

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BULANIK ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ
KULLANARAK RÜZGAR ENERJİSİ SANTRAL YERİ
SEÇİMİ**

Endüstri Mühendisi Uğur YALÇIN

**FBE Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı :Yrd. Doç. Dr. Tufan DEMİREL (Yıldız Teknik Üniversitesi)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
Yunan Harfleri	vi
İndisler	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİNİN TANIMI VE ÖNEMİ	2
2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Küresel Isınma	4
2.1.1 Sıcaklık Artışının Sonuçları	6
2.1.2 Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji	7
3. RÜZGAR ENERJİSİ ve GELİŞİMİ	9
3.1 Rüzgarın Tanımı	11
3.2 Rüzgara Özgü Tanımlar	11
3.2.1 Rüzgar Hızının Kısa Periyot Değişkenliği	11
3.2.2 Günlük Rüzgar Değişimi	11
3.2.3 Rüzgarın Yıllık Değişimi	11
3.2.4 Rüzgar Hızlanması (Tepe Etkisi)	12
3.2.5 Rüzgar Türbülansı (Girdabı)	12
3.3 Dünyada Rüzgar Enerjisine Bakış	13
3.3.1 Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	13
3.3.2 Rüzgar Enerjisinin Geleceğini Etkileyecek Etmenler	17
3.3.2.1 Gelecekteki Elektrik Talebi (IEA-“Dünya Enerjisine Bakış” Raporu)	17
3.3.2.2 Yıllık Büyüme Hızı	20
3.3.2.3 Rüzgar Türbini Boyutlarının Gelecekteki Büyümesi	20
3.3.2.4 Kapasite Faktöründeki Artışlar	21
3.3.2.5 Rüzgar Gücü Yatırım Maliyetler ve İstihdam	22
3.3.2.6 Çevresel Etkiler ve CO ₂ Salımı	22
3.4 Dünyada Rüzgar Enerjisi Gelişim Örnekleri	23

3.4.1	Danimarka Örneği	23
3.4.2	Kaliforniya Örneği	25
3.5	Türkiye’de Rüzgar Enerjisine Bakış	27
3.5.1	Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	27
3.6	Türkiye’deki Rüzgar Enerji Santralleri	30
3.7	REPA (Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası)	34
3.7.1	REPA’nın Tanımı	34
3.7.2	REPA’nın Yararları	34
3.7.3	REPA’da Kullanılan Tematik Haritalar	36
3.7.4	Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Bazı Tematik Haritalar ile Birlikte Bölgesel Gösterimi	40
3.7.5	REPA Hakkında Çarpıcı Bilgiler	45
3.7.6	Rüzgar Enerjisi Santral Yatırımcılarının İzlemesi Gereken Yol	45
4.	FARKLI YÖNLERDEN RÜZGAR ENERJİSİ	46
4.1	Rüzgar Enerjisi’nin Ekonomikliği	46
4.1.1	Rüzgar Enerjisi’nin Maliyeti	46
4.1.2	Elektrik Üretim Maliyetini Oluşturan Faktörler	46
4.1.3	Rüzgar Enerjisinin Yatırım ve Maliyet Açısından Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması	47
4.2	Rüzgar Enerjisinin Avantajları	49
4.3	Rüzgar Türbinlerinin Özellikleri ve Yapısı	50
4.3.1	Weibull Dağılımı	52
4.3.1.1	Rüzgar Hızı Değişikliklerinin Genel Yapısı	52
4.3.1.2	Rüzgar Hızlarının İstatistiksel Tanımı	53
4.3.1.3	Weibull Dağılımının Dengelenmesi	53
4.3.1.4	Rüzgarın Ortalama Gücü - Güç Dağılımının Dengelenmesi	54
4.3.1.5	Rüzgarın Gücü - Güç Yoğunluk Fonksiyonu	54
4.3.1.6	Cut In Rüzgar Hızı	54
4.3.1.7	Cut Out Rüzgar Hızı	54
4.3.1.8	Bir Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi	55
4.3.1.9	Güç Eğrisinin Ölçüm Belirsizliği	55
4.3.2	Betz Yasası	55
4.3.2.1	Rüzgarın İdeal Durdurulması	56
4.3.2.2	Betz Yasası	56
4.3.2.3	Güç Yoğunluğundan Güç Çıktısına	58
4.3.2.4	Güç Katsayısı (Power Coefficient)	59
4.3.3	Rayleigh Dağılımı	59
4.3.4	Rüzgar Gülü	60
4.4	Rüzgar Türbini Bileşenleri	60
4.4.1	Nacelle	61
4.4.2	Kanatlar	61
4.4.3	Kanatların Bağlantı Noktası	62
4.4.4	Düşük Hız Şaftı	62
4.4.5	Dişli Kutusu	62
4.4.6	Mekanik Frenli Yüksek Hızlı Şaft	62
4.4.7	Elektrik Jeneratörü	62
4.4.8	Yaw Mekanizması	62
4.4.9	Elektronik Kontrolcü	63
4.4.10	Hidrolik Sistem	63
4.4.11	Soğutma Birimi Fanı	63

4.4.12	Kule	63
4.4.13	Anemometre ve Rüzgar Vanası	64
4.5	Rüzgar Enerji Santrali ve Yer Seçimi	65
4.5.1	Rüzgar Enerji Santrali	65
4.5.2	Rüzgar Kaynak Tespitinde Ön Etüt Süreci	66
4.5.2.1	Rüzgar Potansiyeli Yüksek Yerlerin Belirlenmesi	66
4.5.2.2	Rüzgar Enerji Santrali Kurmak İçin Uygun Arazi Seçimi	67
4.5.3	Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi	68
4.5.3.1	Enerji Amaçlı Rüzgar Ölçümleri	69
4.5.3.2	RGİ'larına Yakın Çevresel Engeller	70
4.5.3.3	Arazi Yüzey Pürüzlülük Bilgileri	70
4.5.3.4	Topografya Bilgileri	70
4.5.3.5	Alansal Rüzgar Atlas İstatistiklerinin Hesaplanması	71
4.5.4	Alansal Enerji Yoğunluk Dağılımı	71
4.5.5	Rüzgar Türbini Seçimi	71
4.5.6	Alansal Enerji Üretim Miktarının Tespiti	72
4.5.7	Rüzgar Enerji Santrallerinin Tasarımı ve Enerji Üretim Miktarının Hesaplanması	72
5.	BULANIK ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ	73
5.1	Analitik Hiyerarşi Prosesi	73
5.2	Bulanık Mantık	73
5.3	Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi	74
5.4	Üçgen Bulanık Sayılar	76
5.5	Bulanık AHP Algoritması	77
6.	BULANIK ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ KULLANILARAK RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ YERİ SEÇİMİ	81
6.1	Kriterler ve Alt Kriterler ile Alternatiflerin Belirlenmesi ve Hiyerarşik Yapının Oluşturulması	82
6.2	İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Uygulaması	86
6.3	Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Uygulamasının Sonucu	95
6.4	Ana Kriterlerdeki Değişimin Sonuca Etkisi Üzerine Duyarlılık Analizi Çalışması	95
6.4.1	Potansiyel Kriterinin Önem Derecesinin Arttırılma Durumu	96
6.4.2	Teknik Kriterinin Önem Derecesinin Arttırılma Durumu	97
6.4.3	Sosyal Etkenler Kriterinin Önem Derecesinin Arttırılma Durumu	98
6.4.4	Ulaşım Kriterinin Önem Derecesinin Arttırılma Durumu	99
6.4.5	Maliyet Kriterinin Önem Derecesi Arttırılma Durumu	100
6.4.6	Duyarlılık Analizi Sonucu	101
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	102
	KAYNAKLAR	104
	İNTERNET KAYNAKLARI	105
	EKLER	106
Ek 1	Bölge 1 – Balıkesir Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları	107
Ek 2	Bölge 2 – Çanakkale Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları	108

Ek 3	Bölge 3 –İzmir Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları	109
ÖZGEÇMİŞ.....		110

SİMGE LİSTESİ

A	Süpürme alanı (m^2)
CP	Güç Katsayısı
d	Hava yoğunluğu (kg/m^3)
F	Rüzgar tarafından rüzgar rotoru üzerinde kullanılan kuvvet
l	Bulanık üçgen sayının mümkün en küçük değeri
m	Bulanık üçgen sayının en çok beklenen değeri
$\tilde{M}_i$	Bulanık üçgen sayı
M_{gi}^j	Genişletilmiş analiz değeri
P	Güç
S	Rotor içersinden geçen hava akımı bölümü rotor alanı (m^2)
S_1	Rotor içersinden geçen hava akımı bölümü öncesi alan (m^2)
S_2	Rotor içersinden geçen hava akımı bölümü sonrası alan (m^2)
S_i	Bulanık yapay büyüklük değeri
u	Bulanık üçgen sayının mümkün en büyük değeri
U	Hedef kümesi
V	Gerçekte Rotordan geçen ve kanatlar tarafından taranan bütün S alanı için uniform farz edilen rüzgarın hızı (m/s)
V_1	Türbine girmeden önce belirli uzaklıktaki rüzgar hızı (m/s)
V_2	Rotordan çıktıktan sonra belirli uzaklıktaki rüzgar hızı (m/s)
v, V	Rüzgar hızı (m/s)
W'	Ağırlık vektörü
W	Normalize edilmiş ağırlık vektörü
X	Nesne kümesi

Yunan Harfleri

ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
ΔT	Akıntıya karşıdan akıntı yönüne değişen kinetik enerji miktarı

İndisler

A	Ana kriterler
$A(P)$	Potansiyelin önemi arttığında ana kriterler
$A(T)$	Tekniğin önemi arttığında ana kriterler
$A(S)$	Sosyal etkenlerin önemi arttığında ana kriterler

$A(U)$	Ulaşımın önemi arttığında ana kriterler
$A(M)$	Maliyetin önemi arttığında ana kriterler
$ALT^{(RH)}$	Rüzgar hızına göre alternatifler
$ALT^{(RY)}$	Rüzgar yoğunluğuna göre alternatifler
$ALT^{(HRY)}$	Hakim rüzgar yönüne göre alternatifler
$ALT^{(ÇE)}$	Çevresel engellere göre alternatifler
$ALT^{(KF)}$	Kapasite faktörüne göre alternatifler
$ALT^{(DK)}$	Deprem kuşağına göre alternatifler
$ALT^{(AD)}$	Altyapı durumuna göre alternatifler
$ALT^{(OA)}$	Ormanlık alana göre alternatifler
$ALT^{(RTU)}$	Askeri ve sivil radar tesislerine uzaklığa göre alternatifler
$ALT^{(DYED)}$	Doğal yaşam ve ekolojik dengeye göre alternatifler
$ALT^{(HAU)}$	Hava alanına uzaklığa göre alternatifler
$ALT^{(YBU)}$	Yerleşim birimlerine uzaklığa göre alternatifler
$ALT^{(TTAU)}$	Tarihi-turistik alana uzaklığa göre alternatifler
$ALT^{(TMU)}$	Trafo merkezine uzaklığa göre alternatifler
$ALT^{(EİMU)}$	Elektrik ihtiyacı olan merkezlere uzaklığa göre alternatifler
$ALT^{(SYKU)}$	Sahaya yakın karayolu uzaklığına göre alternatifler
$ALT^{(KM)}$	Kurulum maliyetine göre alternatifler
$ALT^{(AM)}$	Arazi maliyetine göre alternatifler
$ALT^{(İBM)}$	İşletme ve bakım maliyetine göre alternatifler
$ALT^{(A)}$	Bulanık AHP'ne göre alternatifler
M	Maliyete göre alt kriterler
P	Potansiyele göre alt kriterler
S	Sosyal etkenlere göre alt kriterler
T	Tekniğe göre alt kriterler
U	Ulaşımına göre alt kriterler

KISALTMA LİSTESİ

AD	Altyapı Durumu
AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
AM	Arazi Maliyeti
ARES	Alaçatı Rüzgar Enerjisi Santrali
AWEA	American Wind Energy Association
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
COP	Conference Of Parties
ÇE	Çevresel Engeller
DK	Deprem Kuşağı
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
DYED	Doğal Yaşam ve Ekolojik Denge
ECU	European Currency Unit
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
EİMU	Elektrik İhtiyacı Olan Merkezlerle Uzaklık
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EWEA	European Wind Energy Association
FMS	Flexible Manufacture System
GSM	Global System for Mobile Communications
GSMH	Gayri Safi Milli Hasıla
HAU	Hava Alanına Uzaklık
HRY	Hakim Rüzgar Yönü
IEA	International Energy Agency
İBM	İşletme ve Bakım Maliyeti
KF	Kapasite Faktörü
KM	Kurulum Maliyeti
Ltd.	Limited
M	Maliyet
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
N	Normal senaryo
OA	Ormanlık Alan
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
P	Potansiyel
RED	Rüzgar Enerji Dönüşüm Sistemleri

REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	Rüzgar Enerjisi Santrali
RGİ	Rüzgar Enerjisi Gözlem İstasyonu
RH	Rüzgar Hızı
rpm	Rotations Per Minute
RTU	Askeri ve Sivil Radar Tesislerine Uzaklık
RY	Rüzgar Yoğunluğu
S	Sosyal Etkenler
S _i	Duyarlılık analizi için farklı senaryolar
SYKU	Sahaya Yakın Karayolu Uzaklığı
T	Teknik
TFN	Triangular Fuzzy Number
TMU	Trafo Merkezine Uzaklık
TTAU	Tarihi-Turistik Alana Uzaklık
U	Ulaşım
UTM	Universal Transverse Mercator
WEC	World Energy Council
WMO	World Meteorology Organization
YBU	Yerleşim Birimlerine Uzaklık

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Tepede Rüzgar.....	12
Şekil 3.2 Engelde (Bina) Türbülans Etkisi	13
Şekil 3.3 Dünyanın Rüzgar Kaynakları, TWs (Dünyadaki toplam: 53.000 TWs).....	15
Şekil 3.4 IEA Sınıflandırmasıyla Uyumlu Bölge Tanımları	16
Şekil 3.5 2020’de %12 Rüzgar Gücü – Bölgesel Dağılım	16
Şekil 3.6 2020 Yılında Elektrik Üretiminin Rüzgar Gücünden Elde Edilen %12’lik Bölümünün Dağılımı	16
Şekil 3.7 Bölgelere Göre Gelecekteki Elektrik Talebi (IEA).....	17
Şekil 3.8 2020’de %12 Rüzgar Gücü – Yıllık Yeni Kapasite (MW)	19
Şekil 3.9 2020’de % 12 Rüzgar Gücü – Toplam Yeni Kapasite (MW)	20
Şekil 3.10 Seçilmiş Piyasalarda Kurulan Rüzgar Türbinlerinin Ortalama Boyutu (kW).....	21
Şekil 3.11 Türkiye Rüzgar Atlası (2002)	28
Şekil 3.12 Dünyada Kurulu Rüzgar Enerjisi Gücünün (MW), Türkiye’de Kurulu Rüzgar Enerjisi Gücü (kW) İle Kıyaslanması	30
Şekil 3.13 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 30 m Yükseklikteki Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası	38
Şekil 3.14 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 50 m Yükseklikteki Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası	38
Şekil 3.15 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 70 m Yükseklikteki Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası	38
Şekil 3.16 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 100 m Yükseklikteki Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası	39
Şekil 3.17 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 50 m Yükseklikteki Kapasite Faktörü Haritası.....	39
Şekil 3.18 Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Bazı Tematik Haritalar ile Birlikte Bölgesel Gösterimi	40
Şekil 3.19 1. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	41
Şekil 3.20 2. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	41
Şekil 3.21 3. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	41
Şekil 3.22 4. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	42
Şekil 3.23 5. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	42
Şekil 3.24 6. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	42
Şekil 3.25 7. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	43

Şekil 3.26 8. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	43
Şekil 3.27 9. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	43
Şekil 3.28 10. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	44
Şekil 3.29 11. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	44
Şekil 3.30 12. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi	44
Şekil 4.1 Rüzgar Enerjisi ve Doğal Gazın Yatırım, Yakıt ve Operasyon Maliyetlerinin, Toplam Maliyetlerdeki Yeri	48
Şekil 4.2 Weibull Dağılımı (1998)	52
Şekil 4.3 Weibull Dağılımının Dengelenmesi	53
Şekil 4.4 Bir Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi (1998)	55
Şekil 4.5 Betz Yasası	57
Şekil 4.6 Güç Yoğunluğu ve Güç Çıktısı (1998)	59
Şekil 4.7 Örnek Rüzgar Gülü	60
Şekil 4.8 Kanat Hareket Yapısı	61
Şekil 4.9 Yaw Mekanizması	63
Şekil 4.10 Rüzgar Türbininin Temel Parçaları	64
Şekil 4.11 Bir Rüzgar Türbininin Sistem Yapısı	65
Şekil 5.1 (l, m, u) Bulanık Üçgen Sayısı	77
Şekil 5.2 M_1 ve M_2 Arasındaki Kesişme	79
Şekil 6.1 Rüzgar Enerjisi Santral Yeri Seçimi Hiyerarşisi	86
Şekil 6.2 Duyarlılık Analizi Sonuç Grafiği	101

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu	14
Çizelge 3.2 Bölgelere Göre Gelecekteki Elektrik Talebi (IEA).....	18
Çizelge 3.3 Var olan Rüzgar Kaynağı ve Gelecekteki Dünya Elektrik Talebi	18
Çizelge 3.4 2020’de % 12 Rüzgar Gücü – Elektrik Üretimi	20
Çizelge 3.5 Seçilmiş Piyasalarda Kurulan Rüzgar Türbinlerinin Ortalama Boyutu (kW).....	21
Çizelge 3.6 Beş Farklı Topografik Durum İçin Yer Seviyesinden 50 m Yükseklikteki Rüzgar Hız Dağılımları	28
Çizelge 3.7 Türkiye’deki Rüzgar Enerji Santralleri (20.09.2007)	32
Çizelge 4.1 Enerji Maliyetinin Güç Kaynaklarına Göre Karşılaştırılması [cent/kWh].....	47
Çizelge 4.2 Elektrik Üretimi Maliyeti (cent/kWh).....	48
Çizelge 4.3 Santral Tipi ve Yatırım Maliyetlerinin Karşılaştırılması	49
Çizelge 4.4 Türbin Boyutlarının Kronolojik Olarak Gelişimi.....	64
Çizelge 4.5 Ölçüm Yüksekliği ve Ölçülen Parametreler.....	69
Çizelge 5.1 İkili Karşılaştırmalarda Kullanılan Ölçek	80
Çizelge 6.1 Amaca Göre Ana Kriterlerin Karşılaştırılması.....	87
Çizelge 6.2 Alt Kriterlerin Potansiyele Göre Karşılaştırılması	88
Çizelge 6.3 Alt Kriterlerin Tekniğe Göre Karşılaştırılması	89
Çizelge 6.4 Alt Kriterlerin Sosyal Etkenlere Göre Karşılaştırılması.....	89
Çizelge 6.5 Alt Kriterlerin Ulaşım Göre Karşılaştırılması	89
Çizelge 6.6 Alt Kriterlerin Maliyete Göre Karşılaştırılması	90
Çizelge 6.7 Rüzgar Hızına Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	90
Çizelge 6.8 Rüzgar Yoğunluğuna Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	90
Çizelge 6.9 Hakim Rüzgar Yönüne Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	90
Çizelge 6.10 Çevresel Engellere Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	90
Çizelge 6.11 Kapasite Faktörüne Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	91
Çizelge 6.12 Deprem Kuşağına Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	91
Çizelge 6.13 Altyapı Durumuna Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	91
Çizelge 6.14 Ormanlık Alana Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	91
Çizelge 6.15 Askeri ve Sivil Radar Tesislerine Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	91
Çizelge 6.16 Doğal Yaşam ve Ekolojik Dengeye Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	92
Çizelge 6.17 Hava Alana Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	92
Çizelge 6.18 Yerleşim Birimlerine Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	92

Çizelge 6.19 Tarihi-Turistik Alana Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	92
Çizelge 6.20 Trafo Merkezlerine Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	92
Çizelge 6.21 Elektrik İhtiyacı Olan Merkezlere Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	93
Çizelge 6.22 Sahaya Yakın Karayolu Uzaklığına Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	93
Çizelge 6.23 Kurulum Maliyetine Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması.....	93
Çizelge 6.24 Arazi Maliyetine Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	93
Çizelge 6.25 İşletme ve Bakım Maliyetine Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması	93
Çizelge 6.26 Potansiyel Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları	94
Çizelge 6.27 Teknik Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları.....	94
Çizelge 6.28 Sosyal Etkenler Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları.....	94
Çizelge 6.29 Ulaşım Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları	94
Çizelge 6.30 Maliyet Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları.....	94
Çizelge 6.31 Ana Kriterlere Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları	95
Çizelge 6.32 Bulanık AHP Algoritması ile Elde Edilen Sonuçlar	95
Çizelge 6.33 Potansiyel Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması	96
Çizelge 6.34 Potansiyel Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması	96
Çizelge 6.35 Teknik Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması	97
Çizelge 6.36 Teknik Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması	97
Çizelge 6.37 Sosyal Etkenler Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması	98
Çizelge 6.38 Sosyal Etkenler Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması	98
Çizelge 6.39 Ulaşım Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması	99
Çizelge 6.40 Ulaşım Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması	99
Çizelge 6.41 Maliyet Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması	100
Çizelge 6.42 Maliyet Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması	100
Çizelge 6.43 Duyarlılık Analizi Özet Tablosu	101

ÖNSÖZ

Hızla artan dünya nüfusu ve tüketilen enerji miktarı insanların bu kaynakları sürdürebilmeleri için yeni arayışlara itmiş ve alternatif enerji kaynakları detaylı olarak incelenmeye başlamıştır. Globalleşen dünyada artık enerji sektörü sadece kar açısından incelenmemekte, devamlılığı, çevreye olan etkileri, insanlığa getireceği kaynaklar ve kullanılabilirliği yönlerinden de incelenmektedir. Bu konuda en temiz kaynak olarak bilinen rüzgar enerjisi günümüzde önemini çokça hissettiğimiz küresel ısınmanın da etkisiyle bir kez daha ön plana çıkmaktadır.

Binlerce yıldır teknelerin yelkenlerini şişiren rüzgar, artık elektrik üretimi için esmekte. İnsanlığın enerji alternatiflerinden rüzgar, yel değirmenlerinden rüzgar türbinleri ve rüzgar santrallerine uzanan bir teknolojik süreç yaşamıştır. Gelecek için umut vadeden rüzgar endüstrisi, teknolojinin ilerlemesi ile gelişen türbin tasarımları ve gelişmiş mikro konuşlandırmalar ile maksimum verim için çabalanan günümüzde olduğu gibi, ilerleyen zamanlarda da enerji sıkıntısına izin vermemek için kullanılan önde gelen enerji kaynaklarından biri olacaktır.

Şüphesiz böyle bir teknolojinin insanoğlunun kullanımına sunulması konusunda biz endüstri mühendislerine, verimliliği arttırmak açısından çok büyük görevler düşmektedir. Bana böyle önemli ve güncel bir konuda çalışma ve kendimi geliştirme fırsatı veren ve çalışmam esnasında desteğini hiç esirgemeyerek beni yönlendiren değerli danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Tufan Demirel'e, yüksek lisans çalışmam boyunca bana destek veren TÜBİTAK kurumuna, çalışmam esnasındaki değerli katkılarından ötürü EİE ve Bilgin Enerji Yatırım Holding çalışanlarına, çalışmam esnasında beni her türlü motive eden değerli arkadaşlarıma ve beni bugünlere getiren sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Bu çalışma, günümüzde hızla artan enerji tüketimi ve hızla tükenen enerji kaynaklarına alternatif olabilecek rüzgar enerjisi ve bu konudaki verimliliği arttırmak için rüzgar enerji santralleri kurulumunda yer seçimi konusunda yapılmıştır. Rüzgar enerjisi bir çok yönüyle araştırılmış, tesis yeri seçimi konusundaki öncelikler belirlenerek alternatifler arasında en iyi yerin seçilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada öncelikle enerjinin tanımı ve günümüz için önemi, rüzgar enerjisi ve gelişimi verilmiş, rüzgar enerjisi farklı yönlerden incelenmiştir. Uygun yerin seçiminde kullanılacak bulanık analitik hiyerarşi prosesi yöntemi açıklandıktan sonra kriter ve alt kriterler bulunarak öncelikleri belirlenmiş ve istenen hiyerarşik yapı kurulmuştur. Çıkan sonuçlar son bölümde değerlendirilerek alternatif yerlerden hangisinin seçileceği konusu detaylı olarak incelenmiş ve yorumlar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Rüzgar Enerjisi, Tesis Yeri Seçimi, Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi

ABSTRACT

This study is made in the subject of election layout for wind energy power station for increasing productivity in this subject and wind energy which can be alternative for today's rapidly running out energy resources and rapidly increasing consumption of energy. Wind energy investigated in many ways, layout fundamentals defined and aimed choosing best place among alternatives.

In the study, first of all description of energy and its importance for today, wind energy and development of it given and wind energy examined in different ways. After explaining the method fuzzy analytical hierarchy process which is used for choosing suitable place, fundamentals are defined finding criteria and sub-criteria and the hierarchical construction is built which is wanted. By valuating appeared results the subject of choosing which place in alternatives examined detailed and commentaries presented.

Keywords: Energy, Wind Energy, Election Layout, Fuzzy Analytic Hierarchy Process

1. GİRİŞ

Çağımızda yiyecek içecek kadar önemli tüketim maddelerinin biri ve vazgeçilmez uygarlık aracı enerjidir. Ülkelerin ekonomik, kültürel ve bilimsel seviyeleri onların ürettikleri ve kullandıkları enerji miktarı ile ölçülmekte ve yaklaşık 7 milyar nüfusa sahip dünyamızda sanayileşmiş ülkelerde yaşayan 1 milyar nüfus kullanılan toplam enerjinin yaklaşık %60'ını tüketirken, gelişmekte olan ülkelerde yaşayan 6 milyar nüfusun sadece %40'ını tüketmekte olduğu tespit edilmiştir. Bu veriler de göstermektedir ki enerji üretimi ve tüketimi gelecekte de gelişim için başka amaçlarda kullanılacaktır ve bu sebeple bu konudaki çalışmalar durmadan artmakta ve gelecekte de artmaya devam edeceği tahmin edilmektedir.

Ayrıca enerji konusunun önemi, son günlerde çokça bahsedilen küresel ısınma ve enerjinin temizliği döngüsünün de katılımı ile bir kat daha artmıştır. Bu sebeple dünyada yenilenebilir enerjilere yönelimler olmuş, ülkeler sadece fosil kaynaklı enerji türlerinden yararlanmaya değil, fosil kaynaklara oranla birçok avantajı beraberinde getiren yenilenebilir enerji kaynaklarından da en verimli şekilde yararlanmaya başlamışlardır.

Bu konu ile ilgili de; ülkemiz açısından en ilginç ve dikkat çekici olan yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisi gösterilebilir. Bugün tüm dünya üzerinde milyonlarca insana elektrik sağlayan, milyarlarca dolarlık iş hacmi olan ve on binlerce insana iş olanağı sunan genç bir endüstri olarak rüzgar enerjisi; hızlı bir gelişim ve değişim gösteren güzel bir başarı öyküsü olarak nitelendirilebilir.

Ne acıdır ki tüm dünyada böyle büyük bir başarı göstermiş olan rüzgar enerjisi, ülkemizdeki büyük potansiyeline rağmen çok düşük kullanım seviyelerinde kalmıştır. Bu konuyu ülkemiz açısından stratejik bir hata olarak görüyor ve enerji konusunda yapılacak yeni yatırımların biran önce bu konuya tahsis edilmesini diliyorum.

Küresel ısınma olarak adlandırdığımız, yaşanan iklim değişikliğine tüm dünya ülkeleri temiz enerji ekonomisine geçiş yaparak ayak uydurmalıdır. Bu konuda da rüzgar enerjisi ekonomik ve fosil yakıtları küresel boyutta ikame edebilecek önde gelen enerji çeşidi olması nedeniyle bizleri çıkmazdan kurtaracak en iyi seçim olarak nitelendirilebilir.

Çalışmada rüzgar enerjisi santral yeri seçimi için bulanık analitik hiyerarşi prosesi önerilmiş, çıkan sonuçlar kriterlerdeki değişimlere göre duyarlılık analizine tabi tutulmuştur. Şüphesiz verimliliği arttıracak her yöntem ilerleyen süreçte daha çok ihtiyaç duyacağımız bu enerji türü için de çok büyük önem taşımaktadır.

2. ENERJİNİN TANIMI VE ÖNEMİ

Enerji hem bir üretim girdisi, hem de tüketim maddesidir. Aslında tüm üretim süreçlerinin ortak yanı, değişik oranlarda olsa bile, mutlaka emek, sermaye ve enerji kullanımındır. Enerjiyi bir temel girdi olarak tanımlayabiliriz. Tüketim maddesi olarak da en yaygın biçimde kullanılmaktadır. Aydınlatma, konfor sağlama, temizlik vb. akla gelebilecek uğraşların büyük çoğunluğu bir enerji tüketimini de beraberinde getirmektedir.

Günümüzde enerji üzerinde en çok durulan konulardan biri haline gelmiştir. Enerjinin önemine değişik boyutlardan yaklaşılabılır. Kimine göre enerji teknik bir sorundur, teknoloji geliştikçe bu sorunda ortadan kalkacaktır. Kimine göre ise enerji ekonomik bir sorundur. Aşırı biçimde artan petrol fiyatları tüm yakıtların fiyatlanmasına yol açmıştır. Aslında maliyeti 1–2 \$'ı bile bulmayan petrol anormal kazançlarla değil de, normal kazançlarla üretilirse, enerji sorunu da çözümlenmiş olacaktır. Diğer bir görüşe göre dünyanın enerji kaynakları tükenmektedir. Doğal olarak tükenen bu kaynağın değeri arttığı gibi, bulunması da güçleşmektedir. Bazılarına göre ise enerji sorunu çok uluslu petrol şirketlerinin açtığı bir derttir; bunlar yola getirilmedikçe soruna çare bulunamayacaktır.

Büyük bir olasılıkla bu ve benzeri tüm etkenler belli ölçülerde enerji sorununa sebep olmuştur. Ancak şunu belirtmekte yarar vardır ki, enerji sorunu her ülkede değişik sebeplerin bileşimlerinden oluşmuştur ve çözümü de oldukça farklı önlemleri gerektirmektedir. Her ne kadar bazı genellemeler yapılabilir ise de, sadece bunlara dayalı olarak belirlenecek politikalar da önemli mahsurlar taşıyabilir (Bozok,1999).

Enerji fiyatlarında son yıllara kadar gözlenen artışlar, özellikle enerji ithalatçısı kalkınmakta olan ülkelerin yerli enerji kaynaklarını geliştirerek dışa bağımlılıklarını en aza indirmeleri için en kısa zamanda önlem almalarını mecbur kılmıştır.

Enerji kaynağının ulusal kalkınma içindeki kritik önemi 1973–74 dünya petrol fiyatlarındaki ani ve önemli artışa kadar göz ardı edilmiştir. Dünya petrol şoku ile tüm dünya enerji kaynaklarının tükenebilir niteliği yanında, ucuz olmadığının da bilincine varmıştır. Bunun yanı sıra kişi başına enerji tüketimi ile kişi başına gelir arasında oldukça yakın bir ilişki olduğu da bugün herkes tarafından kabul edilmektedir. Kalkınmakta olan bir ülke daha yüksek bir kalkınma istiyorsa, üretimi arttırmak amacıyla fert başına enerji tüketimini de arttırmak mecburiyetindedir.

Enerji tüketiminin ekonomiyi etkileyişini belirleyen faktörlerin en önemlileri; enerji ithal oranı ve ülke ekonomisinin dış ticaret yapısıdır.

Tüketilen enerji tamamı yurtiçi kaynaklara dayalı ise, enerji üreten sektör de herhangi bir diğer sanayi kesimi gibi katma değer meydana getirir. Eğer bu sektör üretimini, diğer sektörlerle kıyasla daha verimli yapar ise, zaman içinde ekonominin genel gelişme hızından daha büyük bir hızla gelişir ve ekonomiyi olumlu yönde etkiler. Bunu şöyle ifade etmek de mümkündür; temel girdi olarak tanımlanan emek, sermaye ve enerji ekonomi içinde belli bir rekabet halindedir. Her girdi fiyatına oranla sağladığı ekonomik yarar ölçüsünde rekabet gücüne sahip olursa, ekonomi daha fazla enerji talep edecek ve tüketecektir. Verimli olan bu girdiyi daha fazla tükettiği için de ekonominin gelişme hızı artacaktır.

Oysa enerji girdilerini büyük oranda ithal yoluyla sağlayan ekonomi için ise durum oldukça farklıdır. Konuya açıklık getirmesi için, tükettiği enerjiyi tümüyle ithal eden bir ülke göz önüne alındığında, enerji alımı döviz ile yapılacağından, olay bir dış ticaret meselesi haline gelmekte ve ülkenin ithal-ihrac hacmi ile bunların kompozisyonu önem kazanmaktadır. Dış ticaret hacmi GSMH'ya küçük olan bir ekonomi, enerji fiyatlarının değişiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. Çünkü enerji fiyatlarındaki artışı karşılayabilmek için ihracatın hemen hemen aynı oranda (kısa sürede) arttırmak mecburiyetinde kalacaktır. Aksi takdirde üç seçenek bulunmaktadır. Bunlar (Bozok,1999);

- Enerji tüketimini kısmak
- Diğer ithalat bedellerini kısmak
- Borçlanmak

Kısa vadede ilk iki şıkkı gerçekleştirmek oldukça güç ve politik olarak sakıncalı bulunduğundan genellikle borçlanma yoluna gidilir. Öte yandan alınan borç sadece artan ithal girdilerinin bedellerini ödemeye harcanır ise, karşılaşılan kriz atlatılır. Fakat bunun karşılığında ileriki yılların ekonomik gelişmesi ipotek edilmiş olur. Oysa alınan borç, dış ticaret yapısını da değiştirmeyi amaçlayan biçimde kullanılır ise, bu ipoteğin bedeli daha kolay ödenebilir.

Borçlanma ile tüm açığın kapanmasının mümkün olmadığı halde 1. ve 2. şık bir arada uygulanmaktadır. Bu durumda ekonomide hissedilir bir yavaşlama olmakta ve hem işsizliğe, hem de enflasyona yol açabilmektedir. Nitekim enerji ithal eden birçok ülkede, 1973–74 ve 1979–80 petrol fiyatları artışları sonucu ciddi ekonomik sorunlar baş göstermiştir.

Yurdumuzda, bir yandan artan nüfus, öte yandan sanayileşme, enerji türlerine olan ihtiyacı hızla arttırmıştır. Bu arada elektrik enerjisi talep artışının, öteki enerji türlerinden çok olması

nedeniyle, dünyada elektrik enerjisi daha fazla üretilmeye ve tüketilmeye başlanmıştır.

Ekonomik gelişme süresince, Türkiye’de görülen genel enerji ve elektrik enerjisi darboğazının çok büyük önem taşıdığı bilinmektedir. Bu önem, enerji üreten sektörlerin ekonominin öteki sektörleri ile yapısal bağlılığından kaynaklanmaktadır. Ülkemizde, elektrik enerjisi üretimini arttırabilecek acil önlemlerin alınması ve daha az enerji kullanan teknolojilerin uygulanması kısa dönemde mümkün olmaktadır. Buna karşın yine kısa dönemde, ekonomik gelişme ile sosyal refahın yükselmesini engellemeden ve sanayi sektörünün verimliliğine zarar vermeden, genel enerji ve elektrik enerjisi talebini azaltma olanakları bulunmaktadır. Bu açıdan, ülkemizde elektrik enerjisi açığının zaman geçirilmeden kapatılmasının tek yolu olan ekonomik politikalar büyük önem taşımaktadır.

Ülkelerin enerji taleplerini hassas ve gerçeğe yakın bir şekilde ortaya koymaları, özellikle enerji fiyatlarının giderek arttığı yüzyılımızda daha da önem kazanmaktadır. Üretim planları ile büyük sermaye gerektiren yatırım kararlarının alınmasında, sürekli yenilenebilir, revize edilmeye her an açık hale getirilmesinde tüm dünya ülkelerinde ve uluslar arası kuruluşlarda çalışmalar sürdürülmektedir (Bozok,1999).

2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Küresel Isınma

Özellikle son günlerde tartışılan fosil kaynaklı enerji politikalarının çevreye olan etkisi ve küresel ısınmanın gün geçtikçe büyük bir hızla artış göstermesi bu konuyu böyle bir bakış açısında değerlendirmemi mecbur kılmaktadır. Enerji politikasının kısa bir süreç içerisinde birden değiştirilmesi mümkün olmayacağından, bu konudaki çalışmaların ivedilikle yapılarak dünyanın yeni bir enerji politikası dahilinde bu sorunu çözmesi gerekmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerjilerin gelişiminin iyi incelenmesi gerektiği kanısındayım.

Yenilenebilir enerjiler tükenmeme avantajına sahiptir. Fosil enerjilerle karşılaştırıldığında çevreye daha dost oldukları ve çok daha düşük sera etkisine sahip oldukları görülür. Başlıcaları, hidrolik enerji, rüzgar enerjisi, biomas, solar enerji, fotovoltaiik sistem ve jeotermal enerjidir. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları grubu içinde yer alan güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi alışlagelmiş enerji kaynaklarının karşısında birer alternatiftir. Temelde rüzgar enerjisi de dönüşüme uğramış güneş enerjisidir. Gerek güneş enerjisi ve gerekse rüzgar enerjisi çevre dostu temiz enerji kaynaklarıdır. Bu kaynakların, yenilenebilir yani tükenmeyen kaynaklar oluşu, doğanın temel düzeninden kaynaklanmaktadır (Yücel,2000).

İnsan, yaşamını doğal çevrede sürdürürken ihtiyaçlarını da doğal kaynaklardan sağlıyordu. Kurutmayı ve ısınmayı güneşle, tahıl üretimini rüzgarla yapıyor, bir kandilin ışığıyla aydınlanabiliyordu. Nüfus artıp ihtiyaçlar çeşitlenince, "daha çok" ve "daha hızlı"yı isteyen insan, yeni kaynakların arayışına girdi. Önce buharın keşfinde olduğu gibi kullandığı kaynakları yoğunlaştırarak "daha fazla" enerji elde etti. Ancak suda yaptığı yoğunlaştırmayı güneşin dağınık enerjisini birleştirmek için denemek yerine daha kolay bir yolu seçti. Yakılmasıyla daha fazla enerjiyi açığa çıkaran yakıtlara yöneldi. Fakat bu yakıtların çevreye ve atmosfere verdiği zarar, sağladığı faydayı gölgeledi.

Çok değil, 100 yıl gibi kısa bir sürede fosil yakıtların doğaya ve canlıların sağlığına verdiği zararlar etkisini gösterdi. Kömür, doğalgaz, petrol gibi binlerce yılda oluşmuş kaynaklar "insanlığın gelişmesi" adına tükendikçe, atıklarıyla; hava, su, toprak da tükenmeye başladı. Fosil yakıtlar olarak adlandırılan kömür, petrol ve doğalgazın yarattığı olumsuzluklar sadece yakın çevreyle sınırlı kalmadı; atmosfere de yayıldı. Sonunda bu kirlilik, iklim değişikliğine yol açmaya ve dünya yaşamını tehdit etmeye başladı.

Bugün fosil yakıtların çevre ve insan sağlığı açısından yarattığı olumsuzluklar her geçen gün katlanarak artıyor. Fosil yakıtlar yakıldığında altı sera gazının açığa çıkmasına neden oluyor. Bunlardan en belirleyici olanları karbondioksit (CO_2) ve metan. Diğerleri ise kükürt, partikül madde, azot oksit, kurum ve kül...

Yanma sırasında ortaya çıkan karbon monoksit (CO), oksijenden çok daha hızlı bir şekilde kandaki hemoglobine tutunarak vücuttaki oksijeni bloke ediyor ve baş ağrısı vb. hastalıklara yol açıyor. Kömür ve petrolün yanmasıyla ortaya çıkan, kükürt dioksit (SO_2) ise kokusuyla fark ediliyor. Sülfürik aside dönüşerek insan sağlığına ve doğal çevreye onarılmaz zararlar veriyor; kanser ve diğer hastalıklara yol açıyor.

Doğalgazın yanmasıyla ortaya çıkan kokusuz ve gözle görülemeyen azot oksit ise güneş altında reaksiyona girerek nitrata dönüşüyor. Akciğerlerin koruma mekanizmasından geçen nitrat vücutta nitrik aside dönüşüyor. Bu da bağışıklık sistemini çökerten maddelerin başında geliyor.

Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların iklim değişikliğine yol açmasının nedeniyse, yanma sırasında ortaya çıkan CO_2 ve metan gibi sera gazlarının bünyelerinde ısı tutma özelliğine sahip olmaları. Güneş, gün doğumundan batımına kadar atmosferin içine ısı ve ışığını veriyor. Doğal döngünün devamı için, bu ısı tekrar uzaya transferi gerekiyor. Oysa fosil yakıtların neden olduğu sera gazları, ısıнын bir kısmının atmosferde tutulmasına yol

açıyor. Böylece dünya ısınmaya ve iklim değişmeye başlıyor [12].

2.1.1 Sıcaklık Artışının Sonuçları

Atmosferdeki CO₂ oranı sanayi çağı öncesine göre %25 artmıştır ve 2050 yılında iki katına çıkacaktır. Bu artışın getirdiği sera etkisiyle dünya sıcaklığı 1900'den beri 0.4 – 0.6 C° yükselmiştir. 2100 yılı tahmini ise 2.0 C° 'dır. İklim değişikliğinin zincirleme sonuçları yavaş yavaş yaşamımızı etkilemeye başlamıştır. Su kaynakları kurumakta, çiçekler erken açmakta, erken yağın karlar ürünleri telef etmekte, bitkiler zamansız meyve vermekte yada hiç vermemektedir. CO₂'nin yanında atmosferdeki asit gazlarının çoğalmasa da canlılar üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Normal şartlarda çevreye zararları 0.7 – 4 US cent/kWh'dır.

Uzmanlar, fosil yakıtların etkilerini kısa ve uzun vadeli olarak değerlendiriyorlar. Kısa vadede oluşan sonuçlar artık yaşamımızın bir parçası olmuş durumda. Sıcaklık arttıkça buzlar ana kütleden koparak eriyor, çığ olayları artıyor, fazla miktarda su dolaşıma giriyor, sel felaketleri, fırtınalar, kasırgalar oluşuyor. Deniz kıyısında yaşayan binlerce kişi sel suları altında ölüyor.

Küresel ısınmanın, uzun vadede öngörülen sonuçları daha vahim; ortalama sıcaklık artışı bu hızla devam ederse, önümüzdeki yüzyıl içerisinde deniz seviyesi 15 – 95 cm kadar yükselecek. Bu, dünyanın en büyük kentlerinin sular altında kalması anlamına geliyor.

Dünya genelindeki bu kirlenmelerin üçte birinin elektrik üretiminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Fosil yakıt rezervleri doğal olarak azalmaktadır. 1996 yılı rakamlarıyla aktüel kullanım ve rezerv oranlarına göre kömür 235 yıl, petrol 43 yıl, doğalgaz 66 yıl sonra tükenecektir. Pratikte yıllar geçtikçe yeni rezervler bulunmakta ve teknolojinin gelişmesiyle eskiden ekonomik olmayan kaynaklar da buna katılmaktadır. Fakat şu anda tüketim hızı dünyada doğal fosil oluşum hızının 300.000 katıdır. Diğer bir deyişle, bir günde bin yıllık oluşumu tüketiyoruz. Bu gidişle de rezervlerin tükenmesi kaçınılmazdır.

Kısa vadede fosil yakıtların yerini tamamen alabilecek bir yenilenebilir enerji yoktur, fakat mevcut teknolojiler desteklenerek hem rezervler için süre kazanılabilir hem de yumuşak bir geçiş sağlanarak petrol ve türevleri şu anda hiç alternatifi olmayan plastik hammaddesi olarak değerlendirilebilir [8].

Sıcaklık artışının kısa vadede meydana getirdiği değişimlerin yaşanmaya başlaması ve buna bağlı olarak yapılan tahminler, sivil kuruluşlarla birlikte hükümetleri de harekete geçiriyor. Suların altında kalma tehlikesiyle karşı karşıya kalan 77 ada devleti ve Malta'nın inisiyatifleriyle

lkeler, 1992 yılında Rio evre Zirvesi'ne giden süreci başlattılar. 1992'de yapılan Rio Zirvesi'nin ardından, gelişmiş ülkeler 1992'de Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği ereve Sözleşmesi'ni imzaya açtılar. Zirveye katılan ülkeler, diğer ülkelerle çözüm bulmak ve sera gazı emisyonlarını 1990 yıllarındaki seviyenin altına çekmek için, ülkelerin uyması gereken kuralları belirlemek üzere bir dizi Taraflar Konferansı (COP) düzenlediler. Ancak pek çok ülke yine ekolojik dengeleri ya da insan ve evre sağlığını değil, kendi ekonomik çıkarlarını gzetince anlaşmada zorlandılar. Afganistan, Irak, Somali ve Türkiye gibi bazı lkeler Rio anlaşmasını görmezlikten gelerek, bugüne kadar onaylamadılar. 1997 yılında yapılan Kyoto İklim Zirvesi'nde ise ABD, Kanada, Japonya, Avustralya gibi bazı ülkeler kendi ülkelerinde sera gazı emisyonlarında indirim yapma sorumluluğunu üstlenmek istemediler. Bu arada kendi ülkelerinde güneş, rüzgar gibi temiz enerji kaynaklarını kullanan enerji sistemlerini geliştirerek Kyoto hedeflerini tutturmaya çalışan endüstrileşmiş Avrupa Birliği lkeleri ise, Yunanistan, Portekiz, İspanya gibi birliğe yeni katılan ülkelerin emisyonlarını 1990 yılına göre yüzde 30 civarında artırmasına göz yumulmasını istediler.

Bir yandan ulusal ve ekonomik çıkarlar gözetilirken, diğer yandan da nükleer enerji dahil olmak üzere petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların zararını fark edenler, standart dışı ve pazar değeri olmayan p teknolojileri, bunun farkında olmayan ülkelere, aktarmaya başladılar. Bu teknolojileri satabilmek için kredi veren ülkeler, geçmişin sorunlu teknolojilerini başka ülkelere de taşıdı, taşıyor. Bunu yaparken de sorunun, iklim değişikliği ve küresel kirlenme gibi sonuçlarla kendilerine döneceğini hesap etmiyorlar [12].

2.1.2 Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji

Fosil ve nükleer yakıtlara alternatif doğal enerji kaynakları konusunda yapılan araştırmalar sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kavramlarını da gündeme getirdi. Yaşamın sürdürülebilirliği için kaynakların sürdürülebilir olması yeterli değildi. Ekolojik denge için kaynakların yenilenebilir olması gerekiyordu. Bir şeyin sürekliliği sürdürülebilir olduğunu göstermiyordu. Sürdürülebilirlik bütün açısından ancak yenilenebilir olursa mümkündü. Bu nedenle enerji sistemlerinin sürdürülebilir, enerji kaynaklarının yenilenebilir olması gerekiyor [12].

Yenilenebilir enerji kaynakları, kendisini dünya var oldukça yenileyen, yani tükenmeyen enerji kaynaklarıdır (şen,2003).

Başka bir deyişle; yenilenebilir enerji kaynağı, "doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanıyor. Bugün yaygın olarak kullanılan

fosil yakıtlar, yakılınca biten ve yenilenmeyen enerji kaynakları. Oysa hidrolik (su), güneş, rüzgar ve jeotermal gibi doğal kaynaklar yenilenebilir olmalarının yanı sıra temiz enerji kaynakları olarak karşımıza çıkıyor [12].

Devlet Planlama Teşkilatı 8. Beş Yıllık Plan Enerji Özel İhtisas Komisyonu Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimi Alt Komisyonu'nun hazırladığı raporlar, 2005 yılına kadar ülkemizde rüzgar güç santralleriyle 5000 MW kapasitede elektrik üretiminin mümkün olduğunu ortaya koyuyordu. Bu o yılda; Türkiye'nin toplam elektrik ihtiyacının yüzde 7'sinin rüzgardan sağlanabileceği anlamına geliyordu. Takvimler bugün 2007 yi göstermekte ancak ne kadar üzücüdür ki Türkiye'de kurulu rüzgar gücü santrali günümüz için 67 MW civarında kalmakta. Ayrıca ülkemiz için enerji tüketimimiz ve büyüme hızımız dikkate alındığında, ileride ihtiyaç duyacağımız enerji miktarı konusunda sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının ve özellikle rüzgar enerjisinin önemi bir kat daha artmaktadır. Ülkemizde 2003 yılı sonu itibarı ile 45420 MW toplam kurulu güç ile 160332 milyar kWh elektrik tüketilmiştir. Yüzde 8'lik bir yıllık büyüme ile bu her yıl 3600 MW yeni kurulu güç demektir. Bu ise, her yıl 1.5 katı büyüklüğünde bir Atatürk Barajı, yani, 4-4.5 milyar USD yatırım yapılması demektir. Bu konuda asıl konu her bir enerji branşının ayrı ayrı savunulması yada çıkış yolu olarak gösterilmesi değil optimum enerji üretiminin en uygun politika ve stratejiler ile üretilerek tüketime sunulmasıdır. Bizim savunduğumuz konu da rüzgar enerjisinin tek başına kurtuluş yolu olması değil bu çıkmazı aşabilmek adına büyük bir katkısının olabileceğidir.

2020 yılında dünyada üretilen elektriğin yüzde 50'sinin yenilenebilir kaynaklardan olması planlanıyor. 2010 yılında kullanılacak elektrik enerjisinin yüzde 10'u ise rüzgardan sağlanacak. Bunun dışında dünyada pek yaygın olmayan başka yenilenebilir enerji kaynakları da bulunuyor. Dalga, med-cezir (gel-git), çöpten sağlanan metan gazı ve kanalizasyon ıslısından da ısınma ve elektrik üretimi için enerji elde edilebiliyor. Doğaya saygılı enerji kaynaklarının kullanımı arttıkça, yeni enerji kaynakları konusunda yapılan araştırma faaliyetleri de artıyor [12].

3. RÜZGAR ENERJİSİ ve GELİŞİMİ

Dünyada ilk yel değirmeni, MS 644 yılında İran-Afganistan sınırındaki Seistan'da kurulmuştur. MS 750–850 yıllarında Çin'de pirinç tarlalarının sulanmasında da yel değirmenleri kullanılmıştır. Rüzgarın elektrik enerjisinde ilk kullanımı ise 1882 yılında Amerika'da New York'ta gerçekleştirilmiştir. Rüzgar enerjisi Avrupalılar tarafından önceleri daha çok tahıl öğütme işlemlerinde kullanılmakta idi. Hollanda, İspanya, Danimarka, Ege Adaları'nda bunların örneklerini görmekteyiz. 19. yy.ın sonlarına doğru da kuyulardan su çekme amacına yönelik olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Ayrıca İran, Suriye ve Türkiye'de de 12. yy.dan itibaren yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Ültanır,1998).

Yeraltından su çekmek için kullanılan rüzgar türbinleri elektrik üretim amaçlı kullanılan rüzgar türbinlerinden daha basit yapıdadır. Rüzgar tarafından oluşturulan enerji, pervane şaftına gelerek doğrudan su çekmek için yapılan tulumba mekanizmasına verilmektedir. Su çekme ve sulama amacına yönelik kullanılan rüzgar türbinleri 12–24 kanatlı, 2–5 m pervane çaplı ve 10-30 m yüksekliğinde tasarlanmaktadır. Zeminden çekilen su, borularla dışarıda bulunan ve biraz yüksekçe bir su deposunda toplanmaktadır. Su deposunun yüksek olmasının nedeni suya yükseklik enerjisinin kazandırılarak tarlaya dağıtımı için ek bir enerjiye ihtiyaç duyulmasını engellemektir. 1980'li yıllarda 55 kW gücünde rüzgar türbinleri piyasada satılırken, bugün 1,5 MW büyüklüğünde bir rüzgar türbini tesis ederek, örneğin 850 yataklı bir otelin tüm gereksinimini karşılayacak elektriği üretmek mümkün hale gelmiştir. 1990'larda rüzgar enerjisi dünyanın en hızlı gelişen enerji kolu oldu. Dünyadaki rüzgar enerji santrallerindeki son üç senenin ortalama yıllık artış hızı %35,7 iken, kurulu güç 3 senede 2.5 katına ulaştı. Dünyada rüzgar enerjisini kullanan ilk 10 ülke sırasıyla; Almanya, İspanya, ABD, Danimarka, Hindistan, İtalya, Hollanda, İngiltere, Çin ve İsveç'tir. Çevreci politikaların da etkin hale gelmesiyle 1998 yılında dünya genelinde kullanılan rüzgar enerjisine 2100 MW'lık yeni bir kapasite eklenmiştir. Bu bir rekordur; fakat yeni bir rekor olmasının yanı sıra bir önceki seneden %35 daha fazla rüzgar enerjisi kapasitesi demektir. Yine de yaşanan bütün gelişmelere karşın dünya çapında kullanılan rüzgar enerjisi, enerji gereksiniminin yalnızca %1'ini karşılamaktadır. Bununla birlikte hızla artan kapasitesi ile rüzgardan elde edilecek enerji yakın gelecekte enerji gereksinimini karşılayacak ciddi bir kaynak halini alabilir.

Günümüzde rüzgar santralleri karalarda olduğu kadar denizlerde de kurulmaktadır. Karadan denize geçiş ilk uygulamalarla teknik alanda başarılmış ve ticari uygulamaları da gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte daha gelişkin sistemler için AR-GE çalışmaları sürmektedir. Deniz üstü rüzgar enerjisi ile ilgili ilk çalışmalar 1970'li yılların sonuna doğru

Danimarka, Hollanda, İsveç ve ABD’de başlamıştır. 1980’li yılların başında bu çalışmalar Uluslar arası Enerji Ajansı (IEA) bünyesinde yürütülmüştür. İlk deniz üstü “rüzgar çiftliği” Danimarka’da Loland adası yanında kurulan Vindeby rüzgar çiftliğiydi. Bu çiftlikte 5 MW’lık enerji üretilabiliyordu. 1991 yılı ortalarında işletmeye açılan çiftlik, Danimarka Enerji Bakanlığı’nın 100 MW’lık projesinin bir bölümünü oluşturuyordu. Avrupa’da 1995–1997 yılları arasında kapasitesi 12 MW olan rüzgar santralleri kurulmuş olup günümüzde bu santrallerin kapasitesi arttırılmaktadır. Sözelimi İngiltere’nin doğu kıyısında, Inner Dowsing adı verilen bölgede karaya 5 km uzaklıkta yapılması planlanan bu santralde hedef 1.4 MW gücünde 9 türbin kurup 12.6 MW enerji üretmektir (Ültanır,1998).

Ülkemizde 1992 yılında Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği kurulmuştur. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğine bağlanmıştır. Pek çok kamu kurumu ve özel sektörden katılan üyelerden oluşmuştur. Enerji bakanlığının ve özellikle bu birliğin etkin çalışmaları sonucu, özel şirketler tarafından ilk defa 1998’lerde İzmir- Çeşme, Alaçatı mevkiinde ARES – Güç Birliği şirketi tarafından toplam 7.2 MW güçte rüzgar türbinleri kurularak elektrik üretimine geçilmiştir. Aynı yıllarda Çanakkale-Bozcaada’da Demirer Holding tarafından 10.2 MW’lık güçte rüzgar türbinleri kurulmuştur. Bu türbinler dönmeye ve elektrik üretmeye devam ederken ülkemizde pek çok yerde daha kurulması için büyük şirketlerin çalışmalarının devam etmektedir.

Ülkemizde bu konuda yapılan çalışmalar özellikle bu yıl içerisinde büyük bir ivme kazanmıştır. Şirketlerin yatırım yapmalarını kolaylaştırmak amacıyla REPA (Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası) geçtiğimiz aylar içerisinde tanıtılarak, bu sektördeki firmaların kısa sürede yol alarak yatırımlarını tamamlamaları ve hem şirketler adına hem de ülke adına geride kalınan bu konuda büyük bir gelişme kaydedilmesine çalışılmaktadır.

Rüzgar enerjisi konusunda çalışan bir çok ünlü firma son dönem içerisinde çalışmaları hızlandırmışlardır. Bunlar, As Makinsan A.Ş., İzmir-Çeşme’de ve Çanakkale-Karacaören’de ve Demirer Holding İzmir-Çeşme ve Muğla–Datça’da rüzgar türbin kurma çalışmalarını sürdürmektedir. Aynı şekilde Interwind Ltd., Çanakkale-İntepe ve Atlantis Tic., Balıkesir-Bandırma’da türbin kurma çalışmalarını sürdürmektedir. Ülkemizde rüzgar enerjisinden rüzgar türbinleri kurarak elektrik üretmek amacıyla çalışan diğer büyük şirketlerin isimleri de şöyledir: Prokom A.Ş., Mage A.Ş., Yapısan Ltd., Ak-En A.Ş., Enda A.Ş., Simelko A.Ş., Teknik Tic., Akfırat A.Ş., Bilgin Holding- Escort A.Ş., ..., gibi .

Ayrıca Dünya Bankası, Avrupa Yatırım Bankası gibi finans kurumları ülkelerdeki temiz enerji kaynaklarından enerji üretecek projelere kredi vermektedir (Akgün (b),2004).

3.1 Rüzgarın Tanımı

Yer yüzeyinin gerek duyduğu enerjinin tümü güneşten gelir. Güneş yer yüzeyine her saat 100.000.000.000.000 kWh’lık enerji yayar. Başka bir deyişle, yer yüzeyi güneşten 10^{17} vat gücünde enerji alır. Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %1–2 si rüzgar enerjisine dönüşür. Yani rüzgar enerjisi, hız enerjisine dönüşmüş güneş enerjisidir.

Karalar, denizler ve havaküre farklı özgül ısılarla dolayısıyla farklı sıcaklıklara sahip olurlar. Sıcaklık dağılımı, coğrafik ve çevresel koşullara bağlıdır. Yerkürede ortaya çıkan sıcaklık ve buna bağlı basınç farklılıkları, rüzgarın oluşmasına neden olur. Yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eden hava, “rüzgar” olarak isimlendirilmektedir. Yeryüzünde oluşan hava kütlesi hareketleri, yerin dönmesinden kaynaklanan “coriolis” kuvvetten ve yeryüzü ile akışkan hava kütlesi arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenirler [1].

3.2 Rüzgara Özgü Tanımlar

Rüzgar enerjisini daha iyi anlayabilmek için ona özgü bazı tanımların bilinmesi konunun ilerleyen safhaları için yararlı olacaktır. Bu sebeple aşağıda ilgili tanımlar kısaca açıklanmıştır.

3.2.1 Rüzgar Hızının Kısa Periyot Değişkenliği

Rüzgar hızı çok küçük periyotlarla daima değişen dalga özelliği göstermektedir. Değişimin büyüklüğünün nasıl olduğu hem havaya hem de yüzey koşulları ve engellere bağlıdır [1].

3.2.2 Günlük Rüzgar Değişimi

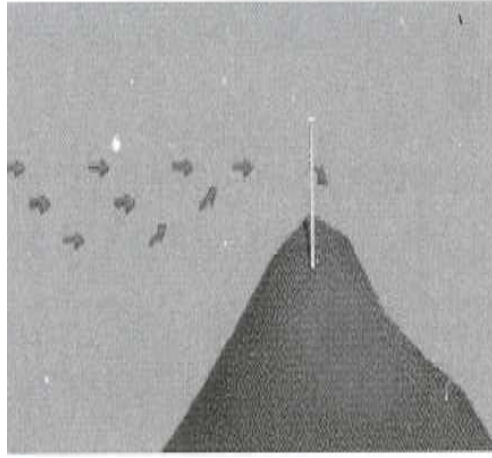
Yer küredeki bir çok yerde, gündüzler gecelerden daha rüzgarlıdır. Bunun asıl nedeni deniz yüzeyi ve kara yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının gündüz gecedan daha fazla olmasıdır. Bu durum, enerjinin gündüz gecedan daha fazla üretilmesi ve tüketilmesinden dolayı önemli bir üstünlük sağlar [1].

3.2.3 Rüzgarın Yıllık Değişimi

Rüzgarın yıldan yıla değişimi %10–20 arasındadır. Danimarka da bu oran 19 yıl boyunca yaklaşık %9–10 arasında gözetlenmektedir [1].

3.2.4 Rüzgar Hızlanması (Tepe Etkisi)

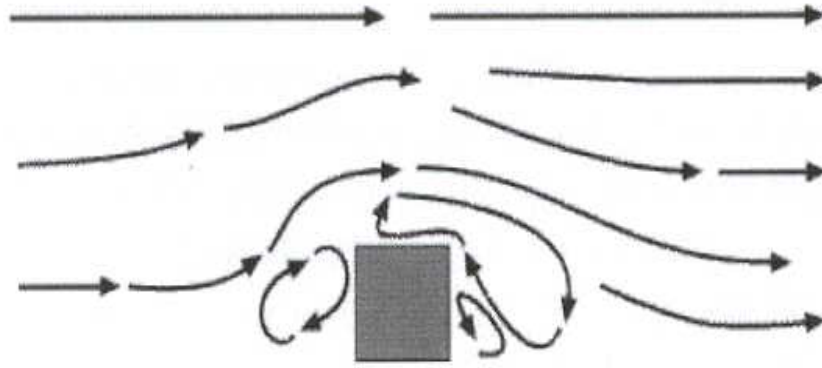
Arazide türbinleri en iyi yerleştirilecek yer, hakim tepe ve sırtlarıdır. Bu durumu arazide baskın rüzgar yönü açısından olabildiğince üstünlük sağlar. Ayıca, tepelerde rüzgar hızları, çevre arazilerden genellikle yüksektir. Tepenin rüzgarlı yanı ile kıyaslandığında, hava tepeye ulaşır ve tekrar dağılarak rüzgarsız yamaçtan alçak basınca doğru hareket eder. Düzgün ve pürüzsüz olmayan tepelerde yüksek rüzgar hızı üstünlüğüne karşın türbülans önemli bir olumsuzluk oluşturur [1].



Şekil 3.1 Tepede Rüzgar [1]

3.2.5 Rüzgar Türbülansı (Girdabı)

Çok engebeli ve pürüzlü arazilerde binalar, ağaçlar gibi engeller çok fazla türbülans yaratır. Türbülans, düzenli olmayan rüzgar akışıdır. Bu akış çevrede dönme ve vorteks yaratır. Türbülans, rüzgar türbininde, rüzgardan enerji üretim verimliliğini azaltır. Türbülans, türbinde yıpranma hasarlanma ve bozulmalara neden olur. Kulelerin genellikle yüksek yapılmasının bir nedeni, hem türbülansdan kaçınmak hem de yüksek rüzgardan daha çok yararlanıp daha çok elektrik üretmektir. Düşük türbülans yoğunluğu, rüzgar türbinleri için daha fazla ömür sağlar. Denizlerde türbülans karadan daha azdır bu nedenle denize kurulan türbinler karaya kurulanlardan daha uzun ömürlüdür [1].



Şekil 3.2 Engelde (Bina) Türbülans Etkisi [1]

3.3 Dünyada Rüzgar Enerjisine Bakış

Öncelikle tüm dünya geneli için rüzgar enerjisinin değerlendirilmesi ve diğer ülkelerin bu enerjiye bakış açılarını incelersek, daha sonra ülkemiz için yapacağımız değerlendirmeler daha tutarlı olacaktır. Bu açıdan öncelikle potansiyeli incelemek bize yön gösterici olacaktır.

3.3.1 Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Dünyanın rüzgar enerjisi potansiyelini tahmin etmek ve belirlemek zordur. Fakat bilimsel çalışmalar ham rüzgar potansiyelinin sadece % 10'nun kullanılmasıyla, dünyanın elektrik enerji gereksiniminin tamamının karşılanabileceğini göstermiştir.

Dünya Enerji Konseyi (WEC) dünya rüzgar kaynağının teknik potansiyelini, km^2 başına 8 MW üretim kapasitesi ve %23 kapasite faktörü kabul ederek, dünya potansiyelini yılda 20.000 TWh olarak tahmin etmiştir. Yerden 10 metre yükseklikte dünya yüzeyinin yaklaşık % 27'sinin yıllık ortalama rüzgar hızı 5.1 m/s'den daha yüksektir. Uygun olmayan arazi, yerleşim alanları, tarımsal amaçlar ve diğer arazi kullanımları nedeniyle bu alanların sadece %4'ü elektrik üreten rüzgar tarlaları için uygundur. Bu alanlar kıta alanlarının 50° kuzey ve güney enlemleri arasında 1000 km^2 'lik sahil şeridi içinde bulunmaktadır. Ekonomik, estetik ve fiziksel planlama kısıtları nedeniyle bunun yaklaşık üçte birinin gerçekleştirilebileceği kabul edilmiştir.

Rüzgar enerjisi bakımından denizler, karasal alanlara göre daha zengindir. Kıyıdan 10 km açıklıkta ve 10 m derinlikteki alanların potansiyeli 750 TWh/yıl iken, kıyıdan uzaklığı 30 km ve su derinliği 40 m olan yerlerde 3500 TWh/yıl düzeyine çıkmaktadır (EİE,2006).

Rüzgar enerjisinin gün geçtikçe önem kazandığı günümüz koşullarında dünya üzerinde de bu konuda birçok kapsamlı araştırma ve projeler yürütülmektedir. Küresel ısınmanın da etkisini yadsınmadığı bu koşullar dünya üzerinde rüzgar enerjisinin kısa bir süre içerisinde daha yaygın olarak kullanılacağına sinyallerini vermektedir. Rüzgar enerjisi dünyada ciddi biçimde yaygınlaşacaksa, öncelikle bu hedefleri gerçekleştirecek doğal kaynakların var olup olmadığını açıkça anlamak gerekir. Uygulamada, elektrik üretiminde kaynak yetersizliğinin, rüzgar gücü kullanımı açısından sınırlayıcı bir etken olma olasılığı yoktur. Dünyanın rüzgar kaynaklarının 53.000 TWs/yıl olduğu hesaplanırken, 2020 yılına kadar dünya elektrik tüketiminin 25.579 TWs/yıl'a yükselmesi beklenmektedir. Bu nedenle teknik olarak elde edilebilecek küresel rüzgar kaynağı, dünyanın tüm elektrik gereksinimi için yapılan tahminin iki katından fazladır. Bugüne kadar yapılmış araştırmalar, dünyanın rüzgar kaynaklarının çok büyük ve neredeyse tüm bölgelere ve ülkelere yayılmış durumda olduğunu göstermektedir. Bunların büyüklükleri konusunda birçok değerlendirme yapılmıştır.

Bu tür çalışmalarda kullanılan yöntem, yer düzeyinden 10 metre yükseklikte, saniyede 5-5,5 metreyi aşkın ortalama yıllık rüzgar hızları olan kaç kilometrekare alan mevcut olduğunu değerlendirmektir. Bugünün enerji üretim maliyetleri ile, rüzgar enerjisinin kullanılması için bu ortalama hız, uygun kabul edilmektedir. Bundan sonra, toplam mevcut kaynak, arazi kullanım kısıtları hesaba katılarak yüzde 90 ya da daha fazla azaltılır. Bu kısıtlar, insan etkilerini, altyapıyı yada yüksek nüfus yoğunluğunu içerebilir. Bu sürecin sonunda, rüzgar kaynağı, piyasada bulunan ticari rüzgar türbinlerinin en gelişkin teknolojik performansına dayanarak, yıllık Teravatsaat (TWs) elektrik üretim miktarına çevrilir [9].

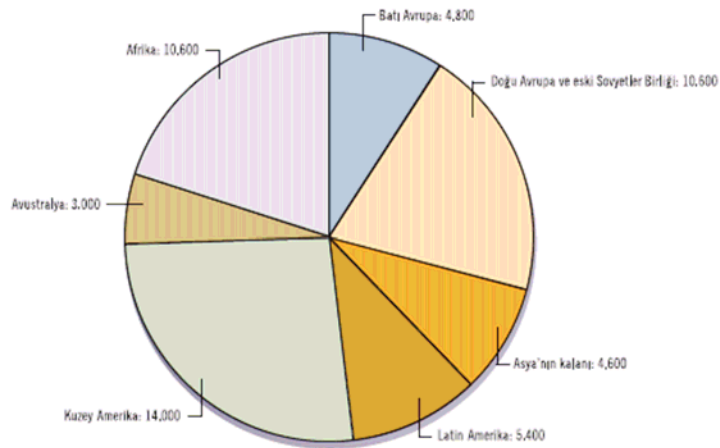
Çizelge 3.1 Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu (Wind Power Monthly Nisan 2006)

ÜLKE	KURULU GÜÇ (MW)	ORANI (%)
Almanya	18 427	31.1
İspanya	10 028	16.9
Danimarka	3 127	5.2
İtalya	1 717	2.9
Avrupa Toplamı	40 865	69
ABD	9 142	15.4
Pasifik Bölgesi	2 104	3.5

Orta Doğu & Africa	256	0.4
Kanada	684	1.1
Asya	5 923	10
Latin Amerika	232	0.3
DÜNYA TOPLAMI	59 206	100.0

Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü 2006 Nisan tarihi itibarıyla 59 206 MW düzeyine ulaşmıştır. Bu kapasitenin; %69'u Avrupa ülkeleri, %16.6'sı Amerika ve %14.4'ü ise diğer ülkeler tarafından karşılanmaktadır (EİE,2006).

Rüzgar gücü kullanımının çoktan yerleşmiş olduğu ülkelerde elde edilen deneyim ise şunu gösteriyor: Daha ayrıntılı değerlendirmeler, gerçekte beklenenden çok daha fazla sayıda potansiyel sahanın kullanılabilir olduğunu kanıtlamaktadır. Bunun iyi bir örneği, Almanya'nın iç bölgelerindeki daha az rüzgarlı görünen sahaların keşfi olmuştur, Kaliforniya'nın dağ geçitlerinde olduğu gibi diğer örneklerde, yerel topografya olağanüstü iyi koşullar yaratmaktadır. Bu nedenle de dünyadaki toplam rüzgar kaynağının, bölgesel iklim gözlemlerine dayalı değerlendirmelerin gösterdiğinden daha da yüksek olması olasıdır. Son olarak, teknolojinin daha da geliştirilmesi, 5 m/s'lik rüzgar hızlarının kullanılma potansiyelini kesinlikle artıracaktır [9].



Şekil 3.3 Dünyanın Rüzgar Kaynakları, TWs (Dünyadaki toplam: 53.000 TWs) [9]

OECD Avrupa:
15 AB ülkesi, Çek Cumhuriyeti, Macaristan, İzlanda, Norveç, İsviçre ve Türkiye

OECD Kuzey Amerika:
ABD ve Kanada

OECD Pasifik:
Japonya, Avustralya ve Yeni Zelanda

Geçiş Ekonomileri:
Arnavutluk, Bulgaristan, Romanya, Slovakya Cumhuriyeti, Eski Yugoslavya ve Eski Sovyetler Birliği ile Polonya

Güney Asya:
Hindistan, Pakistan, Bangladeş, Sri Lanka ve Nepal

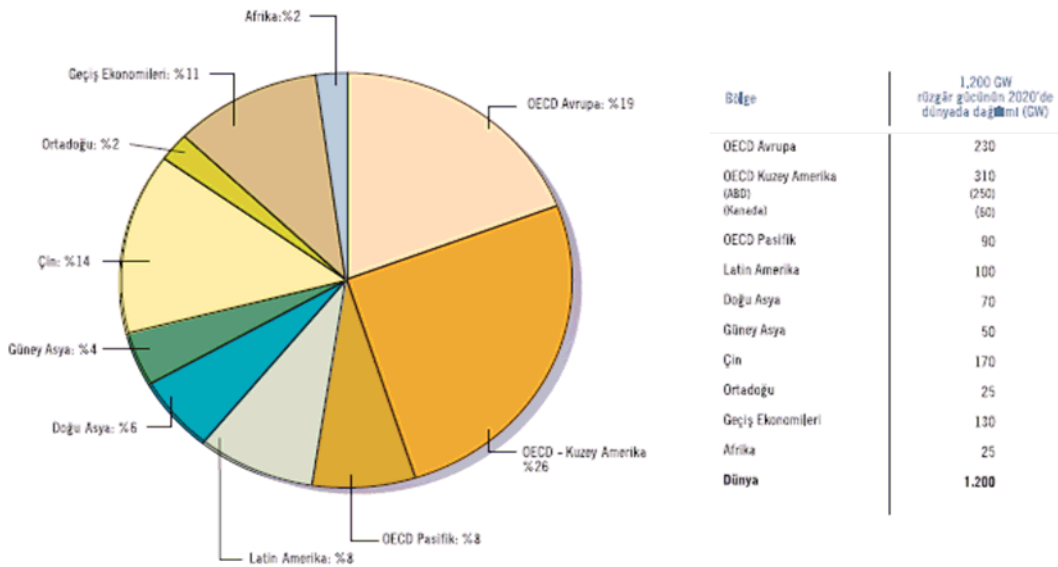
Güney Amerika:
Tüm Güney Amerika ülkeleri ve Karayipler'deki adalar

Doğu Asya:
Brunei, Demokratik Kore Cumhuriyeti, Endonezya, Malezya, Filipinler, Singapur, Kore Cumhuriyeti, Taipei (Çin), Tayland, Vietnam ve Polinezya Adaları dahil, daha küçük bazı ülkeler

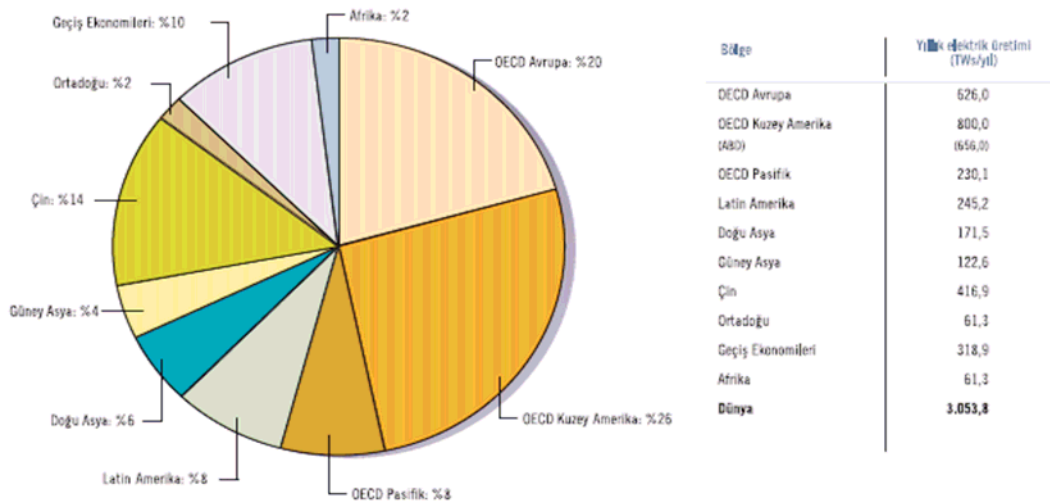
Afrika:
Kuzey ve Güney'deki çoğu Afrika ülkesi

Ortadoğu:
Bahreyn, İran, Irak, İsrail, Ürdün, Kuveyt, Lübnan, Oman, Katar, Suudi Arabistan, Suriye, Birleşik Arap Emirlikleri ve Yemen

Şekil 3.4 IEA Sınıflandırmasıyla Uyumlu Bölge Tanımları [9]



Şekil 3.5 2020'de %12 Rüzgâr Gücü – Bölgesel Dağılım [9]



Şekil 3.6 2020 Yılında Elektrik Üretiminin Rüzgâr Gücünden Elde Edilen %12'lik Bölümünün Dağılımı [9]

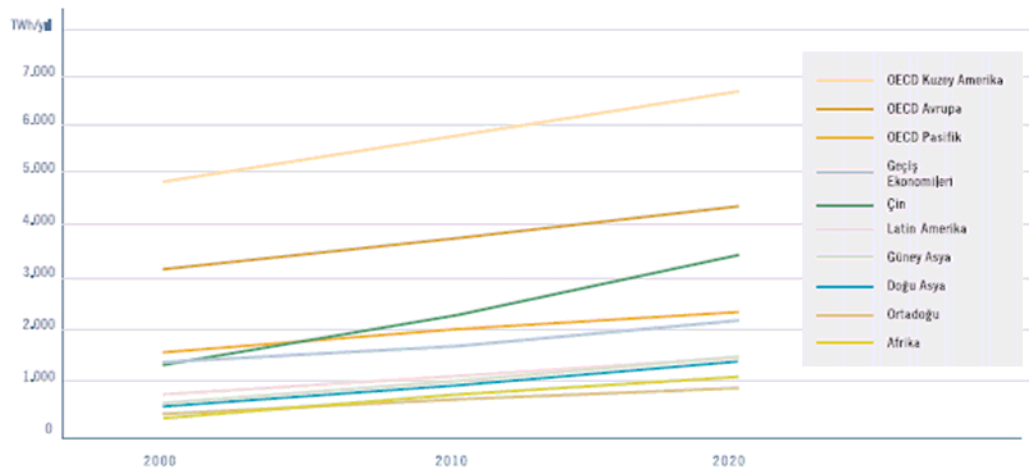
Bugün dünyada rüzgar enerjisi kullanımı giderek yaygınlaşırken, bu çevre dostu enerjiyle, Danimarka, Finlandiya, Norveç ve İsveç'in toplam nüfusları kadar, 23 milyon nüfusun elektrik enerjisi ihtiyacı karşılanmaktadır. Yeryüzü Politikası Enstitüsü'nün geçici verilerine göre, rüzgar enerjisi üretim kapasitesi 2000 yılında 17 bin 800 MW iken 5 bin 500 MW (%31)'lik artışla 2001'de 23 bin 300 MW'a çıkmıştır. Oysa bu rakam daha 1994 yılında sadece 3488 MW'tı. Aynı yıl dünyada 742 MW'lık rüzgar tesisi kurulmuş olup, bu oran 1993 yılındakinden %50 daha fazladır. 1995 yılında eklenen kapasite ise, 1253 MW ile 1994 yılında eklenenin 1,7 katıdır. 1996 yılında 1292 MW, 1997 yılında 1568 MW, 1998 yılında 2597 MW, 1999 yılında ise 3922 MW'lık rüzgar enerjisi tesisi kurulmuştur. Görüldüğü gibi tesis kurulma hızı, her yıl bir önceki yıldan daha fazla artmaktadır. Bu da rüzgar enerjisinin önünün açık olduğunun bir göstergesidir (Şen,2003)

3.3.2 Rüzgar Enerjisinin Geleceğini Etkileyecek Etmenler

Rüzgar enerjisinin geleceğini etkileyecek etmenler olarak gelecekteki elektrik talebi, yıllık büyüme hızı, teknolojinin gelişmesi ile türbin boyutlarının büyümesi, kapasite faktöründeki artışlar, yapılan yatırımlarla birlikte yaratılan istihdam ve rüzgar enerjisinin çevresel etkileri sayılabilir.

3.3.2.1 Gelecekteki Elektrik Talebi (IEA-“Dünya Enerjisine Bakış” Raporu)

Gelecekteki elektrik talebi zaman zaman Dünya Enerji Konseyi ve Uluslar arası Enerji Ajansı gibi uluslar arası kuruluşlarca hesaplanmaktadır. 2020 yılına kadar küresel enerji tüketiminin, 2002'deki rakama göre %63 artarak, yılda 25.579 TWs düzeyine ulaşacağını göstermektedir. 2030 yılı başlarına gelindiğinde, dünyanın talebi ikiye katlanacaktır [9].



Şekil 3.7 Bölgelere Göre Gelecekteki Elektrik Talebi (IEA) [9]

Çizelge 3.2 Bölgelere Göre Gelecekteki Elektrik Talebi (IEA) [9]

Bölge	2000 (TWh/yıl)	Toplamın yüzdesi	2010 (TWh/yıl)	Toplamın yüzdesi	2020 (TWh/yıl)	Toplamın yüzdesi	Ortalama büyüme (TWh/yıl) (% p.a)
OECD Kuzey Amerika	4,813	31,3	5,758	28,7	6,702	26,2	%1,7
OECD Avrupa	3,164	20,6	3,763	18,8	4,339	17,0	%1,6
OECD Pasifik	1,622	10,5	2,003	10,0	2,317	9,1	%1,8
Geçiş Ekonomileri	1,484	9,6	1,765	8,8	2,238	8,7	%1,8
Çin	1,387	9,0	2,282	11,4	3,461	13,5	%4,7
Latin Amerika	804	5,2	1,135	5,7	1,566	6,1	%3,4
Güney Asya	635	4,1	1,001	5,0	1,505	5,9	%4,4
Doğu Asya	585	3,8	970	4,8	1,461	5,7	%4,7
Ortadoğu	462	3,0	675	3,4	899	3,5	%3,4
Afrika	435	2,8	684	3,4	1,091	4,3	%4,7
Dünya	15,391	100,0	20,036	100,0	25,579	100,0	%2,6

Çizelge 3.3 Var olan Rüzgar Kaynağı ve Gelecekteki Dünya Elektrik Talebi [9]

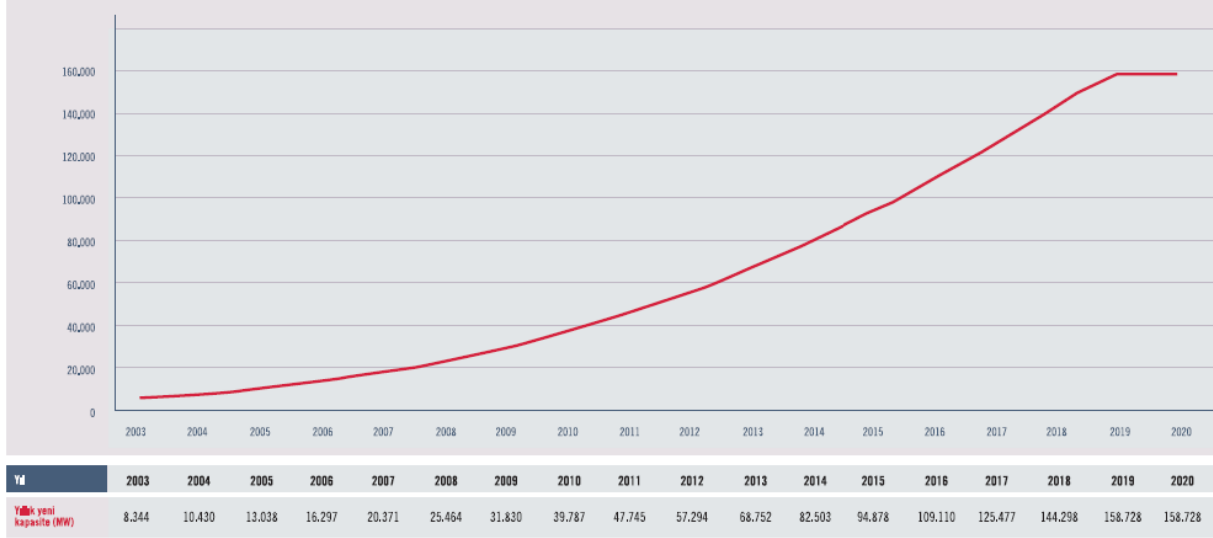
Bölge	OECD Avrupa	OECD Kuzey Amerika	OECD Pasifik	Latin Amerika	Doğu Asya	Güney Asya	Çin	Ortadoğu	Geçiş Ekonomileri	Afrika	Dünya
Gelecekteki tahmini elektrik kullanımı (TWh/yıl)	4,339	6,702	2,317	1,566	1,461	1,505	3,461	899	2,238	1,091	25,579
Var olan rüzgâr kaynağı (TWh/yıl)	943	14,000	3,600	5,400	4,600	4,500	4,600	n / a	10,600	10,600	49,473

Şekil, (IEA'nın 2002 değerlendirmesine göre) dünyanın farklı bölgeleri için gelecekteki elektrik talep tahminini göstermektedir. Bu rüzgar enerjisinin her bir bölgede ne kadar katkıda bulunması gerektiğinin değerlendirilmesi için önemlidir. Tablo, dünyanın bütün bölgelerinde, 2020 yılına kadar elektrik arzının yüzde 20'sini karşılamaya yetecek miktardan daha fazla rüzgar kaynağının bulunduğunu göstermektedir.

2003 yılı sonundaki kurulu rüzgar kapasitesine göre yapılan bu değerlendirme, 2010 yılına kadar yüzde 25'lik bir büyüme hızı ve dünyadaki toplam kurulu güç arttıkça bunu izleyen daha düşük büyüme hızları öngörmektedir. Türbinlerin hem boyutları hem de kapasite faktörleri düzenli olarak artacaktır. 2020 yılına kadar, IEA tarafından tahmin edilen dünya elektrik talebinin yüzde 12'sini karşılamaya yetecek bir yıllık üretimle, 1245 GW'lık bir kurulu güce ulaşılmış olacaktır. Bu tahmini büyüme, diğer elektrik üretim teknolojilerini piyasada ulaşılmış olduğu yaygınlık düzeyi ile eşdeğerdir. Rüzgar gücü, 2030 yılına kadar dünya elektrik talebinin %21'ini, 2040 yılına kadar ise %23'ünü karşılayabilecektir.

Özet olarak bakılacak olursa; aşağıdaki şekil ve tablodan da görüleceği üzere; rakamlar 2003 yılı sonundaki toplam rüzgar enerjisi değerleridir. O sırada dünyadaki kurulu güç, 2003'te yeni kurulan toplam 8344 MW'lık santraller dahil, 40.000 MW'ın biraz üzerindeydi.

Geleceğe bakıldığında, 2004-2011 döneminde her yıl kurulan yeni sistemlerin büyüme oranı, 2010 yılı sonuna kadar işletmeye sokulacak yaklaşık 197.517 MW ile birlikte yılda %25 olarak hesaplanmıştır. Bu ise o dönemdeki en yüksek büyüme hızıdır. 2011 yılından sonra, büyüme hızları düzenli olarak düşecek, buna karşın rüzgar gücünün sürekli büyüme, her yıl eklenen tesislerle ve artan bir hızla devam edecektir [9].



Şekil 3.8 2020’de %12 Rüzgar Gücü – Yıllık Yeni Kapasite (MW) [9]

Gelişme, 2019 yılının ötesinde, yaklaşık 158.700 MW’lık bir yıllık tesis kurma oranıyla sürmektedir. Kabaca 3200 GW’lık küresel rüzgar enerjisi düzeyinin korunacağı bir zaman diliminde, rüzgar enerjisinin piyasadaki yaygınlığının, yaklaşık 30–40 yıl içinde ulaşılacak bir ‘doyma’ noktasına sahip olan tipik bir S-eğrisi izlemesi beklenmektedir.

Gittikçe artan yeni kapasite, zamanla, eski rüzgar santrallerinin yenileriyle değiştirilmesini de içerecektir. Burada, bir rüzgar türbini için, eski türbinlerin yenileriyle değiştirilmesi kadar, yeni projelerin gerçekleştirilmesini de gerektiren ortalama 20 yıllık bir yaşam süresi kabul edilmektedir. Türbinlerin yenilenmesi ya da ‘yeniden güçlendirilmesi’ işi, 2025 yılından sonra oldukça büyük bir hızla gelişecek ve senaryonun daha sonraki yıllarında gittikçe daha önemli olacaktır. 2040 yılına gelindiğinde, artık tüm yeni kurulu güç, türbinlerin yeniden güçlendirilmesi ile elde edilecektir.

Rüzgar enerjisi için büyüme hızları, tarihsel istatistikler ile rüzgar türbini piyasasının önde gelen şirketlerinden alınmış bilgilerin bir karışımına dayanmaktadır. Dünyanın kullanılabilir rüzgar potansiyeli ve değişik bölgelerdeki elektrik tüketim düzeyleri de değerlendirilmiştir. Rüzgar teknolojisinde gelecekteki maliyet indirimleri, ‘öğrenme hızları’ konusundaki beklentilere dayanmaktadır. Bu indirimler bugünkü 1 kW’s başına 3,79 euro cent’lik bir fiyat

düzeyinden (1 kW kurulu güç başına yaklaşık 804 Euro) başlayarak artmaktadır [9].



Şekil 3.9 2020'de % 12 Rüzgar Gücü – Toplam Yeni Kapasite (MW) [9]

Çizelge 3.4 2020'de % 12 Rüzgar Gücü – Elektrik Üretimi [9]

Yıl	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Yıllık rüzgâr elektrikli üretimi (TWh)	84,7	106,7	134,1	175,3	220,0	275,7	345,4	432,6	537,1	742,1	910,7	1,113,1	1,345,8	1,613,5	1,921,2	2,275,2	2,664,5	3,053,8
Üretilen dünya elektrikli talebi (TWh)	16,666	17,110	17,567	18,035	18,516	19,010	19,517	20,037	20,532	21,040	21,560	22,093	22,639	23,198	23,772	24,359	24,961	25,578
Dünya elektrikli rüzgâr gücü yaygınlığı (%)	0,51	0,62	0,76	0,97	1,19	1,45	1,77	2,16	2,62	3,53	4,22	5,04	5,94	6,96	8,08	9,34	10,67	11,94

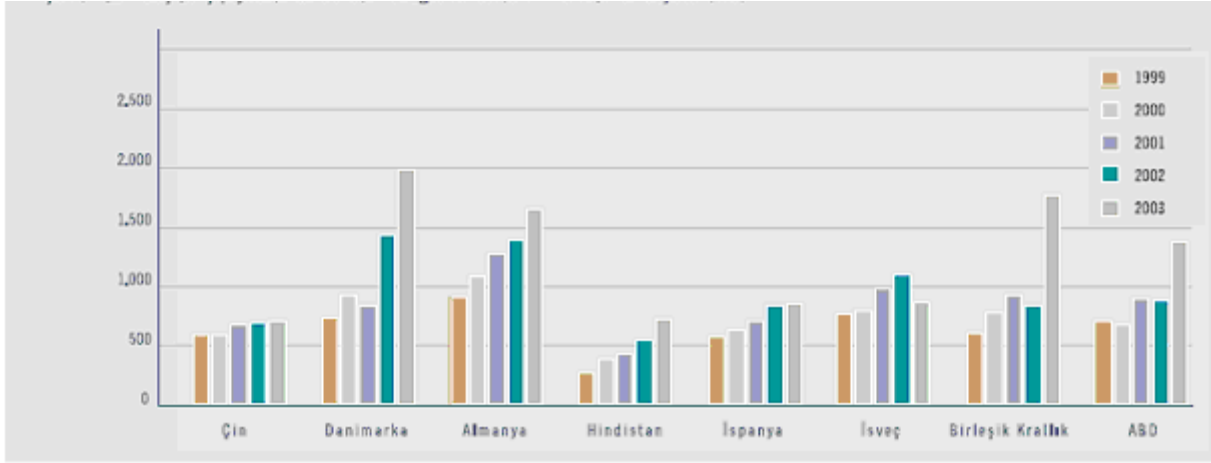
3.3.2.2 Yıllık Büyüme Hızı

Ağır teçhizat üreten bir endüstri için, yüzde 20-25 yıllık büyüme hızları yüksektir. Buna karşın, rüzgar endüstrisinin endüstrileşmesinin ilk aşamasında çok daha yüksek büyüme hızları yaşanmıştır. 1993-1998 yılları arasında, yeni kapasitenin büyüme hızı yüzde 40'tır; 1998-2003 yılları arasında ise yüzde 26 gibi etkileyici bir ortalama sürdürülmüştür. Rüzgar enerjisi endüstrisi, mevcut yaygınlaşma hızına göre, en az yedi yıl boyunca, yılda yüzde 25'lik bir talep artışını rahatça karşılayabilecektir. 2010 yılı sonunda, makine üretim miktarının 39.787 MW/yıl düzeyine ulaşması beklenmektedir. Senaryoda, yeni kapasitenin yıllık büyüme hızı, 2011 yılından sonra yavaşlayarak yüzde 20'ye 2015 yılında yüzde 15'e ve sonunda da 2019 yılında yüzde 10'a inmektedir. 2019 yılındaki makine üretim kapasitesi hızı, yıllık 158.728 MW'ta dengelenmektedir [9].

3.3.2.3 Rüzgar Türbini Boyutlarının Gelecekteki Büyümesi

Şekil, 1999-2003 yılları arasında piyasadaki rüzgar türbini boyutlarının nasıl hızla

büyüdüğünü göstermektedir. Bu şekle bakıldığında, önde gelen bazı piyasalarda, özellikle de Birleşik Krallık, Danimarka ve Hindistan’da kurulan türbinlerin ortalama boyutlarının iki kattan fazla arttığı görülür [9].



Şekil 3.10 Seçilmiş Piyasalarda Kurulan Rüzgar Türbinlerinin Ortalama Boyutu (kW) [9]

Birçok boyutta rüzgar türbini bulunmaktadır. Türbin özellikleri her geçen gün gelişmektedir. Günümüzde 5000 kW (5 MW) gibi büyüklüklerdeki türbin kapasiteleri test edilmektedir (Unay,2006).

Çizelge 3.5 Seçilmiş Piyasalarda Kurulan Rüzgar Türbinlerinin Ortalama Boyutu (kW) [9]

Yıl	Çin	Danimarka	Almanya	Hindistan	İspanya	İsviçre	Birleşik Krallık	ABD
1999	610	750	919	283	589	775	617	720
2000	600	911	1.101	401	648	802	795	686
2001	681	850	1.281	441	721	1.000	941	908
2002	709	1.443	1.397	553	845	1.112	843	893
2003	726	1.988	1.650	729	870	876	1.773	1.374

3.3.2.4 Kapasite Faktöründeki Artışlar

Rüzgar türbinlerinin kapasite faktörleri, bugün gördüğümüz yüzde 24'lük küresel ortalamayı şimdiden yükseltmiştir. Bu hem daha iyi bir ilk tasarıma sahip olmalarının, hem de daha iyi konumlandırılmalarının bir sonucudur. Yakın geçmişte, iyileştirilmiş kapasite faktörlerine esaslı bir katkı da daha büyük türbinlerin merkezlerinin yerden yüksekliğindeki artışla gelmiştir. İç bölgeler için, görece büyük pervanelere sahip olan rüzgar türbinlerinin imal edilmesi de buna yardımcı olmuştur. Elektrik şebekesi açısından, yüksek bir kapasite faktörü istenen bir özelliktir, çünkü belli bir noktada şebekeye beslenen daha fazla güç anlamına gelir. Rüzgar türbinlerinin kapasite faktörlerinin iyileştirilmesinin herhangi bir teknik engel oluşturmadığını, bunun yalnızca şebekeye daha iyi bir bağlantı, modelleme ve maliyet

meselesi olduğunu da vurgulamak gerekir. Bu senaryo, ortalama kapasite faktörlerinin 2006 yılına kadar yüzde 25'e 2012 yılına kadar ise yüzde 28'e yükseleceğini öngörüyor [9].

3.3.2.5 Rüzgar Gücü Yatırım Maliyetler ve İstihdam

Gelecek için rüzgar enerjisinin yatırım değerinin, 2003 yılında 7 milyar Euro'dan, 2019 yılında 82,7 milyar Euro tepe noktasına yükseleceğini hesaplanmaktadır. 2020 yılında, dünyada 1245 GW'lık bir rüzgar gücü düzeyine ulaşmak için gereken toplam yatırım, 692 milyar Euro olarak hesaplanmaktadır. Bu miktar büyük gözüküyorsa da bunun, 20 yıllık bir sürenin tamamındaki toplam değer olduğu ve toplam küresel enerji sektörü yatırımlarının yalnızca küçük bir parçasını temsil ettiği unutulmamalıdır. Örneğin, 1990'larda enerji sektöründeki yıllık yatırım, her yıl 158-186 milyar Euro civarındaydı. 2020 yılına gelindiğinde, bu miktar daha önemli bir orana karşılık gelebilir; ama o zamana kadar, rüzgar gücünün, hidroelektriğin bugünkü payını aşarak, dünya elektrik talebinin yüzde 20'lik bir bölümünü karşılamaya doğru gideceği de unutulmamalıdır. Aynı dönemde, üretim maliyetlerinin 3,79 Euro cent/kWs'den 2,45 Euro cent/kws'e düşmesi beklenmektedir. Dünyada 2020 yılına kadar, imalat, tesis kurma ve rüzgar enerjisi endüstrisiyle ilişkili diğer alanlarda, 2 milyon 300 bin kişiye istihdam yaratılmış olacaktır.

Diğer maliyetleri ve yararlarının yanı sıra rüzgar enerjisinin istihdam etkisi, hesaba katılması gereken yaşamsal bir etkidir. Yüksek işsizlik oranları, dünyanın neredeyse her ülkesinde ekonomik durum açısından başlıca yüklerden biri olmaya devam etmektedir. Bu nedenle de çok miktarda nitelikli ve niteliksiz iş gücü gerektiren herhangi bir teknoloji, büyük ekonomik önem taşıyacak ve farklı enerji seçenekleri arasında yapılan politik seçimlerde, büyük olasılıkla güçlü bir rol oynayacaktır. Yirmi yıl ötesine bakarak, istihdamın belirleyici bir parametre olmaya devam edeceğini varsaymak mantıklı olmayabilir. Buna karşın, eğer bunun tersi, yani sürüp giden bir işsizlik olursa, o zaman bunun gibi uzun dönemli bir teknolojik gelişmenin ne kadar istihdam sağlayacağını bilmek önemlidir. 2020 yılına kadar dünyada rüzgar gücü endüstrisiyle ilişkili imalat, tesis kurma ve diğer işlerde, toplam 2 milyon 300 bin kişiye istihdam yaratılmış olacaktır [9].

3.3.2.6 Çevresel Etkiler ve CO₂ Salımı

Rüzgar enerjisi temiz enerji kaynaklarından ve yaşadığımız çevre üzerinde olumlu etkileri gözlemlenmektedir. Örneğin; 500 kW'lık bir rüzgar türbini 57 000 ağacın yapacağı CO₂ temizleme işine eşdeğer iş yapar (EİE,2006).

2020 yılına kadar toplam 10 milyar 771 milyon ton karbondioksit indirimi sağlanmış olacaktır. Rüzgar enerjisinin en önemli çevresel yararı, iklim değişikliğinden sorumlu ana gaz olan karbondioksitin dünya atmosferine salımında sağlanan indirimdir. Gelecek tahminlerine göre, yıllık karbondioksit indirim düzeyi, 2003 yılında 50 milyon 800 bin tondan, 2020 yılında 1 milyar 832 milyon tona çıkacak, toplam tasarruf miktarı o zamana kadar 10 milyar 771 milyon tona ulaşmış olacaktır.

Çağdaş rüzgar teknolojisi aynı zamanda, çok iyi bir enerji dengesine de sahiptir. Bir rüzgar türbininin ortalama 20 yıllık yaşam döngüsü süresince, imalat tesis kurma ve hizmet işlerine bağlı karbondioksit salımı, ilk üç ile altı aylık işletme döneminin sonunda geri ödenir [9].

3.4 Dünyada Rüzgar Enerjisi Gelişim Örnekleri

Dünyada rüzgar enerjisi konusunda uzmanlaşmış bir çok ülke olmasına rağmen gelişim sürecinin ilginç olduğu ve bu süreci başarı ile tamamlayan iki örnek vereceğim. Bunlar Danimarka ve Kaliforniya örnekleridir.

3.4.1 Danimarka Örneği

Hangi açıdan bakarsanız bakın, Danimarka insanının şaşırtıcı bir yönü yoktur. Dünya üzerindeki birçok şehirden daha az olan 5 milyonluk toplam nüfusu ve Avrupa'nın on birinci sıradaki ekonomisi ile ne ekonomik nede siyasi bir güce sahiptir. Enerji açısından ise yakınındaki Kuzey Denizi'nde bulunan sınırlı petrol ve doğal gaz kendisine önemli bir avantaj sağlamaz. Petrole bağımlı olan birçok devlet gibi Danimarka da yetmişli yıllarda ciddi şoklar yaşamış ve artan fiyatlar karşısında duramayan ekonomisi durgunluk batağına saplanmıştı. Yalnız diğer ülkeler kurtuluşu nükleer santrallerde veya sentetik yakıtlarda ararlarken Danimarka birçoklarına geri gitmek gibi gelen bir adım atmış ve Kuzey Avrupa kıyılarının ekonomisinde on ikinci yüzyılın ortalarından günümüze kadar son derece önemli bir rol oynamış olan bir kaynağa, rüzgar gücüne dönmüştü (Flavin,1999).

Diğer sanayileşmiş ülkelerin tersine Danimarka'nın enerji açığına verdiği yanıt yukarılardan aşağıya dayatılan bir çözüm olmadı. Siyasi olarak merkeziyetçilikten uzak ve kooperatiflere dayalı bir tutumu benimseyen bu ülke kendi kendine yetebilecek ve herkesin eşit bir şekilde yararlanabileceği bir seçenek aradı. Birçok tartışmalardan sonra ülke kendi kaynaklarına ve kendi halkının tasarımlarına dayanmayı tercih etti ve rüzgar enerjisine dönme kararı aldı. Bu alanda ülke belirli deneyimlere sahipti.

Danimarka’da rüzgar enerjisine karşı olan tutku yetmişli senelerde uyanmaya başladı. Kesin bir sonuca ulaşmak isteyen uzmanlar eski rüzgar türbinlerinin planlarını gözden geçirdiler. Aktarma organları yeniden ele alındı. Hatta kamyonlardan çıkartılma eski aktarma elemanlarından bile medet umuldu. Kullanılacak parçaların kendi ürettiklerine çok benzediğini ve gelecekte bugün yapacakları yatırımın kat kat fazlasını çıkarabileceklerini hesaplayan tarım makineleri üreticileri bu araştırmaları desteklemeye başladılar. Kısa sürede önceleri ilkel bir görünüme sahip modeller Danimarka tepelerinde görülmeye başlandı. Kamunun büyük desteğini kazanan bu türbinleri geliştirmek amacı ile devlet yönetimi, önceleri nükleer güç denemeleri için etkinlik göstermiş olan Riso’daki enerji araştırma laboratuvarını bu konuda çalışmaya sevk etti. Eskiden yapılmış incelemeler üzerine kendi görüşlerini ekleyen tasarımcılar birkaç sene içinde bugünkü rüzgar gücü sanayi tarafından kullanılan teknolojiyi geliştirdiler. Temel yapısına bakıldığında fiberglastan yapılma üç kanadı olan bir pervanenin, elektrik nakil hatlarını taşıyanlara benzeyen çelikten bir kule üzerinde döndüğü görülür. Dönmekte olan pervane bilinen bir dişli kutusu aracılığıyla bir jeneratörü çevirir.

Diğer ülkelerde çalışmakta olan araştırmacılar, bu teknolojiyi belki daha ileri götürmekte başarılı oldular. Fakat Danimarka’nın kırsal kesiminin sağladığı yaygın destek diğer ülkelerde yoktu. Seksenli yılların başlarından itibaren rüzgar gücü kooperatifleri kurulmaya başlandı. Bu kooperatifler sayesinde kuleleri dikecek arazi satın alındı veya çoğunlukla üyelerden birinin arazisi üzerine türbinler ve çiftlikler kuruldu. Türbinler için gerekli malzemeler sağlandı. Daha olumlu bir yer bulunması veya daha az gürültü yapan bir pervane tasarımının geliştirilmesi amacıyla herkes el ele verdi. Hatta türbinleri uzaktan göze hoş gözükmeleri için gereken estetik üzerinde bile çalışmalar yapıldı. Ülke yönetimi ilk dokuz çalışma yılının maliyetlerinin %30’unu bağışlayarak önemli bir destek sağladı. Ayrıca elektrik kurumlarının çalışan türbinlerin sağladığı enerjiyi devreye sokmalarını zorunlu kılarak en önemli adımı atmış oldu (Flavin,1999).

Yapılan bu çalışmaların sonuçları Danimarka’daki bütün kırsal bölgelerde çıplak gözle görülebilir bazen tek başına, bazen de birkaç tanesi bir arada 20–30 metre çapında binlerce beyaz türbin yeşil kırlara dayanmış, devasa uçak pervaneleri gibi dönmektedir. Danimarka’da 1994 yılı itibari ile 3600 rüzgar türbini çalışmaktaydı. Toplam kapasite 500 MW dolayındaydı. Rüzgar gücünden elektrik sağlayan ülkeler arasında Danimarka, dünyada dördüncü sıradadır. 1994 yılında ülkenin toplam gereksiniminin %3’ü türbinlerden geliyordu. Bu oranın 2005 yılında %10’a yükselmesi beklenmektedir.

Danimarkalıların ürettikleri rüzgar türbinleri bütün dünyada dayanıklılıkları ile tanınmaktadır. Danimarka’da tasarımlanan ve üretilen türbinlere Kaliforniya’daki devasa merkezlerden Galler, İspanya, Hindistan, Çin ve diğer birçok ülkedeki daha küçük birimlere varana kadar her yerde rastlanmaktadır. Danimarka, yenilenebilir enerji teknolojilerinin mevcut elektrik üretim sistemlerine belirgin ölçüde entegre edilmesini sağlayan ilk ülke olmuştur (Flavin,1999).

3.4.2 Kaliforniya Örneği

Her yıl kurulmakta olan tesislere baktığımız zaman Kaliforniya rüzgar sanayinin çok erken yükselmeye başladığını görebiliriz. Makinelerin güvenilirliğinin arttırıldığı ve her türbinden daha fazla enerji elde edildiği seksenli ve doksanlı yıllarda bu tesisler daha da olgunlaşmıştır. İlk başlarda sağlanan vergi muafiyetleri ve kredilerle ayakta duran atılımcılar zamanla devre dışı bırakılmışlar ve onların yerlerini Aetna ve John Hancock gibi sigorta şirketlerinin de dahil olduğu büyük firmalar almıştır. Seksenli yılların ortalarında 1–580 numaralı otoyol üzerinde San Fransisko Körfezinden doğuya giden herkes, kahverengi tepelerin önlerinde dönmekte olan binlerce beyaz türbinle karşılaşılıyordu. Kaliforniya’daki “rüzgar çiftlikleri” 1993 yılında 3 milyar kWh’lik elektrik üretiyordu. Bu da bütün eyaletin elektrik talebinin %1.2’si demekti ki bu da San Fransisko’nun tüm meskenlerinin gereksiniminin türbinler aracılığıyla karşılanması anlamına geliyordu.

Kaliforniya’nın rüzgar fırtınası başladığı zaman buraya yatırım yapanlar, kazanılan devlet ihaleleri doğrultusunda Boeing ve Westinghouse gibi firmalar tarafından uzay teknolojisinin en son sistemlerini kullanarak geliştirilen devasa türbinlerden yararlanmayı düşünmüşlerdi. Büyük rüzgar makinelerinin küçüklerden daha ekonomik olduğunu gösteren mühendislik çalışmalarına göre hazırlanan bu uzun ve zarif türbinlerin kanat uçları arasındaki mesafe, Boeing 747’lerin kanat açımından daha fazla idi. Ama bu makinelerin hiçbirinin ticari uygulamalar bakımından güvenilirliği veya ekonomikliği kanıtlanamadı. Maliyeti çok yüksek bazı deneylerden sonra, yatırım yapanlar iki ve üç kanatlı pervanelerden aynı anda yararlanabilen daha küçük modellere döndüler. Kullanılan ünitelerden bazıları devasa yumurta çırpıcılarına benziyorlardı (Jamieson vd,1999).

Türbin yapısında sağlanan gelişmeler üzerine bazı küçük üreticiler kendi türbin modellerini piyasaya sürdüler. Bunların hepsi belirli bazı başarılar sağladıysa da çok azı kendini kanıtlayabildi. Hatta bazen bakımlarının son derece pahalıya çıkacağı anlaşıldığından içlerinde yüzlerce türbin bulunan bazı “rüzgar çiftlikleri” oldukları gibi terk edildi. Bu

“rüzgardan mezarlıkların” bazıları doksanlı yılların ortalarında bile hala duruyorlardı. Danimarkalı rüzgar türbini üreticileri, Amerikalıları kurtarmaya geldiler ve Danimarka’da sattıklarının iki katı demek olan 7500 türbini yerine bağladılar.

O zamandan beri rüzgardan yararlanma teknolojisinde Danimarkalı ve Amerikalı üreticilerin ortak çabaları ve sürdürülen devlet desteği ile sürekli bir gelişme sağlandı. Rüzgar gücünün ABD’nde kuvvetlenmesine karşın bu konuda Avrupa ancak doksanlı senelerde kendisini toplamaya başladı. Avrupa’nın Kuzey ve Batlık Denizlerinin çevrelediği kıyılarında son derece kuvvetli bir rüzgar potansiyeli vardır. Bu potansiyel Polonya’ya kadar uzanır. Güney Avrupa’da ise Akdeniz rüzgarları bulunur. Çevre koruma çabalarının bir sonucu olarak bazı Avrupa ülkeleri seksenli yılların sonlarında araştırma ve geliştirme faaliyetleri ile teşvik olanaklarını arttırarak karbon ve kükürt içermeyen yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştirme çabalarını güçlendirmişlerdir.

Rüzgar gücünün hızla gelişmekte olduğu Almanya’da yüksek elektrik fiyatları ve devletin cömert desteği sayesinde rüzgar gücü ile elektrik üreten özel işletmeler kilovat saat başına 13 cent gibi bir fiyat alabiliyorlardı. Hollanda’da entegre bir rüzgar gücü geliştirme programı Ulusal Çevre Koruma Planı’nın (National Enviromental Policy Plan) bir parçası olarak düşünülmüştü. İngiltere’de ise yeni özelleştirilen elektrik kurumu, kurulacak ek elektrik üretiminin bir bölümünü yenilenebilir kaynaklardan sağlamak zorunda kalıyordu. Eskiden nükleer güç ile bağlantılı olarak düşünülmüş olan bu kural bugün rüzgar gücü için geçerli kılınmıştır (Jamieson vd,1999).

Bir enerji şebekesinin güvenilir şekilde beslenmesinde en önemli ilke rüzgar hızının yüksek olduğu yörelerde büyük rüzgar türbinleri kurarak, gerekli gücü en ekonomik biçimde elde etmektir. Bu nedenle bazı bilim adamları, deniz rüzgarı enerjisi kümelerini savunmaktadır. Bu öneriye göre kıyı sularında denizden esen bütün rüzgarları alacak rüzgar türbini kümeleri kurmak gereklidir. Yapılan hesaplar 1 MW’lık 400 türbin alacak 100 metrekairelik bir deniz alanının, 420 000 kişilik bir kentin elektrik gereksinimini karşılayabileceğini göstermektedir. Ne var ki bu alanda rüzgarın esmediği günler için enerji depolama sorunu vardır. Sorun için en iyi çözüm olarak ise suyun büyük çapta elektrolizi önerilmiştir. Suyun elektrolizi yoluyla elde edilen hidrojen depolanabilir ve enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bu yolla elde edilecek enerji ise denizden karaya enerjiyi iletecek kablolar yerine, gemilerle taşınmaya gereksinimi vardır. Elektroliz gerek karada gerekse denizde kullanılan rüzgar türbinlerinin enerjiyi kesikli üretmesinden kaynaklanan depolama sorununa getirilen çözümlerden yalnızca biridir. Enerji fazlasını akümülatörlerde depolamak, doldurmak yada ana şebekeyi rüzgar

estiği sürece beslemek diğer yollardır.

Rüzgar gücü bütün memleketlerde eşit bir şekilde dağılmamıştır. Rüzgar gücü ile elektrik elde edebilme potansiyeli bakımından ABD ile boy ölçüşebilecek ülkeler arasında Arjantin, Kanada, Şili, Çin, Rusya ve İngiltere sayılabilir. Mısır, Hindistan, Meksika, Tunus ve Güney Afrika gibi devletler rüzgarla elde ettikleri gücü rahatlıkla %20 dolayında arttırabilirler. Bir bütün olarak Avrupa, estetik ve çevre koruma bakımından kenara ayırdığı alana göre gereksinimi olan elektriğin %7-26'sını rüzgar gücünden sağlayabilir. Rüzgardan ancak kısıtlı bir şekilde yararlanabilen bir çok yer, sahil şeritlerinden açıklara giderek daha fazla olanak sağlayabileceklerini görebilirler. İngiltere ve Polonya sığ sularda kuracakları rüzgar çiftlikleri ile gereksinimleri olan elektriğin büyük bir kısmını sağlayabilirler. Tropik kuşak dolayında yer alan ve adalardan oluşan 20 kadar devlet, sürekli esmekte olan batı rüzgarları aracılığıyla elektrik gereksinimlerinin büyük bir bölümünü karşılayabilir. Bu ülkeler elektriği dizel jeneratörleri ile pahalı bir şekilde ürettiklerini kabul ederek başka arayışlara dönecek olurlarsa, rüzgar gücü onlar için son derece çekici bir kaynak durumuna gelecektir (Jamieson vd,1999).

3.5 Türkiye’de Rüzgar Enerjisine Bakış

Dünyada rüzgar enerjisine şöyle bir göz gezdirdikten sonra bir de ülkemiz için bu enerji çeşidini değerlendirmek konunun devamı açısından iyi olacaktır. Bu konuda da öncelikle potansiyel incelenecek daha sonra ülkemizde bu konuda yapılan yatırımlar sunulacaktır.

3.5.1 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) istasyonlarının 1970-1980 dönemi rüzgar verileri değerlendirilerek, Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak, DMİ tarafından yapılan ölçümler meteorolojik amaçlıdır (klimatolojik, sinoptik, hava kirliliği vb.) ve yerel rüzgarların ölçümleri Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) kurallarına göre 10 m’de yapılmaktadır. Enerji amaçlı rüzgar ölçümlerinde ise rüzgar hızı, rüzgar yönü ve çevre sıcaklığı (2 m) gibi parametreler 30 m ve mümkünse türbin hub (göbek) yüksekliğinde en az bir yıl periyodik olarak (10 dk, 1 saat) ölçülmeli ve bilgisayar ortamında değerlendirilebilecek şekilde veri paketi olarak tespit edilmelidir (EİE,2006).

Bu nedenle, ülkemizin rüzgar potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgar enerjisinin yurdumuz ekonomisine katkısının hızlandırılması, yatırımcılara rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan yerlerin sunulması için 2002 yılında EİE ve DMİ işbirliği ile "Türkiye Rüzgar Atlası"

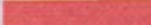
yapılmıştır. Türkiye Rüzgar Atlası genel olarak bir fikir vermektedir. Hazırlanmış olan Türkiye Rüzgar Atlası'na göre yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz Bölgelerinin en yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Bugünkü teknik potansiyelimiz 88 000 MW ve ekonomik potansiyelimizin ise 10 000 MW civarında olacağı tahmin edilmektedir. Aşağıda gördüğümüz şekilde ve bir sonraki tabloda gösterilen lejant renkleri Avrupa'nın da kullandığı renklerdir. Ülkemizde rüzgar potansiyeli olarak en son kırmızı renkte rüzgarlar görülmektedir. En üst katmanda görmüş olduğumuz lacivert renkle gösterilen rüzgar tipine ülkemizde rastlanılmamaktadır (EİE,2006).



Şekil 3.11 Türkiye Rüzgar Atlası (2002) (EİE,2006)

Çizelge 3.6 Beş Farklı Topografik Durum İçin Yer Seviyesinden 50 m Yükseklikteki Rüzgar Hız Dağılımları (EİE,2006)

Beş farklı topoğrafik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri ¹										
	Kapalı Araziler ²		Açık Araziler ³		Kıyılar ⁴		Açık Deniz ⁵		Tepe ve Bayırlar ⁶	
	ms ⁻¹	Wm ²	ms ⁻¹	Wm ²	ms ⁻¹	Wm ²	ms ⁻¹	Wm ²	ms ⁻¹	Wm ²
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
	5.0–6.0	150–250	6.5–7.5	300–500	7.0–8.5	400–700	8.0–9.0	600–800	10.0–11.5	1200–1800
	4.5–5.0	100–150	5.5–6.5	200–300	6.0–7.0	250–400	7.0–8.0	400–600	8.5–10.0	700–1200
	3.5–4.5	50–100	4.5–5.5	100–200	5.0–6.0	150–250	5.5–7.0	200–400	7.0–8.5	400–700
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Enerji konusunda sıkıntı yaşamamak adına özel sektörün gözü de temiz enerji olan rüzgar enerjisine çevrilmiş durumda. Bu konuda birçok tanınmış şirket yatırımlarını bu yönde yapma taraftarı. Son dönem tartışılan konular üzerine çok önemli hale gelen ve gelişimi büyük bir hız

kazanan rüzgar enerjisi için türbin üretici firmalar da seferber olmuş durumda. Ülkemizde rüzgar enerjisi ile ilgilenen şirketler uygun yerler için araştırmalarını yapıp lisans başvurularını yaparken üretici firmalar en erken 2008–2009 için tarih verebiliyor. Tüm dünyanın gözünün rüzgar enerjisine çevrilmiş olması, daha önceden bu konuda üretim yapmak üzerine yatırım yapmış firmaların yüzünü güldürüyor. Ülkemiz için de; 2002 yılında kurulan, 450 kişiye iş imkanı sağlayan, iç pazar harici 26 ülkeye ihracat yapan ve yıllık cirosu 28 milyon euro olan Enercon-Demirer Holding ortaklığında İzmir'deki Aero Rüzgar türbini kanat fabrikasında jenaratör üretimi hariç türbinin kalan kısımları üretilmekte. Genel ortaklık yapısına zaman zaman bu iki şirketin dışında Polat Holding'in de dahil olduğunu görüyoruz.

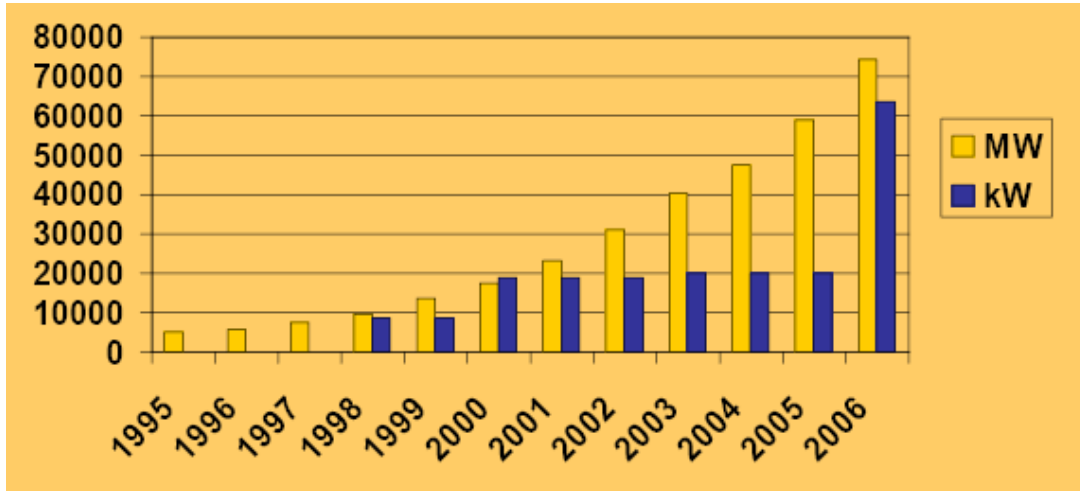
2011'e kadar Demirer Enerji ile birlikte yaklaşık 500 MW kurulu gücünde rüzgar enerjisi yatırımı yapacak olan Polat Enerji'nin, önümüzdeki günlerde hayata geçireceği yeni proje ise rüzgar santrali türbin jenaratör imalatı olacak. 30 milyon euro'luk yatırım hazırlığında olan şirket, hem iç pazara hem de dış pazara yönelik üretim yapacağı belirtiliyor. Rüzgar enerjisi sektörünün dünyada hızlı bir büyüme içine girdiğini belirten Polat Enerji Genel Müdürü Zeki Eriş, rüzgar sanayindeki talep artışının her yıl yüzde 35–40 oranında olduğunu belirtiyor. Bu alanın dünyada her yıl 15 milyar euro'luk türbin jenaratör imalatı sunduğunu da vurgulayan Eriş'e göre dünya pazarı Vestas, Enercon ve General Electric gibi üç-dört firmanın elinde. Şirket bu yatırımda Alman Enercon firmasıyla işbirliği yapacak (Platin Dergisi,2007).

Yenilenebilir enerji yatırımlarının rekabetçi olmaya başlaması, özel sektörün ilgisini bu alana çekmeyi başardı. Türkiye'de ilk rüzgar enerjisi yatırımı yapan şirketlerden Demirer Holding ile Polat Enerji'nin şu anda ayrı ayrı ve ortak olarak yürüttükleri 500 MW gücünde projeleri var. Bu iki şirket bu sene içersinde Çanakkale'de 15 MW, Manisa'da ise 30 MW kurulu gücünde rüzgar santrali yatırımlarını devreye sokacak. 2011'e kadar da 400 MW kurulu gücünde yatırım tamamlanmış olacak.

Zorlu, Aksa ve Sanko da yenilenebilir enerjiye yatırım yapan şirketlerden. Elektrik dağıtım ihaleleri kadar, yenilenebilir enerjiyle de yakından ilgilenen Zorlu'nun hedefi bölgede lider olmak. Zorlu Enerji'nin Pakistan'daki rüzgar santrali projesi hızla ilerliyor. Rüzgar ölçüm istasyonunun temeli 22 Ocak'ta atıldı. Yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelen gruptan bir diğeri ise Sanko. Grup, Türkiye'de 800 milyon dolar ile 1 milyar dolar arasında enerji yatırımı yapacağını açıkladı. Geçen ay garanti bankası da, 42,5 MW kurulu gücüyle en büyük rüzgar elektrik santrali olacak Bergama Projesi için MV Holding'e 41,75 milyon euro tutarında proje finansmanı kredisi sağlayacağını açıkladı. EPDK ise 9 Mart'ta toplam 136,55 MW kurulu gücünde 7 ayrı rüzgar enerjisi santrali kurulması için lisans verdi. Lisans verilen

şirketler arasında Didim’de 31,5 MW kurulu gücünde rüzgar santrali yatırımı gerçekleştirmeyi planlayan Ayen Enerji ile Balıkesir’de 16 MW kurulu gücünde rüzgar santrali kuracak olan Akenerji de bulunuyor. Ayres, İstanbul Enerji, Belen Elektrik, Kapıdağ, lisans alan diğer şirketler arasında. Enerji Bakanlığı Türkiye’de 2020’ye kadar 3000 MW kurulu güce sahip rüzgar santralinin devreye girmesini planlıyor (Nisan 2007 Platin Dergisi).

Tüm dünya üzerinde rüzgar enerjisi kurulu gücü, yıllık %20-30’luk bir artış seviyesi ile, 2006 yılı içersinde 74 GW seviyesine ulaştı.



Şekil 3.12 Dünyada Kurulu Rüzgar Enerjisi Gücünün (MW), Türkiye’de Kurulu Rüzgar Enerjisi Gücü (kW) İle Kıyaslanması - Yıldız Teknik Üniversitesi 9. Kalite Günleri Seminerleri 7. Oturum – Erol Demirer

Mevcut elektrik şebekesine 10.000 MW bağlanabilir. Daha fazla rüzgar enerjisi için ekonomik elektrik enerjisi depolama sistemleri geliştirilmelidir, yoksa rüzgarsız günlerde sıkıntı yaşanabilir. Bu sınırı aşmak için konvensiyonel sistemlerin rüzgara göre %50 daha pahalı bir seviyeye gelmesi beklenmelidir ki depolu rüzgar rekabet edebilsin. Aslında konvensiyonel enerjilerin çevreye verdiği zararlar değerlendirmeye alınırsa bu marj bugünden mevcuttur. Ama bu ek maliyet elektriği üreten veya tüketen tarafından değil, çevredeki herkes tarafından istemi dışında bölüşüldüğü için genellikle gözardı edilmektedir (Yıldız Teknik Üniversitesi 9. Kalite Günleri Seminerleri 7. Oturum – Erol Demirer).

3.6 Türkiye’deki Rüzgar Enerji Santralleri

2006 yılına kadar kurulu gücü 20.1 MW olan Türkiye’nin rüzgar enerji santralleri 2006 ve 2007 yıllarında büyük bir artış göstererek 131.35 MW düzeyine çıkmıştır. 2000-2006 arası dönemin durağan geçmesinin sebebi yap-işlet-devret modelinin üzerindeki tartışmalar ve

rüzgar enerjisinin günümüz koşullarında daha iyi anlaşılan küresel ısınmaya etkisinin tam anlaşılmamış olmasıdır. Bu konuda önceden beri yapılmayan yatırımlar açısından üzülmekle beraber 2006-2007 dönemi içinde hızla artış göstermesini sevinçle karşılıyorum.

Çizelge 3.7 de detaylarının verildiği bu konuda 600 MW'ı aşan tedarik sözleşmesi yapılan RES'leri de umut verici olarak değerlendiriyorum.

Çizelge 3.7 Türkiye’deki Rüzgar Enerji Santralleri (20.09.2007) (EPDK)

Mevkii	Şirket	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin kapasitesi
İzmir-Çeşme	Alize A.Ş.	1998	1,50	Enercon	600 kW
İzmir-Çeşme	Güçbirliği A.Ş.	1998	7,20	Vestas	600 kW
Çanakkale-Bozcaada	Bores A.Ş.	2000	10,20	Enercon	600 kW
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt A.Ş.	2003	1,20	Enercon	600 kW
Balıkesir-Bandırma	Bares A.Ş.	I/2006	30,00	GE	1.500 kW
İstanbul-Silivri	Ertürk A.Ş.	II/2006	0,85	Vestas	850 kW
İzmir-Çeşme	Mare A.Ş.	I/2007	39,20	Enercon	800 kW
Manisa-Akhisar	Deniz A.Ş.	I/2007	10,80	Vestas	1.800 kW
Çanakkale-İntepe	Anemon A.Ş.	I/2007	30,40	Enercon	800 kW
İŞLETMEDEKİ KAPASİTE TOPLAMI			131,35		
Çanakkale-Gelibolu	Doğal A.Ş.	II/2007	15,20	Enercon	800 kW
Manisa-Sayalar	Doğal A.Ş.	II/2007	30,40	Enercon	800 kW
Hatay-Samandağ	Deniz A.Ş.	II/2007	30,00	Vestas	2.000 kW
İNŞA HALİNDEKİ KAPASİTE TOPLAMI			75,60		

Mevkii	Şirket	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin kapasitesi
İstanbul-Gaziosmanpaşa	Lodos A.Ş.	I/2008	24,00	Enercon	2.000 kW
İzmir-Aliğa	İnnores A.Ş.	I/2008	42,50	Nordex	2.500 kW
Aydın-Çine	Sabaş A.Ş.	I/2008	19,50	Vensys	1.500 kW
İstanbul-Çatalca	Ertürk A.Ş.	I/2008	60,00	Vestas	3.000 kW
Çanakkale	As Makinsan Temiz A.Ş.	II/2008	30,00	Nordex	2.500 kW
İzmir-Kemalpaşa	Ak-El A.Ş.	II/2008	66,66	Enercon	900 kW + 2.000 kW
Hatay-Samandağ	Ezse Ltd. Şti.	II/2008	35,10	Fuhrländer	900 kW
Hatay-Samandağ	Ezse Ltd. Şti.	II/2008	22,50	Fuhrländer	2.500 kW
Balıkesir-Şamlı	Baki A.Ş.	II/2008	90,00	Vestas	3.000 kW
Bilecik	Sagap A.Ş.	II/2008	66,60	Conergy AG	900 kW
Balıkesir-Bandırma	Bangüç A.Ş.	II/2008	15,00	Vensys	1.500 kW
Osmaniye-Bahçe	Rotor A.Ş.	I/2009	130,00	GE	2.500 kW
TEDARİK SÖLEŞMESİ İMZALI PROJE TOPLAMI			601,86		

3.7 REPA (Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası)

EİE tarafından düzenlenen REPA günümüz şartlarında RES'lere yatırım yapmak isteyen şirketler için çok önemli bir bilgi kaynağı olacaktır.

3.7.1 REPA'nın Tanımı

REPA, orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası'dır.

Bu atlas yardımıyla Türkiye genelinde 200 m x 200 m çözünürlüğünde;

- 30, 50, 70 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük rüzgar hız ortalamaları,
- 50 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgar güç yoğunlukları,
- 50 m yükseklikteki yıllık kapasite faktörü,
- 50 m yükseklikteki yıllık rüzgar sınıfları,
- 2 ve 50 m yüksekliklerdeki aylık sıcaklık değerleri,
- Deniz seviyesinde ve 50 m yüksekliklerdeki aylık basınç değerleri öğrenilebilecektir.

REPA ile denizlerimizde, kıyılarımızda ve yüksek rakımlı bölgelerimizde daha önce ölçemediğimiz yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir.

Rüzgar santrali kurulabilecek alanların belirlenebilmesi için rüzgar kaynak bilgileri ile topografya, akarsular ve göller, yerleşim bölgeleri, orman arazileri, kara ve demir yolları, özel çevre koruma alanları, kuş göç yolları, deniz ve hava limanları, enerji nakil hatları, trafo merkezleri ve elektrik üretim tesisleri gibi tematik haritalar Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilmiştir. Yerleşim bölgeleri ile arazi ve pürüzlülük sınıflarının belirlenmesi için de uydu görüntülerinden yararlanılmıştır [7].

3.7.2 REPA'nın Yararları

Başta rüzgar enerjisi yatırımları açısından bilgi almak üzere, denizcilik ve dağcılık, tarım, hava kirliliği ölçümleri ve orman yangınları ile mücadele gibi bir çok konuda yararı olan rüzgar enerjisi potansiyel atlası, ilerleyen süreçler için de entegre edilecek başka sistemler ile daha bir çok başlıkla kullanılacaktır.

- REPA, atlas alanındaki rüzgar enerjisi kaynağını belirlemede ve yüksek rüzgar potansiyel bölgelerini göstermede kullanılır.

- REPA bir sonraki adımda daha fazla ayrıntılı inceleme yapmak üzere gerekli rüzgar kaynak bilgilerini rüzgar enerjisi uygulamalarında gerekli olan diğer parametrelerle beraber sunarak ilk etüt çalışmalarını ortadan kaldırır.
- Yüksek çözünürlüklü rüzgar kaynağı haritaları ve bu haritalardan alınan bilgiler hükümet planlamacıları, enerji servis şirketleri, özel girişimciler, iş dünyası ve arazi/konut sahipleri gibi geniş bir kullanıcı bandına hizmet sunar.
- Rüzgar kaynağı hakkında en güncel ve tam bilgilere doğrudan erişim ile bu ürünler kullanıcıların veriye dayalı kararlar almalarını sağlar.
- Yerel seviyede, bu ürünler, örneğin, yerel bir rüzgar enerjisi uygulamasının yapılabilirliğini belirlemede kullanıcılara yardım eder.
- Bir büyük ölçekte, ürünler şu gibi soruların cevaplandırılmasına yardım eder:
 - o belirlenen alanda ne kadar rüzgar potansiyeli vardır,
 - o en iyi alanlar nerededir,
 - o ekonomik rüzgar geliştirme olasılığı nedir,
 - o en açık engeller ve özendirici nitelikler nelerdir,
 - o elektrik üretim maliyeti nedir vb.
- Resmi kurumlar ve enerji şirketleri bu haritaları kendi kişisel enerji programlarına uyarlayabilirler
- Kısaca, bu rüzgar haritalama inisiyatifi, önemli planlama parametrelerine erişimi geliştirmek üzere ileri modelleme teknikleri kullanılarak, teknoloji transferi aktivitelerinde ve aynı zamanda ileriye yönelik rüzgar enerjisi planlama ve konuşlandırma kararlarının alınmasında yararlıdır [6].

REPA, rüzgar enerjisi amaçlı kullanımının yanı sıra;

- Orman yangınları ile mücadele,
- Hava kirliliği konsantrasyonlarının izlenmesi,
- Dağ ve deniz sporları,
- Denizcilik aktiviteleri,
- Tarımsal uygulamalar

gibi bir çok sektörün gelişimine de katkıda bulunabilecektir.

Rüzgar kaynak bilgileri, aşağıda belirtilen tematik haritalarla desteklenerek Türkiye geneli, grid, coğrafi bölge, il ve seçilecek herhangi bir alan veya nokta bazında sorgulanabilmektedir [7].

3.7.3 REPA’da Kullanılan Tematik Haritalar

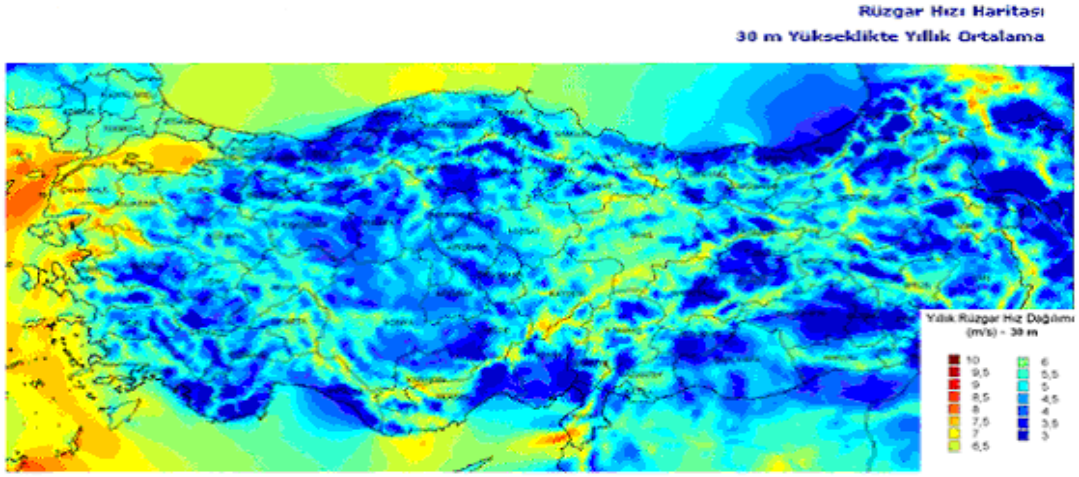
Yukarıda da belirtildiği gibi aşağıdaki tematik haritalar sayesinde rüzgar kaynak bilgileri sorgulanabilmektedir. Böylece rüzgar enerji santrali kurulabilecek alanlar kolaylıkla belirlenmekte, ön fizibilite çalışmaları yapılabilmekte, rüzgar kaynağı arama amacıyla yapılan çalışmalar ortadan kaldırılarak tasarruf sağlanmaktadır [7]:

- Arazi pürüzlülüğü
- Topografya ve yükseklik
- Deniz derinlikleri
- Arazi eğimi
- Yerleşim birimleri
- Yerleşim alanları
- Göller
- Nehirler
- Sulak alanlar
- Kara, demir ve hava yolları
- Limanlar
- Trafo merkezleri
- Enerji nakil hatları
- Enerji santralleri
- Deprem fay zonları
- Arazi kullanım şekli

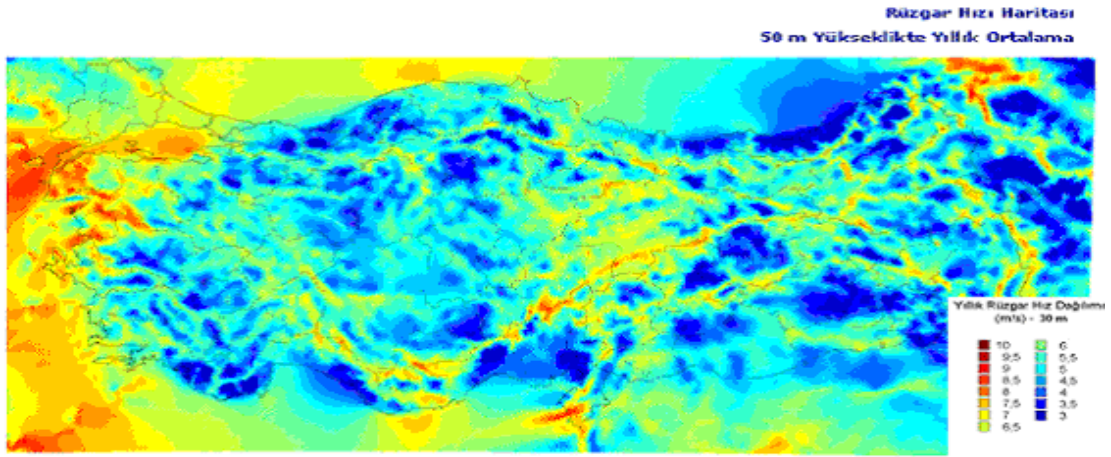
- RES başvurularının yerleri
- Ormanlar
- Çevre koruma alanları
- Kuş göç yolları

REPA ile herhangi bir nokta veya alan için rüzgar enerjisi potansiyeli ve bu alandan üretilebilecek enerji miktarları parametrik olarak belirlenebilecek kabullerle yapılabilmektedir. Genellikle rüzgar enerjisi potansiyeli ve enerji hesaplamalarında bazı kriterler kullanılmaktadır. Bu kriterler isteğe göre değiştirilebilmektedir. Rüzgar enerjisi santralleri için REPA’da tanımlanabilecek kriterlerden bazıları aşağıdaki gibidir [7]:

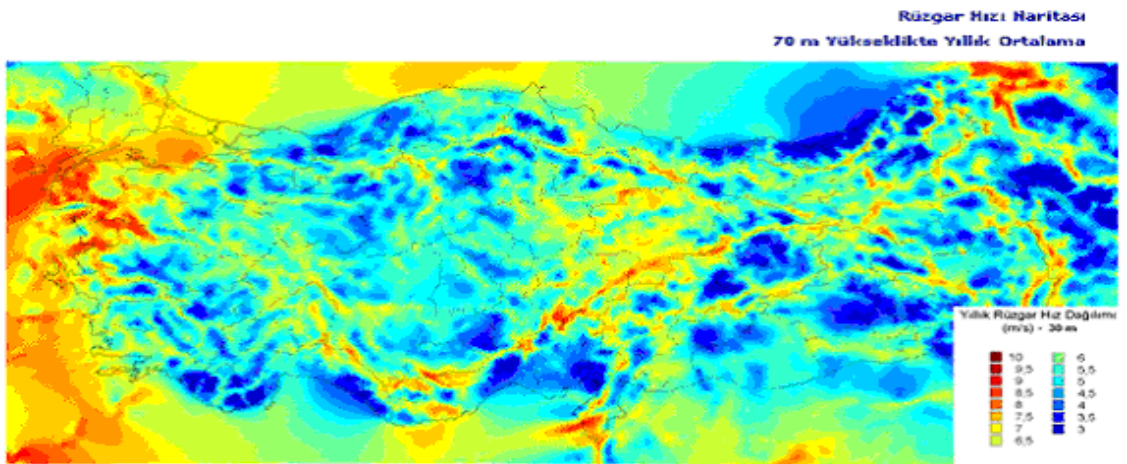
- Rakım
- Eğimi
- Mücavir alanlar ve köyler
- Kara ve demir yolları ile hava alanları ve limanlar
- Akarsular, göller ve orman alanlarının bir bölümü ile Çevre Koruma Alanları
- Enerji santralleri
- Emniyet bantları
- Rüzgar türbini tipi
- Derinliği 50 metre’ den fazla olan deniz alanları...



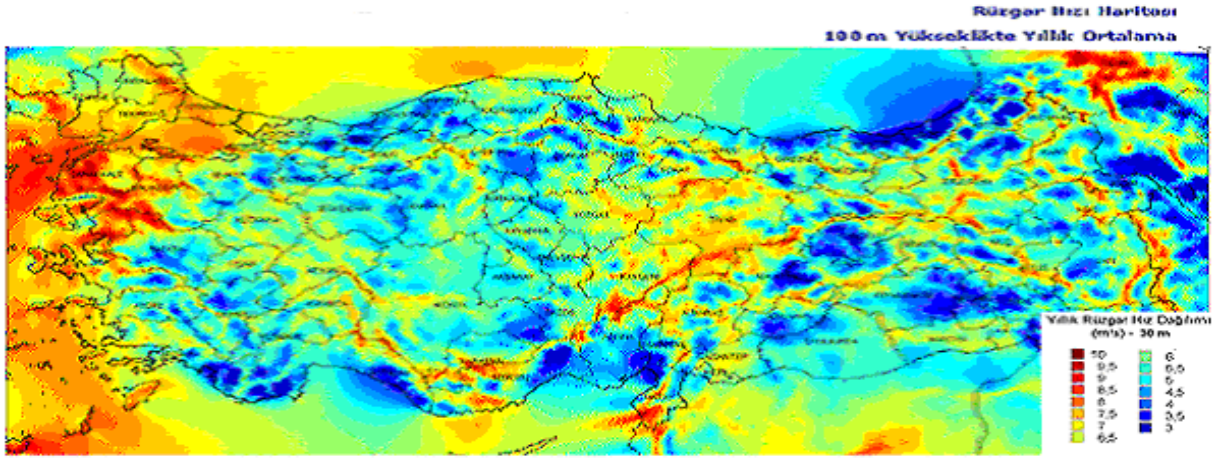
Şekil 3.13 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 30 m Yükseklikteki Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası [6]



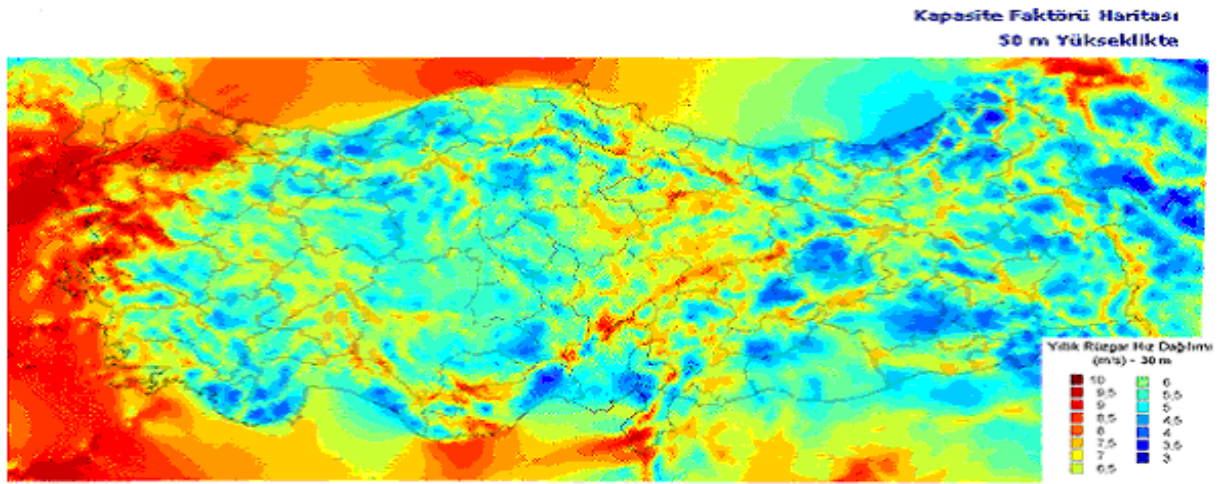
Şekil 3.14 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 50 m Yükseklikteki Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası [6]



Şekil 3.15 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 70 m Yükseklikteki Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası [6]

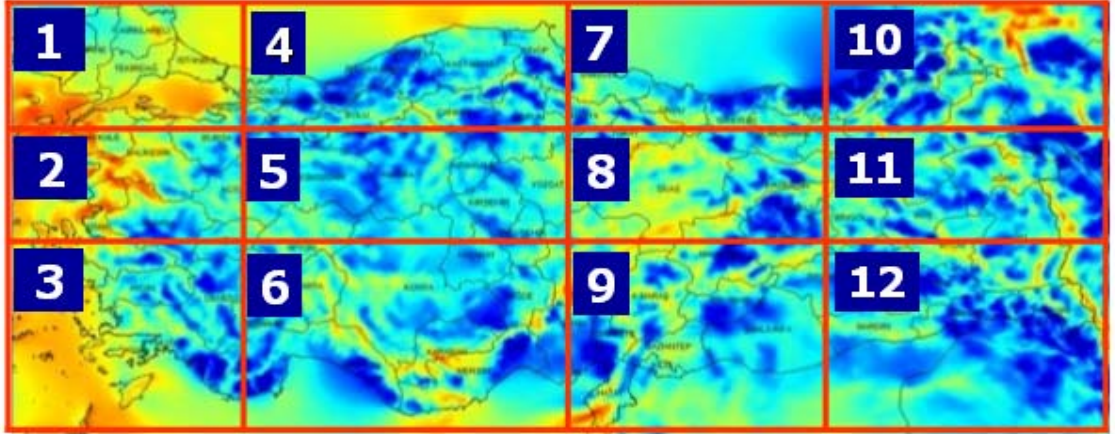


Şekil 3.16 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 100 m Yükseklikteki Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası [6]



Şekil 3.17 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 50 m Yükseklikteki Kapasite Faktörü Haritası [6]

3.7.4 Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Bazı Tematik Haritalar ile Birlikte Bölgesel Gösterimi

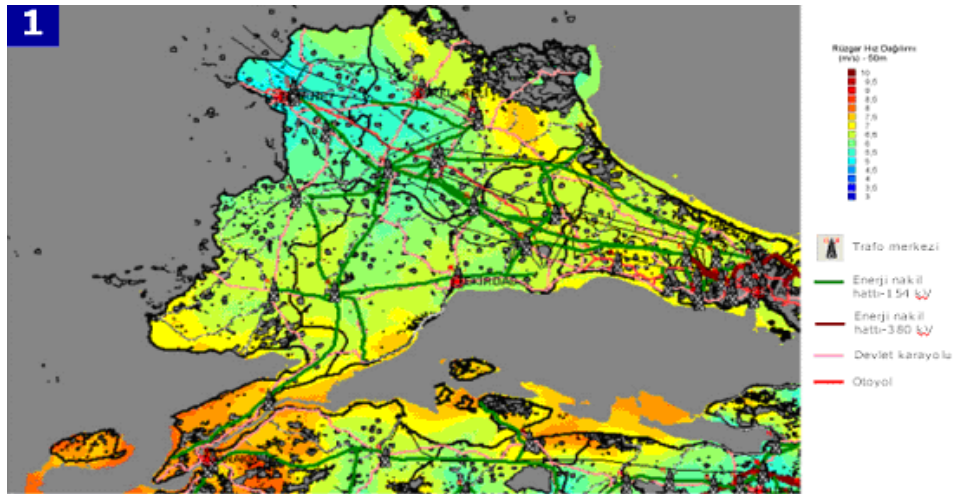


Şekil 3.18 Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Bazı Tematik Haritalar ile Birlikte Bölgesel Gösterimi

[7]

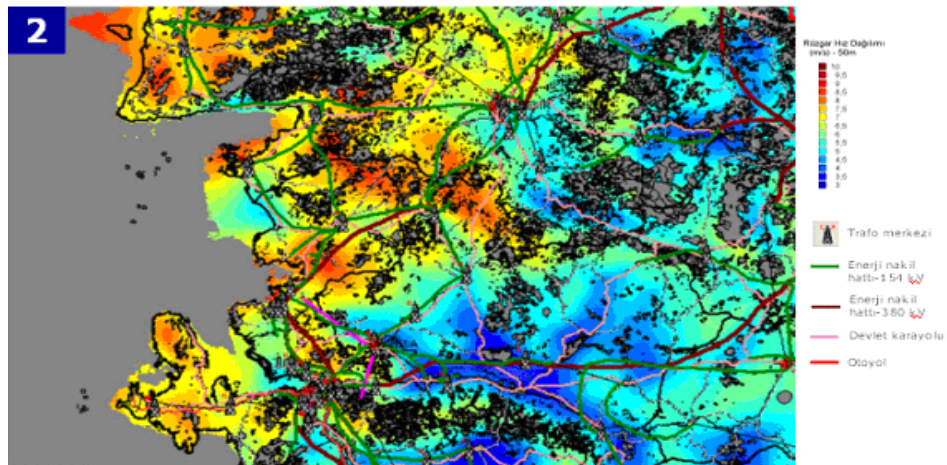
Bölge haritalarında siyah ve gri olarak renklendirilmiş alanlar, rüzgar potansiyeli yüksek olmasına rağmen aşağıda sıralanan kabullere göre rüzgar enerjisi uygulamaları açısından uygun olmayan alanları ifade etmektedir [7]:

- Rakımı 1500 m ve eğimi %20 den fazla olan bölgeler
- Mücavir alanlar ve köyler
- Kara ve demir yolları ile hava alanları ve limanlar
- Akarsular, göller ve orman alanlarının bir bölümü ile Çevre Koruma Alanları
- Enerji santralleri
- Emniyet bantları
- Derinliği 50 metreden fazla olan deniz alanları



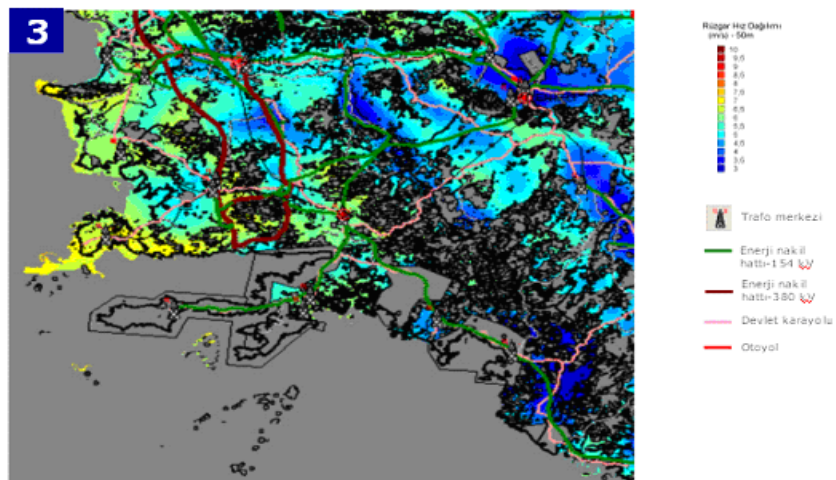
Şekil 3.19 1. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi

[7]



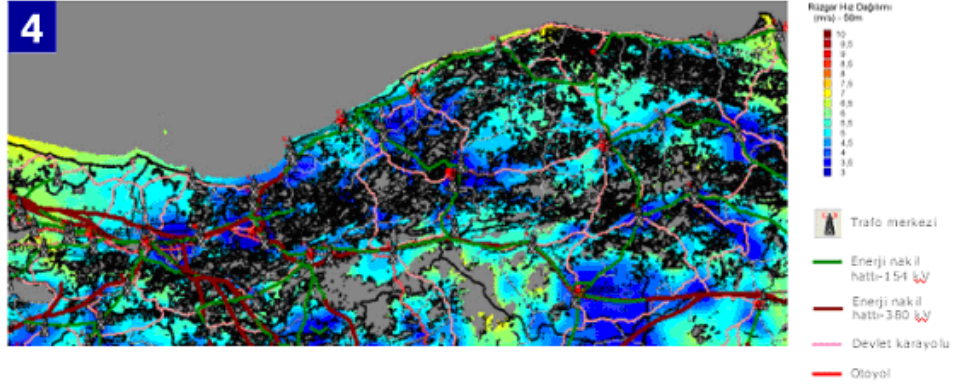
Şekil 3.20 2. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi

[7]

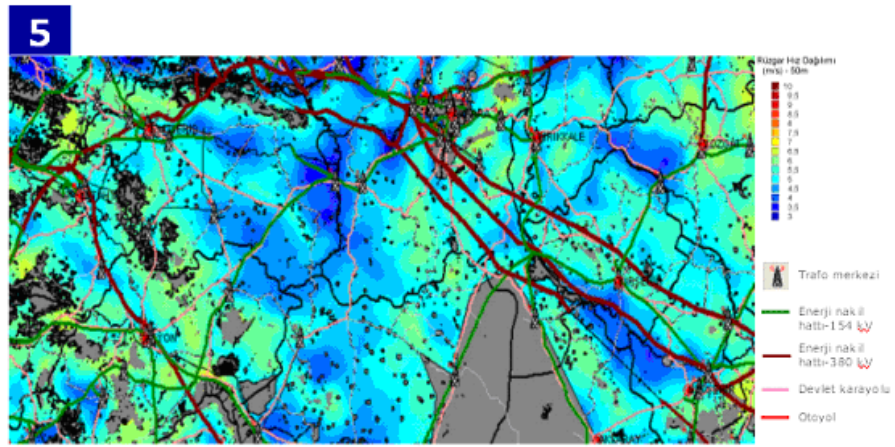


Şekil 3.21 3. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi

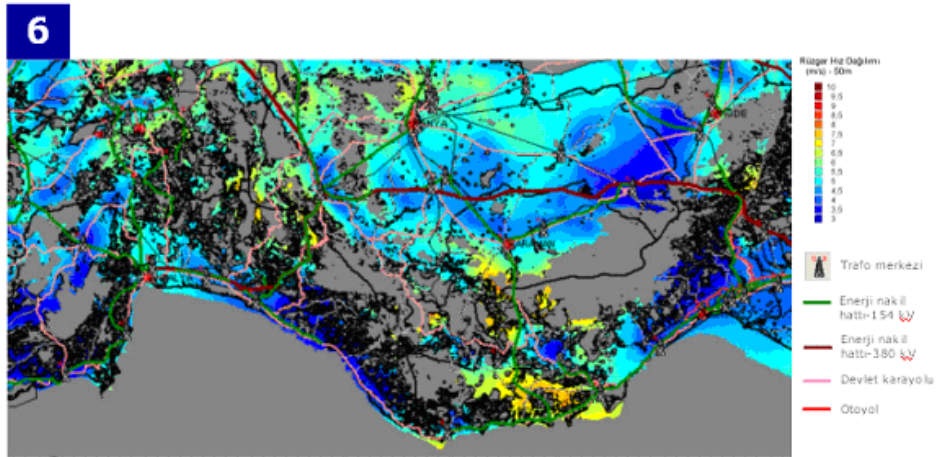
[7]



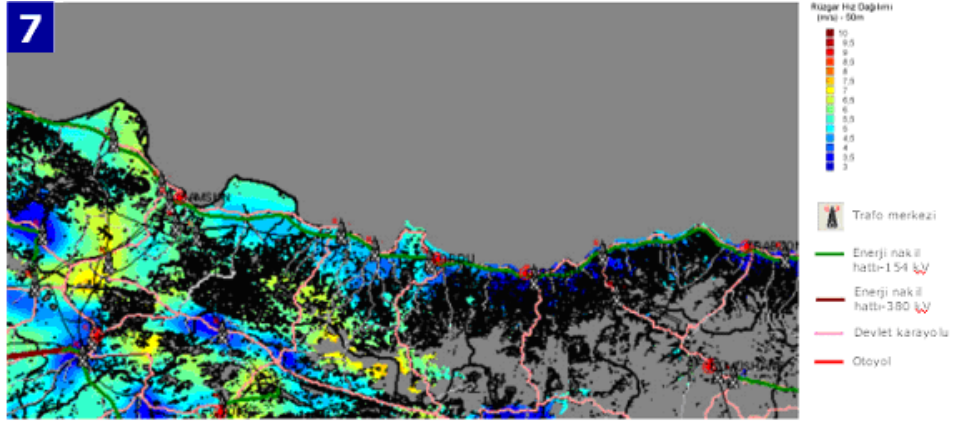
Şekil 3.22 4. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi
[7]



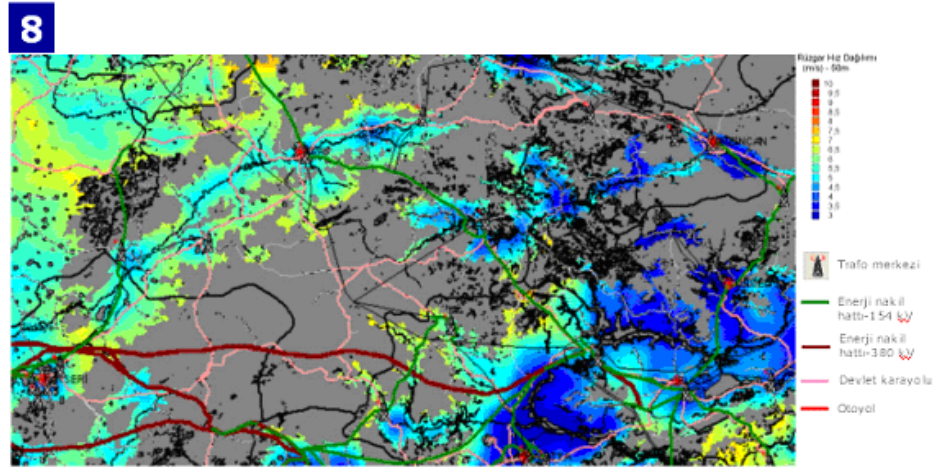
Şekil 3.23 5. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi
[7]



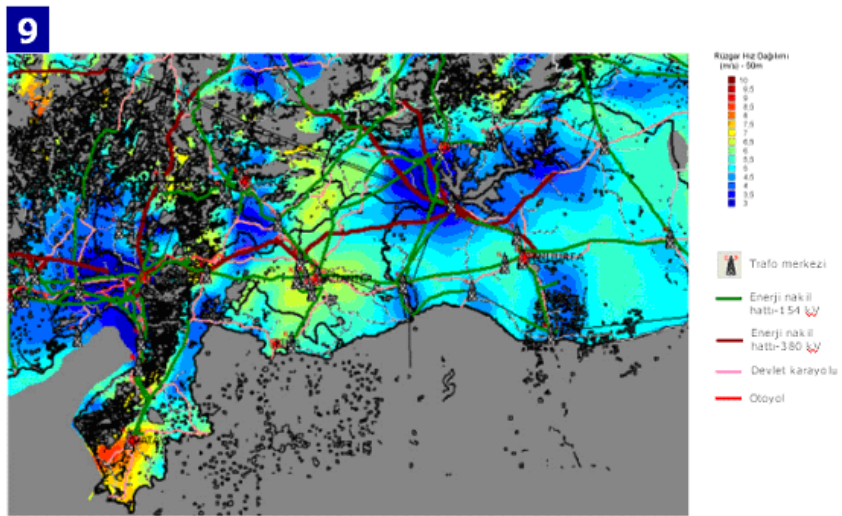
Şekil 3.24 6. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi
[7]



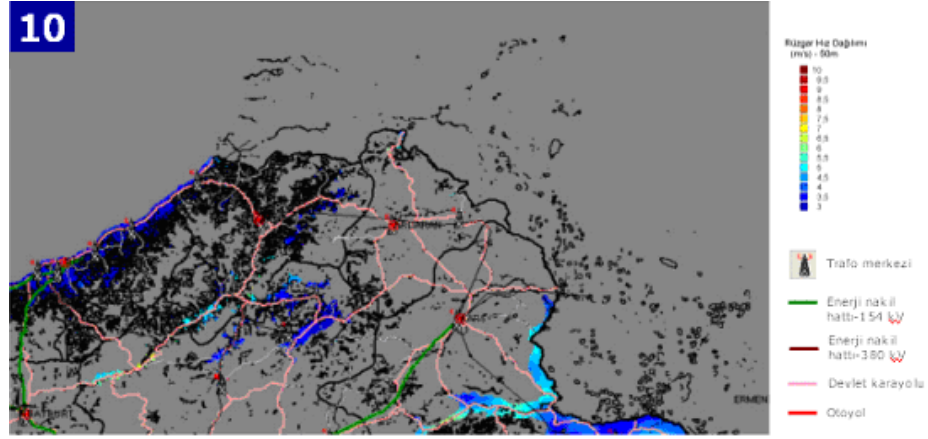
Şekil 3.25 7. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi [7]



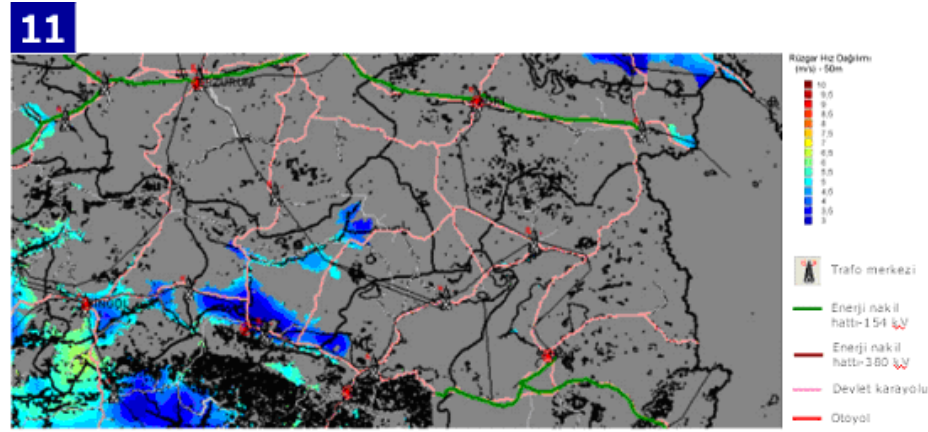
Şekil 3.26 8. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi [7]



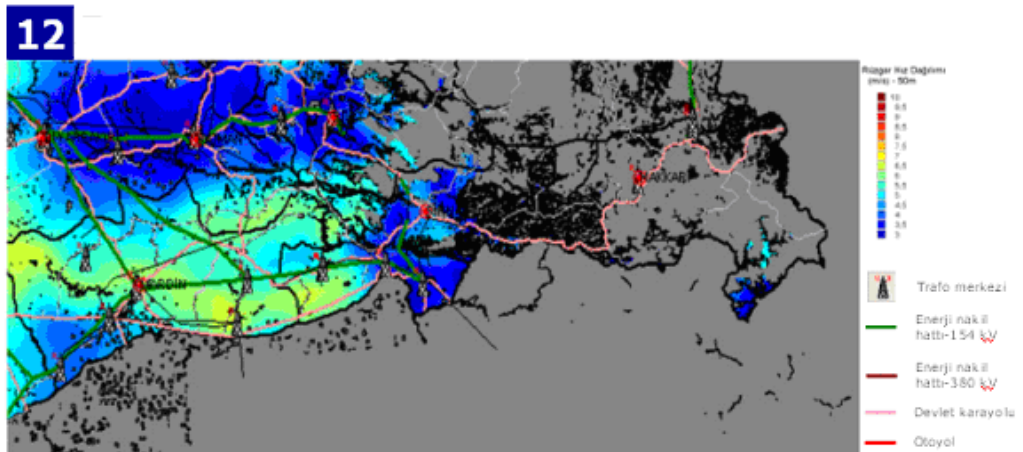
Şekil 3.27 9. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi [7]



Şekil 3.28 10. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi [7]



Şekil 3.29 11. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi [7]



Şekil 3.30 12. Bölgenin Rüzgar Kaynak Bilgilerinin Tematik Haritalar ile Birlikte Gösterimi [7]

3.7.5 REPA Hakkında Çarpıcı Bilgiler

REPA hakkındaki bu bilgiler EİE tarafından yayınlanan REPA broşüründen elde edilmiştir. Daha detaylı bilgi [6] adresinde bulunmaktadır.

- REPA projesinde toplam 700 GB kapasiteli veri üretilerek işlenmiştir. Bu miktar 1000 adet CD'ye veya 150 DVD'ye karşılık gelmektedir.
- Rüzgar kaynak verilerinin üretilmesinde toplam 124 işlemcili ve 5 TB disk alanına sahip bir süper bilgisayar 3 ay boyunca çalıştırılmıştır.
- Türkiye genelinde yaklaşık 33 milyon nokta için rüzgar kaynak verisi elde edilmiştir.
- Projede 12 mühendis 5 ay süresince çalışmıştır.
- Proje tüm Türkiye'yi kapsayacak şekilde, bu miktarda veri işlenen ve bu kadar çok sayıda tematik haritalarla desteklenen ilk uygulamadır.

3.7.6 Rüzgar Enerjisi Santral Yatırımcılarının İzlemesi Gereken Yol

REPA hakkındaki bu bilgiler EİE tarafından yayınlanan REPA broşüründen elde edilmiştir. Daha detaylı bilgi [6] adresinde bulunmaktadır.

1. REPA'dan yararlanarak rüzgar potansiyeli yüksek olan yerlerin belirlenmesi ve bu yerler için rüzgar kaynak bilgilerinin tespit edilmesi,
2. İlgilenilen bölgede daha önce rüzgar enerjisi santrali başvurusunun olup olmadığının araştırılması,
3. İlgilenilen bölgenin arazi yapısı, arazi mülkiyeti, ulaşım imkanları, trafo merkezlerine olan uzaklıkları gibi parametrelerin belirlenmesi,
4. Düşünülen santral sahasını temsil edebilecek optimum rüzgar ölçüm noktası veya noktalarının belirlenmesi,
5. Belirlenen her bir ölçüm noktasında standartlara uygun olarak en az 1 yıl olmak üzere enerji amaçlı rüzgar ölçümlerinin yapılması,
6. Elde edilen rüzgar verilerinin analiz edilerek yatırım kararının alınması,
7. Yatırım fizibilitesinin hazırlanması,
8. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na lisans başvurusu (<http://www.epdk.gov.tr>)

4. FARKLI YÖNLERDEN RÜZGAR ENERJİSİ

Bir önceki bölümde rüzgar enerjisini genel olarak incelenip, dünyadaki ve Türkiye’deki rüzgar enerjilerine değinildi. Bu bölümde ise rüzgar enerjisi hakkında daha çok, teknik konular anlatılmıştır. Maliyet, avantajları, türbin yapısı, rüzgarın oluşumu ve Betz Yasası gibi bir çok konuda açıklama yapılmış, kısacası farklı yönlerden rüzgar enerjisi incelenmiştir.

4.1 Rüzgar Enerjisi’nin Ekonomikliği

Rüzgar enerjisi ilk yatırımlara ve kW başına maliyetleri incelendiğinde diğer enerji türlerinden daha pahalı bir enerji olarak görülebilir ancak çevreye verilen zararlar ve bunların etkilerinin düşürülmesi için yapılacak harcamalarda dikkate alındığında rüzgar enerjisinin diğer enerji türlerine göre bir hayli ekonomik olduğu görülmektedir.

4.1.1 Rüzgar Enerjisi’nin Maliyeti

Rüzgar enerjisini, diğer enerji çeşitleri ile karşılaştırmadan önce maliyetini kendi içersinde inceleyelim. Dünyanın en büyük sorunu olan enerji, günümüzde çoğunlukla yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanmaya çalışılmaktadır. Bunun en büyük nedenlerinden biri de fosil ve nükleer güç ile enerji üreten tesislerde maliyetin, yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar gücüyle enerji üreten tesislere göre oldukça yüksek olmasıdır.

Rüzgar enerjisi, elektrik üretimi maliyetinin azalması ve verimliliğin artması şeklinde iyileşmeye devam etmektedir. 1980 yılında dünyada, rüzgardan elde edilen 1 kWh enerjinin maliyeti yaklaşık 30 cent iken 1991’de bu değer 6 cent’e kadar düşmüştür. Günümüzde ise bu değer ülkelerin sağladığı kolaylıklar nedeniyle 4,7 cent/kWh’tir. Dünyada 1 kWh’lik enerji maliyetinin 2013 yılında 3 cent ve 2020 yılında ise 2,5 cent’e kadar ineceği tahmin edilmektedir (Akyüz, 2000).

Rüzgar enerjisinin maliyet açısından ekonomikliğinin yanı sıra, istihdam oluşturmada da önemli bir faktördür. Rüzgar türbinlerinin kurulduğu arazi sahibi çiftçilere ödenen kira bedelleri, kırsal alanlarda önemli bir ek gelir sağlamaktadır. Ayrıca rüzgar türbinlerinin kurulumu ve bakım-onarım çalışmaları sırasında da önemli iş olanakları doğmaktadır (Akyüz, 2000).

4.1.2 Elektrik Üretim Maliyetini Oluşturan Faktörler

Mevcut enerji kaynaklarının elektrik enerjisine dönüştürülmesi için gereken masrafları dört

ana başlık altında toplayabiliriz;

- **Sermaye ve Sermayenin Maliyeti:** Mevcut teknolojiye göre tesis edilmesi gereken santralin ve bu santralin inşası için gerekli olan finansmanın fiyatı (faizi, geri ödeme planı, vadesi v.s.).
- **İşlenecek Kaynağın Maliyeti:** Enerji kaynağının erişilebilirliğine ve kullanıma uygun hale getirilebilmesine bağlı olarak değişen giderler.
- **İşletme Maliyetleri:** Mevcut tesislerin bakım, onarım ve işletmesi için karşılanacak giderler.
- **Dış Maliyetler:** Doğrudan üretim veya tesisle ilgisi olmayıp çevreye ve/veya enerji sektörüne veya diğer sektörler verilen zararlar ile ilgili masraflar.

Rüzgar türbinleri için yakıt maliyeti yoktur ve rüzgar bedavadır. Projenin maliyeti ödendikten sonra, sadece işletme ve bakım maliyetleri söz konusudur. Yatırım maliyeti, toplam maliyetin %75 ile %90'ını oluşturmaktadır (Akyüz, 2000).

4.1.3 Rüzgar Enerjisinin Yatırım ve Maliyet Açısından Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması

Türbinlerin ortalama ömürleri 40 yıldır. Bu değer atmosferik nem, kararlı rüzgar yapısı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Enerji üretiminde kullanılan diğer farklı yöntemlerden elde edilen elektriğin maliyeti aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi rüzgar enerjisi diğer yaygın enerji kaynakları kadar ekonomiktir.

Çizelge 4.1 Enerji Maliyetinin Güç Kaynaklarına Göre Karşılaştırılması [cent/kWh]
(Akyüz,2000)

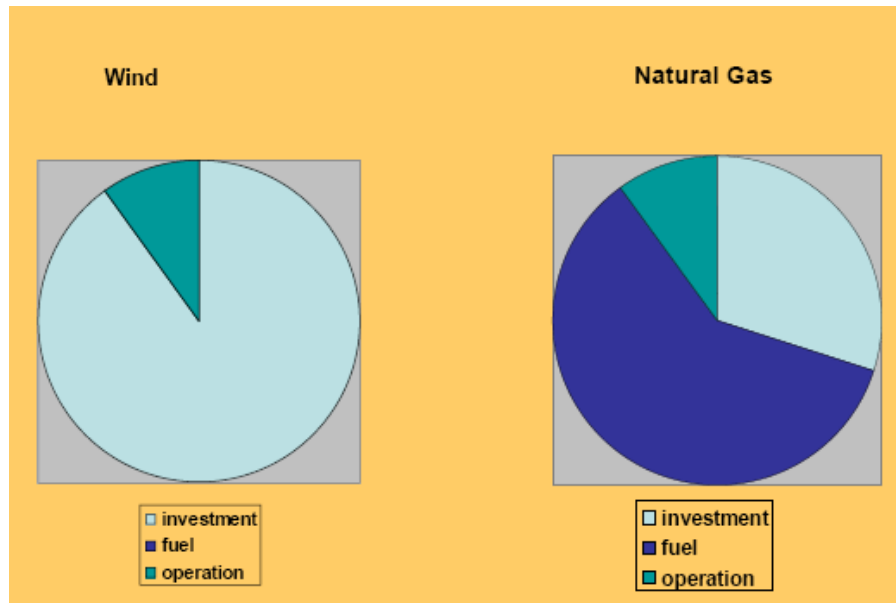
Güç Kaynağı	Min.	Maks.	Ortalama
Solar Termal Hibrid	6,0	7,8	6,9
Nükleer	5,3	9,3	7,3
Doğal Gaz	4,4	5,0	4,7
Rüzgar	4,7	7,2	6,0
Jeotermal	4,3	6,8	5,6
Biyomas	4,2	7,9	6,1

Yukarıdaki çizelgeden de anlaşılacağı gibi rüzgardan elde edilen 1 kWh enerjinin maliyeti düşmesine rağmen diğer enerji kaynaklarında sürekli olarak bir artış görülmektedir.

Enerji kaynaklarından kömüre baktığımızda; Almanya’da kömürün ocak çıkış fiyatı dünya piyasasındaki fiyatın üç katıdır. Dolayısıyla kömürden sağlanan enerji üretiminin gerçek fiyatı kilowatt saat başına 9 c ECU’dan daha fazladır. Nükleer enerjiye baktığımızda ise, nükleer enerjiden elektrik enerjisi üretim fiyatı 1995 yılındaki İngiliz Hükümeti verilerine göre (5,2 – 8,5) c ECU/kWh olmaktadır (1990 fiyat seviyesine göre). Aşağıdaki çizelgede ise elektrik üretim maliyetleri gösterilmiştir (Yılmaz, 2000).

Çizelge 4.2 Elektrik Üretimi Maliyeti (cent/kWh) (Tümerdem, 2002)

	Sermaye	Yakıt	Bakım&Onarım	Toplam	Dış Mas.	Toplam Maliyet
Rüzgar	3,0-3,8	0	0,8-1,0	3,8-4,8	0,04	3,8-4,8
Kömür	1,7-2,4	1,6	1,0	4,3-5,0	2,0	6,3-7,0
Nükleer	2,9-5,5	0,4	0,7	4,0-6,6	2,0	6,0-8,6
Doğal Gaz	0,7-1,3	1,3	0,3	2,3-2,9	0,75	3,0-3,6



Şekil 4.1 Rüzgar Enerjisi ve Doğal Gazın Yatırım, Yakıt ve Operasyon Maliyetlerinin, Toplam Maliyetlerdeki Yeri – (Yıldız Teknik Üniversitesi 9. Kalite Günleri Seminerleri 7. Oturum – Erol Demirer)

Amerikan Rüzgar Enerjisi Birliğince yapılan bir çalışmada rüzgar santralleri, gaz santralleriyle aynı koşullarda finanse edilebilse maliyetlerin %40 düşebileceği hesaplanmıştır. Ülkemizde kullandırılan kredi faizleri ve vadelerinin dış kaynaklı kredi bile olsa hem A.B.D.'de kullandırılan hem de Avrupa Birliğine üye ülkelerde kullandırılan kredilerden daha kötü koşullarla sağlandığı, dolayısıyla Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinin sermaye maliyetinin daha yüksek olacağı bir gerçektir. Bu açıklamadan anlaşılabacağı gibi iyi finansman koşullarıyla rüzgar enerji santralleri gaz, hidrolik, kömür, biomas ve nükleer enerji santrallerine göre dış maliyetler göz önüne alınmasa bile çok daha ucuzdur (Akyüz, 2000).

Çizelge 4.3 Santral Tipi ve Yatırım Maliyetlerinin Karşılaştırılması (AWEA, 2000)

Santral Tipi	Yatırım (\$/kW)
Linyite Dayalı Termik	1600
İthal Kömüre Dayalı Termik	1450
Doğal Gaza Dayalı Termik	680
Rüzgar Santralleri	1000-1450
Petrole Dayalı Termik	2000
Nükleer Santraller	3500

4.2 Rüzgar Enerjisinin Avantajları

Günümüzde bir çok avantajı bulunan rüzgar enerjisinin önemi (EİE,2006), [1], [8] ve [9] kaynakları incelendiğinde açıkça ortaya çıkmaktadır:

- Sonlu fosil kaynakların kullanımını azaltması, bugünkü enerji üretim kaynaklarına doğal kaynakların tüketilmesini geciktirerek destek olması ve yeni teknolojilerin gelişmesi için zaman sağlaması.
- Sera gazı ve CO₂ salımlarında fosil kaynaklara göre daha avantajlı olması, oksijen tüketmemesi, asit yağmurlarına yol açmaması, atmosferik ısınmaya neden olmaması ve radyoaktif etkisinin olmaması
- Doğal bitki örtüsüne ve insan sağlığına olumsuz etkilerinin olmaması, 0,6 MW'lık bir türbin için rüzgar enerjisinde 86.000 ağaca eşdeğer oksijen tasarrufu sağlaması

- Hammadde sıkıntısı olmayan yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olması
- Türbinlerin oturduğu alanın çok küçük olması ve türbinler arası alanların başka amaçlarla kullanımına olanak vermesi (toplam alanın %1'i türbin'e yollar için yeterli)
- Kısa sürede devreye alınabilen ve genişletilebilen tesisler ile rüzgar gücünün elektriğe verimli dönüşümünü sağlaması.
- Ömrü dolan türbinleri söküp kaldırmanın kolay olması. Arazinin yeniden kullanılabilmeye uygun olması.
- Rüzgar endüstrisinin modern ve teknolojik gelişiminin tüm dünyada hızlı olması, yüksek miktarda istihdam sağlaması
- Rüzgar santrali projelerinin basit ve türbinlerin bakımının kolay olması.
- Teknolojik alt yapının olması.
- Rüzgar santralleri kurmak için gerekli kredi faiz oranlarının düşmesi ve verilen teşvikler ile yatırımcılar için rüzgar santrali kurmanın çekici hale gelmesi.
- Dışa bağımlılığının olmaması, petrol fiyatlarındaki dalgalanmalardan etkilenmemesi

4.3 Rüzgar Türbinlerinin Özellikleri ve Yapısı

Rüzgar enerjisi üretimi için kullanılan türbinler teknolojik gelişmeler sayesinde gün geçtikçe modernleşmekte ve eksik olduğu düşünülen konular bir bir tamamlanmakta. Performansı artırıcı sistemler ile rüzgar dünden bugüne yel değirmenlerinden modern türbinlere kadar basamak basamak bir gelişim gösterdi. Şimdi kısaca modern türbinlerin genel yapısına bakacak olursak [1];

- Modern rüzgar türbinleri 2-3 kanatlıdır.
- Kanat çapları yaklaşık olarak 30 m'dir.
- Belli bir zaman aralığında rüzgar hızı değişmez değildir. Ancak, şebekeye enerji, rüzgar jeneratörü ve kanat özellikleri ile yaklaşık olarak değişmez olarak verilir.
- İki rüzgar türbini arasındaki uzaklık yaklaşık olarak 150-300 m arasında değişebilir. Bu nedenle arazinin yaklaşık %99'luk kısmı tarım, hayvancılık ve diğer amaçlar için kullanılabilir.

- En ekonomik rüzgar santrali, 10-30 MW'lık kapasite büyüklüğüdür. Bugün yaygın büyüklükteki 25 türbin yılda yaklaşık 20GWh'lık enerji üretilmektedir.
- Enerji üretimi rotor yüksekliğinde rüzgar hızının küpüne ve kanatların süpürme alanına bağlıdır.
- Rüzgar hızı yükseklikle artar, çoğu türbin 30-50m kule yüksekliğine sahiptir.
- Beklenen türbin ömrü en az 20 yıldır.
- Her türbin bilgisayar sistemi ile denetlenmektedir.
- Rüzgardan üretilen elektriğin birim maliyeti giderek düşmektedir. 2010 yılına kadar maliyetlerin %25 azalması beklenmektedir.
- Türbin güçleri birkaç kW tan birkaç MW a kadar değişebilmektedir.
- Rüzgar türbinleri karaya kurulduğu gibi denizlerde de kurulabilmektedir.

Rüzgar türbinine bağlı elektrik üretici, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemleri 50W ile 2-3 MW arasında mekanik veya elektrik gücü sağlayabilmektedir. Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgardan sağlanacak enerji rüzgar hızına bağlıdır. Rüzgar hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgarın sağlayacağı enerji, gücüne ve esme saati sayısına bağlıdır, özgül rüzgar gücü, hava debisine dik birim yüzeye düşen güçtür. Topografik koşullara göre yerden 50 m yükseklikte özgül güç, hız 3.5 m/s den küçük iken, 50W/m^2 den az olabileceği gibi hız 11.5 m/s den büyük iken 1800W/m^2 den çok olabilir. Ortalama rüzgar hızı yıldan yıla değişebilir. Rüzgar hızının değişkenliğinden dolayı, rüzgar enerjisi potansiyelinden elde edilecek enerji, yıllık ortalama hız değerinden hesaplanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Bu yüzden belli bir bölgede rüzgar türbinleri ile üretilebilecek elektrik enerjisi üretim miktarının hesabında, yıllık ortalama rüzgar hızından çok, gözlemlenene dağılım veya Weibull dağılımı ile hesap edilmiş rüzgar hızı sıklık dağılımı kullanılmaktadır. Türbin tarafından üretilen enerjinin miktarı, rüzgar hızı dağılımına bağlıdır. Rüzgar hızları, frekans dağılımına bağlı olarak, aynı ortalama rüzgar hızına sahip farklı yerlerde iki kata varabilecek güç yoğunluğu farklılıkları olabilir. Bu durum küp çarpanından kaynaklanmaktadır [1].

Elde edilen rüzgar kayıtları, kalite kontrolü yapılarak istatistik çözümlemeler de kullanılmak üzere değerlendirilir. Değerlendirmelerde, hem uzun dönemli rüzgar kayıtlarını elde etmek, hem de farklı site ve farklı yüksekliklerde rüzgar özelliklerini belirlemek için rüzgar hızı

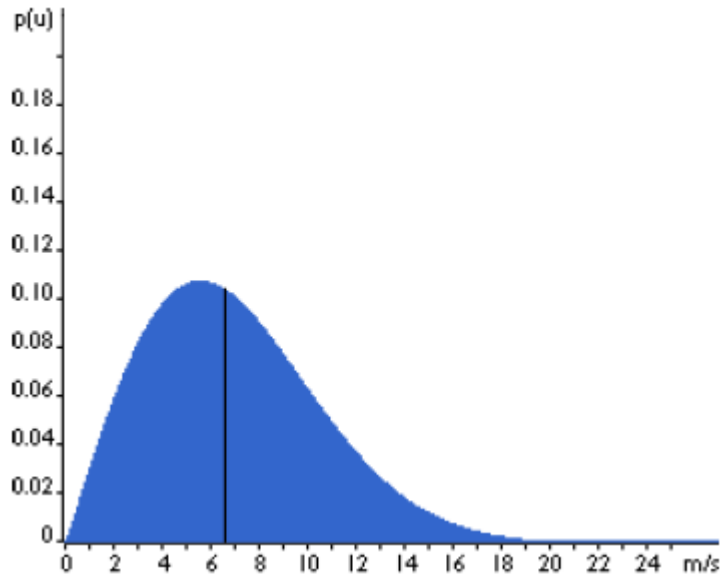
dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Bu fonksiyonlar, Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımı ve Rüzgar gülüdür [1].

4.3.1 Weibull Dağılımı

Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgar endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbin iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgar ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgarların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgarların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir site için rüzgar dağılımı ya ölçülerek, ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde “Weibull dağılımı” ile belirlenir (Akgün (a),2004).

4.3.1.1 Rüzgar Hızı Değişikliklerinin Genel Yapısı

Weibull dağılımı, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olabilirliği “1” dir. Yani, sizin havalarda bunun içinde olmak üzere, belli bir periyotta rüzgarın her aralıkta toplam olma olasılığı %100 dür. Weibull dağılımı eğrisi simetrik değil çarpıktır. Bu eğriyi oluşturan her bir hız frekansları, ortalama hızın bulunmasını da sağlar. Tipik bir yerdeki rüzgar değişimi ekseriya Weibull dağılımı, aşağıda görüntüsü gösterilen şekil, kullanılarak tanımlanabilir. Bu, özel yerde bu eğrinin şekli, şekil parametresi 2 için belirlenmiş ve ortalama rüzgar hızı 7 m/s’dir (Akgün (a),2004).



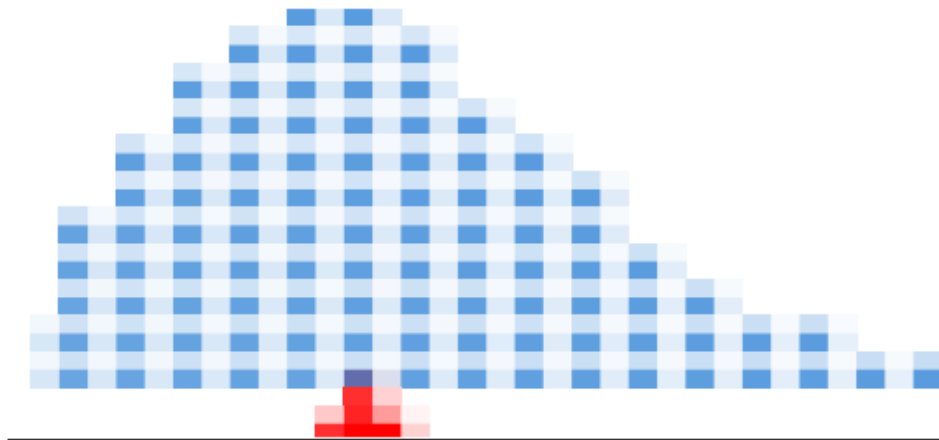
Şekil 4.2 Weibull Dağılımı (1998) [10]

4.3.1.2 Rüzgar Hızlarının İstatistiksel Tarifi

İstatistikle aşına olan insanlar, bu eğrinin şeklinden bir olasılık yoğunluk dağılımını gösterdiğini fark ederler. Bu eğri altındaki alan daima tam olarak 1 dir, çünkü rüzgar hızının sıfır dahil diğer hızlarda esme olasılıkları % 100 olmalıdır. Mavi alanın yarısı dikey siyah çizginin, 6.6 m/s de, solunda kalmaktadır. 6.6 m/s bu dağılımın medyanı diye adlandırılır. Bu demektir ki, zamanın yarısında esmeler 6.6 m/s den daha az hızda iken, diğer yarısında daha fazla hızda olacaktır. O zaman, ortalama hız için neden 7 m/s dendiği merak edilebilir. Ortalama hız gerçekte o yerden elde edilen rüzgar gözlemlerinin ortalamasıdır. Görüldüğü gibi rüzgar hızlarının dağılımı eğrilmiştir, yani, simetrik değildir. Bazen çok yüksek rüzgar hızlarına sahip olunabilir, ancak onlar seyrekler. 5.5 m/s rüzgar hızları bu dağılımda oldukça yaygındır, buna bu dağılımın mod değeri denir. Her bir hız aralığını bu aralığın olma olasılığı ile çarpıp hepsini toplarsak ortalama hız elde edilir. Rüzgar hızlarının istatistik dağılımı yerküre üzerinde bir yerden diğerine, lokal iklim şartlarına, kara parçası ve onun yüzeyine bağlı olarak değişir. Böylece Weibull dağılımının da hem şekli hem de ortalaması değişmektedir (Akgün (a),2004).

4.3.1.3 Weibull Dağılımının Dengelenmesi

Ortalama rüzgar hızını bulmanın bir diğer yolu, aşağıdaki grafikte tam olarak gösterilen, mavi tuğla yığınlarının dengelenmesidir. Her tuğla, yıl boyunca zamanın %1'lik diliminde esen rüzgar olasılığını temsil etmektedir. Yığılmada 1 m/s'lik rüzgar hızları en solda, 17 m/s'lik rüzgar hızları en sağdadır. Yığındaki denge 7. yığında olmaktadır, yani ortalama hız 7 m/s'dir. (Akgün (a),2004).



Şekil 4.3 Weibull Dağılımının Dengelenmesi

4.3.1.4 Rüzgarın Ortalama Gücü - Güç Dağılımının Dengelenmesi

Rüzgar hızları ile ilgilenilmesinin nedeni onların enerji içerikleridir, yukarda gösterilen tuğla örneğindeki gibi. Biz tuğlaların hacimleri ile ilgilenildi. Şimdi, tam olarak rüzgar gücünün rüzgar hızının küpü ile değişmesine benzer olarak bir tuğlanın hacmi, içeriğinin küpü ile değişmektedir. Rüzgar hızlarının Weibull dağılımı dikkate alındığında; her bir hız artımı için rafa bir tuğla yerleştirilir. Böylece, rüzgar hızının olasılık dağılım yüzdesi elde edilmiş olur. Her tuğlanın büyüklüğü, rüzgar hızına karşılık gelirse; her tuğlanın ağırlığı rüzgardaki enerjinin miktarına karşılık gelir. Sağdaki 17 m/s'lik rüzgar hızlarında gerçekten ağır tuğlalara sahibiz demektir, 1 m/s'lik hızlardaki tuğlaların hemen hemen 500 katı ağırlığında. (1 m/s'lik rüzgar 0.61 W/m^2 'lik bir güce sahiptir, 17 m/s deki rüzgar ise 3009 W/m^2 'lik bir güce sahiptir). Güç dağılımı ortalama değeri, rafi dengeleyen rüzgar hızına karşılık bulunur. Bu durumda görüldüğü gibi yüksek rüzgar hızları nadir görülmesine rağmen, onların ağırlıkları çok fazla enerjiye karşılık gelir. Örnekte ortalama rüzgar hızı 7 m/s'dir, ancak rüzgar hızlarının ağırlıklı güç ortalaması 8.7 m/s'ye karşılıktır. Bu rüzgar hızının güç karşılığı 402 W/m^2 'dir (Akgün (a),2004).

4.3.1.5 Rüzgarın Gücü - Güç Yoğunluk Fonksiyonu

Rüzgardaki enerji ile ilgili olarak, enerji potansiyeli (güç) her bir saniyede rüzgar hızının küpü ile ve havanın yoğunluğu ile orantılı olarak değişir. Eğer Weibull dağılımından her bir rüzgar hızı olasılığı her bir rüzgarın gücü ile çarpılırsa; farklı rüzgar hızlarındaki güç yoğunluğunu ve rüzgar enerjisi dağılımı hesaplanmış olur. Fark edilmesi gereken en önemli şey, rüzgar enerjisi miktarının ilgilenilen yerdeki ortalama rüzgar hızının üstünde olan hızlardan kaynaklanacağıdır. Çünkü, yüksek rüzgar hızları düşük rüzgar hızlarından çok daha fazla enerji üretir (Akgün (a),2004).

4.3.1.6 Cut In Rüzgar Hızı

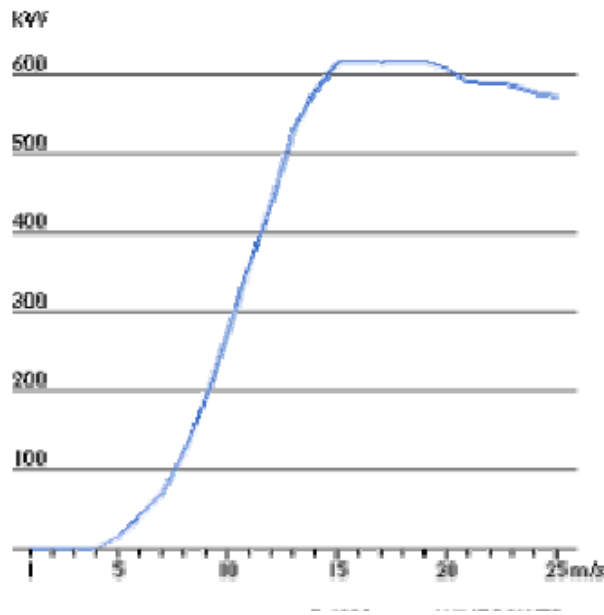
Rüzgar türbinleri ekseriya, 3-5 m/s arasındaki rüzgar hızlarında çalışmaya başlayacak şekilde dizayn edilir. Türbini çalıştırmaya başlatan bu en küçük hız değerine cut in rüzgar hızı denir

4.3.1.7 Cut Out Rüzgar Hızı

Rüzgar türbinleri yüksek rüzgar hızlarında, örneğin 25 m/s üzerindeki hızlar görüldüğünde türbini korumak ve çevresine zarar vermemek için, durdurulmaya programlanır. Türbinin durdurulduğu bu hız, cut out rüzgar hızı diye adlandırılır (Akgün (a),2004).

4.3.1.8 Bir Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi

Bir rüzgar türbininin güç eğrisi, türbinin farklı rüzgar hızlarında üretilecek elektrik gücü miktarının ne kadar olacağını gösteren bir eğridir. Alttaki grafik 600 kW'lık tipik bir rüzgar türbininin güç eğrisini göstermektedir. Güç eğrileri saha ölçümleri ile bulunur, rüzgar türbinine makul yakınlıktaki bir direk üzerine yerleştirilen bir anemometre ile (anemometre türbin üstüne veya çok yakınına yerleştirilmez, türbin türbülansından korunmak ve rüzgar hız ölçümlerini güvenilir yapmak için.) Eğer rüzgar hızı çok hızla dalgalanmıyorsa o zaman bir kimse anemometreden rüzgar hız değerlerini kullanabilir, türbinden elektrik gücü miktarını okur ve bu iki değeri bir grafik üstüne çizer (Akgün (a),2004).



Şekil 4.4 Bir Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi (1998) [10]

4.3.1.9 Güç Eğrisinin Ölçüm Belirsizliği

Pratikte rüzgar hızı daima dalgalandığı için, bir kimse türbin rotorundan geçen rüzgar kolonunu tam olarak ölçemeyebilir. (Türbin önüne yerleştirilen bir anemometre tam bir çözüm değildir, çünkü türbin bir rüzgar gölgelenmesi oluşturacak ve kendi önündeki rüzgarı frenleyecektir). Bu sebeple pratikte, bir kimse her bir rüzgar hızı için farklı ölçümlerin ortalamasını almak zorunda kalacak ve grafiği bu ortalamalara göre çizecektir (Akgün (a),2004).

4.3.2 Betz Yasası

Rüzgardan maksimum yararlanmak için rüzgarın türbinde durdurulabilen kısmının maksimum

seviyeye yükseltilmesi gerekmektedir. Bu konuda literatürdeki önemli bir yasa olan Betz Yasasının incelenmesi konunun anlaşılması açısından iyi olacaktır.

4.3.2.1 Rüzgarın İdeal Durdurulması

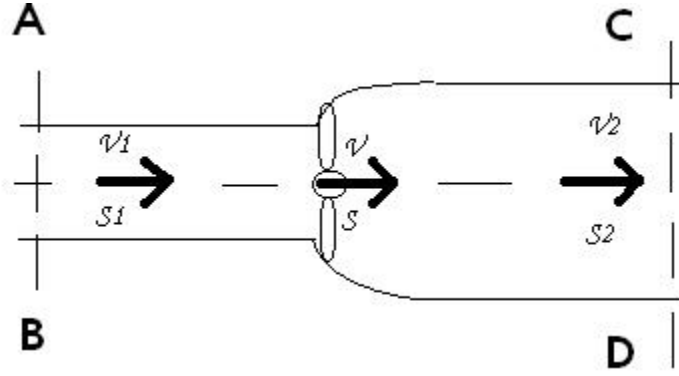
Bir rüzgar türbininin rüzgardan çıkartabileceği daha fazla enerji, rüzgarın daha fazla durdurulması ve türbinin gerisine geçen rüzgarın daha fazla azaltılmasıyla artar. Eğer rüzgarın tüm enerjisini almaya çalışılırsa, türbinden uzaklaşan rüzgarın sıfır hıza düşmesi gerekir, başka bir deyişle hava, türbinin gerisine geçemez. Bu durumda artık herhangi bir enerji çıkarılmaz. Çünkü tüm hava türbin rotor girişinde durdurulmuştur. Diğer bir ekstrem durumda rüzgar, türbinin üzerinden geçer. Bu durumda da herhangi bir enerji üretilmemiş olur. Bu sebeple türbinden enerji elde etmenin yolu bu iki ekstrem durum arasında olmalı ve rüzgardaki enerji, faydalı mekanik enerjiye dönüştürülmelidir. Bunu sürpriz olarak gerçekleştirecek basit bir cevap vardır. İdeal bir rüzgar türbini, rüzgar hızını onun orijinal hızının $2/3$ kadar yavaşlatacaktır. Niçin olduğunu anlamak için rüzgar türbinlerinin aerodinamiği için temel fizik yasasını kullanmak zorunda kalınmaktadır (Akgün (a),2004).

4.3.2.2 Betz Yasası

Betz kuralına göre, bir rüzgar türbininin kullandığı mekanik enerjiye, rüzgarın kinetik enerjisinin sadece $16/27$ (%59) oranından daha azı dönüşür. Betz yasası; Alman fizikçi Albert Betz tarafından 1919'da Göttingen Enstitüsünde ilk defa formüle edilmiştir ve rüzgar türbinleri hakkında ilk global yasa unvanını almıştır. Bu genel ifade disk-biçimindeki bir rotoru olan rüzgar türbinine uygulanabilir (Akgün (a),2004).

Betz kanatların bağlantı noktası olmayan ve sonsuz sayıda kanada sahip, içinden geçen rüzgara hiçbir direnç göstermeyen rüzgar rotorunu ideal farz eder. Böylece bu saf bir enerji dönüştürücüsü olur. Bundan başka rotor tarafından süpürülen tüm alan üzerindeki durumlar uniform ve rotorun üzerindeki ve arkasındaki havanın hızının eksensel olduğu varsayılmaktadır (Gourieres,1982).

Böylece hareketli bir atmosfere yerleştirilmiş durağan rüzgar rotorunu ideal olarak düşünmemizi sağlar.



Şekil 4.5 Betz Yasası

V_1 türbine girmeden önceki belirli uzaklıktaki rüzgar hızı, V gerçekte rotordan geçen ve kanatlar tarafından taranan bütün S alanı için uniform olarak farz edilen rüzgarın hızı, V_2 rotordan çıktıktan sonra belirli mesafedeki rüzgarın hızı olmak üzere; rotor içersinden geçen hava akımı bölümü öncesi, S_1 , sonrası S_2 olmaktadır. Mekanik enerjinin rotor tarafından üretilmesi ancak havanın kinetik enerjisinin azaltılması ile mümkün olmaktadır. Böylece V_2 'nin V_1 den daha düşük olması gerekir. Sonuç olarak, rotor içersinden geçen hava akımı bölümü, akıntıya karşıdan akıntı yönüne artar. S_2 , S_1 'den daha büyüktür (Gourieres,1982).

Eğer havanın sıkıştırılmaz olduğunu farz edersek; devamlılık durumu (sabit kütle akışı) şu şekilde yazılabilir:

$$S_1 \cdot V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2 \quad (4.1)$$

Rüzgar tarafından rüzgar rotoru üzerinde kullanılan kuvvet Euler teoremi ile verilir ve şuna eşittir:

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (4.2)$$

Bu yüzden emilen güç;

$$P = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (4.3)$$

Daha önce de söylediğimiz gibi bu güç kinetik enerjiden alınmıştır. Akıntıya karşıdan akıntı yönüne dönüşen kinetik enerji miktarı;

$$\Delta T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (4.4)$$

P ve ΔT ifadelerinin ikisini eşitleyerek şunu elde ederiz;

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4.5)$$

Rotor üzerinde kullanılan kuvvet ve sağlanan güç aşağıda verilen şekilde ifade edilir:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (4.6)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (4.7)$$

Belirli bir akıntıya karşı V_1 hızı için, P gücündeki değişimi V_2 'nin fonksiyonu olarak çalışabiliriz (Gourieres,1982).

Fark olarak şunu elde ederiz:

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - 2 \cdot V_1 \cdot V_2 - 3 \cdot V_2^2) \quad (4.8)$$

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \text{ eşitliği iki çözüme sahiptir:} \quad (4.9)$$

✓ Birincisi: $V_2 = -V_1$ fiziksel hiçbir anlama sahip olmayan

✓ İkincisi: $V_2 = \frac{V_1}{3}$ maksimum güce karşılık gelen

$V_2 = \frac{V_1}{3}$ belirli değerini P ifadesinde yerine koyarsak, üretilebilecek maksimum gücü elde ederiz:

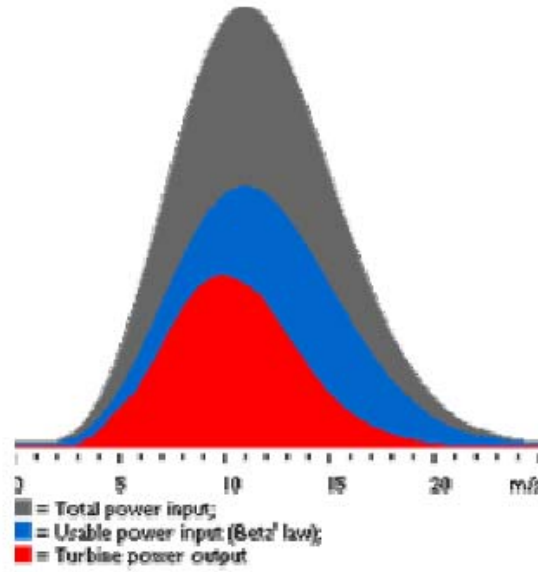
$$P_{\max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 = 0,37 \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (4.10)$$

Hava kütleline özgü ρ değerini $1,25 \text{ kg/m}^3$ alarak; bu ifade Betz'in formülünü meydana getirir. Rotor boyunca rüzgar hızının yönünü eksensel ve S alanı boyunca hızın uniform olduğunu farz eder (Gourieres,1982).

4.3.2.3 Güç Yoğunluğundan Güç Çıktısına

Weibull dağılımından her bir rüzgar hızı olasılığı her bir rüzgarın gücü ile çarpılırsa; farklı rüzgar hızlarındaki güç yoğunluğunu ve rüzgar enerjisi dağılımının hesaplanmış olacağından daha önce de bahsedilmişti. Buradan hareketle; aşağıdaki grafikte kurşuni eğrinin altında

kalan alan (tüm yol alt eksene çıkar) özel bir yerde beklenen rüzgar akışının, metrekaare başına rüzgar gücü miktarını verir. Bu grafik, her bir hız aralığı 0.1 m/s olan dar dik çok sayıdaki kolonlardan oluşmaktadır. Her bir kolonun yüksekliği güçtür (m^2 'ye watt olarak düşen toplam güç miktarına bu özel rüzgar hızı katkıda bulunur). Mavi eğri altındaki alan, rüzgar gücünün teorik olarak ne kadarının mekanik enerjiye dönüştürüleceğini söyler. (Betz kuralına göre bu, rüzgarın toplam gücünün 16/27'sidir). Kırmızı eğrinin altındaki toplam alan, bu yerde bilinen bir rüzgar türbininin ne kadar elektrik üretebileceğini söyler (Akgün (a),2004).



Şekil 4.6 Güç Yoğunluğu ve Güç Çıktısı (1998) [10]

4.3.2.4 Güç Katsayısı (Power Coefficient)

Bir türbininin rüzgardaki enerjiyi elektriğe dönüştürme verimi olarak adlandırılır. Bu rüzgar türbinin enerji çıkışı aşağıdaki eşitlik ile belirlenir. P, güç çıkışı; d, hava yoğunluğu; A, süpürme alanı; CP, Güç katsayısı; v, Rüzgar hızı olmak üzere;

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_P$$

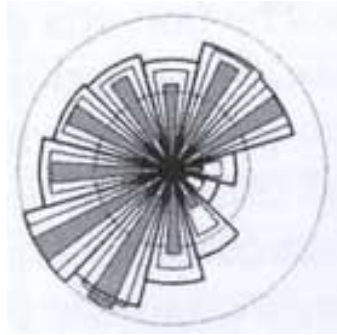
formülü ile hesaplanır (Gourieres,1982).

4.3.3 Rayleigh Dağılımı

Eğer Weibull dağılımı şekil değişkeni 2 ise, böyle bir dağılıma “Rayleigh dağılımı” denir. Rüzgar türbini üreticileri genellikle makine başarımlarını Rayleigh dağılımına göre verirler. Bunun nedeni, değişik yerlerdeki rüzgar dağılımlarının bilinmemesidir [1].

4.3.4 Rüzgar Gülü

Rüzgar gülü, belirli kesimlerdeki rüzgarın esme sıklığını gösterir. Rüzgar gülü, aynı zamanda her bir kesimin ortalama rüzgar hızına katkısının ne kadar olduğunu gösterir. Bir rüzgar gülü farklı kesimlerdeki oransal rüzgar hızları bilgisini verir. Rüzgar gülleri yerden yere değişiklik gösterir. Yakın yerlerde ise, özellikle baskın yön açısından rüzgar gülleri birbirine yakınlık gösterir. Bu durumlarda pratikte interpolasyon veya korelasyon güvenle yapılabilir. Eğer dağ ve vadilerden oluşan karmaşık bir arazi var ise, bu yerler ile kıyı bölgeleri arasında önemli yön değişiklikleri olur. Bu durumlarda kestirimler yapmak genellikle güvenilir değildir. Rüzgar gülü yalnızca rüzgar yönlü, türbin yerleşiminde son derece önemlidir. Eğer türbinleri bu yönde yerleştirmek gerekiyorsa, örneğin baskın enerji yönü kuzey ise doğu ve batı yönlerindeki engeller çok önemli değildir. Çünkü bu yönlerden herhangi bir rüzgar gücü gelmez. Bunun yanında, rüzgarın şekli ve enerji içeriği yıldan yıla yaklaşık %10 değişir . Bu nedenle birkaç yıllık gözlemler sağlıklı yaklaşımlar için iyi sonuçlar verir. Genelde geniş rüzgar parkı planlamacıları bir yıllık yerel ölçümlere güvenirlir. Bu ölçümlerle, yakın ve uzun dönemli meteorolojik gözlemlerden yararlanarak uzun dönemli güvenilir veri elde ederler [1].



Şekil 4.7 Örnek Rüzgar Gülü [1]

4.4 Rüzgar Türbini Bileşenleri

Teknoloji gün geçtikçe türbin yapısını değiştirerek daha farklı boyutlara ve işlevsel hale getirmekte. Burada anlatacağımız türbin tipi tipik bir 600 kW gücündeki türbin yapısını içermektedir (Akgün (c),2004):

1. Nacelle (Türbünün kule üstündeki kafa kısmı)
2. Rotor Blades (Kanatlar)
3. Hub (Kanatların bağlantı noktası)

4. Low Speed Shaft (Düşük Hız Şaftı)
5. Gearbox (Dişli Kutusu)
6. High Speed Shaft With Its Mechanical Brake (Mekanik frenli Yüksek Hız Şaftı)
7. Electrical Generator (Elektrik Jeneratörü)
8. Yaw Mechanism (Rota Mekanizması)
9. Electronic Controller (Elektronik Kontrolcü)
10. Hydraulics System (Hidrolik Sistemi)
11. Cooling Unit (Serinletme Birimi)
12. Tower (Kule)
13. Anemometer and Wind Vane (Anemometre ve Rüzgar Vanası)

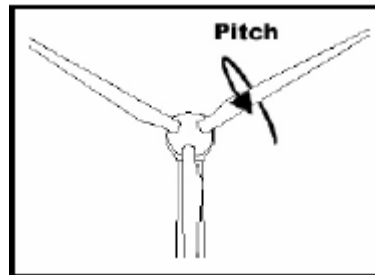
4.4.1 Nacelle

Rüzgar türbininin dişli kutusunu ve jeneratör dahil ana parçalarını içine alır. Servis personeli nacelle'ye türbin kulesinden girebilir. Nacelle'nin solunda rüzgar türbin rotoru, kanatlar ve kanatların bağlantı noktası bulunur (Akgün (c),2004).

4.4.2 Kanatlar

Rüzgarı yakalar ve onun gücünü kanatların bağlantı noktasına aktarır. 600 KW'lık modern bir rüzgar türbininde, her bir kanat 20 m uzunluğundadır ve bir uçak kanadının oldukça benzeri olarak dizayn edilmektedir (Akgün (c),2004).

Ayrıca kanatlarda rüzgar enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmak için kendi eksenleri etrafında 90° hareket kabiliyetine sahiptirler (EİE).



Şekil 4.8 Kanat Hareket Yapısı (Unay,2006)

4.4.3 Kanatların Bağlantı Noktası

Rüzgar türbininin düşük hızlı şaft'ı ile bağlantılıdır (Akgün (c),2004).

4.4.4 Düşük Hız Şaftı

Rüzgar türbinini kanatların bağlantı noktası yüksekliğinden dişli kutusuna bağlar. 600 kW'lık modern bir rüzgar türbin rotoru 19-30 devir/dakika (rpm) kadar, nispeten yavaş döner. Şaft, aerodinamik frenleri işletebilecek hidrolik sistemleri borulara bağlar (Akgün (c),2004).

4.4.5 Dişli Kutusu

Solunda düşük hızlı şaft vardır. Düşük hızlı şafttan yaklaşık olarak 50 kat daha hızlı dönen yüksek hızlı şaft ise sağındadır (Akgün (c),2004).

Düşük hızlı şaft ile yüksek hızlı şaftı birbirine bağlayan bu parça, elektrik üretmek için birçok jeneratörün ihtiyaç duyduğu dönüş hızı olan dakikada 30-60 (rpm) devirden, dakikada 1000-1800 (rpm) devire kadar çıkarır [3].

4.4.6 Mekanik Frenli Yüksek Hızlı Şaft

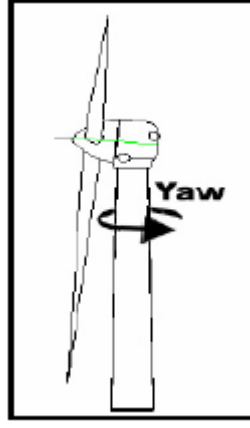
Yaklaşık 1.500 devir/dakika (rpm) ile döner ve elektrik jeneratörünü çalıştırır. Acil bir mekanik disk freni ile birlikte dir. Aerodinamik frenler kusurlu olduğu zaman veya türbin hizmette olduğu zaman mekanik fren devreye girer (Akgün (c),2004).

4.4.7 Elektrik Jeneratörü

Ekseriya indüksiyon jeneratörü veya asinkronous jeneratör olarak bilinir. Modern bir rüzgar türbininin maksimum elektrik gücü halen 500-2300 kilowatt (2.3 MW) kadardır. Bu gücü 3 MW'a çıkarma yönündeki çalışmalar halen sürmektedir (Akgün (c),2004).

4.4.8 Yaw Mekanizması

Yaw mekanizması, rüzgar vanasını kullanarak rüzgar yönünü belirleyen elektronik kontrolcü tarafından işletilir. Rüzgar yönü değıştiğı zaman, normal olarak o anda yaw sadece bir kaç derece kadar olacaktır. Rüzgara karşı nacelle ile rotoru döndürmek için elektrik motorlarını kullanır (Akgün (c),2004).



Şekil 4.9 Yaw Mekanizması (Unay,2006)

4.4.9 Elektronik Kontrolcü

Elektronik kontrolcü, rüzgar türbininin şartlarını sürekli olarak takip eden ve yaw mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar bulundurulur. Herhangi bir bozukluk (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) durumunda türbini otomatik olarak durdurur ve türbin operatörü bilgisayara modem hattı ile çağrı mesajı gönderir (Akgün (c),2004).

Ayrıca cut in ve cut out hızlarında da türbinin durdurulması işlemi elektronik kontrolcü vasıtasıyla yapılmaktadır [3].

4.4.10 Hidrolik Sistem

Türbinin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır (Akgün (c),2004).

4.4.11 Soğutma Birimi Fanı

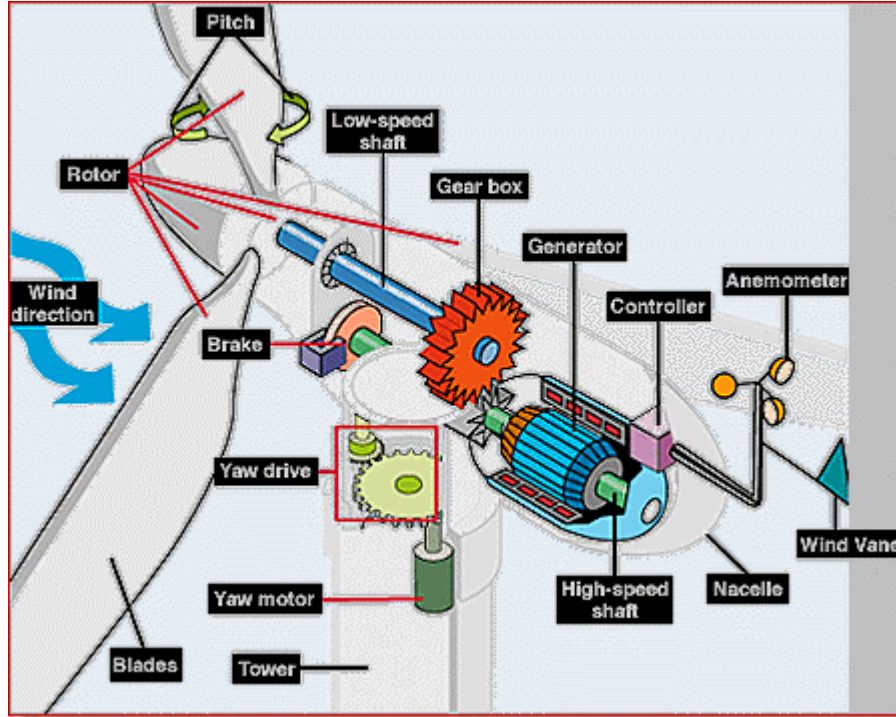
Elektrik jeneratörünü soğutur. Ayrıca dişli kutusunun yağını soğutan bir yağ soğutma birimini de bulundurulur. Bazı türbinler su-soğutmalı jeneratörlere sahiptir (Akgün (c),2004).

4.4.12 Kule

Rüzgar türbininin kulesi, nacelle ve rotoru üzerinde taşır. Genellikle kulenin yüksek olması bir avantajdır çünkü, rüzgar hızları yerden yükseldikçe artar. Tipik olarak 600 kW'lık modern bir rüzgar türbininin kulesi 40-60 m yüksekliktedir (bir 13-20 katlı bina yüksekliği kadar). Kuleler ya tüp ya da kafes biçimindedir. Tüp biçimli kuleler çalışanlar için daha avantajlıdır, çünkü gerektiğinde bir merdivenle içerden türbinin tepesine çıkmak daha kolaydır. Kafes kulelerin avantajı esas olarak ucuz oluşlarıdır (Akgün (c),2004).

4.4.13 Anemometre ve Rüzgar Vanası

Rüzgarın hızını ve yönünü ölçmek için kullanılırlar. Rüzgar hızı 5 m/s ye eriştiğinde türbini harekete geçirmek için rüzgar türbininin elektronik kontrolcüsü tarafından anemometrenin gönderdiği elektronik sinyaller kullanılır. Eğer rüzgar hızı 25 m/s i aşarsa kompütür, türbini ve çevresindekileri korumak için rüzgar türbinini otomatik olarak durdurur. Rüzgar vanasından gelen sinyaller, rüzgar türbini elektronik kontrolcüsü tarafından alınarak, yaw mekanizması yardımıyla rüzgara karşı türbini döndürmek için kullanılır (Akgün (c),2004).



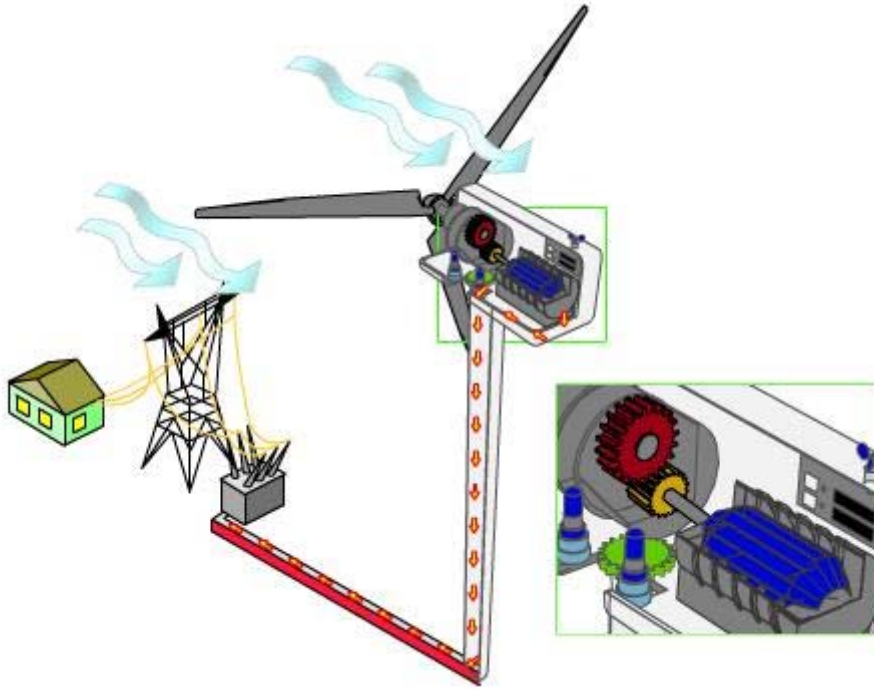
Şekil 4.10 Rüzgar Türbininin Temel Parçaları [3]

Çizelge 4.4 Türbin Boyutlarının Kronolojik Olarak Gelişimi (Unay,2006)

						
Year	1981	1985	1990	1996	1999	2000
Rotor (meters)	10	17	27	40	50	71
Rated Power (kW)	25	100	225	550	750	1,650
Annual Energy Production (MWh)	45	220	550	1,480	2,200	5,600
Capacity Factor (%)	20	25	27	30	33	38

Birçok boyutta rüzgar türbini bulunmaktadır. Yukarıdaki şekilde kronolojik olarak çeşitli türbin boyutları gösterilmiştir. Şekilde; rotor çapları, güçleri, yıllık enerji üretim miktarları ve kapasite faktörleri gösterilmiştir. Türbin özellikleri her geçen gün gelişmektedir. Günümüzde 5000 kW (5 MW) gibi büyüklüklerdeki türbin kapasiteleri test edilmektedir (Unay,2006).

Ayrıca basitçe rüzgar türbininin çalışmasını gösteren bir şekil bu konuda daha açıklayıcı olacaktır. Şekil 4.11’de bir rüzgar türbininin sistem yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Bir Rüzgar Türbininin Sistem Yapısı [2]

4.5 Rüzgar Enerji Santrali ve Yer Seçimi

Rüzgar enerji santrali elektrik üretmek amaçlı kurulan bir çok türbinden ve şebekeye aktarım teknolojisinden oluşur. Böyle bir tesisin yerinin seçimi bir çok kriteri göz önüne alarak yapılmalıdır. Elektriği eş zamanlı üretilip tüketiliyor ve depolanamaz olması bu konunun önemini bir kat daha arttırmaktadır.

4.5.1 Rüzgar Enerji Santrali

Elektrik üretmek amacıyla kurulan birden fazla rüzgar türbinleri topluluğuna “Rüzgar Santrali” yada “Rüzgar Çiftliği” denir. Rüzgar enerjisi bakımından denizler, karasal alanlara göre daha büyük zenginlik göstermektedir. Karalarda ise rüzgar santrallerinin kurulacağı yerlerin seçimi çok önemlidir. Rüzgar santrallerinin kurulması düşünülen yerler için ortalama

ve saatlik rüzgar hızları, santral sahasına kurulan gözlem istasyonlarından temin edilir. Rüzgar santrallerinin planlanması aşamasında, rüzgar atlasları ilk başvuru kaynakları olmalıdır.

Rüzgar atlası; yer yüzeyinden 10 m yükseklikte, yer yüzeyinde ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönüne yeterli süre ve sayıdaki meteoroloji istatistiklerinin, özel bilgisayar programları yardımıyla değerlendirilmesi sonucunda elde edilen, enerji plancılarına ve yatırımcılara, rüzgar gücü ve kapsadığı alanlar hakkında bilgi veren verilerdir. Öte yandan, rüzgar atlası yer seçiminde tek başına yeterli olmayacaktır. Yer seçiminde özel çalışma ve ölçümlere gerek duyulmaktadır (EİE,2006).

Rüzgar enerji santralından üretilecek enerji miktarı rüzgar hızlarının küpüyle orantılıdır. Bu nedenle, rüzgar santralı kurulacak en uygun yerin belirlenmesi ve belirlenen yerde yapılacak enerji amaçlı rüzgar ölçümleri büyük önem taşımaktadır (Çalışkan,2006).

Rüzgar santralı yer seçimi konusunda doğanın kendisi bir yol göstericidir. Santral alanı içindeki ağaçlar, bitki örtüsü ve çaylar var ise, bunlar baskın rüzgar varlığı ve yönü hakkında önemli ip uçları vermektedirler. Parklarda rüzgar potansiyelini belirlemek için herhangi bir ölçüm sistemi kurulmadan önce, meteorolojik ve topografik olarak rüzgar potansiyelinin yüksek olabileceği yerlerde, topografya ve dağ silsileleri dikkate alındığında daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir (EİE,2006).

4.5.2 Rüzgar Kaynak Tespitinde Ön Etüt Süreci

RES kurulumu için öncelikle kaynak tespiti ve bir dizi araştırmayı içeren ön etüt süreci önem kazanmaktadır. Bu bölümün ayrıntıları aşağıdaki kısımlarda incelenmiştir.

4.5.2.1 Rüzgar Potansiyeli Yüksek Yerlerin Belirlenmesi

Rüzgar enerji santralı yatırımı için ilk yapılması gereken rüzgar potansiyeli yüksek yerlerin tespit edilmesidir. Bu aşamada belirlenmesi gereken, rüzgar hızlarının yaklaşık tahmini değerleridir. Tahmini rüzgar hızlarının bulunacağı ilk başvuru kaynağı ise daha önce de bahsettiğimiz rüzgar atlaslarıdır (Çalışkan,2006).

Düşünülen yerlere yakın meteoroloji ve konu ile ilgili kurumlarının yapmış olduğu rüzgar ölçümleri de bir fikir verebilir. Bunların yanı sıra, rüzgar enerji santralı kurulacak yerin tespitinde doğanın kendisi gerçek bir yol göstericidir. Ağaçlar, çalılıklar gibi biyolojik göstergeler, rüzgarın oluşturduğu jeolojik belirtiler (aşınmalar, erozyon) önemli ip uçları

vermektedir. Ayrıca; yöre halkının gözlemleri, eski yel değirmen kalıntıları ve rüzgarı çağrıştıracak yerel, sosyal ve kültürel belirtiler (tepe isimleri, maniler vb) rüzgar varlığını işaret ederler (EİE,2006).

Duyumlar, gözlemler ve kuruluşların yapmış olduğu ölçüm kayıtları ile kabaca belirlenen yerde bizzat arazi çalışması yapılarak tahmini rüzgar hızları belirlenir. Ayrıca, el anemometresi ile belli bir sıklıkta ve sürede anlık rüzgar hızlarının tespit edilmesi de yararlı olacaktır. Yapılan ön çalışmalar sonucu belirlenen tahmini ortalama rüzgar hızları 5-7 m/s civarında ise rüzgar kaynağın ekonomik olarak değerlendirilebileceği düşünülmelidir (Çalışkan,2006).

4.5.2.2 Rüzgar Enerji Santrali Kurmak İçin Uygun Arazi Seçimi

Ortalama rüzgar hızlarının yüksek olacağı düşünülen sahaya rüzgar enerji santrali kurmak fiziksel, çevresel, teknik ve yasal açılardan mümkün olmayabilir. Rüzgar enerji santrali kurmaya aday sahalarda dikkat edilecek bazı kriterler Çalışkan, EİE, Akgün, ve diğer kaynaklar incelendiğinde aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sahaya ulaşım kolaylığı
- Bölgenin elektrik enerjisi talebi
- Ulusal şebekeye bağlanma kolaylığı
- Üretilen enerjiyi pazarlama imkanları
- Enerji nakil hatlarının ve trafo merkezlerinin güç kapasitesi
- Üretilen enerjinin nakli için trafo merkezlerine olan uzaklık
- Sahanın yol ve diğer çalışmalar için işleme kolaylığı
- Arazinin eğimi
- Sahanın büyüklüğü
- Arazinin kullanım şekli
- Sahanın bitki örtüsü
- Arazinin hakim rüzgar yönüne göre durumu

Yatırımcı, bu ve buna benzer kriterleri değerlendirdikten sonra araştırma alanını biraz daha genişleterek aşağıda belirtilen sorulara da cevap aramalıdır (Çalışkan,2006):

- Sahanın yerleşim birimlerine olan uzaklığı
- Sahanın imar durumu
- Sahanın askeri, sivil radar ve buna benzer tesislere olan yakınlığı
- Sahanın sit, milli park, orman arazisi veya diğer kapsamda olup olmadığı
- Sahanın doğal yaşam etkinlikleri ve ekolojik açısından önemi
- Sahanın mülkiyeti ve kullanım biçimi
- Sahanın jeolojik yapısı
- Yeraltı su kaynaklarının analizi
- Yakın civarda yaşayanların rüzgar santrallerine bakış açısı
- Sahanın sivil ve askeri havacılık amaçlı kullanım şekli
- Sahanın buzlanma, yağmur, yıldırım ve atmosferik kararlılık durumları
- GSM kapsama alanının tespiti
- Yasal yükümlülükler
- Yerel elektrik dağıtım şirketi ile yapılacak görüşmelerin sonuçları

Araştırma sahasında rüzgar varlığının tahmini değeri ve yukarıda sıralanan kriterlere bulunulan cevaplar dikkate alınarak yatırımın teknik, ticari ve sosyo-kültürel olarak verimli olabileceği sonucuna varıldığında ilgili sahada rüzgar potansiyelinin belirlenmesine yönelik gerekli çalışmalara başlanmalıdır.

4.5.3 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

Bir sahanın rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi için öncelikle bölgenin alansal rüzgar atlası elde edilmelidir. Rüzgar atlasının temelini ise sağlıklı ve güvenilir enerji amaçlı rüzgar ölçümleri oluşturmaktadır. Yeterli sürede (en az bir yıl) rüzgar verileri elde edildikten sonra bu verilerin istatistiksel analizleri yapılmalıdır. Elde edilen istatistiksel sonuçlar umut verici bulunursa bölgenin alansal rüzgar atlasının hazırlanmasına başlanmalıdır (Çalışkan,2006).

4.5.3.1 Enerji Amaçlı Rüzgar Ölçümleri

Bir bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi için rüzgar varlığının ispatlandığı yerde gerçekçi rüzgar hız ve yön bilgilerine ihtiyaç duyulur. Bu amaçla, arazinin topografik yapısı, düşünülen santralin büyüklüğü gibi unsurlar dikkate alınarak belirlenen sahaya bir ve/veya birden fazla rüzgar enerjisi gözlem istasyonu (RGİ) kurulmalıdır. Rüzgar enerjisi gözlem istasyonları; genellikle 30 metre ve tercihen rüzgar türbini hub yüksekliğinde olan, gergi halatları ile zemine sabitlendirilmiş bir direk üzerine monte edilen belli sayılardaki ölçüm sensörleri ve ölçüm verilerinin kayıt edildiği sistemden (Data Logger) oluşmaktadır. RGİ'ndaki ölçüm direğinde teorik olarak tabloda verilen yüksekliklerde ilgili parametreler ölçülmektedir (Çalışkan,2006).

Çizelge 4.5 Ölçüm Yüksekliği ve Ölçülen Parametreler (EİE,2006)

Ölçüm Yüksekliği (m)	Ölçülen Parametreler
2	Işınım, Sıcaklık, Basınç
10	Rüzgar Hızı
20	Rüzgar Hızı
30	Rüzgar Hızı, Rüzgar Yönü

Rüzgar enerji santral planlaması yapılan sahada en az bir yıl süreyle sürekli olacak şekilde 10'ar dakikalık bazda enerji amaçlı rüzgar ölçümleri yapılmalı, elde edilen ölçüm değerleri varsa yakın civardaki başka ölçüm kayıtları ile karşılaştırılıp değerlendirilmelidir. Ölçüm periyodunun uzatılması ve mümkünse türbin hub yüksekliğinde yapılabilecek rüzgar ölçümleri rüzgar potansiyelinin daha sağlıklı belirlenmesini sağlayacaktır. Bu arada, rüzgar gözlem istasyonlarının kurulduğu noktalara ait 1/25 000 ölçekli harita üzerindeki UTM (Universal Transverse Mercator) ve derece-dakika cinsinden koordinatları ile birlikte deniz seviyesinden olan yüksekleri de tespit edilmelidir.

Rüzgar gözlem istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi hayati öneme sahiptir. Rüzgar gözlem istasyonunun kurulacağı nokta veya noktalar her şeyden önce o alanı temsil edebilecek bir yer olmalıdır. WMO (Dünya Meteoroloji Örgütü) standartlarına göre temsil mesafesi arazinin topografik yapısına bağlı olarak 500 m ile 100 km arasında değişmektedir. Ayrıca seçim yapılan nokta, topografik açıdan son derece uygun olmakla birlikte bu alanda engel sınıfına giren nesneler bulunabilir. Bu şekilde seçilmiş yerler amaca uygun olmamaktadır. Hakim

rüzgar yönüne göre tepe arkalarında kalan yerlerin seçimi tercih edilmemelidir. Bu durumda rüzgar hızı gerçek değerinden türbülanslar nedeniyle çok fazla uzaklaşabilir. Yapılan gözlemlerde, bu tip yanlış uygulamalar durumunda rüzgar hızının gerçek değerinden -%50 ile +%100 değerleri arasında, rüzgar yönünün de 150° kadar saptığı tespit edilmiştir. Ayrıca, rüzgar gözlem istasyonunun kurulacağı noktadaki rüzgar akışları daima birbirine paralel olmalı, bozulmuş rüzgar akışları ve türbülanslar bulunmamalıdır. Rüzgar verilerinden yola çıkarak hesaplanacak türbülans yoğunluğu değeri de %10-15'den büyük olmamalıdır. Enerji amaçlı rüzgar hız ve yön ölçümlerinde hassasiyetin %1'in altında olması istenmektedir. Zira, ölçümlerde yapılabilecek %10 oranında bir hata, enerji üretimine yaklaşık % 30'luk bir hata ve belirsizlik olarak yansır. Bu yüzden yer seçimi mutlaka bu konularda son derece deneyimli uzman personel tarafından yapılmalıdır (Çalışkan,2006).

4.5.3.2 RGİ'larına Yakın Çevresel Engeller

Rüzgar gözlem istasyonuna yakın çevresel engeller, ölçülen rüzgar hız ve yön değerlerini etkilemektedir. Binalar, ağaçlar gibi yakın çevresel engeller rüzgar hızını ve yönünü kayda değer ölçüde değiştirmekte, engel etrafında türbülansa neden olmakta ve rüzgar ölçüm verilerinin sağlıklı olmasını engellemektedir. Bu nedenle rüzgar gözlem istasyonlarının yeri, civarda fazla engel olmayacak şekilde seçilmelidir.

4.5.3.3 Arazi Yüzey Pürüzlülük Bilgileri

Arazi yüzey pürüzlülüğünün değişmesi yüzey sürtünme karakteristiklerini ve dolayısıyla hız profilini değiştirmektedir. Arazi üzerinde esen serbest rüzgarı tespit edebilmek için santral sahası ve çevresi üzerinde bulunan bitki örtüsü, küçük yükseklikler vb. için uygun pürüzlülük katsayıları belirlenerek sınıflandırılmalı ve sayısallaştırılmış harita üzerine işlenmelidir. Bir alanın yüzey pürüzlülüğü, bu alan üzerindeki pürüzlülük elemanlarının boyutları ve alan içindeki dağılımına bağlı olmaktadır. Karasal alanlar için bitki örtüleri, göller, yerleşim yerleri, doğal arazi yapıları tipik pürüzlülük elemanlarıdır (Çalışkan,2006).

4.5.3.4 Topografya Bilgileri

Topografya rüzgarın yönü, hızı ve dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsileleri, tepeler ve kayalıklar rüzgar profilini büyük ölçüde etkiler. Dağ silsilelerinin denize paralel, hakim rüzgar yönüne dik, orta eğimli (10°-22°) ve özellikle çıplak olduğu sahalar enerji üretimi için uygun sahalardır.

Zirvede rüzgar hızı, eğim ve dağ grubunun büyüklüğüne bağlı olarak artar. Bu nedenle, tepelerin hakim rüzgar yönüne göre üst-ön kısmı tesis için uygundur. Fakat tepenin üst-arka kısmı türbülans nedeniyle göz önüne alınmamalıdır.

4.5.3.5 Alansal Rüzgar Atlas İstatistiklerinin Hesaplanması

RGİ’nden elde edilen noktasal rüzgar hız ve yön verileri, istasyon etrafındaki yakın çevresel engeller, arazi yüzey pürüzlülüğü ve topografya bilgilerinin birlikte değerlendirilmesiyle çalışma alanının rüzgar atlası elde edilir.

Rüzgar atlası istatistiksel bilgileri ile ölçüm seviyesinden daha yüksekteki seviyeler için enerji yoğunlukları hesaplanabilmekte ve teknik özellikleri belirlenen rüzgar türbinleri için enerji üretim miktarları hesaplanabilmektedir. Ayrıca, yakın çevresel engellerin, arazi yüzey pürüzlülüğünün ve topografyanın rüzgar enerjisi gözlem istasyonlarında ölçülen rüzgar hız ve yön değerleri üzerindeki sektörel etkilerinden yola çıkarak optimum türbin hub yüksekliği tespit edilebilmekte ve ortalama rüzgar hızları ile ortalama enerji yoğunluklarının yükseklikle değişim miktarı hesaplanabilmektedir (Çalışkan,2006).

4.5.4 Alansal Enerji Yoğunluk Dağılımı

Bir rüzgar enerji santralının enerji üretim miktarının tespiti amacıyla, hesaplanan bölgesel rüzgar atlas bilgilerinden yola çıkarak, belirlenen bir yükseklik için alansal enerji yoğunluklarının verildiği renk dağılımlı harita elde edilir. Renk dağılımlı haritanın elde edilmesi amacıyla ilgili sahanın sınırları tespit edilir ve belli bir çözünürlükte, koordinat bazında istenilen yüksekliklerde enerji yoğunlukları hesaplanır.

Rüzgar türbini kurulabilecek koordinatlar (noktalar) alansal enerji yoğunluk dağılımının verildiği haritalar yardımıyla kabaca tespit edilir. Bu tespitten sonra bizzat santral kurulması düşünülen sahaya gidilerek belirlenen yerlerin fiziksel ve teknik açılardan uygunluğuna bakılır. Koordinat tespitinde, santral sahasında birden fazla rüzgar türbini kurulacaksa türbinlerin birbirleri ile olacak etkileşimi (wake effect) de dikkate alınır.

4.5.5 Rüzgar Türbini Seçimi

Rüzgar kaynağından elektrik enerjisi üretim miktarının belirlenmesi için ölçülen rüzgar verileri dikkate alınarak bölgenin rüzgar rejimi (rüzgar esme sıklığı, weibull parametreleri vb) belirlenir ve belirlenen rüzgar rejimi için en uygun rüzgar türbin güç kapasitesi tespit edilir. Seçilen rüzgar türbin modeline ait teknik değerler ve güç eğrisi imalatçı firmadan sağlanır.

Rüzgar enerjisi sektöründe ticari ortama girmiş birçok model ve kapasitede rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Rüzgar enerjisi yatırımcısı satış fiyatı, teknik özellikler, verim, garanti, türbin referansları ve özellikle bölgenin rüzgar rejimi gibi kriterleri dikkate alarak en uygun rüzgar türbinini seçmelidir (Çalışkan,2006).

4.5.6 Alansal Enerji Üretim Miktarının Tespiti

Alansal enerji yoğunluk dağılımının elde edilmesinde izlenen yolun aynısı izlenerek ve seçilen rüzgar türbini güç eğrisi kullanılarak santral sahası içinde seçilen grid noktalarında üretilecek brüt yıllık enerji miktarı hesaplanır ve alansal enerji üretim miktarının verildiği renk dağılımlı harita elde edilir.

4.5.7 Rüzgar Enerji Santrallerinin Tasarımı ve Enerji Üretim Miktarının Hesaplanması

Rüzgar türbinlerinin kurulacağı noktalar (koordinatlar), alansal enerji yoğunluğu ve yıllık brüt enerji üretiminin verildiği renk dağılımlı haritalar yardımıyla kabaca tespit edildikten sonra santral sahasına gidilip belirlenen noktalara rüzgar türbini kurmak için fiziksel engellerin olup olmadığı araştırılmalıdır. Bu arada, birden fazla rüzgar türbininin kurulması düşünülüyorsa bu türbinlerin birbirleriyle olan etkileşimi de dikkate alınmalı ve nihai noktalar (koordinatlar) belirlenmelidir. Rüzgar türbinlerinin kurulacağı kesin noktalar, rüzgar atlas bilgileri, rüzgar türbini güç eğrisi ve türbin hub yüksekliği verileri birlikte kullanılarak her bir türbinin ve santralin üreteceği enerji miktarları hesap edilir.

Rüzgar enerji santralı tasarlandıktan sonra her bir rüzgar türbininin ve rüzgar santralının toplam enerji üretim miktarları hesaplanır. Rüzgar türbinlerinin kurulduğu yerleri (koordinatları) üzerinde yapılacak küçük oynamalarla enerji üretim miktarları optimize edilerek maksimum enerji eldesi sağlanabilir (Çalışkan,2006).

5. BULANIK ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ

İnsanoğlu var oluşundan bu yana karar verme sorunu ile karşı karşıyadır. Ancak, insanlar, genellikle, karar verme aşamasında, mevcut olan karar verme metotlarından yararlanmaktan kaçınırlar. Bunun nedeni; insanların, kendi değer sistemlerini ve ne istediklerini tam olarak bildiklerine inanmaları; başka birinin kendilerine ait düşünceleri düzenleyip karar vermelerine yardımcı olacağına inanmamalarıdır. Buna karşın; yapılan araştırmalar, insanoğlunun beyin kapasitesinin, karmaşık kararların etkin ve sezgisel bir şekilde sentezini gerçekleştirmeye yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. İnsanların bu tarz yaklaşımından hareketle, Saaty tarafından ortaya atılan analitik hiyerarşi yöntemi, kişileri nasıl karar vermeleri konusunda bir yöntem kullanmaya zorunlu kılmak yerine; onlara kendi karar verme mekanizmalarını tanıma olanağı sağlayıp; bu şekilde daha iyi kararlar vermelerini amaçlamaktadır (Kandakoğlu,2006).

5.1 Analitik Hiyerarşi Prosesi

Analitik hiyerarşi prosesi, insanoğlunun hiçbir şekilde kendisine öğretilmeyen fakat var oluşundan bu yana karar verme sorunu ile karşılaştığında içgüdüsel olarak benimsediği karar mekanizmasıdır (Özdemir, 2002).

Bugüne kadar kişilerin karar verme sürecine yardımcı olabilmek için çok ölçütlü karar verme yöntemleri geliştirilmiştir. Thomas Saaty tarafından 1970’li yıllarda geliştirilen analitik hiyerarşi prosesinde, karar vericinin amacı doğrultusunda kriterler ve ona ait alt kriterler ve alternatiflerden oluşan hiyerarşik bir model kullanılır. Bu hiyerarşik model karar vericinin bilgisinin, deneyiminin, düşüncelerinin ve önsezilerinin mantıksal bir şekilde birleştirildiği, sağlıklı karar vermesine yardımcı olabilecek güçlü bir yöntemdir (Kuruüzüm vd., 2001).

Başka bir deyişle analitik hiyerarşi prosesi hem objektif hem de sübjektif değerlendirme kriterlerini dikkate alabilen ve yaygın olarak kullanılan bir çok kriterli karar verme tekniğidir. Anlaşılmasının çok kolay olması ve basit matematik hesaplamaları içermesi sebebiyle, AHP oldukça büyük bir ilgi görmüş ve gerçek hayatta birçok alanda kullanılmıştır (Çanlı vd., 2007).

5.2 Bulanık Mantık

1965 yılında Lütü (Lotfi) Asker Zade (Zadeh) tarafından ortaya atılan bulanık küme, mantık ve sistem kavramları bu araştırmacının uzun yıllar boyunca kontrol altında çalışması; istediği kontrolü elde edebilmesi için fazlaca doğrusal olmayan denklemlerin işin içine girmesi;

yöntemin karmaşıklaşması ve çözümün zorlaşması neticesinde ortaya çıkmıştır (Şen, 2004).

Bulanık mantık, klasik mantığın aksine iki seviyeli değil, çok seviyeli işlemleri kullanmaktadır. Bulanık mantık yaklaşımı, makineler insanları özel verilerini işleyebilme ve onların deneyimlerinden ve önsezilerinden yararlanarak çalışabilme yeteneği verir. Bu yeteneği kazandırırken sayısal ifadeler yerine sözel ifadeler kullanır. İşte bu sözel ifadelerin makineler aktarılması matematiksel bir temele dayanır (Klir vd., 1994).

Bulanık mantığın en geçerli olduğu iki durumdan ilki, incelenen olayın çok karmaşık olması ve bununla ilgili yeterli bilginin bulunmaması durumunda kişilerin görüş ve değer yargılarına yer verilmesi, ikincisi ise insan muhakemesine, kavrayışlarına ve karar vermesine ihtiyaç gösteren hallerdir (Şen, 2004).

5.3 Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi

Geleneksel çoklu kriterli karar verme yöntemlerinde kriter ve alternatiflerin nihai değerlendirilmesi gerçek sayılarla ifade edilir ve alternatif, kriterleri tümüyle tatmin eder veya etmez klasik mantığıyla karar verme gerçekleşir. Ama gerçek hayatın karmaşıklığından ve insanoğlunun algılama kapasitesinin sınırlı olmasından, kesin olarak kavrayamadığımız çok sayıda çeşitli nesneler vardır ki bunlar sadece subjektif görüşlerle değerlendirilebilir. Böyle karmaşık nesnelere ilişkin karar vermenin üstesinden gelmek için nesneyi nitelendiren genel özellik (örneğin güzellik) bulanık (fuzzy) özellik olarak ele alınır ve bu özellik her biri bir kriter karşılık gelmek üzere özellikler yığını ile tanımlanır, bu konuda Saaty de 1978 yılında çeşitli çalışmalar yapmıştır. Böylece, karar verici alternatifleri oluştururken kişisel görüşlerine dayanarak belirsizlik içeren dilsel değerler kullanır ki bunlar da bulanık kümelerle temsil edilebilir. Karar verici tarafından kriterlerin birbirine göre ikili mukayeselerinden ve alternatiflerin mevcut kriterlere göre tümüyle objektif değerlendirilmesinden sonra birtakım metot ile sonuca ulaşılır (Kahraman vd.,2003).

AHP hem objektif hem de subjektif değerlendirme kriterlerini dikkate alabilen ve yaygın olarak kullanılan birçok kriterli karar verme tekniğidir. Ancak, AHP yönteminde, 1 ile 9 arasında numaralandırılmış ölçeklerin kullanımının basit olmasına rağmen bir takım tutarsızlıklar bulunmaktadır. Ayrıca, karar vericiler genel olarak aralıklı karar vermeyi sabit değerli karar vermeye göre daha rahat bulmaktadır. Dolayısıyla, bu yöntem, karar vericinin kararları ile belirsizliğin açıklanması ve sayılara dökülmesi konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden, insani düşünme şeklini yansıtmak amacıyla Bulanık AHP geliştirilmiştir (Çanlı

vd., 2007).

Farklı yazarlar tarafından hazırlanmış birçok bulanık AHP metodu vardır. Bu metotlar alternatif seçiminde ve problemleri doğrulamada hiyerarşik yapı analizleri ve bulanık grup teorisi konseptini kullanan sistematik yaklaşımlardır. Karar veren kişiler genellikle, aralık hükmünü esas almanın sabit değer hükümlerine göre daha güvenilir sonuçlar doğurduğunu bulmuşlardır. Çünkü eşleştirme sürecinin bulanık doğasından dolayı genellikle tercihlerin açığa kavuşmasında güçlük yaşanmaktadır (Kahraman vd.,2003).

Bulanık AHP konusundaki ilk çalışma, üçgensel üyelik fonksiyonları yoluyla açıklanan bulanık oranları mukayese eden Van Laarhoven ve Pedrycz (1983) çalışması olmuştur. Buckley (1985) ikizkenar yamuk şeklindeki üyelik fonksiyonlarının kıyaslama oranlarının bulanık önceliklerini belirlemiştir ve karşılaştırma oranlarının bulanık önceliklerini trapezoidal üyelik fonksiyonu ile belirlemiştir. Stam et. al. (1996) AHP’de tercih değerlerini belirlemede ya da değerlere yaklaştırmada yapay zekanın son zamanlarda ne kadar geliştiğini keşfetmiştir. Chang (1996) bulanık AHP’nin ele alınmasında ikili eşleştirmeler için üçgensel bulanık sayıları ve ikili karşılaştırmaların suni boyut değerleri için boyut analizi metodunu kullanmasıyla yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur. Cheng (1997) üyelik fonksiyonunun değer sınıfına dayanan bulanık AHP ile deniz kuvvetleri taktiksel misil sistemleri değerlendirilmesi için yeni bir algoritma öne sürmüştür. Weck et. al. (1997) klasik AHP’ye bulanık mantığın matematiğini katarak farklı üretim çevrim alternatifleri değerlendirmek için bir metot ortaya koymuştur. Kahraman et. al. (1998) bulanık ağırlıklı değerlendirmede ve AHP’nin ağırlıklarının elde etmede bulanık objektif ve sübjektif metodu kullanmıştır. Deng (1999) kalitatif çok ölçütlü analiz problemlerini basit ve şeffaf şekilde ele alırken bir bulanık yaklaşımı sunmuştur. Lee et. al. (1999) AHP’nin ardındaki temel düşünceleri gözden geçirmiştir. Bu düşüncelere dayanarak, araştırmacılar karşılaştırma aralıkları kavramını ortaya çıkarmış ve bulanıklığı kıyaslama prosesine uydurmak ve global tutarlılığı başarmak için stokastik optimizasyona dayanan bir metodoloji öne sürmüşlerdir. Zhu et. al. (1999) boyut analizi metodu ve bulanık AHP’nin uygulamaları üzerinde bir değerlendirme yapmıştır. Chan et. al. (2000a) bulanık çerçevede soyut ve somut yararları sayısallaştıran bir teknoloji seçimi algoritması sunmuştur. AHP ve ekonomik değerlendirmeler için bulanık grup teorisinin bir uygulamasını tanımlamışlardır. Hiyerarşiyi izleyerek, bulanık uygun indeksi olarak adlandırılan her bir alternatif teknolojinin tercihsel ağırlıkları bulunmuştur. Teknolojilerin bulanık uygun indisleri daha sonra dereceleri değerlendirilmiş ve teknolojilerin tercihsel dereceli düzenleri bulunmuştur. Ekonomik değerlendirme perspektifinden bir bulanık nakit

akış analizi çalıştırılmıştır. Chan et. al. (2000b) simülasyon ve MCDM teknikleri kullanan FMS'in otomatik dizaynı için entegre bir yaklaşım rapor etmiştir. Tasarının prosesi, yapıyı ve simülasyon metotları kullanılarak alternatif tasarımları meydana getirmektedir. En uygun tasarım seçimi (AHP'ye dayanarak) FMS simülasyon modelinden çıktıları analiz etmek için kullanılmıştır. Zeka araçları (örneğin uzman sistemler, bulanık sistemler ve sinir ağları) FMS tasarımını desteklemek için geliştirilmiştir. Active X tekniği FMS otomatik tasarım prosesinin yeni entegrasyonu için ve zeki karar destek prosesleri için kullanılmıştır. Leung ve Cao (2000) bir bulanık tutarlılık tanımını tolerans sapmasını hesaba katarak sunmuştur. Temel olarak, ilişkili önemlerin (kesin tolerans değerlerine izin veren) bulanık oranları, lokal önceliklerinin üyelik değerleri üzerindeki kısıtlar olarak formüle edilmiştir. Bulanık lokal ve global ağırlıkları genişletme prensipleri yoluyla belirlenmiştir. Alternatifler maksimum-minimum küme derecelendirme metoduyla global ağırlıklar temelinde değerlendirilmiştir. Kuo et. al. (2002) yeni uygun bir depoya yerleştirme için bir karar destek sistemi geliştirmiştir. Öne sürülen sistemin ilk bileşeni bulanık analitik prosesi için hiyerarşik yapı geliştirme olmuştur (Kahraman vd.,2003).

Bulanık AHP metodunda hem kriterlerin hem de alternatiflerin sonlu sayıda olduğu kabul edilmektedir.

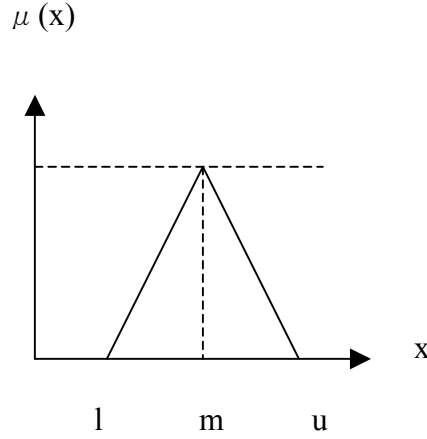
$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \text{ ve } C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$$

Bulanık mantık ile AHP metodunun kombine edilmesi sonucu daha gerçeğe uygun ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu en temel sebep olarak gösterilebilir. Bu yaklaşım, insan karar alma işleminin yapısındaki kararsızlık ve belirsizliği yeterince idare edebilmekte ve karar alıcı için sonuç problemini anlamakta esneklik ve sağlamlık sağlamaktadır.

Biz çalışmamızda Chang'ın yaklaşımına göre bulanık AHP metodunu rüzgar enerjisi santrali kurulum yeri için uygun alternatifleri değerlendirmede kullanacağız. Bu sebeple bu konunun devamında Chang'ın yaklaşımı üzerinde duracağız.

5.4 Üçgen Bulanık Sayılar

Bir üçgen bulanık sayı (triangular fuzzy number – TFN) $(l | m, m | u)$ veya (l, m, u) şeklinde gösterilir. Bir bulanık olay için l , m ve u parametreleri, sırasıyla mümkün en küçük değeri, en çok beklenen değeri ve mümkün en büyük değeri temsil eder. Şekil 5.1'de örnek olarak bir bulanık üçgen sayı verilmiştir (Çanlı vd., 2007).



Şekil 5.1 (l, m, u) Bulanık Üçgen Sayısı

Her üçgen bulanık sayının lineer gösterimleri sol ve sağ taraf şeklinde aşağıdaki üyelik fonksiyonu ile tanımlanabilir (Çanlı vd., 2007):

$$\mu(x|\tilde{M}) = \begin{cases} 0, & x < l, \\ (x-l)/(m-l), & l \leq x \leq m, \\ (u-x)/(u-m), & m \leq x \leq u, \\ 0, & x > u. \end{cases} \quad (5.1)$$

5.5 Bulanık AHP Algoritması

Farklı yazarlar tarafından hazırlanmış birçok bulanık AHP metodu vardır. Bu metotlar alternatif seçiminde ve problemleri doğrulamada hiyerarşik yapı analizleri ve bulanık grup teorisi konseptini kullanan sistematik yaklaşımlardır (Kahraman vd.,2003).

Geleneksel Bulanık AHP yöntemleri yorucu aritmetik hesaplamaları kullanarak operasyonlardaki bulanık değerlerle ilgilenmektedir. Ayrıca, bu yöntemlerin bir diğer dezavantajı da kesin bir sonuca ulaşmak için fazladan durulaştırma işlemine ihtiyaç duyulmasıdır. Chang'ın yaklaşımında ise, bulanık sayıların kesişimi yöntemiyle hesaplamalar yapıldığı için, yukarıda bahsedilen dezavantajlar geçerli değildir (Çanlı vd., 2007).

Aşağıda bu çalışmada kullandığım, bulanık analitik hiyerarşi prosesi Chang'ın yaklaşımı esas alınarak detaylı olarak anlatılmıştır:

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ bir nesne kümesi ve $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ de bir hedef kümesi olsun. Chang'ın genişletilmiş analiz yöntemine göre, her bir nesne ele alınarak her hedef için g_i değerleri sırasıyla oluşturulur. Böylece, her bir nesne için m genişletilmiş analiz değerleri aşağıdaki şekilde elde edilebilir (Erensal vd.,2005):

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, i = 1, 2, \dots, n \quad (5.2)$$

Burada, tüm $M_{g_i}^j (1, 2, \dots, m)$ değerleri parametreleri 1, m ve u olan üçgen bulanık sayıdır (Kahraman vd., 2003).

Chang'in genişletilmiş analizinin adımları aşağıda gibi verilebilir (Kahraman vd., 2003):

Adım 1:

Bulanık yapay büyüklük değeri, i. nesneye göre şöyle tanımlanır:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (5.3)$$

$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$ ifadesini elde etmek için, m değerleri üzerinde bulanık toplama işlemini belirli bir matris için aşağıdaki gibi gerçekleştirmek ,

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (5.4)$$

Ve $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1}$ ifadesini elde etmek için $M_{g_i}^j (1, 2, \dots, m)$ değerleri üzerinde bulanık toplama işlemini yapmak ,

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (5.5)$$

ve daha sonra 5.5 denklemindeki vektörün tersini hesaplamak gerekir (Kahraman vd., 2003).

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (5.6)$$

Adım 2:

$M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ ifadesinin olasılık derecesi şu şekilde tanımlanır:

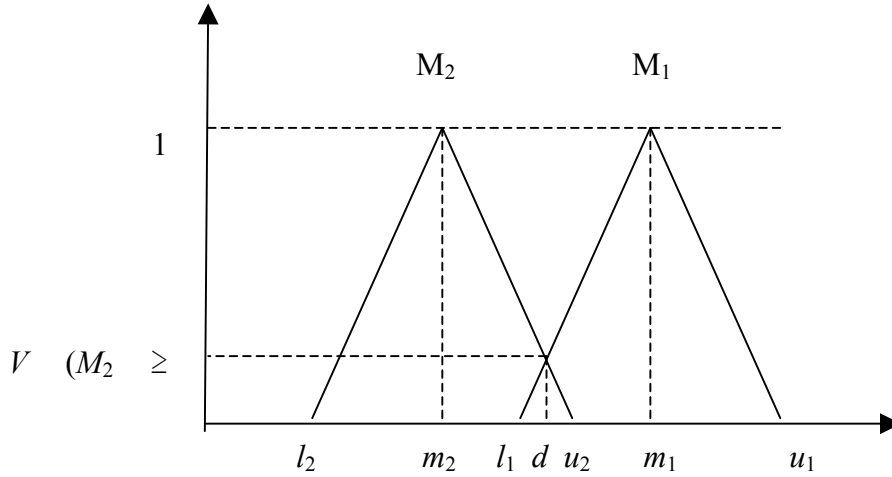
$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} \left[\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y)) \right] \quad (5.7)$$

veya diğer bir ifade ile

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{eğer } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2)(m_1 - l_1)}, & \text{diğer hallerde.} \end{cases} \quad (5.8)$$

Burada d , Şekilde gösterildiği gibi μ_{M_1} ve μ_{M_2} arasındaki en yüksek kesişim noktası olan D 'nin ordinatıdır.

M_1 ve M_2 'yi karşılaştırmak için, $V(M_1 \geq M_2)$ ve $V(M_2 \geq M_1)$ değerlerinin her ikisine de ihtiyaç duyulur (Kahraman vd., 2003).



Şekil 5.2 M_1 ve M_2 Arasındaki Kesişme (Kahraman vd., 2003)

Adım 3:

Konveks bir bulanık sayının olasılık derecesinin k konveks bulanık sayıdan M_i ($i=1,2,\dots,k$) daha büyük olması şu şekilde tanımlanabilir:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ ve } (M \geq M_2) \text{ ve } (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i), i=1,2,\dots,k \quad (5.9)$$

Burada, $k=1,2,\dots,n; k \neq i$ için,

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad (5.10)$$

olduğu düşünülürse ağırlık vektörü şu şekilde bulunur:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (5.11)$$

Burada, A_i ($i = 1, 2, \dots, n$)n elemandan oluşur (Kahraman vd., 2003).

Adım 4:

Normalize edilmiş ağırlık vektörleri

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (5.12)$$

olarak bulunur. Burada, W ağırlık vektörü bulanık bir sayı değildir (Kahraman vd., 2003).

Yukarıda anlatılan Bulanık AHP algoritmasındaki ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması için kullanılan ölçek Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 İkili Karşılaştırmalarda Kullanılan Ölçek (Çanlı vd., 2007)

Dilsel İfade	Bulanık Üçgen Sayılar	
	Sayı	Eşleniği
Eşit derecede önemli	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Biraz daha fazla önemli	(2/3, 1, 3/2)	(2/3, 1, 3/2)
Kuvvetli derecede önemli	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Çok kuvvetli derecede önemli	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)
Tamamıyla önemli	(7/2, 4, 9/2)	(2/9, 1/4, 2/7)

6. BULANIK ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ KULLANILARAK RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ YERİ SEÇİMİ

Gelişen teknoloji ve artan enerji açığı bütün ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de yeni enerji kaynakları üzerinde daha fazla düşünülmesini ve hızlı bir şekilde alternatiflerin üretilmesini gerekli hale getirmiştir. Fosil yakıtların bir gün tükeneceği, nükleer enerjinin de halen tartışılan ve olumsuzluklarına net, mantıklı, herkesin şüphelerini giderecek yanıtlar verilemediği düşünülürse yenilenebilir, çevreyle uyumlu güneş, rüzgar, dalga vb. enerjilerin hem dünyamız hem de bizler için çözümler sunacağı görülmektedir [11].

Ülkemizde bulunan büyük potansiyelinden henüz tam verim alarak kullanamadığımız rüzgar enerjisi bu konuda ön plana çıkan bir başlık olmaktadır. Bu sebeple araştırmalar kurulu olan sınırlı kapasiteyi arttırmanın haricinde kurulu kapasitenin tam verimle çalışması üzerine de yapılmaktadır. Tam verim de günümüz şartları için gelişmiş teknolojinin yanında iyi incelenen ve hesaplarının, mikro konuşlandırmalarının detaylı ve dikkatlice yapıldığı bir araştırma aşamasıyla sağlanmaktadır.

Tesis yerinin seçilmesinde bir çok etmenin inceleniyor olması ve bu etmenlerin genel üzerine olan etkilerinin de hesaba katılması hem verimi arttıracak hem de günümüz koşullarında firmalar için en önemli başlıklardan biri olan maliyetin düşürülerek yatırımın sağlıklı yapılmasını sağlayacaktır. Yatırım öncesi yapılan hesaplamalarda ki %10'luk bir hatanın kurulum ve çalışma esnasında oluşturacağı kaybın %30 oranında olması da bu konunun önemini bir kez daha ön plana çıkarmaktadır (EİE,2006).

Bu çalışma kapsamında öncelikle, rüzgar enerjisi 3. ve 4. bölümlerde ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve rüzgar enerji santrali kurulumu için hangi yerin seçileceğine, sözel ifadeleri göz önünde bulundurarak insani düşünme şeklini yansıtan ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayan Bulanık AHP yöntemi kullanılarak karar verilmiştir. Burada hesaplamalar yapılırken, yorucu aritmetik hesaplamaları kullanan Geleneksel Bulanık AHP yöntemlerinin dezavantajlarının geçerli olmadığı ve hesaplamaların bulanık sayıların kesişimi yöntemiyle yapıldığı “Chang’in Bulanık AHP Algoritması” esas alınmıştır.

Uygulamada kullanılan kriterler ve alternatifler ile bunlar arasındaki ilişkiler konuyla ilgili uzmanların bilgi ve tecrübeleri ile literatürde yer alan çalışmalardan faydalanılarak oluşturulmuştur. Özellikle rüzgar enerjisi konusunda da araştırmalar yapan uzmanlaşmış EİE ve Bilgin Enerji Yatırım Holding çalışanlarından alınan bilgiler ışığında, daha önce kurulan RES ve kurulması düşünülen RES'ler göz önüne alınarak yapılan değerlendirmeler, kriterlerin

seçiminde esas olmuştur. İkili karşılaştırma matrisleri Çizelge 5.1’de verilen ölçeğe göre, uzmanlardan alınan görüşlere göre oluşturulmuştur.

6.1 Kriterler ve Alt Kriterler ile Alternatiflerin Belirlenmesi ve Hiyerarşik Yapının Oluşturulması

Daha önce de belirtildiği gibi kriterlerin ve alt kriterlerin belirlenmesinde uzman kişilerden alınan fikirlerin ve bilgilerin yanı sıra Mustafa Çalışkan’ın RES için ön etüt ve kaynak belirleme çalışmalarından da yararlanılmıştır. Bu şekilde; potansiyel, teknik, sosyal etkenler, ulaşım ve maliyet olmak üzere 5 ana kriter belirlenmiştir.

Daha sonra her bir ana kriter için, yine uzmanların bilgi ve tecrübelerinden faydalanarak alt kriterler oluşturulmuştur. Bu alt kriterler aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır:

Potansiyel (P): Bu ana kriter rüzgarın o bölgede ne kadar olduğunu belirleyen alt kriterleri içerir. Bu başlık altında rüzgar hızı, rüzgar yoğunluğu, hakim rüzgar yönü, çevresel engeller ve kapasite faktörü gibi alt kriterler bulunmaktadır. Santralin kurulabilmesi için çevresel engeller harici alt kriterlerin yüksek olması istenir. Potansiyel santral kurulumu için belirleyici bir unsurdur.

- **Rüzgar Hızı (RH):** Rüzgar hızı, EİE tarafından hazırlanan rüzgar enerjisi potansiyel atlasındaki uzun dönem verileri ve tesis yeri alternatiflerini seçtikten sonra en az bir senelik kısa dönem verileri incelenerek belirli istatistik değerlerine ulaşarak değerlendirilir. 5 m/s değerinin altındaki rüzgar hızı değerleri verimli sayılmamaktadır.
- **Rüzgar Yoğunluğu (RY):** Rüzgar yoğunluğu bir bölge için m^2 ’deki üretilebilecek enerji miktarının ifadesidir. Kısaca m^2 başına düşen enerji miktarıdır.
- **Hakim Rüzgar Yönü (HRY):** Santralde, kurulu her bir türbin rüzgarı ve içerisindeki enerjiyi aldıktan sonra, arkasındaki türbine göndereceği rüzgarı ve enerjisini azaltmaktadır. Bu nedenle ideal olarak türbinleri olabildiğince hakim rüzgar yönüne göre yerleştirmek gerekir. Hakim enerji yönünün belirgin olduğu sitelerde, türbinler birbirine yakın kurularak hem arazi kullanım oranı düşürülür, hem de şebekeye bağlanma ve park yolu masrafları azaltılmaktadır.
- **Çevresel Engeller (ÇE):** Binalar, ağaçlar gibi yakın çevresel engeller rüzgar hızını ve yönünü kayda değer ölçüde değiştirmekte, engel etrafında türbülansa neden

olmaktadır. Bu gibi yerlere kurulacak tesisler hem verim açısından düşük seviyede kalır hem de türbin ömürleri bu etki ile daha kısa olur. Bu sebeple türbülans oluşturacak engellerin olduğu bölgelere rüzgar enerji santrali kurmaktan kaçınılır.

- **Kapasite Faktörü (KF):** $KF = \text{Türbinin yıllık enerji üretim miktarı} / \text{Türbin tarafından nominal güçte yılda üretilecek teorik enerji miktarı}$ formülünden elde edilir. KF, kuramsal olarak 0-100 arası değerler alabilir. Ancak bu değerler, pratikte 20-70 arasında değişmektedir. En çok gerçekleşen KF değeri, 25-40 arasındaki değerlerdir.

Teknik: Bu kriterde tesisin seçilecek yere kurulması için dikkat edilecek deprem kuşağı, altyapı durumu ve ormanlık alan gibi alt kriterleri içinde bulunduran teknik konular incelenir. Teknik kriterinin seçilmesinin sebebi teknik açıdan tesisin kurulumunun mümkün olup olmadığını belirlemektir.

- **Deprem Kuşağı (DK):** Teknolojinin gelişmesi ile rüzgardan daha fazla verim almak adına kule yüksekliklerinin giderek artması bu konudaki dayanıklılık ve dayanım değerlerinin de artmasını gerektirmiştir. Deprem kuşağında olan bir yapının temel hesapları bu konu göz önüne alınarak yapıldığından bu başlığın bir alt kriter olarak alınmasına gerek duyulmuştur.
- **Altyapı Durumu (AD):** Trafo merkezleri ve elektrik iletim şebekelerinin belirli kapasitelerinin olması bazen rüzgar enerji santrallerinin kurulumunda belirleyici etken olabilmektedir. Bir şebekeye bağlanabilecek maksimum gücü aşan değerler için de EPDK tarafından lisans verilmemektedir.
- **Ormanlık Alan (OA):** Ormanlık alan yüksek ağaçların engel statüsüne girmesinden ötürü hem ölçümleri etkilediğinden hem de belirli ormanlık arazilerin koruma altında olmasından ve tesis kurulumuna izin verilmemesinden ötürü önemli bir alt kriter olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sosyal Etkenler: Asker ve sivil radar tesislerine uzaklık, doğal yaşam ve ekolojik denge, hava alanına olan uzaklık, yerleşim birimlerine uzaklık, tarihi-turistik alana uzaklık gibi alt kriterlerin incelendiği sosyal etkenler, tesislerin kurulum yerinin etraftakileri nasıl etkilediği açısından önem taşımaktadır.

- **Askeri ve Sivil Radar Tesislerine Olan Uzaklık (RTU):** RED sistemlerinin dönen kanatları elektromanyetik iletişim cihazlarında girişime neden olabilir. Rüzgar enerji dönüşüm sistemleri (RED) dönen kanatları radarlar gibi elektromanyetik iletişim

cihazlarının kullanımında girişime neden olabilir.

- ***Doğal Yaşam ve Ekolojik Denge (DYED):*** Rüzgar türbinlerinin işletimi kuşlara zarar verebilir. Bu zarar kule veya kanatlarla çarpışma sonucu kuşların ölmesi veya türbinler çevresindeki kuş dinlenme veya beslenme yerlerinin bozulması olarak iki şekildedir. Sadece kuşlar için değil diğer bitki ve hayvan türlerinin ve onların su sistemlerinin kompleks yapısının parçalanması için de endişeler vardır. Her bir bölgenin ekolojik önemi rüzgar tarla gelişiminden olumsuz etkilenir. Bu nedenle rüzgar tarlaları çevresel olarak hassas bölgelerin dışına kurulmaya çalışılmaktadır.
- ***Hava Alanına Olan Uzaklık (HAU):*** RED sistemlerinin dönen kanatları elektromanyetik iletişim cihazlarında girişime neden olabileceğinden hava alanına yakın yerlere santral kurulması da pek istenen bir durum değildir.
- ***Yerleşim Birimlerine Uzaklık (YBU):*** Rüzgar enerji dönüşüm sistemleri (RED) dönen kanatları radyo, televizyon, uydu servisleri, gibi elektromanyetik iletişim cihazlarının kullanımında da girişime neden olabilir. Ayrıca yerleşim yerlerinin çok yakınına kurulan rüzgar enerjisi santralleri insanlar tarafından da çok istenmemektedir.
- ***Tarihi-Turistik Alana Uzaklık (TTAU):*** Tarihi alanların devlet tarafından koruma altında olması ve bu yerlere bu tarihi yapıları bozacak bir yatırımın yapılmasına izin verilmemesi günümüzde gelişmiş teknolojisi ile bu yapıya aykırı bir görüntü oluşturan rüzgar türbinlerini kurulum yeri açısından sınırlandırmaktadır. Bu başlıklardaki diğer alt kriterlerin benzeri şekilde turistik alanlarda da böyle tesislerin kurulması istenmemektedir.

Ulaşım: Bu kriter tesis yerine ulaşım konusundaki alt kriterler olan trafo merkezlerine uzaklık, elektrik ihtiyacı olan merkezlere uzaklık ve sahaya yakın karayolu uzaklığı başlıklarını içerir. Bu başlıklar altında incelenen ulaşım faktörü tesisin kurulumunda ve üretilen elektriğin iletiminde önem taşır.

- ***Trafo Merkezlerine Uzaklık (TMU):*** Trafo merkezine olan uzaklık şebekeye bağlantı açısından yapılacak iletim ve taşıma konularını etkileyeceğinden önemli bir alt kriterdir. İletim ve taşımanın uzun olması kayıplardan ötürü istenmeyen bir durumdur.
- ***Elektrik İhtiyacı Olan Merkezlere Uzaklık (EİMU):*** Bazı bölgeler için günümüz gelişmiş teknolojisi ve bu yerde kurulacak santralin yüksek kapasitesinden ötürü kurulan yerin elektrik ihtiyacından fazlasını karşılayabilecek durumlar

oluşabilmektedir. Böyle durumlar için santralin kurulacağı yerin yakınındaki elektrik ihtiyacı olan merkezler önem kazanmaktadır.

- **Sahaya Yakın Karayolu Uzaklığı (SYKU):** Ulaşılamayan bir yere tesis kurmak, kurulum aşamasından işletme ve bakım aşamasına kadar efektif olmayacağından rüzgar enerjisi santrallerine ulaşım önemli bir konudur. Kurulacak sahaya yakın karayolu belirli bir yere kadar ise şirketin bu karayolunu sahaya bağlayan yol için de yatırım yapması gerekebilmektedir.

Maliyet: Kurulacak olan tesisin her maliyet unsuru bu başlık altındadır. Kurulum maliyeti, arazi maliyeti ve işletme - bakım maliyeti olmak üzere üç alt kriteri bünyesinde bulundurur. Maliyet unsuru şirketler açısından önemli bir faktör olmasından ötürü bu araştırmaya dahil edilmiştir.

- **Kurulum Maliyeti (KM):** Bilindiği üzere rüzgar enerjisi santrali kurulumu için ilk yatırım miktarları yüksektir. Maliyet kalemleri arasında en büyük payı bu sebeple kurulum maliyeti almaktadır. Türbin sayısı ve kapasitesi değişken olabileceğinden bu araştırmada kurulum maliyeti MW başına dikkate alınmıştır.
- **Arazi Maliyeti (AM):** Arazi maliyeti çeşitli şekillerde çözülebilen bir konudur. Türbin mikro konuşlandırması ile genellikle arazinin %1-2'lik kısmı kullanıldığından arazi yapısının uygunluğuna göre sadece bu yerler yada tüm arazi ulaşım için satın alınabilir.
- **İşletme ve Bakım Maliyeti (İBM):** İşletme ve bakım maliyetleri türbinlerin yaşına ve kurulu alandaki türbinlerin ömürlerini etkileyen etmenlere göre değişir. Ayrıca kurulu sistemdeki bir arızanın düzeltilmesi esnasındaki enerji üretimindeki azalma da işletme ve bakım maliyetlerine etki etmektedir. Çalışan kişiler, alınan danışmanlık hizmetleri de işletme giderleri açısından bu alt kriteri etkiler.

Yukarıda açıklanan kriterler göz önüne alınarak birbirleriyle karşılaştırılacak olan alternatifler, Marmara ve Ege bölgelerinden seçilen aşağıdaki yerlerdir:

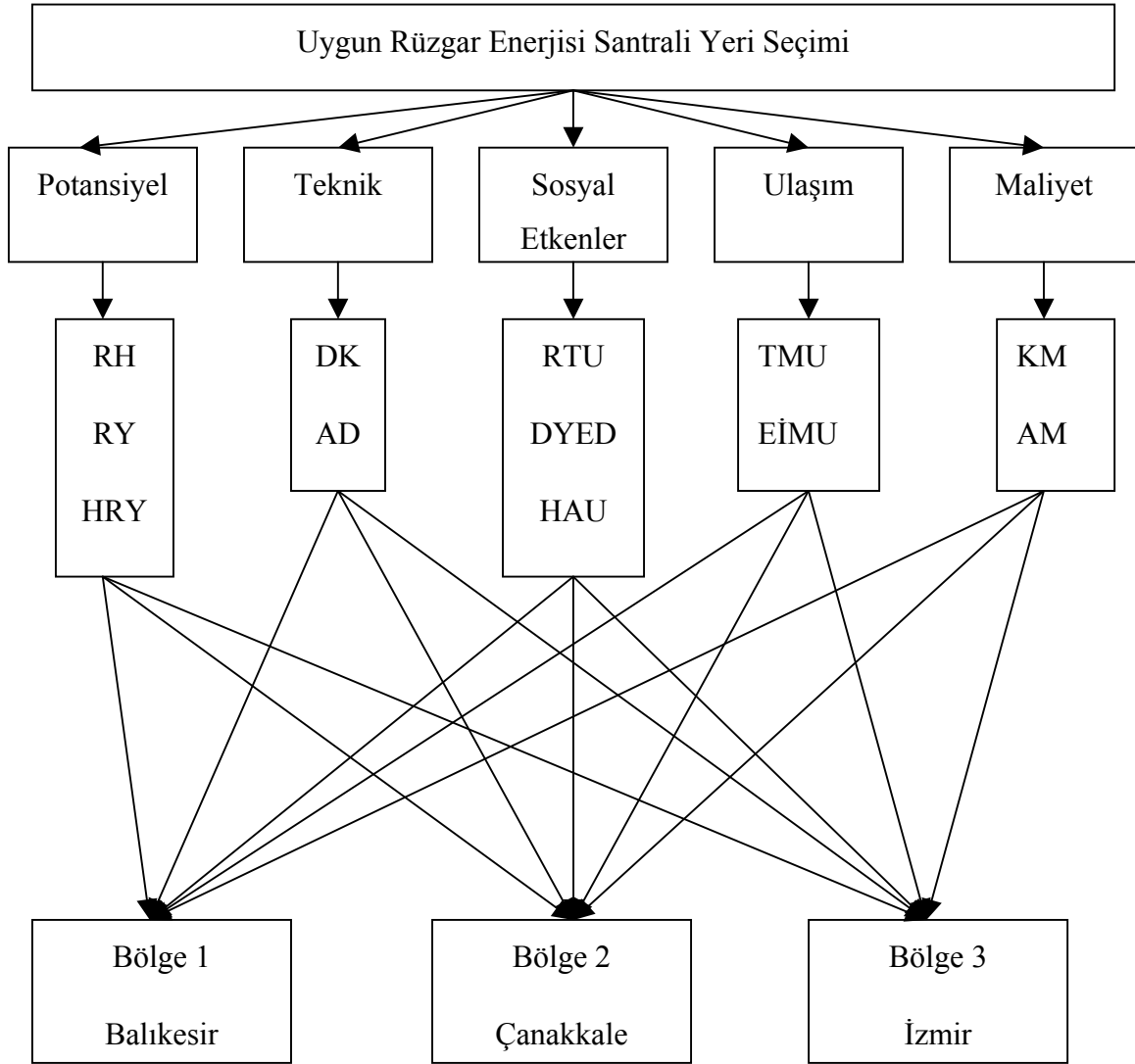
Bölge 1: Balıkesir

Bölge 2: Çanakkale

Bölge 3: İzmir

Kriterler ve alternatifler belirlendikten sonra oluşturulan hiyerarşik yapı Şekil 6.1'de

verilmiştir.



Şekil 6.1 Rüzgar Enerjisi Santral Yeri Seçimi Hiyerarşisi

6.2 İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Uygulaması

Çalışmanın bir önceki bölümünde de belirtildiği gibi ikili karşılaştırma matrisleri, EİE yetkililerinin bilgi ve tecrübeleri doğrultusunda, uzmanlardan alınan bilgiler göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Burada öncelikle amaca göre ana kriterler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Daha sonra her bir ana kriter için belirlenmiş olan alt kriterler kendi aralarında karşılaştırılmış ve son olarak da her bir alt kritere göre alternatifler kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda kullanılan ölçek Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Uygulamanın devamında ise, Bölüm 5.2’de adımları anlatılmış olan Chang’in Bulanık AHP algoritmasından faydalanılarak en iyi alternatif seçilmiştir. Aşağıda, tüm karşılaştırmalar için yapılan hesaplamalar ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 6.1 Amaca Göre Ana Kriterlerin Karşılaştırılması

	Potansiyel			Teknik			Sosyal Etkenler			Ulaşım			Maliyet		
Potansiyel	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Teknik	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Sosyal Etkenler	0,40	0,50	0,67	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67
Ulaşım	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Maliyet	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

Chang’in Bulanık AHP Algoritmasında öncelikle, (5.3)’e göre her bir ana kriter için S_i değerleri şu şekilde elde edilmiştir:

$$S_P = (5.67, 7.00, 8.50) \otimes (1/34.83, 1/27.50, 1/21.83) = (0.16, 0.25, 0.39) \quad (6.1)$$

$$S_T = (2.87, 3.50, 4.50) \otimes (1/34.83, 1/27.50, 1/21.83) = (0.08, 0.13, 0.21) \quad (6.2)$$

$$S_S = (3.97, 5.00, 6.33) \otimes (1/34.83, 1/27.50, 1/21.83) = (0.11, 0.18, 0.29) \quad (6.3)$$

$$S_U = (4.83, 6.00, 7.50) \otimes (1/34.83, 1/27.50, 1/21.83) = (0.14, 0.22, 0.34) \quad (6.4)$$

$$S_M = (4.50, 6.00, 8.00) \otimes (1/34.83, 1/27.50, 1/21.83) = (0.13, 0.22, 0.37) \quad (6.5)$$

Daha sonra (5.7) ve (5.8)’den faydalanılarak, her bir ana kriter için $V(M_2 \geq M_1)$ değerleri şu şekilde elde edilmiştir:

$$V(S_P \geq S_T) = 1.00, V(S_P \geq S_S) = 1.00, V(S_P \geq S_U) = 1.00, V(S_P \geq S_M) = 1.00 \quad (6.6)$$

$$V(S_T \geq S_P) = 0.25, V(S_T \geq S_S) = 0.63, V(S_T \geq S_U) = 0.43, V(S_T \geq S_M) = 0.46 \quad (6.7)$$

$$V(S_S \geq S_P) = 0.64, V(S_S \geq S_T) = 1.00, V(S_S \geq S_U) = 0.81, V(S_S \geq S_M) = 0.82 \quad (6.8)$$

$$V(S_U \geq S_P) = 0.83, V(S_U \geq S_T) = 1.00, V(S_U \geq S_S) = 1.00, V(S_U \geq S_M) = 1.00 \quad (6.9)$$

$$V(S_M \geq S_P) = 0.85, V(S_M \geq S_T) = 1.00, V(S_M \geq S_S) = 1.00, V(S_M \geq S_U) = 1.00 \quad (6.10)$$

Algoritmanın son adımında da (5.9), (5.10), (5.11) ve (5.12) kullanılarak amaca göre karşılaştırılan ana kriterler için ağırlık vektörü (W_A) şu şekilde elde edilir:

$$W_A = (0.28, 0.07, 0.18, 0.23, 0.24)^T \quad (6.11)$$

Algoritmanın adımları, alt kriterlerin ana kriterlere göre ve alternatiflerin alt kriterlere göre karşılaştırmaları sonucu oluşturulan matrislere de aynı şekilde uygulanmıştır. Aşağıda yapılan karşılaştırmalar ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 6.2 Alt Kriterlerin Potansiyele Göre Karşılaştırılması

	Rüzgar Hızı			Rüzgar Yoğunluğu			Hakim Rüzgar Yönü			Çevresel Engeller			Kapasite Faktörü		
Rüzgar Hızı	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Rüzgar Yoğunluğu	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67
Hakim Rüzgar Yönü	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Çevresel Engeller	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67
Kapasite Faktörü	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00

$$W_P = (0.23, 0.08, 0.23, 0.17, 0.28)^T \quad (6.12)$$

Çizelge 6.3 Alt Kriterlerin Tekniğe Göre Karşılaştırılması

	Deprem Kuşağı			Altyapı Durumu			Ormanlık Alan		
Deprem Kuşağı	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Altyapı Durumu	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50
Ormanlık Alan	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00

$$W_T = (0.32, 0.45, 0.23)^T \quad (6.13)$$

Çizelge 6.4 Alt Kriterlerin Sosyal Etkenlere Göre Karşılaştırılması

	Askeri ve Sivil Radar Tesislerine Uzaklık			Doğal Yaşam ve Ekolojik Denge			Hava Alanına Uzaklık			Yerleşim Birimlerine Uzaklık			Tarihi-Turistik Alana Uzaklık		
Askeri ve Sivil Radar Tesislerine Uzaklık	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50
Doğal Yaşam ve Ekolojik Denge	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50
Hava Alanına Uzaklık	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Yerleşim Birimlerine Uzaklık	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67
Tarihi-Turistik Alana Uzaklık	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00

$$W_S = (0.27, 0.25, 0.16, 0.09, 0.23)^T \quad (6.14)$$

Çizelge 6.5 Alt Kriterlerin Ulaşım Göre Karşılaştırılması

	Trafo Merkezine Uzaklık			Elektrik İhtiyacı Olan Merkezlere Uzaklık			Sahaya Yakın Karayolu Uzaklığı		
Trafo Merkezlerine Uzaklık	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Elektrik İhtiyacı Olan Merkezlere Uzaklık	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Sahaya Yakın Karayolu Uzaklığı	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

$$W_U = (0.33, 0.33, 0.33)^T \quad (6.15)$$

Çizelge 6.6 Alt Kriterlerin Maliyete Göre Karşılaştırılması

	Kurulum Maliyeti			Arazi Maliyeti			İşletme ve Bakım Maliyeti		
Kurulum Maliyeti	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50
Arazi Maliyeti	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
İşletme ve Bakım Maliyeti	0,29	0,33	0,40	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_M = (0.77, 0.15, 0.08)^T \quad (6.16)$$

Çizelge 6.7 Rüzgar Hızına Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Bölge 2	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50
Bölge 3	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(RH) = (0.15, 0.70, 0.15)^T \quad (6.17)$$

Çizelge 6.8 Rüzgar Yoğunluğuna Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	2,50	3,00	3,50
Bölge 3	0,40	0,50	0,67	0,29	0,33	0,40	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(RY) = (0.42, 0.58, 0.00)^T \quad (6.18)$$

Çizelge 6.9 Hakim Rüzgar Yönüne Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50
Bölge 3	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(HRY) = (0.47, 0.47, 0.06)^T \quad (6.19)$$

Çizelge 6.10 Çevresel Engellere Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	1,50	2,00	2,50
Bölge 2	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	2,50	3,00	3,50
Bölge 3	0,40	0,50	0,67	0,29	0,33	0,40	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(ÇE) = (0.17, 0.83, 0.00)^T \quad (6.20)$$

Çizelge 6.11 Kapasite Faktörüne Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Bölge 2	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50
Bölge 3	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(KF) = (0.15, 0.70, 0.15)^T \quad (6.21)$$

Çizelge 6.12 Deprem Kuşağına Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(DK) = (0.33, 0.33, 0.33)^T \quad (6.22)$$

Çizelge 6.13 Altyapı Durumuna Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50
Bölge 2	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(AD) = (0.70, 0.15, 0.15)^T \quad (6.23)$$

Çizelge 6.14 Ormanlık Alana Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Bölge 2	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(OA) = (0.23, 0.45, 0.32)^T \quad (6.24)$$

Çizelge 6.15 Askeri ve Sivil Radar Tesislerine Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(RTU) = (0.23, 0.32, 0.45)^T \quad (6.25)$$

Çizelge 6.16 Doğal Yaşam ve Ekolojik Dengeye Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(DYED) = (0.45, 0.32, 0.23)^T \quad (6.26)$$

Çizelge 6.17 Hava Alana Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(HAU) = (0.23, 0.32, 0.45)^T \quad (6.27)$$

Çizelge 6.18 Yerleşim Birimlerine Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00
Bölge 2	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67
Bölge 3	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(YBU) = (0.50, 0.00, 0.50)^T \quad (6.28)$$

Çizelge 6.19 Tarihi-Turistik Alana Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50
Bölge 2	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(TTAU) = (0.70, 0.15, 0.15)^T \quad (6.29)$$

Çizelge 6.20 Trafo Merkezlerine Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50
Bölge 3	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(TMU) = (0.47, 0.47, 0.06)^T \quad (6.30)$$

Çizelge 6.21 Elektrik İhtiyacı Olan Merkezlere Uzaklığa Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50
Bölge 2	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67
Bölge 3	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(EİMU) = (0.47, 0.06, 0.47)^T \quad (6.31)$$

Çizelge 6.22 Sahaya Yakın Karayolu Uzaklığına Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(SYKU) = (0.33, 0.33, 0.33)^T \quad (6.32)$$

Çizelge 6.23 Kurulum Maliyetine Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50
Bölge 3	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(KM) = (0.32, 0.45, 0.23)^T \quad (6.33)$$

Çizelge 6.24 Arazi Maliyetine Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67
Bölge 2	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67
Bölge 3	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(AM) = (0.15, 0.15, 0.70)^T \quad (6.34)$$

Çizelge 6.25 İşletme ve Bakım Maliyetine Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması

	Bölge 1			Bölge 2			Bölge 3		
Bölge 1	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50
Bölge 2	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Bölge 3	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_{ALT}(İBM) = (0.70, 0.15, 0.15)^T \quad (6.35)$$

Son olarak, Chang'in Bulanık AHP Algoritması ile hesaplanan, ana kriterlerin, alt kriterlerin ve alternatiflerin ağırlık vektörleri ((6.11), (6.12), (6.13), (6.14), . . . , (6.35)) birleştirilir ve böylece her alternatif için bir öncelik ağırlığı hesaplanır. Öncelik ağırlığı en büyük olan

alternatif en iyi alternatif olarak seçilir. Bu hesaplamalar, Çizelge 6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30 ve 6.31’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.26 Potansiyel Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları

	RH	RY	HRY	ÇE	KF	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları $W_{ALT}(P)$
Ağırlığı (Wp)	0,23	0,08	0,23	0,17	0,28	
Alternatifler	$W_{ALT}(RH)$	$W_{ALT}(RY)$	$W_{ALT}(HRY)$	$W_{ALT}(ÇE)$	$W_{ALT}(KF)$	
Bölge 1	0,15	0,42	0,47	0,17	0,15	0,25
Bölge 2	0,70	0,58	0,47	0,83	0,70	0,66
Bölge 3	0,15	0,00	0,06	0,00	0,15	0,09

Çizelge 6.27 Teknik Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları

	DK	AD	OA	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları $W_{ALT}(T)$
Ağırlığı (Wt)	0,32	0,45	0,23	
Alternatifler	$W_{ALT}(DK)$	$W_{ALT}(AD)$	$W_{ALT}(OA)$	
Bölge 1	0,33	0,70	0,23	0,48
Bölge 2	0,33	0,15	0,45	0,28
Bölge 3	0,33	0,15	0,32	0,25

Çizelge 6.28 Sosyal Etkenler Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları

	RTU	DYED	HAU	YBU	TTAU	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları $W_{ALT}(S)$
Ağırlığı (Ws)	0,27	0,25	0,16	0,09	0,23	
Alternatifler	$W_{ALT}(RTU)$	$W_{ALT}(DYED)$	$W_{ALT}(HAU)$	$W_{ALT}(ÇE)$	$W_{ALT}(TTAU)$	
Bölge 1	0,23	0,45	0,23	0,50	0,70	0,42
Bölge 2	0,32	0,32	0,32	0,00	0,15	0,25
Bölge 3	0,45	0,23	0,45	0,50	0,15	0,33

Çizelge 6.29 Ulaşım Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları

	TMU	EİMU	SYKU	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları $W_{ALT}(U)$
Ağırlığı (Wu)	0,33	0,33	0,33	
Alternatifler	$W_{ALT}(TMU)$	$W_{ALT}(EİMU)$	$W_{ALT}(SYKU)$	
Bölge 1	0,47	0,47	0,33	0,42
Bölge 2	0,47	0,06	0,33	0,29
Bölge 3	0,06	0,47	0,33	0,29

Çizelge 6.30 Maliyet Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları

	KM	AM	İBM	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları $W_{ALT}(M)$
Ağırlığı (Wm)	0,77	0,15	0,08	
Alternatifler	$W_{ALT}(KM)$	$W_{ALT}(AM)$	$W_{ALT}(İBM)$	
Bölge 1	0,32	0,15	0,70	0,33
Bölge 2	0,45	0,15	0,15	0,38
Bölge 3	0,23	0,70	0,15	0,29

Çizelge 6.31 Ana Kriterlere Göre Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları

	P	T	S	U	M	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları W_{ALT}(A)
Ağırlığı (WA)	0,28	0,07	0,18	0,23	0,24	
Alternatifler	W_{ALT}(P)	W_{ALT}(T)	W_{ALT}(S)	W_{ALT}(U)	W_{ALT}(M)	
Bölge 1	0,25	0,48	0,42	0,42	0,33	0,35
Bölge 2	0,66	0,28	0,25	0,29	0,38	0,41
Bölge 3	0,09	0,25	0,33	0,29	0,29	0,24

6.3 Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Uygulamasının Sonucu

Bulanık AHP Algoritmasına göre yapılan tüm hesaplamalar sonucunda, belirlenen kriterlere göre karşılaştırılan rüzgar enerji santrali alternatif bölgeleri arasından “Bölge 2 – Çanakkale” alternatifinin en iyi olduğu görülmüştür. Bulanık AHP Algoritması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 6.32’de özetlenmiştir:

Çizelge 6.32 Bulanık AHP Algoritması ile Elde Edilen Sonuçlar

Alternatifler	W_{ALT}(A)
Bölge 1 – Balıkesir	0,35
Bölge 2 – Çanakkale	0,41
Bölge 3 – İzmir	0,24

6.4 Ana Kriterlerdeki Değişimin Sonuca Etkisi Üzerine Duyarlılık Analizi Çalışması

Günümüz piyasa koşullarında bir çok değişkene bağlı olan problemlerin çözümünde değişkenlerin önemi günden güne değişebilir. Bu sebeple sadece ana kriterler için, alt kriterler sabit tutulmak şartı ile bir duyarlılık analizi çalışması yapılmış ve sonuca olan etkisi incelenmiştir. Bir önceki bölümde verilen hesaplamalar uzman kişilerin görüşleri eşliğinde yapılan hesaplamalardır, günümüz koşullarındaki durumu açıklayıcı niteliktedir. Bundan sonraki bölüm hesaplamaları ise; sadece sonuca etki edecek değişimi öngörmek adına yapılmıştır. Her bir ana kriterdeki değişiklik diğer tablolardan bağımsız olarak ilk tabloya sadık kalınarak yapılmıştır.

6.4.1 Potansiyel Kriterinin Önem Derecesinin Arttırılma Durumu

Potansiyel kriterinin önem derecesinin diğer kriterlere oranla yüksek olduğu görülmekte; ancak bu konuda ulaşım ile ilgili yapılan ufak bir önem derecesi artırımını sonucu aşağıdaki tablo ve sonuçlar elde edilmektedir:

Çizelge 6.33 Potansiyel Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması

	Potansiyel			Teknik			Sosyal Etkenler			Ulaşım			Maliyet		
Potansiyel	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Teknik	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Sosyal Etkenler	0,40	0,50	0,67	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67
Ulaşım	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Maliyet	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_A (P) = (0.27, 0.09, 0.18, 0.23, 0.23)^T$$

Çizelge 6.34 Potansiyel Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması

Alternatifler	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları
Bölge 1	0,36
Bölge 2	0,40
Bölge 3	0,24

6.4.2 Teknik Kriterinin Önem Derecesinin Arttırılma Durumu

Teknik kriterinde ise tutarlılığı bozmamak için iki ayrı kriterin değeri değiştirilmiştir. Sosyal etkenler ve potansiyel kriterlerinin önem dereceleri düşürülerek teknik kriterinin ki arttırılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki tablodadır:

Çizelge 6.35 Teknik Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması

	Potansiyel			Teknik			Sosyal Etkenler			Ulaşım			Maliyet		
Potansiyel	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Teknik	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Sosyal Etkenler	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67
Ulaşım	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Maliyet	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_A(T) = (0.23, 0.17, 0.14, 0.23, 0.23)^T$$

Çizelge 6.36 Teknik Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması

Alternatifler	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları
Bölge 1	0,37
Bölge 2	0,39
Bölge 3	0,24

6.4.3 Sosyal Etkenler Kriterinin Önem Derecesinin Arttırılma Durumu

Sosyal etkenler kriterinde de tutarlılığı bozmamak için iki ayrı kriterin değeri değiştirilmiştir. Potansiyel ve maliyet kriterlerinin önem dereceleri düşürülerek sosyal etkenler kriterinin ki arttırılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki tablodadır:

Çizelge 6.37 Sosyal Etkenler Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması

	Potansiyel			Teknik			Sosyal Etkenler			Ulaşım			Maliyet		
Potansiyel	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Teknik	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Sosyal Etkenler	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Ulaşım	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Maliyet	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_A(S) = (0.23, 0.10, 0.23, 0.23, 0.20)^T$$

Çizelge 6.38 Sosyal Etkenler Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması

Alternatifler	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları
Bölge 1	0,37
Bölge 2	0,38
Bölge 3	0,25

6.4.4 Ulaşım Kriterinin Önem Derecesinin Arttırılma Durumu

Ulaşım kriterinde de tutarlılığı bozmamak için iki ayrı kriterin değeri değiştirilmiştir. Sosyal etkenler ve potansiyel kriterlerinin önem dereceleri düşürülerek ulaşım kriterinin ki arttırılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki tablodadır:

Çizelge 6.39 Ulaşım Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması

	Potansiyel			Teknik			Sosyal Etkenler			Ulaşım			Maliyet		
Potansiyel	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50
Teknik	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Sosyal Etkenler	0,40	0,50	0,67	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67
Ulaşım	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50
Maliyet	0,67	1,00	1,50	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00

$$W_A (U) = (0.27, 0.09, 0.15, 0.27, 0.23)^T$$

Çizelge 6.40 Ulaşım Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması

Alternatifler	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları
Bölge 1	0,36
Bölge 2	0,40
Bölge 3	0,24

6.4.5 Maliyet Kriterinin Önem Derecesi Arttırılma Durumu

Maliyet kriterinde de tutarlılığı bozmamak için iki ayrı kriterin değeri değiştirilmiştir. Ulaşım ve potansiyel kriterlerinin önem dereceleri düşürülerek maliyet kriterinin ki arttırılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki tablodadır:

Çizelge 6.41 Maliyet Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Ana Kriterlerin Karşılaştırılması

	Potansiyel			Teknik			Sosyal Etkenler			Ulaşım			Maliyet		
Potansiyel	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67
Teknik	0,40	0,50	0,67	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67	0,40	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50
Sosyal Etkenler	0,40	0,50	0,67	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,50	0,40	0,50	0,67
Ulaşım	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,40	0,50	0,67
Maliyet	1,50	2,00	2,50	0,67	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,00

$$W_A (U) = (0.26, 0.04, 0.17, 0.19, 0.34)^T$$

Çizelge 6.42 Maliyet Kriterinin Önem Derecesi Arttırılması Halinde Alternatiflerin Karşılaştırılması

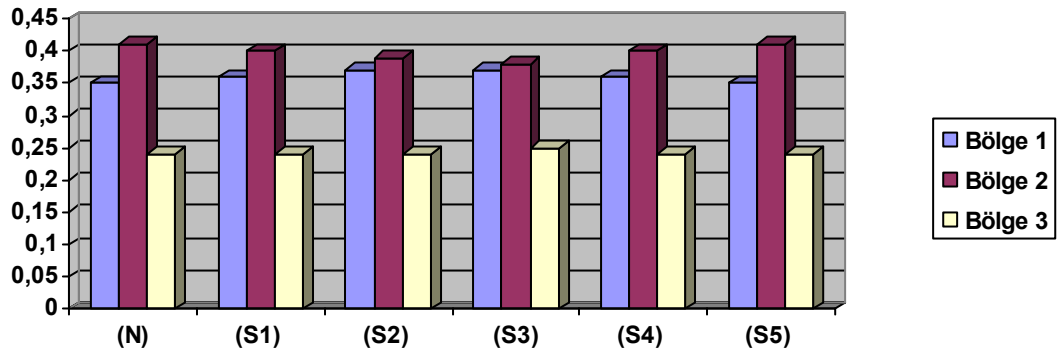
Alternatifler	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları
Bölge 1	0,35
Bölge 2	0,41
Bölge 3	0,24

6.4.6 Duyarlılık Analizi Sonucu

Çizelge 6.34, 6.36, 6.38, 6.40 ve 6.42 birleştirildiğinde normal duruma göre sonuçlar Çizelge 6.43 deki gibi olmaktadır.

Çizelge 6.43 Duyarlılık Analizi Özet Tablosu

	Alternatiflerin Öncelik Ağırlıkları					
	(N) Normal	(S1) P Artınca	(S2) T Artınca	(S3) S Artınca	(S4) U Artınca	(S5) M artınca
Bölge 1	0,35	0,36	0,37	0,37	0,36	0,35
Bölge 2	0,41	0,40	0,39	0,38	0,40	0,41
Bölge 3	0,24	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24



Şekil 6.2 Duyarlılık Analizi Sonuç Grafiği

Şekil 6.2'deki sonuç grafiğinde de görüldüğü üzere farklı senaryolar için sonuçlarda değişimler olmuş ancak bu değişimler seçimimizin sonucunu etkileyecek düzeyde olmamıştır. Bölge 2 – Çanakkale değişik senaryolar sonucunda da rüzgar enerji santrali kurmak adına uygun yer olarak seçilmiştir.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma, günümüzde hızla artan enerji tüketimi ve hızla tükenen enerji kaynaklarına alternatif olabilecek rüzgar enerjisi ve bu konudaki verimliliği arttırmak için rüzgar enerji santralleri kurulumunda yer seçimi konusunda yapılmıştır.

Bir rüzgar santralının ekonomik ve teknik açılardan başarıya ulaşmasının temelinde sağlıklı verilere dayalı olarak hesaplanan enerji üretim miktarları gelmektedir. Bir alandaki rüzgar enerji potansiyelini maksimum düzeyde değerlendirmek için kısa zamana sıkıştırılmamış, detaylı fizibilite çalışmaları yapılmış rüzgar enerjisi santral projeleri üretilmelidir. Bu durum hem yatırımcının önünü görmesine hem de ülke kaynaklarından maksimum düzeyde yararlanılmasına yardımcı olacaktır (Çalışkan,2006).

Dünya ülkeleri ve ülkemiz göz önüne alındığında; ülkemizin bu enerji türünde olan büyük kapasitesine rağmen bu kapasiteyi üretime tam verimle dökemediği görülmektedir. Bu konuda yapılacak çalışmalar hem ülkemizin kaynaklarını maksimum düzeyde kullanma imkanı hem de yeni iş alanları doğuracaktır.

Özellikle son günlerde etkisini bir hayli hissetmeye başladığımız küresel ısınma faktörünün de devreye girmesi ile temiz enerji olarak bilinen rüzgar enerjisi bir kez daha gündeme gelmiş ve tüm dünya ülkelerinde bu konuya yönelim artmıştır.

Şüphesiz biz endüstri mühendislerine bu konudaki verimliliği arttırmak ve maksimum çıktıyı sağlayabilmek adına iyi hazırlanmış fizibilite etütleri ve sağlıklı veriler ile minimum yanılma payına ulaşma görevi düşmektedir. Hesaplamalardaki %10'luk bir değişimin sonuçlara %30 oranında yansıdığı daha önceden de belirtilmişti. Böyle bir durum için tüm kriterlerin değerlendirilmesi ve karar verici sistemin çok iyi çalışması gerekmektedir.

Çok kriterli karar verme teknikleri arasında AHP yöntemi, karar verme problemlerinde kullanılan pek çok diğer yöntemle göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği için en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Konuyla ilgili uzman kişilerin görüş ve değerlendirmelerine dayanan bu yöntemde, en doğru sonuca varmak için, insani düşünme biçiminden kaynaklanan belirsizliği de hesaba katmak gerektiğinden Bulanık AHP yöntemi tercih edilmiştir.

Rüzgar enerjisi santral yeri seçimi problemi için ana ve alt kriterler belirlenmiş, istenen hiyerarşik yapı oluşturulmuş ve bulanık AHP çalışması sonucunda Bölge 1 – 0.35, Bölge 2 - 0.41 ve Bölge 3 – 0.24 ağırlıkları elde edilmiş ve en iyi alternatif olarak Bölge 2 tercih edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde alt kriterler sabit tutulmak şartı ile sadece ana kriterler

tek tek arttırılmış ve sonuca olan etkilerinin değerleri değiştirecek ancak seçim sonucunu değiştirmeyecek düzeyde olduğu görölmüştür.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde ana kriterlerin tek tek değiştirilmesinin haricinde ikili ve üçlü kombinasyonlar halinde değiştiği bir duyarlılık analizi çalışması yapılması seçim sonucunu değiştirebilecek durumlar doğurabilir. Ancak bu durumda tutarlılığın bozulmamasını sağlamak bir hayli güç olacaktır. Bu çalışmada uygulanan yöntemler karmaşık gibi görünse de, oldukça pratik hesaplamalarla sonuca ulaşılmasını ve pek çok faktörü göz önünde bulundurarak gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Akgün, N., (a)(2004), “Rüzgar Değişikliklerinin Tarifi - Weibull Dağılımı” Meteoroloji Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara
- Akgün, N., (b)(2004), “Rüzgar Enerjisi ve Gelişimi” Meteoroloji Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara
- Akgün, N., (c)(2004), “Rüzgar Türbin Bileşenleri” Meteoroloji Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara
- Akyüz O., (Mayıs 2000) “Yenilenebilir Enerjilerin Maliyet Açısından Karşılaştırılması” Asmakinsan Ltd.Şti., Ankara – Türkiye
- AWEA, (2000) “Wind Energy Views on the Environment; Clean and Green”, Wind Energy Fact Sheet American Wind Energy Association
- Bozok, A., (1999), “Enerji Santralleri” Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi, Bitirme Tezi, İstanbul s.3
- C. Flavin, A Force to be Reckored With, Renewable Energy World, March, (1999), p.36
- Çalışkan, M., (2006), “Rüzgar Enerji Santralleri İçin Ön Etüt Ve Kaynak Belirleme Çalışmaları” EİE Yayınları, Ankara
- Çanlı, H., Kandakoğlu, A., (2007), “Hava Gücü Mukayesesi İçin Bulanık AHP Modeli”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi (Ocak, 2007) Cilt 3 Sayı 1, 71–82.
- E.İ.E., (2006), “Rüzgar Enerjisi” Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Ankara
- Erensal, Y.C., Öncan, T., Demircan, M.L., (2005), “Determining key capabilities in technology management using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Turkey”, Information Sciences.
- Gourieres, D.L., (1982), “Wind Power Plants” –1.st edition
- Jamieson, P., Quarton, D., (1999), “Technology Development for Offshore Wind”, “Renewable Energy World”, (May,1999), p.30.
- Kandakoğlu A., (2006) “Günümüz Pazar Koşullarında İşletmelerin Hedef Önceliklendirmesi İçin Algoritma Önerisi ve Uygulaması” ,Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Klir, J.G., Juan, B., (1994), “Fuzzy sets and Fuzzy Logic Theory and Applications”, Prentice-Hall,Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Kuruüzüm, A., Atsan, N., (2001), “Analitik Hiyerarşi Yöntemi ve İşletmecilik Alanındaki Uygulamaları”, Akdeniz İ.İ.B.F. Dergisi(1), 83-105.
- Özdemir, M.S., (2002), “Bir işletmede analitik hiyerarşi süreci kullanılarak performans değerlendirme sistemi tasarımı.”, Endüstri Mühendisliği, Nisan-Mayıs-Haziran 2002-Sayı 2
- Platin Dergisi “Polat Enerji Rüzgar Türbini Üretecek” (Nisan, 2007) s.82
- Şen, Ç. (2003), “Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması”, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İzmir
- Şen, Z., (2004), “Mühendislikte Bulanık (Fuzzy) Mantık ile Modelleme Prensipleri”, Su

Vakfı Yayınları, İstanbul.

Tümerdem O., (2002) “Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye’nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

Unay, L.B., (2006) “A Pre-Feasibility Study Methodology For Wind Power Use On College Campuses”, Colorado State University – Pueblo, (December 18,2006)

Ültanır, M.Ö., “Denizde Kurulan Rüzgar Santralleri”, Uzman Enerji, Eylül, (1998), s.24

Yıldız Teknik Üniversitesi 9. Kalite Günleri Seminerleri 7. Oturum – Erol Demirer

Yılmaz M., (2000) “Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Maliyet Analizi”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

Yücel, B., “Avrupa’da Yenilenebilir Enerjilerin Bilançosu ve 2010 Hedefi”, Kaynak Elektrik, Sayı 141 (Aralık 2000) s.31

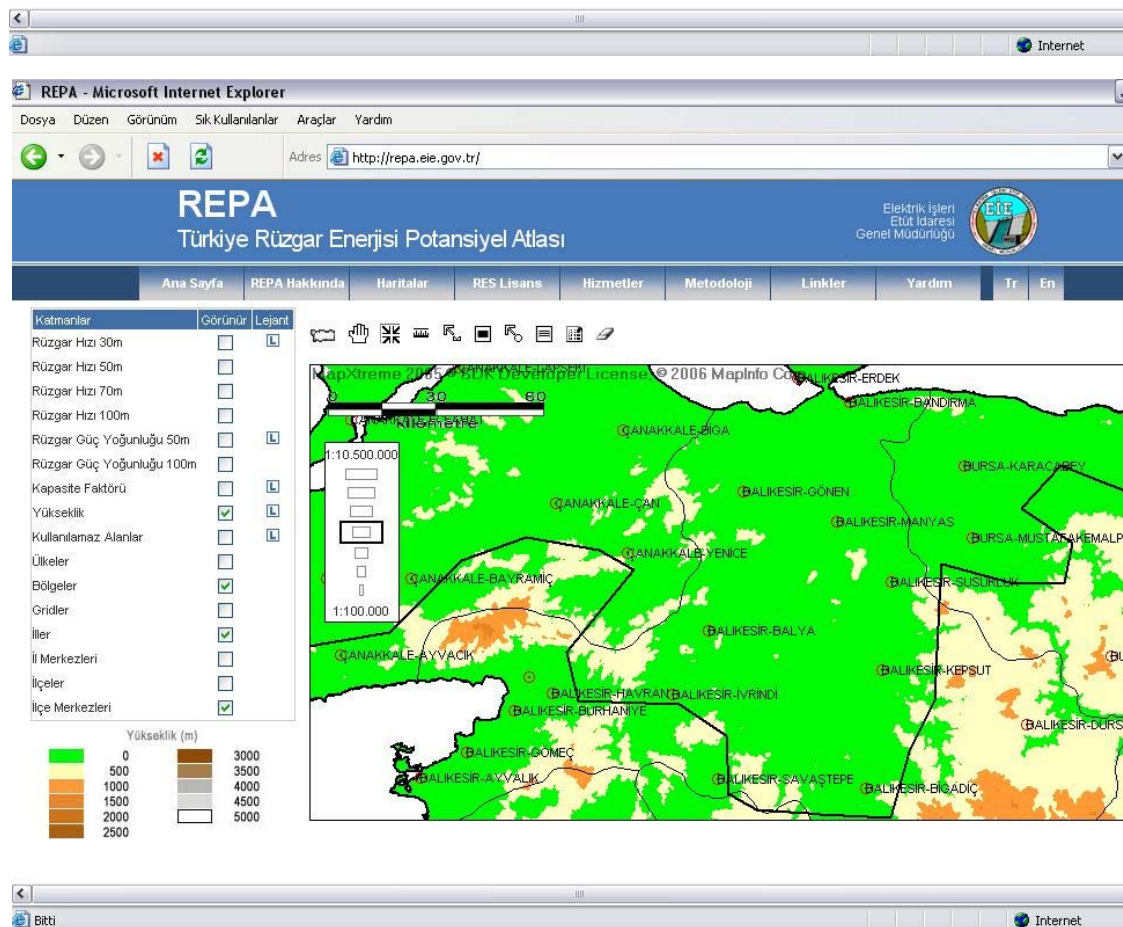
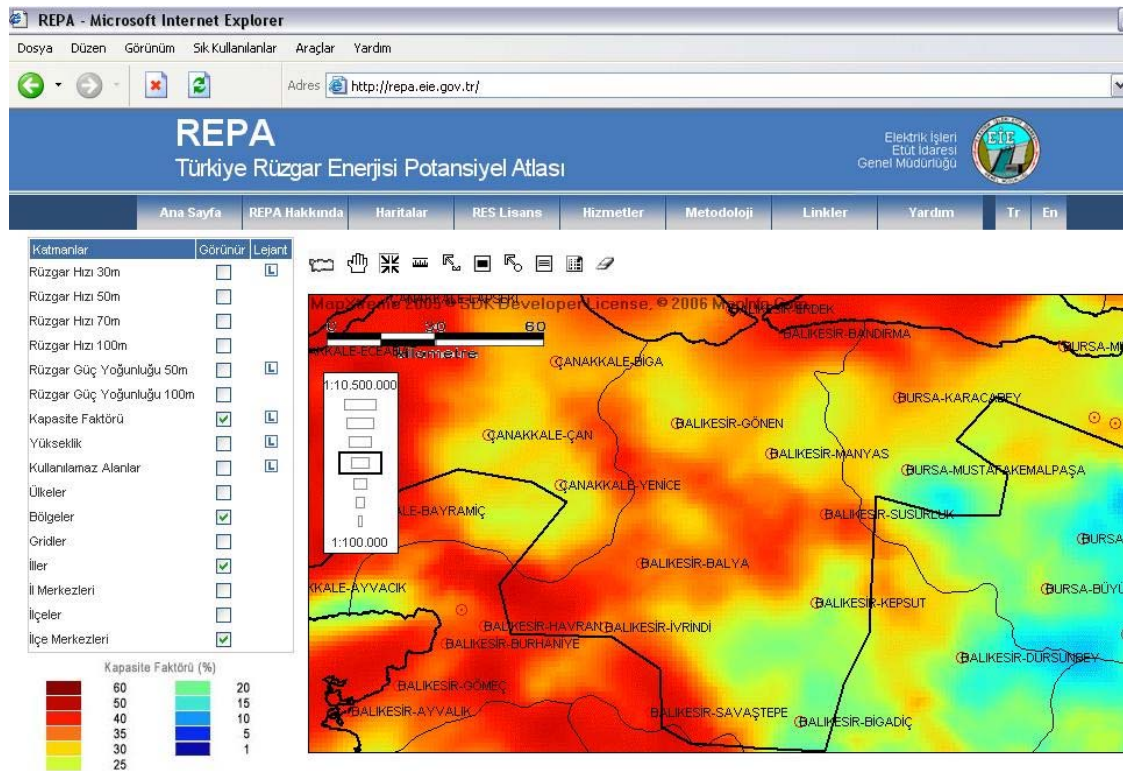
İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] <http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/ruzgar/giris.htm>
- [2] http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind_how.html
- [3] http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind_how.html#inside
- [4] <http://www.awea.org/>
- [5] <http://www.epdk.gov.tr/lisans/elektrik/yek/yek.html>
- [6] <http://repa.eie.gov.tr/>
- [7] <http://www.eie.gov.tr/>
- [8] <http://www.demirer.com.tr>
- [9] http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WF12/RzgarGc12.pdf
- [10] www.WINDPOWER.org
- [11] <http://www.mmo.org.tr/muhendismakina/arsiv/2000/kasim/RUZGAR.htm>
- [12] <http://wordpress.com/tag/ekoloji/>

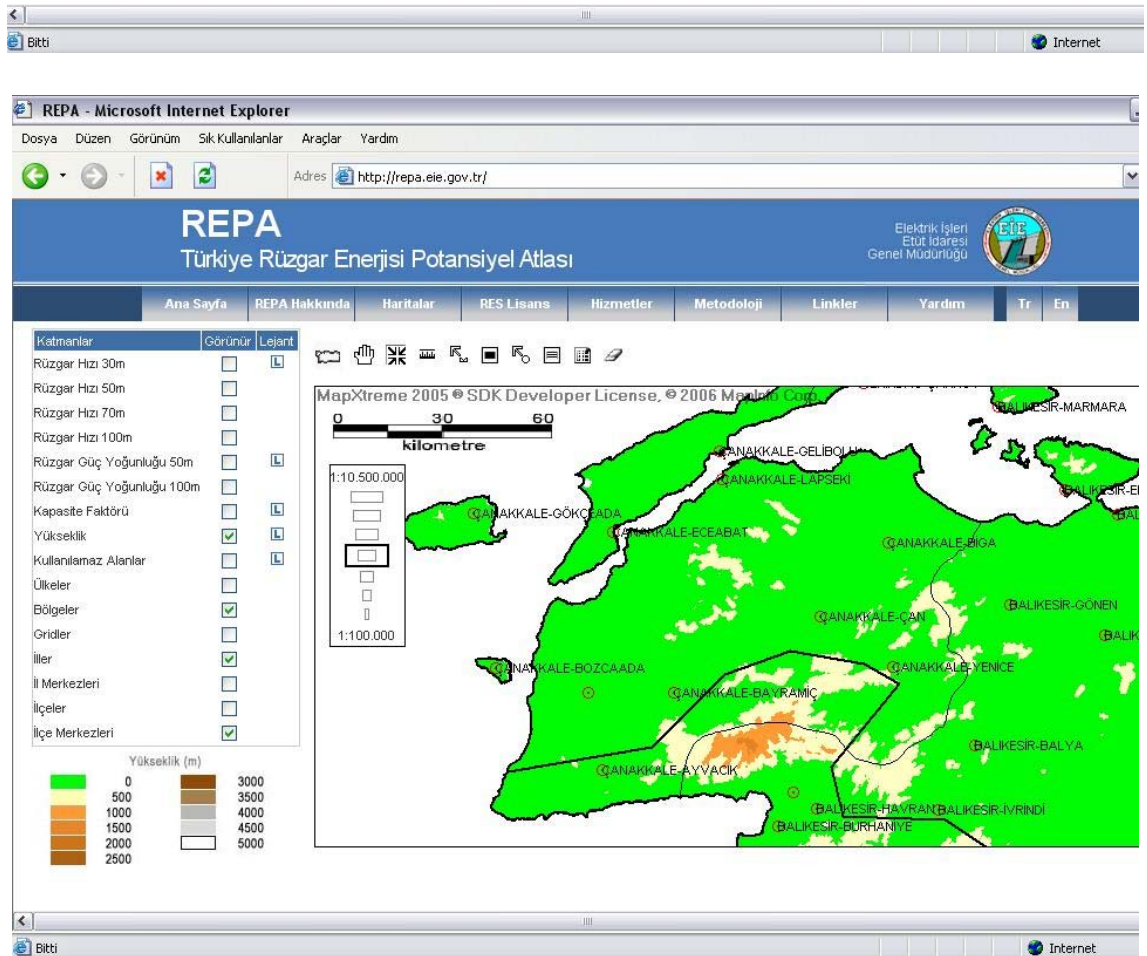
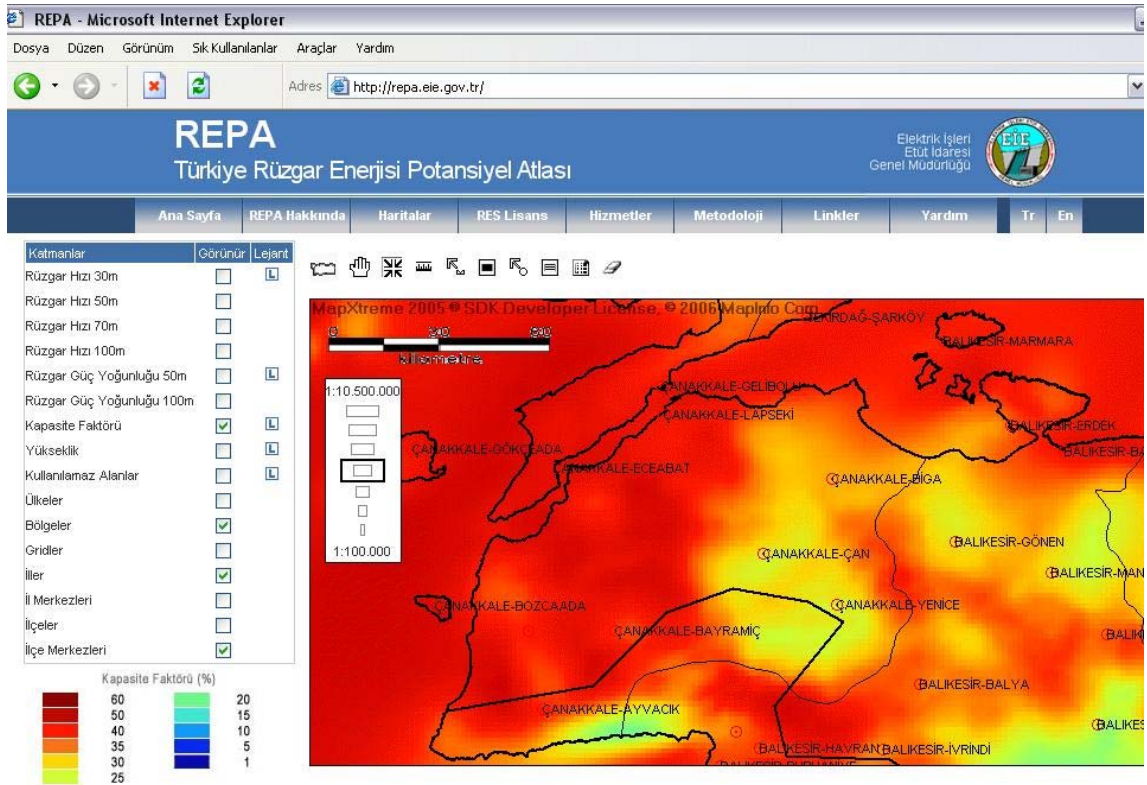
EKLER

- Ek 1 Bölge 1 – Balıkesir Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları
- Ek 2 Bölge 2 – Çanakkale Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları
- Ek 3 Bölge 3 – İzmir Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları

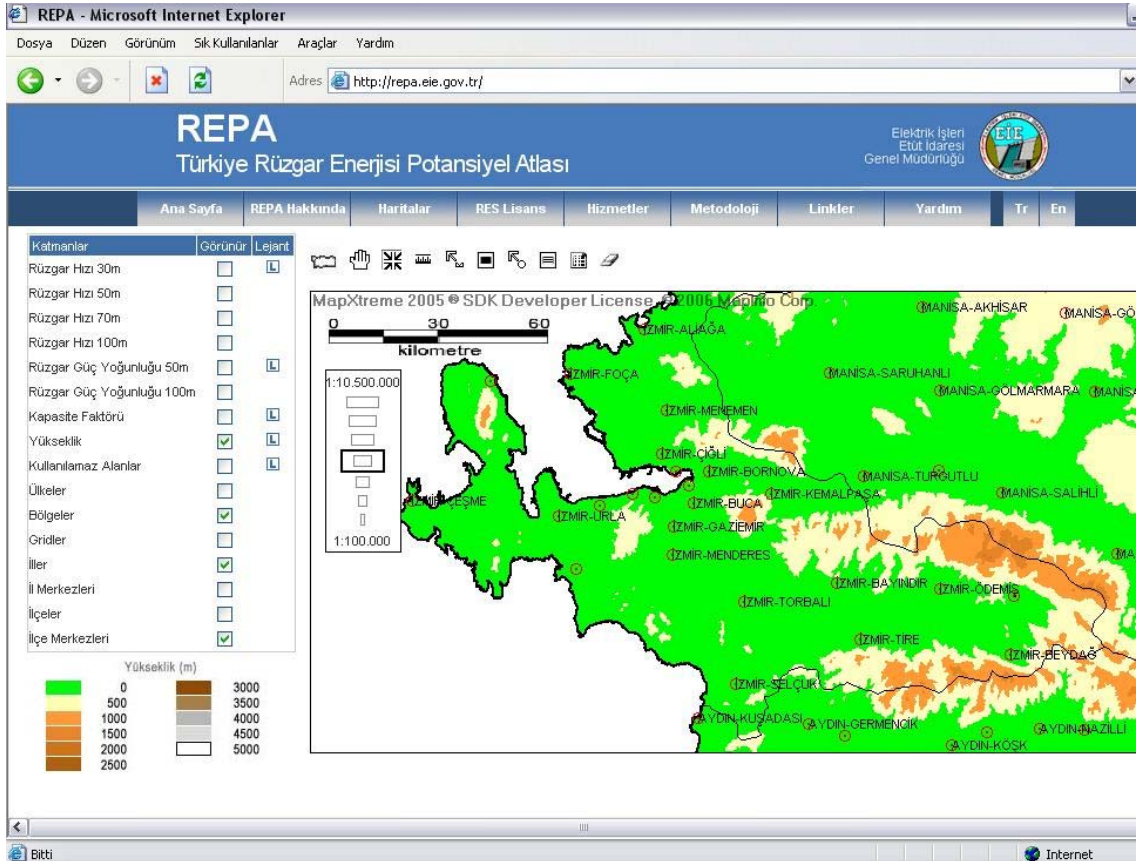
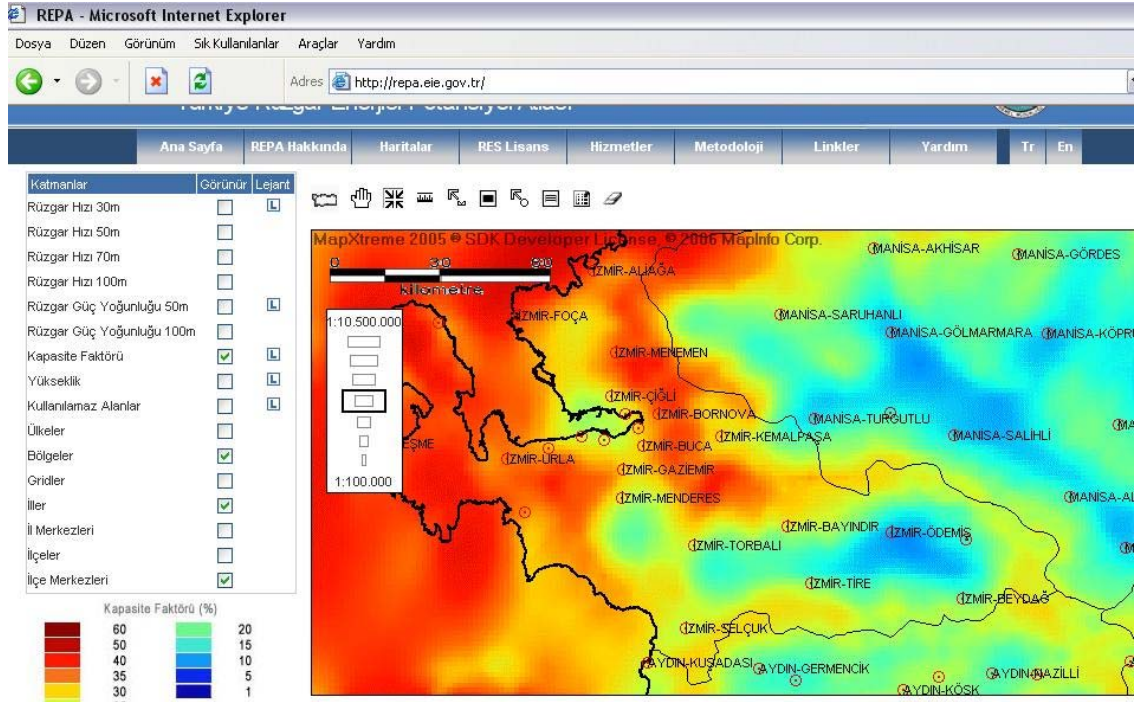
Ek 1 Bölge 1 – Balıkesir Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları



Ek 2 Bölge 2 – Çanakkale Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları



Ek 3 Bölge 3 –İzmir Kapasite Faktörü ve Yükseklik Haritaları



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 06.11.1983

Doğum yeri Edremit/Balıkesir

Lise 1994-2001 Edremit Anadolu Lisesi

Lisans 2001-2005 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.
Endüstri Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği

Çalıştığı kurum(lar)

2002 ED-VAN Vantilatör San. ve Tic. Ltd. Şti.
Atölye Stajı
30 iş günü

2003 Türk Telekom Bilgi İşlem Dairesi
Bilgisayar Stajı
30 iş günü

2004 Anadolu Isuzu Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş.
Endüstri Mühendisliği Stajı
30 iş günü

2003-2005 3.M.S. Otomotiv Ltd. Şti.