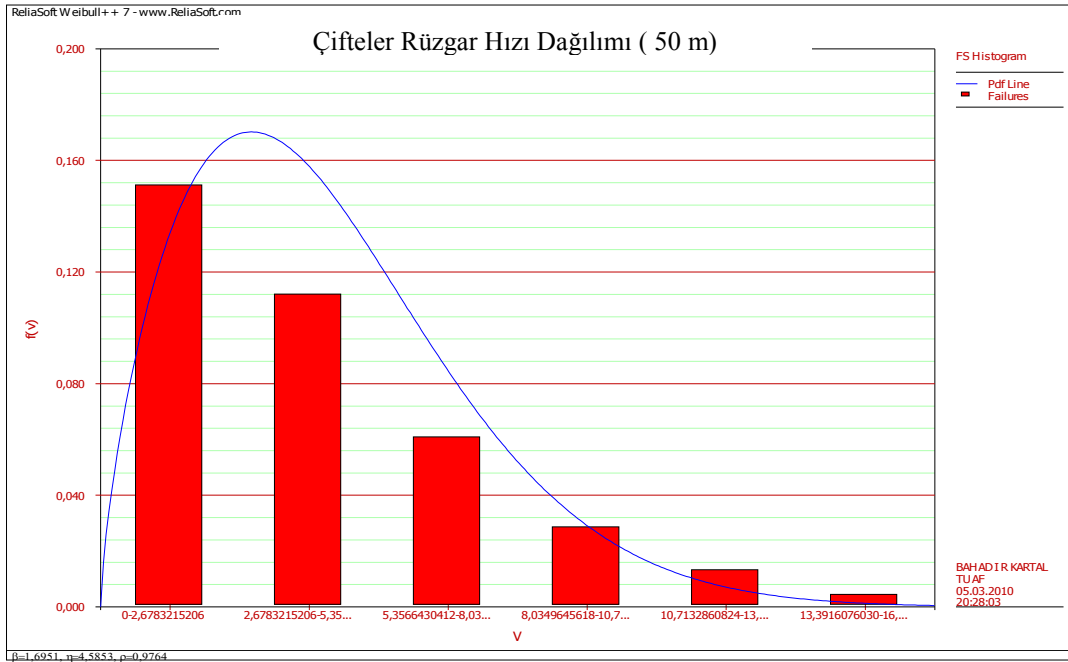
Şekil 4.30. Sivrihisar 30 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.

Şekil 4.27, 4.28, 4.29 ve 4.30 incelendiğinde; Eskişehir, Çifteler, Mahmudiye ve Sivrihisar'da en çok rüzgar esme hızı olasılığının 0,0-2,68 m/s arasında olduğu gözlemlenmektedir.

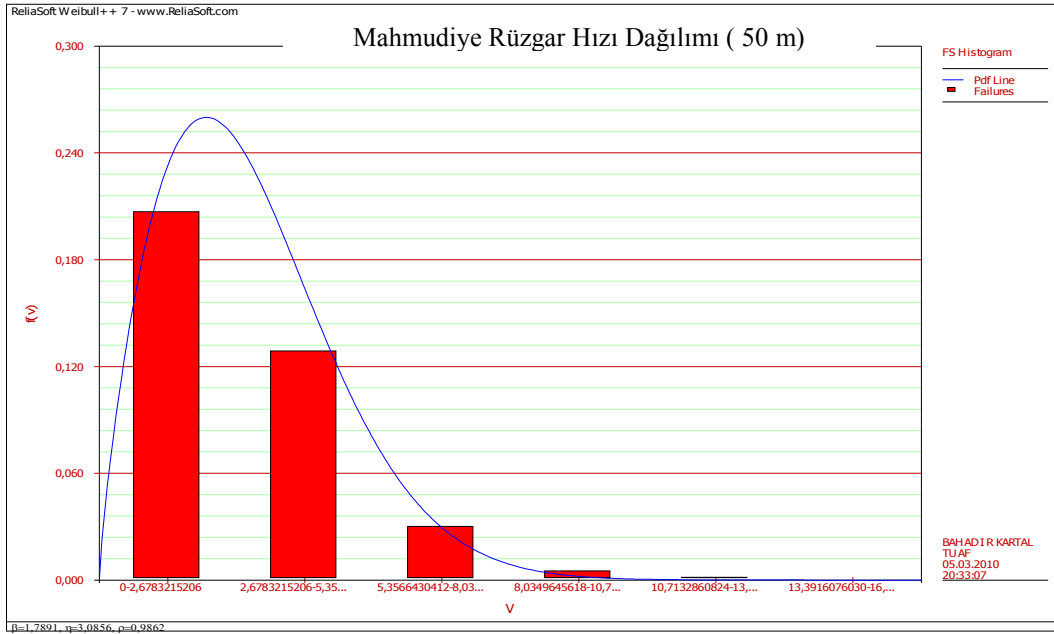
Weibull 7++ programıyla hesaplanan k ve c (m/s) değerleriyle her bir bölge için rüzgar hızı dağılım grafikleri 50 m yükseklik için Şekil 4.31, 4.32, 4.33 ve 4.34'te verilmiştir.



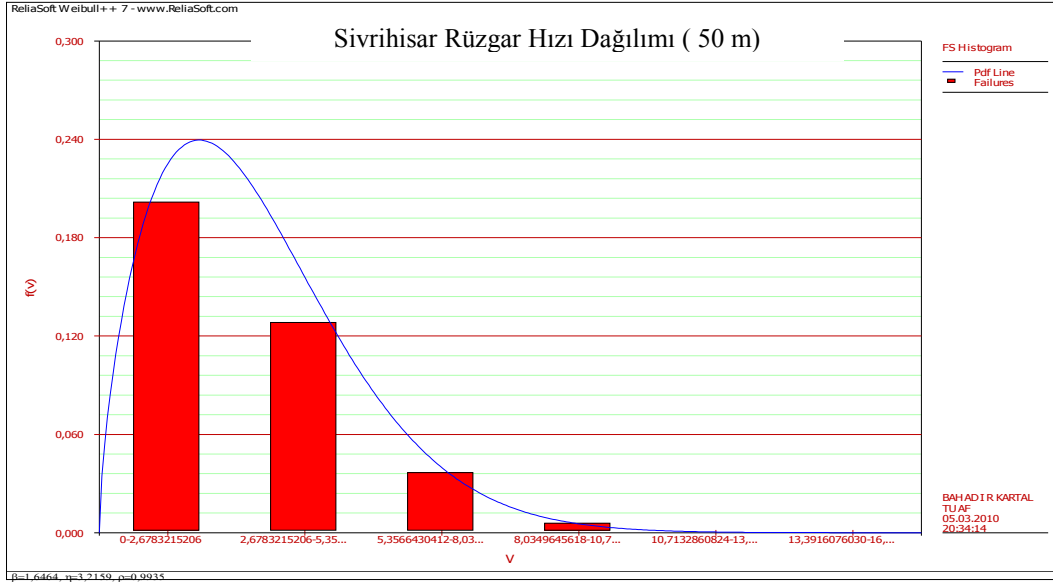
Şekil 4.31. Eskişehir 50 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.



Şekil 4.32. Çifteler 50 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.



Şekil 4.33. Mahmudiye 50 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.



Şekil 4.34. Sivrihisar 50 m. yükseklikteki Weibull7++ programı ile çizdirilen rüzgar hızı dağılım grafiği.

Şekil 4.31, 4.32, 4.33 ve 4.34 incelendiğinde; Eskişehir, Çifteler, Mahmudiye ve Sivrihisar'da en çok rüzgar esme hızı olasılığının 0,0-2,68 m/s arasında olduğu tespit edilmiştir.

4.6.1 Hata analizi sonuçları ile en uygun yöntemin seçilmesi

Weibull parametrelerini belirleme yöntemlerinden hangisinin daha iyi sonuç verdiğinin belirlenmesi; dört yöntemle hesaplanan Weibull parametreleri gerçek veri ile Bölüm 3'teki denklem 3.39 ve 3.40'ta verilen RMSE ve R^2 hata formülleri kullanılarak yapılmıştır. R^2 değerinin büyük RMSE değerinin ise küçük olduğu durum iyi durumu göstermektedir. Yapılan analiz sonucunda Eskişehir, Çifteler, Mahmudiye ve Sivrihisar için 10 m, 30 m ve 50 m için çıkan hata analizi sonuçları ve en iyi yöntemin hangisinin olduğu Çizelge 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.4. Eskişehir hata analizi sonuçları.

Eskişehir hata analizi sonuçları						
Yükseklik (m)	Yöntem Türü	k	c (m/s)	R²	RMSE	En İyi Yöntem
10	Weibull++7 Programı	2,2358	1,9147	0,9999974	0,00016224	
	Grafik yöntem	2,2008	1,9228	0,9999976	0,00015626	
	Moment yöntemi	1,9547	1,938	0,9999985	9,6782E-05	√
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	2,4746	2,0586	0,999997	0,00019512	
30	Weibull++7 Programı	2,2526	2,4957	0,9999974	0,00016786	
	Grafik yöntem	2,2009	2,3953	0,9999974	0,00017143	
	Moment yöntemi	2,0678	2,4165	0,9999977	0,00014688	√
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	2,4748	2,5645	0,9999969	0,00020292	
50	Weibull++7 Programı	2,2526	2,7641	0,9999974	0,00016786	
	Grafik yöntem	2,2012	2,653	0,9999973	0,00017825	
	Moment yöntemi	1,9454	2,6736	0,99999	0,00012582	
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	2,4752	2,8404	0,9993077	2,8958E-07	√

Çizelge 4.5. Çifteler hata analizi sonuçları.

Çifteler hata analizi sonuçları						
Yükseklik (m)	Yöntem Türü	k	c (m/s)	R ²	RMSE	En İyi Yöntem
10	Weibull++7 Programı	1,6845	3,2032	0,9990171	5,6689E-11	√
	Grafik yöntem	1,5926	3,2673	0,9989169	2,7974E-12	
	Moment yöntemi	1,2885	3,2808	0,9990203	9,6527E-09	
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,2934	3,2746	0,9990171	8,7717E-09	
30	Weibull++7 Programı	1,6951	4,1399	0,9990171	5,6689E-11	√
	Grafik yöntem	1,593	4,0699	0,9991419	5,8088E-09	
	Moment yöntemi	1,2859	4,0853	0,9992298	1,2634E-07	
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,2934	4,0793	0,9992271	1,1812E-07	
50	Weibull++7 Programı	1,6951	4,5853	0,9990171	5,6689E-11	√
	Grafik yöntem	1,5924	4,508	0,9992283	3,4962E-08	
	Moment yöntemi	1,2885	4,5267	0,99931	3,0131E-07	
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,2934	4,5181	0,9990171	8,7717E-09	

Çizelge 4.6. Mahmudiye hata analizi sonuçları.

Mahmudiye hata analizi sonuçları						
Yükseklik (m)	Yöntem Türü	k	c (m/s)	R2	RMSE	En İyi Yöntem
10	Weibull++7 Programı	1,804	2,108	0,9828131	8,0907E-09	
	Grafik yöntem	1,7397	2,1331	0,9834481	7,5039E-09	
	Moment yöntemi	1,3998	2,1404	0,9853549	5,8745E-09	√
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,5021	2,1753	0,9851432	6,0456E-09	
30	Weibull++7 Programı	1,7891	2,7859	0,9828131	8,0907E-09	
	Grafik yöntem	1,74	2,6572	0,9868881	4,7089E-09	
	Moment yöntemi	1,401	2,6667	0,9604661	3,7583E-09	
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,5023	2,7101	0,988286	3,7583E-09	√
50	Weibull++7 Programı	1,7891	3,086	0,9828131	8,0907E-09	
	Grafik yöntem	1,7398	2,9431	0,9881946	3,8173E-09	
	Moment yöntemi	1,401	2,9535	0,9896746	2,9201E-09	√
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,5023	3,0015	0,9894801	3,0312E-09	

Çizelge 4.7. Sivrihisar hata analizi sonuçları.

Sivrihisar hata analizi sonuçları						
Yükseklik (m)	Yöntem Türü	k	c (m/s)	R ²	RMSE	En İyi Yöntem
10	Weibull++7 Programı	1,6599	2,1972	0,9465744	0,01327102	
	Grafik yöntem	1,631	2,2107	0,9474966	0,01304196	
	Moment yöntemi	1,4789	2,2164	0,9503612	0,01233038	√
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,5429	2,2396	0,949851	0,01288978	
30	Weibull++7 Programı	1,6464	2,9036	0,9501516	0,01238244	
	Grafik yöntem	1,6315	2,7539	0,9585337	0,01030031	
	Moment yöntemi	1,4789	2,7611	0,9609295	0,0097052	√
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,5431	2,7902	0,9604594	0,00982198	
50	Weibull++7 Programı	1,6464	3,2159	0,9501516	0,01238244	
	Grafik yöntem	1,6312	3,0501	0,9627318	0,00925749	
	Moment yöntemi	1,4798	3,0581	0,9649399	0,00870901	√
	En Yüksek Olabilirlik yöntemi	1,5431	3,0902	0,9644896	0,00882086	

Yapılan analizler incelendiğinde, Çizelge 4.4'e göre Eskişehir'de 10, 30 m yüksekliklerde en iyi yöntem Moment yöntemi, 50 m yükseklikte en iyi yöntem En Yüksek Olabilirlik yöntemidir. Çizelge 4.5'e göre Çifteler'de 10, 30 ve 50 m

yüksekliklerde en iyi sonuç Weibull 7++ programı sonucu elde edilen değerlerdir. Çizelge 4.6'ya göre Mahmudiye'de 10, ve 50 m yüksekliklerde en iyi yöntem Moment yöntemi, 30 m yükseklikte ise en iyi yöntem En Yüksek Olabilirlik yöntemidir. Çizelge 4.7'ye göre Sivrihisar'da 10, 30 ve 50 m yüksekliklerde en iyi yöntem Moment yöntemi olduğu görülmektedir.

4.6.2 En olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğunun hesaplanması

Hata analizi sonuçlarına göre bölgelerin tüm yükseklikleri için tespit edilen en uygun yönteme karşılık gelen k ve c (m/s) değerleriyle; Bölüm 3'te verilen denklem 3.48 ile en olası hız $v_{enolası}$, denklem 3.49 ile en fazla enerjiyi taşıyan hız v_{maxE} ve denklem 3.43 ile güç yoğunlukları hesaplanmış olup değerler Çizelge 4.8, 4.9 ve 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.8. 10 m yükseklikteki en olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğu.

10 m Yükseklik İçin Hız ve Güç Tahminleri					
BÖLGE	k	c (m/s)	$v_{enolası}$ (m/s)	v_{maxE} (m/s)	P_w (W/m ²)
Eskişehir Merkez	1,95467	1,93801589	1,34319	2,779228952	5,6085903
Çifteler	1,6845	3,2032	1,87676	5,097643723	30,41970512
Mahmudiye	1,39977	2,140360328	0,87433	4,034713822	12,60140203
Sivrihisar	1,47893	2,216427928	1,03407	3,952282055	12,24794742

Çizelge 4.9. 30 m yükseklikteki en olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğu.

30 m Yükseklik İçin Hız ve Güç Tahminleri					
BÖLGE	k	c (m/s)	V_{enolası} (m/s)	V_{maxE} (m/s)	P_w (W/m²)
Eskişehir Merkez	2,06783	2,416546638	1,75548	3,351970309	10,2530355
Çifteler	1,6951	4,1399	2,44679	6,556050698	65,06663298
Mahmudiye	1,50225	2,710078	1,30691	4,760840145	22,26285641
Sivrihisar	1,47894	2,761082227	1,2882	4,923458907	23,6774075

Çizelge 4.10. 50 m yükseklikteki en olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğu.

50 m Yükseklik İçin Hız ve Güç Tahminleri					
BÖLGE	k	c (m/s)	V_{enolası} (m/s)	V_{maxE} (m/s)	P_w (W/m²)
Eskişehir Merkez	2,47518	2,84043	2,30451	3,608255057	14,3719
Çifteler	1,6951	4,5853	2,71004	7,261397441	88,4081
Mahmudiye	1,401032	2,95354	1,20942	5,562318209	33,0496
Sivrihisar	1,47984	3,05808	1,42866	5,449851567	32,1323

Çizelge 4.8 incelendiğinde en yüksek güç yoğunluğu 30,42 W/m² ile Çifteler’de, en düşük güç yoğunluğu ise 5,61 W/m² ile Eskişehir’de olduğu görülmektedir. En yüksek ikinci güç yoğunluğu 12,60 W/m² ile Mahmudiye’de ve en yüksek üçüncü güç yoğunluğu 12,25 W/m² ile Sivrihisar’da bulunmuştur.

Çizelge 4.9 incelendiğinde en yüksek güç yoğunluğu 65,07 W/m² ile Çifteler’de, en düşük güç yoğunluğu ise 10,25 W/m² ile Eskişehir’de olduğu görülmektedir. En yüksek ikinci güç yoğunluğu 23,67 W/m² ile Sivrihisar’da ve en yüksek üçüncü güç yoğunluğu 22,26 W/m² ile Mahmudiye’de bulunmuştur.

Çizelge 4.10'a bakıldığında en yüksek güç yoğunluğu $88,41 \text{ W/m}^2$ ile Çifteler'de, en düşük güç yoğunluğu ise $14,37 \text{ W/m}^2$ ile Eskişehir'de olduğu görülmektedir. En yüksek ikinci güç yoğunluğu $33,05 \text{ W/m}^2$ ile Mahmudiye'de ve en yüksek üçüncü güç yoğunluğu $32,13 \text{ W/m}^2$ ile Sivrihisar'da bulunmuştur.

Özet olarak en yüksek güç yoğunluğu Çifteler'de, en düşük güç yoğunluğu ise Eskişehir'de elde edilmiştir. Mahmudiye ve Sivrihisar'ın güç yoğunlukları ise birbirine çok yakındır.

4.6.3 Rüzgar türbinlerinin ürettiği enerjinin hesaplanması

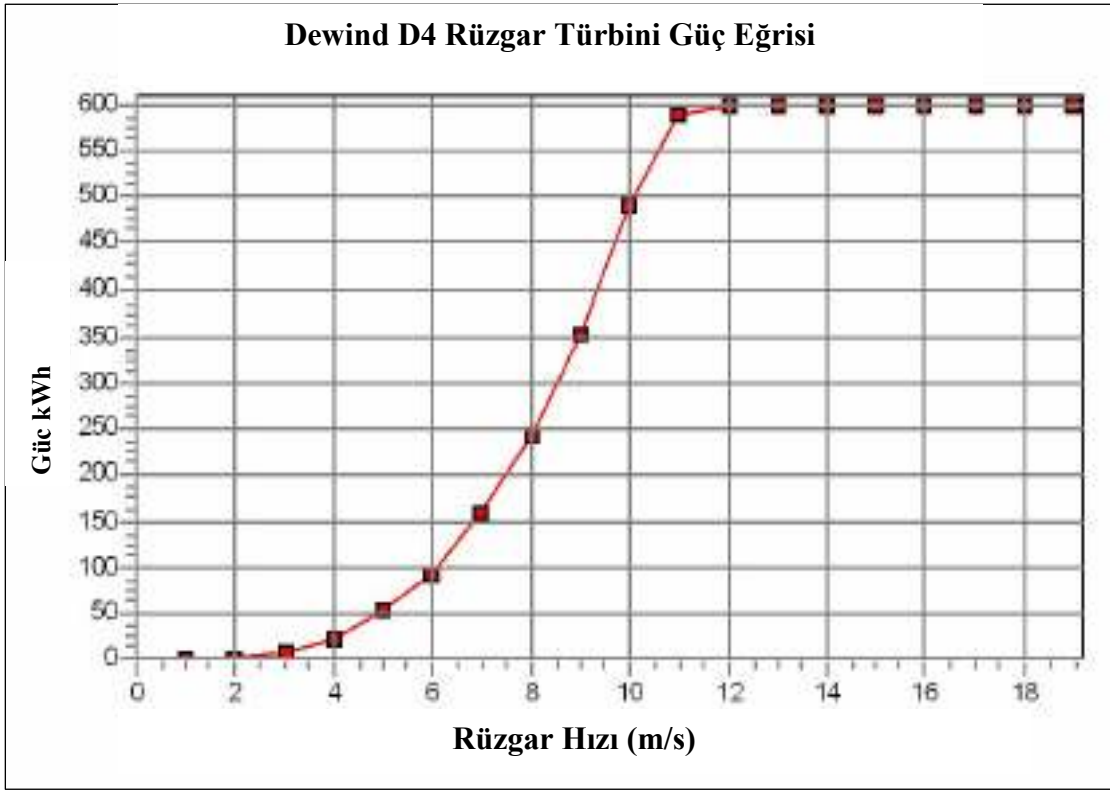
Bölüm 3.9'da rüzgar türbininin belirli bir zaman aralığında ürettiği gücün bulunması için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(v)$, türbin güç eğrisi $P_T(v)$ ile entegre edileceğinden bahsedilmiştir. (Chang, Wu , Hsu, Chu, Liao, 2003).

Çalışmada Eskişehir ve yöresinde enerji üretmek amacıyla 5 adet değişik rüzgar türbin (Dewind D4, Fuhrlander FL 30, Fuhrlander FL 100, Fuhrlander FL 250, Northern Power Nw 100/19) tipi seçilip her bir rüzgar türbininin ürettiği yıllık enerjiler hesaplanmıştır. Rüzgar türbinlerinin ürettiği yıllık enerjilerin hesaplamasında MATHEMATICA programı kullanılmıştır. Bu rüzgar türbinlerinin özellikleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

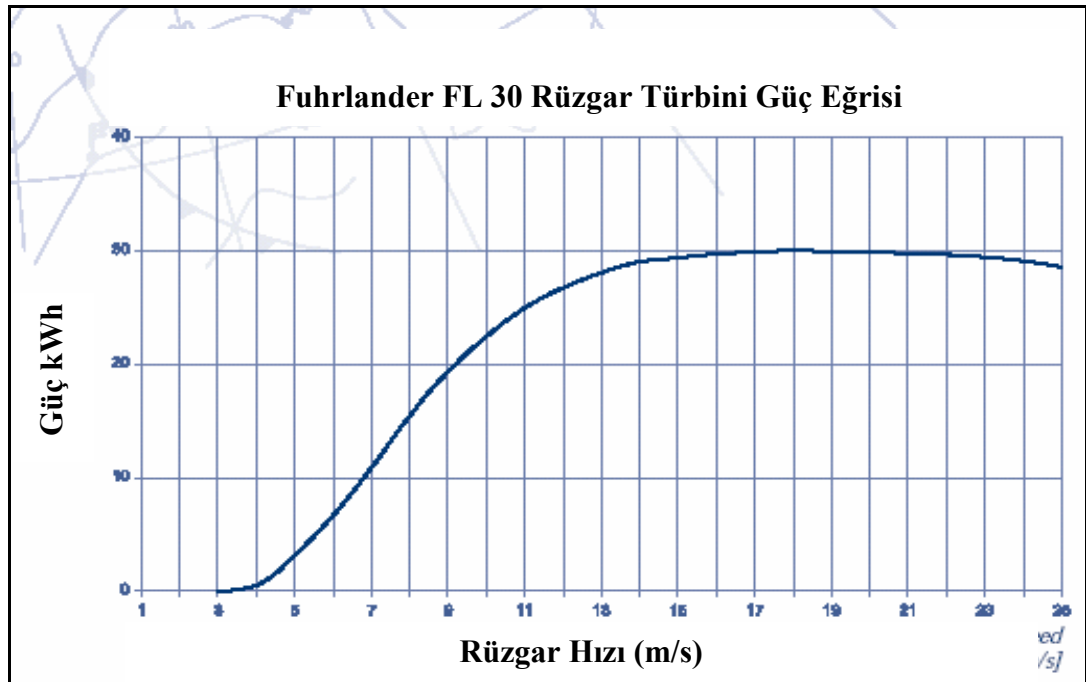
Enerji hesaplamasında tüm bölgeler için 50 m yükseklikteki Bölüm 4.6.1'de hata analizi sonucu seçilen en uygun yöntemdeki k ve c (m/s) değerleri kullanılmıştır. Bu hesaplamalar yapılmadan önce Şekil 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39'da verilen bu türbinlerin gerçek güç eğrileri kullanılarak ve polyfitprogramı (www.softintegration.com) vasıtasıyla 3'üncü bölümde geçen denklem 3.54'deki a_1 , a_2 , a_3 , a_4 değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.12'de verilmiştir. Denklem 3.53'te zaman bir yıl için 8760 saat alındığında her bir türbin için hesaplanan yıllık enerji üretimleri Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.11. Rüzgar türbinlerinin özellikleri (Durak, Özer, 2008).

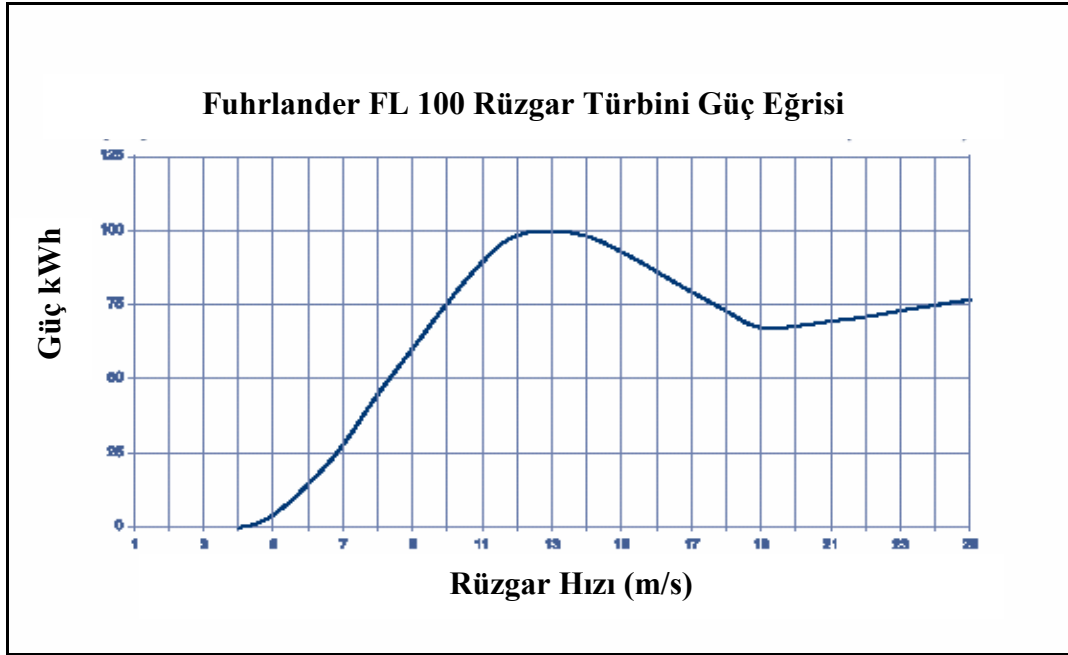
TÜRBİN ADI/ÖZELLİK	Dewind D4	Fuhr. FL 30	Fuhr. FL 100	Fuhr. FL 250	Northern Power NW 100/19
Kurulu Güç(kW)	600	30	100	250	100
Göbek Yükseklği(m)	40	27	35	42	35
Pervane Çapı(m)	46	13	21	29	21
Süpürme Alanı(m²)	1662	133	346	661	346
Devreye Giriş Hızı(m/s)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Devreden Çıkış Hızı(m/s)	22	25	35	25	25
Anma Rüzgar Hızı(m/s)	11,5	13	13	15	13



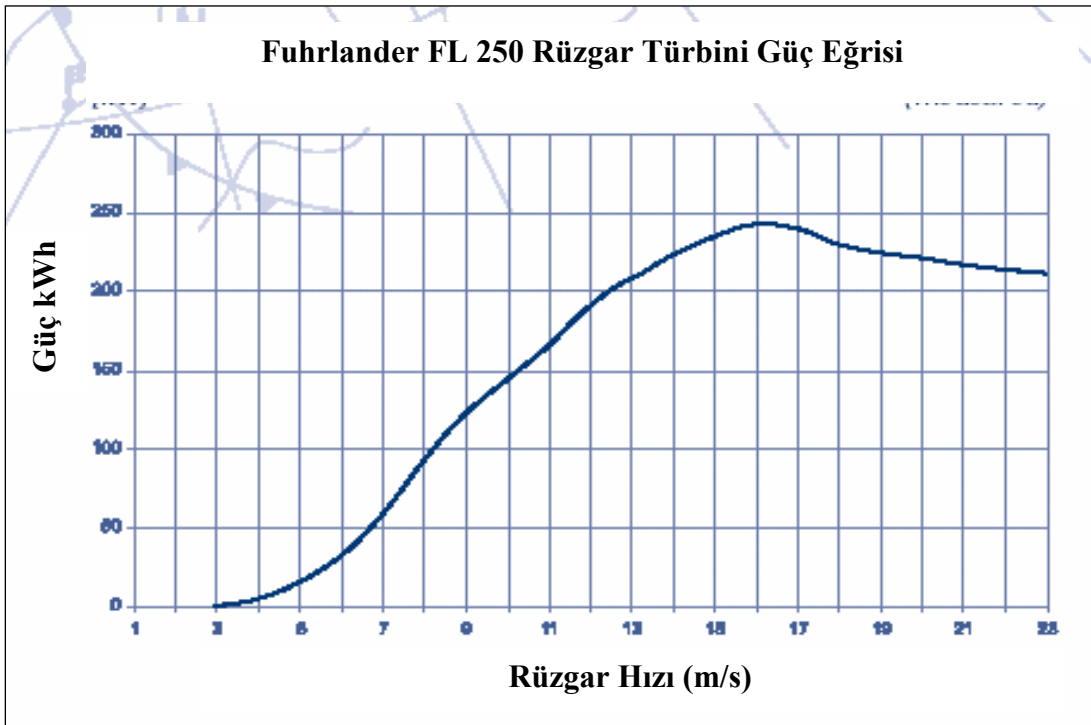
Şekil 4.35. Dewind D4 rüzgar türbini güç eğrisi (www.dewind.com).



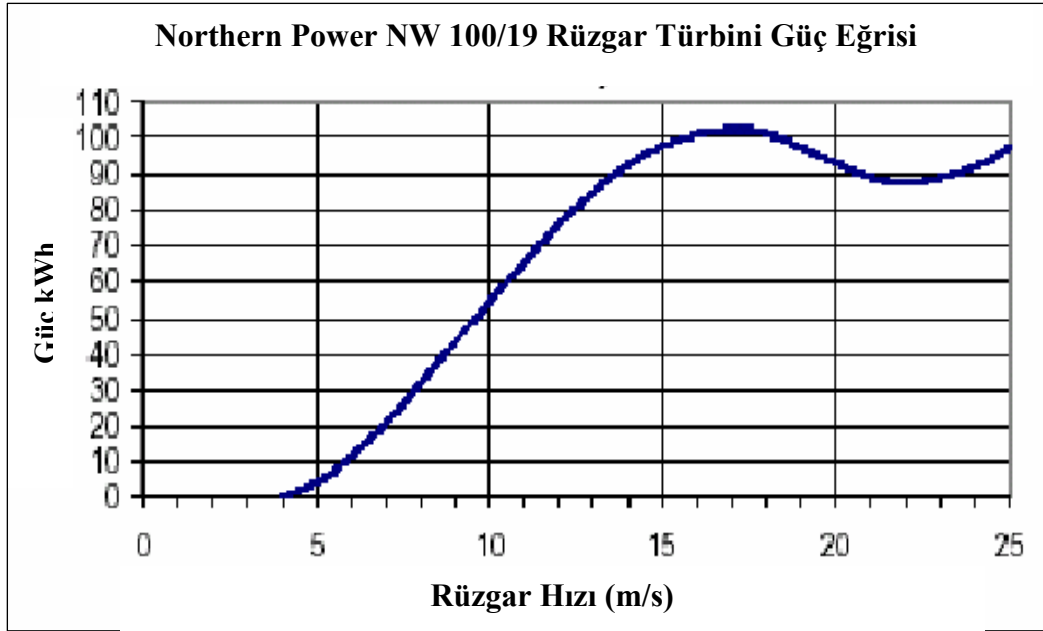
Şekil 4.36. Fuhrlander FL 30 rüzgar türbini güç eğrisi (www.furlaender.de).



Şekil 4.37. Fuhrlander FL 100 rüzgar türbini güç eğrisi (www.furlaender.de).



Şekil 4.38. Fuhrlander FL 250 rüzgar türbini güç eğrisi (www.furlaender.de).



Şekil 4.39. Northern Power Nw 100/19 rüzgar türbini güç eğrisi (www.northernpower.com).

Çizelge 4.12. Rüzgar türbinleri güç eğrileri katsayıları.

S/N	TÜRBİN MARKASI	a_1	a_2	a_3	a_4
1	DEWIND D4	-0,000258	0,005258	0,06447	-0,25566
2	FUHRLANDER FL 30	-0,000033	-0,002933	0,140533	-0,393367
3	FUHRLANDER FL 100	0,00007	-0,00692	0,1757	-0,49353
4	FUHRLANDER FL 250	-0,000108	0,00118	0,08094	-0,25104
5	NORTHERN POWER NW 100/19	-0,00046	0,01565	-0,06817	0,06872

Çizelge 4.13. Bölgelerde yıllık tüm türbin tipleri için üretilebilecek enerji miktarları.

50 m. Yükseklikte Üretilen Yıllık Enerjiler(kWh)					
	Türbin Tipleri				
BÖLGE	Dewind D4	Fuhr. FL 30	Fuhr. FL 100	Fuhr. FL 250	Northern Power NW 100/19
Eskişehir Merkez	46353,76	6497,25	11619,17	38246,37	2524,57
Çifteler	697970,52	43758,04	133724,02	280852,17	65214,43
Mahmudiye	257207,09	18092,57	52192,78	113374,32	21461,03
Sivrihisar	259740,48	18508,06	53221,90	115585,35	21183,95

Çizelge 4.13 incelendiğinde yıllık en fazla enerjiyi Çifteler’de Dewind D4 marka türbin ile 697970,52 kWh olarak üretileceği görülmektedir. Yıllık en az enerjiyi ise Eskişehir’de Northern Power NW 100/19 marka türbinle 2524,57 kWh olarak üretileceği tespit edilmiştir.

Bölüm 3.11’de türbin kapasite faktörü; rüzgar türbininin belirli bir zaman aralığında ürettiği enerjinin üretmesi gereken enerjiye oranı şeklinde tanımlanmıştır. Denklem 3.58’e göre her bir bölge ve 50 m’deki türbin kapasiteleri hesaplandığında Çizelge 4.14’deki değerler elde edilir.

Çizelge 4.14. Bölgelerde 50 m yükseklikteki tüm türbin tiplerinin kapasite faktörleri.

BÖLGE	TÜRBİN TİPLERİ				
	Dewind D4	FUHR. FL 30	FUHR. FL 100	FUHR. FL 250	NORTHERN POWER NW 100/19
Eskişehir Merkez	0,00881921	0,0247232	0,0132639	0,0174641	0,00288194
Çifteler	0,132795	0,166507	0,152653	0,128243	0,0744457
Mahmudiye	0,0489359	0,0688454	0,0595808	0,0517691	0,0244989
Sivrihisar	0,0494179	0,0704264	0,0607556	0,0527787	0,0241826

100 kW kurulu güce sahip olan Fuhrlander FL 100 ve Northern Power Nw 100/19 türbinleri karşılaştırıldığında bu bölgelerde çizelge 4.14'e göre kapasite faktörü diğerine göre büyük olan Fuhrlander FL 100 türbini ile daha çok enerji üretilebilecektir. Kapasite faktörü analizinde dünya ortalaması % 20 civarındadır. Bu oranın üzerinde kapasite faktörüne sahip yerler, enerji üretimi açısından verimlidir (Tavman, 2006).

BÖLÜM 7

SONUÇ VE TARTIŞMA

Günümüzde ülke bağımsızlığının temel kriterlerinden birisi, ülke ekonomisinin iyi olmasıdır. Ülkenin ihtiyacını karşılayacak enerjiye sahip olması ise ekonomik dinamizmin olmazsa olmaz koşuludur. Ülkemiz gelişmekte olan ülkeler arasında yer alırken gün geçtikçe de enerji ihtiyacı katlanarak artmaktadır. Artan ihtiyaca cevap verebilmek amacı ile değişik enerji kaynakları kullanılmaktadır. Her bir enerji kaynağının dışa bağımlılığı da göz önüne alındığında küçümsenmeyecek miktarda maliyetlerle karşı karşıya kalınmaktadır. Ülke ekonomisine külfet oluştursa da ekonomik maliyet bir yerde karşılanabilmekte; fakat katledilen veya kirletilen çevrenin yeniden eski haline getirilmesi bazen hiç mümkün olmamaktadır.

Günümüzde, Dünya’da, enerji ihtiyacının büyük bir kısmı hidrolik enerji ve fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Dünya’daki teknolojik gelişmelere paralel olarak artan enerji talebinin karşılanmasında oldukça önemli bir rol oynadığı gözlenen fosil yakıtlardan petrol ve doğalgaz kaynaklarının sınırlı ülkelerde yer alması ve tükenebilir olması, yeni kaynak arayışlarını hızlandırmaktadır. Geniş bir coğrafyada uygulama alanı bulan ve gün geçtikçe gelişmekte olan rüzgar enerjisi de bunlardan biridir. Ucuz ve yenilenebilir özelliğe sahip olan rüzgar enerjisi, uygun rüzgar alanlarında geleneksel fosil yakıtlar ve nükleer enerji ile rahat rahat rekabet edebilecek düzeyde olup maliyetleri de rüzgar teknolojisi geliştikçe ve kullanım alanları genişledikçe düşüş gösteren yenilenebilir enerji kaynaklarındandır.

Rüzgar enerjisi, yeterli potansiyele sahip olduğu halde Türkiye’de yeterince değerlendirilememiş ve yararlanılamamış bir kaynak halinde kalmıştır. Mevcut fosil kaynaklı enerji rezervlerinin sonlu olması, temininde karşılaşılan problemler ve fiyat artışları enerji girdilerinin önemli bir kısmını ithal eden bir ülke olarak istikbalde Türkiye’yi zora sokacağı dikkate alınırca rüzgar enerjisinden yararlanma konusunda zaman kabetmeden ciddi adımlar atılmalıdır.

Rüzgar enerjisi konusunda ülkemizde yatırım yapmak isteyen yerli ve yabancı yatırımcılar teşvik edilmeli, cazip koşullar için gerekli yasal ve hukuki düzenlemeler yapılmalıdır. Rüzgar enerjisi teknolojileri alanında üniversitelerimizde verilen eğitim yeterli değildir. Bu konuda mühendislik eğitimi veren okullarda rüzgar enerjisi ile ilgili derslerin sayısı artırılmalı, uygulamalar geniş ölçekte yapılmalıdır. Rüzgar enerjisi konusu disiplinler arası bir çalışma olduğundan bölümler arası işbirliği kurulmalı, projeler birlikte gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışmada Eskişehir ve yöresinde enerji üretimi amaçlı rüzgar hızlarının tespiti ve kullanıma uygunluğunun araştırılması yapılmıştır.

Bölüm 1’de problemin tanımından, Türkiye’de rüzgar enerjisi ile ilgili yapılan akademik çalışmalardan, çalışmanın amacı ve yönteminden bahsedilmiştir. Bölüm 2’de rüzgar enerjisinin tanımı, rüzgar enerjisinin tarihçesi, dünyada ve Türkiye’de rüzgar enerjisi potansiyeli ve kurulu gücü, rüzgar enerjisinin avantajları ve dezavantajları anlatılmıştır. Bölüm 3’te rüzgar enerjisinde kullanılan teorik bilgiler, rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplama yöntemleri, rüzgar türbinlerinin ürettiği enerjinin hesaplanması ve rüzgar türbinlerinin kapasite faktörlerinin hesabı anlatılmıştır. Bölüm 4’te Eskişehir ve Eskişehir’e bağlı ilçelerden Çifteler, Mahmudiye ve Sivrihisar için rüzgar hızlarının tespiti DMİ verilerinden faydalanılarak yapılmış ve bölgelerin rüzgar esme yönleri belirlenmiş, rüzgar hız dağılımlarının belirlemek için Weibull dağılımı kullanılmıştır. Weibull parametrelerini belirlemek için literatürde en fazla kullanılan Moment, Grafik ve En Yüksek Olabilirlik yöntemi kullanılmış; ayrıca Weibull 7++ programından da yararlanılarak hesaplanan parametrelerin hata analizi yapılarak en uygun boyutsuz şekil “k” ve ölçek “c (m/s)” parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler 10, 30, 50 m’ler için hesaplanarak bu yüksekliklerdeki güç yoğunluğu $P_w(W/m^2)$, en olası hız $v_{enolasi}(m/s)$ ve en fazla enerjiyi taşıyan hız $V_{max,E}(m/s)$ değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca beş farklı rüzgar türbininin üçüncü dereceden türbin güç eğrileri bulunarak Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile entegre edilmiş, yıllık her bir bölge için 50 m yükseklikte üretilebilecek enerjiler hesaplanmıştır.

Elde edilen bilgiler değerlendirildiğinde, hakim rüzgar yönlerinin Eskişehir bölgesinde batı yönünde, Çifteler’de kuzeybatı yönünde, Mahmudiye’de kuzey-kuzeybatı

yönünde, Sivrihisar'da ise kuzey-kuzedoğu yönünde olduğu belirlenmiştir. Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü verilerine göre Eskişehir yöresinin 3 yıllık ortalama aylık, günlük ve saatlik rüzgar hızı değerleri saptanmıştır. Yapılan analizler incelendiğinde, Çizelge 4.4'e göre Eskişehir'de 10, 30 m yüksekliklerde en iyi yöntem Moment yöntemi, 50 m yükseklikte en iyi yöntem En Yüksek Olabilirlik yöntemidir. Çizelge 4.5'e göre Çifteler'de 10, 30 ve 50 m yüksekliklerde en iyi sonuç Weibull 7++ programı sonucu elde edilen değerlerdir. Çizelge 4.6'ya göre Mahmudiye'de 10, ve 50 m yüksekliklerde en iyi yöntem Moment yöntemi, 30 m yükseklikte ise en iyi yöntem En Yüksek Olabilirlik yöntemidir. Çizelge 4.7'ye göre Sivrihisar'da 10, 30 ve 50 m yüksekliklerde en iyi yöntemin Moment yöntemi olduğu görülmektedir.

Buna göre Eskişehir için 10 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,95 ve ölçek parametresi c (m/s) 1,94 m/s; 30 mde boyutsuz şekil k parametresi 2,07 ve ölçek parametresi c (m/s) 2,42 m/s; 50 mde boyutsuz şekil k parametresi 2,48 ve ölçek parametresi c (m/s) 2,84 m/s olarak hesaplanmıştır.

Çifteler için 10 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,68 ve ölçek parametresi c (m/s) 3,20 m/s; 30 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,70 ve ölçek parametresi c (m/s) 4,14 m/s; 50 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,70 ve ölçek parametresi c (m/s) 4,59 m/s olarak hesaplanmıştır.

Mahmudiye için 10 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,40 ve ölçek parametresi c (m/s) 2,14 m/s; 30 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,50 ve ölçek parametresi c (m/s) 2,71 m/s; 50 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,40 ve ölçek parametresi c (m/s) 2,95 m/s olarak hesaplanmıştır.

Sivrihisar için 10 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,48 ve ölçek parametresi c (m/s) 2,22 m/s; 30 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,48 ve ölçek parametresi c (m/s) 2,76 m/s; 50 mde boyutsuz şekil k parametresi 1,48 ve ölçek parametresi c (m/s) 3,06 m/s olarak hesaplanmıştır.

Hata analizine göre seçilen en uygun k ve c parametreleriyle bölgeler için ayrı ayrı en olası hız, en fazla enerjiyi taşıyan hız ve güç yoğunluğunun hesaplanmıştır. 10 m'de en yüksek güç yoğunluğu 30,42 W/m² ile Çifteler'de, en düşük güç yoğunluğu ise 5,61

m/s Eskişehir'de olduğu bulunmuş, en yüksek ikinci güç yoğunluğu $12,60 \text{ W/m}^2$ ile Mahmudiye'de ve en yüksek üçüncü güç yoğunluğu $12,25 \text{ W/m}^2$ Sivrihisar'da bulunmuştur. 30 m'de en yüksek güç yoğunluğu $65,07 \text{ W/m}^2$ ile Çifteler'de, en düşük güç yoğunluğu ise $10,25 \text{ W/m}^2$ ile Eskişehir'de olduğu hesaplanmış, en yüksek ikinci güç yoğunluğu $23,67 \text{ W/m}^2$ ile Sivrihisar'da ve en yüksek üçüncü güç yoğunluğu $22,26 \text{ W/m}^2$ ile Mahmudiye'de bulunmuştur. 50 m'de en yüksek güç yoğunluğu $88,41 \text{ W/m}^2$ ile Çifteler'de, en düşük güç yoğunluğu ise $14,37 \text{ W/m}^2$ ile Eskişehir'de olduğu tespit edilmiş, en yüksek ikinci güç yoğunluğu $33,05 \text{ W/m}^2$ ile Mahmudiye'de ve en yüksek üçüncü güç yoğunluğu $32,13 \text{ W/m}^2$ ile Sivrihisar'da bulunmuştur. Ekonomik Rüzgar Elektrik Santrali yatırımı için 400 W/m^2 ve üzerinde rüzgar güç yoğunluğu gerekmektedir (Çalışkan 2007).

Özet olarak en yüksek güç yoğunluğu Çifteler'den, en düşük güç yoğunluğu ise Eskişehir'den elde edilmiştir. Mahmudiye ve Sivrihisar'ın güç yoğunlukları ise birbirine çok yakındır.

Çalışmada, Eskişehir ve yöresinde enerji üretmek amacıyla 5 adet değişik rüzgar türbin (Dewind D4, Fuhrlander FL 30, Fuhrlander FL 100, Fuhrlander FL 250, Northern Power Nw 100/19) tipi seçilip her bir rüzgar türbininin ürettiği yıllık enerjiler 50 m yükseklik için hesaplanmıştır. Buna göre en fazla enerjiyi Çifteler'de Dewind D4 marka türbin ile $697970,52 \text{ kWh}$ olarak üretileceği hesaplanmış, en az enerjiyi ise Eskişehir'de Northern Power NW 100/19 marka türbinle $2524,57 \text{ kWh}$ olarak üretileceği tespit edilmiştir. Ayrıca bu seçilen türbinlerin kapasite faktörleri hesaplanmıştır. Bu hesaba göre bölgeler için en yüksek kapasite faktörüne sahip olan türbin Fuhrlander FL 30 olup Eskişehir için kapasite faktörü %2,5, Çifteler için kapasite faktörü %17, Mahmudiye için kapasite faktörü %6,9, Sivrihisar için kapasite faktörü %7 olarak bulunmuştur. Ekonomik Rüzgar Elektrik Santrali yatırımı için rüzgar türbini kapasite faktörü %35 veya üzerinde, ortalama rüzgar hızının 7 m/s ve üzeri olması gerekmektedir (Çalışkan 2007).

Sonuç olarak, Eskişehir ve yöresinde rüzgar çiftlikleri kurmanın fayda sağlamayacağı, kurulsa dahi uygun kapasite kullanımının gerçekleşmeyeceği, dolayısıyla yatırım maliyeti, işletme maliyeti vb. maliyetleri karşılanamayacağı

değerlendirilmektedir. Ancak Türkiye’de rüzgar yönünden uygun bölgelere rüzgar santralleri kurularak mevcut şebekenin yükü hafifletilebilir, dışa bağımlılık azaltılabilir, enerji arzı artırılarak ülke ekonomisine katkıda bulunulabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akdağ S.A, Dinler A., Menteş Ş. S, 2007, Rüzgar Karakteristiğinin Analizi, YEKSEM 07 1 Kasım 2007, Gaziantep.
- Akpınar, E.K., Akpınar, S., 2004, Determination of the wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey, Energy Conversion and Management 45 (2004) 2901-2914.
- Akpınar, E.K., Akpınar, S., 2005 (a), An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics, Energy Conversion and Management 46 (2005) 1848-1867.
- Akpınar E. K., Akpınar S., 2005 (b), A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems, Energy Conversion and Management, 46, 515-532
- Akpınar E. K., 2006, S Statistical Investigation of Wind Energy Potential, Energy Sources Part A, 807-820.
- Aras H., 2003, Wind energy status and its assessment in Turkey, Renewable Energy, 28(14); 2213-2220.
- Bilgili M., Şahin B., Kahraman, A., 2004, Wind energy potential in Antakya and İskenderun regions, Turkey, Renewable Energy 29 (2004) 1733-1745.
- Chang T. J., Wu Y. T., Hsu H., Chu C., Liao C., 2003, Assessment of Wind Characteristics and Wind Turbine Characteristics in Taiwan, Renewable Energy, 28, 851-871.
- Çalışkan M., 2007, S Orta kardeniz Bölgesinde Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, EMO Samsun Şubesi.
- Durak, M., Özer S., 2008 Rüzgar Enerjisi:Teori ve Uygulama, Baskı www.impress.com.tr
- Durak M., Şen Z., 2002, Wind power potential in Turkey and Akhisar case study, Renewable Energy 25 (2002) 463-472.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Ecogenaration World, 2001. “Türkiye’nin En Büyük Rüzgar Enerji Santrali: BORES”, Sayı:5, Sayfa:44-47.
- Elitok Ö., 2006, Weibull Dağılımı ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Erdogdu, E., 2008, On the wind energy in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Rewiews xx (2008) xxx-xxx, in pres.
- Ertürk, E., 1985, Rüzgar Enerjisinden Yararlanma ve Eskişehir İlinde Enerji Üretim Olanaklarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Eskin, N., Artar, H., Tolun, S., 2008, Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Rewiews 12 (2008) 839-851.
- Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2009, Meteoroloji Arşivi.
- Golding, E.W., 1955, The Generation of Elektriciry by Wind Power, Pitman Press, London.
- Güler, Ö., 2009, Wind energy status in electrical energy production of Turkey, Renewable and Sustainable Energy Rewiews 13 (2009) 473-478.
- Hanagasioglu M., 1999, Wind energy in Turkey, Renew Energy 16:822–827.
- Hepbaşlı A, Özgener Ö., 2004, A Review on the Development of Wind Energy in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews 8, sayfa 257-276.
- Hepbaşlı, A., Özdamar, A., Özalp, N., 2001, Present Status And Potential of Renewable Energy Sources in Turkey, Energy Source 23(7) 631-648, AUG-SEP 2001.
- Hepbaşlı, A., Özgener, Ö., 2004, A review on the development of wind energy in Turkey, Energy , Renewable and Sustainable Energy Rewiews 8 (2004) 257-276.
- Karadeniz, Z., 2002, Rüzgar Enerjisi ve Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanımı, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- Karsli, V.M., Geçit, C., 2003, An investigation on wind power potential of Nurdağı-Gaziantep, Turkey, Renewable Energy 28 (2003) 823-830.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Karsli, V.M., Geçit, C., 2003, An investigation on wind power potential of Nurdağı-Gaziantep, Turkey, *Renewable Energy* 28 (2003) 823-830.
- Köse, R., 2004, An evaluation of wind energy potential as a power generation source in Kütahya, Turkey, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 1631-1641.
- Karadeli, S., 2001. Rüzgar Enerjisi, Temiz Enerji Vakfı, Ankara
- Kececioglu, D., 1993, *Reliability and Life Testing Handbook Volume I*, PTR Prentice Hall.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2001., Araştırma ve Geliştirmeler, Resmi İnternet Sitesi, <http://www.meteor.gov.tr>.
- Ozerdem, B., Türkeli, H.M., 2005, Wind energy potential and micrositting on Izmir Instutude of Technology Campus, Turkey, *Renewable Energy* 30 (2004-5) 1623-1633.
- Ozerdem, B., Ozer, S., Tosun, M., 2006, Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94 (2006) 725-743.
- Özdamar, A., 2001, Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Türbinlerine Genel Bakış, TEKSEN 2001 Sempozyumu, sayfa 242-254, İzmir.
- Özdamar, A., 2000, Büyük Anma Güçlü Rüzgar Türbinlerinin Çeşitli Kriterlere Göre Karşılaştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Sayı: B.30.2.PAU.0.45.00.00/600-2000-032, Denizli.
- Öztopal, A., Şahin, A.D., Akgün, N., Şen, Z. 2000, On the regional wind energy potential of Turkey, *Energy* 25 (2000) 189-200.
- Öztürk Ö, 2002, Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Kullanabilirliği, Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir
- Sahin, B., Bilgili, M., Akilli, H., 2005, The wind power potential of eastern Mediterranean region of Turkey, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93 (2005) 171-183.
- Şahin, A.D., 2003, Hourly wind velocity exceedence maps of Turkey, *Energy Conversion and Management* 44 (2003) 549-557.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Şen, Ç., 2003, Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması, Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Tavman, İ., H., 2006, Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması, Türkiye 10. Enerji Kongresi, sayfa 201-209

Toklu, M., 2002, Rüzgar Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.

Turhan, F., 2009, Rüzgar Enerjisinin Dünya'da Ve Türkiye'de Kullanımı, Eskişehir Merkezinin Rüzgar Değerlerinin İncelemesi, Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir

Uçar, S., 2007, Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretimi ve Kayseri İli İçerisindeki Çevresel Etkilerinin Değerlendirmesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Ural, G., 1994, Rüzgar Enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki Durumu, Türkiye 6. Enerji Kongresi Teknik Oturum Tebliğleri I, 17-22 Ekim 1994, İzmir.

Uyar, S.T., 1999, Rüzgar Enerjisi Teknolojilerindeki Gelişmeler", Sürdürülebilir Enerji Teknolojilerindeki Gelişmeler ve Türkiye'deki Uygulamaları Konferansı, İstanbul.

Ucar, A., Balo, F., 2009, Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludağ-Busa, Turkey, Applied Energy 86 (2009) 333-339.

Ucar, A., Balo, F., 2009, Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six location in Turkey, Applied Energy xx (2009) xxx-xxx, in pres.

www.alternaturk.org

www.dewind.com

www.eie.gov.tr

www.eskisehir.gov.tr

www.furlaender.de

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

www.mahmudiye.gov.tr

www.northernpower.com

www.odevsitesi.com

www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr

www.softintegration.com

www.wikipedia.org

www.windenergy.org

www.windpower.dk

www.wwindea.org

Yalçın, C., 1998, Elektrik Enerjisi Üretiminde Kullanılan Alternatif Enerji Kaynaklı Sistemler ve Birleşik Isı-Güç Santralleri ile Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Yavuzcan G., 1961, Rüzgar Enerjisi Üzerine Bir Çalışma ve Türkiye'deki Rüzgar Türbini Kullanımları, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Ankara.