

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR ENERJİSİ TEKNOLOJİSİ VE TÜRKİYE’NİN**  
**RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ**

**TE YÜKSEKÖĞRETİM KURULU**  
**DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Mak. Müh. Oğuzhan TÜMERDEM

F.B.E Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programında  
Hazırlanan

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Burhan SUNGU

Yrd. Doç. Dr. Nurten VAROAR

Doç. Dr. Şükri BEKDEMİR

İSTANBUL, 2002

128642

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	i
KISALTIMA LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ .....	vii
ÖZET .....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. RÜZGAR ENERJİSİ .....	2
2.1 Rüzgar Gücü Kronolojisi .....	2
2.2 Rüzgar Enerjisi İlk Kıpırdanırları .....	3
2.3 Rüzgar Enerjisi Elektrik Üretiminin Öncüsü : Paul La Cour .....	4
2.4 La Cour'un İlk Rüzgar Türbinleri (RT) .....	4
2.5 1940 Sonrası Yıllarda Rüzgar Enerjisinin Dünya'da Durumu .....	5
2.6 Rüzgar Enerjisinin Kullanım Nedenleri.....	7
2.6.1 Temiz Enerji Kaynaklarının Kullanım Nedenleri .....	8
2.6.2 Rüzgar enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları .....	10
3. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ .....	13
3.1 Dünya'da Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü.....	13
3.2 Avrupa'da Rüzgar Enerjisi Potansiyeli .....	19
3.2.1 Rüzgar Enerjisinin Ekonomikliği .....	20
3.2.2 Elektrik Üretim Maliyetini Oluşturan Faktörler .....	20
3.2.3 Elektrik Talebinin Karşılanması ve Rüzgar Kaynakları .....	21
3.2.4 Rüzgar Enerjisinin Gelişimi.....	22
3.2.5 Rüzgar Enerjisinin Konumu .....	24
3.2.6 Yatırım ve Maliyet Açısından İnceleme .....	25
3.2.7 Rüzgar Enerjisinin Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması.....	26
3.3 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi'nin durumu .....	27
3.3.1 RES Projelerinin Dağılımları .....	30
3.3.2 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Gelişimi ve Mevcut Durumu.....	31
3.3.3 Türkiye'de Rüzgar Enerjisine Neden İhtiyaç Var? .....	33
3.3.4 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Kaynakları .....	34
3.3.5 Türkiye'de Enerji Kullanımı .....	34
4. RÜZGAR OLUŞUMU VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	36
4.1 Rüzgar Oluşumunun Nedenleri.....	36
4.2 Rüzgarın Temel Oluşum Mekanizması .....	37
4.3 Atmosferik Sınır Tabaka ve Rüzgar Akışına Etki Eden Faktörler.....	38
4.3.1 Rüzgarın Oluşumu .....	38

4.3.2	Basınç Gradyanı (Eğimi) Kuvveti .....	39
4.3.3	Coriolis Kuvveti.....	41
4.4	Küresel Rüzgarları .....	41
4.4.1	Jeostrofik Rüzgar .....	41
4.4.2	Yüzey Rüzgarları .....	42
4.5	Yerel Rüzgarları.....	42
4.6	Hava Sıcaklığı ve Basıncı .....	43
4.7	Havanın Yoğunluğu .....	43
4.8	Rüzgar Enerjisi Formülasyonunun Çıkartılması.....	45
4.8.1	Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Diğer Eşitlikler .....	46
4.8.2	Rüzgar Şiddeti Dağılımı .....	47
5.	RÜZGAR TÜRBİNLERİ (RT).....	49
5.1	Rüzgar Türbinlerinin Çalışmasına Etki Eden Faktörler.....	49
5.2	RT Kanat Profili (Airfoil) .....	50
5.2.1	Sürüklenme Katsayısı ( $C_D$ ) .....	52
5.2.2.	Kalkınma Katsayısı ( $C_L$ ) .....	52
5.3	Rüzgardan Elde Edilebilecek Gücün Hesabı ve Güç Katsayısı ( $C_p$ ) .....	53
5.3.1	Lanchester-Betz Limiti .....	54
5.3.2	Pervane Kanat Sayısının Etkisi .....	57
5.4	Pervane Kanat Sayılarına Göre Türbin Çeşitleri.....	57
5.4.1	Üç Kanatlı Rüzgar Türbini.....	57
5.4.2	iki Kanatlı Rüzgar Türbini .....	62
5.4.3	Tek Kanatlı Rüzgar Türbini .....	63
5.5	Rüzgar Türbinlerinin Güç Kontrolü.....	63
5.5.1	Stall Kontrol Mekanizması .....	64
5.5.2	Pitch Kontrol Mekanizması .....	65
5.6	Pervane Hızı.....	66
5.6.1	Değişken Pervane Hızı.....	67
5.6.2	Sabit Hızlı Pervaneler .....	67
6.	RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KARAKTERİSTİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI .....	69
6.1	Rüzgar Türbinlerinin Karakteristikleri .....	69
6.2	Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	70
6.2.1	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT) .....	72
6.2.2	Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT) .....	72
6.2.3	Rüzgar Türbin Tipleri ve Kullanım Yerleri .....	73
6.3	Rüzgar Makinaları Elemanları .....	75
6.3.1	Rotor .....	75
6.3.2	Güç Denetimi.....	75
6.3.3	Jeneratör.....	76
6.3.4	Vites Kutusu .....	76
6.3.5	Kule.....	77
7.	RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ELEKTRİK SİSTEMİ.....	80
7.1	Elektrik Jeneratörleri.....	80
7.1.1	Senkron Jeneratörler (Alternatörler).....	81

7.1.2	Asenkron (İndüksiyon) Jeneratörler.....	82
7.2	Jeneratörün DC-AC Şebekeye Tek Güç Kaynağı Olarak Bağlanması .....	83
7.2.1	Güç Çıkışı .....	83
7.3	Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Bağlanması.....	86
8.	RÜZGAR ENERJİSİ UYGULAMA SAHALARI .....	89
8.1	Rüzgar Enerjisinden Yararlanma İmkanları .....	90
8.1.1	Mekanik Enerji Üretimi .....	90
8.1.2	Elektrik Enerjisi Üretimi.....	91
8.2	Rüzgar Enerjisi Kullanımının İncelenmesi.....	91
8.3	Bağımsız Çalışan Akü Şarj Eden Sistemler.....	95
8.4	Denizüstü Rüzgar Santralleri .....	98
8.4.1	Türkiye’de Denizüstü Rüzgar Santrali önerisi.....	101
8.4.2	Denizüstü Rüzgar Santrallerinin Türkiye İçin Önemi .....	102
8.5	Rüzgar Türbini ve Dizel Sistemleri .....	103
8.6	Rüzgar Tarlaları .....	105
9.	RÜZGAR GÜCÜNDE GELİŞME VE RÜZGAR ÇİFTLİĞİ İÇİN GEREKLİ PARAMETRELERİN İNÇİLENMESİ .....	108
9.1	Gerçekçi Bir Yatırım İçin Gerekli İncelemeler.....	109
9.1.1	Rüzgar Potansiyeli ve Üretilen Enerji.....	110
9.1.2	Teknik Fizibilite ve Mühendislik Tasarımları .....	110
9.1.3	Ticari Açıdan Uygulanabilirlik .....	111
9.1.4	Çevresel Faktörler ve Planlama Olayı .....	111
9.2	Rüzgar Enerjisini Etkileyen Faktörler.....	111
9.2.1	Yeryüzünün Engebeliği.....	111
9.2.2	Rüzgar Engelleri .....	111
9.2.3	Park Etkisi .....	113
9.2.4	Tünel Etkisi.....	113
9.2.5	Tepe Etkisi .....	113
9.3	Kullanılan Veri ve Yöntem Analizi .....	113
9.3.1	Kullanılan Veri .....	113
9.4	Rüzgar Enerjisi Modellemesi.....	118
9.4.1	Engel Perdeleme Modeli .....	118
9.4.2	Orografik Model .....	120
9.4.3	Pürüzlülük Değişim Modeli.....	120
9.5	Parametrelerin İncelenmesi.....	120
9.5.1	Enerji Üretimi İncelenmesi .....	121
9.5.2	Gürültü Değerlerinin İncelenmesi.....	121
9.5.3	Elektriksel Alt Yapı Tasarımı .....	122
9.5.4	Çiftlik Arazisi İncelenmesi ve Ön-Alt Yapı Tasarımı Çalışmaları.....	122
9.5.5	Ekonomik Analiz .....	123
9.5.6	Rüzgar Türbini Detayları ve İncelenmesi .....	124
9.5.7	Çevresel Etki Değerlendirmesi .....	124
10.	RÜZGAR ENERJİSİ İLE DİĞER ENERJİ KAYNAKLARININ MALİYET AÇISINDAN İNÇİLENMESİ .....	127
10.1	Tanıtım .....	127
10.2	Maliyet Analiz Kriterleri.....	127



10.2.1 Sermaye ve Sermayenin Maliyeti .....	128
10.2.2 İşlenecek Kaynağın Maliyeti.....	128
10.2.3 İşletme Maliyeti .....	128
10.2.4 Dış Maliyetler .....	128
10.3 Muhtelif Enerji Kaynaklarının Maliyet analizleri.....	128
10.4 Rüzgar Enerjisi Maliyet Analizi .....	130
10.5 Dış Maliyetler .....	138
10.5.1 İnşaat Alanı .....	138
10.5.2 Çevresel Etkiler.....	139
10.5.3 İnşaat Alanının İncelenmesi.....	139
10.5.4 Çevresel Etkilerin İncelenmesi .....	140
11. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	142
KAYNAKLAR .....	157
EKLER .....	162
ÖZGEÇMİŞ .....	163



## SİMGE LİSTESİ

P	Basınç (N/m <sup>2</sup> )
$\bar{V}$	Hacim (m <sup>3</sup> )
m	Kütle (kg)
$\bar{m}$	Molar kütle (kg/kmol)
R	İdeal gaz sabiti (kJ/kg.K)
$\bar{R}$	Universal gaz sabiti (kJ/kmol.K)
T	Sıcaklık (Kelvin)
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
E <sub>B</sub>	Birim Kinetik Enerji (Watt/m <sup>2</sup> )
V	Rüzgar hızı (m/s)
V <sub>1</sub>	h <sub>1</sub> yüksekliğin ölçülen rüzgar hızı (m/s)
V <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı (m/s)
h <sub>1</sub>	Rüzgar şiddetinin ölçüldüğü yükseklik (m)
h <sub>2</sub>	Rüzgar şiddetinin hesaplamak istendiği yükseklik (m).
$\alpha$	Pürüzlülük katsayısı (birimsizdir ve 0,01-1,0 arasında)
A	Rüzgar esme yönüne dik Alan (m <sup>2</sup> )
U	Rüzgar yönündeki uzunluk (m)
t	Zaman (s)
c	Ölçek değişkeni (m/s)
k	Şekil değişkeni
f(v)	Rüzgar hızı frekansı
C <sub>D</sub>	Sürüklenme katsayısı
D	Sürüklenme kuvveti (N)
A <sub>b</sub>	Kanat alanıdır (m <sup>2</sup> )
C <sub>L</sub>	Kaldırma katsayısı
L	Kaldırma kuvveti (N)
C <sub>p</sub>	Güç katsayısı
$\alpha_h$	Hücum Açısı (°)
V <sub>o</sub>	Türbin rotoruna yaklaşan rüzgar hızı (m/s)
V <sub>d</sub>	Rotor düzleminde rüzgarın hızı (m/s)
V <sub>w</sub>	Rotordan uzaklaşırken rüzgarın hızı (m/s)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
N	Rüzgarın getirdiği güç (W)
F	Hava akımına dik olarak yerleştirilen rotor üzerinde oluşan kuvvet (N)
N <sub>r</sub>	Rotordan elde edilecek güç (W)
$\lambda$	Uç hız oranı
$\Omega$	Rotorun açısal hızı (1/s)
n	Rotor devir sayısı (dev/dak)
$\sigma$	Katılık Oranı
A <sup>o</sup>	Rotor kanatlarının toplam alanı (m <sup>2</sup> )
n <sub>pervane</sub>	Pervanenin düşük rotasyonel hızı
n <sub>jeneratör</sub>	Jenaratörün rotasyonel hızı
r	İletim oranı
p	Kutup sayısı
f <sub>şebeke</sub>	Şebeke frekansı
z <sub>o</sub>	Pürüzlülük uzunluğu (m)
h	Pürüzlülüğe neden olan elemanın yüksekliği (m)

S Rüzgara karşı gelen dikey kesit alanı (m<sup>2</sup>)  
A<sub>H</sub> Arazi üzerine dağılmış olan yatay kesit alanı (m<sup>2</sup>)



## KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AKRES	Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali
AREB-TŞ	Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi
ARGE	Araştırma Geliştirme
BGK	Basınç Gradyanı Kuvveti
DERT	Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
E	Kinetik Enerji
ECU	Avrupa Para Birimi
EİE	Elektrik İşleri Etüd Dairesi
EİKT	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
EWEA	Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği
GW(h)	Gigawatt (saat)
KW(h)	Kilowatt (saat)
MW(h)	Megawatt (saat)
NFFO	Fosil Dışı Yakıt Sorumluluđu
NPV	Net Bugünkü Değer
IEA	Uluslararası Enerji Birliği
IRR	Geri Ödeme Oranı
PWR	Ağır Su Reaktörü
RES	Rüzgar Elektrik Santrali
RED	Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi
RS	Rüzgar Santrali
RT	Rüzgar Türbini
TW(h)	Terawatt (saat)
TEAŞ	Türkiye Elektrik Üretim İletim Anonim Şirketi
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TÜREB	Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
WASP	Wind Atlas Analysis and Application Program
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri
YİD	Yap İşlet Devret

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Rüzgar gücünden elektrik enerjisi üretimi için kullanılan ilk türbinler	4
Şekil 2.2 2 Kanatlı Rüzgar Türbini	5
Şekil 2.3 3 Kanatlı Rüzgar Türbini	5
Şekil 2.4 Juul tarafından kullanılan ilk alternatif akım üreten Jeneratör	6
Şekil 2.5 İlk Gedser türbini	6
Şekil 2.6 Gedser'de kurulan 200 kw'lık rüzgar Jeneratörü	6
Şekil 3.1 Kıtaların rüzgar payları	15
Şekil 3.2 2000-2003 yılları arası Avrupa'da rüzgar enerjisi değerleri	16
Şekil 3.3 Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel alanları haritası	17
Şekil 3.4 Çeşitli gözlem yerlerine göre E.İ.E yıllık ortalama rüzgar hızları değerleri	18
Şekil 3.5 yenilenebilir enerji programı 1995-1998 yılları arasında desteklediği proje yatırımları	26
Şekil 3.6 Santrallerin elektrik enerjisi maliyetleri	27
Şekil 3.7 1990-1999 yılları arasında ülkemizde elektrik enerjisi tüketimi	35
Şekil 4.1 Rüzgar gülü şablonu	36
Şekil 4.2 Frekans (sıklık) hesabı yapılmış rüzgar gülü	37
Şekil 4.3 A tankından B tankına hareket gösterimi	39
Şekil 4.4 Basınç gradyanı kuvvetinin oluşumu	40
Şekil 4.5 Nehrin geniş ve dar bölgelerindeki akışlar	40
Şekil 4.6 Jeostrofik rüzgarın oluşumu	42
Şekil 4.7 Weibull dağılımı	47
Şekil 5.1 Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri	49
Şekil 5.2 Akışhatlı (streamlined) bazı cisimler	50
Şekil 5.3 Asimetrik ve simetrik kanat profili	51
Şekil 5.4 Kanat profili üzerine etkiyen kuvvetler	51
Şekil 5.5 Rüzgar türbinini etkileyen temel kuvvetlerin gösterimi	53
Şekil 5.6 Rotorda hızlar	54
Şekil 5.7 $C_p$ 'nin $V_w/V_0$ 'nun fonksiyonu olarak çizilmiş eğri	57
Şekil 5.8 Üç kanatlı RT	58
Şekil 5.9 Nordex N43/600 rüzgar türbininin resmi	59
Şekil 5.10 Windtec 650 rüzgar türbininin mekaniksel şeması	60
Şekil 5.11 Nordex N54/1000 KW rüzgar türbininin nasel kısmında bulunan elemanlar	61
Şekil 5.12 2 Kanatlı RT	62
Şekil 5.13 Tek kanatlı RT	63
Şekil 5.14 Stall Olayının meydana gelmesi	64
Şekil 5.15 Profil etrafındaki hava akışı	64
Şekil 5.16 Profil etrafındaki hava akışı	66
Şekil 5.17 Pitch ve stall kontrollü RT'lerde değişken ve sabit hızlı pervanelerin güç zaman serisinin davranışı	68
Şekil 6.1 Kanat Ucundaki Hız	69
Şekil 6.2 Rüzgar Türbin Dizaynları	70
Şekil 6.3 Rüzgar Türbinlerinin Sıfırlandırılması	71
Şekil 6.4 İki kanatlı rotorda hava akışının şematik gösterimi	72
Şekil 6.5 Dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT)	73
Şekil 6.6 İngiltere'de Cornwall, Delabole'de rüzgar türbininin temelini atılması	77

Şekil 6.7	Kule montajı .....	78
Şekil 6.8	Rüzgar türbininin naselinin montajı .....	78
Şekil 6.9	Rotorun montajı yapılırken vinçle kaldırılması .....	79
Şekil 7.1	Senkron jeneratör .....	82
Şekil 7.2	Asenkron Jeneratör .....	83
Şekil 7.3	Tipik bir 600 kW RT'nin güç eğrisi .....	84
Şekil 7.4	Güç eğrisi hesaplamak için kurulmuş bir sistem .....	85
Şekil 7.5	Sabit hızlı Jeneratörün şebekeye bağlanması .....	86
Şekil 7.6	Değişken hızlı Jeneratörün şebekeye bağlanması .....	87
Şekil 8.1	Danimarka'da yel değirmeni örneği .....	92
Şekil 8.2	California Palm Springs'deki rüzgar tarlası.....	92
Şekil 8.3	Danimarka'da gelişmiş rüzgar türbini .....	93
Şekil 8.4	Hollanda'da denizüstü rüzgar santralleri .....	98
Şekil 8.5	Danimarka'da gelişmiş denizüstü rüzgar santralleri.....	99
Şekil 8.6	Almanya'daki NORDEX rüzgar santrallerinden oluşan rüzgar çiftliği..	107
Şekil 8.8	Hollanda'daki rüzgar çiftliği .....	107
Şekil 9.1	Rüzgar çiftliği değerlendirme programı.....	112
Şekil 9.2	Bir rüzgar türbini tarlasının yerleşim şekli .....	113
Şekil 9.3	9200 P marka anemometre direği .....	115
Şekil 9.4	Anemometre ölçüm direği .....	116
Şekil 9.5	Veri yongalarının bulunduğu veri toplayıcı .....	117
Şekil 9.6	NRG 9200 PLUS hız ve yön sensörleri .....	117
Şekil 9.7	Herhangi bir engelin rüzgar akışına etkisi .....	118
Şekil 9.8	Cismin üstünden bakıldığında türbilans etkisi alanının görüntüsü .....	118
Şekil 9.9	Ağaçların rüzgara engel teşkil ederek türbülans meydana getirmesi.....	119
Şekil 10.1	Enerji fiyatları – faiz oranları ve amortisman sürelerine göre oluşan grafik .....	131
Şekil 10.2	Muhtelif enerji kaynaklarının minimum üretim maliyetleri .....	133
Şekil 10.3	Muhtelif enerji kaynaklarının maksimum üretim maliyetleri .....	134
Şekil 10.4	Muhtelif enerji kaynaklarının üretim maliyetlerinin ortalaması .....	135
Şekil 10.5	Santral tipi ve yatırım maliyetlerinin karşılaştırılması.....	137
Şekil 10.6	Enerji fiyatlarının yıllara göre kaynaklar açısından grafikte gösterimi...	138

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Birincil enerji talebi karşılama oranları .....	8
Çizelge 2.2. Kişi başına gelen enerji tüketimi değerleri .....	8
Çizelge 2.3. Karşılaştırmalı emisyon miktarları .....	10
Çizelge 3.1. Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü .....	14
Çizelge 3.2. Avrupa'da rüzgar enerjisi .....	19
Çizelge 3.3. Avrupa ülkelerinde rüzgar için yöre ve teknik potansiyel özeti .....	23
Çizelge 3.4. 1 kwh enerjinin üretim maliyetleri .....	27
Çizelge 3.5. Türkiye'de kurulma hazırlıkları sürdürülen rüzgar güç santralleri .....	28
Çizelge 3.6. Rüzgar enerjisi projeleri (Olumlu DPT görüşü alan ve Danıştaya gönderilecek) .....	30
Çizelge 3.7. Rüzgar enerjisi projeleri.....	30
Çizelge 3.8. Rüzgar enerjisi projelerinin illere göre dağılımı.....	31
Çizelge 3.9. Türkiye rüzgar enerjisi için mümkün hedefler .....	32
Çizelge 3.10. Türkiye rüzgar endüstrisi tarafından yaratılacak iş sayısı .....	32
Çizelge 3.11. Rüzgar enerjisi kullanımıyla oluşturulabilecek üretim kapasitesi payları .....	33
Çizelge 3.12. Ülkemizde elektrik enerjisi kullanımının dağılımı .....	35
Çizelge 4.1. Hakim rüzgar yönleri.....	42
Çizelge 6.1. Kullanılmakta olan rüzgar türbin tipleri ve bunların kullanım yerleri ....	74
Çizelge 7.1. Gerilim sistemi çeşitleri ve RT kapasiteleri.....	88
Çizelge 9.1. Engel türleri ve geçirgenlik değerleri .....	120
Çizelge 10.1. Termik Santral maliyetleri ve durumları .....	130
Çizelge 10.2. Ülkelere ait faiz oranları ve vadeleri.....	130
Çizelge 10.3. Rüzgar enerjisi maliyetleri .....	131
Çizelge 10.4. Muhtelif enerji kaynaklarının maliyetleri.....	132
Çizelge 10.5. Santral tipi ve yatırım maliyetlerinin karşılaştırılması .....	136
Çizelge 10.6. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) emisyonu.....	140
Çizelge 10.7. Sülfürdioksit (SO <sub>2</sub> ) emisyonu .....	140
Çizelge 10.8. Nitrojenoksit (NO <sub>x</sub> ) emisyonu .....	141
Çizelge 11.1. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi İçin Mümkün Hedefler .....	150
Çizelge 11.2. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Tarafından Yaratılacak İş Sayısı .....	150
Çizelge 11.3. ETKB'nin Elektrik Kapasitesi Öngörümü ve YEKAB Güç Hedefleri..	151



## ÖNSÖZ

Enerji ihtiyacının giderek arttığı dünyada ve ülkemizde enerji ile ilgili çalışmalar da önem arz etmektedir. Fosil yakıtların tükenebilir ve çevre dostu olmayışı insanoğlunu yeni kaynaklar aramaya itmiştir. Son yıllarda rüzgar enerjisi bu kaynakların başında gelmektedir. Yenilenebilir ve temiz enerji kaynağı olan rüzgar ile ilgili çalışmalar ilgi odağı haline gelmiştir. Türkiye bu yönden şanslı bir coğrafyada bulunmaktadır.

Tez çalışmam dolayısı ile bana sürekli yol gösteren ve bu konuyu sevdiren tez danışmanım Sn. Yrd. Doç. Dr. Burhan SUNGU'ya teşekkürü borç bilirim.

Tez için gerekli fotoğraf ve (kaynak) kullanmama izin veren AK-EN A.Ş. Yönetim Kurulunda çalışan Sn. Naci Ekşi'ye, rüzgar türbinleri ile ilgili teknik bilgileri bana sağladıkları için, AN Windenergie GmbH'den Herr Dirk Heuer ve Türk dewind firması yetkililerinden Christian Johannes'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak bu tezin her aşamasında kendisine danıştığım ve faydalandığım TEDAŞ'tan Sn. Faruk Çoban'a, ilk günden itibaren bana destek olan sevgili aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

## ÖZET

Rüzgarın taşıdığı kinetik enerjiyi toplayan ve diğer enerji türlerine çeviren makinalara “RüzgarTürbinleri” denir. Tipik bir rüzgar türbini şu kısımlardan oluşur: Rotor (kanatlar ve göbek), Vites kutusu, Jeneratör, Güç kontrol sistemi ve Kule’dir.

Genelde, rüzgar türbinleri iki ana gruba ayrılırlar. Bunlar yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinleri olarak adlandırılırlar.

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde en önemli eleman rüzgar türbinidir. En yaygın kullanılan çeşidi yatay eksenli pervaneli türbinlerdir, bunun yanında Darrieus tipi rotorlu tipler, Cyclogyro tip rotorlu türbinler, ufak boyutlu Savonius tip rotorlu türbinler karşımıza çıkan çeşitler arasındadır.

Bu çalışmada teknik açıdan rüzgar türbinlerinin çeşitlerine, elektrik sistemlerine, güç üretimlerine ve de güç kontrollerine değinilmiştir.

Enerji üretim maliyetleri her geçen yıl arttıkça alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi de artmaktadır. Güneş, dalga, Jeotermal ve rüzgar gücü ile ilgili bir çok proje dünya genelinde hükümetler tarafından desteklenmektedir. Rüzgar enerjisi ise bunların içerisinde en fazla dikkat çekendir.

Elektrik üretimi sağlamak için günümüzde rüzgar türbinlerini üreten birçok firma vardır. Bu çalışmada rüzgar çifliğı tasarımı için gerekli parametrelerin incelenmesi, teknik fizibilite ve mühendislik tasarımlarının ne olduğu, bu parametrelerin ticari açıdan uygun olup olmadığı, rüzgar potansiyelinin modellenmesi anlatılarak bilgi verilmiştir. Ayrıca ekonomik analiz baz alınarak geri ödeme oranlarına ve net bugünkü değer unsurları gözönüne alınmıştır.

Türkiye’nin rüzgar gücü potansiyelinin ne olduğu gelecek yıllardaki yatırımların ülkemiz için önemi, muhtelif enerji kaynaklarının üretim ve yatırım maliyetlerinin rüzgar enerjisi ile karşılaştırılması, diğer enerji santrallerinin çıkardıkları emisyon miktarlarının rüzgar santralleriyle karşılaştırılması bu çalışmada yer almıştır. Maliyet analizlerinin ve teknik açıdan yapılan bu incelemenin ileride rüzgar enerjisine ilgi duyanlara yardımcı olacak kanısındayım.

**Anahtar Kelimeler :** Rüzgar türbini, geri ödeme oranı, net bugünkü değer, elektrik üretimi maliyeti, yatırım maliyeti

## ABSTRACT

“Wind Turbine” is such a machine that gets the kinetic energy from the wind and converts it into other kinds of energy systems. There are five main parts in the wind turbines. These parts are: Rotor (blades and hub), Gear box, Generator, Power Control System and Tower.

Generally, there are two main groups of the wind turbines. These are called as “Horizontal and vertical – axis wind turbines.”

The most common used machine in the wind energy wind turbines is horizontal-axis wind turbines having three or more blades. The other common used ones are Darrieus, Clcylogyro and Savonius turbines.

In this study, from the technical view, the types of wind turbines, their electrical systems, power supply, grid connection and power control systems are explained

As the cost of energy increases each year, long neglected alternative energy is receiving more attention. Many projects involving solar, tidal, geothermal and wind power are being sponsored by governments around the world. However, wind energy receives more attention day by day.

Today, there are several companies that sell windmills and windturbines for the production of electricity. In this study the necessary parameters for the wind farm projects are observed. The technical feasibility and engineering projects are made clear and it has been examined whether the parameters are convenient from the commercial aspect or not. Also there is a modeling for the wind analysis which helps us to approach wind potential more easily. On the other hand, Internal Rate of Return and Net Present Value are discussed by the help of economic analyses.

In this study; the wind energy potential of Turkey, the future investments for Turkey’s wind energy potential are presented. The importance of these investments are reflected throughout the study. Besides, the comparison between the electricity production costs and the investments costs within different kinds of energy sources are made. The results are gathered and the wind energy is compared in the end. There’s an other comparison between air emission of wind and other fuels. Again the results are taken into consideration, as well. I

hope; this research will help the people who are interested in wind cost analysis and wind energy technology.

**Keywords :** Wind turbine, internal rate of return, net present value, electricity production cost, investment cost.



## 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji üretimi ve tüketimi, milletlerin refah seviyelerini gösteren bir ölçüdür. Yaşadığımız çağın diğer çağlara göre en önemli farkı, enerji tüketiminin çok büyük boyutlara ulaşmış olmasıdır.

Yaygın olarak kullanılan enerji kaynaklarının çoğu fosil kaynaklı olup, rezervleri gittikçe tükenmektedir. Bu kaynaklar gelecek için ölü enerji kaynaklarıdır. Bu nedenle mevcut kaynakların ekonomik bir şekilde kullanılması ve yeni enerji kaynaklarının bulunması gerekmektedir.

Bu yeni enerji kaynaklarının araştırılmasında, aslında pek yeni olmamakla beraber yüzyıllardır kullanılan rüzgar enerjisinin önemli bir yeri vardır.

Rüzgar enerjisinin üstünlüğü yaygın ve tükenmez oluşundan kaynaklanmaktadır. Rüzgar enerjisi diğer enerji biçimlerine çevrilirken, kirlenmeye yol açmaz. Rüzgarın düzensiz ve yoğunluğunun küçük olması dezavantajlarıdır.

Rüzgar enerjisinden istenilen düzeyde yararlanmak için uygun dizayn, inşa usulleri ve tesis yeri seçimi gibi iç içe olan öğelerden meydana gelen meseleye üç ana aşamada yaklaşmak gerekmektedir.

- Tesisin kurulacağı yörede rüzgar ölçümleri yapılarak rüzgar karakteristiklerinin tayini ve yer seçimi.
- Amaçlara ve rüzgar karakteristiklerine uygun (tip, büyüklük,...vs) rüzgar tahrikli makinaların dizaynı ve geliştirilmesi.
- Sistemin enerji depolanmasına ihtiyaç göstermeden, verimli olarak çalışmasının temini.

Bir çok ülkede yukarıda sayılan maddelerden ilk ikisi ile ilgili olarak ayrıntılı çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır. Son madde ile ilgili nispeten az çalışma vardır. Ancak yapılan bu çalışmaların hepsi ilgili ülkelerin yararları doğrultusunda yapıldığı için, sadece rehber çalışmalar olarak görülmelidir.

Ülkemizde de bu konuda çalışmalara yeni yeni başlanmaktadır. Fakat istenen düzeyde değildir. Bu konuda TBTA, EİEİ ve çeşitli üniversitelerde araştırma grupları oluşturulmuştur.

## 2. RÜZGAR ENERJİSİ

### 2.1 Rüzgar Gücü Kronolojisi:

M.Ö. 2800: Mısırlılar tarafından ticari amaçlı yelkenlilerde kullanıldı.

IX. yy: Persler tarafından yel değirmeni olarak.

XI. yy. Avrupa'da özellikle Hollanda'da.

16. yy: Danimarka, Hollanda, Almanya'da yel değirmenlerinde.

1840: Kaliforniya'da.

1846-1908: Paul la Cour, modern elektrik üretim rüzgar türbinleri.

1918: Danimarka'da toplam 3 MW.

1920-1930: Danimarka – 3000 türbin.

1932 – 15 m/s rüzgar hızında 20 MW'lık bir türbin tasarlandı, sadece kağıt üzerinde kaldı.

1942: Modern rüzgar teknolojisinin başlangıç tarihi.

1941-1945: Smith/Putnam tarafından 1250 kW'lık türbin kuruldu. ABD'de 1945'de kapandı.

1950: Amerika'da orta batıda 50.000 küçük türbin.

1956-1957: J. Juul, Danimarka'da 200 kW'lık Gedser rüzgar türbini.

1958: Ulzich Hütter, Hannof tezine göre 10 kW'lık deniz üstü türbin kurdu. Meksika Körfezi'ne bir petrol platformuna kuruldu.

1971: Taşkent, Rusya.

1974: İsveç – 1 MW

1979: 2 tane 630 kW üretildi.

1980 – 1981: Endüstriyel ve teknolojik sıçrama – Modern türbinlerin gelişimi.

1985: 1000'den fazla türbinden oluşan Kaliforniya Rüzgar çiftliği.

1983-1987: Vorth-Hütter türbini, 300 kW, Kuzey Denizi kıyısında.

1990: Almanya'da 4 tane Man'ın yaptığı Grouden II.

1991: Baltık Denizi'nde Danimarka'da deniz üstü (11 x 450 kW)

1995: 1500 kW'lık Neg Micon türbinleri.

1996: 1500 kW ve 1650 kW'lık Vestas türbinleri.

1997: Buzlu ve soğuk yerler için rotor kanadı siyah yapıldı.

1998: 1,5 MW'lık Enercon E66'lardan oluşan Almanya'da Avrupa'nın en büyük rüzgar çiftliği (52,5 MW) kuruldu.

1999-2003: 2 MW ve 3 MW çalışmaları.

## 2.2. Rüzgar Enerjisi İlk Kıpırdanışları

Rüzgar enerjisi kullanımı günümüzden çok öncelere dayanmaktadır. Sanılanın aksine ilk defa, Asya medeniyetlerinden olan Çin, Tibet, Hindistan, Afganistan ve İran'da kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgar Türbeleri (RT) kullanımına ait ilk yazılı bilgiler Büyük İskender tarafından M.Ö. 200 ~ 300 yıllarında basit yapıdaki yatay – eksenli RT'leri hakkındadır. Ayrıca M.Ö. 700 yıllarında Farşlıların da düşey – eksenli RT'lerin kullanıldığı somut kanıtlardan bilinmektedir (Golding, 1955).

Rüzgar gücü kullanımı, Asya'dan Avrupa'ya 10.yüzyıl civarında geçmiştir. Bu geçişin ilk belirtileri olarak 11.ve 12.yüzyılda İngiltere'de rüzgar millerinin kullandığı bilinmektedir. Mesela 1190'lı yıllarda alman Haçlıları rüzgar millerini Suriye'ye getirmiştir. Dolayısı ile ortaçağ döneminde rüzgar enerjisinin Avrupa'da kullanıldığını görmekteyiz. O dönemlerde ve hala günümüzde birçok ülkede çiftçiler tarafından kullanılan rüzgar milleri daha çok kuyulardan su çekmek amacıyla yönelik olarak kullanılmıştır. Hollanda ve Akdeniz'deki bir çok adada bunların örneklerini görmekteyiz.

Endüstri devrimi ile beraber, 18.yüzyılda buhar makinalarının ortaya çıkması sonucu dünya, enerji gücünün temini için termodinamik işlemlere dayanan makinalardan yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile beraber, bu makinalar daha avantajlı duruma gelmiştir. İstenildiği-zaman enerji kaynağı sağladıkları için, rüzgar enerjisinden daha popüler hale gelmiştir. Bu yüzden 19.yüzyılda ve 20.yüzyılın ortalarına kadar rüzgar enerjisinin önemi azalmıştır. Sadece Amerika, Rusya ve Avusturya gibi nüfusu dağınık olarak bulunan ülkelerde rüzgar enerjisi çiftçiler tarafından su çekmek için kullanılmıştır.



Günümüzde rüzgar enerjisine olan rağbet arttığından, potansiyel belirleme ile ilgili birçok çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar hem teorik hem de pratik amaçlı olmaktadır. Rüzgar enerjisi çalışmalarında dünyadan örnek olarak (WMO, 1981), Irak (Darwish and Sayigh, 1988), Croatia (Proje ve Cividini, 1988) ve Lübnan (Habali vd., 1986) sayılabilir. Ülkemizdeki örneklere ise Gökçeada (Tolun vd., 1995), Çeşme (Dündar ve İnan, 1995), Türkiye (Öney vd., 1980) verilebilir.

### 2.3 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Öncüsü : Poul La Cour

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmeyi düşünen ilk kişi olan Poul La Cour (1846-1908). Askov Danimarka'da yaşamıştır. Aslında meteoroloji eğitimi almış bir kişi idi (Vosburgh, 1983). Rüzgardan elektrik üreten ilk türbini 1891 yılında yapmıştır. La Cour aynı zamanda aerodinamik alanında yaptığı çalışmalar ile de tanınmıştır. Bazı teorik deneyler için rüzgar tüneline de ilk defa o kullanmıştır. La Cour Askov Folk High School'da rüzgar enerjisi ile ilgili çeşitli dersler vererek konunun önemini anlatmaya çalışmıştır.

### 2.4 La Cour'un İlk Rüzgar Türbinleri (RT):

Askov Folk High School'da 1897 yılında La Cour tarafından yapılan RT, 89 W gücünde idi (Şekil 2.1)



Şekil 2.1 Rüzgar gücünden elektrik enerjisi üretimi için kullanılan ilk türbinler

1905 yılında La Cour'un kuruculuğunu yaptığı Rüzgar Elektrikçileri Birliği'nin (Society of Wind Electricians), 356 üyesi bulunmakta idi. Dünya'da rüzgar enerjisi ile ilgili bilinen

Journal of Wind Electricity isimli ilk dergi de La Cour'un editörlüğünde bu birlik tarafından yayınlanmıştır. Böylelikle, Danimarka'da rüzgar kuvvetinin elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımı yaygınlaşmıştır.

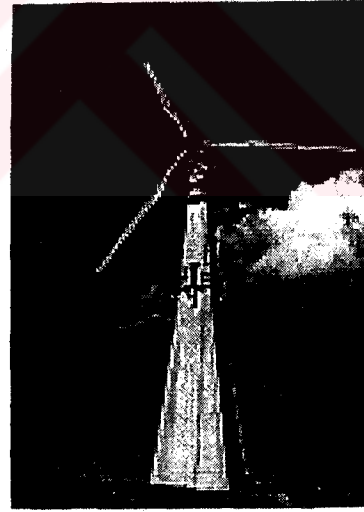
Diğer taraftan, 1918 yılına ulaşıldığında, Danimarka'da elektrik üretim amaçlı 120 adet RT bulunmakta idi. Güçleri 20 ile 35 kW arası değişen bu türbinler, toplam 3 MW kurulu gücüne ulaşmıştı.

### 2.5 1940 Sonrası Yıllarda Rüzgar Enerjisinin Dünya'da Durumu:

İkinci Dünya Savaşı yıllarında Danimarkalı bir şirket olan F.L. Smith, 2 ve 3-kanatlı RT'leri inşa etmiştir (Şekli 2.2 ve 2.3). Bu türbinler de, öncekiler de olduğu gibi doğru akım üretiyorlardı.



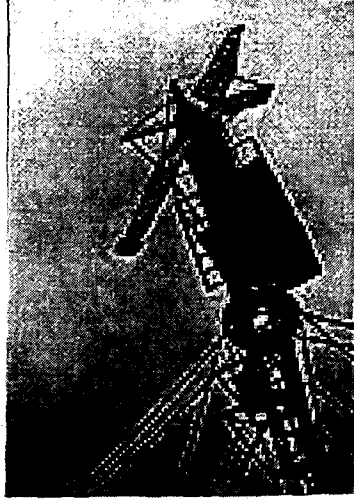
Şekil 2.2 2-kanatlı RT



Şekil 2.3. 3-kanatlı RT

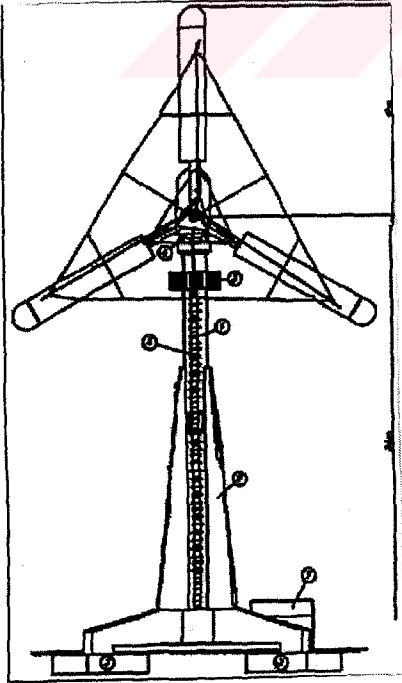
Şekil 2.3'de görülen 3-kanatlı RT, 1942 yılında Bogo adasında elektrik üretimi için kurulmuştu. 1951 yılından sonra doğru akım üreten jeneratörler, yerlerini yavaş yavaş alternatif akım üreten 35 kW asenkron jeneratörlere bırakmaya başlamışlardır.

Mühendislik eğitimi almış olan Johannes Juul ve Vester Egeborg, Poul La Cour'un ilk öğrencilerindendi. Juul, 1950'lerde dünyada kullanılmaya başlanan alternatif akım üreten jeneratörlerin öncüsü olmuştur (Şekil 2.4)

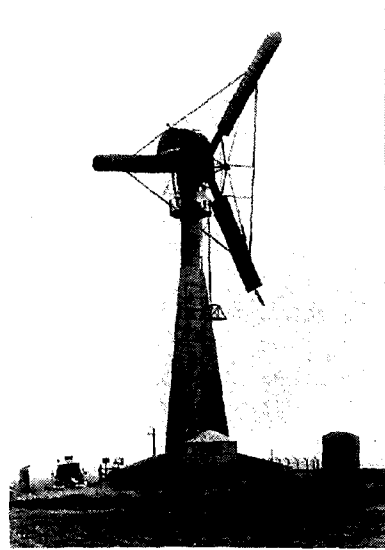


Şekil 2.4 Juul tarafından kullanılan ilk alternatif akım üreten jeneratör.

Daha sonra 1956-1957 yıllarında 200 kW gücünde ilk Gedser RT, Juul tarafından Gedser'de SEAS elektrik şirketi için yapılmıştır (Şekil 2.5). Gedser türbini günümüzde kullanılan RT'lere öncü nitelikte özelliklere sahiptir. Bunlar 3-kanatlı, elektro mekanik yaw (yönerge) sistemli ve asenkron motor kullanmakta idi, Stall kontrol prensibine göre çalışan Gedser türbininde, ayrıca aerodinamik uç freni bulunmakta idi. Bu sistem günümüzde kullanılan Stall kontrollü türbinlerde hala bulunmaktadır.



Şekil 2.5 İlk Gedser türbini



Şekil 2.6 Gedser'de kurulan 200  
KW'lık rüzgar jeneratörü

1960'lı yıllardan sonra rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ekonomik nedenlerle azama göstermiştir. Daha ucuz olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb) kullanılarak yapılan termik santraller revaçta olmaya başlamıştır. Fakat 1970'li yıllarda meydana gelen petrol krizi insanoğlunu tekrar alternatif enerji kaynakları aramaya itmiştir. Rüzgar, güneş, jeotermal vb gibi alternatif enerji kaynaklarının yenilenebilir olması, çevre kirliliğine yol açmaması, ham maddeye gereksinim duymaması gibi sebeplerden dolayı tekrar kullanılmaya başlanmıştır (Gündüz, 1997). Temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutan rüzgar enerjisinin kullanım nedenleri şöyledir:

## **2.6 Rüzgar Enerjisinin Kullanım Nedenleri:**

Türkiye'nin hedefi gelecekte enerji ihtiyacını karşılamada kendi kendine yetebilmektir. Bu, şu an için ulaşılması güç bir hedeftir. Mevcut enerji üretimimizin yaklaşık olarak % 61'inin dışa bağımlı kaynaklardan karşılandığı göz önüne alınırsa bu ibreyi aşağılara çekmek ülkemizin için hiç de kolay değildir. Su ve kömür kaynaklarımız sınırlı olduğuna göre elimizde doğal olarak alternatif enerji kaynakları kalmaktadır. Bunlar da daha çok güneş, rüzgar, jeotermalden sağlanabilir. Şu andaki sanayileşme ve büyüme hızıyla bu oranı aşağılara çekmek için muazzam yatırımlar yapmak zorunda olduğumuz bir gerçektir. Bunu yaparken bir yandan da mevcut hatlarımızı da iyileştirmek zorundayız.

Günümüzde hidroelektrik santral kurulabilecek her yer değerlendirilmiş veya değerlendirilmektedir. Mevsim şartlarından etkilendiği için kesin garanti olarak kabul edilemez. Yine doğal gaz santrallerinin gaz sıkıntısı dışa bağımlılığın en güzel örneğidir. Nükleer de ise yeterli uranyum rezervimizin olmamasından dolayı gene bağımlılığımız devam edecek.

Geriye kalan güneş, rüzgar, jeotermal ve diğer kaynaklarla ise birdenbire bütün ülke ihtiyacına cevap vermek oldukça zor ve pahalı olacaktır. Ancak şu da bir gerçektir ki; tüm bu saydığımız enerji kaynaklarını kullandığımız enerji çeşitliliği olan bir Türkiye yaratmalıyız. Sadece bir kaynağa yönelmek doğru olmaz. Ama ağırlığımızı temiz enerjiye ve özellikle de rüzgara yöneltmeliyiz. Mevcut olan bürokratik engeller olmasa 1 yıl içinde 1400 MW, 5 yılda ise 8-10000 MW kurulabilecekken bu sene içinde izin alabilen 240 MW olmuştur. Daha hızlı hareket etmek ve en son teknolojiyi, mümkün olan en büyük güçteki türbinleri getirmeliyiz. Hatta bunları yerli üretme yollarını aramalıyız. Böylece hem yeni iş kolları yaratılmış olur ve hem de ülke parası dışarı gitmez (Sarıkayalar, 1998).

Bahsettiğimiz gibi çok yakında sinyallerini yavaş yavaş veren bir enerji darboğazına girmek istemiyorsak enerji çeşitliliğini bir an önce dört koldan başlatmalıyız. Ama önceliği temiz ve hızlı olması bakımından rüzgara ayırmamızda fayda olacaktır. Tabii ki bunu yaparken bugüne kadar ihmal edilmiş bir jeotermal enerji de kesinlikle unutulmamalıdır. Sonunda şu birkaç yıl içinde çok akıllı davranıp sonra pişman olacak davranışlardan kaçınmalıyız. Unutulmamalı ki enerjisiz bir gelecek yoktur.

Çizelge 2.1 Birincil enerji talebi karşılama oranları (TWEA, 1997)

Yıl	Yerli Kaynaklar	İthalat
1998	% 39	% 61
2000	% 34	% 66
2010	% 29	% 71
2020	% 25	% 75

Çizelge 2.2 Kişi başına genel enerji tüketimi değerleri (TWEA, 1997)

Yıl	Kişi Başına Genel Enerji Tüketimi (Kg petrol eşdeğeri)
1998	1170
2010	2300

### 2.6.1 Temiz enerji kaynaklarının kullanım nedenleri:

Dünyamızda enerji ihtiyacı her yıl yaklaşık % 4-5 oranında artmaktadır. Buna karşılık bu ihtiyacı karşılayan fosil-yakıt rezervi ise, çok daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. En iyimser tahminler bile, en geç 2030-2050 yılları arasında petrol rezervlerinin büyük ölçüde tükeneceğini ve ihtiyacı karşılayamayacağını göstermektedir. Kömür ve doğal gaz için de benzer bir durum söz konusudur. (Şen, 1999)

Ayrıca fosil yakıtlarının kullanımı dünya ortalama sıcaklığını da son bin yılın en yüksek değerlerine ulaştırmıştır. Bu durum ise, yoğun hava kirliliğinin yanı sıra milyonlarca dolar zarara yol açan sel-fırtına gibi doğal felaketlerin gözle görülür şekilde artmasına neder

olmuştur. Şimdiden dünyanın deniz seviyesinde bulunan bir çok adasında yerleşim alanları, buzulların erimesi ve su seviyesinin yükselmesinden dolayı boşaltılmıştır. En kısa zamanda önlem alınmaması durumunda yakın gelecekte deniz kenarındaki birçok şehir sular altında kalacaktır. Bu nedenle insanoğlu fosil yakıt rezervlerinin bitmesini beklemeden temiz enerji kaynaklarına yönelmek zorundadır.

En kısa zamanda fosil yakıtlar yerine alternatif temiz bir çözümün getirilmemesi halinde birçok hayvan/bitki soyu tükenecektir. Bu durumda insanoğlunun da yaşam şartlarına son derece ağırlaşacaktır. Sadece egzoz gazlarındaki kurşun yüzünden doğan zihinsel özürlü çocuk sayısı on binler ile ifade edilecek boyutlara ulaşmıştır. Yoğun hava kirliliğinin tehdidi altındaki büyük şehirlerde yüzlerce insan hava kirliliği nedeniyle dolaylı olarak hayatını kaybetmektedir. Asit yağmurları yüzünden birçok doğal eko sistemler tamamen ölmüş, doğadaki gıda ve madde zinciri ile ağır metaller insan vücuduna aldıkları besinler ile birlikte girmeye başlamıştır.

Bu nedenle, kendini sınırsız tekrarlayan yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, su ve biokütle gibi) çok kısa bir süre içinde önem kazanacaktır. Bu gerçeğin farkında olan dev petrol şirketlerinin (Agip, Shell, BP gibi) araştırma ve geliştirme çalışmaları da tamamen söz konusu teknolojileri geliştirmek üzerine yoğunlaşmaktadır.

Türkiye, güneş ve rüzgar bakımından oldukça zengin bir ülkedir. Şimdiye kadar güneş enerjisi yalnızca güney yörelerimizde çok düşük verim ile su ısıtma amaçlı kullanılmıştır. Bu zenginliği boşa harcama lüksüne sahip olmayan yurdumuz için, tükenmeyen kaynaklar olan rüzgar ve güneş, önümüzdeki yılların ana enerji ve elektrik kaynağı olmaya adaydır.

İlk yatırım maliyetinden sonra, bakım ihtiyacı sıfıra yakın olan sistemlerin birim fiyatları dünya genelinde düşmeye başlamıştır. Bunun sonucunda, çok yakın bir gelecekte hem verim hem de maliyet olarak alternatif enerji kaynakları sistemleri, diğer konvansiyonel sistemler ile aynı seviyeye gelecektir.

Alternatif enerji kaynaklarının yaygın kullanımıyla, daha değişik bir dünya görüşü günlük yaşamımıza hakim olacaktır. Sınırsız ve sorumsuzca enerji tüketiminin yerini, bilinçli, çevreye saygılı ve ihtiyacı karşılamaya yönelik enerji kullanımı alacaktır. Böyle bir ortamda da refah düzeyini, en fazla enerji tüketen yerine, en verimli enerji kullanan belirleyecektir. Türkiye'de de benzeri bir anlayışın hakim olması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artacaktır.



## 2.6.2 Rüzgar enerjisinin avantajları ve dezavantajları:

### Avantajları:

1. Temiz, çevreyi kirletmeyen, yakıt parası olmayan bir enerjidir.
2. Rüzgar enerjisinde ulaştırma masrafları yoktur. Doğadaki rüzgar direkt olarak kullanılabilir.
3. Sürekli bir enerji kaynağıdır. Dışa bağımlılığı yoktur. Sadece yerel imkanlarla enerji elde edilir.
4. Özellikle dikkat edilecek başka bir hususta uzun dönem işletme masrafları diğer tüm enerji kaynaklarının içinde en az olanıdır.
5. Rüzgar türbinleri karmaşık makinalar değildir. Gayet basit bir şekilde operatöre ihtiyaç duyulmadan çalıştırılabilir. Tamamen otomatik olarak çalışabilecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Ayrıca bu şekilde sadece periyodik bakımların yapılması ile 20-30 yıla kadar çalışabilir.
6. Rüzgar türbinleri sanıldığı aksine gürültü rahatsızlığı da vermezler. Çıkarılmış olduğu ses bir çoğundan daha azdır.
7. Hava kirliliği yaratacak emisyon ve atık ısı oluşturmazlar. Rüzgar enerjisinin en büyük avantajı gerek sera etkisi gerekse de hava kirleticisinin ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  gibi) diğer yöntemlere göre az olmasıdır.

Çizelge 2.3 Karşılaştırmalı emisyon miktarları (AWEA, 2000)

Yakıt cinsi	Kwh başına düşen $CO_2$ miktarı (kg)	KWh başına düşen $SO_2$ miktarı (kg)	KWh başına düşen $NO_x$ miktarı (kg)
Kömür	0.967	0.0060836	0.0034504
Doğalgaz	0.46762	0.000003178	0.0008172
Petrol	0.70824	0.0050848	0.0009534
Amerika ortalaması karışık yakıt	0.69008	0.003632	0.0021792
Rüzgar	---	---	---



8. Rüzgar enerjisi işgücü ve istihdam demektir. Örnek olarak Danimarka'yı ele alırsak istihdam hacmini gayet iyi anlarız. Yeni iş kollarının yaratılması ile ekonomide canlanma meydana gelecektir. Yine New York'da yapılan bir çalışmaya göre, rüzgar enerjisinden üretilen 10 milyon kWh elektrik enerjisinin yine aynı elektrik miktarını üreten kömür santraline göre % 27 daha fazla ve gene doğal gaz kombine çevrim santralinden de % 66 daha fazla iş imkanı sağlamaktadır (Şen ve Şahin, 1997).
9. Artan petrol fiyatları, yeni çevre düzenlemeleri ve aniden ortaya çıkan başka maliyetleri olmadığı için vergi artırımını olarak vatandaşa yük olmaz.
10. Çok yer kaplamazlar. Aksi gibi deniz üstü olarak denize kurulabilen cinsleri karadan yer kazanma maksadıyla kullanılabilirler.
11. Patlama yapmazlar ve radyasyon yaymazlar. Dolayısıyla tehlikeli değildirler.
12. Rüzgar türbinlerinin bulunduğu yerler başka amaçlara hizmet edebilirler (tarla vb. gibi) Yani, diğer santraller gibi fazla yer işgal etmezler.
13. Eneri ücretsiz olup taşınma maliyetleri yoktur. Buna ilaveten de bir atık üretimi söz konusu değildir.
14. Herhangi bir radyoaktif ışınım tahrifatı yaratmamaktadır.
15. Atmosfere veya yakındaki nehir ve denizlere ısı emisyonları bulunmamaktadır.
16. Rüzgar türbinleri güvenlik açısından oldukça başarılı bir geçmişe sahiptir. Kullanım sonrasında tasfiye edilmeleri diğer enerji tesislerine göre çok kolaydır.
17. Rüzgar bir yerli enerji kaynağıdır. Ayrıca dünya enerji pazarlarından büyük ölçüde bağımsız olma özelliğine sahiptir.
18. Rüzgar türbinlerinin işletmeye alınması, inşaatın başlamasından ticari üretime geçişine kadar, üç ay gibi kısa bir sürede gerçekleşebilmektedir.
19. Rüzgar türbinleri modüler olup herhangi büyüklükte imal edilebilmekte ve tek olarak ya da gruplar halinde kullanılabilirler.

#### **Dezavantajları:**

1. İlk dezavantajı türbinlerin maliyetleridir. Birçok türbin teknik olarak başarılı çalışma göstermekte olup, maliyet biraz yüksektir. Ancak; işe çevre ve sosyal şartlar

bakımından bakacak olursak, rüzgar enerjisinin çevreyi kirletmediği gibi buna ilaveten temizlediği saptanmıştır. Yani gayet temiz bir enerjidir. Zaten türbin fiyatları da gün geçtikçe iyileşme göstermektedir. Zamanla fiyatlar diğer enerji kaynakları ile rekabet eder hale gelmiştir. Daha da iyi olacağı açıkça bellidir.

2. Bir başka dezavantaj ise, özellikle yurdumuzda da karşılaşıldığı gibi iyi derecede rüzgar alan bölgelerde arazilerin elde edilmesindeki zorluklar veya sit alanı olarak görülmesinden dolayı yaşanan zorluklardır.
3. Rüzgar santrali kurulması için gereken ekipmanların çoğunun ithal edilmesi ve bu yüzden de pahalı olması. Bu sorun bir an önce yerli sanayinin kurulması ile ortadan kalkacaktır.
4. Rüzgar enerjisi kullanımının en büyük dezavantajı rüzgarın değişken olmasıdır. Yeryüzünde rüzgarın sabit olduğu az yer vardır. Bu yüzden ki insanoğlu istediği her yere rüzgar santrali kuramaz. Aslında rüzgarın bu değişkenliği enerjinin depolanması yolu ile aşılabılır. Ancak bir hidroelektrikte olduğu gibi barajlar yardımıyla bu iş yapılamamaktadır. Fakat depolama mümkün olmadığından dolayı en sağlıklı yol rüzgardan elde edilen enerjinin direkt olarak ana güç şebekelerine verilmesidir.

Günümüzde rüzgar enerjisi sektörü yıllık toplam cirosu 2 milyar dolar olan dev bir sektör haline gelmiştir (FT, 1999). Günümüzde kullanılan rüzgar gücü, dünyada toplam elektrik enerjisi üretiminde % 1'lik bir paya sahip iken, önümüzdeki dönemde bu oranın artacağı tahmin edilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'nın yaptığı açıklamaya göre, ABD, 2020 yılında elektrik enerjisinin % 5'ini rüzgar gücünden temin etmeyi amaçlamaktadır (FT, 1999).

### 3. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ

#### 3.1 Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü:

Dünya geneline bakacak olursak, Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi Almanya, Amerika ve Danimarka kurulu rüzgar gücü bakımından ilk 3 sırayı paylaşmaktadırlar (Mays, 1999). İspanya ise bu listede hızla yukarıya doğru tırmanmaktadır. Türkiye ise 9 MW’lık kurulu rüzgar gücü ile son sıralarda yer almaktadır. Ancak proje aşamasındaki santrallerin kurulması ile beraber hızla liste başlarına doğru tırmanacağı açıktır.

Kıtaların rüzgar paylarına bakacak olursak Şekil 3.1’de Avrupa ve Amerika’nın başı çektiği görülmektedir (Mays, 1999). Şekil 3.2’de ise 2000-2003 yılları arasındaki Avrupa’daki rüzgar enerjisi değerleri verilmektedir (AREB – TŞ, 2000).

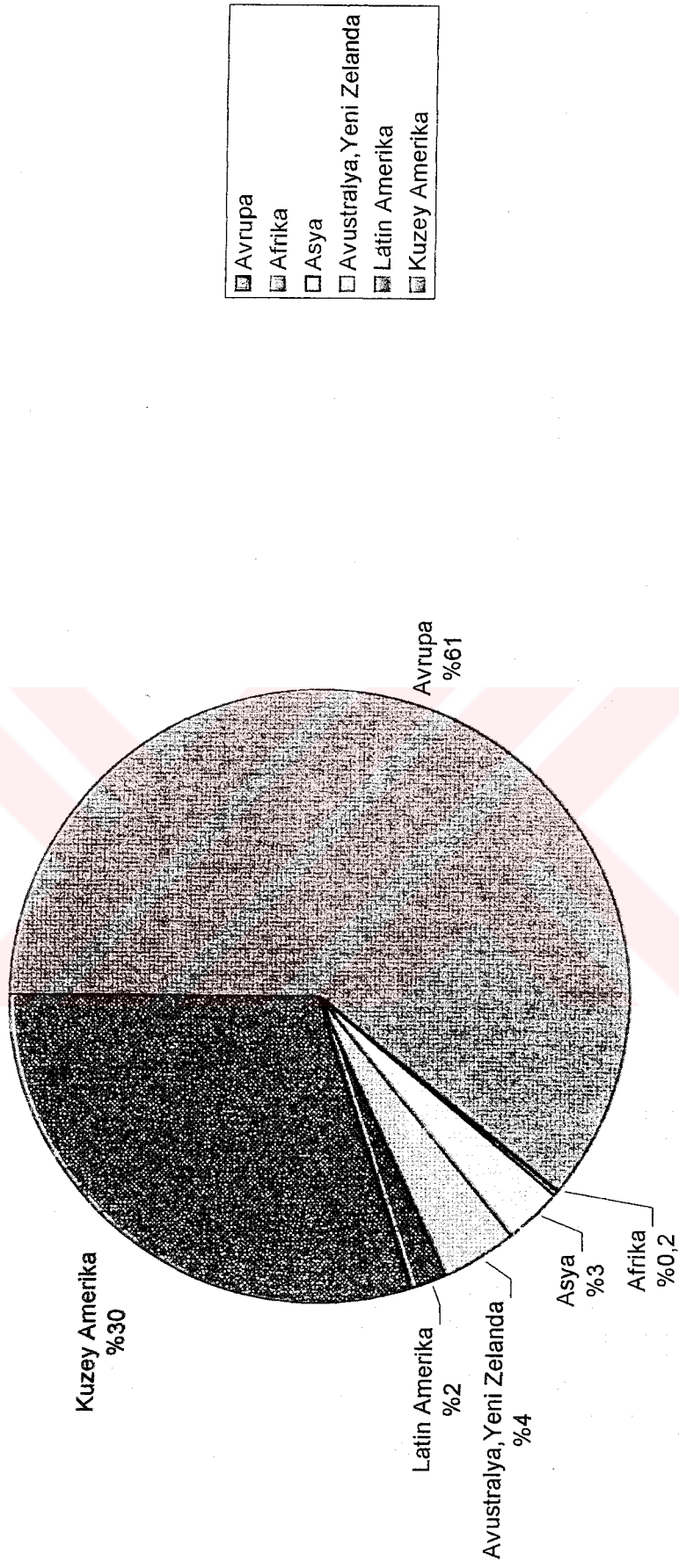
Diğer enerji kaynaklarına alternatif teşkil etmeden önce o kaynağın potansiyeli belirlenmelidir. Türkiye’de bu çalışmalar başlatılmış olup son zamanlarda hız verilmiştir. Rüzgar haritası çalışmaları halen devam etmektedir. Yapılan ölçümlere göre bir çok yer tespit edilmiş olup bu yerlerde özel firmalar tarafından projelendirilmiş rüzgar tarlaları mevcuttur. Bunlar genellikle Ege kıyılarında yoğunlaşmıştır. EİE tarafından çeşitli gözlem istasyonlarında rüzgar hızı verileri saptanmaktadır. Bu veriler doğrultusunda Şekil 3.3’deki bölgelere ayrılmış rüzgar haritası ortaya çıkmıştır. Bunun gibi daha detaylı haritaların çizilmesi ile beraber çok daha uygun projeler ortaya çıkacaktır. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere en fizibl bölge 1 ile gösterilen Batı Ege-Çanakkale-Muğla civarları ve Hatay’dır. Diğer bölgeler de harita üzerinde önem sırasına göre numaralandırılmıştır (E.İ.E, 1992).

Türkiye’de EİE’nin yürüttüğü rüzgar hızı belirleme çalışmalarına göre en yüksek rüzgar hızları Hatay, Çeşme, Gökçeada, Bozcaada’dır. Şekil 3.4’de bütün EİE ölçüm bölgelerinde elde edilen yıllık ortalama rüzgar hız verileri verilmiştir. Bu grafikten de anlaşıldığı gibi Ege ve Karadeniz kıyılarındaki rüzgar hızları oldukça yeterli hızlardır. Zaten bu yüzden ki kurulması planlanan rüzgar tarlalarının bir çoğu öncelikle Ege olmak üzere bu bölgeler için düşünülmüştür (E.İ.E, 1992).

Çizelge 3.1 Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü (Mays, 1999)

Ülke	1999 Mart (MW)	1998 sonu (MW)	1997 sonu (MW)	Nüfus 1996 (milyon)	Kurulu kapasite (Watt/Şehir)	Alan (km <sup>2</sup> )	Kurulu kapasite (kW/km <sup>2</sup> )	Brüt Millî Hasıla 1996 (bn.\$)	Kurulu Kapasite (MW/bn.\$)
Almanya	3.068	2.875	2.081	81,91	37,46	357.021	8,5943	2.364,60	1,3
Amerika	1.856	1.820	1.673	265,28	7	9.809.155	0,1892	7.433,50	0,25
Danimarka	1.560	1.448	1.148	5,26	296,54	43.094	36,1959	168,90	9,24
Hindistan	1.004	968	940	945,12	1,06	3.287.263	0,3056	357,80	2,81
İspanya	834	707	512	39,26	21,24	504.782	1,6522	563,20	1,48
Hollanda	369	361	319	15,52	23,78	41.865	8,814	402,60	0,92
İngiltere	341	333	319	58,78	5,81	242,9	1,4055	1.152,10	0,3
Çin	233	214	166	1221,72	0,19	9.572.395	0,0243	906,10	0,26
İtalya	223	180	103	57,38	3,88	301.323	0,7395	1.140,50	0,2
İsveç	187	174	122	8,84	21,14	449.964	0,4153	227,30	0,82
Kanada	82	82	25	29,96	2,74	9.958.319	0,0082	569,90	0,14
İrlanda	73	73	53	3,63	20,11	70.273	1,03888	62,00	1,18
Yunanistan	63	63	29	10,47	6,02	131.957	0,4774	120,00	0,53
Portekiz	60	60	38	9,93	0,37	92.345	0,6497	100,90	0,59
Japonya	47	47	18	125,76	3,97	377.819	0,1244	5.149,19	0,01
Avusturya	32	32	20	8,06	7,55	83.858	0,3816	226,50	0,14
Kostarika	26	26	20	3,44	0,12	51.060	0,5092	9,08	2,86
Brezilya	20	20	3	161,36	0,33	8.547.404	0,0023	709,59	0,03
Fransa	19	19	10	58,37	3,52	543.965	0,0349	1.533,60	0,01
Finlandiya	18	18	12	5,12	0,93	338.144	0,0532	119,10	0,15
Avustralya	17	17	11	18,31	0,37	7.682.300	0,0022	367,80	0,05
Arjantin	13	13	9	35,22	1,18	2.780.400	0,0047	295,13	0,04
Belçika	12	12	7	10,16	0,18	30.528	0,3931	268,60	0,04
İran	11	11	11	62,51	21,95	1.648.000	0,0067	49,70	0,22
Lüksemburg	9	9	2	0,41	2,05	2.586	3,4803	16,88	0,53
Norveç	9	9	4	4,38	0,14	323.758	0,0278	151,20	0,06
Türkiye	9	9	0	62,7	0,68	779.452	0,0115	177,50	0,05
Çek Cumhuriyeti	7	7	7	10,31	0,18	78.866	0,0888	48,86	0,14
Polonya	7	7	2	38,62	1,05	312.685	0,0224	124,68	0,06
İsrail	6	6	6	5,69	0,08	21.946	0,2734	90,31	0,07
Mısır	5	5	5	59,27	1,39	1.002.000	0,005	64,28	0,08
Yeni Zelanda	5	5	4	3,6	0,1	270.534	0,0185	51,66	0,1
Rusya	5	5	5	147,74	0,03	17.054.400	0,0003	356,03	0,01
Ukrayna	5	5	5	50,72	0,42	603.700	0,0015	60,90	0,08
Meksika	3	3	2	91,83		1.958.201	0,0727	304,60	0,01
İsviçre	3	3	3	7,07		41.284		313,70	0,01
<b>TOPLAM</b>	<b>10.242</b>	<b>9.603</b>	<b>7.694</b>						

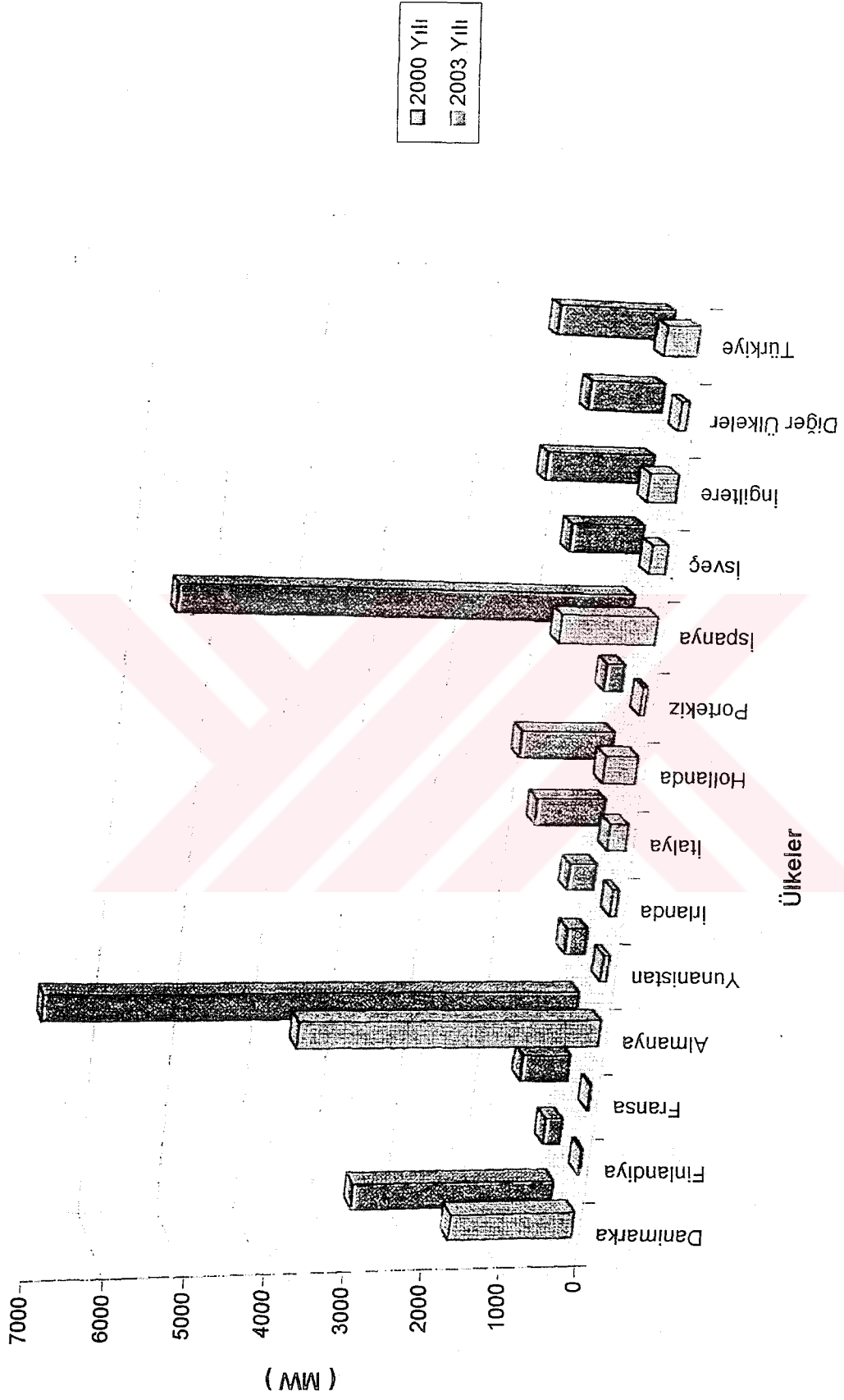
## KITALARIN RÜZGAR PAYLARI



Şekil 3.1. Kıtaların rüzgar payları (Mays, 1999)

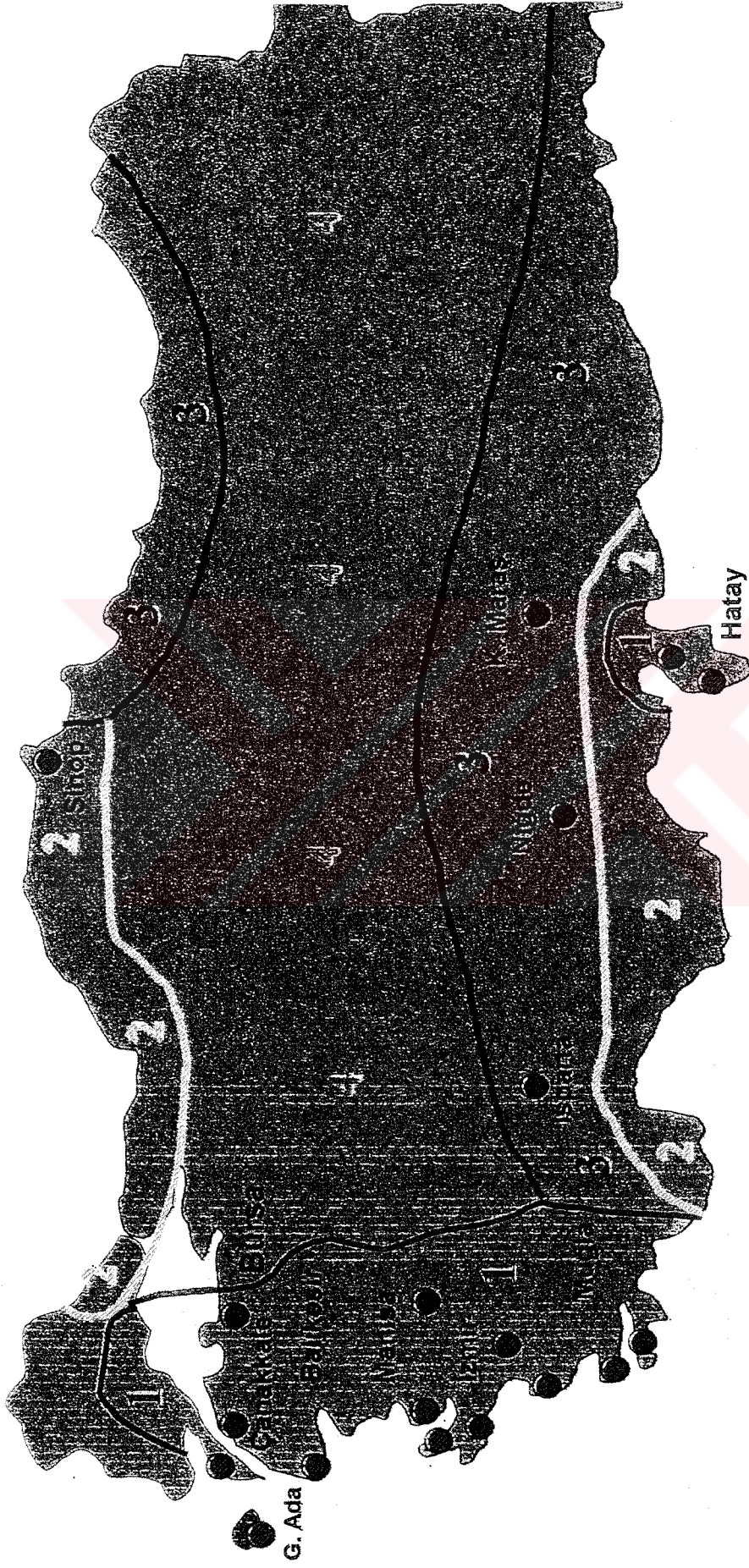


## Avrupa'da Rüzgar Enerjisi 2000-2003



Şekil 3.2. 2000-2003 yılları arasında Avrupa'da rüzgar enerjisi değerleri (AREB – TŞ, 2000)

## RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ALANLARI



### ● Elil Rüzgar Enerjisi Gözlem İstasyonları

Şekil 3.3 : Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel alanları haritası (E.I.E, 1992)

1. Ekonomik Olarak Fizibil Bölge

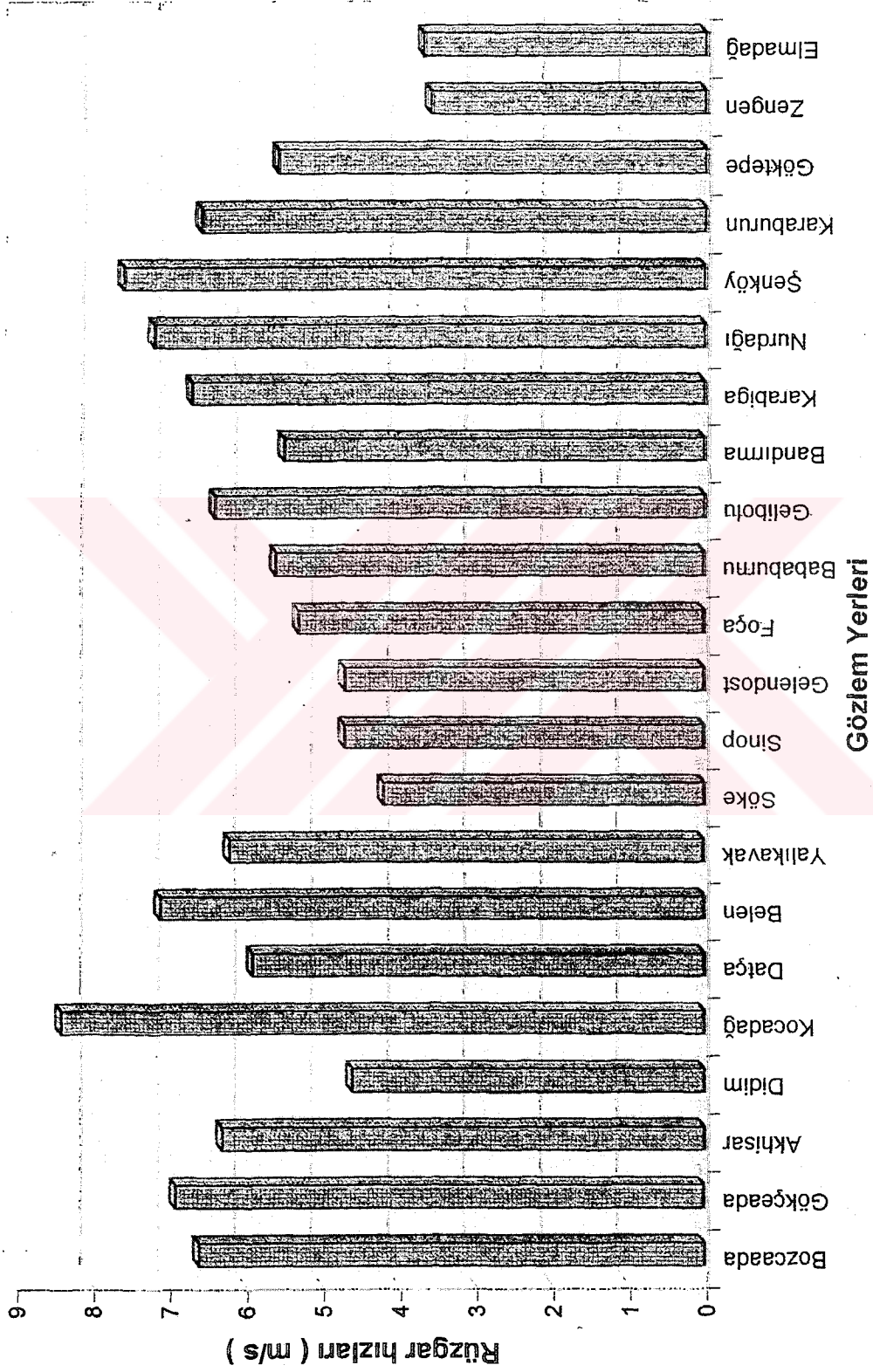
2. Rüzgarlı Bölge

3. Rüzgarlı Bölge

4. Geliştirilmemiş Bölge



## EİE GÖZLEM İSTASYONLARININ YILLIK ORTALAMA RÜZGAR HIZLARI



Şekil 3.4 : Çeşitli gözlem yerlerine göre EİE yıllık ortalama rüzgar hızları değerleri (E.İ.E, 1992)

### 3.2 Avrupa'da Rüzgar Enerjisi Potansiyeli:

Rüzgar enerjisi endüstrisi Avrupa için 2010 yılına kadar 40.000 MW rüzgar enerji kapasitesi kurmak üzere bir hedef koymuştur. Bu hedefe ulaşılmasıyla yaklaşık 50 milyon insana elektrik sağlanacaktır. "2010 da 40.000 MW" kampanyası, Avrupa Komisyonu'nun "AB'deki Yenilenebilir Enerji Kaynakları için Beyaz Rapor"u tarafından da desteklenmektedir. Bu raporda yapılan değerlendirme bu hedeflere erişilebileceğini göstermektedir.

Çizelge 3.2 Avrupa'da rüzgar enerjisi (AREB – TŞ, 1999)

Ülke	Eylül 1999 sonu kapasite (MW)	2003 için öngörülen kapasite (MW)
Danimarka	1606	2645
Finlandiya	32	218
Fransa	22	621
Almanya	3817	6774
Yunanistan	79	265
İrlanda	73	344
İtalya	227	872
Hollanda	405	1179
Portekiz	60	221
İspanya	1180	5580
İsveç	197	896
İngiltere	350	1313
Diğer ülkeler	91	905
<b>Toplam</b>	<b>8139</b>	<b>21833</b>

Geçtiğimiz altı yıl boyunca Avrupa'da kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi yılda % 40 oranında artmıştır. Bugün Avrupa'daki rüzgar enerjisi projeleri 5 milyon civarında insanın yerel gereksinimlerini karşılayacak yeterlilikte elektrik üretmektedir.

20 türbinden oluşan tipik bir rüzgar çiftliği yaklaşık 1 km<sup>2</sup>'lik alana kurulabilmektedir. Diğer güç istasyonlarına nazaran rüzgar çiftliği, bulunduğu alanın sadece % 1'ini kullanır. Tarım alanlarıyla çiftçilik faaliyetleri türbinlerin hemen altında yapılabilmektedir.

Türbin çalışma hayatlarının sonuna geldiklerinde kolayca sökülebilmekte ve buldukları alan eskiden kullanıldığı hale dönüştürülebilmektedir. Türbinlerin sökülmesinin maliyeti genelde türbinlerin arta kalan parçaların parasal değeri ile karşılanabilmektedir.

### **3.2.1 Rüzgar enerjisinin ekonomikliğı:**

Rüzgardan elektrik üretimi yeni bir endüstridir. Rüzgar gücünün çevresel yararları göz önüne alınmadan bile bazı ülkelerde rüzgar enerjisi daha şimdiden fosil ve nükleer güç ile rekabet edebilmektedir. Geleneksel güç santrallerinden elde edilen elektriğin maliyeti genelde çevresel etkileri (asit yağmurları, petrol sızıntılarının temizlenmesi, iklim değişikliğinin etkileri) tümüyle hesaba katmamaktadır.

Rüzgar endüstrisi aynı zamanda önemli bir işverendir. Danimarka Rüzgar Türbinleri İmalatçıları Birliğı tarafından yapılan son bir çalışma Danimarka rüzgar endüstrisinin 8500 Danimarkalıya iş sağladığını ve 4000 kişiye de Danimarka dışında çalışma imkanı verdiğini göstermektedir. Danimarka Rüzgar Endüstrisi şu an balıkçılık endüstrisinden daha fazla işçi çalıştırmaktadır. Avrupa'da rüzgar endüstrisinin yarattığı toplam iş sayısının 20.000'i aştığı tahmin edilmektedir.

Avrupa Bankalarının en az 10 tanesi ve kamu hizmet şirketlerinin en az 20 tanesi rüzgar enerjisine yatırım yapmaktadır. Danimarka'da 100.000'den fazla birey kişisel yatırımlarını rüzgar enerjisine yapmaktadır (Tuncer, 1999).

Rüzgar enerjisi üretimi maliyetin azalması ve verimliliğın artması şeklinde iyileşmeye devam etmektedir. Rüzgar enerjisinden elde edilen elektriğın maliyeti kWh başına 5-8 ECU olup bu maliyetin 4 ECU'ya kadar düşmesi beklenmektedir. Rüzgar enerjisi projelerinin tesis edilmesi kolay olup bakımı da ucuzdur. Arazi sahibi çiftçilere ödenen kira bedelleri kırsal alanlarda önemli bir ek gelir sağlamaktadır. İnşaat çalışmaları çoğu kez yöredeki işgücünü seferber eden yerel şirketlerce gerçekleştirilmekte ve bakım işleri için uzun dönemli iş olanakları yaratmaktadır. Rüzgar enerjisi hızlı büyüyen, dünya çapında bir endüstridir. Dünya çapında yaklaşık 60 imalatçı bulunmaktadır ve bunun çoğu Avrupalıdır (Redman, 1992).

### **3.2.2 Elektrik üretim maliyetini oluşturan faktörler:**

- Yatırım maliyeti – güç santrallerinin inşaatı ve şebekeye bağlanması
- İşletme maliyetleri – tesisin işletilmesi, yakıtının sağlanması ve bakımı

- Finansmanı – yatırımcı ve bankalara geri ödeme maliyeti

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.

Türbin maliyeti kW güç başına halen 600-900 ECU'dur. Projenin hazırlanması ve tesis etme maliyetleri kW başına 200-250 ECU daha eklemektedir. Bu rüzgar türbinlerinin toplam maliyetini kW kurulu kapasite başına 1000 ECU'ya ulaştırmaktadır (Redman, 1992).

Rüzgar enerjisi geliştirme işletme maliyeti üretilen kWh elektrik başına yaklaşık 1-2 ECU mertebesindedir. Bu maliyet arazi kirası, bakım ve sigorta primlerini kapsamaktadır.

### **3.2.3 Elektrik talebinin karşılanması ve rüzgar kaynakları:**

Rüzgar kaynakları ve elektrik talebi için bilimsel değerlendirmeler sonucunda bir çok sonuca ulaşılmıştır. Bu analizlerin oluşturulmasında temel alınan birçok parametre göz önüne alınmıştır. Eğer bu parametreleri sıralayacak olursak:

Bugün pazarda yer alan dünyanın önde gelen şirketlerinden gelen bilgiler, 1990'dan bugüne aktarılmış olan tarihsel veriler.

Teknolojideki gelişmeler, iyileştirmeler, rüzgar enerji endüstrisinin bu hızlı oranlarda genişlemesi rüzgar türbinlerinin güç çıktısı ve verimliliği sürekli bir gelişme göstermiştir. Bu eğilimin ise sürmesi ilerideki zamanlarda da beklenmektedir.

Dünyanın farklı bölgelerinde rüzgar potansiyeli, elektrik tüketim seviyeleri, bölgesel olarak pazara giriş sınırlamalarının tutucu bir biçimde öngörümüleri.

Son araştırmalara göre dünyadaki rüzgar kaynaklarının son derece büyük ve 6 kıtaya yayılmış olduğunu göstermiştir. Bugün dünyadaki mevcut toplam teknik olarak işe koşulabilir rüzgar kaynağı yılda 53.000 Terawatt saattir ve bu dünyanın 1998'daki toplam elektrik tüketiminin yaklaşık 4 katıdır.

Dünyadaki rüzgar kaynakları hiçbir zaman elektrik üretimi için rüzgar gücü kullanımını sınırlayan bir faktör olmayacaktır. 2020 yılına kadar dünya elektriğinin % 10'unu rüzgar gücüyle sağlansa bile rüzgar potansiyelinin çoğu hala kullanılmamış olacaktır (Bellarmine ve Urquhart, 1996).

Avrupa yoğun bir rüzgar kaynağına sahip olduğu için şanslıdır. Avrupa’da, gelecek yüzyılın ilk yıllarında gerçekleşmesi beklenen, deniz üstü alanların geliştirilmesi elektrik talebinin karşılanmasında ek potansiyel sağlayacaktır. Teorik olarak rüzgar enerjisi tüm Avrupa’nın elektrik ihtiyacını sağlayabilecektir. Teknik kısıtlamalar nedeniyle rüzgar enerjisinin Avrupa’nın elektrik talebinin % 20’sinin karşılamak üzere kullanılması anlamlıdır. Pek çok Avrupa ülkesindeki çalışmalar, elektrik şebekesinin işleyip ve yapısında herhangi bir değişiklik yapmadan, elektrik talebinin % 10-20’sinin rüzgar türbinleri ile karşılanabileceğini göstermiştir. Avrupa’da karada ve deniz üzerindeki kombine rüzgar potansiyeli 2020 yılı için öngörülen elektrik talebinin % 20’sinden fazlasını karşılamaya yetecektir. Özellikle deniz üstü projeler için iyileştirilmiş teknoloji ve daha ucuza mal olan temeller bu yüzdeyi önemli ölçüde artıracaktır.

Uluslararası Enerji Ajansı dünyanın 2020 yılına kadar elektrik tüketimini iki misli artıracığını öngörmektedir. Elektriğe olan gelecekteki talep artışı, 20 yılda dünyanın elektrik talebinin % 10’unu karşılamayı hedefleyen, rüzgar gücünün yılda 2500-3000 Terawatt saatlik elektrik enerjisi üretmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

Bugünkü beklenti rüzgar gücünün 1998 ve 2003 yılları arasında yıllık % 20 oranında büyümesi ve bu süre sonunda dünyadaki kurulu kapasitenin 33.400 MW’a erişmesidir.

% 10’luk hedefe ulaşabilmek için 2004 ile 2010 arasında yıllık % 30’luk bir yıllık büyüme kaydedilerek toplam kurulu güç 181.000 MW’a ulaşmalıdır (Bellarmine ve Urquhart, 1996).

2010 yılından itibaren rüzgar gücünün % 20’lik büyüme oranları gerçekleştiğinde, 2020 yılı dünya elektrik enerji talebinin % 10.85’i rüzgar enerjisinden sağlanabilecektir. 2040 yılında ise rüzgar gücü dünya elektriğinin % 20’sini üretebilir duruma gelecektir.

Rüzgar çiftliklerinin gelişim Avrupa Birliği’nin planlama gereksinimlerini beklemede ve Avrupa Rüzgar Endüstrisi “Rüzgar Türbinlerinin Sorumlu Gelişimi için En İyi Uygulamalar Rehberini” hazırlamıştır.

Rüzgar gücündeki büyüme dünya çapında gerçekleşecektir, fakat en hızlı gelişmenin Avrupa, Kuzey Amerika ve Çin’de olması bekleniyor.

### **3.2.4 Rüzgar enerjisinin gelişimi:**

Rüzgar enerjisini desteklemek amacıyla farklı biçimler mevcut olup, bunların arasında en çok kullanılanlar ise:



1. Rüzgar türbinlerinin tesisine doğrudan yatırım sübvansiyonları,
2. İngiliz NFFO (Fosil Dışı Yakıt Zorunluluğu) benzeri ihale süreçleri,
3. Kamu şebekesine verilen elektriğin karşılığında sabit bir fiyat ödenmesi
4. Ulusal "ARGE" programlarının genel kamu finansmanı

Avrupa'da sabit fiyat ödeme yöntemi dinamik pazar geliştirilmesinde, endüstrinin gelişerek iş kapasitesi yaratmasında en başarılı yöntem olarak bulunmuştur. Almanya ve Danimarka'da da sabit bedel ödeme çok başarılı olmuştur.

Çizelge 3.3 EİKT-Avrupa ülkelerinde rüzgar için yöre ve teknik potansiyeli özeti (Van Wijk ve Coelingh, 1993)

EİKT-Avrupa	Toplam yüzölçüm 1000 km <sup>2</sup>	Potansiyel rüzgar sınıfı >3 1000 km <sup>2</sup>	Yöre potansiyeli km <sup>2</sup>	Teknik Potansiyel	
				GW	TWh/yr
Avusturya	84	40	200	2	3
Belçika	31	7	280	5	5
Danimarka	43	43	1720	14	29
Finlandiya	337	17	440	4	7
Fransa	547	216	5080	42	85
Almanya	357	39	1400	12	24
İngiltere	244	171	6840	57	114
Yunanistan	132	73	2640	22	44
İzlanda	103	103	2080	17	34
İrlanda	70	67	2680	22	44
İtalya	301	194	4160	35	69
Lüksemburg	3	0	0	0	0
Hollanda	41	10	400	3	7
Norveç	324	217	4560	38	76
Portekiz	92	31	880	7	15
İspanya	505	200	5160	43	86
İsveç	450	119	2440	20	41
İsviçre	41	21	80	1	1
Türkiye	781	418	9960	83	166



### 3.2.5 Rüzgar enerjisinin konumu:

Rüzgar gücü yenilenebilir enerji teknolojilerinin en ileri ve ticari olarak mevcut olanıdır. Tamamen doğal bir kaynak olarak kirliliğe neden olmayan ve tükenme olasılığı olmayan bir güç sağlamaktadır. Son yıllarda dünyanın en hızlı büyüyen enerji kaynağı olmuştur.

1998 sonuna gelindiğinde dünya çapındaki hemen hemen 50 ülkede 10.000 MW'dan fazla elektrik üreten rüzgar türbinleri çalışmaktadır. Son altı yılda rüzgar türbinlerinin satışlarındaki ortalama yıllık büyüme % 40 civarında gerçekleşmiştir. Rüzgar enerjisi endüstrisi 600 kW büyüklüğünde orta boy makinaların seri üretimini sürdürmekte ve megawatt büyüklüğündeki 100 adet tasarımın prototiplerini üretmiş bulunmaktadır. Mevcut kurulu kapasitedeki artış (500-600 kW'tan 1.5 MW'a 3 kat) çarpıcıdır ve 1990'dan bu yana çok hızlı bir gelişme gerçekleşmiştir. Büyük ünitelerin ortaya çıkışı, endüstrinin büyük deniz üstü uygulamalara hazırlandığından dolayı, zamanında gerçekleşmiştir (Walker ve Jenkins, 1997).

Son yıllarda rüzgar enerjisinin en başarılı pazarları, özellikle Danimarka, Almanya ve İspanya olmak üzere Avrupa ülkeleridir. Arasında Hindistan, Çin ve Güney Amerika'nın da bulunduğu bazı gelişmekte olan ülkelerin yanı sıra ABD'de de bu teknolojinin kullanımında bir sıçrama görülmektedir. Rüzgar enerjisi bir dizi farklı ekonomi ve coğrafi yapıda başarılı olmaktadır.

Rüzgar enerjisi aynı zamanda en ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Rüzgarlı yörelerde yeni geleneksel fosil yakıt ve nükleer üretimi ile daha şimdiden tümüyle rekabet edebilmektedir. Teknoloji geliştikçe ve arazilerden en iyi şekilde yararlandığında maliyetleri de azalmaya başlamaktadır.

Çevresel üstünlükleri tanındıkça, birçok ülke hükümet destekli girişimler ile rüzgar enerjisinin gelişimini desteklemeye başlamışlardır. Bu desteklerin hedefi pazarın hareketlendirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi, konvansiyonel yakıtların örneğin devlet subvansiyonları yoluyla sağlandıkları hakça olmayan üstünlüklerinin etkisinin azaltılmasıdır. Farklı ülkelerde bir dizi pazar hareketlendirme mekanizmaları kullanılmıştır.

Araştırma ve geliştirme girişimlerinin desteklenmesi ve elektrik şebekesine rüzgar güç üreticileri için hakça erişim sağlanması teknolojinin sürekli başarısı için önemli unsurlardır.

Ortalama bir sahada modern bir rüzgar türbini üç dört ay içerisinde imalatında kullanılan miktarda enerjiyi üretebilmektedir. Rüzgar çiftlikleri kolayca sökülebilmekte ve arazi kolayca

eski haline getirilebilmektedir. Rüzgar türbinlerinin geri kazanılabilirlik oranı artmakta ve böylece hurda makinelerden daha çok enerji kurtarılabilmektedir.

20 türbinden oluşan tipik bir rüzgar çiftliği yaklaşık 1 km<sup>2</sup> alan kaplar ama bu alanın sadece % 1'ini kullanmaktadır. Geri kalan alanlar çiftlik için ya da doğal alan olarak kullanılabilir. Bunun gibi bir proje 6500 ila 10000 arasında evin elektrik gereksinimini karşılayabilmektedir.

Rüzgar türbinleri karayolu trafiği, trenler, uçaklar ya da inşaat faaliyetleriyle karşılaştırıldığında rüzgar türbinleri çok düşük seviyede gürültü üretirler. Rüzgar çiftliğinin hemen yakınındaki bir ev, bir şelaleye 50-100 mt. uzaklıktaki bir evden daha az gürültü duyar. Rüzgar çiftliklerine en yakın evlerin dışında gürültü 50-100 metre bu tipik bir oturma odasının gürültülü atmosferinin hemen yandaki kütüphane ya da dinlenme salonu gibi sessiz sakin bir yerden duyulması gibi bir sestir (Uyar, 1998).

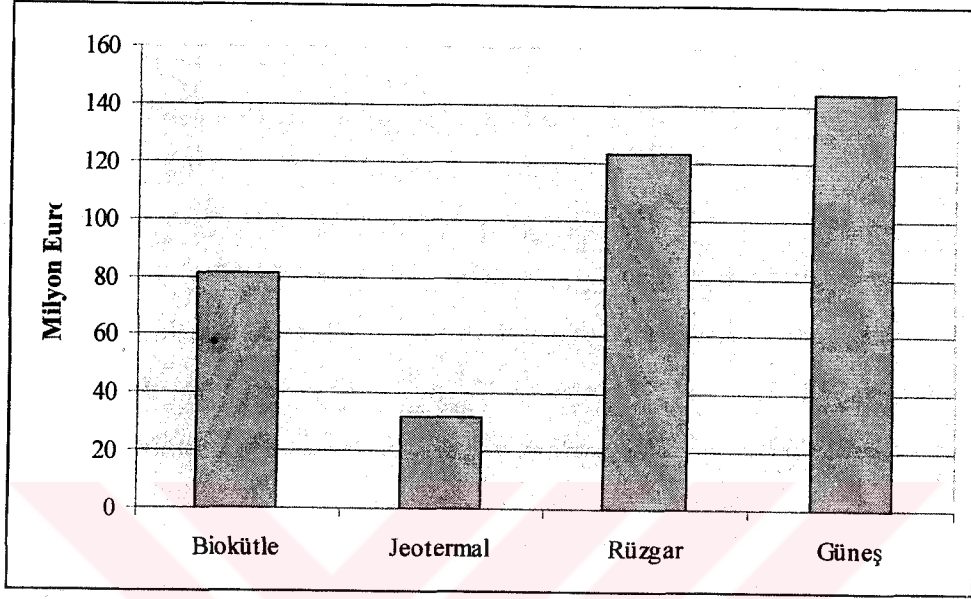
### 3.2.6 Yatırım ve maliyet açısından inceleme:

Dünyanın elektriğinin % 10'unun rüzgar enerjisinden elde edilmesinin yıllık yatırım gereksinimleri 1999'da 3 milyar dolar olacak ve 2020 yılında 78 milyar dolara ulaşacaktır. Bu değerler 1990'lı yıllarda ortalama yıl başına 170-200 milyar dolar olan toplam süresel enerji yatırımlarının bir dilimidir (ED, 1999). Tabii ki bu dilim rüzgar gücü elektrik sektörünün önemli bir kısmını oluşturduğunda göreceli olarak artacaktır.

Rüzgar gücü ekonomisi ağırlığını koymaktadır. Rüzgar türbinlerinin inşaat ve işletme maliyetleri daha şimdiden önemli ölçüde azalmıştır. Danimarka'da rüzgar enerjisi maliyetleri 1981 ile 1995 yılları arasında 2/3 oranında düşmüştür. Rüzgar gücü elektrik maliyetleri bugünkü 4.7 sent/kWh değerinden daha da azalacak ve 2013 yılına kadar (14 yıl sonra) 3 sent/kWh seviyesinin altına düşecektir. 2020 yılında üretilen birim elektrik başına maliyetler 2.5 sente kadar gerileyecektir. Bu durum rüzgar enerjisini, büyük ölçekli hidrolik dahil olmak üzere, günümüzün tüm yeni üretim teknolojileri ile rekabet edebilir hale getirecektir (ED, 1999).

Avrupa Birliği'nde termik santrallerin elektrik üretim maliyetleri büyük ölçüde farklı göstermektedir. Nükleer ve kömür endüstrileri için hükümet desteği, gerçek üretim maliyetlerinin görünenden daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Rüzgar enerjisi fiyatıyla termik kaynaklardan elektrik elde etmenin fiyatının doğrudan karşılaştırılması, ç

kez yenilenebilir elektrik üretim teknolojilerinin, merkezi santrallere göre, tüketicinin talebi daha yakın mesafeden karşıladığı gerçeğini göz ardı etmektedir.



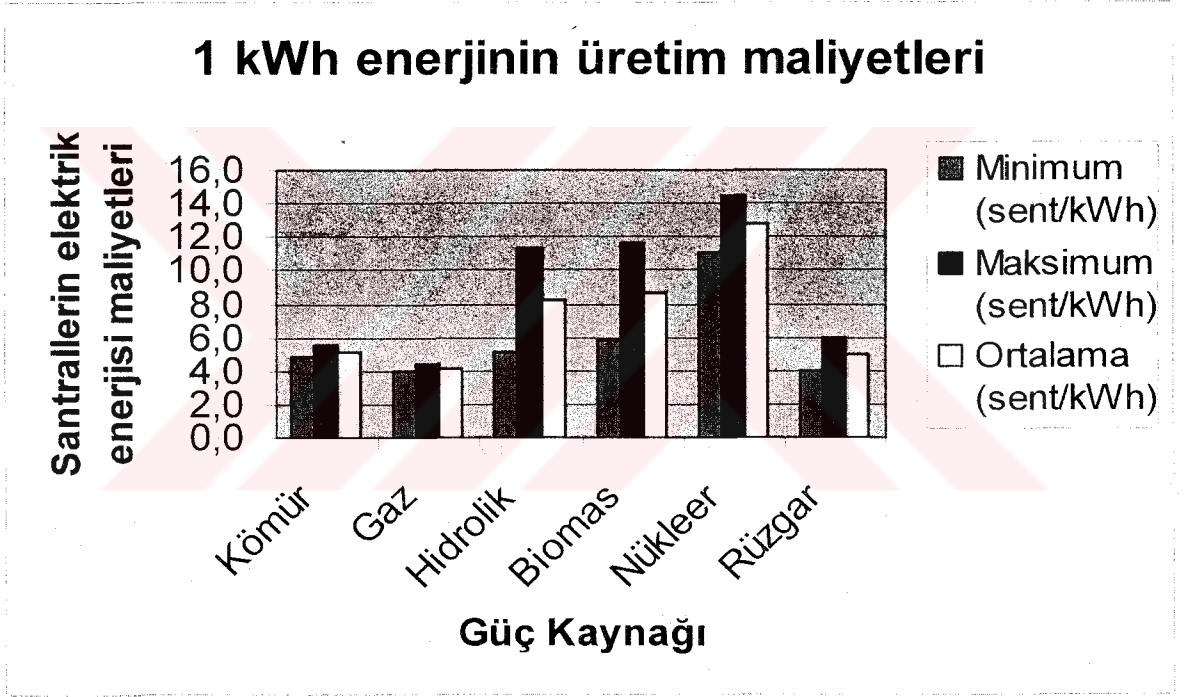
Şekil 3.5 Yenilenebilir enerji programı 1995-1998 yılları arasında desteklediği proje yatırımları (Weis – Taylor, 1998)

### 3.2.7 Rüzgar enerjisinin diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırılması:

Türbinlerin ortalama ömürleri 40 yıldır. Bu değer, atmosferik nem, kararlı rüzgar yapısı vb gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca diğer önemli bir nokta da, rüzgar santrali kurulduktan sonra yapılan harcamalar sadece işletme ve bakım masraflarından ibarettir. Bu miktar da son derece düşüktür. Enerji üretiminde kullanılan diğer farklı yöntemlerden elde edilen elektriğin maliyet karşılaştırılması Çizelge 3.4’de verilmiştir (AWEA, 2000). Çizelgeden de görüldüğü gibi, rüzgar enerjisi diğer yaygın enerji kaynakları kadar ekonomiktir. 1980 yılında rüzgardan elde edilen 1 kWh enerjinin maliyeti 30 sent iken, son zamanlarda bu değer 5 sent’e kadar düşmüştür. Bunun aksine diğer kaynaklarda sürekli bir artış görülmektedir.

Çizelge 3.4 1kWh enerjinin üretim maliyeti (AWEA, 2000)

Güç Kaynağı	Minimum (sent/kwh)	Maksimum (sent/kwh)	Ortalama (sent/kwh)
Kömür	4.8	5.5	5.15
Gaz	3.9	4.4	4.15
Hidrolik	5.1	11.3	8.2
Biyomas	5.8	11.6	8.7
Nükleer	11.1	14.5	12.8
Rüzgar	4.0	6.0	5



Şekil 3.6 Santrallerin elektrik enerjisi maliyetleri (AWEA, 2000)

### 3.3 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi’nin Durumu:

Ülkemizde son yıllarda rüzgar enerjisine olan ilgi artmıştır (Çizelge 3.5). Şu anda rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretim amaçlı 2 adet rüzgar çiftliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki 3 adet rüzgar türbini bulunan Çeşme Alaçatı Germiyan Köyü’nde 1.7 MW kurulu güçlü; diğeri de yine İzmir Çeşme Alaçatı’da 12 adet rüzgar türbinine sahip 7.2 MW kurulu güçlü

santraldır. Bununla beraber, yakın bir gelecekte ülkemizde rüzgar santrallerinin önemli bir artış göstereceği resmi kaynaklar tarafından doğrulanmaktadır. (AREB-TŞ, 1999).

Çizelge 3.5 Türkiye’de kurulma hazırlıkları sürdürülen rüzgar güç santralleri (AREB-TŞ, 1999) (RS : Rüzgar Santrali)

<b>İşletmede olan RS</b>			
<b>Projenin Adı</b>	<b>Başvuran Firma</b>	<b>Yeri</b>	<b>Gücü</b>
Çeşme Alaçatı Rüzgar Santrali	Ares A.Ş	İzmir-Çeşme Alaçatı	7.2 MW
<b>Kurulma hazırlıkları süren RS</b>			
<b>Projenin Adı</b>	<b>Başvuran Firma</b>	<b>Yeri</b>	<b>Gücü</b>
Kocadağ Santrali	As Makinsan	İzmir-Çeşme Kocadağ	50.4 MW
Çanakkale Rüzgar Santrali	As Makinsan	Çanakkale	30 MW
Bozcaada Rüzgar Santrali	Demirer Holding	Çanakkale-Bozcaada	10.2 MW
Mazıdağı Rüzgar Santrali	Demirer Holding	İzmir-Çeşme Alaçatı	39 MW
İntepe Rüzgar Santrali	Interwind	Çanakkale-İntepe	30 MW
Datça Rüzgar Santrali	Demirer Holding	Datça-Muğla	28.8 MW
Datça Rüzgar Santrali	Atlantis Ticaret	Muğla-Datça	12.54 MW
Yalıkavak Rüzgar Santrali	Atlantis Ticaret	Muğla-Bodrum Yalıkavak	7.92 MW
Bandırma Rüzgar Santrali	Atlatis Ticaret	Balıkesir-Bandırma	15 MW
Çeşme Rüzgar Santrali	Prokon	İzmir-Çeşme	12 MW
Akhisar Rüzgar Santrali	Ak-En İnşaat	Manisa-Akhisar	12 MW
Akhisar Rüzgar Santrali	Demirer Holding	Manisa-Akhisar	30 MW
Beyoba Rüzgar Santrali	Atlantis Ticaret	Manisa-Akhisar (Beyoba)	7.92 MW
Karaburun Rüzgar Santrali	Atlantis Ticaret	İzmir-Karaburun	22.5 MW

Hacıömerli Rüzgar Santrali	Demirer Holding	İzmir-Hacıömerli	45 MW
Kocadağ Rüzgar Santrali	Mage A.Ş.	İzmir-Çeşme (Kocadağ)	26.25 MW
Gökçeada Rüzgar Santrali	Simelko	Çanakkale-Gökçeada	5 MW
Yaylaköy Rüzgar Santrali	Mage A.Ş.	İzmir-Karaburun	15 MW
Lapseki Rüzgar Santrali	Atlantis Ticaret	Çanakkale-Lapseki	15 MW
Şenköy Rüzgar Santrali	Akfirat A.Ş.	Hatay-Şenköy	12 MW
Belen Rüzgar Santrali	Teknik Ticaret	Belen-Hatay	20-30 MW
Kumkale Rüzgar Santrali	Demirer Holding	Çanakkale-Kumkale	12.6 MW
Mazıdağı-2 Rüzgar Santrali	Demirer Holding	İzmir-Çeşme	90 MW
Mazıdağı-3 Rüzgar Santrali	Yapısan Ltd.	İzmir-Çeşme	39.6 MW
Kapıdağ Rüzgar Santrali	As Makinsan	Erdek-Balıkesir	20-35 MW
Karabiga Rüzgar Santrali	As Makinsan	Karabiga-Çanakkale	15-50 MW
Yellice Belen Rüzgar santrali	As Makinsan	Yellice-Belen Karaburun	70-100 MW
Zeytinbağ Rüzgar Santrali	Deryalar Ltd.	Bursa-Zeytinbağ	30-60 MW
ÇERES (Çeşme) Rüzgar Santrali	Intirwind Ltd.	Çeşme	18-25.5 MW
Taştepe Rüzgar Santrali	Fora A.Ş.	Taştepe-Bandırma	37.8 MW
Kocaali Rüzgar Santrali	Derin Ltd.	Tekirdağ-Şarköy	31.2 MW
Topdağ Rüzgar Santrali	Derin Ltd.	Sinop	33 MW
Paşalimanı Rüzgar Santrali	As Makinsan	Kapıdağ-Marmara	9 MW
Seyitli Rüzgar Santrali	Derin Ltd.	Aliğa	51 MW
Güzelyer Rüzgar Santrali	Enda Üretim A.Ş.	Çeşme	50.4 MW
Yenişakran Rüzgar Santrali	Yapısan İnşaat	Aliğa-Bahçedere	54 MW
Ekinli Rüzgar Santrali	Deryalar Ltd.	Karacabey-Bandırma	39.6 MW



### 3.3.1 RES projelerinin dağılımları:

Enerji arzının sağlanmasında konvansiyonel kaynaklar yanında yeri ve yenilenebilir kaynaklardan da yararlanılması ve yakıt çeşitliliğinin sağlanması olarak belirlenen Bakanlık politikası doğrultusunda başta rüzgar enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının YİD modeli kapsamında değerlendirilmesine önem verilmektedir.

Çizelge 3.6 Rüzgar enerjisi projeleri (Olumlu DPT görüşü alan ve Danıştay'a gönderilecek)  
(E.İ.E brifingi, 1999)

Proje Adı	Yakıt Tipi	Kurulu Gücü (MW)
Çeşme-Kocadağ RES	RÜZGAR	50.4
Çanakkale-Karacaören RES	RÜZGAR	30
Çeşme-Mazıdağı RES	RÜZGAR	39
Datça RES	RÜZGAR	28.8
Çanakkale-İntepe RES	RÜZGAR	30
Bandırma RES	RÜZGAR	15
Çanakkale-Bozcaada RES	RÜZGAR	10.2
<b>TOPLAM</b>	<b>RÜZGAR</b>	<b>203.4</b>

\* 12 MW Kurulu güçte İzmir-Çeşme projesi için DPT görüşü beklenmektedir.

Çizelge 3.7 Rüzgar enerjisi projeleri (E.İ.E. brifingi, 1999)

Projeler	Adet	Kurulu Gücü (MW)
Fizibilite Raporu Değerlendirme Çalışmaları Devam eden	7	233
Revize Fizibilite Raporları Beklenen	3	47
Fizibilite Raporu Beklenen	5	122
Ön Başvuru Aşamasında Olan (Böl.Fiz.Raporu İstenen)	15	580-680
Ön Başvuru Aşamasında Olan (Böl. Fiz. Raporu İçin makam Onayı Alınacak Olan)	4	295
<b>TOPLAM</b>	<b>34</b>	<b>1277-1377</b>

Çizelge 3.8 Rüzgar enerjisi projelerinin illere göre dağılımı (E.İ.E brifingi, 1999)

Yer	Adet
İzmir	16
Çanakkale	7
Manisa-Akhisar-Soma	4
Muğla	2
Hatay	2
Balıkesir	7
Sinop	1
Tekirdağ	1
Bursa	2
<b>Toplam</b>	<b>42</b>

### 3.3.2 Türkiye’de rüzgar enerjisi gelişimi ve mevcut durum:

Gelişmeler rüzgardan elektrik üretiminin cazibesini ortaya koymaktadır. Üç tarafı denizlerle çevrili Türkiye’de çok büyük bir rüzgar potansiyeli olmasına rağmen ABD ve Avrupa’daki bu hızlı gelişmeye ayak uydurulamamış, son 1-2 yıldan beri özel sektör yatırımları ve Enerji Bakanlığı yetkililerinin konuya hassasiyetle eğilmesi sonucu Türkiye’de rüzgar elektrik santralleri yatırımları başlamıştır. İlk defa 1998 yılında Çeşme Germiyan’da 1700 kW’lık Otoprodüktör statüsünde bir rüzgar santrali kurulmuştur. Bunu takiben Çeşme Alaçatı’da Yap-İşlet-Devret modeli ile 7.2 MW’lık 12 adet türbinden oluşan ikinci bir rüzgar santrali işletmeye alınmıştır ve ulusal şebekeye elektrik vermeye devam etmektedir. Ayrıca toplam 600 MW’lık rüzgar santral kurulması konusunda 10-15 firmanın Enerji Bakanlığına müracaatları yapılmış olup, etüt ve fizibilite çalışmaları devam etmektedir. Rüzgar santrali kurulması için seçilen İzmir Çeşme yöresi, Marmara ve Çanakkale civarı, Akhisar yöresi, Hatay ve İskenderun yöreleridir. Bu bölgeler rüzgar potansiyelinin en fazla olduğu yörelerdir. Ayrıca bütün Ege kıyısı, Marmara bölgesi, batı ve orta Karadeniz bölgesi de rüzgar enerjisi için uygun bölgelerdir. Şu anda Türkiye’de rüzgar elektrik santrallerinin daha da fazla yaygınlaşmasının önünde önemli bir altyapı sorunu vardır.

Bu sorun rüzgar potansiyeli olan yörelerdeki elektrik şebekelerinin, kurulacak bu güçleri taşıyacak kapasiteye henüz erişmemiş olmasıdır. Devletin bu konuda rüzgar enerjisi yatırımlarına paralel olarak şebeke kapasitelerini artırması gerekmektedir. Bu sorun yeni kurulacak veya kurulmakta olan hidroelektrik ve şebeke bağlantılı doğal gaz santralleri içinde

geçerlidir. Elektrik üretim ve dağıtımının özelleştirildiği ve elektrik üretiminin yaygınlaştığı ve teşvik gördüğü bu dönemde devlete düşen en büyük görev, mevcut hat kapasitelerinin artırılması için gerekli önlemleri zamanında almasıdır.

Bugüne kadar ETKB tarafından değerlendirilen 39 adet Rüzgar Çiftliği projesi bulunmaktadır. Bu projelerin toplam kapasitesi 1370 ila 1440 MW'dir. Bu 39 projenin, 215 MW'lık kapasiteye sahip 8 tanesinin yatırımcılarla yapılan görüşmeleri sonuçlandırılmıştır (Mendilcioğlu, 1999).

ETKB'nin 9 Eylül 1999'da açtığı YİD Modeli ile Rüzgar Güç Santralleri Yapılması konusundaki resmi ihale gündemdeki toplam proje sayısını 55'e çıkartmıştır. Böylece Türkiye'de gerçekleşme aşamasına girmiş rüzgar güç santrallerinin toplam kurulu gücü 1700 MW'a ulaşmıştır (Mendilcioğlu, 1999).

Rüzgardan üretilen elektriğe, kirlenici emisyonlar olmadan üretilen elektriğin çevresel yararlarını yansıtan, hakça bir bedel ödenmesi ve iyi organize olmuş bir kurumsal alt yapı ve rüzgar enerjisinin planlama yönetmeliklerinin hazırlanması durumunda, Türkiye'de rüzgar enerjisi kurulu gücünün gelişiminde kolayca aşağıdaki hedeflere ulaşılabilecektir.

Çizelge 3.9 Türkiye rüzgar enerjisi için mümkün hedefler (TWEA, 1999)

Yıl	Kurulu Kapasite (MW)
2000	400
2003	1400
2005	5.000
2010	10.000
2020	20.000

Çizelge 3.10 Türkiye rüzgar endüstrisi tarafından yaratılacak iş sayısı (TWEA, 1999)

Yıl	Kurulu Kapasite (MW) YEKAB-Hedefi	Yaratılan İş Adam Yıl
2000	400	8.000
2003	1400	28.000
2005	5.000	100.000
2010	10.000	200.000
2020	20.000	400.000

Çizelge 3.11'de TWEA'nın (Turkish Wind Energy Association) Bülteni gelecek yıllar için öngördüğü kurulu güç kapasitesi içinde rüzgar enerjisi kullanımıyla oluşturulabilecek üretim kapasitesi payları verilmiştir.

Çizelge 3.11 Rüzgar enerjisi kullanımıyla oluşturulabilecek üretim kapasitesi payları  
(TWEA, 1999)

ETKB'nin Öngörümü	Elektrik Kapasite	YEKAB Kurulu Güç Hedefleri Esas Alınarak
Yıl	Kurulu Kapasite	Toplam kurulu kapasitenin %'si olarak rüzgar payı
2000	30000	1.33
2010	65000	15.38
2020	110000	18.18

Türkiye 2020 yılında kurmayı hedeflediği toplam elektrik enerjisi üretim kapasitesinin % 18'i kadar rüzgar güç santral kapasitesini mevcut altyapıda radikal değişiklikler yapmadan tesis edebilecektir. Bu hedefe ulaşabilmesi için;

- Enerji sektörüne ilişkin kararlar alınırken fosil ve nükleer güç santrallerinin neden olduğu toplumsal maliyetler ekonomik fizibilite çalışmalarında hesaba katılmalıdır.
- Türkiye'de rüzgar gücü tesisi için uzun vadeli hedefler konmalıdır.
- Halen yenilenebilir enerji kaynakları ve enerjinin etkin kullanımını cezalandıran kömür, akaryakıt ve doğal gaza sağlanan teşvikler ve sübvansiyonlar kaldırılmalıdır.

### 3.3.3 Türkiye'de rüzgar enerjisine neden ihtiyaç var?

Türkiye'de son yıllarda gittikçe artan enerji darboğazı, tüketimin büyük bir hızla artması, üretimin çok az artış göstermesi, gelecekte büyüyen bir sorun oluşturmaktadır. Bu sorunun karşısında ülkemiz alternatif enerji sistemlerinin uygulanması ve bu soruna gelecek için umut verici bir çözüm için enerji kaynaklarından rüzgar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu enerji kaynağı olan rüzgar, ülkemizde sınırsız, temiz ve çevreyi kirletmeyen bir enerji kaynağı olmasından dolayı daha ön plana çıkmaktadır.

Gelişmekte olan ülkelerin gereksinimleri için rüzgar güç sistemleri acilen yeni kapasite kurmaya gerek duyulmuştur. Temel elektrik yapısı ve gücün taşınması için şebeke yatırımları gerektiren büyük güç santralleri ile karşılaştırsak eğer, rüzgar enerjisi daha ucuz ve hızlı bir şekilde devreye sokulabilir. Rüzgar enerjisi fosil yakıtlar tarafından üretilmek durumunda olan gücün miktarını azaltmak üzere mevcut elektrik sistemlerine entegre edilebilir. Bu olay ise gazların emisyonunu durduracaktır.

### **3.3.4 Türkiye'deki rüzgar enerjisi kaynakları:**

Türkiye'deki rüzgar enerjisi kaynakları teorik olarak Türkiye'nin elektriğinin tamamını karşılayabilecek yeterliliktedir. Fakat rüzgar enerjisinin sisteme girişinin tutarlı bir biçiminde gerçekleşmesini kolaylaştırmak üzere gerekli altyapı tasarlanmalıdır. EİKT Avrupa ülkelerinde Rüzgar Enerji Potansiyelinin bir özeti (Şekil 3.2)'de verilmiştir. Türkiye Avrupa'da rüzgar enerjisi potansiyeli en ümit verici olan ülkelerden biridir (AREB-TŞ, 2000).

Türkiye'nin teknik potansiyeli 83.000 MW'dir. Bu, Türkiye'nin bir an önce kullanması gereken önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği TÜREB kurulmasından sonra yatırımcılar Türkiye'de rüzgar enerjisini desteklemek üzere toplandılar. 1996 yılında ETKB'nin Türkiye'de rüzgar enerjisi kullanımına ilişkin politikası iyimser bir şekilde değildi. Son üç yıldır, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği'nin çabaları ve ETKB ile Elektrik İşleri Etüd İdaresi'nin (EİEİ) TÜREB çalışmalarına katılımı sonrası Türkiye'de rüzgar enerjisi kabul görmeye başlamıştır.

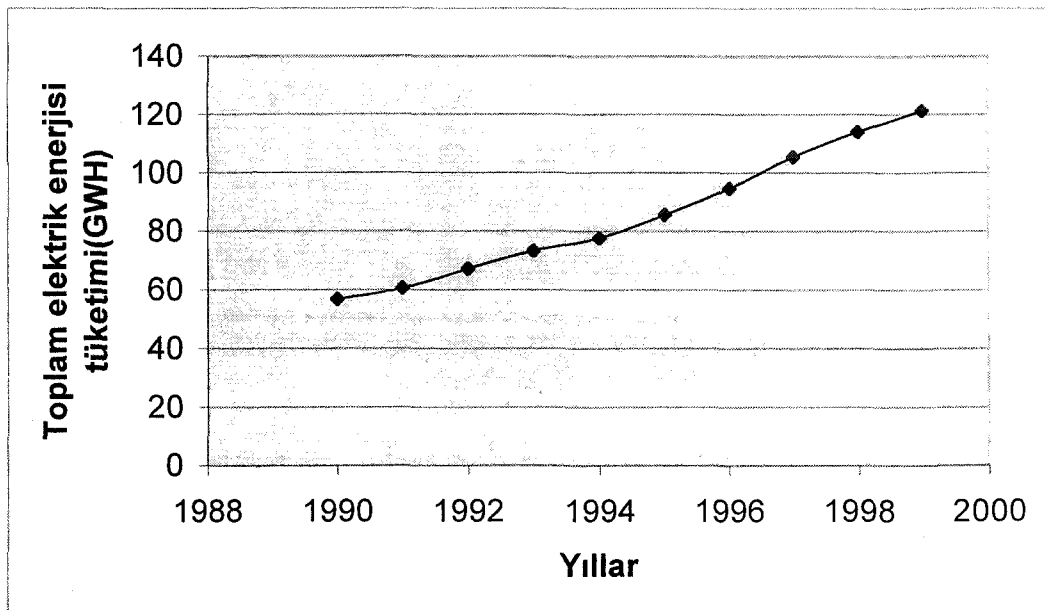
### **3.3.5 Türkiye'de enerji kullanımı:**

Ülkelerin enerji kullanımına ait bilgiler, gelişmişlik seviyesini de göstermektedir. Çünkü bütün sosyal ve endüstriyel aktiviteler enerjiye bağlıdır. Ülkemizdeki kullanılan temel enerji kaynakları ise, petrol, doğal gaz, kömür, su, rüzgar ve nükleer olarak sayılabilir (Dünya, 1999). Linyit, Türkiye'nin kullandığı toplam enerji kaynaklarının % 40'ını oluşturmaktadır. Ülkemizde üretilen enerji, toplam enerji talebinin % 48'ini teşkil etmektedir. 1998 yılı içerisinde devletin kamu yatırımlarına ayırdığı toplam tutar, 2,135 trilyon TL'dir. Bunun 403.4 trilyonu, yani % 18.89'u, enerji yatırımları için ayrılmıştır (Dünya, 1999). Aşağıda verilen Çizelge 4.12, son 9 yılda ülkemizde kullanılan elektrik tüketimini detayları ile vermektedir. Görüldüğü gibi elektrik tüketimi gittikçe artmaktadır.

Çizelge 3.12 Ülkemizde elektrik enerji kullanımının dağılımı (Dünya, 1999)

Yıllar	Toplam (GWH)	Ev (%)	Ticari (%)	Kamu (%)	Sokak (%)	Endüstri (%)	Diğer (%)	Kayıp (%)
1990	56.812	15.9	4.5	2.6	2.2	51.4	5.8	17.6
1991	60.499	17.9	5.0	3.1	2.3	47.1	6.0	18.5
1992	67.217	17.1	4.9	3.0	2.8	46.9	5.7	18.5
1993	73.351	17.1	4.9	3.1	3.1	46.7	5.8	18.5
1994	77.783	17.3	4.8	4.3	3.2	43.9	5.5	21.1
1995	85.645	16.9	4.9	3.5	3.6	44.4	5.3	21.3
1996	94.789	17.3	6.1	3.2	3.1	42.9	5.7	21.8
1997	105.517	17.2	5.7	3.4	2.8	41.8	5.7	23.3
1998	114.100	18.2	5.8	3.6	2.6	41.9	6.2	21.3
1999	121.400	18.3	5.8	3.6	2.5	42.0	6.2	20.6

Aşağıda verilen Şekil 3.7 toplam elektrik enerji tüketiminin yıllara göre zaman serisini göstermektedir. Şekilden de görüleceği gibi, ülkemizde elektrik enerjisi tüketimi her yıl % 10 artış göstermektedir.



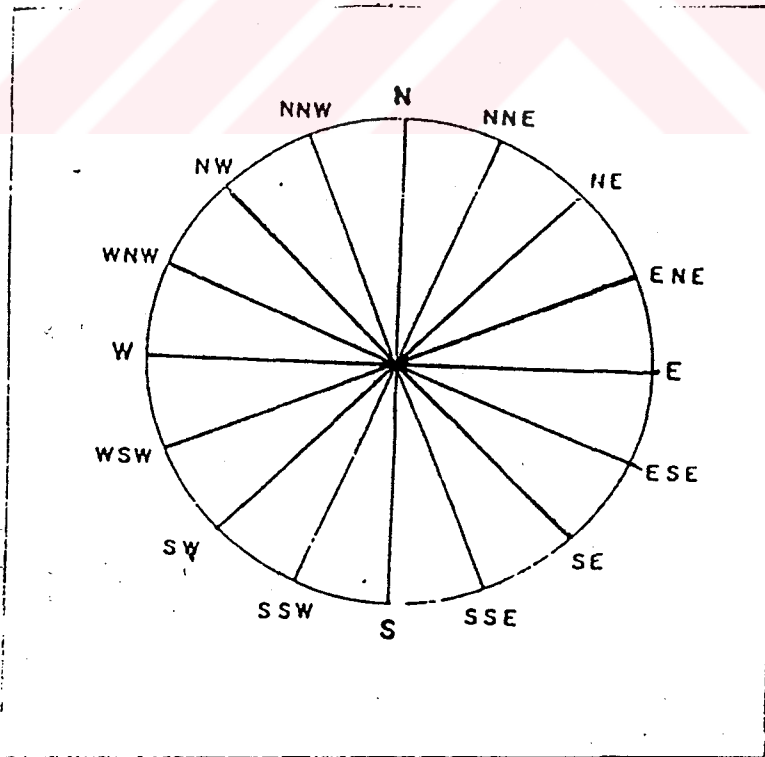
Şekil 3.7. 1990 – 1999 yılları arasında ülkemizde elektrik enerjisi tüketimi



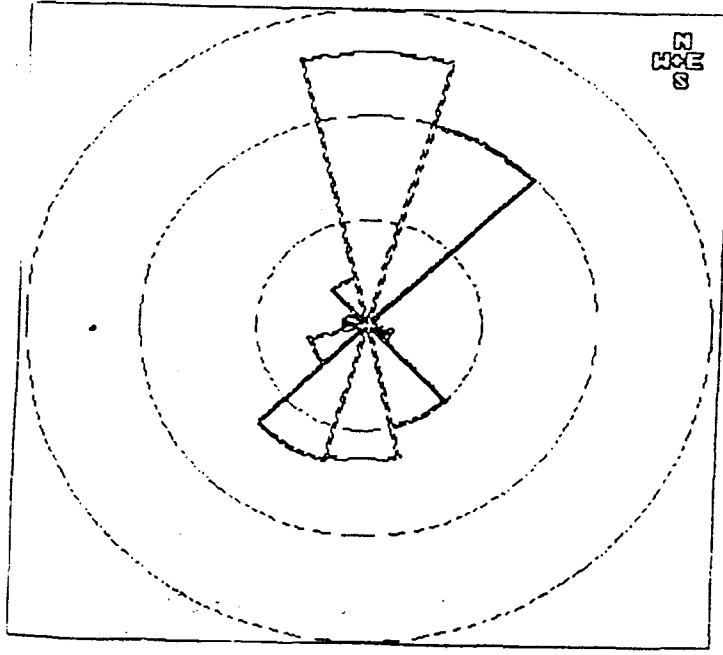
## 4. RÜZGAR OLUŞUMU VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

### 4.1 Rüzgar Oluşumunun Nedenleri:

Rüzgar enerjisinin kaynağı güneştir. Rüzgar, yeryüzünün eşit olmayan ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan hava hareketidir. Rüzgar enerjisinden yararlanmanın en önemli bölümü ise, rüzgar enerjisi potansiyelinin doğru bir şekilde belirlenmesidir. Rüzgar enerjisi, rüzgar şiddeti, havanın özgül kütlesi, rüzgarın tutulacağı rotor alanının ve rotorun bulunduğu yüksekliğin fonksiyonudur (DEWI, 1998). Rüzgar potansiyelleri belirlenirken dikkat edilmesi gereken en önemli husus rüzgar şiddetidir, çünkü enerji şiddetin küpü ile orantılıdır. Rüzgar şiddet ve yön olmak üzere iki parametre ile belirlenir. Hızdaki ani dalgalanma değişikliklere hamle (gust) adı verilir (Ahrens, 1988). Rüzgarın yönü, coğrafi kuzey veya pusula yönü ile bulunarak saat yelkovanı dönüşüne göre daire şeklinde ifade edilir. Bu şekle rüzgar gülü şablonu denir (Şekil 4.1). Rüzgar gülü şablonu toplam olarak 360°'lik bir alan süpürür. Bu alan, 16 parçaya yani 22.5°'lik açılar ile yönlere ayrılır. Şekil 4.2, rüzgarın esme sıklığı (frekansı) hesaplandıktan sonra çizilmiş bir rüzgar gülünü göstermektedir. Şekilden de görüleceği gibi, rüzgarın estiği hakim yön, kuzey-kuzey-doğudur.



Şekil 4.1 Rüzgar gülü şablonu.



Şekil 4.2 Frekans (sıklık) hesabı yapılmış rüzgar gülü.

Rüzgar hızı knot, km/h veya m/s olarak ölçülmektedir. Enerji potansiyeli belirleme amacına yönelik çalışmalarda m/s birimi kullanılmaktadır.

#### 4.2 Rüzgarın Temel Oluşum Mekanizması:

Yukarıda belirtildiği gibi, rüzgar oluşumuna yeryüzündeki farklı sıcaklık dağılımı neden olur. Sıcaklık dağılımını ise, enlem, kara, deniz, yükseklik ve mevsimler etkilemektedir. Okyanus ve deniz kıyısına sahip kara parçalarında sıcaklık farkı yüksek olduğu için, rüzgar potansiyeli de yüksektir. Konu ile ilgili geniş bilgi ileriki bölümlerde verilecektir. Rüzgarın arazi üzerinde aşındırma ve taşıma etkileri vardır. Bitkiler rüzgarın yön ve şiddetine göre eğiklik gösterirler.

Meteorolojik ve topoğrafik açıdan rüzgarın oluşabileceği yerler aşağıda sıralanmıştır:

- Basınç gradyanının yüksek olduğu yerler,
- Yüksek engebesiz tepe ve vadiler,
- Güçlü jeostrofik rüzgarların etkisi altında kalan bölgeler,
- Jeostrofik rüzgar ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri,
- Kanal etkilerinin meydana geldiği dağ silsileleri, vadiler ve tepeler

Rüzgarın topoğrafya ile ilişkisi de çok önemlidir. Dağ rüzgarı, vadi rüzgarı, kara ve deniz meltemleri, fön rüzgarları, katabatik rüzgarlar gibi topoğrafik etkilerle meydana gelen rüzgarlar bulunmaktadır. Topografyanın rüzgar üzerinde üç önemli etkisi bulunmaktadır. Bunlar, pürüzlülük, oroğrafik ve perdeleme etkileridir. Oroğrafik etkilerden kasıt, tepeler, sırtlar basamaklı arazi yapısı, oluk, vadi ve yüksek platoların bulunması sayılabilir. Bu elemanlar rüzgar üzerinde ilave bir etkiye sahiptir. Örneğin, rüzgar bir zirveye yaklaşırken, üstünden aşarken veya dağın eteklerine kadar hızlanırken; zirve tabanında yavaşlamaktadır.

#### 4.3 Atmosferik Sınır Tabaka Ve Rüzgar Akışına Etki Eden Faktörler:

Rüzgar akışına etki eden faktörlere girmeden önce “atmosferik sınır tabaka” ile ilgili bilgi vermek faydalı olacaktır. Atmosferik sınır tabaka, yüzeydeki değişikliklerden en fazla etkilenen ve bu etkilenmeye hızlı bir şekilde tepki veren atmosferin yüzey tabakası olarak tanımlanmaktadır (Arya, 1988). Atmosferik sınır tabakada, momentum, ısı ve kütle alışverişi meydana gelir. Rüzgar enerjisinde kullanılan rüzgar eşitlikleri atmosferik sınır tabaka için geliştirilmiştir. Atmosferik sınır tabakada rüzgar etki eden faktörler arasında,

- Büyük ölçekli basınç ve sıcaklık gradyanları,
- Yüzey sürtünmesi ve momentum alışverişine neden olduğundan dolayı yüzey pürüzlülük parametresi,
- Sınır tabakada rüzgar kaymalarını meydana getiren sınır tabaka yüksekliği,
- Sıcaklık ve momentumun yatay taşınımı,

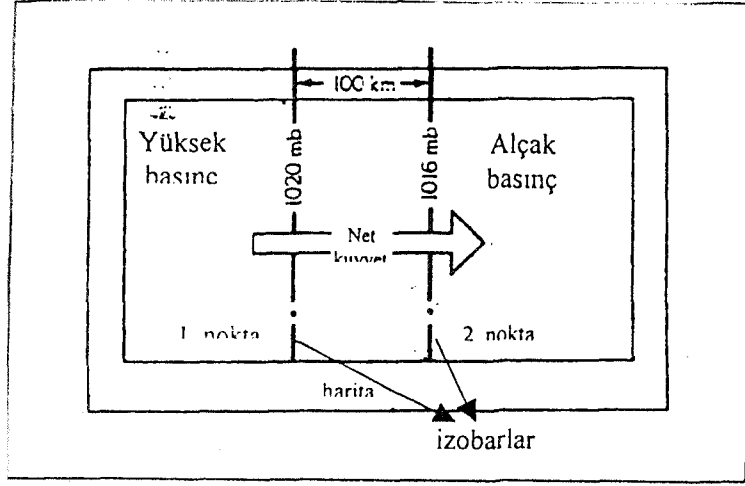
sayılabilir.

##### 4.3.1 Rüzgarın oluşumu:

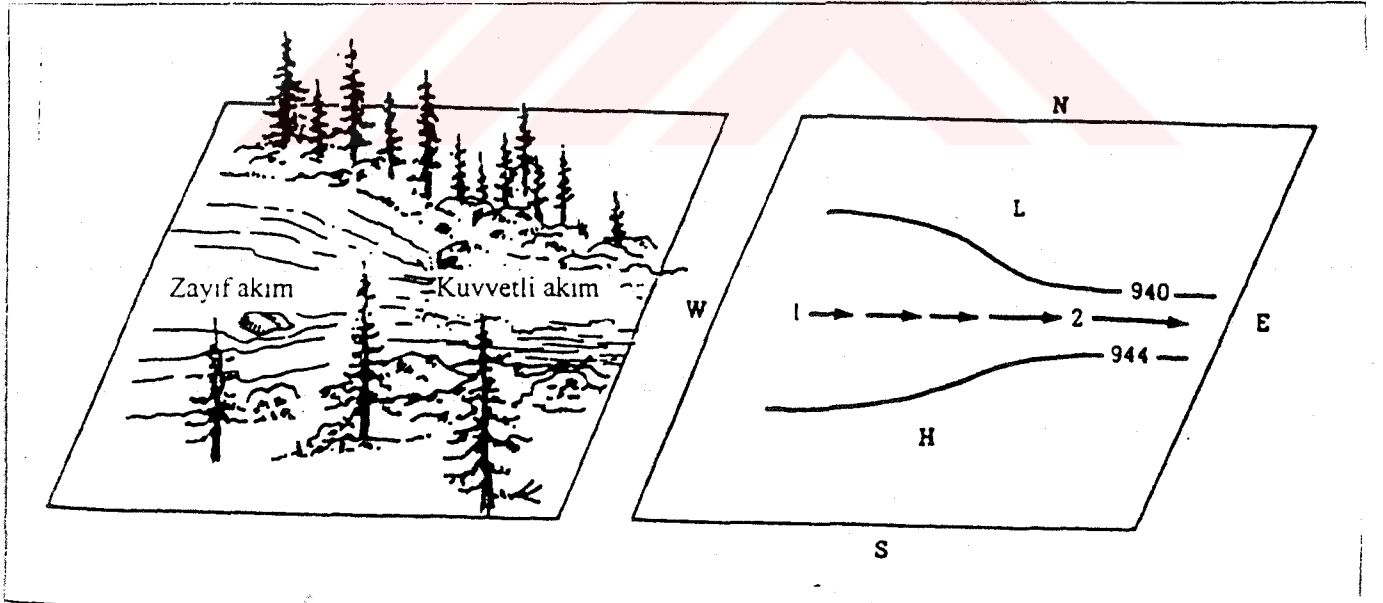
Rüzgar en basit anlamda, hava hareketi olduğundan atmosferde havayı harekete, hangi mekanizmanın başlattığını incelemek yeterli olacaktır (Ahrens, 1988). Bunun için öncelikle suyu örnek vererek başlayabiliriz. Şekil 4.3 incelendiğinde, A tankının 2/3’ü su ile dolu iken; B tankının 1/3’ü su ile dolu olduğunu varsayalım. Herbir tanktaki su basıncı, tankın üzerinde bulunan suyun ağırlığına eşit olduğundan, A tankının basıncı daha büyüktür. Basınç tanım olarak “birim alana uygulanan net kuvvet” olduğundan, net kuvvet, A tankından B tankına doğru olacaktır ve bunun sonucunda da A tankından B tankına doğru bir su akışı başlayacaktır. Hava da su gibi bir akışkan olduğundan dolayı, aynı mantık atmosfer için de



bulduğunu söyleyebiliriz. Doğada da bu olayı gözlemlemek mümkündür, nehir akımlarında nehrin geniş olduğu yerde su yavaş akarken, nehrin daralmaya başladığı yerlerde ise, daha hızlı akmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.4 Basınç gradyanı kuvvetinin oluşumu.



Şekil 4.5 Nehrin geniş ve dar bölgelerindeki akışlar.

Hava kütlesi üzerine etkiyen tek kuvvet basınç gradyanı kuvveti değildir. Hava parseli harekete başladıktan sonra üzerine "Coriolis kuvveti" denen bir kuvvet etki etmektedir.

### 4.3.3 Coriolis kuvveti:

Ekvator bölgesi Dünya'nın geri kalan bölgelerine göre daha fazla ısınır. Bu bölgede ısınan hava yaklaşık 10 km'ye kadar yükselir, kuzeye ve güneye doğru yayılır. Eğer dünya dönmeseydi, ısınan hava Kuzey Kutbu'na veya Güney Kutbu'na vardıkdan sonra aşağı doğru hareket eder ve ekvatora geri dönerdi. Dünya döndüğü için kuzey yarımküredeki her hareket sağa doğru yönelir, güney yarımkürede ise sola doğru yönelir. Bu kuvvete Fransız Matematikçi Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843) bulduğu için, Coriolis Kuvveti denir.

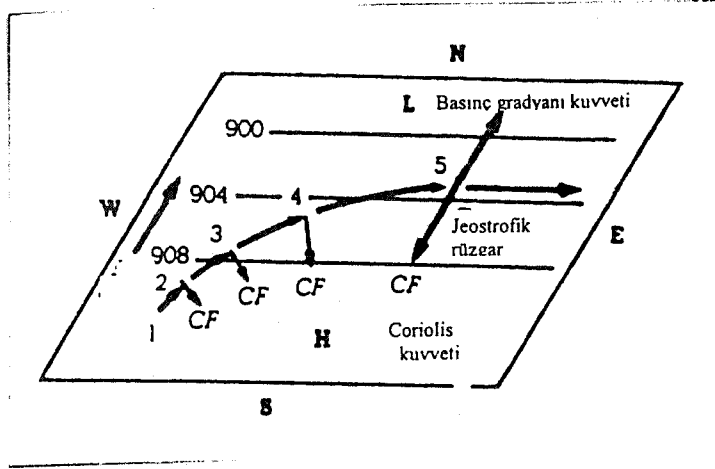
Rüzgar, ekvator bölgesinde yükselir, ve atmosferin yüksek katmanlarında kuzeye veya güneye doğru hareket eder. Her iki yarımkürede de 30° enlem civarında Coriolis Kuvveti havanın uzağa gitmesini engeller. Havanın aşağı doğru hareket ettiği bu enlemde yüksek basınç alanı vardır. Havanın yükselmeye başladığı ekvator bölgesinde ise alçak basınç alanı vardır. Tablo 4.1'de verilmiş olan hakim rüzgar yönleri Coriolis Kuvveti'nin bir sonucudur. Bu rüzgar yönleri rüzgar türbinlerinde yer seçimi açısından önemlidir. Çünkü, rüzgar türbinlerinin bu rüzgar yönlerinde engeli az olan alanlara kurulması istenir (Borhan, 1996).

## 4.4. Küresel Rüzgarlar

### 4.4.1. Jeostrofik rüzgar:

Jeostrofik rüzgarlar sıcaklık ve basınç değişimlerinin bir sonucudur. Rüzgar enerjisi potansiyelini belirleyebilmek için kullanılan WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) paket programı, Jeostrofik rüzgar kabülü yapmaktadır. Jeostrofik rüzgarın nasıl oluştuğu şekil 4.6 üzerinde gösterilmiştir. Bu şekil, kuzey yarımkürede yeryüzünden aşağı – yukarı 1 km yükseklikte (atmosferik sınır tabakanın üzerinde) meydana gelen Jeostrofik rüzgarın oluşumunu göstermektedir. İzobarlara bakıldığında basınç gradyanı kuvvetinin güneyden kuzeye doğru olduğu görülmektedir. Burada 1 noktasında basınç gradyanı kuvveti (BGK), hava parselini basıncın düşük olduğu bölgeye yani kuzeye doğru harekete geçirecektir. Bununla beraber, hava parseli harekete başlar başlamaz, parseli sağa doğru saptırıcı Coriolis kuvveti de etkileyecektir. Hava parselinin hızı arttıkça (2,3 ve 4.noktaları) Coriolis kuvveti de büyüyecektir ve hava parselini daha çok sağa saptıracaktır. Bu durum, Coriolis kuvvetinin, basınç gradyanı kuvvetine eşit olmasına kadar devam edecektir. Sistemin üzerine etkiyen net kuvvet eşit olduğundan dolayı, 5 noktasından sonra rüzgarın hızı artık artmayıp sabit kalacaktır.





Şekil 4.6 Jeostrofik rüzgarın oluşumu.

#### 4.4.2. YüzeY Rüzgarları

YüzeY rüzgarlarına 100 m.'ye kadar olan yüksekliklerde bu rüzgar tipinin hızı yeryüzünün pürüzlü yapısı ve engeller yüzünden daha yavaştır. Yeryüzüne daha yakın olan yüzeY rüzgarlarının yönü, Jeostrofik rüzgar yönünden biraz farklıdır.

Çizelge 4.1. Hakim rüzgar yönleri

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

#### 4.5. Yerel Rüzgarlar

Küresel rüzgarlar belirli alanlardaki hakim rüzgar yönünü tespit etmekte önemli olmasına rağmen, yerel iklim koşulları rüzgar yönünün değişiminde önemli rol oynarlar. Önemli yerel rüzgarlar; deniz ve kara meltemi, dağ ve vadi meltemi, musondur.

Deniz meltemi gün boyunca kara ile deniz arasındaki ısı farklılığından oluşur. Gündüz, kara denize oranla daha çabuk ısınır. Daha sıcak olan kara üzerindeki hava yükselir ve denizden karaya doğru bir rüzgar eser. Bu rüzgar karada 50-150 km. içeri kadar sokulur. Bu hareketin tersi gece görülür. Kara meltemi soğuyan karadan denize doğru eser. Dağda da benzer bir mekanizma, vadi meltemi ile dağ melteminin dönüşümlü olarak esmesine yol açar. Vadi meltemi, gün boyunca vadiden tepelere doğru eser. Dağ meltemi ise gece boyunca tepelerden ovaya doğru eser.

Muson rüzgarları, tropikal enlemlerde, özellikle Güney Asya'da, görülür. Yazın denizden karaya (yaz musonu), kışın karadan denize doğru esen mevsimlik rüzgarlardır (Veziroğlu, 1982).

#### 4.6. Hava Sıcaklığı ve Basıncı

Hava basıncının sebebi üzerinde bulunan havanın ağırlığıdır. Yeryüzünde uzaklaştıkça atmosfer basıncı düşer. Barometreler genel olarak atmosfer basıncını ölçmeye yarar. Az olan barometre basıncı havanın bozulacağına işaret eder. Yükselen barometre basıncı ise havanın iyi olacağını gösterir.

Hava sıcaklığı, hava ağırlığı ve basıncı ile ilgili olan hava yoğunluğunu etkiler. Sıcaklık yükseldikçe havanın ağırlığı azalır. Yani artan sıcaklık ile birlikte havanın yoğunluğu azalır. Hava sıcaklığı arttıkça basınç azalır.

Atmosferik basınç genellikle inches civa sütunu olarak A.B.D'de basınç birimi olarak kullanılır. Bar metrik, sistemde, fen bilimlerinde ve havacılıkta kullanılır. (Kaner, 1990).

#### 4.7. Havanın Yoğunluğu

Yoğunluk bir maddenin birim hacmindeki ağırlığıdır. Rüzgarın enerjisinin ve gücünün hesaplanabilmesi için havanın yoğunluğunun bilinmesi gerekmektedir. Havanın yoğunluğu ise sıcaklığa ve deniz seviyesinden yüksekliğe bağlıdır. Sıcaklık, basınç ve hava yoğunluğunun bulunması için kesin standart değerler kullanılır. Doğal olarak performans hesaplarında bu standart değerlerden yararlanır. Deniz seviyesindeki standart şartlar :

Sıcaklık : 15 °C

Basınç : 1,0132 Bar

İdeal Gazlar Denklemince havanın yoğunluğu;

$$P_0 \cdot \bar{V} = m \cdot R \cdot T_0 \quad (4.1)$$

$$R = \frac{\bar{R}}{m} \quad (4.2)$$

$$\rho = \frac{m}{\bar{V}} = \frac{P_0}{R \cdot T_0} \text{ şeklinde bulunur.} \quad (4.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde yapılan standart kabuller ve kullanılan birimler şunlardır.

$$\bar{R} = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol.K}} \text{ (universal gaz sabiti)}$$

R: ideal gaz sabiti (kJ/kg.K)      m : havanın kütlesi (kg)

$$\bar{m} = 28,9632 \text{ kg/kmol (havanın mol kütlesi)}$$

$$P_0 = P_{\text{atm}} = 1,0132 \text{ Bar} = 1,0132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$T_0 = 273 + 15 = 288 \text{ Kelvin}$$

$$[\text{Joule}] = [\text{Newton}] \cdot [\text{m}]$$

$$[\text{kJ}] = [\text{kN}] \cdot [\text{m}]$$

$$[\text{kJ}] = 10^3 [\text{N}] \cdot [\text{m}]$$

$$[\text{Bar}] = \frac{10^5 [\text{N}]}{[\text{m}^2]}$$

Bu eşitliklerle  $\rho$ , deniz seviyesindeki standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup şu şekilde bulunur;

$$R = \frac{\bar{R}}{\bar{m}} = \frac{8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol.K}}}{28,9632 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \text{ (4.2) eşitliği yardımıyla bulunur.}$$

Bu eşitlikten bulunan R'yi (4.3) de yerine koyarsak eğer havanın yoğunluğu olan  $\rho$ 'yu bulmuş oluruz.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P_o}{R.T_o} = \frac{1,0132 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{0,287 \text{ kJ/kg.K} \times 288 \text{ K}} = \frac{1,0132 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{0,287 \times 10^3 \frac{\text{N.m}}{\text{kg.K}} \times 288 \text{ K}} = 1,2258 \text{ kg/m}^3$$

$$\approx 1,226 \text{ kg/m}^3$$

$\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$  olarak ifade edilmektedir.

#### 4.8 Rüzgar Enerjisi Formülasyonunun Çıkarılması:

Bilindiği gibi, hareket halindeki her cisim bir kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar da hareketli halinde olan bir hava akımı olduğundan kinetik enerjiye sahiptir (Gündüz, 1997). Kinetik enerji (E) eşitliği,

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (4.4)$$

ile verilmektedir. Burada m hareket eden cismin kütlesi, V ise hızıdır. Özgül kütle  $\rho$  olmak üzere, eşitlikteki m kütlesi

$$m = \rho \bar{V} \quad (4.5)$$

şeklinde yazılır ve burada  $\bar{V}$ , hacmi ifade edilmektedir. Rüzgarın düşey bileşeni yatay bileşeninin yanında ihmal edilir ve rüzgar esme yönüne dik alanı A ile, rüzgar yönündeki uzunlukta U ile gösterilirse bu durumda hacim,

$$\bar{V} = AU \quad (4.6)$$

ile ifade edilir. V rüzgar hızında ve t süresinde kat edilecek mesafe ise,

$$U = V.t \quad (4.7)$$

Şeklinde olur. Böylece, (4.5), (4.6), (4.7) eşitliklerini (4.4) eşitliğinde yerine koyarsak

$$E = \frac{1}{2} \rho A t V^3 \quad (4.8)$$

Rüzgar esme yönüne dik alan A'dan geçen, V rüzgar hızında t zamanında Watt-saniye ile ölçülen enerjidir. Bu eşitlik bize rüzgar türbininde işin yapılması için mevcut total enerjiyi verir.

Bu denklemde  $t=1$  ve  $A=1$  alınır, birim zamanda birim alandaki enerjiyi  $E_B$  yani rüzgarın bir noktadaki enerjisi elde edilir.

$$E_B = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (4.9)$$

Eşitlikte kullanılan  $\rho$ , deniz seviyesindeki standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup sayısal değeri  $1.226 \text{ kg/m}^3$ ,  $V$  ise  $10 \text{ m}$  yükseklikte ölçülen yatay rüzgar hızıdır.

Rüzgar enerjisi analizinde kullanılan birimler,

$$\rho = 1.226 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$V : \text{[m/s]}$$

$$E = 1/2 \rho V^3 \text{ [kg/m}^3\text{] [m}^3\text{/s}^3\text{]}$$

$$\text{[Watt]} = \text{[kgm}^2\text{/s}^3\text{]} \text{ olduğundan}$$

$$E = \text{[Watt/m}^2\text{]}$$

olarak ifade edilmektedir.

#### 4.8.1 Rüzgar enerjisinde kullanılan diğer eşitlikler:

Belirli bir yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızını kullanarak herhangi bir yükseklikteki rüzgar hızı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır (DEWI, 1998):

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \quad (4.10)$$

Burada,

$h_1$  : rüzgar şiddetinin ölçüldüğü yükseklik (m)

$h_2$  : rüzgar şiddetinin hesaplamak istendiği yükseklik (m)

$V_1$  :  $h_1$  yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı (m/s)

$V_2$  :  $h_2$  yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı (m/s)

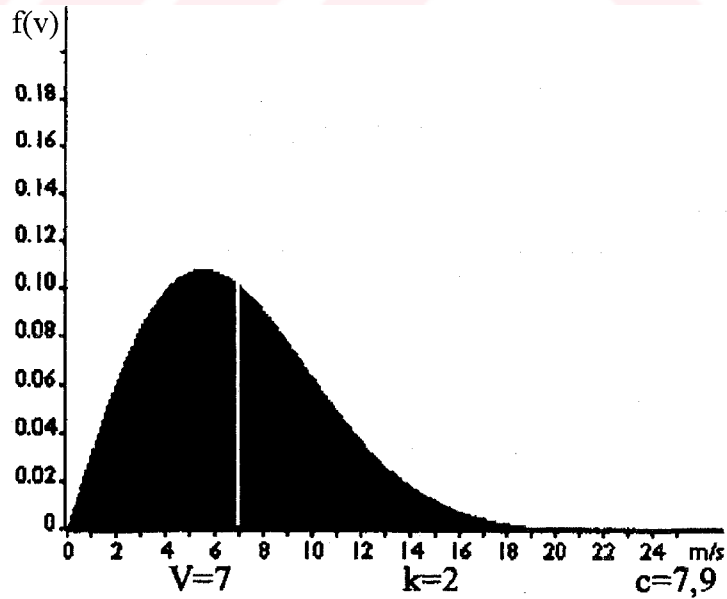
$\alpha$  : pürüzlülük katsayısı (birimsizdir ve 0.01-1.0 arasında değişir)

Burada  $\alpha$  değeri kararlılık ve  $z_0$  pürüzlülük uzunluğuna göre değişir. Fakat genellikle 1/7 alınır.

Ülkemizde de rüzgar potansiyelinin bulunabilmesi için bazı eşitlikler geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak rüzgar enerjisinin alan zaman davranışları (Şen, 1997); nem, basınç ve sıcaklık gibi meteorolojik parametreleri de hesaba katan potansiyel hesaplamaları (Şahin ve Şen, 1995) sayılabilir.

#### 4.8.2 Rüzgar şiddeti dağılımı:

Rüzgar potansiyellerini belirlerken kullanılan diğer bir önemli ifade de 2 parametrelili Weibull dağılımıdır. Eğer uzun bir süre (örneğin bir yıl) boyunca rüzgar verilerini ölçersek, rüzgarın hangi şiddet değerinde ne kadarlık sıklıkta estiğini gösteren grafik büyük bir ihtimalle Şekil 4.7'ye benzeyecektir. Şekildeki ortalama hız değeri 7 m/s , şekil değişkeni 2 ve ölçek değişkeni 7,9 alınarak çizilmiştir. Eğer şekil değişkeni 2 ise, şekildeki gibi buna Rayleigh dağılımı denir. Rüzgar türbini üreticileri makinaların standart performans diyagramını Rayleigh dağılımı kullanarak verirler. Rüzgar enerjisinin frekans dağılımına en uygun istatistiksel dağılımın Weibull dağılımı olduğu başta Justus (1978) ve Lyons tarafından ifade edilmiştir (Hanasçioğlu, 1999).



Şekil 4.7 Weibull dağılımı



İki parametrelili Weibull dağılımının matematiksel ifadesi ise,

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (4.11)$$

Burada,

$V$  : rüzgar hızı (m/s)

$c$  : ölçek değişkeni (m/s)

$k$  : şekil değişkeni

Birikimli Weibull dağılımı  $F(V)$  ise,

$$F(V) = e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (4.12)$$

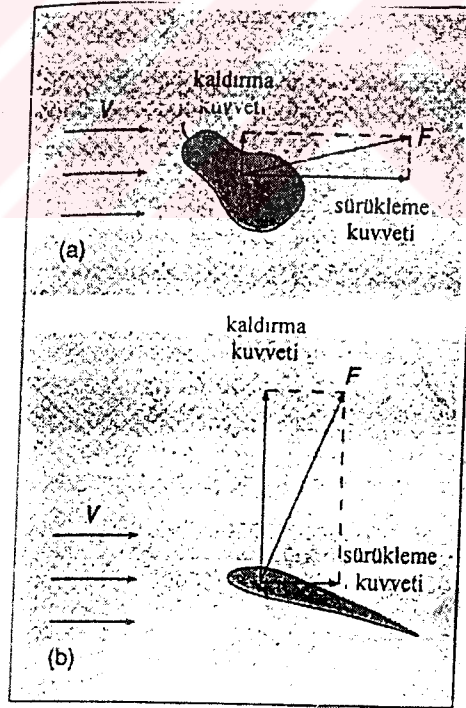
eşitliği ile verilmektedir.

## 5. RÜZGAR TÜRBİNLERİ (RT)

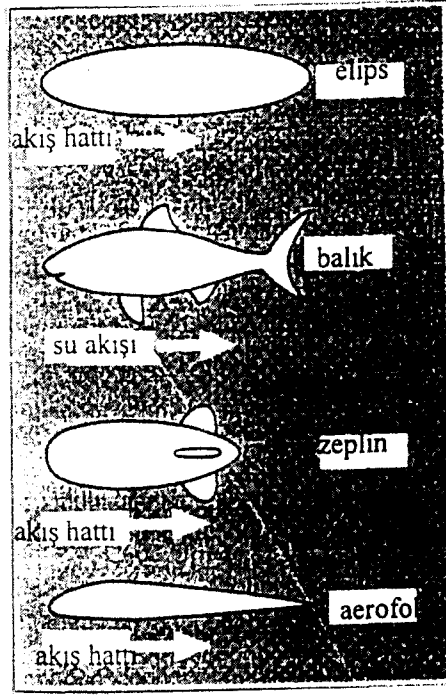
### 5.1 Rüzgar Türbinlerinin Çalışmasına Etki Eden Faktörler:

Modern RT'lerin nasıl çalıştığını anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bunlar sürüklenme (drag) ve kaldırma (lift) kuvvetleridir (Taylor, 1995). Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine  $90^\circ$  dik geldiği durumda iken; minimum sürüklenme kuvveti de hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir (Şekil 5.1). Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen bir kuvvettir. Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır.

Sürüklenme kuvvetine en iyi örnek paraşüt verilebilir. Bu kuvvet sayesinde paraşütün hızı kesilmektedir. Sürüklenme kuvvetinin etkilerini minimuma indirebilmek için yapılmış özel cisimlere "akışhatlı" (streamlined) cisimler denir. Şekil 5.2'de akışhatlı bazı cisimler görülmektedir.



Şekil 5.1 Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri



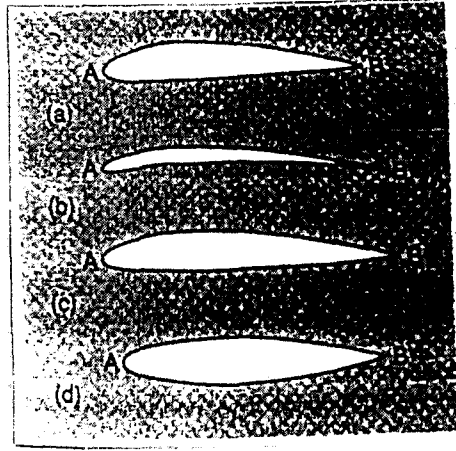
Şekil 5.2. Akışhatlı (streamlined) bazı cisimler.

Düz bir plaka üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı plaka yüzeyine  $0^\circ$  açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Bu bölgelere akışaltı da (downstream) denir. Dolayısı ile, hava akışı hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelmiş olur. Yani hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça ise, basınç artar, bu olaya “Bernoulli etkisi” denir. Kaldırma kuvveti cisim üzerinde emme (veya çekme) meydana getirir.

### 5.2 RT Kanat Profili (Airfoil):

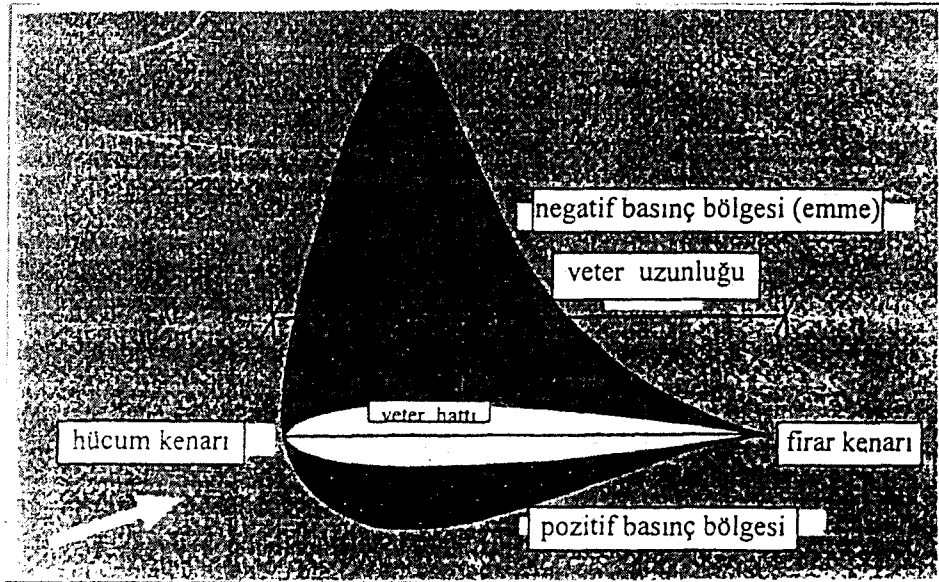
Cismin veter hattı (referans hattı) ile hava akışı arasında yaptığı açı “hücum açısı (angle of attack)” olarak adlandırılır ve  $\alpha_h$  ile gösterilir. Kanat profilinin referans hattına “veter hattı (chord line)” da denir (Yükselen, 1993). Hafif bombeli yüzeyler, verilen bir hücum açısı için daha yüksek bir kaldırma kuvveti meydana getirirler. Dolayısı ile airfoil (kanat profili) denen bu tip şekiller bu durum için uygundur. Kanat profili üst yüzeyde daha hızlı bir akış meydana getirmektedir. Yüksek hava akış hızı, kanat profilinin üst kısmında basıncı düşürerek alçak basınç bölgesi meydana getirecektir. Bunun sonucunda emme etkisi meydana gelerek kanat havalanacaktır. İki temel kanat profil tipi vardır: simetrik ve asimetrik. Aşağıda verilen Şekil

5.3'de simetrik ve asimetric kanat profilleri gösterilmiştir. (a), (b) ve (c) ile gösterilen kanat profilleri asimetric; (d) şikkında ise simetrik kanat profili gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Asimetric ve simetrik kanat profili.

Şekil 5.3 dikkatle incelendiğinde, bazı ortak noktalar göze çarpmaktadır. Bunlar, dışbükey olmaları, hücum kenarının (leading edge) dairesel, firar kenarlarının da (trailing edge) keskin ve sivri olduğu görülmektedir. Aralarındaki temel farklılık ise, alt yüzeylerinin şeklidir. Asimetric kanat profillerinde, profilin alt yüzeyi hava akış yönüne en yakın noktadan maksimum kaldırmayı yaparken; simetrik kanat profillerinde her iki yüzeyde de aşağı yukarı eşit bir kaldırma görülür. Aşağıda verilen Şekil 5.4'te ise kanat profili üzerindeki kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Kanat profili üzerine etkiyen kuvvetler.

Kanat profillerinde sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin özellikleri, rüzgar tüneline yapılan testlerle belirlenmektedir. Bu testlerde farklı hücum açılarında birimsiz büyüklükler olan sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) ve kaldırma katsayısı ( $C_L$ ) hesaplanır. Bu katsayılar yardımı ile türbin için en uygun kanat yapısı tasarlanır.

### 5.2.1 Sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ):

Herhangi bir kanat profili için sürüklenme katsayısı aşağıdaki ifade ile verilir (Taylor, 1995).

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho V^2 A_b} \quad (5.1)$$

Buradaki büyüklükler aşağıdaki anlamlara sahiptir:

D : sürüklenme kuvveti (N),

$\rho$  : hava yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ),

V : hava hızı (m/s),

$A_b$  : kanat alanıdır ( $\text{m}^2$ ).

### 5.2.2 Kaldırma katsayısı ( $C_L$ ):

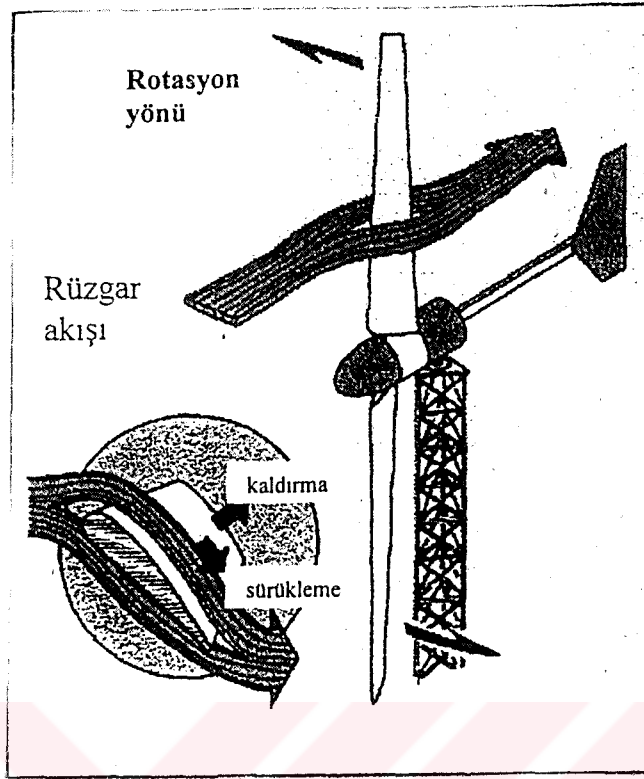
Kanat profilleri için kaldırma katsayısı ise (Taylor, 1995),

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho V^2 A_b} \quad (5.2)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikte kullanılan L indisi, kaldırma kuvvetini ifade etmektedir.

Her iki katsayı da rüzgar tünellerinde farklı hücum açıları ve rüzgar hızlarında hesaplanmaktadır. Her bir hücum açısı için hesaplanan  $C_D$  ve  $C_L$  değerlerinin oranları ( $C_D/C_L$ ) alınır, bu oranların en büyük olduğu değerdeki hücum açısı değeri, RT'den en iyi verim alınabilecek değerdir.

Tüm anlatılanlardan anlaşılacağı gibi RT'nin pervanesinin dönmesinde temel mantık sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin etkisidir. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin RT kanatları üzerine etkisi ise, Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, rüzgar akışı, pervane kanada çarptığında, kanat profilinin üst kısmından daha hızlı, alt kısmından ise daha yavaş geçecektir.



Şekil 5.5 Rüzgar türbinini etkileyen temel kuvvetlerin gösterimi.

### 5.3. Rüzgardan Elde Edilebilecek Gücün Hesabı ve Güç Katsayısı ( $C_p$ )

Rüzgar türbinin rotoru hava akımındaki enerjiyi absorbe eder ve bu da rüzgarın hızına bir etkide bulunur. Şekil 5.6'da havanın rotor çevresindeki akışı verilmiştir. Türbinlerde bulunan pervane bozulmamış (undisturbed) rüzgar hızını düşürerek pervane arkasında bulunan daha düşük şiddetteki hıza çevirirler (DEWI, 1998). Rotoru terkeden havanın hızı alır ve bu hızlar arasındaki farklılık, rüzgardan çıkarılan enerjiyi ifade etmektedir.

$C_p$  = Güç Katsayısı

$$C_p = \text{Faydalı Güç} / \text{Gelen Güç} = N_R / N \quad (5.3)$$

$$C_{p_{\max}} = N_{R_{\max}} / N$$

$$C_{p_{\max}} = N_{R_{\max}} / N = 16/27 = 59,3\%$$

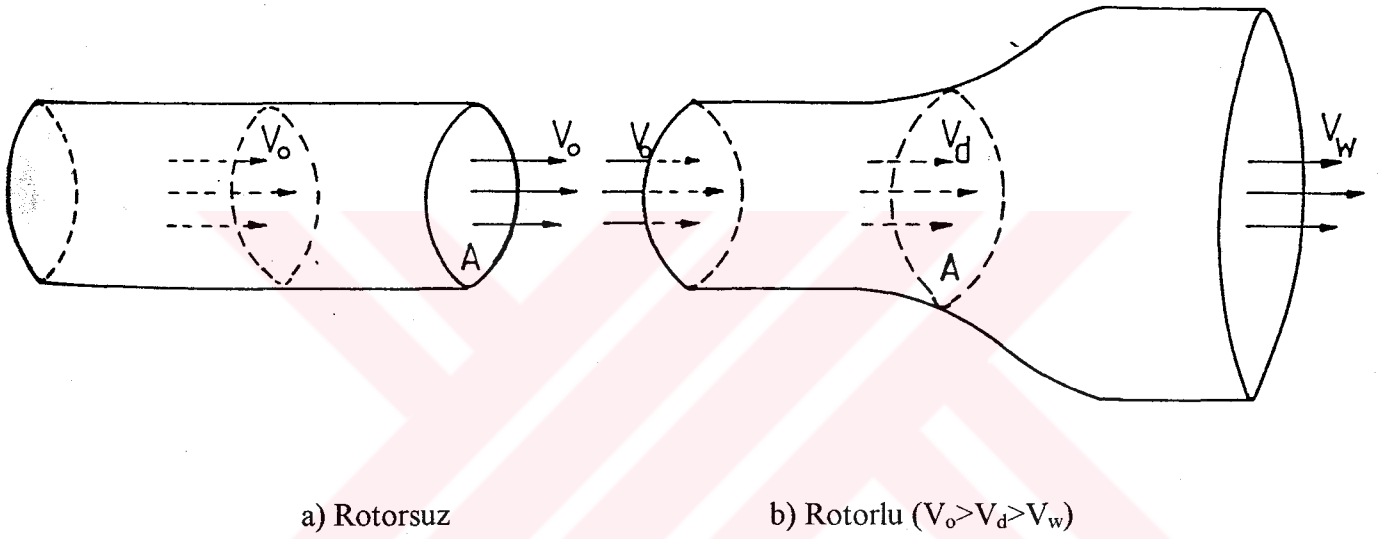
16/27 oranına Lanchester-Betz limiti denir. Bu limit değeri, rüzgar enerjisi elektrik santrallerinin en fazla %59,3 verime sahip olabileceklerini göstermektedir (Çöten, 1990).



### 5.3.1. Lanchester-Betz Limiti :

Bir rüzgar türbini tesis etmeden önce seçilen yöre nin rüzgar enerjisi potansiyelinin ve buna ait teorik hesapların yapılması gerekir. Sağlıklı bir tahmin için rüzgar hızı ölçümleri, türbin kanat çapı, kanat sayısı, türbinin yerden yüksekliği, kanat ucu hız oranı gibi parametrelerin bilinmesi gerekir.

Bu maksatla; kanat alanı ( $A=\pi.R^2$ ) ve kanat yarı çapı R olan bir rüzgar türbinin rotoruna  $V_o$  hızı ile yaklaşan rüzgarın, rotor düzleminde  $V_d$ , rotordan uzaklaşırken  $V_w$  hızına ulaşacağını kabul edelim.



Şekil 5.6 Rotorda hızlar

Şekil 5.6'da a ve b, rotora yaklaşan ve uzaklaşan hava kütle sinin hız değişimini gösterir.

Rotorsuz durumda rüzgarın akış yönüne dik, herhangi bir A alanı içinden birim zamanda taşınan enerji (N) aşağıdaki formülde ifade edilir.

$$N = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V_o^2 \quad (\text{W}) \quad (5.4)$$

$\dot{m}$  ; kütle sel debi olup,

$$\dot{m} = \rho \cdot V_o \cdot A \quad (\text{kg/s}) \text{ ifadesi ile bulunur.}$$

Rüzgarın getirdiği güç ;

$$N = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_o \cdot A \cdot V_o^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_o^3 \quad (\text{W}) \quad (5.5)$$

olarak bulunmaktadır. Bu ifadeden de anlaşılacağı gibi güç, hızın küpü ve tipik alanın yarıçapının karesi ile orantılıdır.

Bu defa akıma dik olarak yerleştirilen rotor üzerinde oluşan kuvvet  $F$ , Newton'un 2.kanunundan yararlanılarak bulunabilir.

$$F = \dot{m}(V_o - V_w) \quad (\text{N}) \quad (5.6)$$

olup rotor üzerinde birim zamanda yapılan iş ( $Nr$ ) :

$$Nr = F.V_d = \dot{m} \cdot (V_o - V_w) \cdot V_d \quad (\text{W}) \quad (5.7)$$

$\dot{m}$  = Rotorlu durumda kütleli debidir.

$$\dot{m} = \rho.A.V_d \quad (\text{kg/s}) \quad (5.8)$$

formülüyle ifade edilir.

İş-Enerjisi ilişkisine göre, birim zamandaki kinetik enerji değişimi rotor üzerinde birim zamanda yapılan işe eşit alınabilir.

$$\dot{m}(V_o - V_w) \cdot V_d = 1/2 \cdot \dot{m}(V_o^2 - V_w^2) \quad (5.9)$$

$$V_d = (V_o + V_w)/2 \quad (\text{m/s}) \quad (5.10)$$

Yani rotor düzlemindeki akım hızı, rotora yaklaşan ve uzaklaşan akımların hızlarının ortalamasıdır.

$$Nr = F.V_d$$

$$Nr = \dot{m} \cdot (V_o - V_w) \cdot V_d$$

$$Nr = \dot{m} \cdot (V_o - V_w) \cdot (V_o + V_w)/2$$

$$Nr = \rho \cdot A \cdot V_d \cdot (V_o - V_w) \cdot (V_o + V_w)/2$$

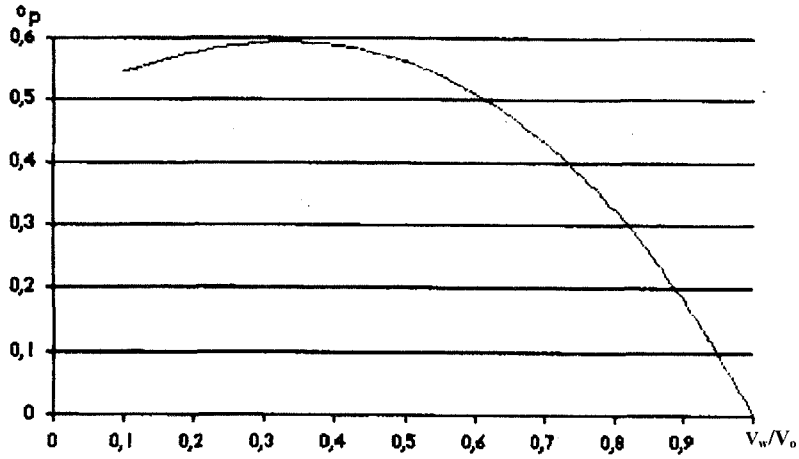
$$Nr = \rho \cdot A \cdot (V_o + V_w)/2 \cdot (V_o - V_w) \cdot (V_o + V_w)/2$$

$$Nr = \rho \cdot A/4 \cdot (V_o + V_w) \cdot (V_o^2 - V_w^2) \quad (5.11)$$

Bu güç fonksiyonunun maksimum değeri uygulamada çok önemlidir, çünkü buradan sistemin maksimum verimini tahmin etmek mümkündür.

Bu maksatla güç ifadesini  $V_w$  hızına göre türevlersek;





Şekil 5.7  $C_p$ 'nin  $\frac{V_w}{V_o}$ 'nun fonksiyonu olarak çizilmiş eğri

### 5.3.2 Pervane kanat sayısının etkisi:

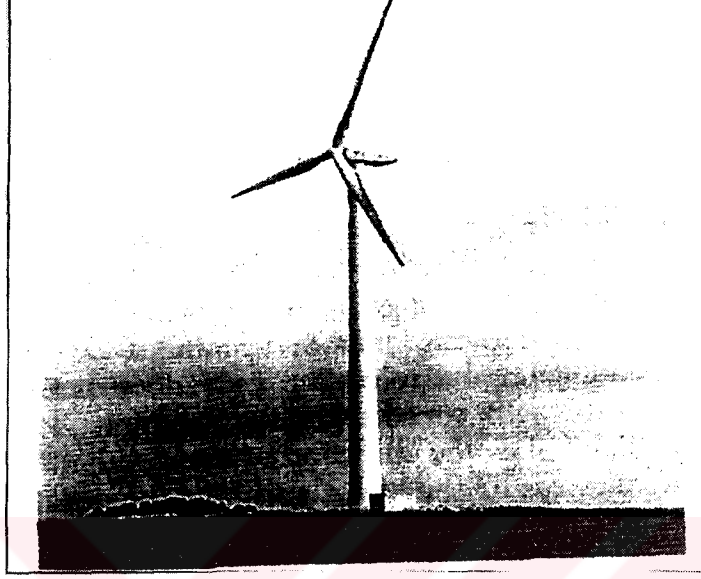
Rüzgar türbinleri farklı kanat sayılarına sahiptir. Temel kural ise, kanat sayısının azalması ile, dönüş hızının artmasıdır. Bu dönüşün ölçüsü olarak uç hız oranı (tip speed ratio) denen bir parametre tanımlanmıştır.  $\lambda$  ile gösterilen bu oran, pervane dönüş hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır. Eğer  $\lambda=1$  ise, pervanenin dönüş hızının rüzgar hızına eşit olduğu görülür.

### 5.4 Pervane Kanat Sayılarına Göre Türbin Çeşitleri:

Daha önceleri, tek-kanatlı ve 2-kanatlı RT'lerin yaygın olarak kullanılmasına karşın, günümüzde en fazla 3-kanatlı RT'ler kullanılmaktadır. Bunların çeşitli fayda ve zararları bulunmaktadır. İzleyen kısımlarda bunlar üzerinde durulacaktır.

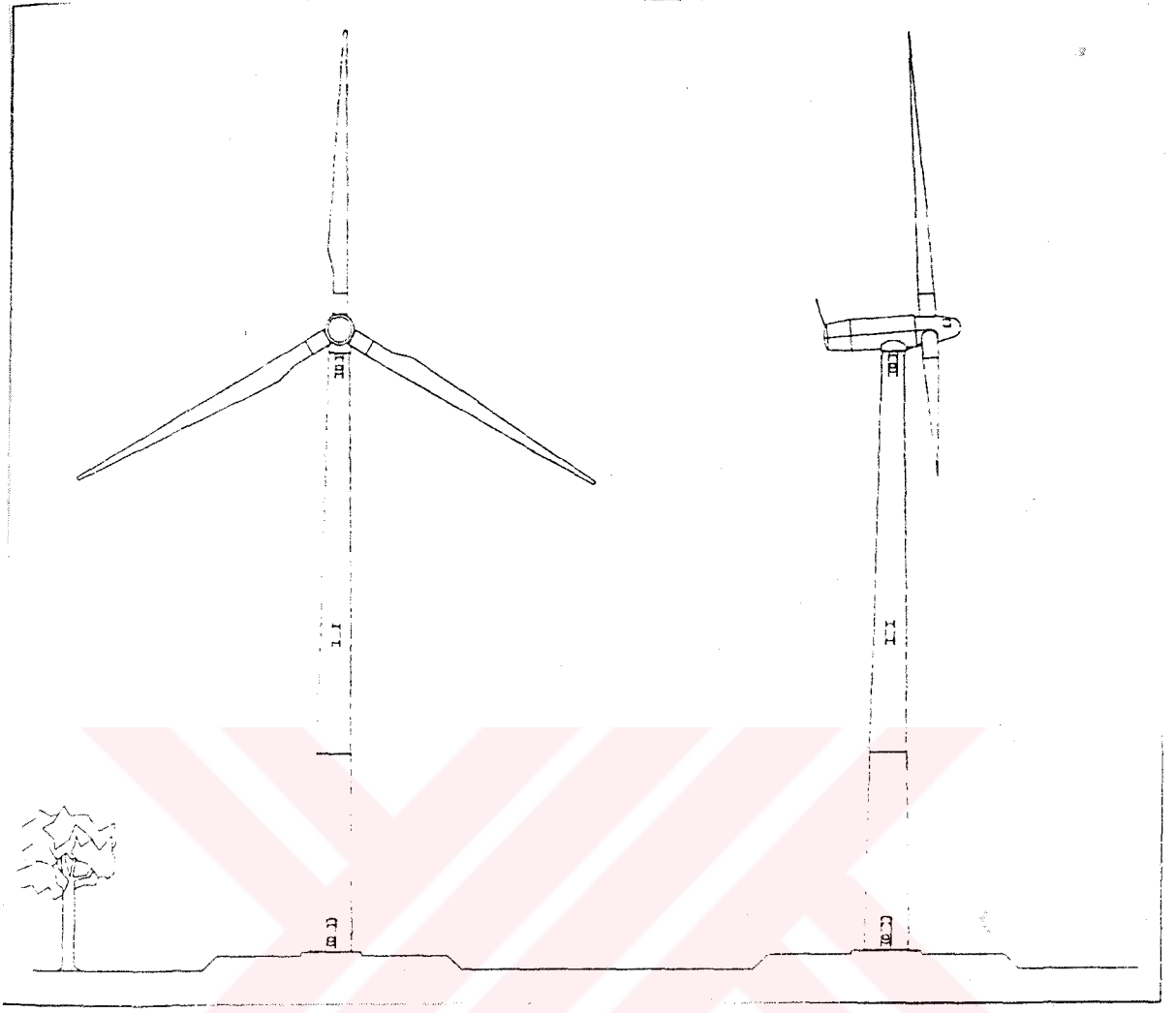
#### 5.4.1 Üç-kanatlı rüzgar türbini:

Modern RT'lerde en çok kullanılan model üç kanatlı olmaktadır (Şekil 5.8). Bunun temel nedeni, pervanenin tüm hızlarda sabit atalet momentine sahip olmasıdır. Üç veya daha fazla kanada sahip olan tüm pervaneler bu avantaja sahiptir. Ayrıca, üç kanatlı pervane bu avantajından dolayı RT üzerinde ek bir yük getirmemektedir.



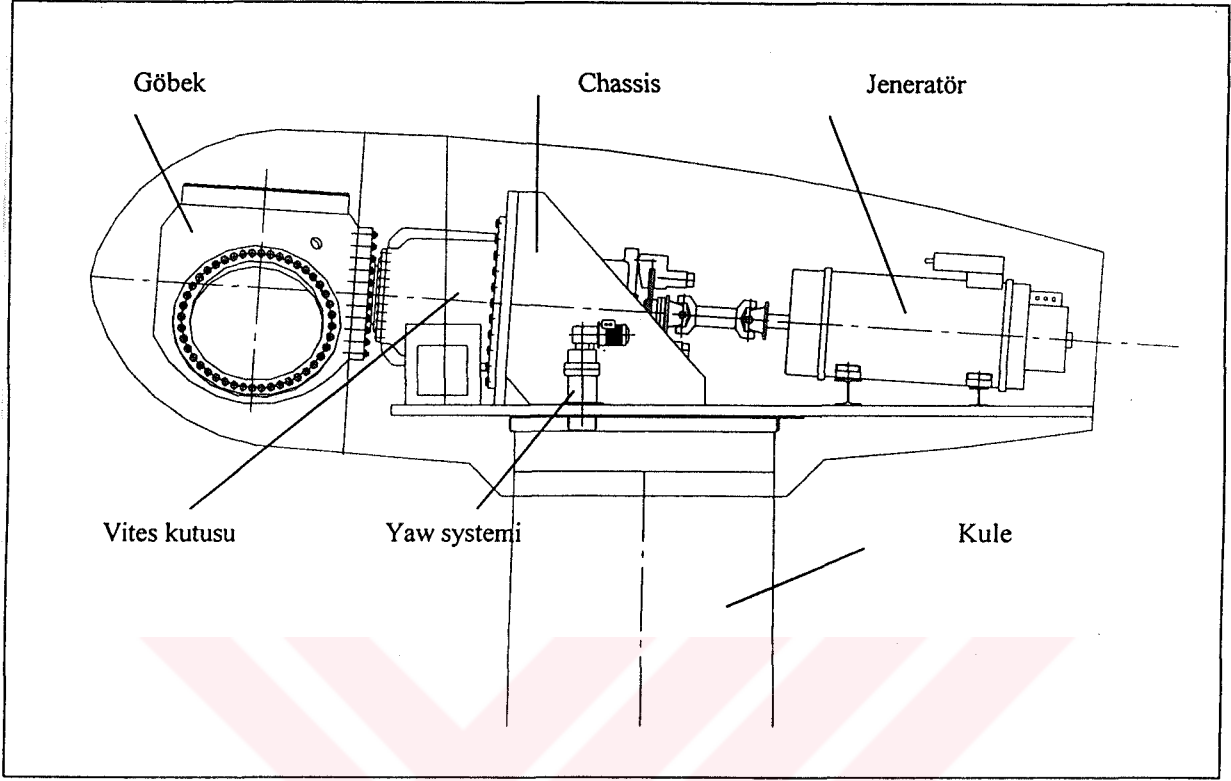
Şekil 5.8 Üç kanatlı RT.

3-kanatlı RT-lerde bulunan temel elemanlar Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11'de gösterilmiştir. Şekil 5.9'de görülen RT'nin yüksekliği 50 m'dir. Pervane çapı ise 43 m'dir.



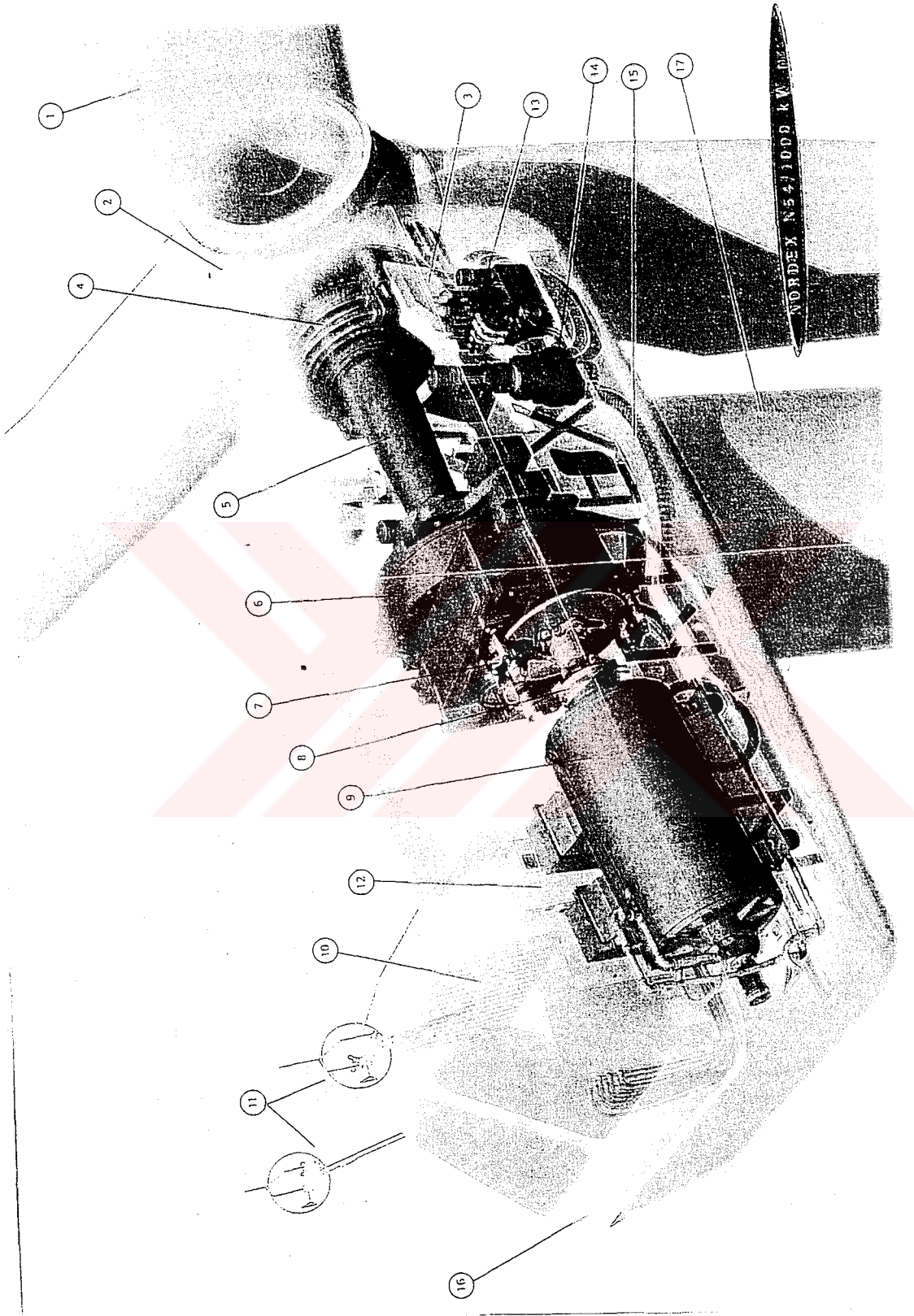
Şekil 5.9 Nordex N43/600 rüzgar türbinin resmi (Nordex GmbH izni ile).





Şekil 5.10 Windtec 650 rüzgar türbininin mekaniksel şeması (Windtec GmbH izni ile).

Şekil 5.11 ile , Nordex N54/1000 kW rüzgar türbinin nasel kısmında bulunan elemanlar daha görülebilir şekilde görülebilmektedir (Nordex GmbH izni ile)



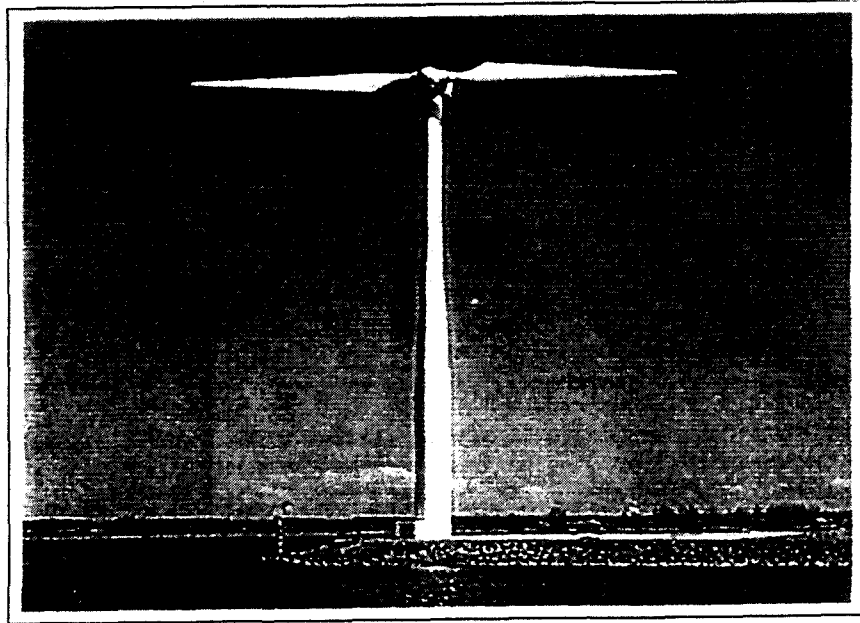
Şekil 5.11 Nordex N54 / 1000 KW rüzgar türbini.

Şekil 5.11’de bulunan elemanların açıklaması aşağıdaki gibidir:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Pervane kanatları (Rotor blades),             | 10. Soğutma radyatörü (Cooling radiator),         |
| 2. Göbek (Hub),                                  | 11. Rüzgar ölçüm sistemi (Wind measuring system), |
| 3. Türbin tutacağı (Turbine frame),              | 12. Kontrol sistemi (Controlling system),         |
| 4. Pervane yatağı (Turbine bearing),             | 13. Hidrolik sistem (Hydraulic system),           |
| 5. Pervane şaft sistemi (Rotor shaft),           | 14. Yönerge sürücüsü (Yaw drive),                 |
| 6. Vites kutusu (Gearbox)                        | 15. Yönerge yatağı (Yaw Bearing),                 |
| 7. Disk fren sistemi (Disc brake),               | 16. Nasel kapağı (Nacelle cover),                 |
| 8. Jeneratör kuplaj sistemi (Generator coupling) | 17. Kule (Tower)                                  |
| 9. Jeneratör (Generator),                        |   |

#### 5.4.2 İki-kanatlı RT :

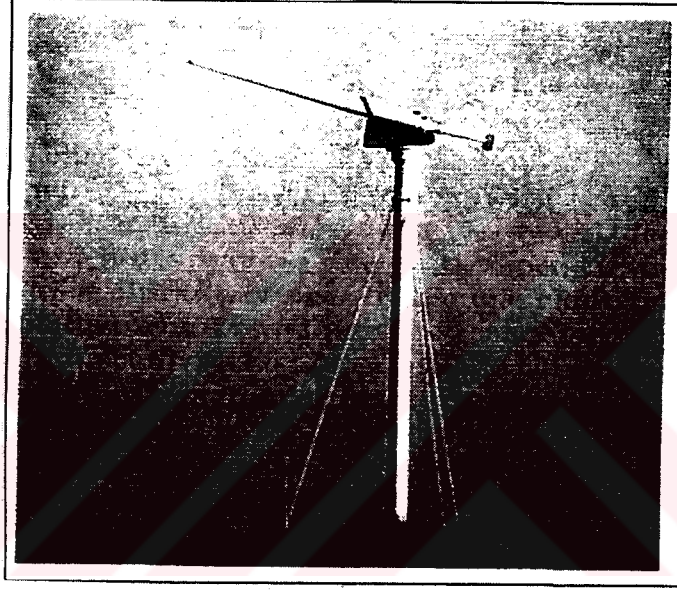
20 yıl öncesine kadar iki kanatlı RT’ler yaygın bir şekilde kullanılırdı (Şekil 5.12). 10 m’den 100 m’ye kadar değişen farklı pervane çaplarında Avrupa ve Amerika’da kullanılmıştır. 2-kanatlı RT, 3-kanatlı RT’den daha ekonomik gibi görünmesine rağmen, 2-kanatlı RT dinamik etkilerden dolayı bir takım ek ekipmanlar gerektirdiğinden, 3-kanatlı RT ile aynı maliyete gelmektedir. 3-kanatlı RT’den farklı olarak dönmeden meydana gelen ve kulenin yatay eksinine göre olan bir atalet momentine sahiptir. Bu durum RT üzerinde ek bir yüklenme meydana getirir ve sadece sallanan göbek (teetering hub) ile giderilebilir. Sallanan göbek kullanılmasının nedeni, dönen pervane üzerinde büyük atalet moment değişimlerinin etkilerini önlemektir. Ayrıca düşük şiddetteki rüzgar hızlarında (örneğin 3 m/s) pervane devreye girememektedir.



Şekil 5.12 2-kanatlı RT.

### 5.4.3 Tek-kanatlı RT :

Tek kanatlı RT'lerin kullanımının temel amacı; pervanelere etkiyen yüksek rotasyonel hızın düşürülmesidir (Şekil 5.14). Diğer yandan, tek-kanatlı RT aerodinamik olarak dengesizdir ve bu durumda ek hareketler ile istenmeyen bazı yüklere sebep olur. Bu mekanizmayı kontrol etmek için, göbek kısmına ek yapılar yapmayı gerektirir. Diğer dezavantajlarından birisi de, yüksek aerodinamik gürültü seviyesidir. Uç hız oranı, 120 m/s civarındaki 3-kanatlı pervanelerle kıyaslandığında, uç hızı 2 kat daha yüksektir. Dolayısı ile 3-kanatlı RT'lerden daha gürültülüdür.

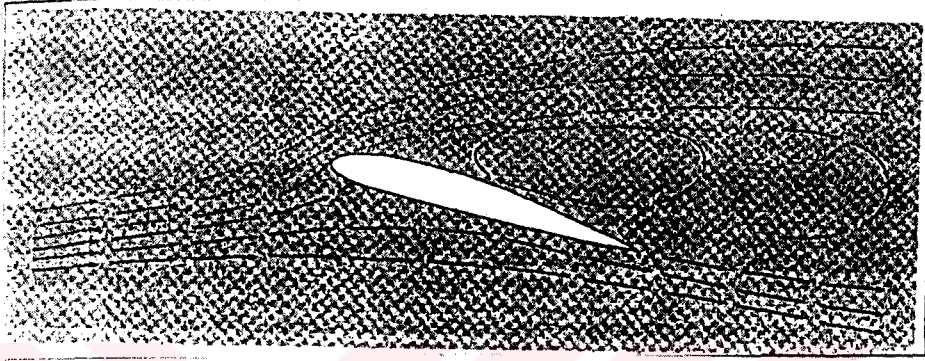


Şekil 5.13 Tek-kanatlı RT.

### 5.5 Rüzgar Türbinlerinin Güç Kontrolü:

Pervane kanatlarının üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetlerden dolayı RT'leri, rüzgardaki kinetik enerjiyi dönme (rotasyonel) mekanik enerjisine çevirir. Pervane kanatlarındaki bu kuvvetler uçak kanatlarının maruz kaldığı kuvvetlere çok benzer. Günümüzde kullanılan modern RT'lerde, 2 farklı aerodinamik kontrol mekanizması kullanılır. Bunlar Stall (pasif) ve Pitch (aktif) kontrol mekanizmalarıdır. Bu iki mekanizma, jeneratörün rüzgardan çıkarabileceği enerjiye göre ayarlanır. Eskiden çoğu küçük ve orta büyüklükte türbinler stall kontrol kullanırken, günümüzde RT'ler üzerinde daha etkin bir kontrolü sağlayan pitch kontrol mekanizması kullanılmaktadır. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle "stall"

olayının bilinmesinde yarar vardır. Stall olayı, akışın kanat profilinin negatif basınç bölgesinin aniden terkederken meydana gelen bir durumdur. Stall meydana geldiği zaman, hücum açısı büyüyerek kaldırma kuvvetinin azalmasına, sürüklenme kuvvetinin ise artmasına neden olur (Şekil 5.14). Uçaklarda uçuş sırasında meydana gelen bu durum çok tehlikelidir. Bazı rüzgar türbinlerinin kanatları bu durumu bir avantaj olarak kullanıp yüksek rüzgar hızlarında pervane kontrolü için yararlanılır.



Şekil 5.14 Stall olayının meydana gelmesi.

#### 5.5.1 Stall kontrol mekanizması:

Stall kontrol (pasif kontrol) rüzgar hızı üzerinde kuvvet gösteren pasif bir kontrol sistemidir. Pervane kanatları pitch açılarında sabitlenmiştir ve yatay ekseninde dönme yapamazlar. Kanat etrafındaki hava akışı Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Profil etrafındaki hava akışı.

RT sabitlenmiş pitch açısında sabit rotasyon hızında döndüğünü farz edelim. Rüzgar hızı arttıkça, uç hızı oranı azalacaktır ve hücum açısı da artacaktır. Hücum açısı artıp stall açısına geldiğinde stall olayı meydana gelecektir. Bu durum, daha önce anlatıldığı gibi kaldırma kuvvetini düşürürken, sürüklenme kuvvetinde bir artış meydana getirecektir. Stall olayı



kanatlarda bütün radyal pozisyonlarda aynı zamanda meydana gelir ve pervane gücünü azaltır. Kanatlar, yatay bir dönüş hareketi yaparak yumuşak bir stall gelişimi meydana getirirler. Şekil 5.15'dan da görüleceği gibi, nominal rüzgar hızından yüksek rüzgar hızlarında, profil etrafındaki hava akışı kanat yüzeyinden ayrık bir şekilde meydana gelir. Stall kontrollü RT'ler, pitch kontrollü RT'lere göre daha basit bir yapıdadır. Bu mekanizmanın faydalarını saymak gerekirse, bunlar arasında

- basit bir pervane ve göbek yapısına sahip olması,
- daha az bakım gerektirmesi,
- güç kontrolünde yüksek verimlilik sağlaması

bulunur.

Dünyada halen stall kontrollü RT'ler daha çok kullanılmaktadır. Türbin üreticiler basit güç kontrol sistemi ile çalışan türbinleri seçmektedir ve sabit bir pervane hızında indüksiyon jeneratör aracılığı ile ulusal şebekeye geçiş yapılmaktadır.

Son yıllarda stall ile pitch kontrol sistemlerinin karışımı olan “aktif stall” sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemin avantajlarını şöyle saymak mümkündür:

- çok küçük pitch açıları gerektirmesi,
- düşük rüzgar hızlarında bile güç kontrolünü mümkün kılması,
- ekstrem rüzgarlarda pervane kanatlarının düşük yüklenmesi için pozisyon değiştirilmesi,

sayılabilir.

### 5.5.2 Pitch kontrol mekanizması:

Pitch kontrol (aktif kontrol), jeneratörden girdi işareti bekleyen aktif bir sistemdir. Pitch kontrollü RT'lerde bulunan elektronik aksama bağlı hız kontrol sistemi saniyede birkaç kez güç çıkışını kontrol eder. Güç çıkışı normalden çok yüksekse, hız kontrol sistemi pervane pitch mekanizmasına sinyal göndererek durumu bildirir. Gelen bu sinyalden sonra, pervane kanatları da yönünü rüzgarın estiği yönden hafifçe çevirerek güç kontrolü yapar. Ters durumda da yani, rüzgar hızı azaldığında yani hız kontrol ve sinyal gönderme işlemi meydana gelir ve pervane bu kez rüzgarın estiği yöne doğru yönelir. Jeneratörün nominal güçte (rated power) çalışırken, rüzgar hızından düşük olduğu zaman pervane kanatları yatay eksenleri



etrafında dönecektir; yani pitch açıları değişerek hücum açısını azaltıp hava akışının etkilerini düzenleyecektir. Nominal rüzgar hızından yüksek hızlarda sadece nominal güçte üretebileceği kadar enerji üretir. Fakat bu durum rüzgar türbinine göre de değişmektedir. Bütün rüzgarlı durumlarda pervane kanadının etrafındaki hava akışı Şekil 5.16'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.16 Profil etrafındaki hava akışı.

Şekil 5.16'den de görüleceği gibi, kanat yüzeye çok yakındır ve bu yüzden çok küçük sürüklenme kuvveti meydana gelmektedir. Pitch kontrol sisteminin başlıca avantajları arasında:

- bütün rüzgarlı durumlarda aktif güç kontrol olanağı sağlaması,
  - daha yüksek enerji üretimi,
  - pervanenin acil durumlarda durabilmesi için güçlü fren sistemi gerektirmemesi,
  - nominal gücün üzerinde rüzgar hızlarında pervane kanatlarına binen yükün azalması,
  - ekstrem rüzgarlarda pervane kanatlarına düşük yükleme için pozisyon değişimine olanak sağlaması,
  - kanatların hafif olmasından dolayı daha hafif bir yapıya sahip olması
- sayılabilir.

### 5.6 Pervane Hızı:

Modern RT'leri elektrik şebekesine iki türlü bağlanabilmektedir. Birincisi, RT jeneratörünün, sabit hızda dönerek basit bir şekilde doğrudan senkronizasyon yöntemi ile şebekeye bağlanması; ikincisi, jeneratör ile şebeke arasındaki bağlantının, dönüştürücü sistemin de yardımı ile değişken pervane hızlarında (yani rüzgar hızlarında) bağlanmasıdır.

### 5.6.1 Değişken pervane hızı:

RT'leri için en iyi aerodinamik verimin belirlenmesinde kullanılan temel yöntem RT pervane uç hızı ile (Tip speed) rüzgar hızı arasındaki oranı en iyi şekilde belirlemektir (uç hız oranı-tip speed ratio,  $\lambda$ ). Maksimum aerodinamik verimi yakalayabilmek için pervanenin rotasyonel hızını rüzgar şiddetine göre değiştirmesi gerekir; yani düşük hızlı rüzgarlarda düşük şiddette pervane hızı; yüksek hızlı rüzgarlarda ise, büyük şiddette pervane hızı meydana gelmelidir. Günümüzde kullanılan RT'lerin bu durum ancak değişken hızlı pervane kullanımı ile mümkün olabilmektedir. Bu tip RT'ler, dönüştürücü sistemler ile çift beslemeli indüksiyon jeneratörler kullanılırlar.

Değişken hızlı pervaneleri sabit hızlı pervanelere göre bazı avantajlara sahiptir.

Bunlar,

- daha fazla enerji kazanımı,
- nominal güç işlemi sırasında çok küçük bozulmalar (şekil 5.17),
- hamleli rüzgarlara karşı daha düşük yüklenmeler,
- düşük şiddetteki rüzgarlarda daha az gürültü

sayılabilir.

### 5.6.2 Sabit hızlı pervaneler:

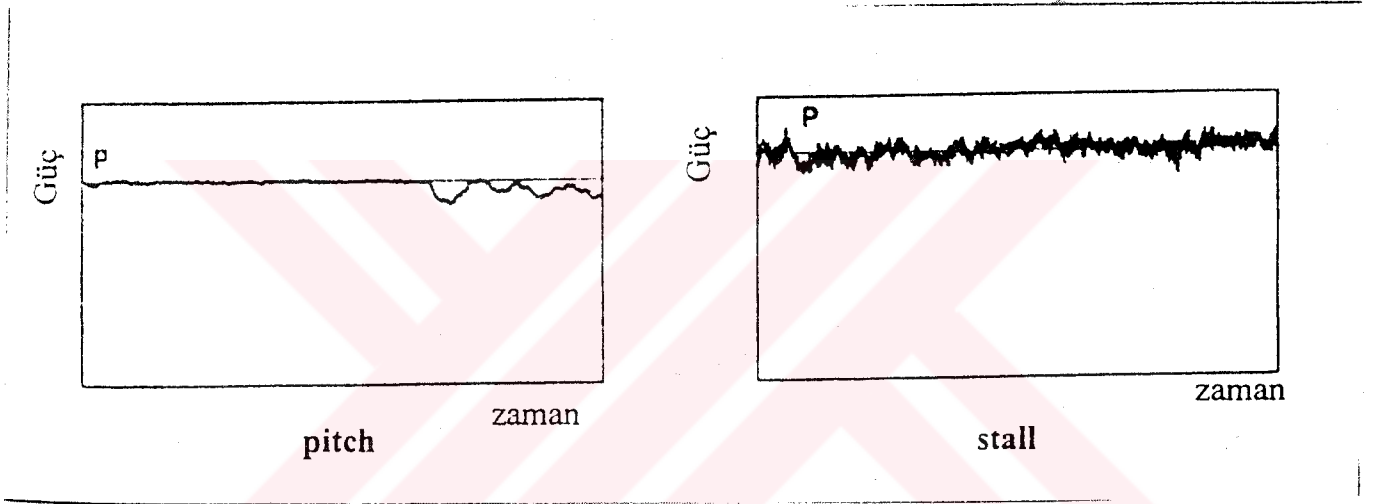
Sabit hızla dönen pervaneler basit yapıdadır, çünkü pervane hızı şebeke frekansına göre ayarlanır. Uç hızı oranı  $\lambda$ , çalışma sırasında sabit kalmayabilir, yani en iyi aerodinamik verim sadece sabit bir rüzgar hızında alınır. Dolayısı ile, türbin için hesaplanmış özel rüzgar hızı dışındaki değerlerde tam verim alınmaz. RT çalışırken en iyi aerodinamik verimliliği alabilmek için, türbin üreticileri çift-sabit hızlı indüksiyon jeneratör kullanmışlardır. Bu durum, pervane hızının iki adımda değişmesine imkan tanımaktadır. Düşük rüzgar hızlarında jeneratör düşük hızlarda hareket ederken; yüksek rüzgar hızlarında yüksek dönme hızları ile çalışmasını sürdürmektedir. Pervane hızının, sabit bir veya iki adımda kontrolü kolaydır. Sabit hızlı pervane sisteminin avantajlarını şöyle sayabiliriz:

- herhangi bir pervane hız kontrol sistemi gerektirmemesi,

- güçlü şebeke (grid) sistemi nedeni ile basit bir pervane hız düzenlemesine ihtiyaç duyması,
- sadece düşük hızlı pervane kontrolü gerektirmesi,
- daha ekonomik bir sistem olması,

sayılabilir.

Günümüzde kullanılan RT'lerinin büyük bir çoğunluğu sabit hızlı pervane sistemine göre tasarlanmıştır. Bu sistemin dezavantajı olarak nominal güç çıkışı sırasında fazla güç salınımı örnek verilebilir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 Pitch ve stall kontrollü RT'lerde değişken ve sabit hızlı pervanelerin güç zaman serisinin davranışı

## 6. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KARAKTERİSTİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI

### 6.1. Rüzgar Türbinlerinin Karakteristikleri

Dönüştürücü sistemleri birbiriyle karşılaştırabilmek için, sistemi tanıtan karakteristik sayılar tarif edilmiştir.

#### a) Güç Katsayısı ( $C_p$ )

Rotordan elde edilen gücün, rüzgarın sahip olduğu güce oranı şeklinde tarif edilir.

$$C_p = \frac{N_R}{N} = \frac{N_R}{1/2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A} \quad (6.1)$$

Güç Katsayısı aynı zamanda rotorun verimini de gösterir.

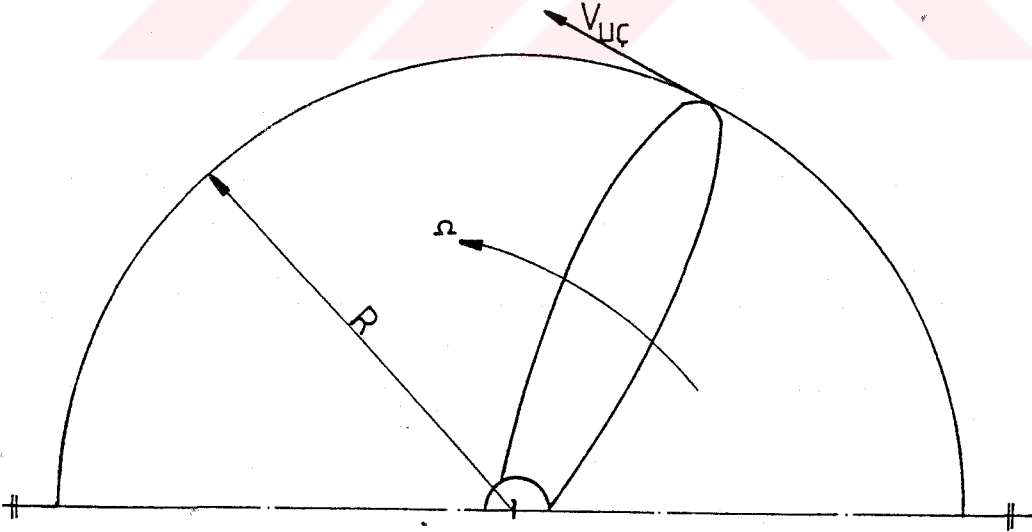
$C_p$  = Güç sayısı (Boyutsuz)

$N_R$  = Rotordan elde edilecek güç (W ya da KW)

$N$  = Rüzgar gücü (W ya da KW)

#### b) Uç hız oranı ( $\lambda$ )

Kanat ucundaki çevresel hızın, rüzgar hızına oranı şeklinde tarif edilir.



Şekil 61. Kanat ucundaki hız

$$\lambda = \frac{(R\Omega)}{V} = \frac{V_{u\check{c}}}{V} \quad (6.2)$$

$\lambda$  = Uç hız oranı (Boyutsuz)

$\Omega : 2 \pi n/60$  , Rotorun açısal hızı (1/s)

$n$  : Rotorun devir sayısı (dev/dak)

c) Katılık Oranı

$$\sigma = \frac{A^{\circ}}{A} \quad (6.3)$$

$A^{\circ}$  = Rotor kanatlarının toplam alanı ( $m^2$ )

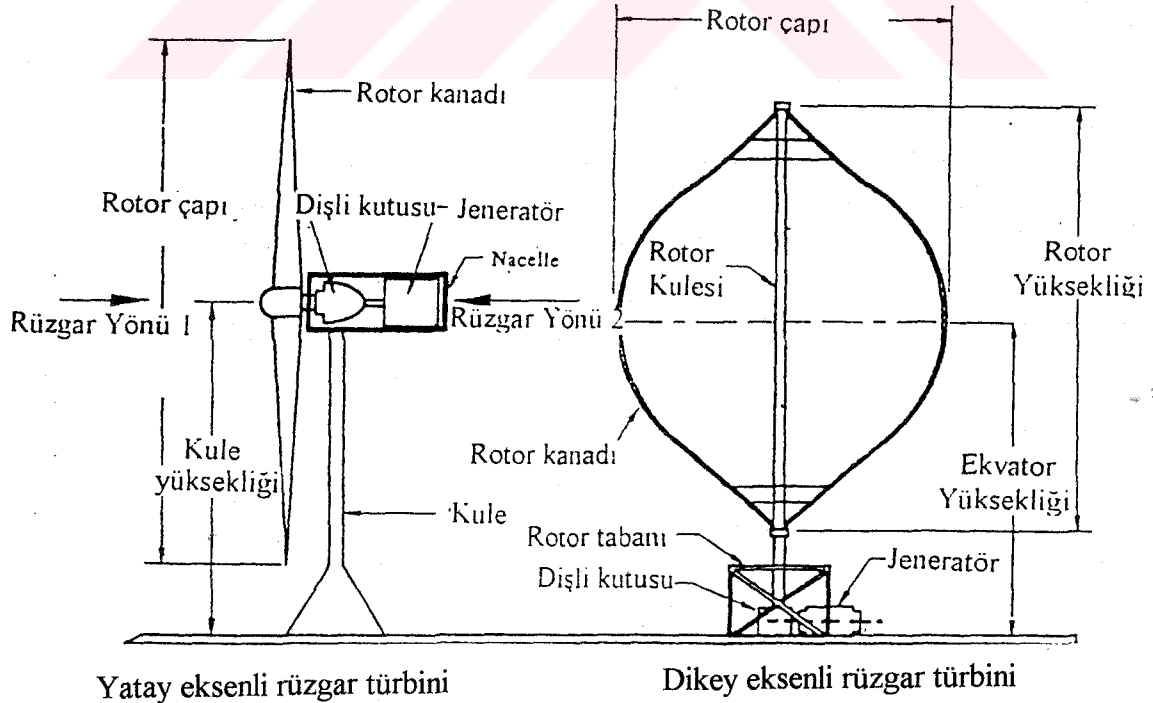
$A$  = Rotor kanatlarının süpürdüğü alan ( $m^2$ )

### 6.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilirler. En anlamlı bulunan sınıflandırma biçimi rotor ekseninin yeryüzüne göre konumuna dikkat alan sınıflandırmadır. Buna göre rüzgar makinaları :

- Yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT)
- Dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT)

Şeklindeki ikiye ayırmak mümkündür. (Şekil 6.2)

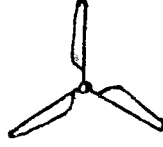


Şekil 6.2 Rüzgar türbin dizaynları

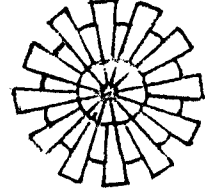
## Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri



İki Kanatlı

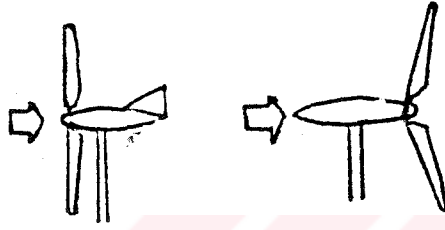


Üç Kanatlı



Çok Kanatlı

Rüzgarı Önden  
Alan Türbin



Rüzgarı Arkadan  
Alan Türbin

## Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Sürüklenme Tipi



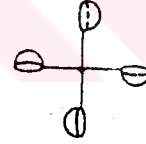
Savonius



Çok Kanatlı

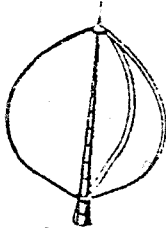


Koruyucu

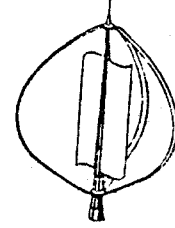


Fincanlı

Kaldırma Tipi



Darrieus

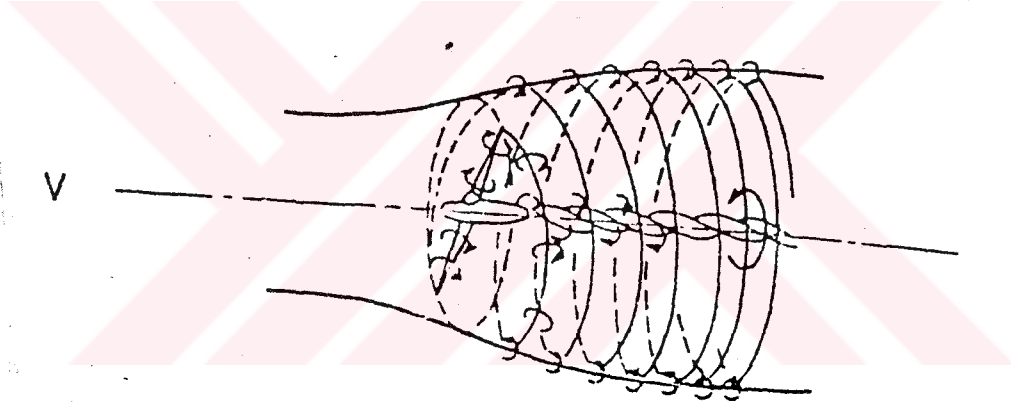


Savonius / Darrieus

Şekil 6.3 Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması

### 6.2.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT):

Bu tip türbinlerin rotorları, maksimum enerjiyi tutabilmek için rüzgar akışına dik olarak durmalıdır. Rüzgarı önden alan sistemlerde kılavuz kuyruk vasıtasıyla, rotor rüzgara karşı yönlendirilir. Kanatlardaki kaldırma kuvvetleri rotorun dönmesini sağlar. Yatay eksenli türbinlerin çoğu rüzgarı önden olacak şekilde (upwind) tasarımlanır. Rüzgarı arkadan alan (downwind) türbinlerin ise, yaygın bir kullanımı yoktur (Benocci, 1984).



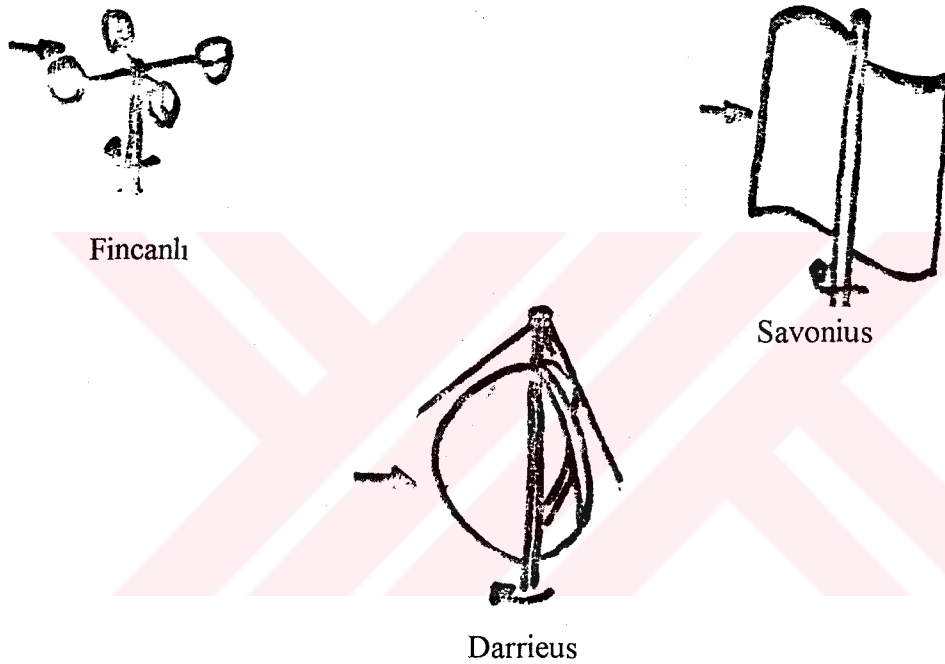
Şekil 6.4 İki kanatlı rotorda hava akışının şematik gösterilimi (Benocci, 1984)

### 6.2.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT)

Dikey eksenli türbinlerde, kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Aynı ilke Savonius rotorlarda daha özel bir şekilde kullanılır. Bu rotorda güç katsayısı 0,15 den azdır. Bu nedenle güç üretiminde tercih edilmezler.



Bu türbinlerin dönme eksenleri dikey ve rüzgara diktir. Kanat kirişleri dönme eksenine dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yüksek verimleri nedeniyle dikey eksenli Darious tipi türbinlere son yıllarda ilgi artmıştır. DERT'lerin rüzgarı her yönden kabul edebilme üstünlükleri vardır. DERT'lerin diğer bir üstünlüğü ise, makine aksamının (hız yükseltici, Jeneratör, ..., v.s.) toprak seviyesine kurulabilmesidir (Eldrige, 1979).

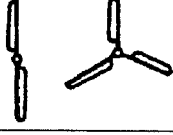


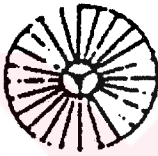






Şekil 6.5 Dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT)

### 6.2.3. Rüzgar Türbin Tipleri ve Kullanım Yerleri :

Günümüzde bir kısmı ticari amaçlı olan değişik özellikte ve türde rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Rüzgar türbin tipleri ve kullanım yerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kullanılmakta olan rüzgar türbin tipleri ve bunların kullanım yerleri (Eldrige, 1979)

Rotor Tipleri	$\lambda$	$C_p$	RPM	Tork	Kullanım Yeri
PERVANE TİPİ 	6 - 10	0.42	Yüksek	Alçak	Elektrik üretimi
DARRIEUS TİPİ 	5 - 6	0.40	Yüksek	Alçak	Elektrik üretim
CYCLOGIRO TİPİ 	3 - 4	0.45	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya su pompalama
ÇOK KANATLI TİP 	3 - 4	0.35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya su pompalama
YELKEN KANAT TİPİ 	4	0.35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya su pompalama
FAN TİPİ 	1	0.30	Alçak	Alçak	Su pompalama
SAVONIUS TİPİ 	1	0.15	Alçak	Yüksek	Su pompalama
HOLLANDA TİPİ 	2 - 3	0.17	Alçak	Yüksek	Su pompalama veya değirmen

$C_p$ = Güç Katsayısı

$$\lambda = \frac{\text{Kanat uç hızı}}{\text{Rüzgar hızı}} \text{ oranı}$$

RPM = revolutions per minute = dakikadaki devir

### 6.3 Rüzgar Makinaları Elemanları:

#### 6.3.1 Rotor:

Çoğu YERT'ler, iki veya üç kanatlı rüzgar yönüne dönük tasarımlardır. YERT'lerin büyüklükleri arttıkça, önemli ağırlık artışı nedeniyle, iki kanat tercih edilmektedir. Almanya ve İtalya'da geliştirilen karşı ağırlıklı tek kanat YERT'ler de bulunmaktadır. DERT'ler çoğunlukla iki kanatlıdır.

Kanatlar cam elyafı ile takviye edilmiş polyester, ince tabakalara ayrılmış, ağaç, alüminyum veya çelikten imal edilmektedir. Rüzgar türbin imalatçılarının çoğu cam elyafı ile takviye edilmiş, polyester kullanılmaktadır. Bu göreceli olarak daha hafif kanatlar, mil yataklarına ve rotor göbeklerine, daha az basınç uygulamaktadır. Diğer imalatçılar ise imalat kolaylığı, dayanıklılık ve düşük maliyetleri nedeniyle çelik kanatlar kullanmaktadır. Mükemmel yorgunluk direnç özellikleri nedeniyle bazen ağaç tabakaları da kanatlarda kullanılmaktadır. Çoğu DERT imalatçıları ise alüminyum kanatlar kullanmaktadır.

Modern üç kanatlı YERT'ler, genelde tip tarafından dökme demir veya dökme çelik bir göbeğe bağlanmış tek tarafından destekli kanatlara sahiptir. Daha büyük DERT'ler için yeni bir tasarım seçeneği ise, iki kanatlı hareketli bir rotor kullanılmaktadır. Burada kastedilen hareket, iki kanatlı bir rotorun askı çivileri ve yataklarda düşük hız miline bağlandığında ortaya çıkan sallanma hareketi olup, dönme ekseninin dikeyden birkaç derece öne arkaya kaymasına izin vermektedir. Hareketlilik kanatlar üzerindeki yükleri önemli ölçüde azaltmaktadır (Uyar, 1985).

#### 6.3.2 Güç denetimi:

Bir rüzgar türbininin tasarımı sırasında verilmesi gereken en can alıcı kararlardan biri yüksek rüzgar hızlarında gücün nasıl sınırlanacağıdır. Sabit hız makinaları için iki temel seçenek hız kaybı ile düzenleme ve kanat açısı denetimidir.

En basit seçenek olan hız kaybı ile düzenleme yöntemi, sabit kanatları olan DERT ve YERT'lerde kullanılmaktadır. Eğer rüzgar hızı artarsa, hava akışının kanatlar üzerindeki saldırı açısı, akış ayrımı gerçekleşene yani hız kaybına kadar büyümektedir. Bu ise kaldırma da kayba, sürüklemeye bir artışa ve rüzgar türbininin çıktısının sabitlenmesine neden olmaktadır. Bu prosesin etkisi, kanat profilinin kalınlık ve giriş dağılımının ve kanat biçiminin uygun seçimi ile yönlendirilebilmektedir. Hız kaybı ile düzenlemenin üstünlüğü basitliğinden ve göreceli düşük maliyetinden kaynaklanmaktadır.

Kanatlar boyunca veya daha dış kısımlarında kanat açısının değiştirilebileceği bir düzenleme yapıldığında, yüksek rüzgar hızlarında saldırı açısı kanat açısı değiştirilerek adım adım azaltılabilmektedir. Sonuç olarak, güç çıktısı türbin gücünün tasarım seviyesinde sabit tutulabilmektedir. Kanat açısı değiştirmenin üstünlüğü etkin aerodinamik olarak tanınmasıdır. Sadece YERT'lerde kullanılan bu denetim mekanizması ek maliyetlere yol açan karmaşık bir açı değiştirme mekanizmasına sahiptir.

Çapı 25 metreden küçük olan, daha ufak, türbinlerin çoğunlukla hız kaybı ile düzenlemeden yararlandıkları son on yılın deneyimi ile ortaya çıkmıştır. Şimdilerde satılmakta olan büyük ölçekli türbinlerin hemen hemen tamamında kanat boyunca değişken kanat açı denetimi özelliği bulunmaktadır. Son zamanlarda, değişken hızlı büyük makinalar pazara girmeye başlamıştır. Bu makinaların özellikleri arasında kanat ve göbek üzerine daha az zorlamanın yanı sıra güç düzenleme sırasında daha az enerji kaybı sayılabilmektedir (Wilson, 1984).

### 6.3.3 Jeneratör:

Sabit hız rüzgar türbinlerinde kullanılan jeneratörler için iki temel seçenek asenkron (induction) veya senkron jeneratörlerdir. Bugüne kadar tesis edilen, şebekeye bağlı rüzgar türbinlerinin çoğu asenkron jeneratör kullanılmaktadır. Bu türbinlerin elektrik üretmeye başlayabilmeleri için elektrik şebekesine bağlı olmaları gerekir. Jeneratör bazen, türbini senkron hıza ulaştırabilmek üzere, bir motor olarak kullanılmaktadır. Bu özellik hız kaybı ile güç düzenleme yapan, rüzgar türbinleri tarafından kullanılmaktadır. Asenkron jeneratörler basit ve ucuzdur. Temel dezavantajları ise şebekeden reaktif güç çekmeleridir. Senkron jeneratörler ise reaktif güç gerektirmemektedir. Bu nedenle elektrik şirketlerince tercih edilmektedir. Ancak bu jeneratörler daha pahalıdır.

Son on yılda Kaliforniya ve Avrupa da tesis edilen rüzgar türbinlerinin hemen hemen tamamı asenkron jeneratörleri kullanmıştır ve bu eğilimin süreceği anlaşılmaktadır. Değişken hız tasarımlarında AA-DA-AA güç (elektronik) çevrim sistemleri, enterkonnekte şebeke ve güç denetimi için kullanılmaktadır (Angi, 1984).

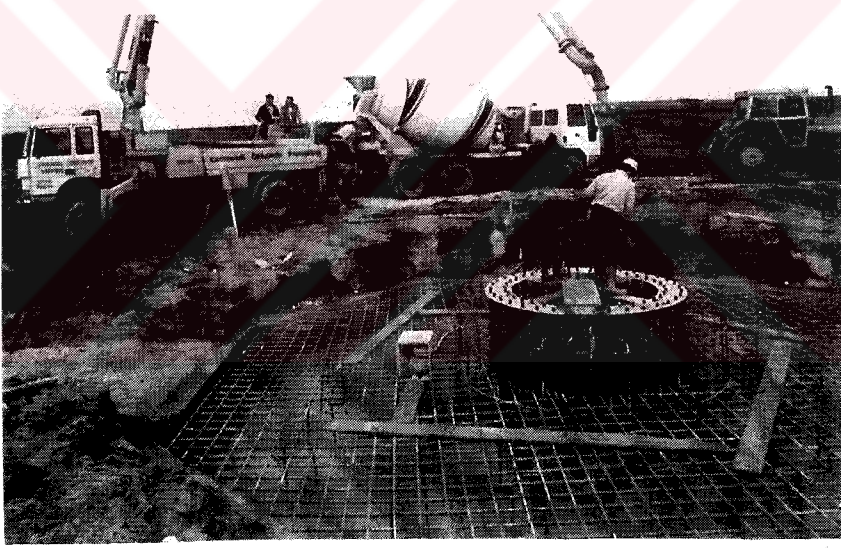
### 6.3.4 Vites kutusu:

Rüzgar türbinleri göreceli olarak düşük hızlarda çalışmaktadır. Kanat uç hızları tipik olarak 55-90 m/s mertebesindedir. 30 metre çapındaki bir türbinin kanatları yaklaşık 35 ila 55 devir/dakika hızla dönmektedir. Jeneratörün senkron hızında (tipik olarak 1500 devir/dakika) dönen bir shaft çıktısı için hız yükseltici vites kutusu gerekmektedir. En sık kullanılan iki

kutusu tipi paralel şaft ve büyük bir dişli çarkın içinde dönen küçük dişli vites kutularındır. Paralel, şaft tasarımları basit olmakla beraber göreceli olarak ağır ve şaft çıkışı ana eksenle çakışmamaktadır. Dişli çark vites kutuları daha hafif, daha derli toplu ve çıkış şaftları giriş şaftları ile aynı çizgi üzerindedir. Daha büyük rüzgar türbinleri (çapı 25 metreden büyük) için dişli çark vites kutularının maliyet ve ağırlık üstünlükleri giderek belirginleşmektedir.

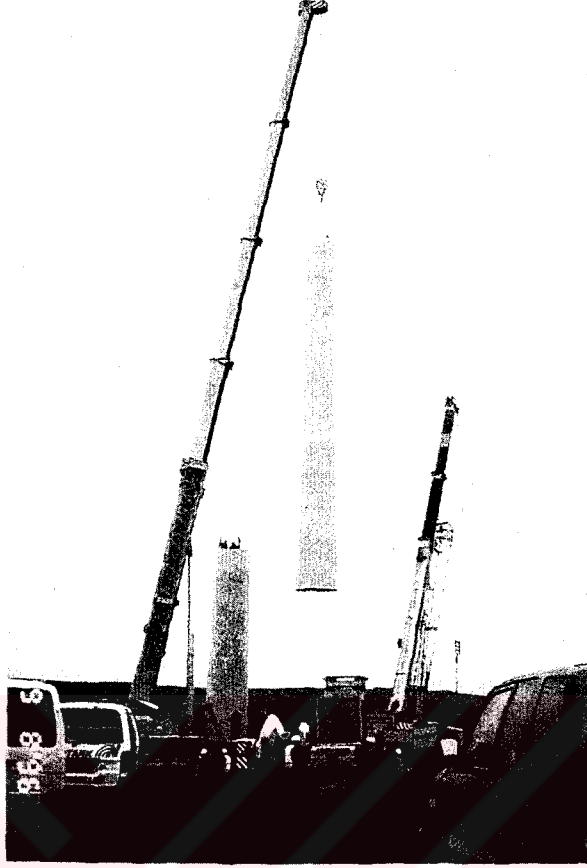
### 6.3.5 Kule:

Kafesli ve borulu olmak üzere iki tip kule kullanılmaktadır. Kaliforniya’da kurulu olan rüzgar türbinlerinden dengeli bir biçimde her iki kule tipinden de kullanılmıştır. Kafes kulelerin maliyeti daha azdır. Borulu kule ise genel olarak görsel açıdan daha çekici bulunmaktadır. Borulu kulelerin arkasında oluşan korumalı kısım, kötü hava koşullarında ve bakım amacıyla makine odasına ulaşılmasında çok daha pratik görülmektedir. Geleceğin çoğu Avrupa rüzgar santral gruplarının borulu kuleleri olan türbinlere önem vermeleri beklenmektedir.



Şekil 6.6 İngiltere’de Cornwall, Delabole’de rüzgar türbininin temelini atılması.

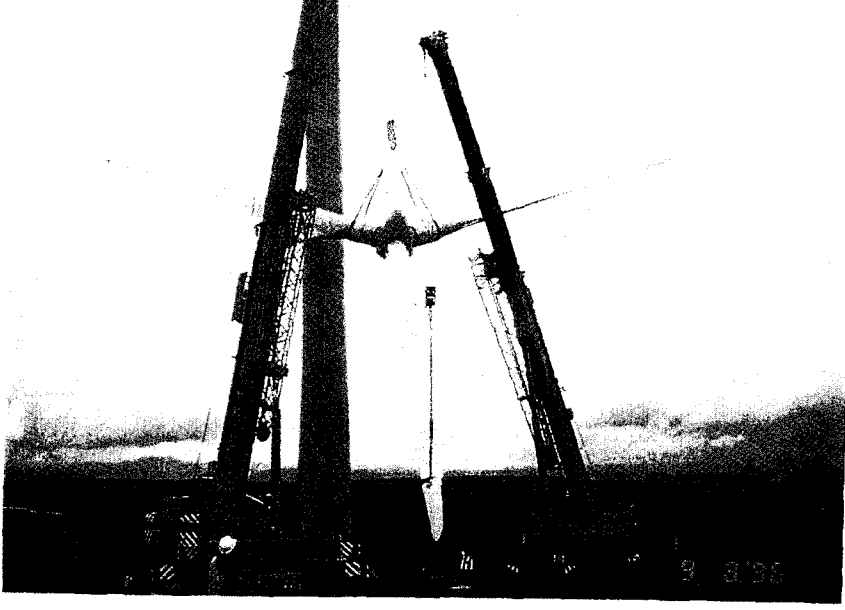
(Ulusal Rüzgar Gücü Teşkilatının İzni İle)



Şekil 6.7 Kule montajı (Ulusal Rüzgar Gücü Teşkilatının izni ile)



Şekil 6.8 Rüzgar türbininin naselinin (jeneratör yerleşiminin) montajı  
(Ulusal Rüzgar Gücü Teşkilatının izni ile)



Şekil 6.9 Rotorun montajı yapılırken vinç ile kaldırılması  
(Ulusal Rüzgar Gücü Teşkilatının izni ile)



## 7. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ELEKTRİK SİSTEMİ

Elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan rüzgar türbinleri, önceki bölümde açıklandığı gibi, bir, iki veya üç kanadı olan ve yüksek hızda çalışan makinalardır. Yüksek hızda çalışmalarının nedenleri (EİEİ, 1994);

- Eşit çaptaki yüksek hızlı bir rüzgar türbini düşük hızlı bir rüzgar türbininden daha hafif dolayısı ile daha ekonomiktir,
- Dönme hızları yüksek olduğu için gerekli çevrim oranı daha düşüktür. Bu nedenle dişli kutusu daha hafiftir;
- Elektrik jeneratörlerinin çalışmaya geçmesi için gerekli başlangıç torku küçüktür.

Hızlı bir rüzgar pervanesinin başlatma torku çok küçük de olsa, jeneratörü kolaylıkla harekete geçirir. Dolayısı ile yüksek hızlı rüzgar türbinleri bu kullanım için son derece uygundur.

Türbin kanatları sabit veya değişken açılı olurlar. Bazı tasarımlarda pervane frenlendiğinde açığı arttıran özel bir düzenleyici (regülatör) kullanılır. Sabit açılı kanat yüksek hızlı rüzgar makinalarında, jeneratör başlama esnasında motor gibi davranır ve dönme hızı nominal hıza ulaştığında jeneratöre dönüşür. Regülatör sistemleri olmayan rüzgar pervaneleri de vardır. Bu tür rüzgar pervanelerinin çalışmaya başlaması özellikle makinanın  $\lambda_0$  uç hız oranı (tip speed ratio), yüksek ise daha zordur. Bu gibi makinalarda burulmuş kanatlar tercih edilmelidir.

Genellikle rüzgar, pervaneyi bir dişli kutusu üzerinden hareket ettirerek elektrik jeneratörünü sürer. Dişli teknolojisinde ortaya çıkan gelişmeler ve düşük hızlı elektrik jeneratörlerinin maliyetinin yüksek olması, küçük sistemler dışında pervanenin jeneratör tarafından doğrudan sürülmemesi eğilimine yol açmaktadır.

Rüzgar türbininin pervanesi kuleye rüzgarı önden (upwind) veya arkadan (downwind) alan yönde olarak yerleştirilebilir. Birinci durumda kalkış etkisinden kaçınılır, ikinci durumun avantajı ise başlangıç torku düşük olduğu için yön bulma motorunun gücünün azalmasıdır.

### 7.1 Elektrik Jeneratörleri:

Mekanik enerjiden elektrik enerjisi üretimi için RT'lerinde kullanılan jeneratörlerde, üç fazlı alternatif akım vardır.

Aşağıdaki üç tip jeneratör yaygın olarak kullanılır:

1. Doğru akım jeneratörü (veya şönt tipi)
2. Senkron jeneratör (veya alternatör)
3. Asenkron jeneratör (veya indüksiyon jeneratör)

Küçük güç sistemlerinde eskiden çok fazla kullanılan doğru akım jeneratörleri şimdi genellikle senkron veya asenkron jeneratörler ile değiştirilmektedir. Bu jeneratörleri, çok pahalı olmayan doğrultmaçlar yardımı ile kolayca doğru akıma dönüştürebilen alternatif akım üretir. Senkron ve asenkron jeneratörler orta ve büyük güçlü sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar. Bunlar sabit stator ve dönen rotor olmak üzere sabit iki kısımdan oluşur. Her iki jeneratör tipinde de, stator benzer yapıdadır. Statorlar sabit hızda manyetik alan meydana getirirler.

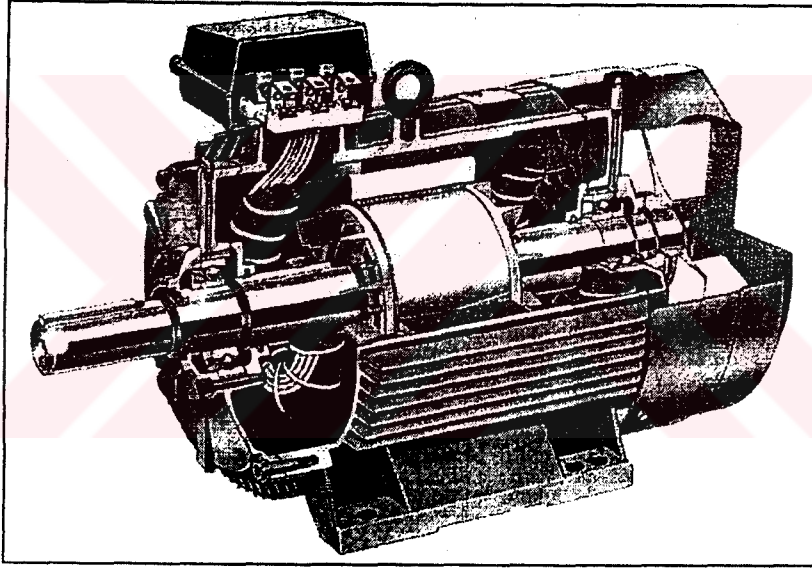
#### **7.1.1 Senkron jeneratörler (alternatörler):**

Senkron jeneratörlerin en önemli özelliği, bağlandığı şebeke ile aynı frekansta çalışmasıdır. Senkron jeneratörün doğru akım jeneratörüne göre avantajı, veriminin yüksek olması ve bir doğru akım jeneratörüne göre daha düşük dönme hızında elektrik verebilme özelliğidir. Bunun yanında senkron jeneratörler daha yüksek hızlarda elektrik üretirler. Alternatif akım jeneratörlerinde maksimum dönme hızı ile elektrik üretimi için gerekli minimum hız arasındaki oran yüksektir. Böylece bir senkron jeneratörü süren bir rüzgar türbini daha geniş rüzgar hızı aralığında çalışabilecektir (Şekil 7.1).

Asenkron jeneratörlerine oranla senkron jeneratörlerin kendi mıknatıslama akımını sağlama avantajı vardır. Ancak bunlar pahalı ve kontrol sistemlerine bağlantıları daha karmaşıktır. Bir kontrol sisteminde takometre, voltmetre, fazmetre, şebeke ile bağlantıyı sağlayan otomatik cihaz ve rüzgar kesildiğinde veya şebeke gerilimi sıfıra düştüğünde bağlantının kesilmesini sağlayan ters güç rölesi bulunur. Senkron jeneratörün şebekeye bağlanması hassas bir düzenleme ister bu işlemin sık sık yapılması gerektiği için sorunlar ortaya çıkar. Jeneratör şebekeye tam senkron hızda, senkron jeneratör gerilimi şebeke gerilimi ile aynı fazda ve değerde iken bağlanmalıdır. Bu zorlukların üstesinden büyük damperler kullanılarak gelinebilir. Damperler senkron jeneratörü indüksiyon motoru gibi yol verilmesini sağlayan sincap kafes şeklinde bobinlerdir ve şebekeye bağlantı yapıldığında oluşabilen bağlantının azaltılmasını sağlarlar. Diğer bir çözüm, rüzgar türbini ve senkron jeneratör arasına, jeneratörü şebekeye sürekli bağlantılı bırakan serbest bir kuplaj yapılmasıdır. Fakat bu çözüm

ek ekonomik değildir. En ucuz ve güvenilir çözüm olarak, asenkron jeneratör görünmektedir. Bu jeneratörlerin bir çok avantajı vardır. Bunlar (Siegfried, 1998):

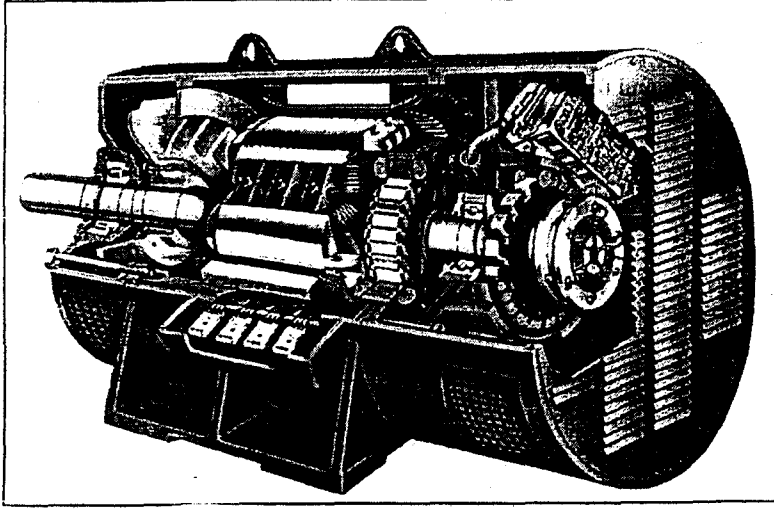
- Tesisi ucuzdur,
- Dönen kontaklar yoktur,
- Şebekeye bağlantı kolaylığı vardır,
- Şebekeye bağlandığı zaman salınımlar oluşmaz.



Şekil 7.1. Senkron jeneratör (Siegfried, 1998)

### 7.1.2 Asenkron (indüksiyon) jeneratörler:

Asenkron jeneratör şebeke frekansından biraz yüksek frekansta çalışırlar. Senkron hızdan çok az farklı bir hız ile uyum gözetmeksizin bağlanabilir ve bu bağlantı sonucunda oluşan aşırı yüklenme çok kısa sürelidir. Bağlantı kontrol sistemi, şebekeye bağlantıyı kontrol eden takometre kontağından ve rüzgar hızı düştüğü zaman bağlantının kesilmesini sağlayan bir ters akım rölesinden oluşur. (Şekil 7.2)



Şekil 7.2 Asenkron jeneratör (Siegfried, 1998)

Asenkron jeneratörün dezavantajı, mıknatıslanma akımını şebekeden çekmesi, böylelikle reaktif güç tüketmesidir. Bu sorun, uçlara kapasitör bağlanarak giderilebilir. Kapasitörlerin kullanılması şebekeden çekilen reaktif gücün azaltılmasını sağlar. Bu nedenle de güç faktörü artırılmış olur. Eğer rüzgar hızı türbinin çalışmaya başlama hızından (cut-in wind speed) daha düşükse, bir otomatik ayırma cihazı jeneratörü şebekeden ayırır. Bu sistem, başlatma torku düşük olan yüksek hızı sabit kanatlı makineler için faydalıdır.

## 7.2 Jeneratörün Dc-Ac Şebekeye Tek Güç Kaynağı Olarak Bağlanması:

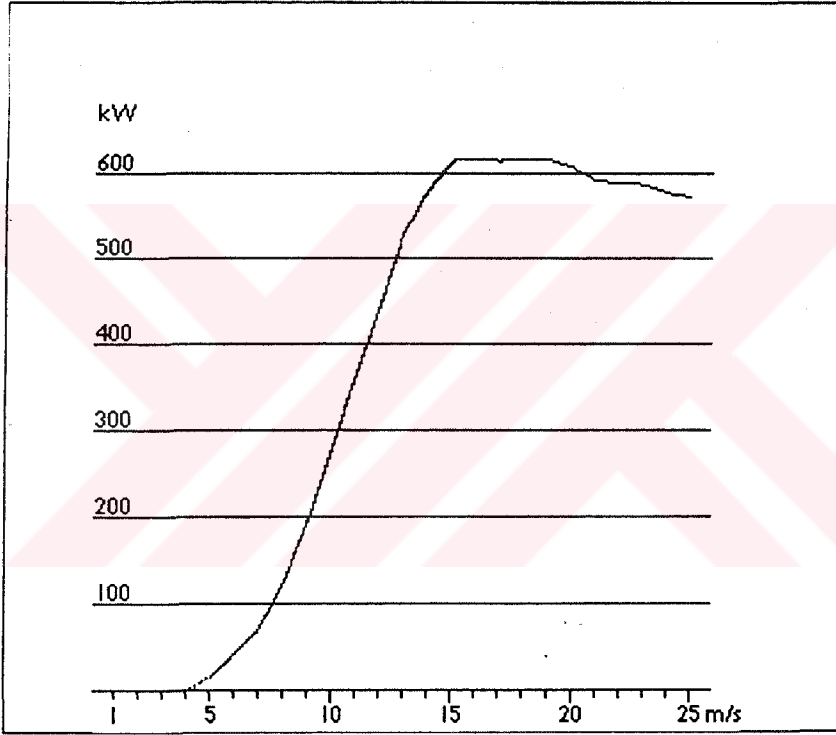
Bu durumda elektrik üretme işlemi, su pompalamaya çok benzer. Rüzgar türbini belli bir manometrik basınç altında belli bir su basması sağlayan bir pompa sürmek yerine, belli bir gerilim altında akım sağlayan bir alternatörü çalıştırır. Bunun için rüzgar türbini, jeneratör, şebeke ve karakteristikleri incelenmelidir.

### 7.2.1 Güç çıkışı:

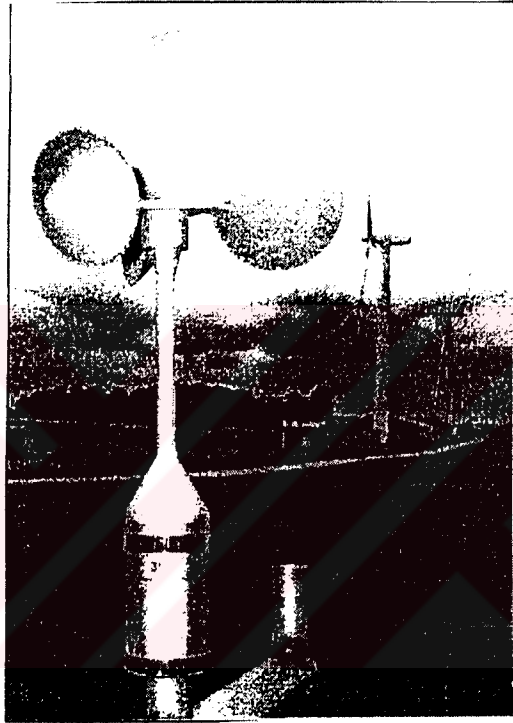
Herhangi bir RT tarafından üretilecek maksimum güce “nominal güç” (Rated power), türbinin rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmeye başladığı rüzgar hızına da, “nominal rüzgar hızı” (rated wind power) denir. RT’lerinin modellerine göre devreye girebileceği en düşük hızı “devreye giriş hızı” (cut-in wind speed), belli bir rüzgar hızından sonra ise, güvenlik nedeni ile devreden çıktıkları hızı da “devreden çıkış hızı” (cut-out wind speed) denir. Nominal hızın üzerindeki rüzgar hızlarından devreden çıkış hızlarına kadar olan hızlarda türbin tipine göre sabit veya artan değerlerde enerji üretilmektedir. Her türbin için farklı rüzgar hızlarında üretilebilecek enerji miktarı vardır. Bu bağıntıyı gösteren grafiklere “güç eğrisi” (power curve) denmektedir (Şekil 7.3). Türbin mikrokonuşlandırma ve enerji üretimi

hesaplamalarında da doğrudan alındığı için santral verimi üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir.

Güç eğrisi hesaplamaları için geliştirilen yöntem (RISO, 1999), türbin pervanesinin çapının 2.5 katı kadar uzakta bir mesafeye rüzgar ölçüm direği konarak yapılır (Şekil 7.4).



Şekil 7.3 Tipik bir 600 kW RT'ni güç eğrisi (RISO, 1999).



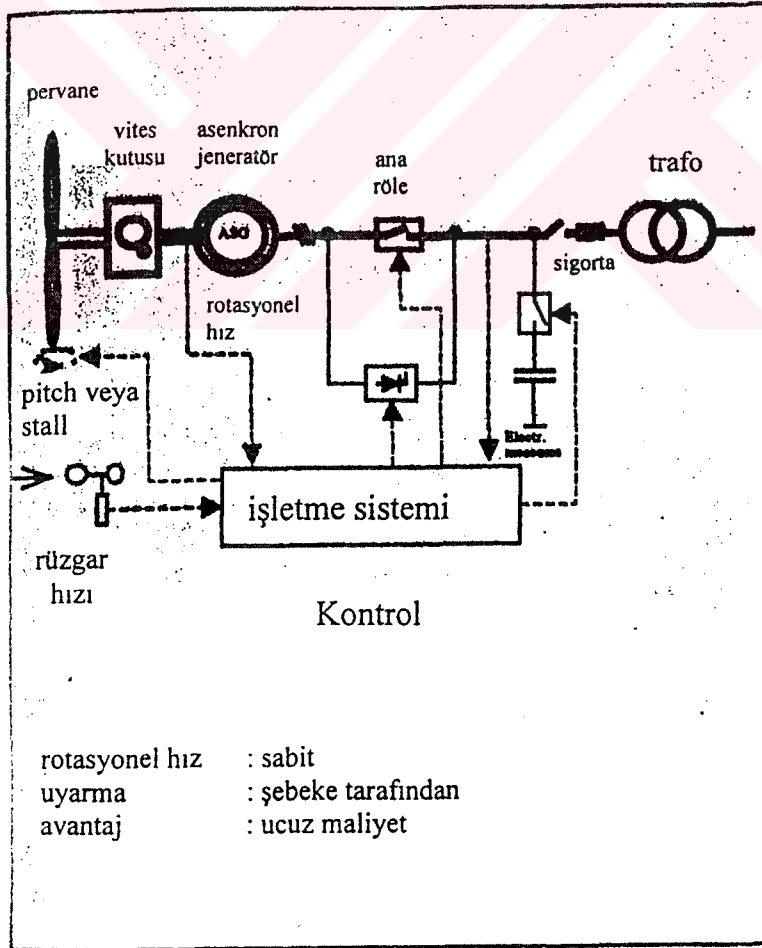
Şekil 7.4 Güç eğrisi hesaplamak için kurulmuş bir sistem (RISO, 1999).

Ayrıca burada dikkat edilmesi gereken husus türbin ile ölçüm direği arasında herhangi bir engelin bulunmamasıdır. RT pervanesinin kanatları dairesel bir yörünge izlediğinden pervane de dairesel bir alan taramaktadır. Bu alana “süpürülen alan” (swept area) denilmektedir.

RT'nin rüzgardan çıkarabileceği enerji, Bölüm IV'de izah edildiği gibi, pervane alanı ile doğru orantılı olduğundan, pervane rüzgarı daima oldukça dik görmelidir. Fakat rüzgar her zaman aynı yönden esmeyeceğinden dolayı RT'ye bazı ekler yapılarak pervanenin rüzgarın esiş yönüne doğru kendini çevirebilecek mekanik aksam gerekmektedir. Yatay eksen üzerinde bu dönmeyi sağlayan sisteme yawing adı verilir.

### 7.3 Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Bağlanması:

RT'lerde kullanılan dönüşüm sistemlerini 3 gruba ayırmak mümkündür. Bunlar, sabit hızlı makinalar, bir veya iki hızlı makinalar ile değişken hızlı makinalardır. RT'lerdeki enerji dönüşümü sırasında kullanılan üç temel eleman, pervane, vites kutusu ve jeneratördür. Pervane rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirir. Jeneratör, bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek tüketir. Vites kutusu ise, pervaneyi jeneratör hızına göre düzenler. Sabit hızlı makinalarda, jeneratör doğrudan ana şebekeye (grid sistemi) bağlıdır (Şekil 7.5). Sabit hızlı RT'nin en büyük faydası basit yapıda ve ucuz olmasıdır. Ayrıca herhangi bir senkronizasyon ünitesi gerektirmez. Dezavantaj olarak ise, yüksek başlama akımı ve reaktif güç gerektirmesidir.



Şekil 7.5 Sabit hızlı jeneratörün şebekeye bağlanması.



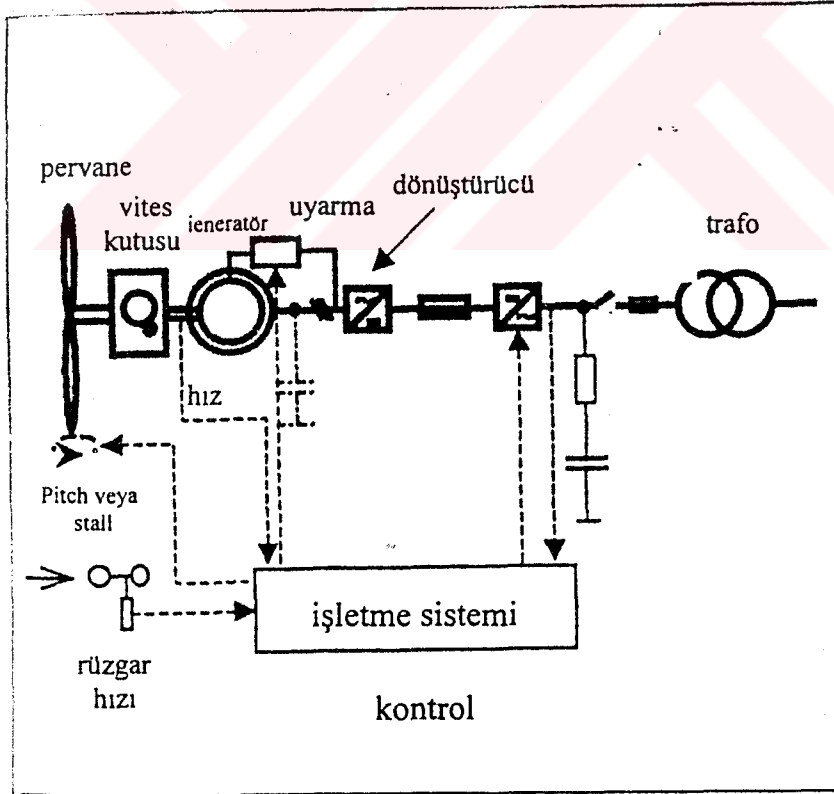
Şebekenin frekansı jeneratör ve dolayısı ile pervane hızını belirler. Pervanenin düşük rotasyonel hızı olan  $n_{pervane}$ , jeneratörün rotasyonel hızı olan  $n_{jeneratör}$ 'e çevrilir. Bu işlemler vites kutusu yardımı ile ve iletim oranı  $r$  (transmission ratio) ile beraber yapılır. Jeneratör hızı, kutup sayısı  $p$  ile şebeke frekansına ( $f_{şebeke}$ ) bağlıdır. İzleyen eşitliklere bakılırsa konu daha iyi anlaşılabilir olacaktır (DEWI; 1998):

$$n_{pervane} = \frac{n_{jeneratör}}{r} \quad (7.1)$$

$$n_{jeneratör} = \frac{f_{şebeke}}{p} \quad (7.2)$$

$$n_{pervane} = \frac{f_{şebeke}}{r.p} \quad (7.3)$$

Değişken hızlı makinalarda, jeneratör şebekeye elektronik bir dönüştürücü veya jeneratör uyarıcı bir sistem vasıtası ile bağlanmaktadır (Şekil 7.6).



Şekil 7.6 Değişken hızlı jeneratörün şebekeye bağlanması.

RT'lerin şebekeye bağlanması Çizelge 7.1'de gösterilen durumlara göre olmaktadır (DEWI, 1998).

Çizelge 7.1. Gerilim sistemi çeşitleri ve RT kapasiteleri

Gerilim Sistemi	Bağlanacak Santral Kapasitesi
Alçak Gerilim Sistemi	Küçük ve orta kapasitede RT'ler (300 Kw'ya kadar)
Orta Gerilim Sistemi	Orta ve büyük kapasiteli RT'ler ile 10-15 MW'a kadar rüzgar santralleri
Yüksek Gerilim Sistemi	Büyük güçlü rüzgar santralleri (>15 MW)

Birçok RT orta gerilim sistemine bağlanmaktadır. Düşük gerilim hatlarında meydana gelen kayıplardan dolayı rüzgar çiftliğindeki her bir RT'nin kendi trafosu bulunmaktadır.

## 8. RÜZGAR ENERJİSİ UYGULAMA SAHALARI

Bu bölümde rüzgarın taşıdığı kinetik enerjiyi toplayan rüzgar makinalarının belli başlı kullanım alanları tanıtılmaya çalışılacaktır.

Rüzgar enerjisi uygulamalarını etkileyen en önemli faktörler şunlardır:

### Uygulama Ortamının Özellikleri:

- Rüzgar enerjisinden yararlanması düşünülen birimin büyüklüğü (konut, çiftlik, köy, enterkonnekte şebeke).
- Mevcut enerji kaynaklarının ulaşılabilirliği (Enterkonnekte şebekenin uzaklığı, konvansiyel yakıtların temin olanakları).
- Uygulamanın yapılacağı yörenin rüzgar özellikleri.
- Uygulamadan yararlanacak tüketicilerin şimdiki ve geleceğe ilişkin enerji taleplerinin türü ve miktarı.
- Rüzgarı ikame edebilecek veya rüzgarla birlikte kullanımı mümkün diğer yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının durumu.

### Uygulamada Rüzgar Enerjisi Çevrim Sistemi Kullanımına İlişkin Kısıtlar:

- Ulusal enerji politikalarının yenilenebilir enerji kaynakları kullanımına ve ilgili araştırma geliştirme çalışmalarına verdiği önem.
- Rüzgar enerjisi çevrim sistemlerinin teknolojik gelişkinlik düzeyi.
- İlgili uygulamanın gerektirdiği teknik bilgi birikimi ve personel mevcudiyeti.
- Uygulamanın maliyeti ve kaynak temini.

Rüzgar enerjisinin en önemli özelliği yenilenebilir olmasıdır. Zaman içinde tükenmeyen bu enerjiden yararlanabilmek için uygun ölçümlerin yapılması gerekmektedir.

Çevre yönünden de rüzgar enerjisi temiz bir enerji kaynağıdır.

Rüzgar enerjisi üretim tesisleri, basit veya çok gelişmiş teknolojiler ile kurulabilmektedir. Türkiye’de mevcut teknoloji ile tesisleri imal etmeye yeterlidir. Teknolojinin hızla gelişmesi, daha ucuz ve daha çok miktarda üretim, maliyetleri düşürebilecek ve ileride bu tür tesislerin daha ekonomik olmasını sağlayabilecektir.

Rüzgar enerjisi tesisleri birkaç watt'tan beş milyon watt'a kadar değişik güçlerde yapılabilmektedir. Bu değişebilirlik, rüzgar enerjisinin çok çeşitli yerlerde değişik amaçlarla kullanılabilmesini sağlamaktadır. Rüzgar gücünden, elektrik elde edilmesinin yanısıra, pompalama ve drenaj maksadıyla yararlanılabildiği gibi, mekanik güç kaynağı olarak öğütme ve yağ çıkarma konularında da yararlanılmaktadır. Rüzgar enerjisi yardımı ile pompalanarak yüksek bir yerde biriktirilen su, daha sonra rüzgarsız zamanlarda elektrik enerjisine dönüştürülebilmekte ve bu enerjiyi elektrik olarak bataryalarda depolayabilmek mümkün olmaktadır. Bugün için batarya tesisinin maliyeti hayli yüksek olmasına rağmen, halen bu konuda daha ucuz teknolojilerin geliştirilmesi çalışmaları sürdürülmektedir.

Rüzgar enerjisinden elektrik elde eden tesislerin bir kısmı, yeterli rüzgar olmadığı zamanlarda küçük bir dizel motoru ile çalışmasını sürdürebilmekte veya enterkonnekte sisteme bağlanmak suretiyle yine bu enerjiden optimum fayda elde edilebilmektedir.

Rüzgar enerjisi tesisleri ihtiyacın olduğu yerde değil, kaynağın bulunduğu yerde kurulmaktadır. Bu sebeple, yakında bir tüketim ihtiyacının olmaması, rüzgar enerjisinden istifade imkanlarını sınırlamaktadır (Çetin, 1976).

## **8.1 Rüzgar Enerjisinden Yararlanma İmkanları:**

Rüzgar enerjisinden yararlanma imkanları iki bölümde incelenebilir. Bu enerjiden genel olarak mekanik enerji üretimi ve elektrik enerjisi üretimi şeklinde yararlanılmaktadır.

### **8.1.1 Mekanik enerji üretimi:**

Rüzgar enerjisinin şaft gücünden faydalanılarak elde edilen mekanik enerji, su pompalama, tahıl öğütme, kesme, sıkıştırma ve yağ çıkarma konularında kullanılmaktadır.

Su pompalamasındaki uygulamalar, su temini veya fazla suyun araziden uzaklaştırılması (drenaj gibi) iki alanda olmaktadır.

Rüzgar enerjisinden su temini amacı ile kurulan tesisler çok kanatlı bir çark, bir kule ve bir pompaj ünitesinden meydana gelmektedir. Gerekli su, arzu edilen zamanda ve yeterli miktarda temin edilemediği takdirde, su depolama tesislerinin yapılması gerekmektedir. Bu tesislerde depolanan su, hem içme suyu, hem de sulama suyu olarak kullanılabilir.

Fazla suyun araziden uzaklaştırılması (drenaj) için kurulan rüzgar türbinleri de aynı sisteme dayanmaktadır.

Örnek olarak düşünülürse, 100 watt'lık pompa çalışması için 10m.'lik kuyu ile 1 hektar genişliğindeki alanı sulayabilme amacıyla, rüzgarın hızı saniyede 3 m. olduğunda ortalama 1.500.000 TL, rüzgarın hızı saniyede 4 m. olduğunda ortalama 800.000 TL tutarında yatırım yapılması gerekmektedir. 100 watt'lık enerji, 10 m. derinlikten saniyede 1 litre su çıkarmaya tekabül etmekte ve yılda 3000 m<sup>3</sup> su çıkarma imkanı sağlanmaktadır (Konaklıoğlu, 1983).

Rüzgar enerjisinin değirmenlerde kullanılması da pompalama ve depolama yoluyla olmaktadır. Geleneksel çok kanatlı değirmenlerin yanı sıra, son yıllarda bütünüyle metalden yapılan çok bıçaklı rüzgar değirmenleri geliştirilmektedir. Bunlar daha hafif, daha verimli, yapımı kolay ve daha ucuz olmaktadır. Bu çalışmalar özellikle Hindistan, Kenya, Pakistan, Tunus ve Sri Lanka'da pilot projeler olarak geliştirilmektedir. Rüzgar değirmenlerinin bütünüyle metal olan geliştirilmiş çeşitleri Kolombiya, Etopya, Hindistan ve Hollanda'da çiftçilerin taleplerini karşılama için geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.

### 8.1.2 Elektrik enerjisi üretimi:

Rüzgar enerjisinden elektrik elde etme çalışmaları, özellikle son yıllarda büyük önem kazanmıştır. 300 KW'lık türbinler bazı ülkelerde seri halinde üretildiği gibi bazı ülkelerde 5 MW'lık türbinler inşa edilmektedir.

Halen yapılmış olan en büyük rüzgar jeneratörü 5 MW'tır. Bundan büyük tesislerin yapılması imkanı bulunmakla beraber halen bazı teknolojik gelişmelerin sağlanması gerekmektedir.

Yerel tüketimin karşılanması amacıyla daha ziyade enterkonnekte sistemin ulaşmadığı uzak yerleşim merkezlerinde, kırsal alanlarda, ormanlık ve dağlık bölgelerde, adalarda, deniz fenerlerinde, çiftliklerde, yangın kulelerinde küçük güçlerdeki elektrik üretim tesisleri yararlı olmaktadır. Özellikle asenkron jeneratörlerle donatılmış rüzgar türbinlerinin rüzgar ve elektrik enerjisi olan her yerde sistemle ortak çalışması mümkün olmaktadır. Bu takdirde rüzgarlı zamanlarda fazla enerjinin sisteme aktarılması, rüzgarın az olduğu zamanlarda ise şebekeden enerji alınmasını mümkün kılmakta, bu sistemin depolama masrafı olmadığı için ilk yatırım masrafları düşük olmakta ve bilhassa köy ve çiftliklerde kullanılması mümkün olmaktadır (Erdiller, 1975).

### 8.2 Rüzgar Enerjisi Kullanımının İncelenmesi:

Rüzgar enerjisi kullanımının dünyadaki örneklerine baktığımızda iki kısımda incelenmesi gerektiğini görüyoruz. Küçük türbinler olarak adlandırabileceğimiz, kişisel kullanıma yönelik sistemler ve büyük türbinler adını alan endüstriyel kullanıma yönelik sistemler.

Şekillerin bize göstermiş oldukları yolda ve şekillerin ışığında; güneş uyarlığında, tertemiz bir gökyüzü altında temiz hava soluyarak, asit yağmurlarından, çöleşmeden, sel ve deniz baskınlarından uzak bir yaşam... Rüzgar enerjisi doğada herhangi bir yıkıma yol açmıyor, üstelik tükenme riski de yok. Şekil 8.1'de bir yel değirmeni örneği, şekil 8.2'de California Palm Springs'teki rüzgar tarlası ve şekil 8.3'de gelişmiş bir rüzgar türbini bize yel değirmeninden rüzgar türbinine ne kadar ilerleme kaydedildiği hakkında bilgi vermektedirler.

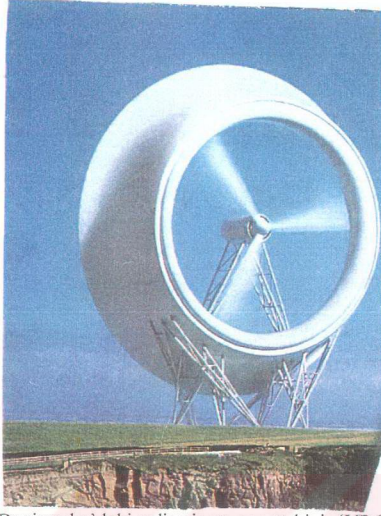


Şekil 8.1 Danimarka'da yel değirmeni örneği. (URGT izni ile)



Şekil 8.2 California Palm Springs'teki rüzgar tarlası. (URGT izni ile)





Şekil 8.3 Danimarka'daki gelişmiş rüzgar türbini. (URGT izni ile)

Büyük türbinler, rüzgar çiftliği olarak adlandırılan diziler halinde kurulur. Bir rüzgar çiftliğinin toplam gücü 1-50 MW arasındadır. Tek bir türbinin gücü 50 kW'tan 2 MW'a kadar olabilir. Ancak günümüzde ekonomik şartlar açısından 500 kW'tan küçük türbinler pek fazla kullanılmamaktadır.

Büyük türbinler yatırım amaçlı olarak kurulurlar. Üretilen enerji şebekeye verilir. Bu yüzden yatırımdan önce yapılması gerekli olan bazı çalışmalar vardır. Öncelikle bölgenin rüzgar açısından durumunun belirlenmesi gerekir. Yapılan ayrıntılı ve en az bir yıl sürecek teknik rüzgar ölçümleriyle, rüzgar hızı ortalamaları, günlük, mevsimlik ve yıllık dağılımlar ile yaklaşık rüzgar enerjisi değerleri belirlenir. Bunun ardından yapılacak olan fizibilite çalışmaları sonucunda, kurulacak olan santralin büyüklüğü, türbinlerin yerleri ve güçleri, üretilen enerjinin maliyeti gibi sonuçlara ulaşılır. Bu çalışmalarda, bölgesel elektrik kurumlarıyla ve devletle yapılacak olan anlaşmalar, alınacak özel izinler, çevre halkının yaklaşımı, bölgedeki konvansiyonel elektriğin maliyeti, yıllık harcama miktarı, arazinin fiziksel yapısı, finansman ve kredi politikası gibi parametreler önemli rol oynar.

Büyük türbinlerden elde edilen elektriğin maliyeti yukarıda da sayılan bir çok parametreye bağlıdır. İyi rüzgar sahalılarında ortalama şartlarda, rüzgardan elde edilen elektrik enerjisinin maliyeti 5 cent/kWsaat değerlerine kadar düşmektedir. Termik, hidroelektrik vs. konvansiyonel kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin maliyetinin bu değerden yüksek



olması ve yıllık harcamanın 100.000 kWsaati aşması durumunda rüzgar enerjisi üretimi ekonomik bir çözüm olarak düşünülebilir. Ancak bunun için bölgedeki rüzgar potansiyelinin uygun olması gerekir. Büyük türbinlerin üretime başlaması için gereken rüzgar hızları bir yaklaşım olarak değerlendirildiğinde, bölgedeki ortalama rüzgar hızının 5-7 m/s (18-25 km/saat) civarında olması gerektiği söylenebilir. Tabi ki bu kesin bir sonuç değildir. Yatırımın ekonomik olup olmadığının belirlenmesi için tüm yıla yayılan bir dağılımın çıkarılması şarttır. Büyük türbinlerden oluşan rüzgar çiftliklerinin yatırım maliyeti kabaca bir yaklaşımla 1000 \$/kW'dır. Yıllık bakım masrafı ise yatırımın % 1-1,5'i olarak gerçekleşir. Bu şartlar altında kurulacak türbinlerden elde edilen elektrik enerjisi, şebekeye; maliyeti düşük, çevreyi kirliletmeyen, güvenli ve yenilenebilir bir kaynaktan üretilmiş olarak verilir (E.İ.E., 1984).

Küçük türbinler, genellikle şebekenin olmadığı ya da ulaştırmanın ekonomik olmadığı, ya da sorunlu olduğu yerlerde uygulanır. Şehir dışı yerleşimler, çiftlik evleri, telekomünikasyon aktarıcıları, radyo ve orman kuleleri, askeri tesisler, demiryolu sinyalizasyonu, balık çiftlikleri, seralar, maden ocakları, deniz vasıtaları ve bazı fabrikalarda küçük türbinler oldukça uygun kullanım alanları bulmaktadır. Üretilen enerjinin depolanmasıyla güvenilir enerji sağlanır. Küçük türbinlerin güç değerleri, 0,05-20 kW arasındadır. En fazla 4 adet hareketli parçadan oluşan bu tip türbinler bakımsız ya da çok az bakımlı olarak dizayn edilmişlerdir. İşletme giderleri neredeyse yoktur. Her türlü çevre şartlarına dayanabilecek şekilde dizayn edilirler. Otomatik kontrol mekanizmaları, sistemi aşırı şarjdan koruyan kontrol sistemleri vardır ve ayrıca çok yüksek rüzgar hızlarında otomatik korunmalı dizayn edilmişlerdir.

Şebekeye elektrik enerjisinin verildiği büyük türbinlerin aksine, küçük türbinlerde bu sistem uygulanamaz. Akü şarjı esasına göre çalışan küçük türbinlerle, üretilen enerji, ihtiyacı kalınmıştır. Avrupa Topluluğu tarafından öngörülen, gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin toplam üretime oranı olan % 2'lik değere ulaşılması için hızlı bir şekilde çalışmaların ilerletilmesi gerekmektedir (Martinez ve Prats, 1999).

Ülkemizde henüz çok yeni ve tanınmamış bir kaynak olan rüzgar enerjisinin tanıtımı ve yaygınlaştırılması için konuyla ilgili tüm kişi, kuruluş ve örgütler ile medyaya ve devlete de büyük iş düşüyor. Özellikle yerli kaynak, malzeme, teknik bilgi ve işgücü kullanılarak üretilen türbinler, iç pazarda olduğu kadar dış pazarlarda da rekabet edebilecek düzeyde olacaktır. Yakın gelecekte bu tip çalışmaların artmasıyla, büyük yerleşim birimlerinin elektrikliğini sağlayan, büyük türbinlerden oluşan rüzgar çiftliklerinin kurulması, Türkiye'nin

enerji darboğazından kendi çabalarıyla kurtulup enerji ihraç eden bir ülke konumuna gelmesine yardımcı olacaktır.

### 8.3 Bağımsız Çalışan Akü Şarj Eden Sistemler:

Akü şarj eden sistemler, genellikle şebekeden uzak bölgelerde kullanılmaktadır. Şehir dışı yerleşimler, çiftlik evleri, telekomünikasyon aktarıcıları, radyo ve orman kuleleri, askeri tesisler, demiryolu sinyalizasyonu, balık çiftlikleri, seralar, maden ocakları, deniz vasıtaları ve bazı fabrikalarda, aydınlatma, meteoroloji istasyonları, bilimsel ve diğer araştırma istasyonlarında elektrik ihtiyacını karşılar.

Rüzgarla akü şarj eden bir sistem başlıca aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır.

1. AC Çıkışlı rüzgar türbini ve 6-18 mt. yüksekliğindeki kulesi
2. Elektronik kontrol ünitesi
3. Aşırı şarjdan koruyan direnç
4. Akü bankası
5. Alternatif akım ile çalışan cihazlar için evireç
6. Özel doğru akım cihazları

1.Standart Rüzgar Türbinleri 20 Watt-10 kW güçleri arasındadır. Daha yüksek güçler için iki veya daha fazla 10 kW'lık türbin paralel bağlanabilmektedir. Rüzgar türbinleri 12, 24, 48 ve 120 VDC doğru akım gerilimlerinde üretilmektedir.

2.Elektronik kontrol ünitesi, AC çıkışı istenilen doğru akım voltajına çevirmek için kullanılmaktadır. 500 Watt'a kadar olan modellerde ünite pervane içerisinde, daha büyük olan modellerde ayrı bir elektronik ünite olarak bulunmaktadır.

3.Voltaj kontrolü aküleri aşırı şarjdan korumaktadır. Aküler tam olarak dolduysa (2.30 V/hücre) ve sadece çok az bir yük varsa, rüzgar türbininden gelen fazla enerji, yük direncine aktarılır. Bu direnç hava ısıtan bir dirençtir, istenirse aynı değerlere sahip olan su ısıtıcısı da konabilir.

4.Gerekli olan akü bankası sistemin kurulduğu yerin şartlarına bağlıdır. Akülerin uzun ömrünü sağlamak için şarj akımı, akü kapasitesinin % 10'undan fazla olmamalıdır. Örneğin: 600 Ah bir akü bankası 60 A'in üzerinde bir akımla şarj edilmemelidir. Ayrıca kapasitenin % 40'ının altına inecek kadar da aküler boşaltılmamalıdır (1.75 V/hücre). Akü kapasitesinin % 60'nın kullanılacağı düşünülürse, 2 kW saatlik günlük harcamayı örnek alırsak; 24 VDC akü

grubu için 2000 Watt.saat/24 V=80 Ah demektir. Buna göre, günlük akü kapasitesi  $80/0.6=140$  Ah.

5. Alternatif akım (AC) yükler için yeterli kapasitede bir evireçe gerek vardır. Piyasada mevcut olan evireçler genel olarak 12, 24, 48, 96 ya da 120 VDC girişlidir. Evireçin gücü devamlı ihtiyaç duyulacak maksimum güç kadar olmalıdır. Evireç kendi maksimum gücünün 2 katı kadar anlık güçleri karşılayabilmelidir. Çünkü elektrik motoru gibi bazı yükler kalkışlarda kendi anılan güçlerinin 3-4 katı kadar yük çekerler. En basit evireçler trapez dalga ile çalışırlar. Aşağı yukarı bütün ev aletleri bu elektrikle çalışır. Fakat bazı özel durumlarda, örneğin ölçme aletlerinde tam sinüs akımına ihtiyaç duyulmaktadır (Gipe, 1993).

6. Doğru akımla çalışan cihazların rüzgar enerjisi ile birlikte kullanılması, çevirici kayıplarının hiç olmaması ya da çok az olmasından dolayı en verimli kullanım şeklidir. Bu tip tesislere en yaygın örnekler:

\*Telsiz vericileri (12 ya da 24 VDC) göre seçilen akü bankasına şarj edilerek kullanılır. Güçleri 50 W ile 20 kW arasındadır. Bu güç değerleri, türbinin maksimum hızda dönmesi durumundaki gücü gösterir. Daha düşük hızlarda ise türbin elektrik üretmeyi daha düşük bir güçte sürdürür. Akü bankasının yeterli seviyede seçilmesi durumunda depolanmış enerji ihtiyaç duyulan güçte aküden çekilebilir.

Rüzgar türbini jeneratörünün çıkışına bağlanan elektronik şarj kontrol ünitesi ile AC çıkışı, DC'ye çevrilerek aküler şarj edilir. 500W'dan küçük türbinlerde bu ünite türbinin içine monte edilmiş olarak bulunur. Elektronik şarj kontrol ünitesi aküleri aşırı şarjdan korur. Bunun için akülerin tam dolu olması durumunda rüzgar hala esmeye ve türbini döndürmeye devam ediyorsa, türbinden gelen fazla enerji yük direncine aktarılır. Bu direnç hava ısıtan bir dirençtir. İsteğe bağlı olarak aynı değerlerde su ısıtan dirençler de kullanılabilir.

Gerekli olan akü bankası sistemin kurulduğu yerin şartlarına bağlıdır. Akülerin uzun ömürlü olmaları için şarj akımı, akü kapasitesinin % 10'undan azla olmamalıdır. Örneğin 600 Ah bir akü bankası 60 A'in üzerinde bir akımla şarj edilmemelidir. Ayrıca, kapasitenin % 40'ının altına incek kadar da aküler boşaltılmamalıdır (1.75 V/hücre). Akü bankasının büyüklüğü, rüzgarsız geçecek 3-5 güne yetecek kadar olmalıdır. Bunun için günlük harcama miktarının iyi belirlenmesi ve seçimin buna göre yapılması gerekir. Daha az enerji harcayan cihazlar, örneğin elektronik dengeli ampuller kullanılarak güç ihtiyacının azaltılıp azaltılmayacağı değerlendirilmelidir (Gipe, 1993).

Alternatif akım (AC) yükler için uygun kapasitede bir evrieçe gerek vardır. Piyasada mevcut olan evrieçler genel olarak 12, 24, 48, 96 ya da 120 VDC girişlidir. Evrieğin gücü devamlı ihtiyaç duyulacak maksimum güç kadar olmalıdır. Evrieç kendi maksimum gücünün 2/3 katı kadar anlı güçleri karşılayabilmelidir. En ucuz evrieçler trapez dalga ile çalışırlar. Aşağı yukarı bütün ev aletleri bu dalga biçiminde elektrikle çalışır. Fakat bazı özel durumlarda, örneğin ölçme aletlerinde ve hassas ev aletlerinde tam sinüs akıma ihtiyaç duyulmaktadır.

Doğru akımla çalışan cihazlar kullanmak daha verimlidir. Genel olarak, 12 veya 24 VDC ile çalışan ev aletleri bulunmaktadır. Fakat hem 220 VDC ile çalışanlara göre daha pahalıdır, hem de seçenek azdır.

Küçük rüzgar türbinleri, çeşitli nedenlerle dizel sistemlerle birlikte kullanılabilirler. Mevcut bir dizel jeneratör varsa, yakıt sarfiyatını azaltmak için böyle bir çözüme gidilebilir. Ya da rüzgar türbini ana ihtiyacı karşılamak için kullanılabilir; dizel jeneratör de arada bir devreye sokularak daha yüksek güç ihtiyaçlarında ya da düşük rüzgar zamanlarında sisteme destek olmak amacıyla kullanılabilir.

ABD’de rüzgar çiftliklerinin toplam kurulu gücü 1700 MW dolaylarındadır. Yıllık üretim miktarı ise 3 milyar kW saat kadardır. İyi rüzgar sahalarının bulunduğu Hollanda, Danimarka, Almanya gibi ülkelerde de rüzgar enerjisi konusunda önemli atılımlar yapılmış, üretim ve kurulu güç açısından bu ülkeler dünya çapında öncü konumuna gelmişlerdir. Ülkemizin rüzgar potansiyelleri göz önüne alındığında elimizdeki sınırsız ve dünya çapında oldukça iyi durumda olan rezervleri kullanmadığımızı görüyoruz. Özellikle kıyı bölgelerimiz olmak üzere rüzgar ve arazi bakımından oldukça iyi bir durumda olan Türkiye’de ne yazık ki bugüne kadar rüzgar üzerinde yapılan çalışmalar çok düşük seviyede kalmış, böylece çok üstün bir teknoloji gerektirmeyen bir enerji kaynağından yıllardır mahrum kalmıştır.

- GSM aktarıcıları (24 VDC)
- Telekom aktarıcıları (48 VDC)
- Motorlu taşıtlar (12 ya da 24 VDC)
- Deniz vasıtaları (12 ya da 24 VDC)
- Uyarı ışıkları (12 VDC)
- 12 ya da 24 VDC ile çalışan elektrikli aletler vs.



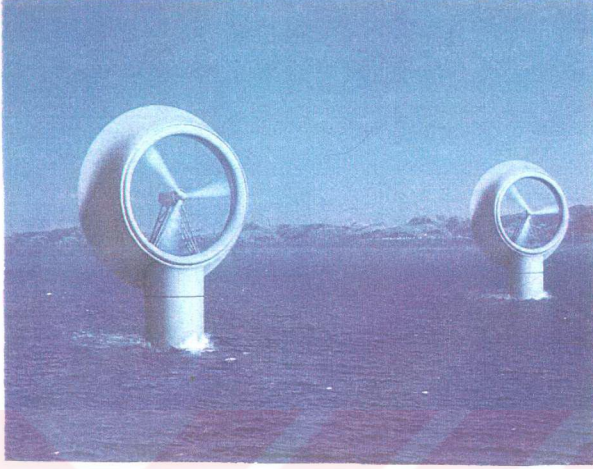
#### 8.4 Denizüstü Rüzgar Santralleri:

Rüzgar enerjisi bakımından deniz alanları karasal alanlara göre daha büyük zenginlik göstermektedir. Avrupa Birliği kapsamında bir çalışma ile kıydan uzaklığa ve su derinliğine bağlı olarak denizüstü rüzgar türbini kurulma olasılığına göre potansiyel belirleme çalışması yapılmıştır. Bu hesaplamada 100 m rotor çaplı türbinleri kullanılacağı varsayılmıştır. Kıydan 10 km. açıklıkta ve 10 m. su derinliği olan alanlardaki potansiyel 750 TWh/yıl iken, kıydan uzaklığı 30 km. ve su derinliği 40 m. olan alanlar göz önüne alındığında 3500 TWh/yıl düzeyine çıkmaktadır. Oysa Avrupa Birliği'nin elektrik tüketimi 1727 TW/yıl kadardır. Dikkate değer bu potansiyel 1990-1995 yılları arasında saptanmıştır. 1994 yılında Akdeniz ve diğer Avrupa Denizlerinde Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi (OWEMES) Avrupa Semineri Roma'da yapılmıştır. Denizüstü WECS'lerin önemi giderek artmaktadır (Wind Energy Conversion Systems) (AREB, 1998).

Şekil 8.4 ve şekil 8.5 bizlere deniz üstü rüzgar santralleri hakkında bilgi verir.



Şekil 8.4. Hollanda'da denizüstü rüzgar santralleri. (URGT izni ile)



Şekil 8.5 Danimarka'da gelişmiş denizüstü rüzgar santralleri (URGT izni ile)

Denizüstü rüzgar enerjisi ile ilgili ilk çalışmalar 1970'li yılların sonuna doğru Danimarka, Hollanda, İsveç, İngiltere ve ABD'de başlamıştır. 1980'li yılların başında bu çalışmalar Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) bünyesinde OWECS programı kapsamında yürütülmüştür. İlk denizüstü proje, 1990 yılında İsveç'te kıydan 0.25 km açıklıkta 220 kW'lık tek bir Windword türbini yerleştirilerek gerçekleştirilen Nøgersund tesisidir.

İlk denizüstü rüzgar çiftliği ise Danimarka Lolland adası yakınında kurulmuş olan Vindeby Rüzgar Çiftliği olup, 11 x 450 kW'lık türbin içeren 5 MW'lık bu çiftlik 1991 yılının ortalarında işletmeye alınmıştır. Vindeby pilot denizüstü rüzgar çiftliği Danimarka Enerji Bakanlığı'nın 100 MW'lık programının bir parçasıdır. 45 MW'lık bölümü Vindeby'i inşa eden ELKRAFT firmasına verilmiştir. Vindeby çiftliğinde kullanılan türbinler dünya piyasasında satılan Danimarka malı Bonus marka türbinlerdir. Her bir türbin güçlendirilmiş beton duba tipi temel üzerine yerleştirilmiştir. Duba temeller Onsevig limanında kuru dok alanında yapıldıktan sonra yerlerine yüzdürülerek götürülmüşlerdir. Konik biçimindeki temellerin çapları üstte 5 m, altta 14 m'dir. Denizdeki konumuna göre yükseklikleri 5,5 m ile 8,2 m arasında değişmektedir. En büyük temeller 550 ton olup içlerine 500 tonluk çakıl ve kum yerleştirildiği için toplam kütle 1050 tona ulaşmıştır. Dubalar deniz tabanına bağlıdır. Denizüstü yerleşimde deniz yüzeyinden yukarıdaki kanadın ucuna olan yükseklik 55 m olmuştur.

Vindeby rüzgar çiftliğinin türbinleri kıyı şeridinden 1.5 km uzaklıkta iki sıra olarak dizilmişlerdir. İki sıra arasında yine 1.5 km açıklık vardır. Bir başka deyişle, türbinler kıyı şeridinden 1.5-3 km uzaklıktadır. Sıralardan birinde beş ve diğerinde altı türbin yer almaktadır. Danimarka Enerji Bakanlığı'nın verilerine göre çiftliğin yapım maliyeti yaklaşık 83 milyon DKK (14.5 milyon \$) düzeyindedir (2930 \$/kW). Yatırımın yüksekliğinde türbinin oturacağı temel açısından gereken deniz içi beton yapı etkili olmuştur (Uyar, 1998).

Bonus 450 türbinlerinin rotor çapı 35 m olup, süpürme alanı  $962 \text{ m}^2$ 'dir. Özgül üretim gücü  $470 \text{ W/m}^2$  dir. Rotor üç kanatlıdır. Kanatlar polyester ile güçlendirilmiş fibreglass malzemeden yapılmıştır. Rüzgarın rotor gelişi önden olup, ileri rüzgarlı (upwind) tipi türbindir. Rotor göbeğinin taban platformundan yüksekliği  $37.5 \text{ m}$ 'dir. Kule tek parçalı çelik borudan yapılmıştır ve tekneye çıkmak için içten merdivenlidir. Kule ve diğer donanımlar nemli koşullara karşı koruyucu bir sistemle boyanmıştır.

Türbin  $5 \text{ m/s}$  rüzgar hızında yararlı güç üretmeye başlamakta,  $14-18 \text{ m/s}$  arasında gücü  $450 \text{ kW}$ ' ulaşmaktadır. Türbinin frenlendiği kritik rüzgar hızı  $28 \text{ m/s}$ 'dir. Kanat ucu hızı  $67 \text{ m/s}$ 'dir. Kanat açıları sabit konumludur. Rotorun hızı sabit ve dakikadaki dönü sayısı  $35 \text{ d/d}$ 'dir. Türbinin hidrolik aktiviteli hava frenleri ile mekanik freni vardır. Türbin jeneratörü  $450 \text{ kW}$ 'lık asenkron jeneratör olup, devir sayısı  $1500 \text{ d/d}$ , frekansı  $50 \text{ Hz}$  ve çıkış gerilimi  $690 \text{ Volt}$ 'tur. Rotor ile jeneratör arasındaki dişli kutusu  $3 (2 + 1)$  kademeli kombine planet ve paralel tiptedir. Her bir türbinin ortalama üretim kapasitesi  $733 \text{ MWh/yıl}$  düzeyindedir. Türbinlerde üretilen elektrik denizaltı kablosu ile şebekeye aktarılmaktadır. Vindeby Rüzgar Çiftliğinin yıllık üretimi  $10.6$  milyon kWh olup,  $3000$  konutun gereksinimini karşılamaya yeterli olduğu belirtilmektedir (Krawiec, 1980).

İngiltere'de denizüstü rüzgar santralleri üzerinde ele alınmış iki önemli proje olduğu bilinmektedir. İngilizler denizüstü tesisler için öncelikle orta güçlü makineler üzerinde durduklarını belirtmekle birlikte,  $50$ 'den  $120 \text{ m}$ 'ye kadar rotor çapı olan türbinler dizayn etmişlerdir. İngiltere'nin doğu kıyısında Inner Dowsing alanında ve  $5 \text{ km}$  açıklıkta uygun site yeri belirlenmiştir. Burada kuracakları çiftliğe ait pilot tesis ile ilgili bir demonstrasyon projesine  $3.5-4$  milyon sterlin ( $5.4-6.1$  milyon \$) bütçe ayrılmıştır. İngilizler üç ayaklı kafes biçiminde kule ile deniz yüzeyinden  $45 \text{ m}$  yüksekliğe  $60 \text{ m}$  rotor çaplı ve  $1.4 \text{ MW}$  güçlü bir türbin projesini gerçekleştirmeye çalışmaktadırlar. Pilot ünitenin bu yıl tamamlanması beklenmektedir. Toplam  $9$  türbin ile nominal gücü  $1.26 \text{ MW}$  olan bir denizüstü rüzgar çiftliği kurmayı hedeflemişlerdir. Yukarıdan bu yana tanıtıla gelen İsveç, Danimarka ve



İngiltere'nin dışında denizüstü rüzgar tesisleri konusunda Hollanda ve İtalya'nın da detaylı çalışmaları ve projeleri olduğu bilinmektedir.

Avrupa Birliği'nin yeni ve yenilenebilir kaynakların geliştirilmesine yönelik olarak uyguladığı Thermie ve Joule programlarının sonucu olarak, 2005 yılında Avrupa'da kurulu rüzgar gücü 12.000 MW'a ulaşması hedeflenmiştir. Şimdi bu hedefin aşılması bekleniyor. Bu rüzgar santrallerinin bir bölümü deniz üstünde kurulacaktır. Örneğin Danimarka, gelecek 30 yılda denizüstü rüzgar santrallerinin kurulu gücünü 4000 MW'ın üzerine çıkarmayı hedeflemektedir. Danimarka 2005 yılında denizüstünde 500 türbin kurmayı ve denizüstü kurulu gücünün 750 MW'a çıkarmayı planlamıştır. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Kurulu rüzgar gücünün 2030 yılında Avrupa'da 100.000 MW'a çıkacağını ve bunun içinde denizüstü payının % 25'den az olmayacağını tahmin ediyordu. Şimdi bu hedef 2030 yılına çekilmiş bulunmaktadır (Olav, 1994).

Rüzgar türbinlerinin ünite güçleri artırılırken, son beş yıl içerisinde fiyatları da düşürülmüştür. Karada kurulan WECS'lerin 1995 yılı fiyatları Avrupa'da 1400 \$/kW'a kadar çıkabilmekteyse de, ABD'de 750 \$/kW düzeyine dek düşürülen tipler vardır. Bugün için dünya rüzgar türbini pazarı 1000 MW/yıl düzeyinin üzerine çıkmıştır. Dünya türbin pazarı 2000 MW/yıl düzeyine ulaştığında, birim kurulu güç maliyetinin 750 \$/kW'ın altına düşmesi beklendiğinden rekabet daha artacaktır. Ancak, denizüstü rüzgar türbinleri kara tipi türbinlere göre 1.5-2.5 kat pahalıya kurulabilmektedir (Olav, 1994).

Geliştirilen yeni bir proje entegre denizüstü rüzgar santralleri ve deniz dalga santralleri projesidir. Bu konudaki bilimsel ve teknik çalışmalar, kombine rüzgar dalga santrallerinin daha uygun olacağını ortaya koymuştur. Deniz dalgası da rüzgar kökenli bir birinci enerji olup, aynı anda pik değerlere ulaşmaktadırlar. Kombine rüzgar dalga sistemi ile elektrik üretimi konusunda İngiltere'de yapılan bir çalışmada birim enerji maliyeti 6-9 sent/kWh arasında olmuşken, Güney Kore'de yapılan benzer bir çalışmada enerji maliyeti 11-18 sent-kWh arasında saptanmıştır. Sistemlerin geliştirilmesi ile maliyetin hızla düşmesi beklenmektedir.

#### **8.4.1 Türkiye'de denizüstü rüzgar santrali önerisi:**

Denizüstü rüzgar santralleri, bir iç deniz olan Marmara dışında kıyıları 8210 km'yi bulan Türkiye açısından çok önemlidir. Türkiye'de rüzgar enerjisince zengin yörelerin başında Marmara'nın yanı sıra Ege kıyıları, Karadeniz (özellikle Sinop) kıyıları, Akdeniz (özellikle İskenderun kıyıları) gelmektedir. Ege denizindeki çeşitli Yunan adalarında kurulmuş ve

çalışmakta olan rüzgar türbinleri vardır. Karadeniz'de deniz dibi suyundan hidrojen üretiminde kullanılmak üzere Rus ve Bulgar ortak projesi olan rüzgar santralleri üzerinde durulduğu bilinmektedir.

Avrupa Topluluğu için hazırlanmış rüzgar atlasından Ege denizinin 10 m yükseklikteki rüzgar hızının 7-8 m/s arasında olduğu ve bunun Türkiye kıyılarına kadar geçerliliğini koruduğu görülmektedir. Ege denizinde karasularımız ile ülkemize ait ada, adacık, kayalıklar ve Anadolu'nun ayrılmaz parçası olan kıta sahanlığımız üzerinde gelecekte denizüstü rüzgar santralleri kurulması olanaklıdır. Dünyadaki gelişmelere koşut olarak ilk pilot denizüstü rüzgar santralimiz Ege'de bugüne kadar değerlendirmedığımız için, komşumuzun hak iddia etmeye kalktığı Kardak Kayalıkları (İkizce Adaları) üzerinde kurulabilir. Kardak Kayalıkları yüzer beton dok sorununu ortadan kaldırdığından, böyle bir santralin kurulması için ideal yerdir. Bodrum Turgut Reis (Karatoprak) mücavir alanı içinde kayıtlı bulunan İkizce Adaları 1000 m<sup>2</sup>'lik yüzey alanı ile denizüstü rüzgar santralleri için doğal temel görevi yapmaya, uygundur. Yörede 50 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgar gücü yoğunluğu 180 W/m<sup>2</sup>'nin üzerinde olup, maksimum güç bunun 3 katına ulaşmaktadır. Ortalama güce göre brüt rüzgar enerjisi potansiyeli de 1600 kWh/m<sup>2</sup> yıl kadardır (Öztürk, 1997).

Türkiye'nin ilk pilot deniz rüzgar santrali olabilecek Kardak-WECS, nominal 1.5 MW güçte olmak üzere ve tam donanımları dışarıdan ithal edilme koşulu ile en çok 2.25 milyon \$'lık bir yatırım gerektirir. Buna karşın, paket teknoloji alımı yerine parça teknoloji transferi ve yerli üretim ile bu maliyetin 1 milyon \$'a düşürülmesi olanaklıdır. İthale yönelmesi koşulunda tüm türbin tiplerine açık bir ihaleye çıkarılmalıdır. Yerli mühendislik gücümüzden ve teknolojik olanaklarımızdan yararlanılarak, gerekli ölçüde yabancı işbirliği de yapılarak pilot tesisin gerçekleştirilmesi koşulunda, iki ya da üç kanatlı propeller rotorlu, kanat konumları sabit, beton kuleli, ileri rüzgar (up-wind) tipinde, sabit rotor hızlı ve asenkron jeneratörlü bir türbin üzerinde durulması uygun olur. 1.5 MW güçlü Pilot Kardak Rüzgar Santrali ile yılda 25 milyon kWh'in üzerinde elektrik üretilerek, ulusal şebekemize yeni bir kaynak sokulabileceği gibi, bugün için sık sık elektrik kesintisi uygulanan Turgut Reis yöresine alternatif bir olanak da sağlanabilir.

#### **8.4.2 Denizüstü rüzgar santrallerinin Türkiye için önemi:**

Rüzgar potansiyeli ile ilgili ön çalışmalara göre, Türkiye'nin kısa dönemde rüzgar kurulu gücünü 6.000 MW düzeyine çıkarmaya uygun potansiyeli olduğu bilinmektedir. Bu potansiyelin uzun dönemde 20.000 MW'a tırmanması olasıdır. Ülkemize ait deniz

alanlarındaki potansiyelin ise 60.000 MW düzeylerine ulaşması beklenebilir (REESFR, 1985).

Denizüstü rüzgar santralleri, bir iç deniz olan Marmara dışında kıyıları 8210 km'yi bulan Türkiye açısından çok önemlidir. Türkiye'de rüzgar enerjisi yönünden zengin yörelerin başında Marmara'nın yanı sıra Ege kıyıları, Karadeniz (özellikle Sinop) kıyıları, Akdeniz (özellikle İskenderun kıyıları) gelmektedir. Karadeniz'de deniz dibi suyundan hidrojen üretiminde kullanılmak üzere Rus ve Bulgar ortak projesi olan rüzgar santralleri üzerinde durulduğu bilinmektedir. Avrupa Topluluğu için hazırlanmış rüzgar atlasından Ege Denizi'nin 10 m yükseklikteki rüzgar hızının 7-8 m/s arasında olduğu ve bunun Türkiye kıyılarına kadar geçerliliğini koruduğu görülmektedir. Ege denizinde karasularımız ile ülkemize ait ada, adacık, kayalıklar ve Anadolu'nun ayrılmaz parçası olan kıta sahanlığımız üzerinde gelecekte denizüstü rüzgar santralleri kurulması olanaklıdır (Öztürk, 1997).

Türkiye'de kara tipi rüzgar santrali kurmak için özel sektör tarafından yapılmış 30 girişim vardır ve kurulmak istenen rüzgar çiftliklerinin güçleri 1.62 MW ile 186 MW arasında değişmektedir. Bu santral tekliflerinin toplam gücü ilk etapta 700 MW'ı aşmış olup, kısa dönemde 850 MW'a çıkarılması, orta dönemde 700 MW daha güç eklenmesi önerilmiştir (AREB -TŞ, 1999).

Ancak, denizüstü rüzgar santrali kurulması için yapılan teklif yoktur. Oysa, Ege'nin bazı sığ sahillerinde, örneğin Foça, Urla deniz alanlarında bu tür santrallerin karadakine göre 1.5 katı yatırımla kurulması olanaklıdır. Ayrıca, Ege'de kıta sahanlığı üzerindeki kayalıklarda, kayalık doğal zemini oluşturmak üzere, karadakinden az bir fiyat farkı ile denizüstü rüzgar santralleri kurulabilir. Bu santrallerden yapılabilecek daha fazla üretimle, santralin karadakine göre kendisini daha kısa sürede amorti etmesi söz konusudur. Bununla beraber, teknoloji kazanımı açısından önemli olduğu için devlet desteği ile ve paket projeler kapsamında özel sektörün denizüstü rüzgar santrallerine yatırım yapması özendirilmelidir.

### **8.5 Rüzgar Türbini ve Dizel Sistemleri:**

Rüzgar türbini, evireç ve küçük akü bankası ile bir dizel jeneratörü beraber çalışabilir. Rüzgar ve dizel sistemleri en iyi aşağıdaki yollarla kullanılabilir.

I. Eğer mevcut bir dizel jeneratör varsa yakıt sarfiyatını azaltmak için kullanılabilir.

II. Rüzgar türbini ana ihtiyacı karşılamak veya çok düşük rüzgar zamanlarında rüzgar türbinine destek olmak için kullanılabilir.

I.Dünya üzerindeki pek çok elektrikten uzak bölgede dizel jeneratörlerden yararlanılmaktadır. kW saat başına elektrik fiyatı, o bölgedeki yakıt fiyatına, jeneratörün bakım masraflarına ve dizel jeneratörün verimliliğine bağlıdır. Dizel jeneratörün ilk yatırım masrafları azdır ve dizel teknolojisi dünya çapında iyi bilinen bir teknolojidir.

II.Eğer kullanım yerinde elektrik ihtiyacı zaman zaman çok yüksek güçlere çıkıyorsa ve bu olay günde toplam 1-2 saat için oluyorsa, ortalama genel ihtiyacı rüzgar türbini karşılar, arada bir olan yüksek ihtiyaç dizel jeneratörle karşılanabilir. Akü voltajını 220 V alternatif akıma çeviren evirecin maksimum gücü aşıldığı zaman dizel jeneratör devreye sokulur. Çekilen yük evirecin gücü içerisine girdiği zaman, belli bir süre sonra dizel jeneratör devreden çıkarılır. Jeneratörün verimini artırmak için çalıştığı süre içerisinde aküleri şarj ederek rüzgar jeneratörüne destek olur. Akü yedekli rüzgar türbini + dizel jeneratör sistemi aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır (Walker ve Jenkins, 1997).

1. Rüzgar türbini
2. Dizel jeneratör seti
3. Doğrultucu
4. Kontrol ünitesi + direnç
5. Akü bankası
6. Evireç
7. Dizel jeneratörün otomatik açma – kapama sistemi

1. Standart Rüzgar Türbinleri 20 Watt – 10 kW güçleri arasındadır. Daha yüksek güçler için iki veya daha fazla 10 kW'lık türbin paralel bağlanabilmektedir. Rüzgar türbinleri 12, 24, 48 ve 120 VDC doğru akım gerilimlerinde üretilmektedir.

2. En fazla ihtiyacınıza göre uygun bir dizel jeneratör seçilir.

3. Doğrultucu, dizel jeneratörden gelen alternatif akımı doğru akıma çevirir ve fazla gücü aküleri şarj etmek için kullanılır.

4. Gerekli olan akü bankası sistemin kurulduğu yerin şartlarına bağlıdır. Akülerin uzun ömrünü sağlamak için şarj akımı, akü kapasitesinin % 10'undan fazla olmamalıdır. Örneğin: 600 Ah bir akü bankası 60 A'in üzerinde bir akımla şarj edilmemelidir. Ayrıca kapasitenin % 40'ının altına incek kadar da aküler boşaltılmamalıdır (1.75 V/hücre). Akü kapasitesinin % 60'ının kullanılacağı düşünülürse, 2 kW saatlik günlük harcamayı örnek alırsak; 24 VDC akü

grubu için  $2000 \text{ Watt.saat}/24\text{V}=80 \text{ Ah}$  demektir. Buna göre, günlük akü kapasitesi  $80/0.6 = 140 \text{ Ah}$ .

5. Alternatif akım (AC) yükler için yeterli kapasitede bir evirece gerek vardır. Piyasada mevcut olan evireçler genel olarak 12, 24, 48, 96 ya da 120 VDC girişlidir. Evireçin gücü devamlı ihtiyaç duyulacak maksimum güç kadar olmalıdır. Evireç kendi maksimum gücünün 2 katı kadar anlık güçleri karşılayabilmelidir. Çünkü elektrik motoru gibi bazı yükler kalkışlarda kendi anılan güçlerinin  $3/4$  katı kadar yük çekerler. En basit evireçleri trapez dalga ile çalışırlar. Aşağı yukarı bütün ev aletleri bu elektrikle çalışır. Fakat bazı özel durumlarda, örneğin ölçme aletlerinde tam sinüs akımına ihtiyaç duyulmaktadır.

6. Doğru akımla çalışan cihazların rüzgar enerjisi ile birlikte kullanılması, çevirici kayıplarının hiç olmaması ya da çok az olmasından dolayı en verimli kullanım şeklidir. Bu tip tesislere en yaygın örnekler: (Walker ve Jenkins, 1997).

- Telsiz vericileri (12 ya da 24 VDC)
- GSM aktarıcıları (24 VDC)
- Telekom aktarıcıları (48 VDC)
- Motorlu taşıtlar (12 ya da 24 VDC)
- Deniz vasıtaları (12 ya da 24 VDC)
- Uyarı ışıkları (12 VDC)
- 12 ya da 24 VDC ile çalışan elektrikli aletler vs.

### 8.6 Rüzgar Tarlaları:

Bu kavram, güç şebekesine elektrik üreten RED sistemlerini belirtmek için kullanılır. Çeşitli yayınlarda “rüzgar çiftliği” veya “rüzgar parkı” şeklinde de tanımlanmaktadır.

Rüzgar enerji sistemlerinde elde edilen güç üretimi kesikli ve birim çıkış gücü konvansiyonel güç tesislerine göre düşüktür. Bu sorunlara ve sistemdeki diğer problemlere çözüm getirebilmek için “rüzgar tarlası” kavramı geliştirilmiştir (Çolak vd., 1995).

Şekil 8.6 ve şekil 8.8’de gördüğümüz gibi 20 rüzgar türbininden oluşan tipik bir rüzgar çiftliğinde, yaklaşık  $1 \text{ km}^2$  alan kaplıyor olmasına rağmen bu alanın sadece yüzde 2’sini kullanmaktadır. Geri kalan alan, çiftlik ya da doğal alan olarak kullanıma açık kalmaktadır. 20

rüzgar türbininden oluşan bir rüzgar çiftliği, 6500 ile 10000 evin elektrik gereksinimini karşılamaktadır. Şekil 8.7 ise NORDEX rüzgar türbinlerinden oluşan bir rüzgar çiftliği göze çarpmaktadır.

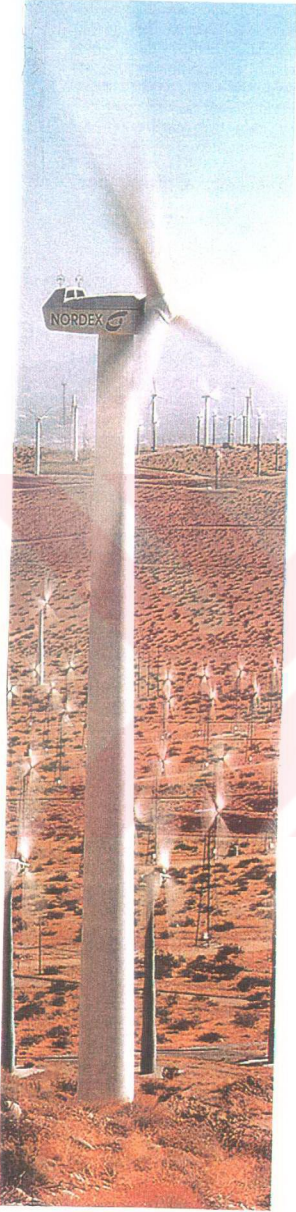
Bir rüzgar tarlası projesi, meteoroloji grubu, RED sistem tasarımcıları, üreticiler, yerel yönetim, yöre halkı ve planlama grubu arasında büyük bir işbirliğini gerektirir.

Rüzgar sistemlerinde kullanılan senkron generatörlerin, şebeke ile bağlantısı ayrıntılı olarak incelenmiş ve büyük bir teknik sorun görülmemiştir. İndüksiyon generatörüne sahip rüzgar türbinleri hacim olarak küçüktür. Ancak, şebekeye güç aktarımı sırasında % 5'in üzerinde voltaj oynama riski bulunur. Bununla birlikte, rüzgar tarlasında merkezi şebeke kontrolü sağlandığı için, bu sorun kolayca çözülebilir (Çolak vd., 1995).

RED sistemlerinin geniş bir alan üzerine yayılması ile enerji çıkış kararlılığında bazı iyileştirmeler sağlanır. Ancak, sabit bir güç elde etmek için, çıkış gücü yüksek türbinlerin en iyi şekilde tasarlanması gerekir. Rüzgar tarlasındaki türbinlerin işletilmesinden elde edilen deneyimler, kanat açısı ve diğer işletim özelliklerini optimize etmek için kullanılmalıdır. Rüzgar enerjisinin depolanması, iletim hattı olan yerlerde ekonomik değildir. Kurşun asit bataryalar aşırı pahalıdır. Bunun yanı sıra, volan gibi diğer parçaların geliştirilmesi ve test edilmesi gerekir.

Rüzgar tarlalarında enerji çıkışı büyüktür ve bu enerjinin anında kullanılması her zaman mümkün değildir. Bu nedenle elde edilen enerjiyi hidroelektrik tesislerden yararlanarak depolamak daha ekonomik olacaktır. Burada yapılacak olan işlem ya suyun tasarruf edilmesi veya hidrogeneratörden aşağı akan suyun yeniden yukarı pompalanmasıdır.





Şekil 8.7. Amerika'daki NORDEX rüzgar santrallerinden oluşan rüzgar çiftliği (URGT izni ile)



Şekil 8.6 Almanya'daki rüzgar çiftliği (URGT izni ile)



Şekil 8.8. Hollanda'daki rüzgar çiftliği (URGT izni ile)



## 9. RÜZGAR GÜCÜNDE GELİŞME VE RÜZGAR ÇİFTLİĞİ TASARIMI İÇİN GEREKLİ PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Yüzyıllardan beri rüzgar makinaları su pompalama ve tahıl öğütme gibi çeşitli işlerde güç sağlamak için kullanılmıştır. Hollanda'daki yel değirmenleri rüzgar gücünden yararlanma yönünden en önemli uygulamalardan biridir. Bir zamanlar Amerika'da da yel değirmenleri kurulmuştu. Bu tür yel değirmenleri, elektriğin ulaşamadığı bölgelerde elektrik üretiminde ve su pompalama işlerinde kullanılmıştır.

En büyük rüzgar gücü makinaları 1941 yılında kurulmuştu. Türbin jeneratör grubunca üretilen elektrik enerjisi lokal şebekeleri beslemekteydi. İlk prototip 1250 (kW) gücünde elektrik üretmek için Smith-Putnam rüzgar türbini dizayn edilmiştir. En iyi rüzgar gücünün elde edileceği yer ve meteorolojik araştırmalar yapılmalıdır. Yapılan araştırmalar sonucunda 48 (km/h)'lık rüzgar hızı ile ancak elektrik üretimi sağlanabilir.

37 (m) yüksekliğindeki çelikten kulenin tepesinde bulunan rüzgar türbini içine elektrik jeneratörü, shaft ve kanatlar monte edilmiştir. Yel değirmeni rotoru, bir uçtan diğer uca kadar 53,5 (m) uzunluğundaydı. İki kanattan her biri 19,8 (m) uzunlukta ve 3,66 (m) genişlikteydi. Büyük rotor kullanılmasındaki amaç şudur rotor, 29 (dev/dak) civarında döner sonuçta da kanadın uç noktalarında 2980 (km/h) lık hızlara ulaşılır. 24 (km/h)'lık minimum rüzgar hızı 24 ile 48 (km/h)'lik değerler arasında değişirken kanadın uç noktasındaki hız ile rüzgar hızı arasındaki oran 1/6 ile 1/12 arasında olabilir.

24 (km/h)'lik rüzgar hızına ulaşıldığında, hız kontrol dişlisi sistemi otomatik olarak devreye sokarak elektrik üretilmesini sağlar. 24 (km/h)'lik rüzgar hızı ile güç üretmeye başlayan sistem, 48 (km/h)'lik rüzgar hızına ulaşıncaya kadar elektrik üretmeye devam eder ve bu hız değerinin üzerine rüzgar hızı çıktığı zaman rotor otomatik olarak devre dışı kalır ve boşa dönmeye başlar.

Rüzgar türbinindeki temel hareketler şunlardır: Rotasyonel hareketler, otomatik olarak kanat açısının (pitch) kontrolü ile esneme ve kontrol işlemleridir. Normal çalışma şartları altında, hız kontrol mekanizmasıyla kanatların hızı sabit bir devirde tutulur. Değişken rüzgar hızlarına rağmen kanatlarda sabit bir hız elde edebilmek için her iki kanat pitch kontrol mekanizması vasıtasıyla eksenleri etrafında döndürülerek uygun açı elde edilir.

Hız kontrol sisteminin devreye girmesiyle kanatlar boylamasına, eksenleri etrafında hareket ettirilerek pitch kontrolü sağlanır.

Kule içinde rüzgar yönüne paralel bir şekilde monte edilmiş olan türbin mili dikey konumda bulunan şaftı çevirir. Kanatlar kulede dikey konumda bulunmaktadır ve bir hidrolik motor sayesinde kanatların dikey eksen boyunca esnemesi kontrol edilir.

Rotor göbeğine bağlanmış olan türbin kanatlarının her biri eksenleri etrafında serbestçe dönebilir. Kon hareketi, kanatları rüzgarın şiddetine göre yukarı aşağı hareket ettirir. Bu hareket çok şiddetli kasırga veya bora gibi doğal afetlerde kanatları yüksek gerilmelerden korumak içindir. Kanatlara verilen koni açısı gravitasyonel, aerodinamik ve merkezkaç kuvvetlere etki eder.

Smith-Putnam rüzgar türbini 1941'den 1945'e kadar çalıştırıldı ve kanatların birisindeki metal yorulmasından dolayı devreden çıkarıldı. Kanatın tamiri yapıldıktan sonra, türbin çalışmaya devam etti fakat diğer enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında ekonomik olmadığına karar verildiği için iptal edildi. Bu nedenden dolayı rüzgar türbini-jeneratör grubu sona erdirildi.

1950'li ve 1960'lı yıllar esnasında rüzgar gücü teknolojisi daha fazla araştırıldı. Avrupa'da da bu konuda çalışmalar yapılmaktaydı. Almanya'da 100 (kW) gücünde ve Danimarka'da 200 (kW) gücünde rüzgar türbini-jeneratör grubunu kurmuşlardı. 10 yıl içinde türbinler enterkonnekte şebekeye bağlanmıştır. Rüzgar türbinlerinin Avrupa'da gösterdikleri performans sonucunda bu güç üretim şekline ilgi artmıştır. Bir rüzgar türbini-jeneratör grubu tesisi, fosil yakıt yakan güç santrallerine göre daha ekonomiktir.

Smith-Putnam'ın dizaynı ve konstrüksiyonu olan rüzgar türbini mühendislik açısından başarılı bir çalışma idi. Bugünlerde ise Grandpa's Knob'un 1940'lı yıllarda kurduğu yatay eksenli rüzgar türbinlerine ilgi daha fazladır. Airkaft imalat teknolojisinden faydalanılarak rotor çapları daha büyük ve kanatlar daha hafif imal edilmektedir (Sorensen, 1986).

### 9.1 Gerçekçi Bir Yatırım İçin Gerekli İncelemeler:

Rüzgar türbini teknolojisi gelişimi, çevre dostu bir enerji kaynağına yatırım için yeni bir fırsat yaratmaktadır. Hızlı bir biçimde gelişen rüzgar enerjisi endüstrisinde gerçekçi bir yatırım için yapılması gereken incelemeleri şöyle sıralayabiliriz:

- Çiftliğin kurulacağı bölgenin belirlenmesi
- Bölgenin ön değerlendirmesi
- Rüzgar hızı gözlemleri ve veri analizi

- Yüzey yapısı modellemesi ve mikro-konuşlandırma
- Altyapı tasarımı ve türbin seçimi
- Enerji üretimi değerlendirmesi
- Ekonomik analiz
- Çevre etki değerlendirmesi

### 9.1.1 Rüzgar potansiyeli ve üretilen enerji:

Rüzgar türbini ekonomisi, rüzgar türbini ve rüzgar çiftliğinin üreteceği enerjiyle son derece bağlantılıdır. Dolayısıyla bu, ilgilenilen bölgenin rüzgar potansiyeline bağlıdır. Bunun için bölgede rüzgar hızı ölçümleri yapılarak, elde edilen veri yakın civarda bulunan bir meteoroloji istasyonundan elde edilecek uzun dönem verileri karşılaştırılır ve türbinlerin konumları analiz edilerek bölgesel etkiler incelenir.

Rüzgar potansiyeli incelemelerinden elde edilen sonuçlar rüzgar türbini karakteristikleriyle ve bölgenin topografik özellikleriyle birleştirilerek beklenen yıllık enerji üretimi belirlenir. Daha sonra, bu prosedür etkileşimli olarak uygulanarak, enerji üretimini ve dolayısıyla karlılığı en yüksek değerine çıkarmak için rüzgar çiftliği planı optimize edilir.

### 9.1.2 Teknik fizibilite ve mühendislik tasarımları:

Yapılması gereken teknik ve mühendislik işlemleri şöyle sıralanabilir:

1. Rüzgar türbinlerinin satın alma koşullarının ve mevcut türbinlerin teknik karakteristik ve fiyat analizlerinin hazırlanması,
2. Rüzgar çiftliği bölgesinin incelenmesi; yerin jeolojik yapı analizi ve yıl gereksiniminin belirlenmesi,
3. Rüzgar türbini temel inşaatının tasarlanması,
4. Bölgenin elektrik şebekesinin incelenmesi,
5. Ana şebeke bağlantılarının tasarlanması,
6. Teknik veri ve türbin karakteristiklerinin gerçekleşme durumlarını belirlemek için rüzgar türbini performans testi ölçümlerinin yapılması.

### 9.1.3 Ticari açıdan uygulanabilirlik:

Kurulması düşünülen rüzgar türbini veya çiftliğinin ticari açıdan uygulanabilirliğinin gerçekçi analizi öncelikli öneme sahiptir. Karar verme yöntemi Şekil 9.1'deki akış diyagramında görülen planlama ve hesaplamalarla yapılır.

Bu yaklaşım, rüzgar potansiyelini mühendislik inceleme ve planlama prosedürlerini birleştirerek, inşa işlemlerine başlanmadan önce yatırımcının projenin ticari açıdan uygulanabilirliği hakkında karar verebilmesini sağlar.

### 9.1.4 Çevresel faktörler ve planlama onayı:

Bölgesel planlama otoriteleri tarafından dikkate alınan birtakım faktörler vardır. Özellikle görsel etki ve gürültü düzeyleri. Bu yüzden, rüzgar türbinlerinin gürültü düzeylerinin hesaplanması ve görsel değerlerinin belirlenmesi gereklidir.

## 9.2 Rüzgar Enerjisini Etkileyen Faktörler:

### 9.2.1 Yeryüzünün engebелiliği:

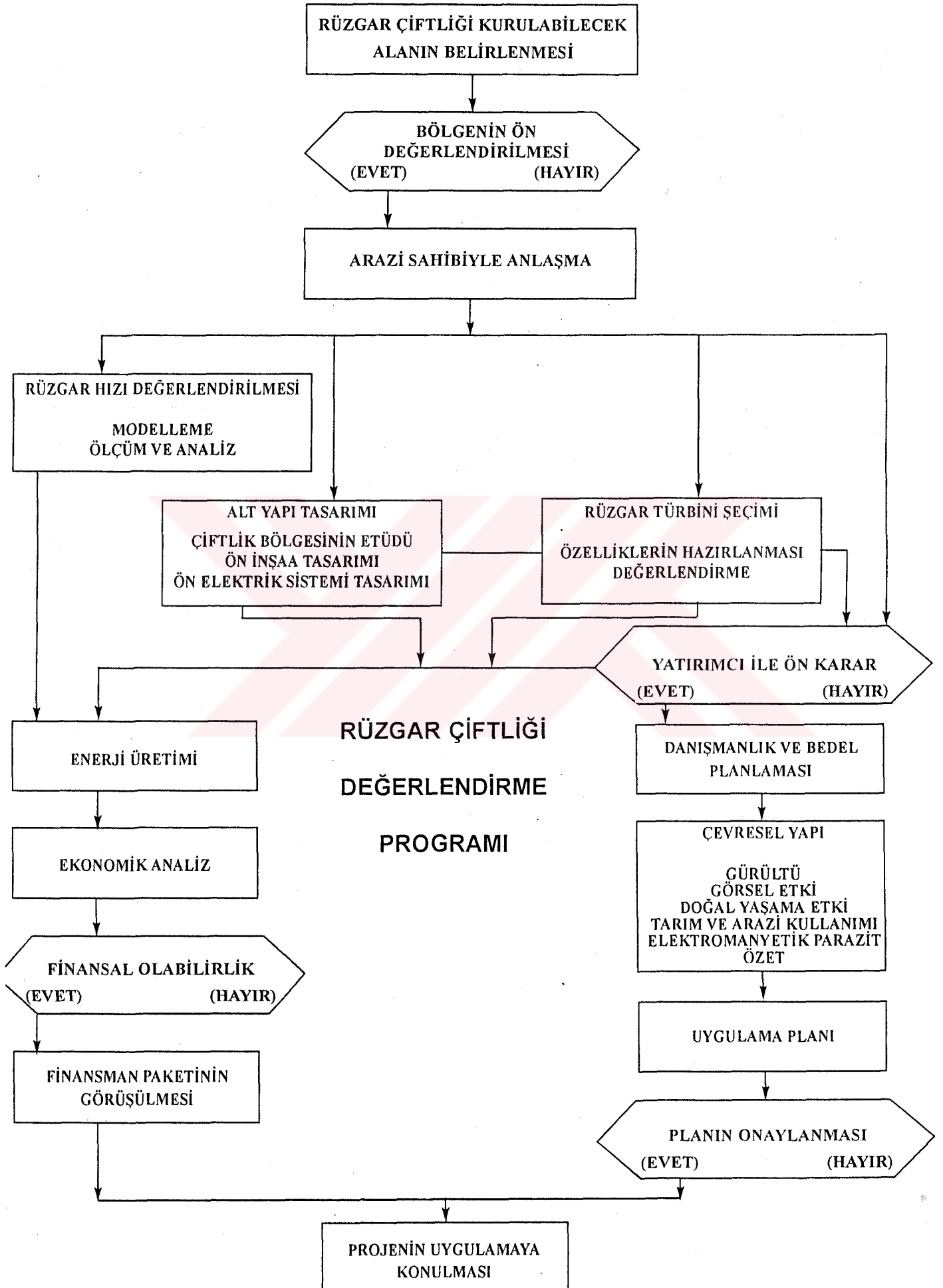
1 km. yüksekliğe kadar yeryüzünün engebелiliği rüzgarın hızını etkiler. Rüzgarın hızı yeryüzüne karşı olan sürtünme nedeni ile azalır.

Rüzgar enerjisinde rüzgar koşullarını değerlendirmek için engebелilik sınıfı göz önüne alınır. Rüzgar hızı ölçümleri Dünya Meteoroloji Teşkilatı'nın belirlemiş olduğu 10 m. yükseklikte yapılmaktadır. Türbinler ise genellikle 60 m. yüksekliğindedir (DEWI, 1998).

### 9.2.2 Rüzgar engelleri:

Binalar, ağaçlar, kayalar, vb. rüzgarın hızını azaltan engellerdir. Bu engeller çevrelerinde türbülans yaratırlar. Türbülans alanı engelin yüksekliğinin 3 katına kadar uzanabilir. Türbülans engelin arkasında daha belirgindir. Bu nedenle türbinin kurulacağı alanda bu tür engellerden kaçınılmalıdır.

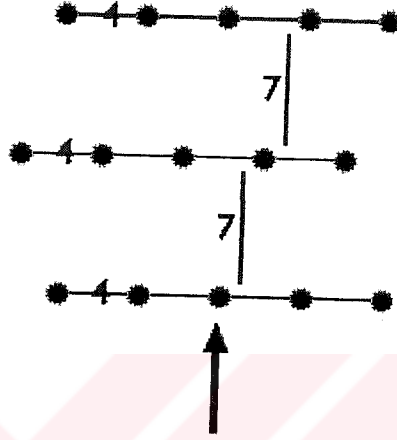
Engellerin rüzgar hızındaki etkisi engelin porozitesine bağlıdır. Porozite, rüzgarın çarptığı nesnenin açık alanlarının yüzdesidir. Binaların % 0, sık ağaçların porozitesini % 50 ve yaprakları seyrek olan ağaçların porozitesini % 70'dir (DEWI, 1998).



Şekil 9.1 Rüzgar çiftliği değerlendirme programı

### 9.2.3 Park etkisi:

Rüzgar türbini tarlasında bulunan her türbin rüzgarın hızını azaltır. Bu nedenle türbinler olabildiğince birbirinden uzağa yerleştirilir. Genel olarak türbinler hakim rüzgar yönünde 5 ile 9 rotor çapı, hakim rüzgar yönüne dik olarak da 3 ile 5 rotor çapı boşluk bırakılacak şekilde yerleştirilirler. Şekil 9.2’de bir rüzgar türbini tarlasının yerleşim şekli verilmiştir. Park etkisi nedeniyle % 5 civarında bir enerji kaybı olur (DEWI, 1998).



Şekil 9.2 Bir rüzgar türbini tarlasının yerleşim şekli.

### 9.2.4 Tünel etkisi:

Rüzgar binaların veya dağların arasında geçerken hızı artar. Bu etkiye tünel etkisi denir. Açık alanda hızı 6 m/s olan rüzgarın hızı, bu doğal tünellerde 9 m/s’ye kadar çıkabilir.

Düz olmayan tepelerin arasında yer alan tünellerde çok fazla türbülans olur. Bu da rüzgarın hızının artmasındaki avantajı boşa çıkarabilir (DEWI, 1998).

### 9.2.5 Tepe etkisi:

Rüzgar türbinlerini yerleştirmenin yaygın yollarından biri, türbini tepeye koymaktır. Tepelerde rüzgar hızı çevreye göre daha fazladır. Eğer tepe sarp ise, tünel etkisinde olduğu gibi, meydana gelen türbülanslar rüzgarın hızının artmasındaki avantajı boşa çıkarabilir.

## 9.3 Kullanılan Veri ve Yöntem Analizi:

### 9.3.1 Kullanılan veri:

Bir bölgeye rüzgar santrali dikileceği zaman öncelikle o bölgede ön rapor için en az 6 ay, fizibite için ise, en az 1 yıllık veri gerekmektedir. Bu şart Enerji ve Tabii Kaynaklar

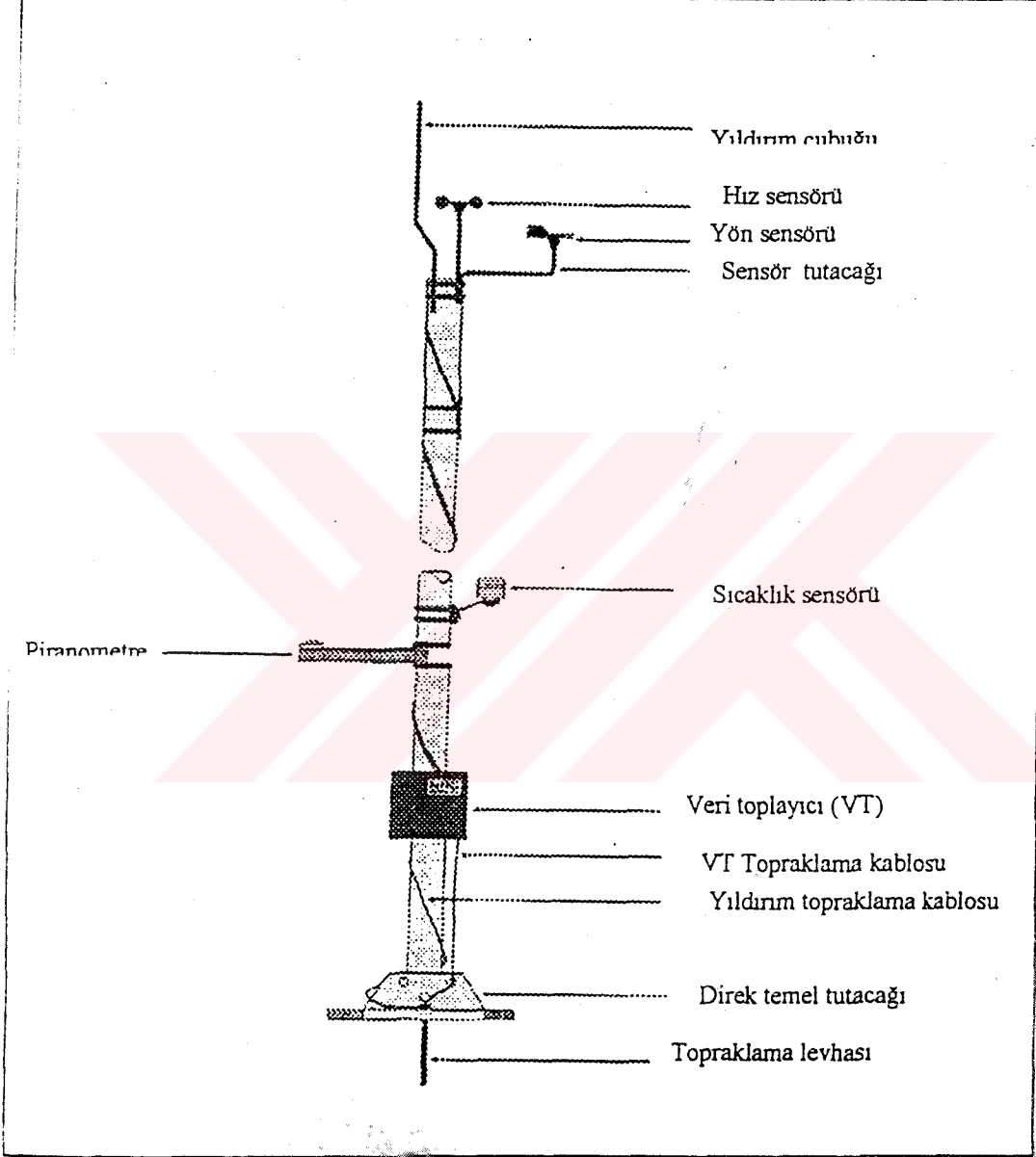


Bakanlığı'nın "Rüzgar Santralleri Şartnamesi"nde de belirtilmektedir (RSS, 1997). Bakanlık şartnamesine göre, veriler 1'er saatlik veya 10'ar dakikalık ortalama şeklinde şiddet ve yön verileri olmak zorundadır. Fakat öneri olarak türbinlerin proje sahasında ömürlerini kontrol etmek amacı ile nem ve sıcaklık verilerinin de alınması faydalı olacaktır. Fizibilite Bakanlığa sunulma aşamasında, gerek Bakanlık ve gerekse Elektrik İşleri Etüd İdaresi yetkilileri tarafından direk kontrol edilmektedir. Herhangi bir bölgeye rüzgar ölçüm direği (anemometre direği) dikerken bazı hususlara dikkat edilmelidir. Bu hususları şöyle sıralayabiliriz:

- Direk dikilen yer, bölgeyi tam olarak temsil etmelidir,
- Rüzgar yönü kuzeyden ölçüldüğü için, yön sensörü dikkatli bir şekilde ve 0° kuzeyi gösterecek şekilde yerleştirilmelidir.
- Enerji nakil hatlarına mümkün mertebe yakın olmalıdır,
- Ulaşılması güç bölgelere yapılmamalıdır,
- Konutlara yakın olmamalıdır,
- Anemometre kalibrasyonuna dikkat edilmelidir,
- Kullanılan anemometreler sertifikalı olmalıdır,
- Çok fazla engebeli ve pürüzlü arazilere dikilmemelidir,
- Önünde rüzgar ölçümlerini etkileyecek herhangi bir engel bulunmamalıdır.

Kullanılan veriler 1 yıllık ve 10 m'de ölçülmüş hız ve yön verileri olmaktadır. Veriler 10'ar dakika aralıklarla ortalama olarak kaydedilir. Kullanılan veri ile ilgili daha geniş bilgi vermek gerekirse, Şekil 9.3 ile şekil 9.4'ü incelemek faydalı olacaktır. Şekil 9.3'den de görüldüğü gibi, ölçüm direği yıldırım düşmelerine karşı paratoner tesisatı ile korunmuştur. Daha sonra, yön ve hız sensörleri direğe monte edilmektedir. Veri toplayıcı, yerden yaklaşık olarak 3 m yükseklikte bir yere monte edilerek direk dikilmektedir.

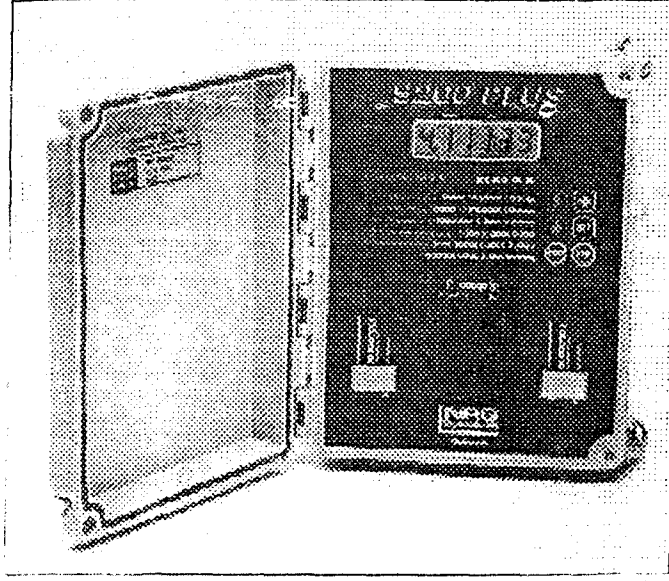
Direk dikildikten sonra yaklaşık 50 günde bir bölgeye gidilerek veri toplayıcısından veri alınarak pil de değiştirilir. Bu süre veri toplayıcı içerisindeki pilin kalitesine göre azalabilir veya artabilir. Veriler, veri toplayıcısının içerisinde bulunan özel bölmeden (veri yongası-data chip) çıkartılarak alınır (Şekil 9.5). Şekil 9.6 ise, NRG 9200 PLUS anemometrenin rüzgar yön ve elemanlarını göstermektedir.



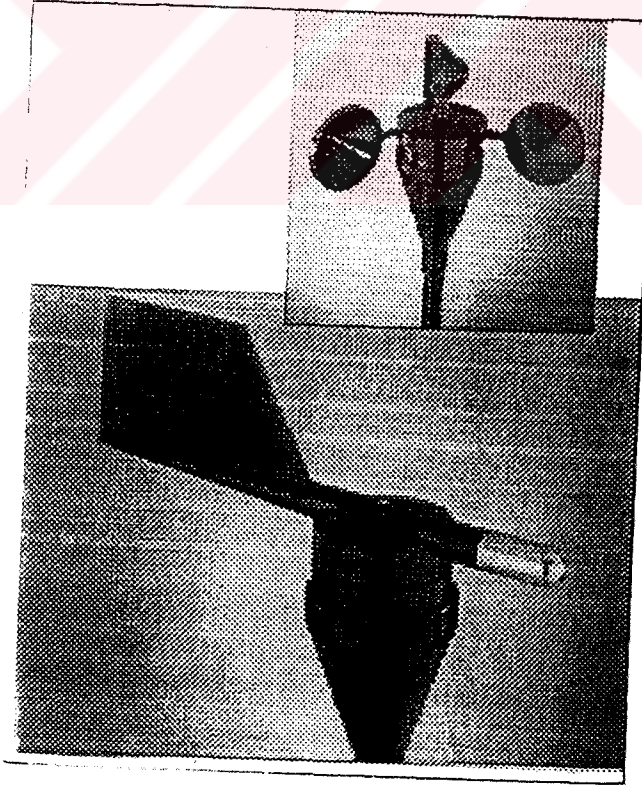
Şekil 9.3 9200 P marka anemometre direği.



Şekil 9.4 Anemometre ölçüm direği (AK-EN A.Ş. izni ile)



Şekil 9.5 Veri yongalarının bulunduğu veri toplayıcı.



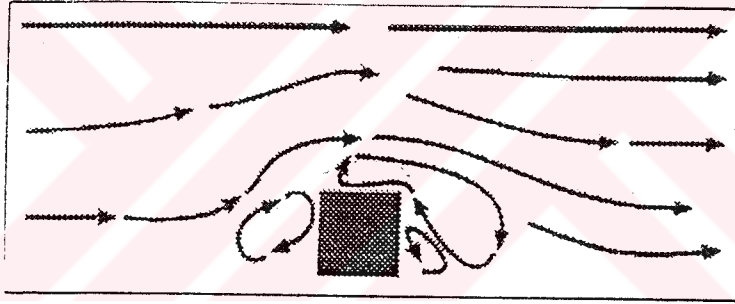
Şekil 9.6 NRG 9200 PLUS hız ve yön sensörleri.

#### 9.4 Rüzgar Potansiyeli Modellemesi:

Rüzgar potansiyelini belirlemek için bazı alt modeller kullanılmaktadır. Bunlar; engel perdeleme modeli, orografik model ve pürüzlülük değişim modelleridir. Modellerde yapılan kabuller üzerinde kısaca durmak konuyu anlamak için faydalı olacaktır.

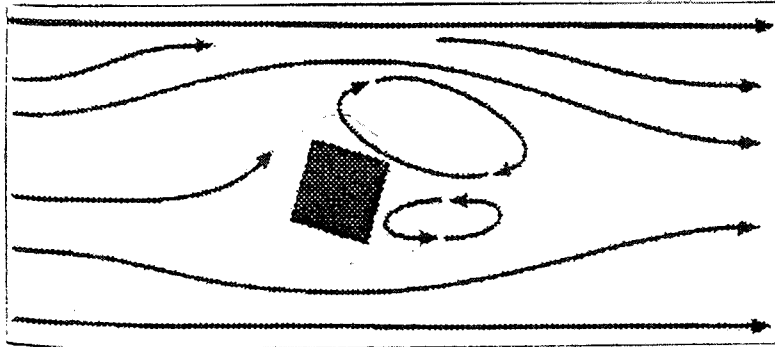
##### 9.4.1 Engel perdeleme modeli:

Arazide bulunan engellerin rüzgar akışına çok önemli etkileri vardır. Özellikle bina, ağaç, kayalık, vb gibi engeller rüzgar yön ve hızına küçümsemeyecek etkilerde bulunur. Rüzgar, bir cisme çarptığı zaman cisim civarında bir türbülans meydana getirir. (Şekil 9.7) Oluşan türbülans, cismin büyüklüğünün 2-3 katı kadar bir alanda etkili olur.



Şekil 9.7 Herhangi bir engelin rüzgar akışına etkisi.

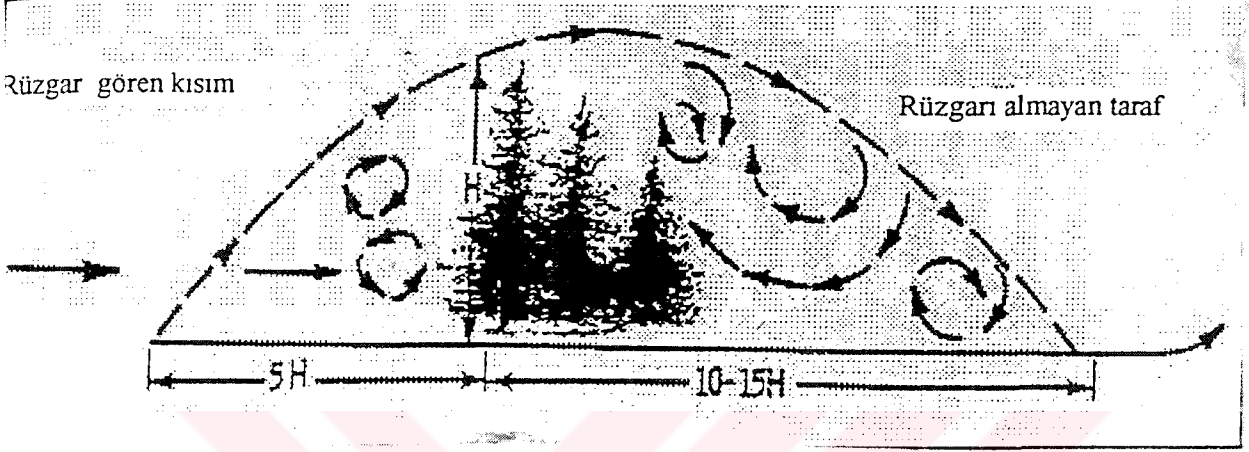
Bu durum, cisme kuşbakışı bakıldığında daha iyi görülebilmektedir (Şekil 9.8).



Şekil 9.8 Cismin üstünden bakıldığında türbülans etki alanının görünüşü.



Türbülans, rüzgarın cisme çarptığı ön yüzeyde değil de, daha çok arka yüzeyde etkilidir. Bazı durumlarda etkilenme sahası 5 katına kadar çıkabilir. (Şekil 9.9)



Şekil 9.9 Ağaçların rüzgara engel teşkil ederek türbülans meydana getirmesi.

Yukarıda anlatılanlardan anlaşılacağı üzere, rüzgar ölçümünün yapıldığı anemometre direğinin yakınlarındaki arazide bulunan bir engelden dolayı rüzgar hızında ortaya çıkan azalmaya veya yön değişimine perdeleme etkisi (shelter effect) denmektedir (Troen ve Petersen, 1989). Herhangi bir engelin perdeleme etkisi aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Hesaplama noktasının engelden olan uzaklığı ( $x$ )
- Engelin yüksekliği ( $h$ )
- Engelin uzunluğu ( $L$ )
- Hesaplama noktasının yüksekliği ( $H$ )
- Engelin geçirgenliğine ( $p$ ) bağlıdır.

Engel, rüzgarın geçirgenliğine de etki etmektedir. Geçirgenlikteki (porosity) artış ve engel uzunluğunun azalması perdeleme etkisini zayıflatmaktadır. Aşağıdaki verilen çizelge 9.1 engel türüne göre geçirgenlik değerlerini vermektedir (Mortensen vd., 1993).



Çizelge 9.1 Engel türleri ve geçirgenlik değerleri.

Engel Türleri	Geçirgenlik (p)
Katı cisim (duvar, ev)	0
Çok yoğun	$\leq 0.35$
Yoğun	0.35-0.50
Açık	$\geq 0.50$

Geçirgenlik, değeri, genel bir kural olarak binalar için 0, ağaçlar için 0.5 alınmaktadır.

#### 9.4.2 Orografik model:

Bu modelin temel amacı, yüzey şekillerinin rüzgar profiline etkisini azaltmaktır. Bu model yatay olarak çok geniş bir alanın etkilerini hesaplayabilmektedir.

#### 9.4.3 Pürüzlülük değişim modeli:

İncelenen bir alanın pürüzlülüğü, bu alan üzerindeki pürüzlülüğe neden olan cisimlerin alan içindeki pozisyonu ve boyutlarına bağlıdır. Arazi pürüzlülüğü, pürüzlülük uzunluğu ile belirlenir. Bu uzunluk  $z_0$  ile gösterilir ve aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir:

$$z_0 = 0.5 (hS / A_H) \quad (9.1)$$

Burada kullanılan değişkenler şunlardır:

h: pürüzlülüğe neden olan elemanın yüksekliği,

S: rüzgara karşı gelen dikey kesit alanı,

$A_H$ : arazi üzerine dağılmış olan yatay kesit alanıdır.

$A_H$  değerinin, S değerinden daha büyük olduğu koşullarda yapılan potansiyel hesaplamaları daha doğrudur.

#### 9.5 Parametrelerin İncelenmesi:

Yukarıda bahsedilen aktivite ve incelemeler daha detaylı bir şekilde aşağıdaki alt başlıklarla açıklanmıştır. Bunların rüzgar çiftliği projesinin özelliklerine göre değiştirilip, geliştirilmesi mümkündür.

Bu verilerin güvenilirlikleri, tamamen çiftlik alanında yapılan gözlemlerin kapsadığı zaman aralığına ve bu veriyle meteoroloji istasyonundan elde edilen veri arasındaki korelasyonun derecesine bağlıdır. Yukarıda bahsedilen çıktılara, hata sınırları belirlenerek, etkinlik kazandırılabilir.

### 9.5.1. Enerji üretimi incelemesi:

Bir rüzgar çiftliğinin net enerji üretimi, projenin ekonomik açıdan uygulanabilirliğinin belirlenebilmesindeki anahtar faktörlerden birisidir. Bu, bilgisayar ortamında hazırlanan modeller kullanılarak hesaplanır.

Dijitize edilmiş yer yüzeyi verisi, rüzgar türbini verisi (geometrik yapısı, güç eğrisi, devreye girme vb), rüzgar hızı ve yönü dağılımları, rüzgar profili ve türbülans düzeylerini rüzgar profili ve türbülans düzeylerini rüzgar türbini dizilişiyle birleştirerek, türbinlerin tek tek ve bir arada üretecekleri yıllık enerji miktarları hesaplanır. Bu hesaplamalarda, çiftlik bölgesindeki akış değişimleri ve iz bölgesi etkileri (wake effects) de dikkate alınmalıdır. Elektrik sisteminde meydana gelebilecek diğer kayıplar da bu hesaplamalara dahil edilebilir. Prosedürün etkileşimli olarak kullanılmasıyla türbin dizilişini optimize etmek ve böylece enerji üretimini, dolayısıyla karlılığı en yüksek değerine yükseltmek de mümkündür (Gipe vd., 1995).

Bu işlemler sonucunda rüzgar çiftliğinin toplamı ve ayrı ayrı her türbinin beklenen yıllık enerji üretimi miktarı elde edilir. Buna bağlı olarak da rüzgar çiftliğinin kapasite faktörü hesaplanarak çiftliğin verimi belirlenir.

### 9.5.2 Gürültü değerlerinin incelenmesi:

Rüzgar çiftliğinin meydana getirecek gürültü etkisinin dağılımı, çiftliğin kabul edilebilirliğinin ortaya konulmasına önemli bir parametredir. Bu nedenle rüzgar çiftliği içerisinde ve civarındaki her noktada gürültü düzeylerinin meteoroloji koşullara göre belirlenmesi gereklidir.

Bu belirlemeleri yapabilmek için mesafe, atmosferik ve yeryüzü absorpsiyon gibi faktörleri de içeren bir gürültü yayma modeli kullanılır. Model için gerekli olan girdi, yeryüzü verisiyle bir türbinin gürültü karakteristikleri ve dizilişleridir. Aynı meteorolojik etkiler de buna dahil edilebilir. Model yardımıyla çiftlik düzenini optimize ederek gürültü etkisini en az düzeye indirmek mümkün olmaktadır. Burada kullanılan öngörü tekniği tek tek her nokta için

hesaplamaların yapılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece duvardaki bir yerleşim yerinde gözlenecek gürültü değerleri belirlenebilmektedir. Aynı gürültü düzeyi konturları çizilmiş haritalar elde edilmesi de mümkün olmaktadır.

### 9.5.3 Elektriksel altyapı tasarımı:

Rüzgar çiftliği planlamalarında ihale edilen özelliklerden bir tanesi de elektriksel altyapının durumudur. Bu, rüzgar çiftliğinin yatırım maliyeti, enerji üretim ve dolayısıyla karlılığı üzerinde önemli etken neden olabilmektedir. Elektrik sistemindeki kayıplar tipik olarak rüzgar çiftliği toplam üretiminin % 2-3'ü kadardır (ECD, 1999). Bu nedenle optimum hat ve transformatörlerin belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla hazırlanacak modelde alternatif akımlı elektrik sistemlerinin durumlarının detaylarıyla birlikte, rüzgar hızı dağılımı ve türbinlerin performans detayları veri olarak kullanılır. Maliyetlerin ve iletim hatlarının transformatörlerin belli bir alan için kayıplarının veri tabanı kullanılarak yatırım maliyetleri ve enerji kayıpları hesaplanır. Alınan enerji ve reaktif güç miktarları ayrıca belirlenmektedir. Daha sonra basit bir yatırım-kazanç testi yardımıyla en optimum durum belirlenir. Yapılan hesaplamalar sonucunda maliyetleri, enerji kayıplarının kaynaklarını ve reaktif güç gereksinimlerini gösteren bir tablo oluşturulur. Şebeke boyunca voltaj profilleri de hesaplanarak sunulur.

### 9.5.4 Çiftlik arazisi incelemesi ve ön-alt yapı tasarımı çalışmaları:

Rüzgar çiftliği ekonomisinde önemli bir faktör de inşaat işlemleri, erişme yolları (geçici ve daimi) yapımı, ara istasyonlar ve kontrol binası yapımını içeren altyapı işlemleridir. Bu işlerin maliyeti tipik bir rüzgar çiftliği için toplam proje maliyetinin yaklaşık % 30-40'ı kadardır (Tripathy vd., 1998). Bu çalışmalar özellikle kış aylarında önemli etkilere neden olabilmektedirler. Dolayısıyla, bu faktörlerin projenin ilk aşamalarında belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Gerekli zaman ve maliyetlerin tahminlerinin iyilik derecesi önceden ele alınan tasarım çalışmalarının kalitesine bağlıdır. Altyapı tasarımı, bölgenin ziyaretinden ve deneme kazılarında elde edilen veriye dayalı olarak yapılır. Ana hatları oluşturma ancak parametrelerle bir rüzgar çiftliğinin de tasarımının yapılabileceği yeterlilikte oluşturulur. Bu aşamada, taşıtların geçiş yolları ve türbinlerin kurulması ile ilgili potansiyel problemler belirlenir.

Bu işlemler sonucunda bölgenin ziyaretinden ve incelemelerden elde edilen veri sunulur. Bütçe tahmini yapılabilecek detaylara sahip bir ön tasarım hazırlanır.

### 9.5.5 Ekonomik analiz:

Ekonomik etkinliğin uygulanabildiği mühendislik ekonomisi problemlerini incelemek zorundayız. Denkleştirme yapmak için mantık yolu kullanılır. Bu mantık yolu ile bir seçeneğe ait nakit akışlarını bazı eşdeğer seriler altında düzenleyebiliriz. Olası seçeneklerin sonuçlarını seçim ölçütlerine uygulayabilmek için, bunları önce karşılaştırılabilir birimler içerisinde çözmek zorundayız. Seçenekleri, sonuçlarının bugünkü değerliliği çerçevesinde çözümleyen Net Bugünkü Değer analizi incelenmelidir.

Seçeneklerin, sonuçlarının bugünkü değerliliği çerçevesinde çözümleyen Net Bugünkü Değer analizini incelemek şarttır.

Aynı anda gerçekleşmesi olası seçenekleri karşılaştırmanın kolay yolu, bunların sonuçlarının şimdiki zamanda karşılaştırmaktadır.

Net Bugünkü Değer analizi daha çok gelecekteki para alacak ve borçlarının şimdiki değerini belirlemek için kullanılır. Örneğin bir apartman dairesi, bir petrol kuyusu gibi mal mülkün sağladığı gelirlerin şimdiki değerlerini belirlememizde yardımcı olur. Eğer gelecekteki gelirler ve giderler bilirse, uygun bir faiz oranı kullanılarak bir malın şimdiki değeri hesaplanabilir. Böylece bir malın satış veya satınalma fiyatının tahmini de kolaylaşmış olur.

Diğer uygulamalara, hisse senedi ve tahvillerin değerlerinin hesaplanmasında rastlanır. Net Bugünkü Değer analizinde dikkat edilecek önemli noktalardan biri de analiz döneminin verilmesidir. Genellikle işin buna bağlı zaman dönemi içinde yapıldığı varsayılır. Bu durumda, her seçeneğin sonuçları analiz dönemi veya bazen planlama ufku denilen bu zaman dönemi içinde gözönüne alınmış olur.

Geri ödeme oranı, mühendislik ekonomisinin analiz yöntemlerinden birisidir. Geri ödeme oranı borcun ödenmemiş kısmına uygulanan ödeme planının son ödemeye borç kalıntısını sıfıra eşitlediği bir orandır. Geri ödeme oranı bir iskonto oranı olarak ele alınabilir. Yatırımın gerçek kârlılığı diye adlandırılan bu yöntemde , projenin ömrü boyunca sağlayacağı parasal geliri, yatırım tutarına eşit kılan iskonto oranı bulunur. Geri ödeme oranı veya geri dönüş oranı yatırımın geri ödenmeyen borçları üzerinden hesaplamak koşulu ile, bu borçları sıfıra eşitleyen iskonto oranıdır.

Bir rüzgar çiftliği bölgesinin uzun dönem enerji üretiminin tahmininin ve türbin sayısı ile türbin kapasitesinin karşılaştırılması için proje maliyetinin belirlenmesi gereklidir. Geri ödeme oranı (Internal Rate of Return, IRR) ve net bugünkü değer (Net Present Value, NPV)'in

belirlenmesi için rüzgar çiftliği projesinde ekonomik analize olanak sağlayan bir model kullanılır (Fortunato ve Mummolo, 1997).

Rüzgar çiftliği düzeni, rüzgar rejimi gibi çeşitli detaylar verilerek, oluşturulan bir model yardımıyla proje ömrü boyunca her yıl için, enerji üretimi ve bu enerjinin satışından elde edilecek gelir, bakım ve onarım masrafları, arazi kirası ve diğer giderler hesaplanır. Değer kaybı ve vergiler ödendikten sonra, yıllık nakit akışı hesaplanır; bunlar projenin net bugünkü değerini hesaplamak için göz ardı edilebilir veya projenin geri ödeme oranını belirlemede kullanılır. Kredilerin geri ödemesindeki provizyon ve enflasyon basit bir şekilde dahil edilebilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda hazırlanacak raporda her proje için mukayeseli bir para akışı sınıflandırması ve ekonomik göstergelerin (IRR ve NPV gibi) özeti sunulur.

#### **9.5.6 Rüzgar türbini detayları ve incelenmesi:**

Piyasada oldukça çok miktarda rüzgar türbini çeşidi bulunmaktadır. Yatırımcı amaçlarını da dikkate alarak, söz konusu rüzgar çiftliği alanı için en uygun olan rüzgar türbininin seçilmesi projenin başarılı olması açısından çok önemlidir.

Genelde bu tür projelerin hepsinde, rüzgar türbini ve gerekli ekipmanın seçimi, makinenin teknik özelliklerine (rüzgar-üstü veya rüzgar-altı, 2 veya 3 kanatlı, asenkron veya endüksiyon jeneratörlü, yatay veya düşey eksenli), fiyatına, garanti ve hazırda bulunma durumlarının bileşimine dayalı olarak yapılır. Bu işin teknik ve mühendislik yönleri incelenerek çeşitli özelliklere sahip makineler karşılaştırılıp, en uygun olanı satın alınmalıdır. Çeşitli rüzgar türbinlerinin performanslarının gerçekçi bir şekilde karşılaştırılabilmesi için üretilen türbinlerin teknik özellikleri kullanılır.

Bir rüzgar türbini kurulduktan ve çalıştırıldıktan sonra üretici firmanın öngördüğü güç eğrisi, enerji üretimi ve hazırda bulunma değerlerinin doğruluğunun tespiti için de ölçümler alınarak, karşılaştırmalar yapılır.

#### **9.5.7 Çevresel etki değerlendirmesi:**

Uygulama planı ile birlikte sunulmak üzere gereksinimleri karşılayacak şekilde bir çevresel değerlendirme hazırlanır. Bu doküman aşağıdaki bölümlerin tamamını veya bir kısmını içermektedir.

Bölüm 1. Genel özet. Dokümanda yer alan sonuçların ve diğer bölümlerin teknik olmayan kısa bir özettir.

Bölüm 2. Giriş: Projeye ilgili temel bilgiler, dokümanın amaçları ve diğer ilgili detaylar sunulur.

Bölüm 3. Bölgenin rüzgar enerjisinden sağlayacağı faydalar: Bölge halkının projeden elde edeceği ekonomik, sosyal ve çevresel kazanımların özeti ile birlikte dünyanın kazanımları belirtilir.

Bölüm 4. Rüzgar çiftliği alanının seçimi. Rüzgar çiftliği alanının belirlenmesinde dikkate alınan faktörler yeniden özetlenir ve irdelenir.

Bölüm 5. Proje tanıtımı, yapımı ve işletmesi: Bu bölümde projenin detaylı açıklamaları yer alır.

Bölüm 6. Çevresel değerlendirme: Dökümanın en önemli öğelerinden birisi, bu gelişmenin çevre üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi ve önemli herhangi bir etki olmayacağını (etkilerin kabul edilebilir düzeylerde kalacağını) gösteren ölçümlerdir. Bu bölüm aşağıdaki alt başlıklara ayrılmıştır (AWEA, 1999).

- a) Görsel etki değerlendirmesi: Rüzgar çiftliğinin, görüntü kirliliğine neden olmayacağı, doğal güzellik açısından önemli bir bölgede olup olmadığını anlatan bir rapor hazırlanır.
- b) Doğal yaşam üzerinde potansiyel etki: Bölge yetkililerinin özellikle ilgilendiği bir alan olup olmaması, koruma altına alınmış bitki vb bulunan alanların varlığı, belli bir kanunla koruma altına alınmış yabani hayvanların varlığı, özel bir üretim veya yetiştirme alanı olup olmaması, kuş sürülerinin yerleşim veya geçiş alanı olup olmaması incelenir.
- c) Arkeolojik ve tarihi özellikler: Arkeolojik ve/veya tarihi öneme sahip bölge olup olmaması ve yakında böyle bölgeler varsa onlara herhangi bir zarar verilmeyeceğini gösteren ölçüm ve benzeri belgeler sunulur.
- d) Tarım ve arazi kullanımı: Projenin arazi kullanımı üzerindeki detaylı etkileri ve şimdiki kullanımla birlikte düşünülen katılım şeması verilir.
- e) Gürültü: Fonda ölçülüp kaydedilen gürültü düzeyleri üzerinde rüzgar çiftliğinin meydana getireceği etkiler dikkate alınır. Bölgenin bir gürültü profili oluşturulur.
- f) Elektromanyetik parazit: Bölgede mikrodalga bağlantı yapan sistemler (TV veya radyo verici veya yansıtıcıları) varsa, bu sistemleri işletenlerle temasa geçilerek, kurulacak rüzgar çiftliğinin herhangi bir parazit etkisi yapıp yapmayacağı incelenir.



- g) Otoyollar ve çiftlik bölgesindeki erişme yolları: Rüzgar çiftliği kurulması ve işletilmesi sırasında bölgesel otoyollar üzerinde meydana gelecek etkiler tüm detaylarıyla birlikte sunulur.
- h) Bölgeye özel: Bölgeye özel, dikkate alınması gereken diğer hususlar varsa bunlar teşhis edilir ve uygun incelemeler yapılarak sonuçları sunulur.
- i) Sonuç ve karar: Genel bir özetle bölüm sonuçlandırılır ve olumlu veya olumsuz bir karar belirtilir.



## 10. RÜZGAR ENERJİSİ İLE DİĞER ENERJİ KAYNAKLARININ MALİYET AÇISINDAN İNCELENMESİ

### 10.1 Tanıtım:

Bilindiği gibi yeryüzünde mevcut bütün enerji kaynaklarının kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi o kaynağın kendine özgü niteliği, zenginliği ve cinsine göre değişmektedir. Bu kaynakların kimine ulaşmak için çok büyük masrafları göz önüne almak gerektiği gibi hiçbir maliyet gerekmeden ulaşılabilen kaynaklar da mevcuttur ancak bu kaynakların her birini işlemek için ayrı bir yol ve her bir yolun da ayrı bir maliyeti mevcuttur.

Dışa kapalı, planlı ekonomilerde enerji üretimi çoğu zaman “Olmazsa olmaz” zihniyeti ile çok fazla derinlemesine inilip maliyet/fayda analizleri yapılmadan hemen erişilebilir ve üretim teknolojisi hazır kaynaklara dayandırılmaktaydı. Ancak dünya genelinde bütün ülke ekonomilerinin ister-istemez liberalleşmeye (serbest piyasa ekonomisine) doğru gittikleri 1990’lı yıllardan beri elektrik üretimi için kullanılan enerji kaynaklarının çok detaylı fiyat/maliyet analizleri yapılarak toplam maliyeti en düşük olan enerji kaynaklarına doğru bir yönelme olmuştur.

Bu gelişim içinde devletlerin rolü hangi enerji türünün kullanılacağından ziyade, hangi enerji türünün kullanımının desteklenmesi ve hangi üretim enerjisi türünün teknolojisinin hükümet destekli bilimsel araştırma ve geliştirme çalışmaları ile ilerletilmesi yönünde olmuştur.

Nitekim yüzyılın başında üretilen enerjinin % 90’ı kömürden elde ediliyordu. 1950’lerden sonra bu oran %60’a indi. Günümüzde enerjinin hemen hemen yarısı petrolden, %35’i kömürden, %15’i ise gaz, güneş, rüzgar, nükleer v.s gibi alternatif enerjilerden elde ediliyor (Wagner, 1999).

### 10.2 Maliyet Analizi Kriterleri:

Liberal ekonomilerde mevcut risklerden biri de ticari şirketlerin yalnızca kendi gelir ve giderleri ile ilgilenmesi, dolayısıyla çevrelerine veya buldukları sektöre verdikleri zararları göz önüne almamalarıdır. Bu bağlamda hükümetlerin üstlendikleri rolün getirdiği sorumluluk kesinlikle geçmişteki karar verip, uygulayan taraf rolünden daha az değildir. Liberal ekonomilerdeki bu başboşluk riskini, tarafsız ve objektif bir oyuncu olarak devletin bertaraf etmesi, diğer bir deyişle ekonomik faaliyetlerdeki bütün ilgili tarafların ne oran ve ne şekilde zarar veya fayda gördüğünün belirlenerek maksimum fayda sağlayacak faaliyetlerin

desteklenmesi ve bu faaliyetlerin kurallarının koyulması beklenmektedir. Devletin bu rolü üstlenmek istememesi veya bu rolünü layıkıyla yerine getirememesi durumunda Liberal ekonomilerin o toplumun insanlarına fayda getirmesi mümkün olamamaktadır.

Mevcut kaynakların elektrik enerjisine dönüştürülmesi için gereken masrafları dört ana başlık altında toplayabiliriz.

#### **10.2.1 Sermaye ve sermayenin maliyeti:**

Mevcut teknolojiye göre tesis edilmesi gereken santralın ve bu santralın inşası için gerekli olan finansmanın fiyatı (faizi, geri ödeme planı, vadesi vs).

#### **10.2.2 İşlenecek kaynağın maliyeti:**

Enerji kaynağının erişilebilirliğine, kullanıma uygun hale getirilebilmesine bağlı olarak değişen giderler.

#### **10.2.3 İşletme maliyeti:**

Mevcut tesislerin bakım, onarım ve işletmesi için karşılanacak giderler.

#### **10.2.4 Dış maliyetler:**

Direk olarak üretim veya tesisle ilgisi olmayıp çevreye ve/veya enerji sektörüne veya diğer sektörlerle verilen zararlar ile ilgili masraflar.

### **10.3 Muhtelif Enerji Kaynaklarının Maliyet Analizleri:**

Maliyet analizlerinin ekonomik istikrarın sağlandığı ve dolayısıyla finansman paketlerinin tutarlı ve istikrarlı olduğu ülkeler dikkate alınarak yapılmasında büyük fayda vardır. Aksi takdirde bu gün için yapılan maliyet analizinin ileriye dönük bir planlama için kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu bağlamda Avrupa Birliği üyesi ülkelerdeki maliyet analizlerinin dikkate alınması kanaatimizce daha sağlıklı neticeler verecektir. Avrupa Komisyonunun hazırladığı Enerji Rehberindeki Rüzgar Enerjisi kısmında konuyla ilgili bölümün çevirisi aynen aşağıdaki gibidir (AKEİGM, 1999; s.12-13).

“Avrupa Birliği genelinde kömür, gaz, hidrolojik, linyit ve petrolden elde edilen elektrik enerjisi üretim fiyatları çok çeşitlilik arz etmektedir. Herhangi bir enerji kaynağı için tek bir

fiyat verebilmek mümkün değildir. Termik ve hidrolojik kaynaklardan elde edilen enerji fiyatlarını sıkça belirleyen en önemli faktörler olan faiz oranları ve amortisman süreleri kurumsal oluşumlara göre değişmesine rağmen tesis ve kullanılacak yakıtın maliyeti de önemli bir rol oynamaktadır. Nükleer ve kömür endüstrilerine sağlanan devlet desteği gerçek üretim maliyetlerinin gözüktüğünden daha fazla olduğunu göstermektedir.

Örneğin, Almanya'da kömürün ocak çıkış fiyatı dünya piyasasındaki fiyatın üç katıdır, dolayısıyla kömürden sağlanan enerji üretiminin gerçek fiyatı kilowatt saat başına 9cECU daha fazladır (Esasen üretim tesisleri bu yüksek fiyatı ödemiyorlar ancak kömür endüstrisine vergi mükelleflerinin parasıyla yıllık 7400 milyon DM'lik destek yapılmaktadır. Bu klasik bir "gizli" veya "dış" maliyet örneğidir). Gizli maliyetleri incelemek istersek eğer; Elektrik fiyatları elektrik üretiminin sağlığa ve çevreye verdiği zararlara bağlı olan ve bizim gizli maliyetler olarak adlandırdığımız maliyeti kapsamamaktadır. Bu maliyetler, elektriğin üretiminden veya tüketiciden kaynaklanmaz ve bu nedenle de elektrik fiyatları tespit edilirken hesaba katılmazlar. Gizli maliyetleri tam ve doğru olarak hesaplamak zordur, bu da şu anki statükonun korunması için bir neden olarak kullanılmakta ancak bunun tatmin edici bir neden olmadığı her geçen gün daha çok kişi tarafından kabul görmektedir.

Her ne kadar gizli maliyetlerin genel tanımı yapılırken, bunların üretim ve tüketim sürecinde yer alan tarafların aktiviteleriyle oluşmadığı şekilde kabul görmüş bir kanı varsa da, maliyet sınırlarının belirlenmesi konusunda yaygın ve farklı görüşler söz konusudur. Örneğin petrol stoklarının stratejik nedenlerle korunma gerekliliği nedeniyle depolama, ekstra nakliye ve güvenliğin sağlanmasının, petrol fiyatlarını ortalama üçte bir oranında arttırdığı şeklinde bir iddia söz konusudur. Bu nedenle bu gölge maliyeti, petrolün gizli maliyeti olarak değerlendirmek gerekmektedir.

Büyük kombine-dönüşümlü gaz türbinleri maliyetleri İngiltere ve diğer yerlerde yoğun rekabet sonucu düşmektedir. Ancak gaz fiyatları artmaktadır. İleride bütün kömür santralleri desülfürizasyon gaz bacası santralleri ile donatılacak ve emisyonlar üzerine getirilen artan orandaki kısıtlamalar tesis maliyetlerini artıracaktır.

Fransa dışında, nükleer santral "üretim akışları" pek görülmemektedir. Dolayısıyla nükleer enerjiden elektrik enerjisi üretim fiyatları çok büyük farklılıklar göstermekte ve 1995 yılındaki İngiliz Hükümeti verilerine göre 5.2-8.5cECU/kWh olmaktadır (1990 yılı fiyat seviyesine göre). Nükleer enerji fiyatları, kaza riski gibi devletler tarafından üstlenilen ve tesisleri sigorta primi ödemekten kurtaran, gizli dış maliyetleri içermemektedir.

Çizelge 10.1'de termik santral maliyetleri ve durumları gösterilmiştir. Enerji fiyatları – rüzgar santrallerindeki bir kısım fiyat tahminlerindeki hataları bertaraf etmek için- %5 düşürülmüştür.

Çizelge 10.1 Termik santral maliyetleri ve durumları (AWEA, 2000).

Santral	Yatırım Maliyeti (\$/kW)	Yakıt Maliyeti (sent/kWh)	İşletme Maliyeti (sent/kWh)	Toplam (sent/kWh)
Gaz	680	1.53-1.8	0.36-0.54	3.9-4.4
Kömür	1450	1.62-2.07	0.63-0.9	4.8-5.5
Nükleer	3500	0.63-0.81	0.72-0.9	11.1-14.5

#### 10.4 Rüzgar Enerjisi Maliyet Analizi:

Rüzgar Enerjisi halihazırda mevcut üretim teknolojileri ile kilowatt başına yüksek sermaye gerektiren ancak yakıt ve işletme maliyeti en düşük olan bir enerji kaynağıdır. Yoğun sermaye gerektiren her yatırımda olduğu gibi Rüzgar Enerjisi Santrallerinin karlılığı sermayenin fiyatına, yani tesislerin öz sermaye ve kredi finansman koşullarına çok duyarlıdır. Örneğin faiz, geri ödeme planı ve vade gibi unsurlar kredi finansmanının maliyetini belirlediği gibi tesis amortisman dönemi ile özsermaye geri ödeme süresi de özsermaye finansmanının maliyetini etkilemektedir. Avrupa Komisyonunun hazırladığı rapora göre Avrupa Birliğine üye ülkelerin Rüzgar Enerjisi için finansman koşulları kimi zaman uygulamaya konan kanunlar ile çok büyük değişiklikler gösterebilmektedir. Örneğin tesislerin amortisman dönemi İngiltere'de Fosil Yakıt Olmayan Yakıtlar Yükümlülüğünün (Non Fossil Fuel Obligation – NFFO) kabulünden sonra uzatılmıştır. Dolayısıyla özsermaye maliyeti önemli ölçüde düşürülmüştür. Bu rapora göre aşağı Çizelge 10.2'deki finansman koşullarına göre oluşan rüzgar enerjisi maliyetleri Çizelge 10.3'de verilmiştir (AWEA, 2000).

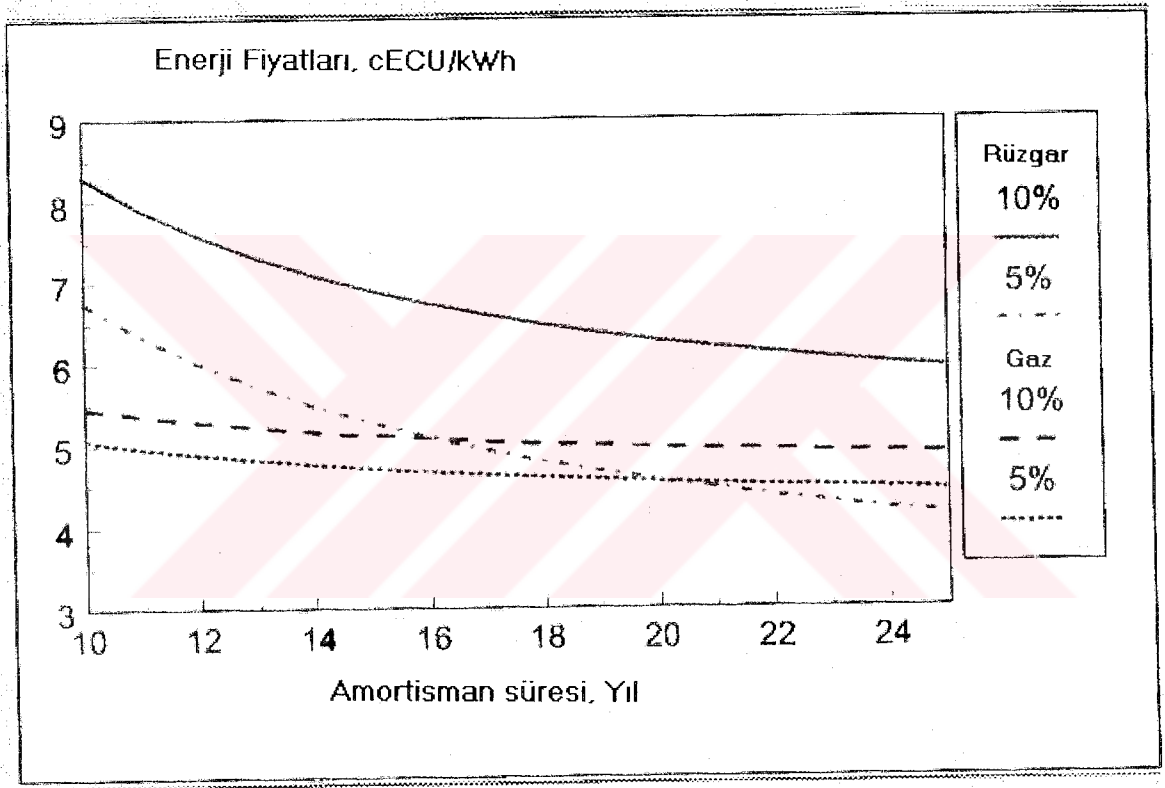
Çizelge 10.2 Ükelere ait faiz oranları ve vadeleri (finansman koşulları)

Ülke	Faiz Oranı	Vade
Danimarka	% 7	20 yıl
Almanya	Değişken, % 5 üstü	10 yıl
Hollanda	% 5	10 yıl
Portekiz	% 10	10 yıl
İngiltere	Girişimci belirliyor	15 yıl

Çizelge 10.3 Rüzgar enerjisi maliyetleri (AWEA, 2000)

Santral	Yatırım Maliyeti (\$/kW)	Yakıt Maliyeti (sent/kWh)	İşletme Maliyeti (sent/kWh)	Toplam (sent/kWh)
Rüzgar	1000-1450	0	0.9	4.0-6.0

Rüzgar enerjisi yatırımlarının karlılığının finansman koşullarına göre ne kadar değiştiği hakkında bir fikir verebilmesi maksadıyla % 5 ve % 10 olan faiz oranları ve değişik amortisman sürelerine göre oluşan enerji fiyatları grafiği aşağıda sunulmuştur.



Şekil 10.1 Enerji fiyatları – faiz oranları ve amortisman sürelerine göre oluşan grafik.

(AKEİGM, 1999)

Kıyaslama yapılabilmesi maksadıyla dünyanın bir diğer ucunda Amerikan Rüzgar Enerjisi Birliğinin yayınladığı ve Kaliforniya Enerji Komisyonun 1996 yılı Enerji Teknolojileri Durum Raporuna göre muhtelif enerji kaynaklarının maliyetleri aşağıda sunulmuştur;

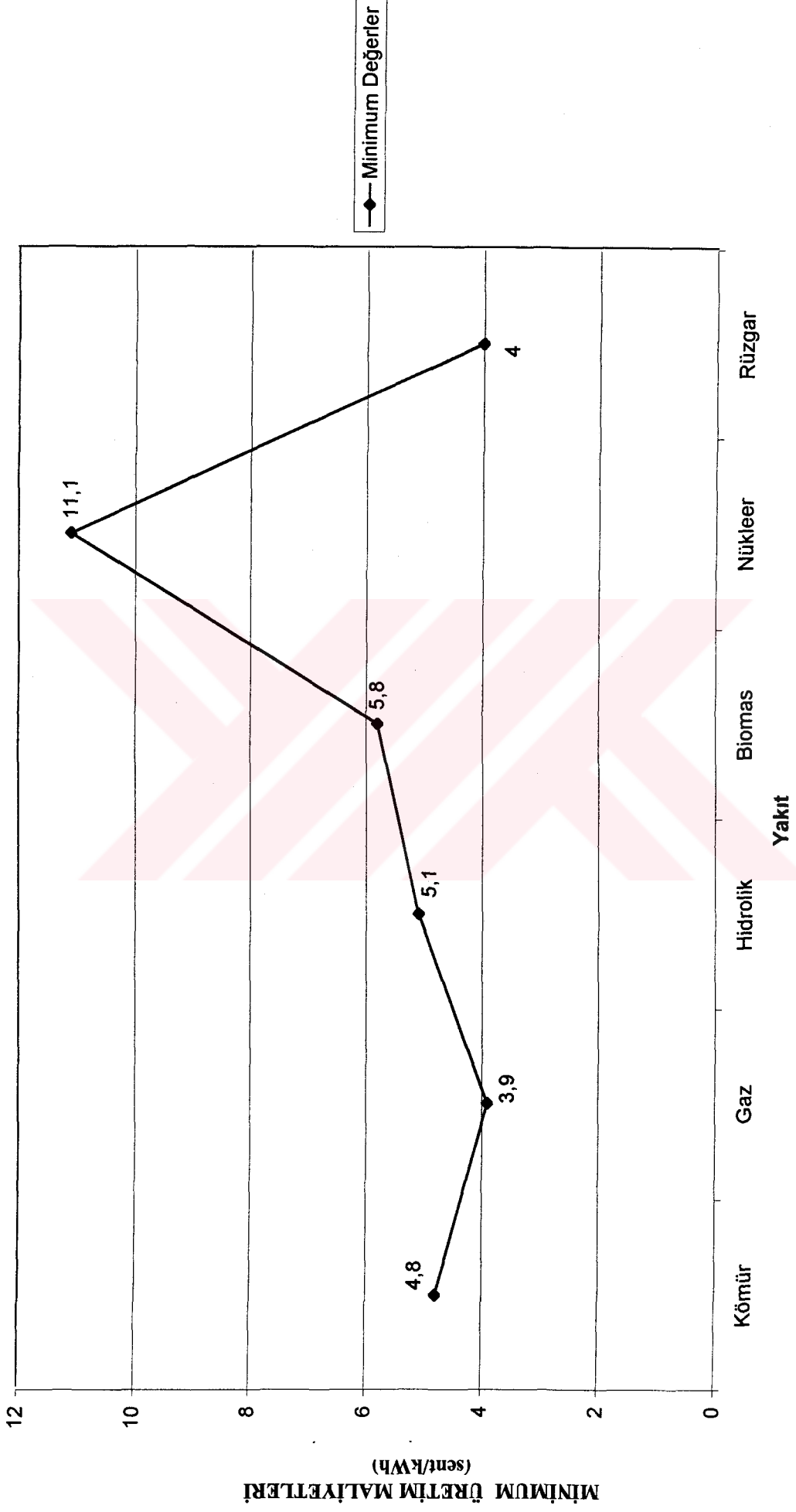


Çizelge 10.4 1 kWh enerjinin üretim maliyeti (AWEA, 2000)

<b>Yakıt</b>	<b>Minimum (sent/kWh)</b>	<b>Maksimum (sent/kWh)</b>	<b>Ortalama (sent/kWh)</b>
Kömür	4.8	5.5	5.15
Gaz	3.9	4.4	4.15
Hidrolik	5.1	11.3	8.2
Biyomas	5.8	11.6	8.7
Nükleer	11.1	14.5	12.8
Rüzgar	4.0	6.0	5

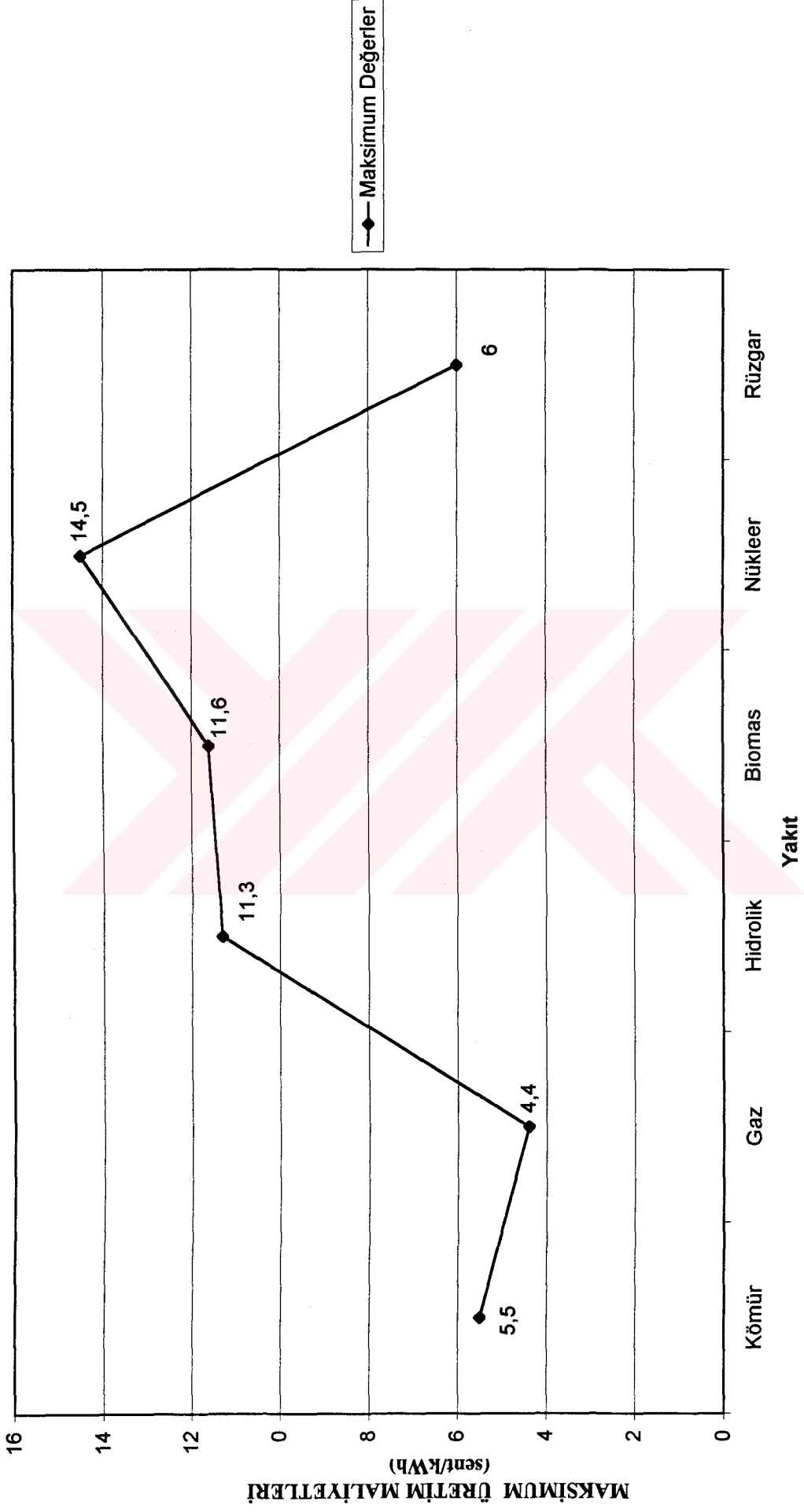
Şekil 10.2, 10.3 ve 10.4 çizelge 10.4'deki verilere göre düzenlenmiştir.

## 1 kWh Enerjinin Üretim Maliyetlerinin Minimum Değerleri



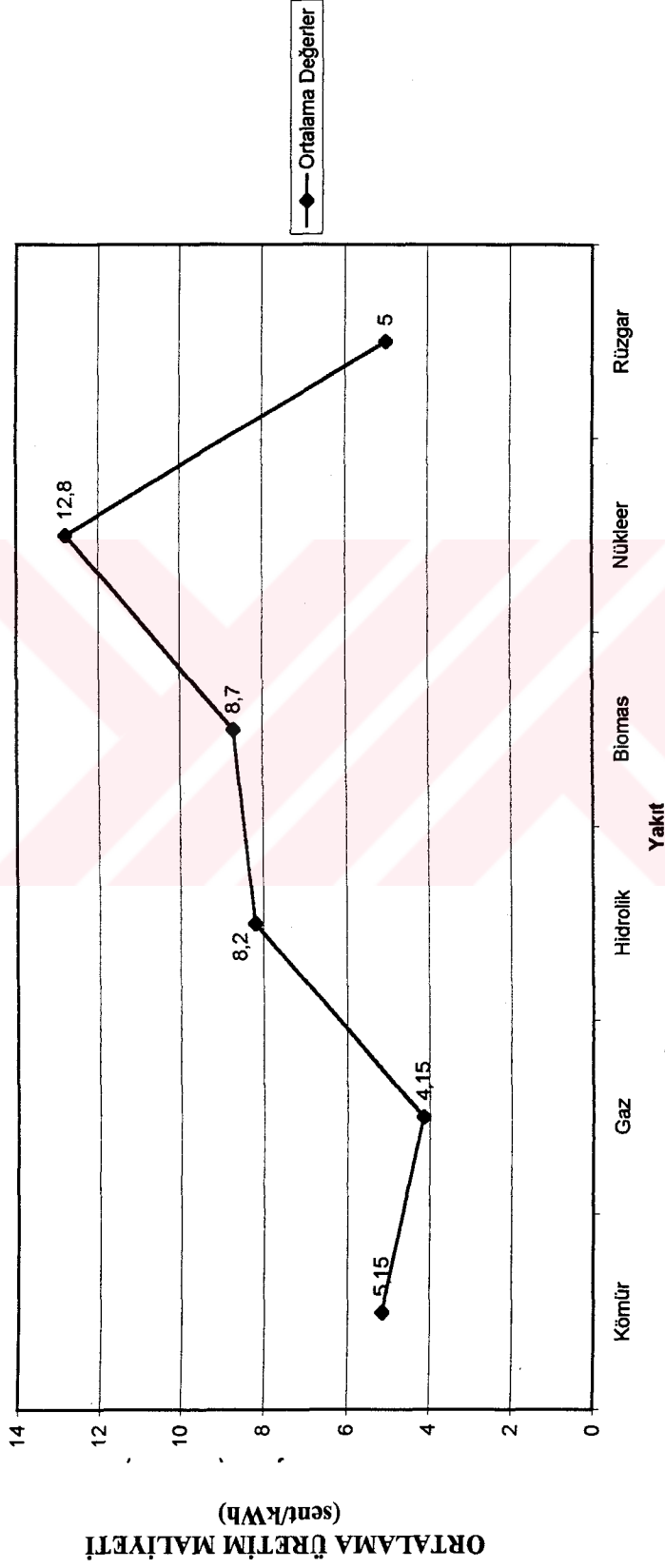
Şekil 10.2 Muhtelif enerji kaynaklarının minimum üretim maliyetleri

### 1 kWh Enerjinin Üretim Maliyetlerinin Maksimum Değerleri



Şekil 10.3. Muhtelif enerji kaynaklarının maksimum üretim maliyetleri

### 1 kWh Enerjinin Üretim Maliyetlerinin Ortalama Değerleri



Şekil 10.4. Muhtelif enerji kaynaklarının ortalama üretim maliyetleri

Amerikan Rüzgar Enerjisi Birliğine göre bir çalışmada rüzgar santralleri gaz santralleriyle aynı koşullarda finanse edilebilse maliyetlerinin % 40 düşebileceği hesaplanmıştır. Ülkemizde kullanılan kredi faizleri ve vadelerinin dış kaynaklı kredi olsa bile hem A.B.D.'de kullanılan ve hem de Avrupa Birliğine üye ülkelerde kullanılan kredilerden daha kötü koşullarda sağlandığı, dolayısıyla Türkiye'deki Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Sermaye Maliyetinin daha yüksek olacağı bir gerçektir.

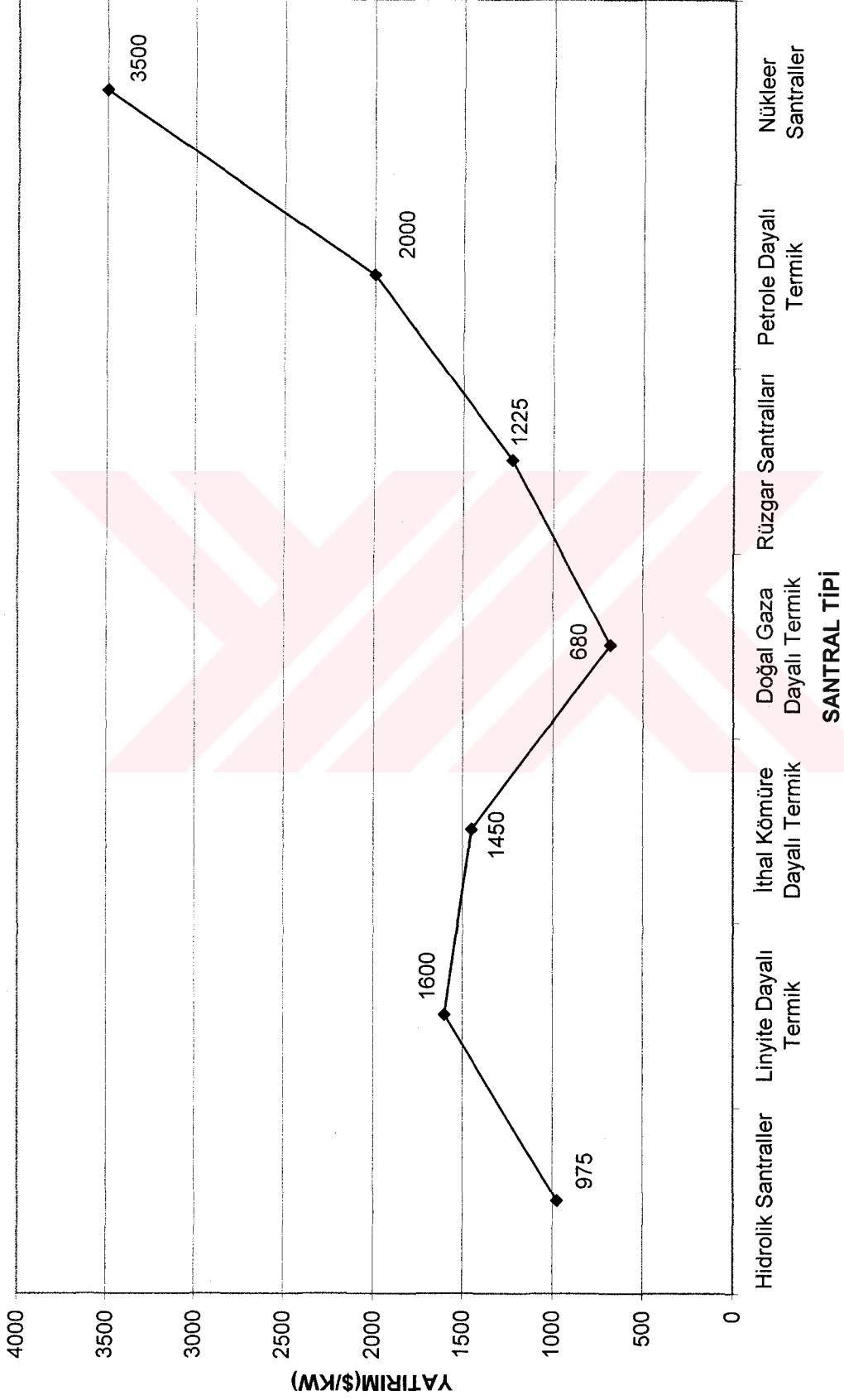
Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi halihazırda iyi finansman koşullarıyla Rüzgar Enerjisi Santralleri, Gaz, Hidrolik, Kömür, Biomas ve Nükleer Enerji Santrallerine göre dış maliyetler gözönüne alınmasa bile çok daha ucuzdur.

Santral tiplerini ve yatırım maliyetlerini incelersek eğer; Rüzgar santrallerinin yine büyük bir atılımda olduğunu diğer santral tipleriyle rekabet edecek düzeyde olduğunu görmüş oluruz. Şekil 10.5 ise çizelge 10.5'deki verilere göre düzenlenmiştir.

Çizelge 10.5 Santral tipi ve yatırım maliyetlerinin karşılaştırılması (AWEA, 2000).

SANTRAL TİPİ	YATIRIM (\$/KW)
Hidrolik Santraller	750-1200
Linyite Dayalı Termik	1600
İthal Kömüre Dayalı Termik	1450
Doğalgaza Dayalı Termik	680
Rüzgar Santralleri	1000-1450
Petrole Dayalı Termik	2000
Nükleer Santraller	3500

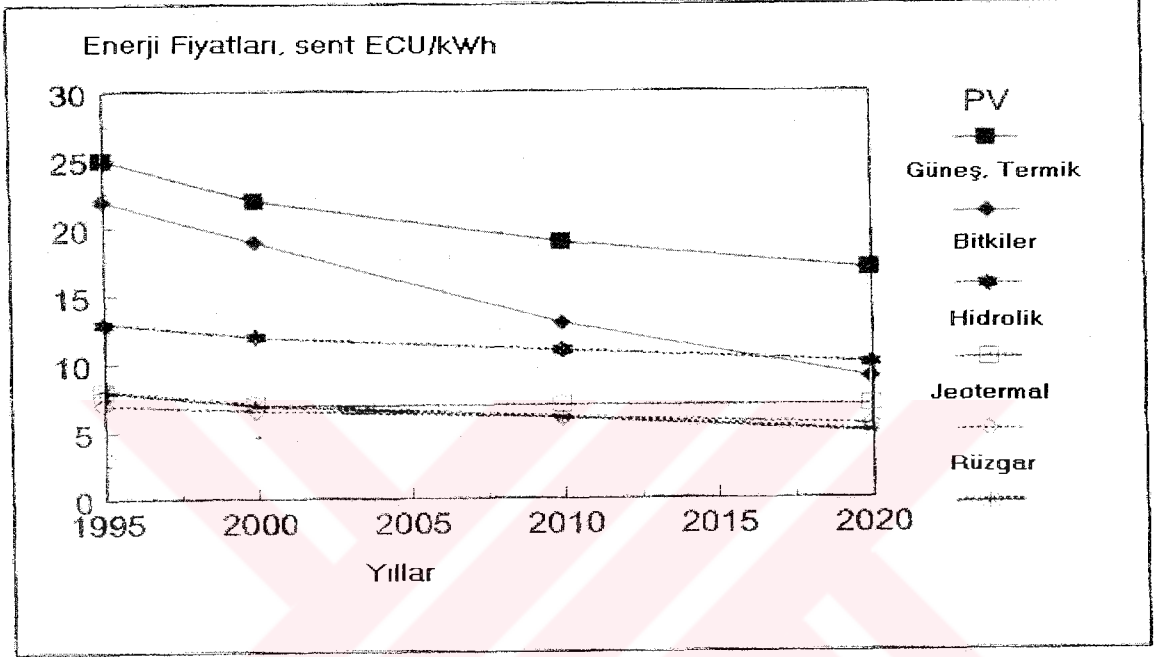
## SANTRAL TİPİ VE MALİYETLERİN KARŞILAŞTIRILMASI



Şekil 10.5. Santral tipi ve yatırım maliyetlerinin karşılaştırılması



Rüzgar enerjisi sektöründeki teknolojik gelişmelerin mevcut hızıyla devam etmesi halinde ileride Rüzgar Enerjisi Santrallerinin maliyetlerinin önemli ölçüde düşmesi beklenmektedir (AWEA, 2000). Aşağıda bu beklenti ile ilgili grafik muhtelif enerji kaynakları göz önüne alınarak sunulmuştur.



Şekil 10.6. Enerji fiyatlarının yıllara göre muhtelif kaynaklar açısından grafikte gösterimi (AWEA, 2000).

### 10.5 Dış Maliyetler:

Yukarıda, dış maliyetleri direk olarak üretim veya tesisle ilgisi olmayıp çevreye ve/veya enerji sektörüne veya diğer sektörler verilecek zararların maliyeti olarak tanımlamıştık. Bu bağlamda enerji santrallerinin mevcut dış maliyetlerini iki ana başlık altında toplayabiliriz.

#### 10.5.1 İnşaat alanı :

Her enerji santralının işgal edeceği bir toprak parçası vardır. Bu alanın diğer amaçlarla kullanımının, enerji santrali olarak kullanımından daha faydalı olması durumunda bir dış

maliyet oluşmuş demektir. Aynı şekilde enerji santralına tahsis edilecek alan üzerinde daha önceden yapılan faaliyetlerin iptal edilmesi de çok ciddi bir dış maliyet unsurudur.

### **10.5.2 Çevresel etkiler:**

Kimi enerji santrallerinde kullanılan yakıtlar, atmosfere veya çevresine düzenli olarak atık maddeler bırakılmaktadır. Bu maddelerin santralin yakın ve uzak çevresine verebileceği olumsuz etkiler birer dış maliyet unsurudur. Ayrıca enerji santralında olabilecek doğal felaketler veya arızalar sebebiyle çevreye verilebilecek zararların da riskini çevredeki doğal yaşam veya tesisler taşımak zorundadır. Bu riskin sigorta şirketlerince taşınması durumunda belirli bir prim ödenmesi gerekmektedir. Bu risk primi de diğer bir dış maliyet unsuru olarak karşımıza çıkmaktadır.

### **10.5.3 İnşaat alanının incelenmesi:**

Genellikle Rüzgar Enerjisi santralleri, rüzgarın çokluğu sebebiyle çıplak ve yüksek tepe ve tepeliklere kurulmaktadır. Bu tepeler ancak küçük ekonomik faaliyetler, hayvancılık, veya tarımsal faaliyetler için kullanılabilen yerlerdir. Genel olarak rüzgar enerjisi santralleri için dikilen türbinlerin her biri en fazla 100 m<sup>2</sup>'lik bir alan kaplamaktadır. Her bir türbinin birbirlerinden uzaklıkları ise kanat çapına ve rüzgar rejimine bağlı olarak 50 ila 200 metre arasında değişmektedir. Rüzgar türbinleri arasında kalan arazinin ise başka faaliyetler için kullanılmasında hiçbir sakınca yoktur. Nitekim yurt dışında bu alanların tarımsal ve hayvancılık faaliyetleri için sıkça kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca dünya genelinde Rüzgar Santrallerinin Offshore tabir edilen deniz üstünde kurulan tipleri oldukça yaygınlaşmaktadır. Bu durumda santral inşaatı için alan kaybı söz konusu bile olmamaktadır.

Hidroelektrik Santrallerin barajlı tiplerinde ise gövde önünde oluşturulan yapay göl yüzünden ne kadar büyük bir alanın kaybedildiği herkesçe bilinmektedir. Bu alanda daha önceden yapılan ekonomik faaliyetler ve varsa yerleşim yerleri hatta tarihi değeri sebebiyle paha biçilemeyen arkeolojik varlıklar da tamamen baraj gölünün altında kalmakta ve çok büyük bir dış maliyet ile karşılaşmaktadır. Bu alanların başkaca ekonomik faaliyetler için kullanılması gibi bir alternatif de ortadan kalkmaktadır. Maalesef hidroelektrik santrallerin inşaat maliyetinde bu husus genellikle dikkate alınmamaktadır.

Termik veya Nükleer enerji santrallerinde ise genellikle inşaat alanının kaynağın bulunduğu yere yakın olması veya inşaat konusunda kolaylık sağlayabilecek alanların seçimine dikkat edilmektedir. Bu aşamada da söz konusu yerlerde daha önceden yapılan faaliyetler ile bu

alanların başka amaçlarla daha faydalı kullanımı olabileceği konusu pek dikkate alınmamaktadır.

#### 10.5.4 Çevresel etkilerin incelenmesi:

Konvansiyonel enerji kaynaklarıyla çalışan elektrik santrallerinde kullanılan teknolojiye göre, düzenli olarak çevreye bırakılan atık miktarı değişebilmektedir. Bu bağlamda ABD orta-ileri teknoloji kullanan bir ülke olarak adlandırılabilir. Amerikan Rüzgar Enerjisi Birliği verilerine göre hazırlanan muhtelif enerji kaynakları için hazırlanan ABD'deki emisyon miktarları aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 10.6 Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu (küresel ısınmada, sera etkisi yaratan başlıca unsur) (AWEA, 2000).

Yakıt	Üretilen kWh başına salınan CO <sub>2</sub> (kg)	Üretilen kWh, 1997 (milyar)	Salınan CO <sub>2</sub> , Toplam Üretim (milyon ton)
Kömür	0.967	1,804	1,744
Doğal gaz	0.467	283,6	132,568
Petrol	0.708	77,8	54,934
ABD ort.	0.690	3,494	2,412
Rüzgar	0	3,5	0

Çizelge 10.7 Sülfürdioksit (SO<sub>2</sub>) emisyonu (asit yağmurlarını doğuran başlıca unsur) (AWEA, 2000).

Yakıt	Üretilen kWh başına salınan SO <sub>2</sub> (kg)	Üretilen kWh, 1997 (milyar)	Salınan SO <sub>2</sub> , Toplam Üretim (bin ton)
Kömür	0.0060	1,804	10,975
Doğal gaz	0.000003178	283,6	0,908
Petrol	0.0050848	77,8	395,434
ABD ort.	0.003632	3,494	12,690
Rüzgar	0	3,5	0

Çizelge 10.8 Nitrojenoksit (NO<sub>x</sub>) emisyonu (asit yağmurlarını doğuran diğer bir unsur ve dumanlı sisin temel maddesi) (AWEA, 2000).

Yakıt	Üretilen kWh başına salınan NO <sub>x</sub> (kg)	Üretilen kWh, 1997 (milyar)	Salınan NO <sub>x</sub> , Toplam Üretim (bin ton)
Kömür	0.00345	1,804	6,224
Doğal gaz	0.0008172	283,6	231,54
Petrol	0.0009534	77,8	74,002
ABD ort.	0.002246	3,494	7,772
Rüzgar	0	3,5	0

Bütün bu atıkların yanı sıra doğal felaketler veya ihmal sonucu Nükleer veya Hidroelektrik Santrallerde meydana gelebilecek hasarlar sonucu çevreye verilebilecek zararın büyüklüğü herkesçe çok iyi bilinmektedir. Bu tür bir risk eğer sigorta şirketlerine yüklense maliyetlerin ve ödenecek primin ne olacağı meçhuldür.

Rüzgar enerjisi santrallerinde oluşabilecek tek çevresel etki olarak gürültü gösterilmektedir. Ancak rüzgar enerjisi santralleri, rüzgar rejimine bağlı olarak, genelde yerleşimin olmadığı veya rakım farklılıkları sebebiyle gürültünün etkilerinin daha az hissedildiği yerlerde kurulmaktadır. Diğer yandan türbin teknolojisindeki gelişmeler doğrultusunda gürültü emisyonları gün geçtikçe düşürülmekte ve hatta türbinlerden 150-200 metre uzaklıkta 40 dB (Fısıltı seviyesi)'nin altına inilmektedir. Dolayısıyla gürültü etkisiyle oluşacak bir çevresel kirlenme Rüzgar Enerjisi Santralleri için göz ardı edilebilecek orandadır.

Yukarıda bahsedilen emisyon miktarları ile risk primlerinin toplamının kilowatt saat başına ne kadarlık bir maliyet getireceğinin hesaplanması oldukça zordur. Bu aşamada gelişmiş ülkelerin yukarıda bahsedilen emisyon miktarları ve risk primleri için kurumlara ek vergiler getirmeyi düşündüklerini görmekteyiz. Örneğin Avrupa Birliğine üye ülkelerde kömür santrallerinden kWh başına 1.6 cECU, gaz ile çalışanlardan 0.8 cECU ve nükleer enerji ile çalışan santrallerden de 0.7 cECU ek vergi toplanması düşünülmektedir (AKEİGM, 1999; s.15).[1 ecu senti, US sente çevirmek için 0,8-1,0 ile çarpmak gerekir]

Dolayısıyla Rüzgar Enerjisi hariç diğer enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin maliyeti göz önüne alınırken en azından 0.7 ile 1.6 cECU/kWh'lık bir dış maliyetin varlığı göz önüne alınmalı ve yukarıdaki bölümlerde verilen enerji maliyetlerine eklenmelidir.

## 11. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Dünya ekonomisi gittikçe küreselleşen ve serbest piyasa ekonomisinin gün geçtikçe daha yaygın hale geldiği bir atmosferde gelişmektedir. Uzun vadede bu yöndeki gelişimin devam etmesi beklenmektedir. Ancak ekonomik libelleşmenin, ülke ekonomisinde bir başıbozukluk ve sosyal dengeleri alt üst etme gibi bir riskide beraberinde getirdiği çok akıttır. Bu aşamada gelişme karşı konulmayacağı için devlete çok büyük bir rol düşmektedir; piyasaları ve sektörleri topluma en çok fayda sağlayacakları şekilde yönlendirmek ve kuralları koyup uygulamaları izlemek. Bu rol kesinlikle devletin ekonomide karar verici ve uygulayıcı olarak üstlendiği rolden daha az bir sorumluluk gerektirmemektedir. Bilakis devletin artık piyasaları derinlemesine analiz etmesi, maliyetleri derinlemesine tetkik etmesi ve hassas bir değerlendirme ile sektörlere nasıl yön vereceğini bilmesi gerekmektedir. Bu aşamada kararsız ve kuralsız bir devlet (topluma) büyük zararlar verebilecektir.

Çevreye en çok zarar veren maddeler toksit metaller (civa ve kadmiyum) havaya ve yiyeceklere karıştığı zaman akciğer kanserine ve birçok ciddi rahatsızlıklara sebebiyet vermektedirler. Bu atıkların çevreye zarar vermemesi için büyük paralar harcanmaktadır. Oysa rüzgar enerjisi üretiminde böyle bir şey söz konusu değildir. Aksine çevreyi temizleyici bir etkisi bulunmaktadır.

Yakıt fiyatlarındaki inanılmaz artışlar gün geçtikçe enerji santral maliyetlerinin artmasına neden olmakta ve böylece rüzgar santralleriyle aradaki maliyet oluşumu da rüzgarın lehine gelişmektedir. 1970'lerde ve daha sonra da 1980'lerde yakıt fiyatları hızlı bir şekilde arttı. Gelecek 30 yıl içerisinde de gaz fiyatlarının yılda ortalama % 3 oranında artacağı hesaplanmaktadır. Bu şartlarda tipik bir kombine çevrim gaz santrali yaklaşık olarak 4 sent/kwh'a enerji üretimi yapmaktadır. Bu ise, rüzgarın altında bir fiyattır. Fakat gaz fiyatlarının tahminlerin üzerinde artması söz konusu olduğunda, akılda bazı soru işaretleri bırakmaktadır.

Rüzgar Enerjisi, özelliği gereği çevreye en az zarar veren, dolayısıyla dış maliyetleri en düşük enerji kaynağıdır. Rüzgar santrali maliyetleri ve rüzgar enerjisi fiyatları düzenli olarak düşmektedir. Rüzgar enerjisinin fiyatını belirlemede tek bir unsur yoktur. Rüzgar hızları, amortisman süresi, santral maliyetleri her yerde farklıdır. Ancak iyi rüzgar olan yerlerde mevcut rüzgar enerjisi fiyatları termik santrallerle baş edebilecek düzeydedir. Rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren teknoloji maalesef büyük sermaye gerektirmektedir, ancak yakıt ve işletme giderlerinin çok düşük olduğu da bir gerçektir. Bu aşamada finansman koşullarının iyi olması Rüzgar Enerjisinden elde edilecek elektrik enerjisinin diğer bütün

bilinen enerji kaynaklarından elde edilenden çok daha ucuza mal edileceğini göstermektedir. Her halukarda dünya genelinde Rüzgar Enerjisinin Santrallerinin diğer konvansiyonel enerji kaynakları ile çalışan santrallere göre çok daha geniş bir alanda desteklendiği ve diğerlerine göre çok daha kolay ve iyi şartlarda finansman bulduğu gözlemlenmektedir.

Rüzgar, yersel ve zamansal olarak son derece hızlı değişen vektörel bir büyüklüktür. Rüzgar enerjisinden yararlanmayı amaç edinen yatırımcılar gerçekçi fizibilite çalışmaları yapmazlarsa eğer, karlı bir yatırım sağlayamazlar. Çevre dostu olan rüzgarın aynı zamanda ekonomik bir kaynağa dönüşebilmesi için ilk ve temel koşul yeterince yüksek rüzgar potansiyeline sahip olan alanın belirlenmesidir. Altyapı için gerekli yatırımın en aza indirgenmesinde yine rüzgar çiftliklerinin kurulacağı alanın büyük önemi vardır. Amaca en uygun rüzgar türbinlerinin belirlenmesi, enterkonnekte şebekeye bağlantı ve çevresel değerlendirmeler de fizibilite çalışmasında ve ekonomik analizlerde göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerdir.

Başta Almanya olmak üzere Danimarka, Hollanda, İspanya gibi belli başlı Avrupa Birliğine üye ülkelerin temiz enerji kaynağı olan Rüzgar Enerjisinden daha fazla faydalanılması maksadıyla yatırımları ve araştırma geliştirme faaliyetlerini destekledikleri ve Rüzgar Enerjisi Santrallerinin de en çok bu ülkelerde tesis edildiği görülmektedir. Rüzgar enerjisinin İngiltere, İrlanda ve Fransa gibi ülkelerde de çok fazla desteklenmediği ve dolayısıyla da kurulu kapasitelerin diğer ülkelere göre daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Ancak bütün ülkelerdeki uygulamalarda belirli bir enerji politikasının varlığı dikkate çarpmaktadır. Kanaatimce benzer bir politikanın ülkemizde de belirlenmesi ve devletin bütün kurumlarınca misyon olarak kabul edilerek, duyurulması hem ekonomik faaliyetlerin daha sağlıklı yürümesi ve hem de gereksiz zaman ve para kaybının önlenmesi bakımından hayati önem arz etmektedir.

Ülkemizde hızla artan enerji talebimizin karşılanmasında yerli enerji kaynaklarımız yeterli olmamaktadır. Önümüzdeki yıllarda yenibir enerji darboğazına girmemek için kaynak çeşitliği politikalarına büyük önem vermek ve bu doğrultuda ülkemizin yenilenebilir enerji kaynaklarından optimum oranda yararlanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarımız arasında teknik kapasite açısından elektrik enerjisi üretimine en elverişli olan ve son yıllarda ticari ortama girmiş bulunan rüzgar enerjisi konusunda Dünyadaki gelişmelere paralel olarak ülkemizde büyük aşamalar kaydedilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının arttırılması hem sürdürülebilir kalkınma ilkeleri ile uyumlu hem de çevresel riskler açısından olumludur. Rüzgar Enerjisi herhangi bir hammadde



kaynağına bağılı olmayan, yenilebilir, çevresel etkileri az olan, temiz bir enerji kaynağıdır. Enerji arzının sağlanmasında konvansiyonel kaynaklar yanında yeni ve yenilenebilir kaynakların değerlendirilmesine ve yakıt çeşitliliğinin sağlanmasına önem verilmektedir. Uygulanan politikalar doğrultusunda yürütülen rüzgar enerjisine dayalı yatırımlar başarıyla devam etmektedir.

Türkiye’de ticari amaç güden ilk rüzgar santrali Çeşme Alaçatı’da Demirer Holding tarafından yapılmıştır. 21 Şubat 1998 tarihinde enerji üretmeye başlayan bu ilk rüzgar santrali 1.7 MW kurulu güce sahiptir. Yap-İşlet-Devlet modeli ile yapılan 7.2 MW (12x600 KW) kurulu gücündeki ilk rüzgra santrali ise yine Çeşme – Alaçatı’da ARES A.Ş. tarafından yaptırılmış ve 1998 tarihinde işletmeye geçmiştir. Bu santralin enerji üretim değeri ise 19 GWh/yıl seviyesindedir.

Yap-İşlet-Devret modeli kanun kapsamında özel sektör tarafından gerçekleştirilmek üzere bakanlık tarafından değerlendirilmekte olan başvuruların sayısı 39 olup, söz konusu başvuruların toplam kurulu gücü 1370-1440 MW civarındadır. Toplam 39 proje başvurusundan, kurul güçleri toplamı 215 MW olan 8 projenin görüşmeleri tamamlanmıştır. Halen çeşitli çalışmaları sürdürülen 39 adet rüzgar santralinin yanısıra yeni uygulama kapsamında yaptırılacak olan 16 adet rüzgar santrali ile rüzgara dayalı kurulu gücümüz 2005 yılından önce yaklaşık 1700 MW’a ulaşabilecektir.

Ülkemiz olan Türkiye’nin hedefi rekabetçi bir yapı içerisinde rüzgar santrallerinin kurulmasını gerçekleştirmek olmalıdır. Türkiye’de Rüzgar Türbinleri üretilmesi için yeterli kaynak ve bilgi birikimi mevcuttur. Devletin Rüzgar Enerjisi Santrallerini desteklemesi durumunda oluşacak bu yeni sektörde yeni iş imkanları yaratılacak hatta işçilik ve nakliye avantajları sebebiyle Türkiye ekonomisine yeni bir ihraç ürünün daha katılacağı söylenebilir. Bu durumda ekonomideki dinamik dengelerin ne kadar büyük bir katma değer yaratacağını da göz ardı etmemek gerekir. Ayrıca milli kaynaklara dayanan bu enerji türüyle sektörün dışa bağımlılığı da tümüyle ortadan kaldırılabilir.

İlk çağlardan beri ülkemizin üzerinde akıp geçen bu muazzam rüzgar enerjisi kaynağını artık toplumumuzun hizmetine sunmanın zamanının geldiğini düşünmekteyim. Bu yönde sarf edilecek bütün gayretlerin ülke çıkarıları için çok değerli olacağı kesindir. Temiz enerji üretmek isteyen yatırımcı, kendi ayakları üstünde durabilme gücüne erişene kadar temiz enerji üretiminin getireceği ek maliyetler için kamu kaynaklarından desteklenmeli ve teşvik edilmelidir. Türkiye Rüzgar Enerjisi Kullanım Programının hayata geçirilmesi için şu öneriler sunulmalıdır:



- 1) Rüzgar Enerjisinden elektrik üretimi hükümetlerin yaygın olarak kullanımını teşvik ettiği teknolojiler arasında yer almalıdır.
- 2) Türkiye’de gelecek yıllarda kullanılan enerji teknolojileri değerlendirilirken çevresel kısıtlar ve aday teknolojilerin neden oldukları toplumsal maliyetler de değerlendirme kapsamına alınmalıdır.
- 3) Doğal çevre ve insanlara hiçbir olumsuz etkisi bulunmayan rüzgar enerjisinin daha çok kullanımı özendirilmelidir. Türkiye’nin tüm yüzeyi incelenerek rüzgar türbini çiftlikleri kurulabilecek alanları tespit edilmeli ve seçilecek bölgelere rüzgar çiftlik alanları kurmak üzere kamu girişimiyle hareketler başlatılmalı ve kaliteli hizmete en ekonomik olanak sağlayan yatırım ve işletmecilerin üreteceği elektrik, elektrik şirketlerince satın alınırken, ödenecek ücret diğer enerji teknolojilerinin doğaya ve insanlara zarar vererek yol açtıkları toplumsal maliyetler gözönüne alınarak belirlenmelidir.
- 4) Çevreyi kirleten, ürettiği birim ve enerji başına yüksek enerji tüketen teknolojilerin olumsuzluklarını ortadan kaldırmaya aday olan rüzgar güç santrallerinin ülkemizde üretilmesi ve kullanılmasına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, TÜBİTAK ve Devlet Planlama Teşkilatı araştırma fonlarınınca desteklenmelidir.
- 5) Rüzgar Enerjisi santrallerinden elektrik üretim esaslarını düzenleyen bir kanun TBMM’den geçirilmelidir. Rüzgar kaynağının özelliği nedeniyle, rüzgar enerjisi enerjinin kamu kuruluşları dışında üretilip, kamunun kullanımına sunulabilmesi için elverişli koşullara sahiptir. Rüzgar Enerjisi diğer çevre dostu olmayan enerji kaynakları ile bir tutulup değerlendirilemez.
- 6) Kuruluşlar ve çevreci kişiler rüzgar enerjisinin doğal çevrede enerji üretimi konusunda yardımcı olabileceği konusunda bilgilendirilmelidir.
- 7) Rüzgar santrallerinin ticari kullanıma girmesini engelleyen tüm kurumsal engeller ve belirsizliklerin ortadan kaldırılması için yasal düzenlemelerin yerine getirilmesi

Dünyanın enerji tüketimi özellikle gelişmekte olan ülkelerin sanayileşmesiyle hızla artmaktadır ve 2030 yılında bugünkünün ikimisine varacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle bir yandan enerji tasarrufu diğer yandan temiz enerjinin önemi ise açıktır. Şu anda Avrupa Birliği’nde üretilen toplam elektrik enerjisinin % 5.3’ü yenilenebilir enerjidir. Bunun büyük

bir kısmı hidroelektriktir; fakat verimli projelerin büyük oranda gerçekleşmiş olmasından dolayı artış hızı düşmüştür, ikinci sıradaki rüzgar enerjisi ise büyük bir atılım içerisindedir. AB'nin yenilenebilir enerjiler için 2005 yılı hedefi %8, 2010 yılı hedefi ise % 12'dir.

Yatırım ve maliyet açısından eğer Rüzgar Enerjisini irdelersek, dünyanın elektriğinin % 10'nun Rüzgar Enerjisinden elde edilmesinin yıllık yatırım gereksinimleri 1999'da 3 milyar dolar olduğu ve 2020 yılında 78 milyar dolara ulaşacağı aşıkardır. Bu değerler 1990'lı yıllarda ortalama yıl başına 170-200 milyar dolar olan toplam küresel enerji yatırımlarının bir dilimidir. Tabii ki bu dilim rüzgar gücü elektrik sektörünün önemli bir kısmını oluşturduğundan göreceli olarak artacaktır.

Rüzgar gücü ekonomisi ağırlığın koymaktadır. Rüzgar türbinlerinin inşaat ve işletme maliyetleri daha şimdiden önemli ölçüde azalmıştır. Danimarka'da rüzgar enerjisi maliyetleri 1981 ile 1995 yılları arasında 2/3 oranında düşmüştür. Rüzgar gücü elektrik maliyetleri bugünkü 4.7 sent/kWh değerinden daha da azalacak ve 2013 yılına kadar 3 sent/kWh seviyesinin altına düşecektir. 2020 yılında üretilen birim elektrik başına maliyetler 2.5 sente kadar gerileyecektir. Bu durum ise rüzgar enerjisini, büyük ölçekli hidrolik dahil olmak üzere, günümüzün tüm yeni üretim teknolojileri ile rekabet edebilir hale getirecektir.

Rüzgar Enerjisi halen hazırda mevcut üretim teknolojileri ile kilowatt başına yüksek sermaye gerektiren ancak yakıt ve işletme maliyeti en düşük olan bir enerji kaynağıdır. Yoğun sermaye gerektiren her yatırımda olduğu gibi Rüzgar Enerjisi Santrallerinin karlılığı sermayenin fiyatına, yani tesislerin öz sermaye ve kredi finansman koşullarına çok duyarlıdır. Rüzgar Santrallerinin yatırım maliyeti 1225 \$/kW, yakıt maliyeti 0 sent/kWh (yani yok), işletme maliyeti ise 0.9 sent/kWh'tir.

Avrupa Birliği genelinde kömür, gaz, hidrolojik, linyit ve petrolden elde edilen elektrik enerjisi üretimi fiyatları çok çeşitlilik arz etmektedir. Herhangi bir enerji kaynağı için tekbir fiyat verebilmek mümkün değildir. Termik ve hidrolojik kaynaklardan elde edilen enerji fiyatlarını sıkça belirleyen en önemli faktörler faiz oranları ve amortisman süreleri kurumsal oluşumlara göre değişmesine rağmen tesis ve kullanılacak yakıtın maliyeti de önemli rol oynamaktadır. Nükleer ve kömür endüstrilerine sağlanan devlet desteği gerçek üretim maliyetlerinin gözüktüğünden daha fazla olduğunu göstermektedir.

Rüzgar Enerjisi yatırımlarının karlılığının finansman koşullarına göre ne kadar değiştiği hakkında bir fikir verebilmesi için %5 ve % 10 olan faiz oranları ve değişik amortisman sürelerine göre oluşan enerji fiyatları ise Avrupa Komisyonu, Enerji İşleri Genel

Müdürlüğünce tesbit edilmiştir. Rüzgar Enerjisi %10 faiz oranı ile 8.25 cECU/kWh 10 yıllık amortisman süresinden 6.40 cECU/kWh 24 yıllık amortisman süresine, % 5 faiz oranı ile de 6.60 cECU/kWh 10 yıllık amortisman süresinden 4.50 cECU/kWh 24 yıllık amortisman süresine bağlı olan bir yatırımın karlılığı söz konusudur. Bu enerji fiyatlarının karşılaştırılmasını Şekil 10.1'deki grafik yardımıyla görebiliriz.

Neredeyse rüzgar, gazın % 5'lik, faiz oranı ile 24 yıllık amortisman süresi içerisinde rekabet edilebilir hale gelmiştir. Rüzgar enerjisi maliyetlerinin düşmesi ve rekabet durumunun daha da gelişmesiyle birlikte enerji fiyatlarının gazla rekabet edebilir bir düzeye geleceği beklentisi hakimdir. Bu fikirlerin ortaya atılması Şekil 10.1'deki % 5 ve % 10'luk faiz oranları ve değişik amortisman süreçlerine göre oluşturulmuş olan rüzgar ve gazın enerji fiyatlarının bir ürünüdür.

Elektrik enerjisinde kuruluş maliyetlerinin yanısıra elektrik enerjisinin üretim maliyeti de önemlidir. Yani bir birim elektrik enerjisi üretimi için girdi miktarının maliyeti de önemlidir. Yeni Kapasite Maliyetleri yani muhtelif enerji kaynaklarının üretim maliyetlerini karşılaştırırsak eğer;

Şekil 10.2 ve 10.3 ve 10.4 bize yardımcı olmaktadır. Şekil 10.2 ve 10.3 üçteki minimum ve maksimum üretim maliyetlerinin ortalamaları şekil 10.4'deki şekilde gösterilmiştir. Üretim maliyetleri açısından değerlendirildiğinde çizelge 10.4'deki muhtelif enerji kaynaklarının maliyetlerini de göz önüne alırsak eğer en ucuz elektrik üretimi doğal gaz dayalı termik santrallerdir. İkinci en ucuz üretim ise rüzgar santralleridir. Daha sonra ise bu sırayı Kömüre dayalı termik santraller, hidrolik santraller, biyomasa dayalı santraller ve en pahalı elektrik üretimini sağlayan nükleer santraller izlemektedir. Üretim maliyetlerinin minimum değerleri sırasıyla şöyledir : Şekil 10.2'de görüldüğü yakıt türlerine göre sıralarsak eğer : 1) Gaz : 3.9 sent/kWh, 2) Rüzgar : 4 sent/kWh, 3) Kömür : 4.8 sent/kWh 4) Hidrolik : 5.1 sent/kWh 5) Biomas : 5.8 sent/kWh, 6) Nükleer : 11.1 sent/kWh (Bu veriler kıyaslama maksadıyla Amerikan Rüzgar Enerjisi Birliğinin yayınladığı ve Kalifornia Enerji Komisyonununun 1996 yılı Enerji Teknolojileri Durum Raporuna göre düzenlenmiştir)

Santral tipleri ve bunların yatırım maliyetlerinin karşılaştırılmasına değinmek istersek eğer, şekil 10.5 ve Çizelge 10.5'teki bilgiler bize yardım edecektir. En ucuz yatırım Doğal Gaza Dayalı Termik Santrallerdir. İkinci en ucuz ise Hidrolik Santrallerdir. Daha sonra bu sırayı Rüzgar Santralleri, İthal Kömüre Dayalı Termik Santraller, Linyite Dayalı Termik Santraller, Petrole Dayalı Termik Santraller ve en pahalı yatırım maliyetine sahip olan Nükleer Santraller takip eder. Yatırım maliyetlerini minimumdan maksimuma sıralarsak eğer

- 1) Doğal Gaz Dayalı Termik Santraller : 680 \$/kW,
- 2) Hidrolik Santraller : 975 \$/kW,
- 3) Rüzgar Santraller : 1225 \$/kW,
- 4) İthal Kömüre Dayalı Termik Santraller : 1450 \$/kW,
- 5) Linyite Dayalı Termik Santraller : 1600 \$/kW,
- 6) Petrole Dayalı Termik Santraller : 2000 \$/kW,
- 7) Nükleer Santraller : 3500 \$/kW.

Amerikan Rüzgar Enerjisi Birliğine göre bir çalışma sonucunda rüzgar santralleri gaz santralleri ile aynı koşullarda finanse edilebilse maliyetlerin % 40 düşebileceği hesaplanmıştır. Ülkemizde kullanılan kredi faizleri ve vadelerin dış kaynaklı olsa bile hem A.B.D'de kullanılan ve hem de Avrupa Birliğine üye ülkelerde kullanılan kredilerden daha kötü koşullarda sağlandığı, dolayısıyla Türkiye'deki Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Sermaye Maliyetlerinin daha yüksek olacağı bir gerçektir. Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi halihazırda iyi finansman koşullarıyla Rüzgar Enerjisi Santralleri; Gaz, Hidrolik, Kömür, Biomas ve Nükleer Enerji Santrallerine göre dış maliyetler göz önüne alınmasa bile çok daha ucuzdur.

Rüzgar Enerjisi sektöründeki teknolojik gelişmelerin mevcut bir hızla devam etmesi halinde ilerideki zamanlarda Rüzgar Enerjisi Santrallerinin maliyetlerinin önemli ölçüde düşmesi beklenmektedir.

Çevresel etkileri göz önüne aldığımız zaman ise fosil yakıtlar kaçınılmaz olarak CO<sub>2</sub> oluşumuna sebep verilir. Yaklaşık olarak GWh başına kömürde 1000 ton, fuel oil'de 750 ton, doğalgazda ise 500 ton CO<sub>2</sub> çıkar. Atmosferdeki CO<sub>2</sub> oranı sanayi çağı öncesine göre şimdiden % 25 artmıştır ve 2050 yılında iki katına çıkacaktır. Bu artışın getirdiği sera etkisiyle Dünya ısı 1900'dan beri 0.3-0.6 °C yükselmiştir. Bu ise önemli iklim değişimlerin, kutuplardaki buzların erimesine ve denizlerin 15-95 cm yükselmesine sebep olacaktır. AB bu yüzden 1997 yılında CO<sub>2</sub> emisyonunu 2010 yılına kadar % 15 azaltma hedefi koymuştur.

SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> gibi asit gazların emisyonu yakıtın kalitesine ve kullanılan yakma ve filtreleme sistemine göre çok değişebilir, diğer yandan çevreye etkileri tam anlamıyla global değil birkaç yüz km'lik bir mesafe içerisinde olduğu için zararı ekonomik boyutu bu çevrede ne olduğuna da bağlıdır. 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 veya teknolojinin gelişmesiyle eskiden ekonomik olmayan kaynaklar da buna katılmaktadır. Fakat şu anda tüketim hızı dünyada fosil oluşum hızınının 300.000 katıdır, diğer bir deyişle bir günde bin yıllık oluşumu neredeyse tüketiyoruz. Bu gidişle rezervlerin tükenmesi kaçınılmazdır.

Rüzgar Enerjisi 1980'lerden itibaren çeşitli teşviklerle bugünkü olgunluğa erişmiştir. Teşvikler; araştırma geliştirme desteği, kamu sermayeli örnek yatırımlar, yüksek enerji fiyatı, düşük faizli uzun vadeli krediler vb.'dir. Bu teşviklerle rüzgar enerjisi güç toplayarak bir yandan istihdam ve katma değer sağlanmış diğer yandan maliyeti geçtiğimiz 20 yıl içerisinde 2.5 kat düşmüştür.

Zararlı atıkların yansısıra doğal felaketler veya ihmal sonucu Nükleer veya Hidroelektrik Santrallerde gelebilecek hasarlar sonucu çevreye verebilecek zararın büyüklüğü herkesçe bilinmektedir. Örneğin Ukrayna'da yaşanan Çernobil Nükleer Santrali felaketinde yaşananlar gibi. Bu türden bir risk eğer sigorta şirketlerine yüklense maliyetlerin ve ödenecek primin ne olacağı meçhuldür.

Rüzgar Enerjisi Santrallerinde oluşabilecek tek çevresel etki olarak gürültü gösterilmektedir. Rüzgar Enerjisi Santralleri, rüzgar rejimine bağlı olarak, genelde yerleşimin olmadığı veya rakım farklılıkları nedeniyle gürültü etkilerinin az hisseldiği yerlerde kurulmaktadır. Türbin teknolojisindeki gelişmeler doğrultusunda gürültü emisyonları gün geçtikçe düşürülmekte ve hatta türbinlerden 150-200 metre uzaklıktaki 40 dB (Fısıltı seviyesinin) altına inilmektedir. Bu yüzden gürültü etkisiyle oluşacak bir çevresel kirlenme Rüzgar Enerjisi Santralleri için gözardı edilebilecek orandadır.

Buraya kadar ele alınan çevresel faktörlerin bahsedilen emisyon miktarları ile risk primlerinin toplamının kilowatt saat başına ne kadarlık bir maliyet getireceğinin hesaplanması oldukça zordur. Bu aşamada ise gelişmiş ülkelerin bahsedilen emisyon miktarları ve risk primleri için kurumlara ek vergiler getirmeyi düşündüklerini görmekteyiz. Örneğin Avrupa Birliğine üye olan ülkelerde kömür santrallerinden kWh başına 1.6 cECU, gaz ile çalışanlarından 0.8 cECU ve nükleer ile çalışan santrallerden de 0.7 cECU ek vergi toplanması düşünülmektedir. Dolayısıyla Rüzgar Enerjisi hariç diğer enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin maliyeti göz önüne alınırken en azından 0.7 ile 1.6 cECU/kWh lik bir dış maliyetin varlığı göz önüne alınmalı ve enerji maliyetlerine eklenmelidir. Türkiye şartları dikkate alındığında (yakıt kalitesi ve teknoloji düzeyi) bu dış maliyetin 2-2.5 cECU/kWh dan az olmaması beklenmektedir.

Rüzgardan üretilen elektriğe, kirlenici emisyonlar olmadan üretilecek elektriğin çevresel yararlarını yansıtan, hakça bir bedel ödenmesi ve iyi organize olmuş bir kurumsal alt yapı ve rüzgar enerjisinin planlama yönetmeliklerinin hazırlanması durumunda, Türkiye'de rüzgar enerjisi kurulu gücünün gelişiminde kolayca şu hedeflere ulaşabilecektir.

rüzgar enerjisinin planlama yönetmeliklerinin hazırlanması durumunda, Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücünün gelişiminde kolayca şu hedeflere ulaşabilecektir.

Çizelge 11.1. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi İçin Mümkün Hedefler (TWEA, 1999)  
(Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynak ve Teknolojileri Araştırma Birimi)  
(YEKAB’ın ÖNGÖRÜMÜ İLE)

Yıl	Kurulu Kapasite
2000	400 MW
2003	1.400 MW
2005	5.000 MW
2010	10.000 MW
2020	20.000 MW

Rüzgar enerjisinin geliştirilmesine gereken önem verilerek Pazar yaratıldığında Türk Endüstrisi rüzgar gücü santrallerinin imalatına kolayca adapte olabilecektir. Yeni kurulan rüzgar çiftliklerinin kuleleri yerel olarak imal edilmeye başlanmıştır. Türkiye için öngördüğümüz kurulu güç hedefleri ve bu kurulu kapasitenin Türkiye Endüstrisi tarafından imalatı durumunda yaratılacak iş potansiyeli ise :

Çizelge 11.2. Türkiye’de Rüzgar Endüstrisi Tarafından Yaratılacak İş Sayısı (TWEA, 1999)

Yıl	Kurulu Kapasite (MW) YEKAB-Hedefi	Yaratılan İş Adam Yıl
2000	400 MW	8.000
2003	1.400 MW	28.000
2005	5.000 MW	100.000
2010	10.000 MW	200.000
2020	20.000 MW	400.000

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) aşağıdaki çizelgede gelecek yıllar için öngördüğü kurulu güç kapasitesi içinde rüzgar enerjisi kullanımıyla oluşturulabilecek üretim kapasitesi payları verilmiştir.



**Çizelge 11.3. ETKB'NİN ELEKTRİK KAPASİTESİ ÖNGÖRÜMÜ – YEKAB KURULU  
GÜÇ HEDEFLERİ ESAS ALINARAK (TWEA, 1999)**

Yıl	Kurulu Kapasite	Toplam kurulu kapasitenin %si olarak rüzgar payı
2000	30.000 MW	1,33
2010	65.000 MW	15,38
2020	110.000 MW	18,18

### **Politik Açıdan Öneriler**

Türkiye 20202 yılında kurmayı hedeflediği toplam elektrik enerjisi üretim kapasitesinin % 18'i kadar rüzgar güç santral kapasitesini mevcut altyapıda radikal değişiklikler yapmadan tesis edebilecektir. Bu hedefler ulaşılabilmesi için:

- Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerjinin etkin kullanımını sağlayan kömür, akaryakıt ve doğalgaza sağlanan teşvikler ve sübvansiyonlar kaldırılmalıdır.
- Türkiye'de rüzgar gücü tesisi için uzun vadeli hedefler konmalıdır.
- Enerji sektörüne ilişkin kararlar alınırken fosil ve nükleer güç santrallerinin neden olduğu toplumsal maliyetler ekonomik fizibilite çalışmalarında hesaba katılmalıdır.

### **Rüzgar Yatırımcılarına Öneriler**

Şu anda rüzgar enerjisi Türkiye'de çok yeni olduğu için ve fazla bilinmediği için, yatırımcılar rüzgar türbinlerini dışarıdan ihthal etmek zorunda kalmaktadırlar. Yatırımcıların ileride riske girmemeleri ve ülke kaynaklarını optimum seviyede değerlendirmeleri için bazı önerilerin sunulmasında fayda vardır.

1. Ciddi ve namı geçen firmaların ellerinde çeşitli güçlerde 39 m, 42 m ve 44 m.pervane çaplı ürünleri mevcuttur. Bunun nedeni ise değişik rüzgar şartlarının göz önünde bulundurulmasıdır. Fakat 50 m.'lik bir pervane koyarak da teorik olarak üretimi hesaplayabilirsiniz ancak yıpranmalar, Jeneratörde ve aksamlarda da dayanım açısından problemler ve verimsizlikler yaşanacaktır. Sorumluluk sahibi olan bir yatırımcı işin sorumluluğunu 20 sene taşıyacağını ve 20 sene sonra çalışır vaziyette Yap – İşlet – Devret (YİD) modeli çerçevesinde devir edeceği unutulmamalıdır.



2. Fazla sayıda türbinden oluşan rüzgar çiftliklerinde arka sıralarda kalan türbinlere ne kadar enerji kalacağı (Trust Curve)'ler kullanılarak hesaplanabilir. Bu anda pitch kontrole sahip türbinlerin avantajı görülür. Trust Curve'ler türbine binen yükü ve aynı zamanda pervaneden arkaya geçen rüzgarın miktarını gösterir. Bu yüzden yatırımcılar mutlaka istemelidirler.
3. Powercurve dediğimiz güç eğrileri çizim olarak verilirler ve doğruluk garantileri iyice incelenmelidir. Bu eğriler hangi rüzgar hızında ne kadar güç üretileceğini gösterir.
4. Üreticiler üretimlerini daha fazla göstermek amacı ile yüksek süpürme alanlı türbinleri, yani pervane çapı büyük olan türbinleri kullanarak fazladan enerji üretimi olduğunu göstermektedirler. Yatırımcılar bu abartılan enerji üretimine kanmamalıdır.
5. Yatırımcılar rüzgar türbinlerinin yedek parça ve bakım anlaşmalarının borç süresinde (10 sene gibi) tutulmasında büyük fayda vardır. Genelde garantiler 2 sene olarak belirlenmektedir. Fakat türbinlerde oluşacak aşınmalar ve arızalar 2 seneden sonra çoğalmakta; özellikle de yedek parça fiyatları çok önem arz etmektedir. 10 sene gibi bir sürenin yatırımcılar tarafından garanti talebinde bulunulmasında yarar vardır.
6. "talep edilen gücün kesin olarak verilmesi" oranı, rüzgar olduğu zaman üreticinin çalıştırma garantisi yaklaşık olarak % 97-% 98 oranında verilmektedir. Ayrıca bu değer burada esen süreler için verildiğinden önemli olan rüzgarın kuvvetli olduğu saatlerde türbinlerin çalışmasıdır. Toplam çalışma süresi % 80 ise enerjisinin % 25, çalışma süresi %20 ise % 75 ürettiği gözönüne alınarak çalışma süresinden ziyade üretim kaybına göre verilmesi üretici, firmaya söylenmeli veya pazarlık oranı olarak ortaya koyulmalıdır.
7. Yatırımcılar özellikle türbin satın alırken yalnızca ön fiyatına değil bunun yanında da uzun süre kullanım maliyetine de bakmak gerekmektedir. Yatırımcılar bu yukarıdaki değinilen hususlara ve konulara dikkatle eğilmeleri gerekmektedir.

**Bu Çalışmanın Mali Sonuçlarını Özetlersek;**

- 1) Rüzgar santral maliyetleri düzenli olarak azalmakta ve bu trend bundan sonra da böyle devam edecek gibi gözükmektedir.
- 2) Makinalar daha güvenli ve daha verimli oldukça rüzgar enerjisi fiyatları da hızla düşmektedir.
- 3) Rüzgar enerjisini tanımlamak için tek bir faktör kullanılmaz. Rüzgar hızları faiz oranları, amortisman süreleri ve santral maliyetleri ve bunlar gibi birçok parametreyle birlikte değerlendirilmelidir.
- 4) Santral tipi ve yatırım maliyetleri açısından Rüzgar Santralleri 1225 \$/KW ile baştan 3.sırayı teşkil etmekte olup, yakıt türleri ve elektrik üretim maliyetlerine göre de rüzgar 4 sent/KWh ile baştan 2.sırayı teşkil etmektedir.
- 5) İyi rüzgar olan yerlerde rüzgar enerjisi fiyatları termik santrallerden elde edilen enerji fiyatları ile rekabet edebilir haldedir.
- 6) Rüzgar enerjisi genellikle küçük gerilim hattına bağlandığı için transmisyon ve bir takım diğer masraflardan tasarruf edilir.
- 7) Rüzgar enerjisine de kredi imkanı sağlanmalıdır, genellikle düşük voltajlı dağıtım şebekelerine enjekte olması ve naklinde güvenli olması gibi avantajları sağlaması amacıyla.
- 8) Denizüstü rüzgar enerjisi, birçok diğer yenilenebilir enerjiye göre daha ucuzdur. Ama karadakine göre daha maliyetlidir. Denizüstünde çevreye etki minimum seviyededir. Bu da elektrik ihtiyacının yoğun yerlere yapılmasını destekleyen bir özelliktir.
- 9) Rüzgar hızları genel olarak denizüstünde karada olduğundan daha yüksektir. Denizüstü rüzgar gücü bu yüzden Danimarka ve Hollanda gibi rüzgarlı tepelerin olmadığı yerleşimlerde daha çok tercih edilir. Bu bölgelerde karadakinden 0,5 ÷ 1 m/sn daha hızlı bir rüzgar esmektedir. Günümüzde birçok denizüstü rüzgar çiftliği kurulmuştur. İşletme tecrübesi edindikçe maliyetleri azaltmak da mümkün olacaktır.
- 10) Birçok çalışmada görülmüştür ki, gelecekte fiyatlarda ki düşüşler düzenli olarak devam edecektir.

**Bu Çalışmanın Teknik Sonuçlarını Özetlersek;**

- 1) 1980'lerin başından beri rüzgar türbin kavramı araştırılmakta olup önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. En çok kullanılan ve popüler olan tipler ise yatay eksenli türbinlerdir. Bu tip türbinlerin rotorları maksimum enerjiyi tutabilmek için rüzgar akışına dik olarak durmalıdır. Kanatlardaki kaldırma kuvvetleri rotorun dönmesini sağlar. Yatay eksenli türbinlerin en çoğu rüzgarı önden alacak şekilde (upwind) olarak tasarlanırlar. Yatay eksenli türbinlerin en çok kullanılanı ise üç kanatlı olanıdır.
- 2) En çok kullanılan rüzgar türbini modeli üç kanatlı olanıdır. Bunun temel nedeni ise pervanenin tüm hızlarında sabit atalet momentine sahip olmasıdır. Üç veya daha fazla kanada sahip olan tüm pervaneler bu avantaja sahiptir. Üç kanatlı pervaneler bu avantajından dolayı RT üzerine ek bir yük getirmemektedir.
- 3) 2 Kanatlı RT, 3 kanatlı RT'den daha ekonomik gibi görünmesine rağmen, 2 kanatlı RT dinamik etkilerden dolayı bir takım ek ekipmanlar gerektirdiğinden, 3 kanatlı RT ile aynı maliyete gelmektedir. 3 kanatlı RT'den farklı olarak dönmeden dolayı ve kulenin yatay eksenine göre olan bir atalet momentine sahiptir. Bu durum 2 kanatlı RT üzerinde ek bir yüklenme meydana getirir ve sadece sallanan göbek (teetering hub) ile giderilebilir. Sallanan göbek kullanılmasının nedeni ise, dönen pervane üzerinde büyük atalet moment değişimlerinin etkilerini önlemektir. 2 kanatlı RT ayrıca düşük şiddetteki rüzgar hızlarında (örneğin 3m/sn) pervane devreye girememektedir.
- 4) Tek kanat RT'ler aerodinamik olarak dengesizdir ve bu durumda ek hareketler ile istenmeyen bazı yüklere sebep olurlar. Mekanizmanın kontrolü için göbek kısmına ek yapılar gerektirirler. Diğer bir dezavantajı ise yüksek aerodinamik gürültü seviyesidir. Mekanizmanın kontrolü için göbek kısmına ek yapılar yapmayı gerektirirler. Dezavantajı ise yüksek aerodinamik gürültü seviyesidir. 3 kanatlı RT'lerden daha gürültüdür çünkü uç hızı 120 m/sn civarındaki 3-kanatlı pervanelerle kıyaslandığında uç hızı 2 kat daha yüksektir.
- 5) Rüzgar Türbinlerinin güç kontrol sistemlerini karşılaştırmak istersek eğer; Stall kontrollü RT'ler, pitch kontrollü RT'lere göre daha basit yapıdadır. Stall kontrollü RT'lerin avantajları arasında basit bir pervane yapısı ve göbek yapısına sahip olması, daha az bakım gerektirmesi, güç kontrolünde yüksek verimlilik sağlaması.

- 6) Pitch kontrol sistemlerinin başlıca avantajları ise bütün rüzgarlı durumlarda aktif güç kontrol olanağı sağlaması, daha yüksek enerji üretimi, pervanenin acil durumlarda durabilmesi için güçlü fren sistemi gerektirmemesi, ekstrem rüzgallarda pervane kanatlarına düşük yükleme için pozisyon değişimine olanak sağlaması, nominal gücün üzerinde rüzgar hızlarında pervane kanatlarına binen yükün azalması, kanatların hafif olmasından dolayı daha hafif bir yapıya sahip olması.
- 7) Son yıllarda ise stall ile pitch kontrol sistemlerinin karışımı olan “aktif stall” sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemin avantajları ise çok küçük pitch açıları gerektirmesi, düşük rüzgar hızlarında bile güç kontrolünü mümkün kılması, ekstrem rüzgar hızlarında pervane kanatlarının düşük yüklenmesi için pozisyon değiştirmesi sayılabilir.
- 8) RT'leri için en iyi aerodinamik verimin belirlenmesinde kullanılan temel yöntem RT pervane uç hızı ile (Tip speed) rüzgar hızı arasındaki oranı en iyi belirlemektedir (uç hız oranı – tip speed ratio,  $\lambda$ ). Değişken hızlı pervanelerin kullanımı ile maksimum aerodinamik verimi yakalayabilmek için düşük hızlı rüzgarlarda düşük şiddette pervane hızı, yüksek hızlı rüzgallarda ise büyük şiddette pervane hızı meydana gelmelidir. Değişken hızlı pervanelerin sabit hızlı pervanelere göre avantajları şunlardır; daha fazla enerji kazanımı, nominal güç işlemi sırasında çok küçük bozulmalar, hamleli rüzgarlara karşı daha düşük yüklenmeler ve düşük şiddetteki rüzgarlarda daha az gürültüdür.
- 9) Sabit hızla dönen pervaneler sabit yapıdadır çünkü pervane hızı şebeke frekansına göre ayarlanır. Sabit hızlı pervane sisteminin avantajları ise; herhangi bir pervane hız kontrol sistemi gerektirmemesi, güçlü şebeke (grid) sistemi nedeni ile basit bir pervane hız düzenlemesine ihtiyaç duyulması, sadece düşük hızlı pervane kontrolü gerektirmesi ve daha ekonomik bir sistem olmasıdır. Bu sistemin dezavantajı ise normal güç sırasında fazla güç salınımı örnek verilebilir.
- 10) Mekanik enerjiden elektrik enerjisi üretimi için RT'lerde kullanılan Jeneratörlerde üç fazlı alternatif akım vardır. Bu Jeneratörler sırasıyla Doğru Akım Jeneratörü (Şönt Tipi), Senkron Jeneratör (Alternatör), asenkron Jeneratör (indüksiyon Jeneratör)'dür. En ucuz ve güvenilir çözüm olarak Asenkron Jeneratör görünmektedir. Asenkron Jeneratörlerin avantajları arasında; tesisi ucuzdur, dönen kontaktlar yoktur, şebekeye bağlantı kolaylığı vardır, şebekeye bağlandığı zaman salınımlar oluşmaz.
- 11) Rüzgar Türbinlerinde kullanılan dönüşüm sistemlerini 3 grupta toplayabiliriz. Bunlar sabit hızlı makinalar, bir veya iki hızlı makinalar ve değişken hızlı makinalardır. Rüzgar

Türbinlerindeki üç önemli eleman; pervane, vites kutusu ve Jeneratördür. Pervane rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirir. Jeneratör bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek tüketir. Vites kutusu ise pervaneyi jeneratör hızına göre düzenler. Sabit hızlı makinalarda doğrudan Jeneratör ana şebekeye (grid sisteme) bağlıdır. Sabit hızlı Rüzgar Türbinlerinin en büyük faydası basit yapıda ve ucuz olmasıdır. Herhangi bir senkronizasyon ünitesi gerektirmez. Dezavantaj olarak ise, yüksek başlama akımı ve reaktif güç gerektirmesidir. Değişken hızlı makinalarda, Jeneratör şebekeye elektronik bir dönüştürücü veya Jeneratör uyarıcı bir sistemle bağlanmaktadır.

- 12) Rüzgardan elde edilebilecek elektrik gücünün irdelenmesini ele alırsak, rüzgar türbininin rotoru hava akımındaki enerjiyi absorbe eder ve bu da rüzgarın hızına bir etkiye bulunur. Türbinlerde bulunan pervane bozulmamış rüzgar hızını düşürerek pervane arkasında bulunan daha düşük şiddetteki hıza çevirirler. Rotoru terkeden havanın hızı azalır ve bu hızlar arasındaki farklılık rüzgardan çıkarılan enerjiyi ifade eder. Betz Limiti ise bize RT'lerin havada bulunan rüzgar enerjisinin ancak % 59.3 kullanılabileceklerini göstermektedir.
- 13) Günümüzde ticari rüzgar türbinleri 100-750 KW büyüklükleri arasındadır. Boyutu arttırırken en önemli etken aynı uzaklıktan 1 MW ile 100 KW'lık türbinleri hemen hemen aynı görsel etkiyi yapmasıdır. Üst sınır ise büyük türbinler taşınırken ve montajı yapılırken ortaya çıkan lojistik problemler tarafından belirlenebilir.
- 14) 2000 yılından sonraki zamanda rüzgar teknolojisindeki gelişmelerin, boyutlarındaki hızlı büyüme ve radikal tasarım yeniliklerinden çok 300-1000 KW aralığındaki türbinlerin bazı özelliklerinin optimize edilmesi şeklinde karakterize edileceği beklenmektedir. Gelişmeler, yüksek güvenlik, daha etkin maliyet ve daha az çevresel etki (gürültü) ile sonuçlanacaktır.
- 15) Uluslararası teknik stratejiye örnek Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği strateji belgesidir. Bu belge European Wind Energy Association (EWEA) tarafından yayınlanmıştır ve rüzgar enerjisi uygulamaları için bir Avrupa Stratejisi oluşturmaya yöneliktir. EWEA strateji belgesi bir seri somut eylemler koymaktadır. Bunlar uygulanırsa Avrupa 2000 yılında sonra rüzgar enerjisi kapasitesini 4000 MW'a çıkaracak, 2005 yılında ise 11500 MW'a ulaşacaktır. Stratejinin uzun dönem hedefi 2030 yılına kadar Avrupa'nın enerji tüketiminin % 10'unun rüzgar enerjisinden karşılamaktır.

**KAYNAKLAR**

Ahrens, D.C. (1988), "Meteorology, Today: An Introduction to the Weather, Climate and the Environment", West Publishing Company, USA.

AKEİGM, (1999), "Maliyet, Fiyat ve Değerler: Rüzgar Enerjisi", II. cilt Avrupa Komisyonu Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, sf 4-12-13-15.

Angi, H., (1984), "Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Dizaynı", İ.T.Ü. M.M.L.S. Tezi, İstanbul.

AREB-TŞ, (1998), "Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi (Turkish Wind Energy Association) Bülteni", Temmuz 1998, Sayı 1.

AREB-TŞ, (2000), "Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi Haberler Bülteni", Sayı 3, Temmuz 2000.

AREB-TŞ, (1999), "Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi (Turkish Wind Energy Association) Bülteni", Sayı 2, Temmuz 1999.

Arya, S.P., (1988), "Introduction to the Micrometeorology", Academic Press Inc, California.

American Wind Energy Association (AWEA), (2000), "Comperative Air Emissions of Wind and Other Fuels", 6-10 Sept. 2000.

AWEA, (1999), "Wind Energy Views on The Environment: Clean and Green", Wind Energy Fact Sheet American Wind Energy Association.

Bellarmino, G.T., Urguhart, J., (1996), "Wind Energy for the 1990's And Beyond", Energy Conversion & Management 37.

Bennoci, C., (1984), "Fundamental Aerodynamics And Design Procedure For Horizontal Axis Windmill", V.K.A., June, 1984.

Borhan, Y., (1996), "Dinamik Meteroloji Ders Notları", İ.T.Ü., Meterololoji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Çetin, Ü., (1976), "Yeni Enerji Kaynaklarına Bir Bakış", DEK Enerji Dünyası.

Çolak, M., Gökçen, G., Günerhan, H., (1995), "İzmir Bornova Yöresi için Rüzgar Rejimi ve Potansiyelinin Belirlenmesi", Elektrik Dergisi, 1995/3.

Çöten, A., (1990), "Rüzgar Enerjisi", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Darwish, A.S.K and Sayigh, A.A.M., (1998). "Wind Energy Potential in Irag. Solar Wind Technology." s.215-222.

DEWI, (1998), "Wind Energy Information Brochure", Deutshland Wind Energy, Institute Wilhekmshaven.



Dündar, C., ve İnan, D., (1995). "Çeşme Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi", Türkiye 7. Enerji Kongresi, Ankara.

Dünya Ekonomi- Politika Gazetesi, 13.07.1999.

ECD, (1999), "Encyclopedia of Current Dynamics", Mc Graw – Hill Book Company, 10-19.6.1999.

ED, (1999), "Enerji Dünyası", sayı: 25, Ağustos 1999.

E.İ.E., (1984), "Türkiye Rüzgar Enerjisi Doğal Potansiyeli", Elektrik İşleri Etüd Dairesi.

E.İ.E. Brifing, (1999), Genel Müdür Mehmet Demirtola, 19 Mart 1999.

E.İ.E. (1992), "Rüzgar Enerjisi", Elektrik İşleri Etüd Dairesi, Ankara.

E.İ.E., (1994), "Rüzgar Gücüyle Elektrik Üretimi Sistemi Tasarımı", Elektrik İşleri Etüd Dairesi Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara.

Eldridge, F.R., (1979), "Wind Machines".

Erdiller, B., (1975), "Türkiye'de Rüzgar Enerjisi ve Faydalanma Olanakları", DEK Enerji Dünyası.

Fortunato, B., Mummolo, G., (1997), "Technical-Economic Optimization of a Wind Power Plant By Means of a Stochastic Analytical Model", Energy Conversion & Management 38.

FT, (Financial Times Gazetesi), (1999), Companies & Markets eki, 25 June 1999.

Gipe, P., Quarton, D.C., Fenton, V.C., (1995), "Wind Energy Conversion", John Wiley & Sons. Inc.

Gipe, P., (1993), "Wind Energy Comes of Age", John Wiley & Sons. Inc.

Golding, E.W., (1955). "The Generation of Electricity by Wind Power" E. & F.N. Spon Limited London.

Gündüz, A., (1997). "Marmara Bölgesi Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi", Lisans Tezi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Habali, S.M. and et all (1986) "Wind Speed and Wind Energy Potential of Jordan", Solar Energy, Vol. 38, 159-170.

Hanaşçıoğlu, M., (1999), "Wind Energy in Turkey", Renewable Energy, sf. 822-827, 1999.

Kaner, T., (1990), "Rüzgar Karakteristiklerinin Aerojeneratör Tasarımına Etkileri", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Konaklıoğlu, T., (1983), "Güneş ve Rüzgar Enerjisinden Yararlanma Biçimleri ve Ülkemizde Bu Konuda yapılan Çalışmalar", DMI Güneş ve Rüzgar Enerjisi Sempozyumu.



- Krawiec, S., (1980), "Economics of Selected WECS Dispersed Applications", Solar Energy Research Institute (SERI).
- Martinez, A., Prats, P., (1999), "Wind Technology Issues", Renewable Energy 16 835-839, Pergamon.
- Mays, I., (1999), "Status of Wind Energy World Wide and Prospects in Europe."
- Mendilcioğlu, M., (1999), "Enerji Sektöründe Rüzgar Enerjisi Uygulamalarının Gelişimi ve Geleceği" T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
- Mortensen, N.G.; Lansberg, L., Troen, I., And Petersen, E.L, (1993), "Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP)", Vol 1: Getting Started, Riso National Laboratory, Denmark.
- Nordex GmbH, (1999), "Nordex N43 600 kw Wind Turbine Technical Description Brochure", Give, Denmark.
- Olav, J., (1994), "Estimation of Cost of Energy from Wind Energy Conversion Systems", Tande Riso National Laboratory, İngiltere.
- Öney, S. Yarman, T., Tekes, B., (1980) "Wind Energy Utilization Possibilities in Turkey, Symp. On Alternative Energy Sources", Vol. 4, 1635-1656.
- Öztürk, N., (1997), "Realization of Wind Energy Projects in Turkey", Sarıgerme Wind Energy Workshop, ETKB, 19-20 June 1997.
- Proje, D. and Cividini, B., (1980) "Wind Energy, Potential in Croatia, Solar Energy", Vol. 41 543-554.
- Redman, M.J., (1992), "Wind Energy Costs", Master's Project, San Diego State University.
- REESFR, (1985), "Rüzgar Enerjisi Elektrik Santralleri Fizibilite Raporu", 188859 sayılı Resim gazete, Sayfa 23, 4 Eylül 1985.
- RISO, (1999), "Power Curve Measurements Brochure", RISO National Laboratory Test and Measurement Division, Denmark.
- RSS, (1997), "Rüzgar santralleri Şartnamesi", Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.
- Sarıkayalar, O., (1998), "Rüzgar Enerjisi ve Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli" Y.L. Tezi Haziran 1998, Y.T.Ü., İstanbul.
- Siegfried, H., (1998), "Grid Integration of Wind energy Conversion Systems", John Wiley & Sons, England.
- Sorensen, A., (1986), "Energy Conversion Systems", Washington State University.
- Şahin, A.D., ve Şen, Z., (1995), "Refined Wind Energy Formulation and its Application in Turkey", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier, 74-76.

Şen, Z., (1997), "Rüzgar Enerjisinin alan-zaman davranışlarının teorik incelenmesi", 2.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, 6-7 Ocak.

Şen, Z., (1999), "Terrain Topography Classification For Wind Energy Generation", Renewable Energy 16, Pergamon.

Şen, Zekai., Şahin, A.D., (1997), "Regional Assesment of Wind Power in Western Turkey By The Cumulative Semiveriogram Method", Renewable Energy 12, No: 2.

Taylor, D., (1995), "Energy Resources Package", Open University Publications, England.

Tolun, S., Menteş, S., Aslan, Z. and Yükselen, M.A., (1995), "The Wind Energy Potential of Gökçeada in the Northern Aegean Sea", Renewable Energy, Vol. 6, No: 7, 679-685.

Tripathy, S.C., Lakshmi, S.R., Balasubramanian, R., (1998), "Production Costing and Economic Analysis of Power Systems Containing Wind Energy Conversion Systems", Energy Conversion & Management 39.

Troen, I., Petersen, L.E., (1989), "European Wind Atlas", Comission of the European Communities, Riso National Laboratory, Denmark.

Tuncer, K.K., (1999); "Rüzgar Enerjisi Teknolojileri ve Kullanımının Dünyada ve Ülkemizdeki Gelişimi", M.A.M.

TWEA, (1999); "Turkish Wind Energy Association", Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Bülteni, Sayı 2, Ekim 1999.

Turkish Wind Energy Association (TWEA), (1997), "Wind Energy Investment in Turkey", Proceedings, Workshop, 3-4 April 1997, Ankara.

URGT, (1993), "National Wind Power Association of European Community Technical Description Brochure", 8-12 March 1993.

Uyar, S.T., (1985), "Rüzgar Enerjisi Sistemleri", TBTAK Proje No: 44.

Uyar, Dr. T.S., (1998/11), "Türkiye'de ve Dünya'da Rüzgar Enerjisi Kullanımdaki Gelişmeler", Elektrik Dergisi.

Van Wijk, A.J.M., Coelingh, J.P., (1993), "OECD ülkelerinde Rüzgar Enerjisi Poteniyeli 93091", Utrecht, Hollanda: Utecht Üniversitesi, 35 s.

Veziroğlu, N., (1982), "Atternative Energy, Sources IV", Volume 4-Indirecet Solar Wind Geothermal, 1982.

Vosburgh, N.P., (1983). "Commercial Applications of Wind Power", Van Nostrand Reinhold Company, USA.

Wagner, A., (1999), "Wind Power and the REFIT Model", Wind Directions, March 1999.

Walker, J.F., Jenkins, N., (1997), "Wind Energy Technology", John Wiley & Sons. Inc.

Weis – Taylor, P., (1998), “International Energy”, Agency Wind Energy Annual Report.

Wilson, E.R., (1984), “Electrical Energy From The Wind”, Mechanical Engineering, January 1984.

Windtec, (1998), “Windtec 650 600 kw Wind Türbine Technical Description Brochure”, Völkermarkt, Austria.

WMO, (1981). “Meteorological Aspects of the Utilization of the Wind as an Energy Source”, Report No: 575 World Meteorological Organization, Geneva.

Yükselen A., (1993), “Aerodinamik I-II Ders Notları”, Hava Harp Okulu, İstanbul.



**EKLER****1. Kullanılan Birimlerin Analizi**

1 Birim Elektrik = 1 Kilowattsaat = (1 kWh)

1 kW kapasite (1 saatte 1 kWh elektrik üreten santral kapasitesi)

1000 kW kapasite = 1 MegaWatt = (1 MW)

1000 kWh (1000 kilowattsaat) = 1 (MWh)

1000 Mwsaat = 1 Gigawattsaat = 1 (GWh)

1000 Gigawattsaat = 1 Terawattsaat = 1 (TWh)



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	21.01.1976	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1987-1994	F.M.V. Işık Lisesi (Nişantaşı)
Lisans	1995-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2000-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı

