

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGÂR ENERJİSİNİN GÜÇ KALİTESİ
AÇISINDAN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk.-Elktr. Müh. Melikşah ÖZAKTÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ertan YANIKOĞLU

Haziran 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGÂR ENERJİSİNİN GÜÇ KALİTESİ
AÇISINDAN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk.-Elktr. Müh. Melikşah ÖZAKTÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Bu tez 08/06/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Ertan YANIKOĞLU
Jüri Başkanı**

**Doç. Dr.
Yaşar İSLAMOĞLU
Üye**

**Yrd. Doç. Dr.
T. Fedai ÇAVUŞ
Üye**

ÖNSÖZ

Enerji, ekonomik ve sosyal kalkınmanın en önemli öğelerinden biridir. Enerji gittikçe uluslararası bir nitelik kazanmış ve dünya politikasına etki eden bir konuma gelmiştir. İnsanoğlu, fosil kökenli enerji kaynaklarının sınırlı olması ve çevresel zararlarından dolayı yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönelmiştir. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde hem teknolojisi hem de kullanımı en hızlı şekilde gelişen enerji kaynağıdır.

Günümüzde hızla artan nüfus ve sanayileşmeden kaynaklanan enerji gereksinimi, ülkemiz kaynaklarıyla karşılanamamakta, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki açık hızla büyümektedir. Bu nedenle kendi öz kaynaklarımızdan daha etkin bir şekilde yararlanmak kaçınılmaz olmaktadır.

Türkiye, konumu ve coğrafi yapısı itibariyle önemli bir rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte rüzgâr enerjisi uzun yıllar Türkiye’de değerlendirilememiş ve yararlanılamamış bir kaynak halinde kalmıştır. Kendi öz kaynaklarımızdan olan rüzgâr enerjisinin kullanımının yaygınlaşmasına ve ülkemizin daha az dışa bağımlı hale gelmesine yardımcı olması amacıyla bu tezi hazırlamaktan mutluluk duyduğumu ifade etmek isterim.

Bu çalışmamı hazırlarken başta maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, bilgisi ve tecrübesini paylaşan, eğitim-öğretim hayatım boyunca desteğini üzerimden hiç eksik etmeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU’na, Yrd. Doç. Dr. Türker Fedai ÇAVUŞ’a ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Melikşah ÖZAKTÜRK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Rüzgâr ve Enerji.....	1
1.2. Rüzgâr Enerjisinin Kısa Tarihiçesi.....	1
1.3. Dünyada Rüzgâr Enerjisi.....	2
1.4. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi.....	9

BÖLÜM 2.

RÜZGÂR ENERJİSİ.....	11
2.1. Rüzgârın Tanımı.....	11
2.2. Rüzgâr Potansiyeli ve Belirlenmesi.....	12
2.3. Rüzgâr Türleri.....	13
2.3.1. Küresel rüzgârlar.....	13
2.3.1.1. Geostrofik rüzgârlar.....	14
2.3.1.2. Yüzey rüzgârları.....	14
2.3.2. Yerel rüzgârlar.....	14
2.4. Rüzgâr Enerjisini Etkileyen Faktörler.....	15
2.4.1. Yüzey pürüzlülüğü.....	15

2.4.2. Rüzgâr engelleri.....	16
2.5. Weibull Dağılımı.....	16
BÖLÜM 3.	
RÜZÂR TÜRBİNLERİ	18
3.1. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	18
3.1.1. Yapılarına göre rüzgâr türbinleri.....	18
3.1.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	18
3.1.1.2. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri.....	19
3.1.1.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri.....	21
3.1.2. Güçlerine göre rüzgâr türbinleri.....	21
3.1.2.1. Mikro türbinler.....	21
3.1.2.2. Küçük güçlü Rüzgâr türbinleri.....	22
3.1.2.3. Orta güçlü rüzgâr türbinleri.....	22
3.1.2.4. Büyük güçlü rüzgâr türbinleri.....	22
3.1.3. Şebeke açısından rüzgâr türbinleri.....	23
3.1.3.1. Şebekeden bağımsız sistemler.....	23
3.1.3.2. Şebekeye bağlı sistemler.....	24
3.1.4. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri.....	25
3.1.4.1. Tek kanatlı rüzgâr türbinleri.....	25
3.1.4.2. İki kanatlı rüzgâr türbinleri.....	26
3.1.4.3. Üç kanatlı rüzgâr türbinleri.....	27
3.2. Rüzgâr Türbinlerinin Parçaları.....	28
3.2.1. Kanatlar ve kuyruk.....	30
3.2.2. Kule.....	31
3.2.3. Rotor.....	32
3.2.4. Vites kutusu.....	32
3.2.5. Eğim donanımı.....	32
3.2.6. Fren sistemi.....	33
3.2.7. Elektriksel aksamlar.....	33
3.2.7.1. Jeneratör.....	33
3.2.7.2. Doğrultucu ve gerilim regülâtörü.....	34
3.2.7.3. Akü.....	34

3.2.7.4. İverter.....	34
3.3. Rüzgâr Türbinlerinin Güç Kontrolü.....	35
3.3.1. Stall kontrol mekanizması.....	35
3.3.2. Pitch kontrol mekanizması.....	37
3.4. Türbinin Çalışma Prensibi.....	38
3.5. Pervane Hızı.....	38
3.5.1. Değişken hızlı pervaneler.....	39
3.5.2. Sabit hızlı pervaneler.....	39
BÖLÜM 4.	
RÜZGÂR ENERJİSİ KALİTESİ.....	41
4.1. Rüzgâr Türbini Güç Üretimi.....	41
4.2. Rüzgâr Santralleri Teknolojisi	42
4.2.1. Sincap kafesli indüksiyon jeneratörleri.....	43
4.2.2. Rotoru sargılı indüksiyon jeneratörleri.....	43
4.2.3. Senkron jeneratörler.....	43
4.3. Rüzgâr Türbinlerinin Şebekeye Bağlantısı.....	44
4.4. Güç Kalitesi ve Şebeke Etkileşimi.....	47
4.5. Rüzgâr Santrallerin İletim ve Dağıtım Sistemine Etkileri.....	48
4.6. Rüzgâr Türbinlerinin Arz Güvenliği ve Kalitesi Üzerindeki Bozucu Etkileri.....	49
4.6.1. Reaktif güç üretimi ve gerilim kontrolü.....	49
4.6.2. Kısa devre arızası durumunda rüzgâr türbinlerinin tepkisi.....	50
4.6.3. Frekans kontrolü.....	52
4.7. Rüzgâr Santrallerinin Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri.....	52
4.8. Rüzgâr Santrallerinin Şebekeye Bağlantısı için İlave Teknik Şartlar.....	55
4.8.1. Anormal frekans ve gerilimler.....	55
4.8.2. Arz kalitesi.....	57
4.8.3. Sistem kararlılığı.....	57
4.9. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları.....	58

BÖLÜM 5.

RÜZGÂR ENERJİSİ PROJELERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	60
5.1. Rüzgâr Kaynakları ve Yer Seçimi.....	61
5.2. Yerel Rüzgâr Analizi.....	62
5.3. Proje Planlaması ve Analizi.....	63
5.4. Rüzgâr Enerjisi Ekonomisi.....	65
5.5. Rüzgâr Üretim Maliyetleri.....	66
5.6. Rüzgâr Enerjisine Verilen Piyasa Teşvikleri.....	66
5.7. Çevresel Etkiler.....	68
5.8. Rüzgâr Enerjisi ve Karbondioksit Emisyonları.....	69

BÖLÜM 6.

TÜRKİYE' NİN RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ.....	70
6.1. Bölgesel Rüzgâr Yoğunlukları.....	70
6.2. Rüzgâr Enerjisi Olanakları.....	72
6.3. Bölgesel Rüzgâr Değişimleri.....	73

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	77
EK.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	81

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

W	: Watt
kW	: Kilo-watt
MW	: Mega-watt
GW	: Giga-watt
kWh	: Kilo-watt-saat
TWh	: Tera-watt-saat
TWh/yıl	: Tera-watt-saat cinsinden 1 yılda tüketilen enerji
MVA	: Mega-volt-amper
m	: metre
km	: kilometre
m/sn	: metre / saniye (hız birimi)
Hz	: Hertz (frekans birimi)
AB	: Avrupa Birliği
AB-15	: 15 Avrupa Birliği Ülkesi
AB-25	: 25 Avrupa Birliği Ülkesi
EURELECTRIC	: Avrupa Elektrik Endüstrisi Birliği
EWEA	: Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği
IEA	: Uluslararası Enerji Kurumu
WWEA	: Dünya Rüzgâr Enerjisi Birliği
USA (ABD)	: Amerika Birleşik Devletleri
RES	: Rüzgâr Elektrik Santrali
RGİ	: Rüzgâr Gözlem İstasyonu
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri Kurumu
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
UCTE	: Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyonu Birliği
WASP	: Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	AB-15’te kurulu güç gelişimi.....	3
Şekil 1.2.	AB-15’te rüzgâr üretim gelişimi.....	3
Şekil 1.3.	AB-15’te rüzgâr kurulu gücü gelişimi ülkeler bazında.....	4
Şekil 1.4.	Dünyanın Teknik Rüzgâr Potansiyel Dağılımı.....	6
Şekil 1.5.	Dünyanın Teknik Rüzgâr Potansiyel Dağılım Payları.....	6
Şekil 1.6.	ABD’nin toplam kurulu rüzgâr gücü kapasitesi	7
Şekil 2.1.	Rüzgâr hızının yüksekliğe göre değişimi.....	11
Şekil 2.2.	Bir engelin çevresindeki rüzgâr akışı.....	16
Şekil 3.1.	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Çeşitli Kanat Şekilleri.....	19
Şekil 3.2.	Yatay Eksenli Sistem.....	19
Şekil 3.3.	Savonius çarkı dikey eksenli rüzgâr türbini.....	20
Şekil 3.4.	Darrieus çarkı dikey eksenli rüzgâr türbini.....	20
Şekil 3.5.	Düşey Eksenli Sistemler.....	20
Şekil 3.6.	Şebekeden bağımsız çalışan büyük güçlü rüzgâr türbini.....	23
Şekil 3.7.	Şebekeden bağımsız akü şarj prensibine göre çalışan rüzgâr türbini.....	24
Şekil 3.8.	Şebekeyle paralel bağlı rüzgâr türbini.....	24
Şekil 3.9.	Tek kanatlı rüzgâr türbini.....	26
Şekil 3.10.	İki kanatlı rüzgâr türbinleri.....	27
Şekil 3.11.	Üç kanatlı rüzgâr türbini.....	28
Şekil 3.12.	Türbinin bileşenleri.....	29
Şekil 3.13.	Bir rüzgâr türbininde bulunan aksamalar.....	29
Şekil 3.14.	Kanatlar.....	30
Şekil 3.15.	Kuyruk.....	31
Şekil 3.16.	Doğrultucu ve gerilim regülâtörü elektrik devresi.....	34
Şekil 3.17.	Stall olayının meydana gelmesi.....	35

Şekil 3.18.	Profil etrafındaki hava akışı.....	36
Şekil 3.19.	Profil etrafındaki hava akışı.....	37
Şekil 4.1.	λ - C_p ilişkisi.....	42
Şekil 4.2.	Sabit hızlı jeneratörün şebekeye bağlanması.....	45
Şekil 4.3.	Değişken hızlı jeneratörün şebekeye bağlanması.....	46
Şekil 4.4.	Anormal frekanslar için çalışma şartları.....	55
Şekil 4.5.	Anormal gerilim ve frekansta rüzgâr santrallerinin işletme şartları.....	56
Şekil 4.6a.	Rüzgâr santrallerinin arıza anında ve arıza sonrası vermesi gereken tepkiler.....	57
Şekil 4.6b.	Rüzgâr santrallerinin arıza anında ve arıza sonrası vermesi gereken tepkiler.....	58
Şekil 5.1.	Rüzgâr enerjisi projesindeki ana başlıklar.....	60
Şekil A.1.	Türkiye Rüzgâr Atlası.....	80

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	2003 itibariyle Avrupa'daki toplam kurulu rüzgar gücü.....	5
Tablo 1.2.	Dünya Kurulu Rüzgâr Gücü Kapasitesi.....	8
Tablo 1.3.	Türkiye'deki Rüzgâr Santralleri ve Kurulu Güçleri.....	9
Tablo 1.4.	Türkiye'de Bulunan Rüzgâr Santrallerinin Enerji Üretimi.....	10
Tablo 4.1.	Kullanılan jeneratör tiplerinin ülkelere göre değişimi.....	43
Tablo 4.2	Gerilim sistemi çeşitleri ve rüzgâr türbini kapasiteleri	44
Tablo 4.3	Rüzgârdan üretilen elektrik enerjisinin şebekeye bağlanması konusunda karşılaşılan engeller açısından AB ülkelerinin durumu.....	47
Tablo 4.4.	Gerilimde meydana gelen değişiklikler ve neden olduğu aksaklıklar.....	48
Tablo 6.1	Türkiye'nin bölgelere göre rüzgâr enerjisi potansiyeli.....	71
Tablo 6.2	Türkiye'deki rüzgâr enerjisi açısından zengin bölgeler.....	72

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Enerjisi, Rüzgâr Türbinleri, Güç Kalitesi, Yenilenebilir Enerji, Rüzgâr Santrali, Rüzgâr Potansiyeli

Rüzgâr, çok eski çağlardan günümüze kadar geçen sürede su pompalama, tahıl öğütme ve deniz araçlarının hareket ettirilmesi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ayrıca elektrik enerjisi üretmede kullanılan rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji türlerinden biridir. Bu çalışmada rüzgâr enerjisi ve kalitesi üzerinde durulmuştur. İlk bölümde rüzgâr enerjisinin dünya ve ülkemiz genelindeki durumu anlatılmıştır. Tezin ikinci ve üçüncü bölümlerinde rüzgârın tanımı yapılarak rüzgâr türbinleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde ise rüzgâr santrallerinin iletim ve dağıtım sistemine olan etkileri, üretilen enerjinin kalitesi, rüzgâr enerjisinin avantajları-dezavantajları anlatılmıştır.

Beşinci bölümde rüzgâr enerjisi projelerinin gerçekleştirilmesinde yer tespiti, maliyet, rüzgâr analizi verileri ve teşvikler gibi dikkat edilmesi gereken hususlar ele alınmıştır. Son olarak altıncı bölümde ise Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışma, rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesinin yaygınlaşmasını desteklemekle birlikte üretilen enerjinin daha kaliteli ve daha güvenilir olması gerektiğini vurgulamaktadır.

EXAMINING WIND ENERGY IN TERMS OF POWER QUALITY

SUMMARY

Keywords: Wind Energy, Wind Turbines, Power Quality, Renewable Energy, Wind Power Plant, Wind Potential

Wind has been traditionally used for the purposes of water pumping, grain grinding and moving of sea vehicles. Nowadays, wind energy which is also used for generating electrical energy, is a kind of renewable energies. This study focuses on wind energy and its quality. In first chapter the state of wind energy throughout the world and in our country is told. In the second chapter of this thesis wind is defined and in the third chapter detailed information about wind turbines is given. The effects of wind power plants on transmission and distribution system, the quality of the generated energy, advantages and disadvantages of the wind energy are discussed in the fourth chapter.

Chapter five deals with the important issues such as the region determination in implementing wind energy projects, cost analysis, wind analysis datum and government promotions. Finally, in sixth chapter Turkey's wind energy potential is tried to determine.

This study encourages the widespread use of electrical energy generation from wind energy and it also emphasizes that the generated energy should be much reliable and higher in quality.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Rüzgâr ve Enerji

Yenilenebilir enerjilerin tümü (gel-git ve jeotermal enerji hariç) ile fosil yakıtların kaynağı güneştir. Yeryüzü, güneşten $1,74 \times 10^{17}$ kWh gücünde enerji alır. Güneşten gelen enerjinin %1–2'si rüzgâr enerjisine dönüşür [1]. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi homojen ısıtmaması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları, rüzgârları oluşturmaktadır. Rüzgâr yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına yer değiştiren havanın, dünya yüzeyine göre bağıl olarak yaptığı hareketlerdir. Yeryüzünde oluşan hava kütleleri hareketleri, yerin dönmesinden kaynaklanan “Coriolis” büküm kuvvetinden ve yeryüzü ile akışkan hava kütleleri arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenir. Ayrıca rüzgârlar bir merkez çevresinde dolandıklarından, merkezkaç kuvveti etkisinde kaldıkları gibi, yeryüzü ile hava arasındaki sürtünme kuvvetinden de etkilenirler. Kutuplar ve ekvator arasındaki hava akımlarına bağlı belli rüzgârlar varsa da enerji üretimi açısından denizler, karalar, dağlar ya da vadiler arasındaki hava akımlarına dayanan yerel rüzgârlar daha önemlidir.

1.2. Rüzgâr Enerjisinin Kısa Tarihçesi

Rüzgâr enerjisi, ilk olarak yaklaşık 5000 yıl önce Nil nehri üzerinde kayıkların yol almasında kullanılmıştır [2]. Yel değirmenlerinin ilk kullanım alanları ise tahıl öğütme ve su taşımacılığı olmuştur [2,3]. Elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulan ilk yel değirmeni ise 1890 yılında Amerika’da kullanılmıştır [2]. 1250 kW kapasiteli 53 m çapında full-snap kanat açısı (pitch) kontrollü Smith–Putnam rüzgâr türbini 1941 yılında Amerika’da inşa edilmiştir [3]. Deneysel anlamda 1979 yılında 2 MW kapasite büyüklüğündeki türbin, Newyork’ta Boone yakınlarında bulunan Howard Knob Dağı üzerinde kurulmuş ve şebekeye bağlantısı yapılmıştır; ayrıca 3 MW’lık

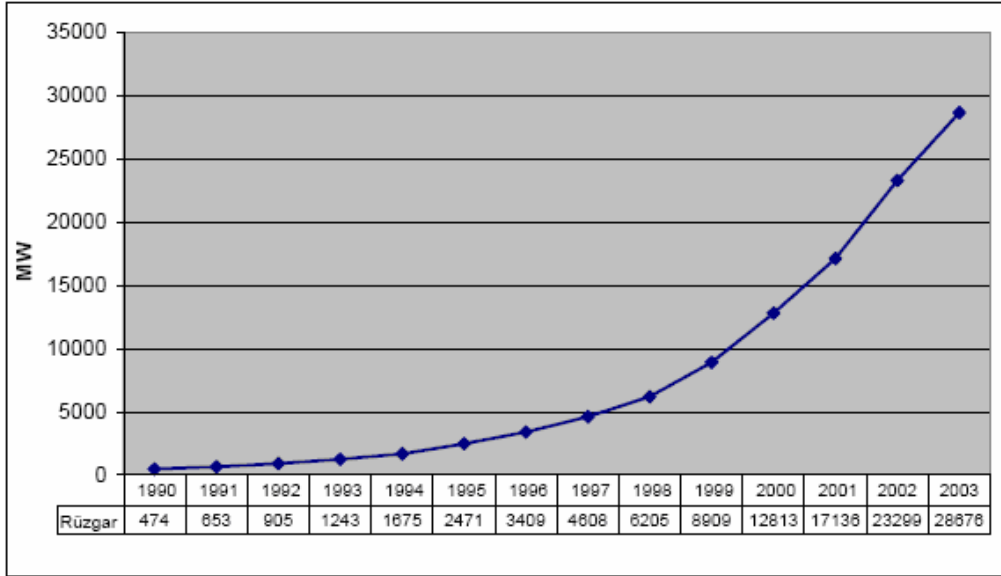
türbin ise İskoçya'daki Berger Tepesine kurulmuştur [2]. 1990lı yılların başlarına kadar rüzgâr santrallerinde kurulan türbinlerin ortalama büyüklükleri 300 kW civarındaydı. Günümüzdeki yeni makineler 1 ila 3 MW kapasite arasında üretilmektedir. ABD gibi bazı gelişmiş ülkelerde 5 MW kapasiteli rüzgâr türbinleri geliştirilmiş olup bir dizi test işlemlerinden geçmektedir [2].

1.3. Dünyada Rüzgâr Enerjisi

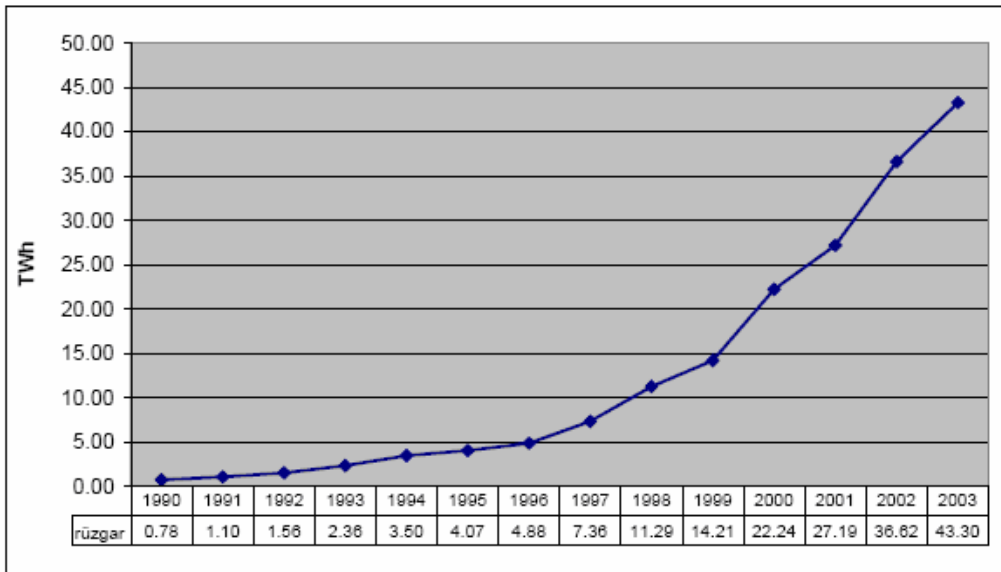
Birçok ülkenin rüzgâr potansiyelinden yararlanmaya yönelik, yoğun araştırmalar yaptıkları ve önemli teknolojik gelişmeler kaydettikleri ve hatta günümüz koşullarında bile ekonomik bir şekilde bu potansiyelin bir kısmını kullandıkları bilinmektedir. Teknolojik gelişmelerinde etkisiyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında konvansiyonel kaynaklarla en rekabet edebilir kaynak durumuna gelen rüzgâr enerjisi; özellikle Danimarka, Almanya, Amerika ve son yıllarda İspanya'da uygulanan teşvik politikaları ile hızlı bir gelişim göstermiştir.

1990 yılında AB-15'te sadece 474 MW olan rüzgâr kurulu gücü, 2003 yılına kadar olan 13 yıllık dönemde tam 60 kat artarak 2003 yılında 28676 MW'a ulaşmıştır [4]. Dünyadaki kurulu rüzgâr gücünün yaklaşık %74'üne karşılık gelen bu kurulu güç ile Avrupa, rüzgâr enerjisi konusunda dünyadaki lider konumunu sürdürmektedir. EWEA, Avrupa'nın kurulu rüzgâr gücünün yaklaşık %84'ünü Almanya, İspanya, Danimarka ve İngiltere'nin paylaştığını belirtmektedir [2].

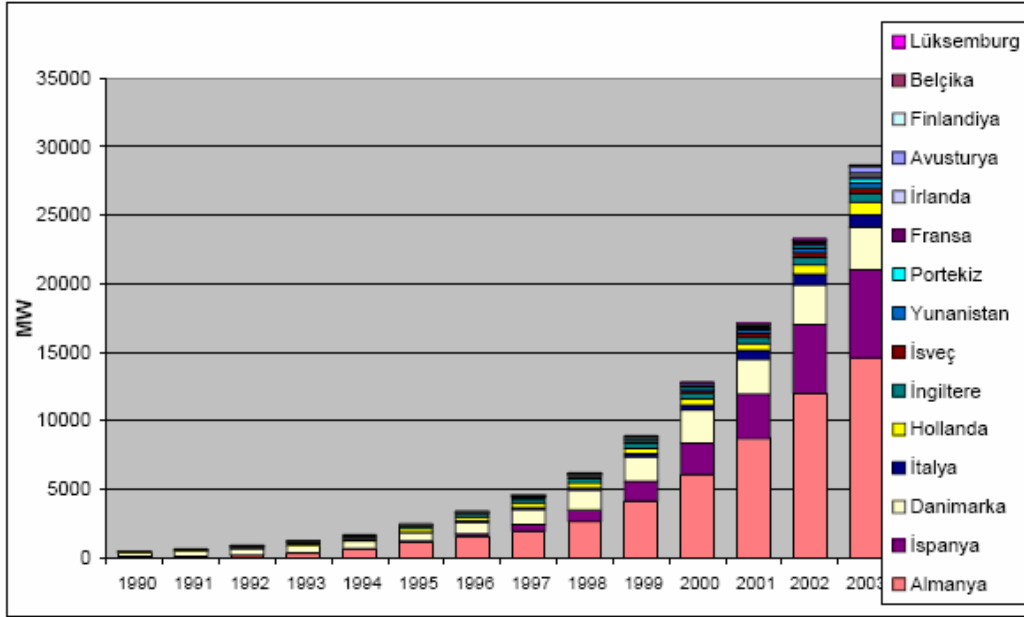
AB ülkelerinde rüzgâr kurulu gücünün 1990'dan günümüze kadar olan gelişimi ve rüzgârdan üretilen yıllık elektrik enerjisi miktarı aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Şekil 1.1. AB-15'te kurulu güç gelişimi (MW)
(1990–2001 yılları için IEA istatistikleri, 2002–2003 yılları için EurObserv'ER 2004 istatistikleri kullanılmıştır)



Şekil 1.2. AB-15'te rüzgâr üretim gelişimi (TWh)
(1990–2002 yılları için IEA istatistikleri, 2003 yılı için EurObserv'ER 2004 istatistikleri kullanılmıştır.)



Şekil 1.3. AB-15'te rüzgâr kurulu gücü gelişimi (MW) – ülkeler bazında (1990–2001 yılları için IEA istatistikleri, 2002–2003 yılları için EurObserv'ER 2004 istatistikleri kullanılmıştır)

Bu şekillere göre AB ülkelerinde son 10 yılda yaklaşık 27400 MW, son 5 yılda ise 22400 MW rüzgâr santrali tesis edilmiştir. Böylece son 10 yıllık dönemde yıllık ortalama %37 artan rüzgâr kurulu gücü 23 katına çıkmış, son 5 yıllık dönemde ise kaydedilen yıllık ortalama %36'lık artış kurulu gücü 5 yılda 4,6 katına çıkıştır. Kurulu güç ve üretim şekillerinde görüldüğü üzere rüzgâr santrallerinin elektrik enerjisi üretimi kurulu güç gelişimine paralel olarak hızlı bir artış göstermiştir.

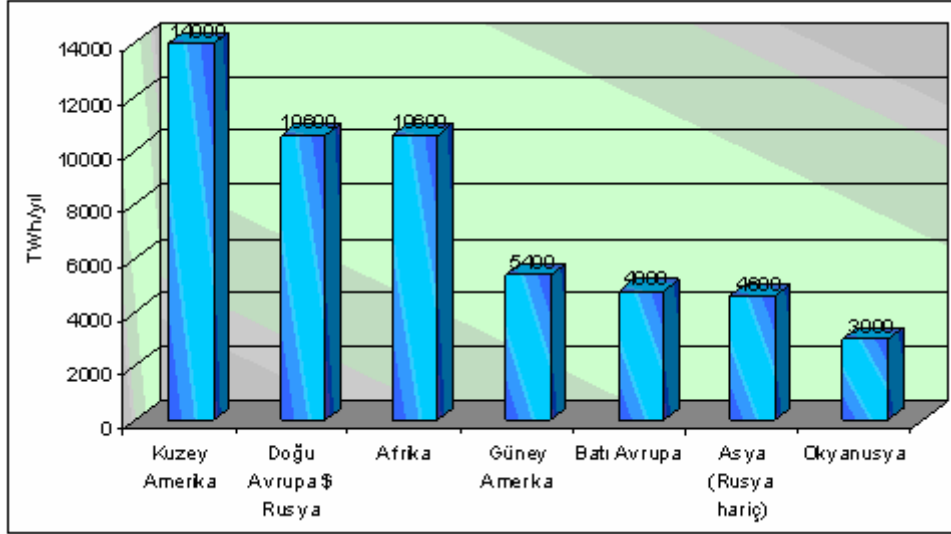
1990 yılında 1 TWh değerinin altında olan elektrik üretimi 2003 yılında 43,3 TWh' e kadar yükselmiştir. Son 5 yıllık dönemde üretimdeki artış 3,8 kata karşılık gelmektedir [4]. Elektrik üretimindeki artışın kurulu güç gelişiminin bir miktar altında kalması, sektörün gelişimi ve sağlanan teşviklerle daha önce ekonomik olmayan üretimi nispeten az sahaların son yıllarda geliştirilmesi ve meteorolojik koşullarla açıklanabilir.

2003 yılı itibariyle Avrupa ülkelerindeki toplam rüzgâr kurulu gücü Tablo 1.1' de verilmektedir [4].

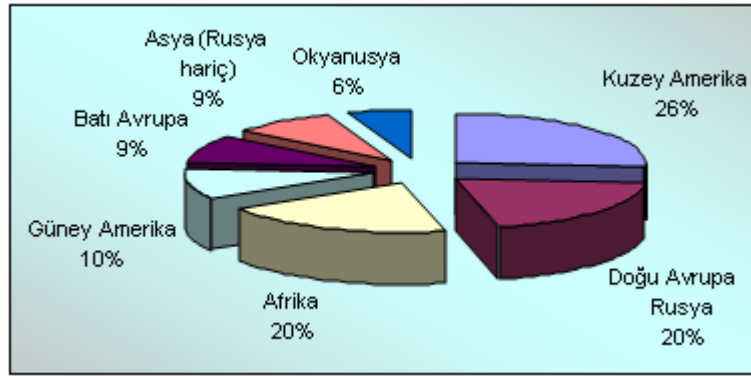
Tablo 1.1. 2003 itibariyle Avrupa'daki toplam kurulu rüzgâr gücü (MW) [4] (Kaynak: Rüzgâr kurulu gücü için EurObserv'ER 2004, toplam kurulu güç için Eurelectric istatistikleri)

Ülkeler	Rüzgâr (MW)				Toplam Kurulu Güç (MW)		Rüzgârın Toplamdaki Payı (%)	
	2002	2003	2003'te giren	%	2002	2003	2002	2003
Almanya	11994	14609	2645	21.8	124420	126531	9.6	11.5
İspanya	5042	6411	1369	27.2	59738	63819	8.4	10.0
Danimarka	2889	3110	243	7.6	12879	12948	22.4	24.0
İtalya	788	904	116	14.7	76950	78358	1.0	1.2
Hollanda	685	910	232	32.8	20813	20965	3.3	4.3
İngiltere	552	648	103	17.3	77133	78200	0.7	0.8
İsveç	328	399	71	21.6	32263	33361	1.0	1.2
Yunanistan	302	390	88	29.1	10990	10990	2.7	3.5
Portekiz	194	301	107	55.2	11450	11654	1.7	2.6
Fransa	153	253	100	65.2	116200	116380	0.1	0.2
İrlanda	138	187	49	35.5	5400	5550	2.6	3.4
Avusturya	139	415	276	198.6	17799	17842	0.8	2.3
Finlandiya	43	51	8	18.6	16566	16647	0.3	0.3
Belçika	35	67	31	89.2	15627	15684	0.2	0.4
Lüksemburg	16	22	5	32.9	1129	1129	1.4	1.9
AB-15	23299	28676	5443	23.1	599357	610058	3.9	4.7
Polonya	29	60	31	108.8	31013	31699	0.1	0.2
Letonya	23	24	1	4.3	2175	2141	1.1	1.1
Çek Cum.	3	10	7	233.3	15133	16005	0.0	0.1
Estonya	5	5	0	0.0	2427	2427	0.2	0.2
Macaristan	3	3	0	0.0	7492	7998	0.0	0.0
Slovakya	0	3	3	0.0	7757	7777	0.0	0.0
Kıbrıs	2	2	0	0.0	988	988	0.2	0.2
Litvanya	0	0	0	0.0	5761	5784	0.0	0.0
Malta	0	0	0	0.0	577	577	0.0	0.0
Slovenya	0	0	0	0.0	2729	2772	0.0	0.0
AB-25	23360	28780	5486	23.2	675409	688226	3.5	4.2
Türkiye	19	19	0	0.0	31846	35587	0.1	0.1
Romanya	1	1	0	0.0	17846	35502	0.0	0.0
Dünya	31412	39294	7948	25.1				

IEA tarafından yayınlanmış bir çalışmada 5,1 m/sn üzerinde rüzgâr hızına sahip bölgelerin uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni ile 4'ün kullanılacağı esasına dayalı çalışmada dünya toplam potansiyeli 53000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır ve bu değerın dünyadaki dağılımı Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'te gösterilmektedir [5].



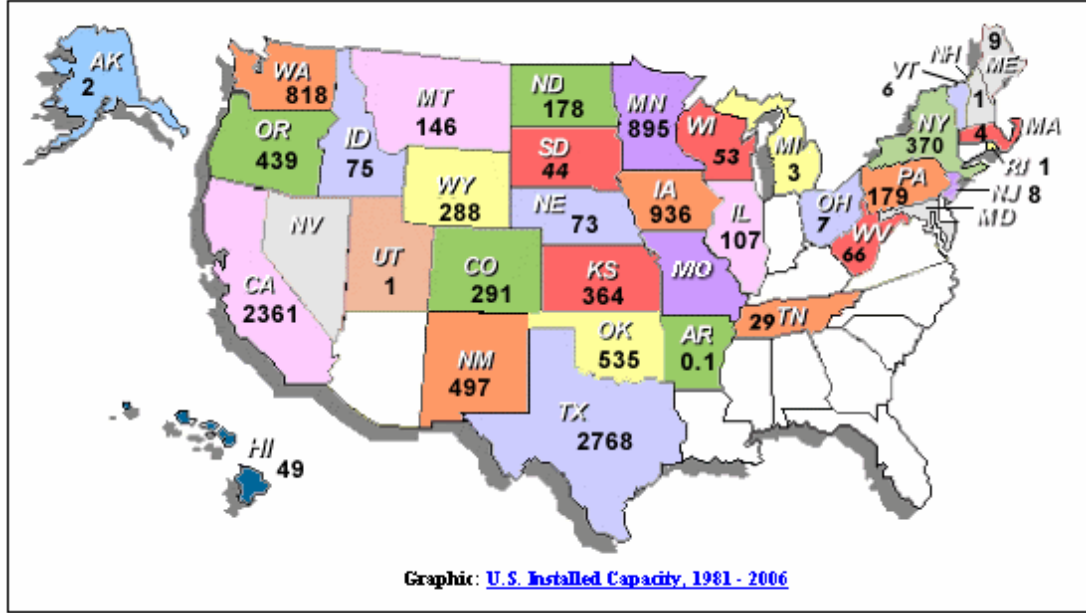
Şekil 1.4. Dünyanın Teknik Rüzgâr Potansiyel Dağılımı (Kaynak: IEA)



Şekil 1.5. Dünyanın Teknik Rüzgâr Potansiyel Dağılım payları (Kaynak: IEA)

2004 yılı itibariyle dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücü 40530 MW olup Avrupa %74 pay (29956 MW) ile en büyük kullanıcıdır, bunu %6,4 pay (6352 MW) ile Amerika izlemektedir, ayrıca Avrupa'daki en büyük rüzgâr enerjisi kullanıcısı 15162 MW kurulu güç ile Almanya olup bu değer Avrupa'nın kurulu gücünün yaklaşık %51'i, dünya kurulu gücünün yaklaşık %37'sine karşılık gelmektedir [6].

31 Aralık 2006 verilerine göre ABD'nin toplam kurulu rüzgâr gücü kapasitesi 11.603 MW olup eyaletlerin kurulu güçleri Şekil 1.6' da gösterilmektedir [7].



Şekil 1.6. ABD'nin toplam kurulu rüzgâr gücü kapasitesi

Dünyanın rüzgâr gücü kapasitesini belirlemek için yapılan son araştırmalara göre dünyanın kurulu rüzgâr gücü toplam kapasitesi, 2005 ve 2006 yılları arasındaki rüzgâr gücü kapasitelerinin karşılaştırılması ile büyüme oranları Tablo 1.2' de verilmiştir [8–11].

Tablo 1.2. Dünya Kurulu Rüzgâr Gücü Kapasitesi (MW) [8–11]

Ülkeler	Eklenen Kapasite (MW) (2006)	Büyüme oranı (%) (2006)	Toplam Kapasite (MW) (2006 sonu)	Toplam Kapasite (MW) (2005 sonu)
Almanya	2.194	11,9	20.622	18.428
İspanya	1.587	15,8	11.615	10.028
ABD	2.454	26,8	11.603	9.149
Hindistan	1.840	41,5	6.270	4.430
Danimarka	8	0,3	3.136	3.128
Çin	1.344	106,7	2.604	1.260
İtalya	405	23,6	2.123	1.718
İngiltere Krallığı	681	50,3	2.034	1.353
Portekiz	628	61,4	1.650	1.022
Fransa	810	106,9	1.567	757
Hollanda	336	27,5	1.560	1.224
Kanada	768	112,4	1.451	683
Japonya	354	34,0	1.394	1.040
Avusturya	146	17,8	965	819
Avustralya	238	41,1	817	579
Yunanistan	183	31,9	756	573
İrlanda	147	29,6	643	496
İsveç	54	10,6	564	510
Norveç	55	20,4	325	270
Brezilya	208	717,3	237	29
Belçika	26	15,6	193	167
Polonya	79,5	109	152,5	73
Finlandiya	4	4,9	86	82
Ukrayna	3,5	4,3	85,5	82
Macaristan	44	259	61	17
Litvanya	48,5	693	55,5	7
Türkiye	31	155	51	20
Çek Cumhuriyeti	24	92,3	50	26
Lüksemburg	10	40	35	25
Estonya	2	6,7	32	30
Bulgaristan	31	3100	32	1
Letonya	1	3,9	27	26
Hırvatistan	11,2	186,7	17,2	6
İsviçre	0	0	11,6	11,6
Slovakya	0	0	5	5
Diğer Ülkeler	413,3	33,1	1.660,7	1.247,4
TOPLAM	15.169	25,5	74.491	59.322

Dünya ülkelerinin gelecekteki rüzgâr kapasitesi projeksiyonlarına baktığımızda Avrupa ülkeleri, kurulu rüzgâr gücü kapasitesini 2010 yılına kadar 75 GW'a, 2020 yılına kadar 180 GW'a, 2030 yılına kadar ise 300 GW'a çıkarmayı hedeflemektedir [12].

Dünya Rüzgâr Enerjisi Birliği (WWEA), 2010 yılı sonuna kadar bütün dünyadaki kurulu rüzgâr gücü kapasitesinin 160 GW'a ulaşacağını tahmin etmektedir [9]. 2016 yılı sonu kadar bu kapasitenin 455 GW civarında olacağı bildirilmektedir [13].

1.4. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

Türkiye'de son zamanlara kadar, rüzgâr enerjisi konusunda kayda değer bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Türkiye'de rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi konusunda kullanılan ilk sistem, 1985 Yılı'nda Danimarka'dan ithal edilip İzmir-Çeşme Altinyunus Turistik tesislerinde kurulan 55/11 kW gücündeki rüzgâr türbinidir. Üç kanatlı yatay eksenli bu türbinden üretilen elektrik enerjisi adı geçen tesiste tüketilmektedir [14].

Türkiye'de halen şebeke bağlantılı beş rüzgâr santrali vardır. Bu santrallerin toplam gücü 50,1 MW'tır. Bütün santrallerdeki türbinler de yatay eksenlidir. Santrallerle ilgili temel bilgiler Tablo 1.3' te, bu santrallerden üretilen enerji miktarları ise Tablo 1.4' te verilmektedir [5, 14].

Tablo 1.3. Türkiye'deki Rüzgâr Santralleri ve Kurulu Güçleri [5, 14]

Santral Adı	Kapasite	Yer	Yatırımcı Firma	İşletmeye Başlama Tarihi
Delta Plastik	1.5 MW, Otoprodüktör (3x500 kW Enercon türbin)	Alaçatı-Çeşme	Demirer Holding	21 Şubat 1998
ARES RES	7.2 MW, YİD (12 x 500 kW Vestas türbin)	Alaçatı-Çeşme	Güçbirliği	28 Kasım 1998
Bozcaada RES	10.2 MW, YİD (17x 600 kW Enercon türbin)	Bozcaada-Çanakkale	Demirer Holding & Enercon.	25 Haziran 2000
Sunjüt	1.2 MW Otoprodüktör, 4628 Sayılı Yasaya göre Otoprodüktör Lisansı (2x 600 kW Enercon Türbin)	İstanbul-Çatalca-Hadımköy	SUNJÜT Suni Jüt San. ve Tic. A.Ş.	Kasım 2003
Bandırma RES	30 MW, 4628 ve 5346 Sayılı Yasaya göre üretim lisansı 20x1,5 MW, GE 1,5 se	Bandırma-Erikli-Dutlیمان Sahil Yenice Köyleri	Bilgin Enerji Şirketler Grubu	Mayıs 2006

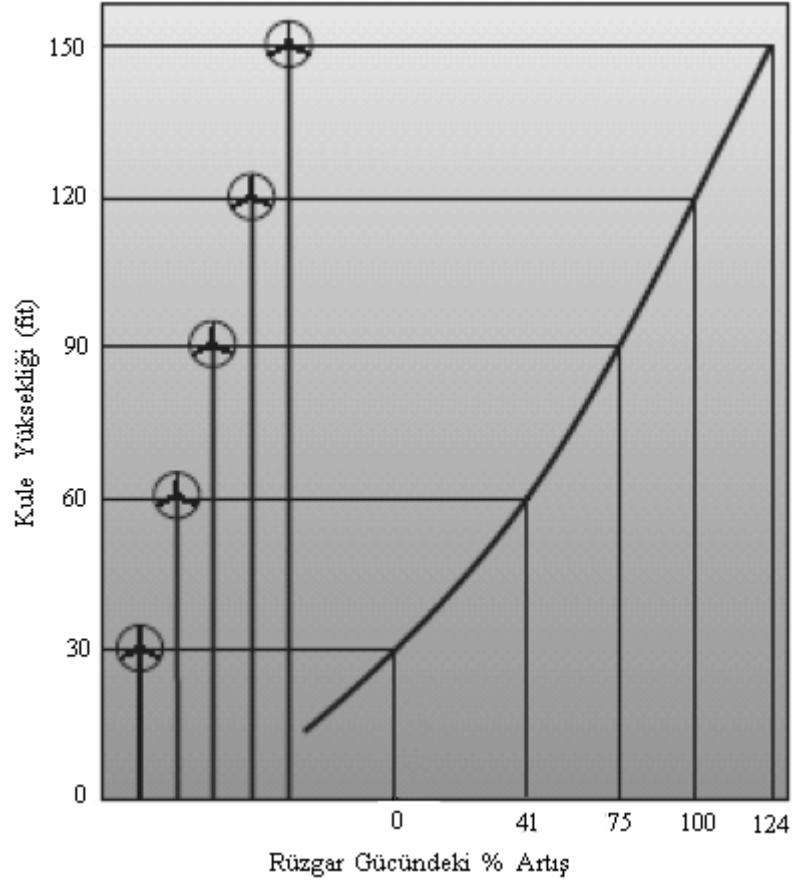
Tablo 1.4. Türkiye’de Bulunan Rüzgâr Santrallerinin Enerji Üretimi [5, 14]

Santral Adı Üretim (kWh)	Delta Plastik	ARES RES	Bozcaada RES	SUNJÜT	Bandırma RES	Toplam (kWh)
1999 yılı	4 281 273	16 208 290	-	-	-	20 489 563
2000 yılı	4 078 959	15 346 070	13 964 000 (25.6.2000'den itibaren)	-	-	33 389 029
2001 yılı	5 144 728	17 705 730	39 498 360	-	-	62 348 818
2002 yılı	3 863 908	13 447 486	30 508 440	-	-	47 819 834
2003 yılı	5 100 000	17 560 000	38 900 000	-	-	61 560 000
2004 yılı	-	17 850 000	34 190 000	-	-	52 040 000
2005 yılı	-	6 990 000 (4 aylık)	24 690 000 (9 aylık)	-	-	31 680 000
2006 yılı	-	-	-	15 yıllık Lisansta öngörülen 2 430 000 kWh/yıl	20 yıllık Lisansta öngörülen 120 000 000 kWh/yıl	

BÖLÜM 2. RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1. Rüzgârın Tanımı

Rüzgâr, açık ve geniş bir yüzey üzerinde havanın yere göre yatay hareketi olarak tanımlanabilir. Ayrıca güneşin yeryüzünü özdeş ısıtamamasından dolayı meydana gelen sıcaklık ve basınç farklılıkları rüzgârları oluşturmaktadır. Rüzgâr hızı ve yönü, yerden yüksekliğe bağlı olarak belirgin bir değişkenlik gösterir. Rüzgâr hızının yüksekliğe bağlı değişimi Şekil 2.1’de verilmiştir [15].



Şekil 2.1. Rüzgâr hızının yüksekliğe göre değişimi

Atmosferde bol miktarda ve serbest olarak bulunan rüzgâr, doğası gereği kinetik enerji taşımaktadır. Havanın özkütlesi az olduğundan rüzgârdan sağlanacak enerjinin miktarı, rüzgâr hızına bağlıdır. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere rüzgârın hızı yükseklikle; gücü ise hızın küpü ile orantılı olarak artar.

2.2. Rüzgâr Potansiyeli ve Belirlenmesi

Rüzgâr enerjisi santrallerinin projelendirilmesi ve ekonomisi temel olarak seçilen santral sahasından üretilebilecek enerji miktarına bağlı olmaktadır. Bu enerji miktarının tespiti için seçilen proje sahasına ait arazinin topoğrafik yapısı da göz önüne alınarak uygun nokta veya noktalara rüzgâr gözlem istasyonu (RGI) kurulmalıdır. Rüzgâr enerji sistemlerinin tasarımı, planlanması ve çalıştırılması için rüzgârın karakteristiklerinin tüm detaylarıyla bilinmesi gerekmektedir. Türbin yerleşimi ve rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenebilmesi için uzun süreli güvenilir verilere ihtiyaç duyulmaktadır [16].

Rüzgâr enerjisinden yararlanmak amacıyla sürdürülen çalışmaların ilkinin potansiyel belirleme çalışmaları oluşturmaktadır. Bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli rüzgâr hızlarının küpüyle orantılıdır. Bu nedenle rüzgâr hızı ölçümlerinde yapılabilecek ölçüm hatası, santral sahasının rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesindeki doğruluğu oldukça etkiler. Ölçüm periyodunun uzatılması ve mümkünse türbin göbek yüksekliğinden alınacak rüzgâr ölçümleri rüzgâr potansiyelini daha sağlıklı belirleyecektir. Ayrıca, elde edilen rüzgâr ölçüm kayıtları yeterli ilişkiye sahip yakın istasyonlarla veya aynı ölçüm noktasından alınan uzun dönem rüzgâr ölçüm kayıtlarıyla karşılaştırılıp değerlendirilmelidir. Rüzgâr ölçüm verileri mümkün olduğunca sürekli olmalı, kesintili ve eksik olmamalıdır. Ölçüm serilerinde bir ayda meydana gelen ölçüm kesintilerinin 180 saatin üzerine çıkması hassas bir değerlendirmeyi mümkün kılmadığından elde edilen ölçüm değerleri iptal edilmelidir.

Türkiye’de genel amaçlı rüzgâr ölçümleri diğer meteorolojik ölçümlerle birlikte D.M.İ tarafından yapılmaktadır. Ülke genelinde rüzgâr enerjisi kaynağına dayalı plan ve programların yapılabilmesi, bu kaynağın potansiyelinin belirlenmesi ile

mümkündür. Bu amaçla, D.M.İ.'ne ait istasyonların 1970–1980 yılları arasındaki kayıtları değerlendirilmiş ve ülke genelindeki doğal rüzgâr enerjisi dağılımı genel olarak belirlenmiştir. Ancak, rüzgârdan elektrik enerjisi üretimine yönelik çalışmalarda ayrıntılı rüzgâr potansiyel değerlendirme çalışmaları gerekli olmaktadır. Bu amaç doğrultusunda ülkemizde, ilk aşamada belirlenmiş olan ve rüzgâr enerjisi umut verici yerlerde yapılan etütler ile rüzgârdan enerji üretimine elverişli olabilecek bölgelere rüzgâr enerji gözlem istasyonları kurulup veri toplanmaya başlanmıştır. Bu istasyonlarda düşük güçlü mikro işlemci kontrollü veri toplama sistemleri kullanılmaktadır. Ölçümler çoğunlukla 10 metre yükseklikte alınmakla birlikte 30 metre yükseklikte alınan ölçümlerde mevcuttur. Veriler birer saatlik ve 10 dakikalık periyotlarla toplanmakta, yazılım programı kullanılarak işlenmekte ve arşivlenmektedir. EİE rüzgâr enerjisi gözlem istasyonlarına ait aylık ortalama rüzgâr hızları ve rüzgâr yönleri güncellenmekte ve ücretsiz olarak yayımlanmaktadır. E.İ.E.'nin ölçüm istasyonlarından elde edilen ortalama rüzgâr hızları, bu istasyonların bulunduğu bölgelerin birçoğunun rüzgâr enerjisi uygulamaları için elverişli olduğunu göstermektedir [16, 17].

Çeşitli ülkelerce hazırlanıp kullanıma sunulan ve bir alandaki rüzgâr ölçüm parametrelerini kullanarak rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesine yardımcı olan bilgisayar programları mevcuttur. Bu bilgisayar programların başında Danimarka RISO Ulusal Laboratuvarında geliştirilmiş olan ve Avrupa kıtasının rüzgâr atlasının hazırlanmasında kullanılan WASP (Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı) bilgisayar programı gelmektedir. WASP bilgisayar programı rüzgâr hız ve yön bilgileri ile rüzgâr gözlem istasyonu çevresindeki engellerden, arazi yüzey pürüzlülüğü ve arazinin topoğrafik özelliklerinden yola çıkarak bölgesel rüzgâr atlas istatistiklerinin ve enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

2.3. Rüzgâr Türleri

2.3.1. Küresel rüzgârlar

Rüzgâr, dünyanın ekvator bölgesinden yükselerek hem kuzeye hem güneye doğru atmosferin yüksek tabakaları içerisinde hareket eder. Havanın her iki yarımküredeki

30° enlemleri civarında daha yükseklerle çıkması Coriolis kuvveti tarafından önlenir. Bu enlemlerdeki yüksek basınçtan dolayı hava tekrar alçalmaya başlar. Rüzgâr, ekvatorundan yükselirken kuzey ve güneyden gelen yer seviyesi çekimindeki rüzgârlara kadar düşük basınçlı bir alan oluşacaktır. Kutuplarda ise havanın soğumasından dolayı yüksek basınç meydana gelecektir. Bu basınç farkından dolayı da küresel rüzgârlar oluşacaktır [1].

2.3.1.1. Geostrofik rüzgârlar

Geostrofik rüzgârlar, sıcaklık farklılıkları dolayısıyla oluşan basınç farklılıklarından meydana gelir. Yer seviyesinin yaklaşık 1000 metre üzerinde görünen geostrofik rüzgârlar, yer yüzeyinin yapısından fazla etkilenmezler ve hızları hava balonları kullanılarak ölçülebilir [1].

2.3.1.2. Yüzey rüzgârları

Yüzey rüzgârları, 100 metreye kadar olan yüksekliklerde görüldüğünden yer yüzeyinden çok fazla etkilenirler. Bu rüzgâr tipinin hızı, yeryüzünün pürüzlü ve engebeli olmasından dolayı çok yavaştır. Yer yüzeyine yakın olan bölgelerde yüzey rüzgârlarının yönün geostrofik rüzgâr yönünden farklı olmasının nedeni dünyanın dönüş yönüdür [1].

2.3.2. Yerel rüzgârlar

Küresel rüzgârlar belirli alanlardaki hâkim rüzgâr yönünü tespit etmekte önemli olmasına rağmen, yerel iklim koşulları rüzgâr yönündeki değişimde önemli rol oynarlar. Önemli yerel rüzgârlar; deniz ve kara meltemi, dağ ve vadi meltemi ile musondur. Deniz meltemi gün boyunca kara ile deniz arasındaki ısı farklılığından oluşur. Gündüzleri kara üzerindeki hava kütlesi, deniz üzerindeki hava kütlesine göre daha çok ısınır. Hava kütlesi yukarıya doğru hareket etmeye başlar. Böylece kara üzerinde alçak basınç oluşur. Bu alana denizdeki hava kütlesi hareket ederek deniz meltemini oluşturur. Bu rüzgâr karada 50–150 km kadar içerilere sokulur. Akşam, kara ve deniz sıcaklıklarının eşitlenmesi süreci olduğundan hava sakindir. Gece ise

kara denizden daha soğuk olduğu için deniz meltemindeki olayın tersine hareket başlar. Buna kara meltemi denir. Bu rüzgârlar deniz meltemine göre daha az şiddetlidir. Çünkü geceleyin kara ve deniz sıcaklıkları birbirine daha yakındır. 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 rüzgârları, tropikal enlemlerde, özellikle Güney Asya’da, görülür. Yazın denizden karaya (yaz musonu), kışın karadan denize doğru esen mevsimlik rüzgârlardır [1,18, 19].

2.4. Rüzgâr Enerjisini Etkileyen Faktörler

2.4.1. Yüzey pürüzlülüğü

Rüzgâr, yer seviyesinin yaklaşık 1 km üzerindeki yüksekliklerde yeryüzünün yüzey şekillerinden veya engebeliğinden hemen hemen hiç etkilenmez. Ancak 1 km’ nin altındaki yüksekliklerde yer yüzeyinden dolayı sürtünmeler, rüzgâr hızını azaltmakta ve yönünü değiştirmektedir. Yeryüzü ne kadar çok pürüzlü veya engebeli ise rüzgâr hızı da o kadar az olacaktır [1].

Rüzgâr hızı ölçümleri Dünya Meteoroloji Teşkilatı’nın belirlemiş olduğu 10m yükseklikte yapılmaktadır. Türbinler ise genellikle 60 m yüksekliğindedir. Bu yükseklikte hızı belirlemek için aşağıdaki formül kullanılır:

$$\frac{V_{h2}}{V_{h1}} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^a \quad (2.1)$$

V_{h2} : h_2 yüksekliğindeki rüzgâr hızı (m/sn)

V_{h1} : h_1 yüksekliğindeki rüzgâr hızı (m/sn)

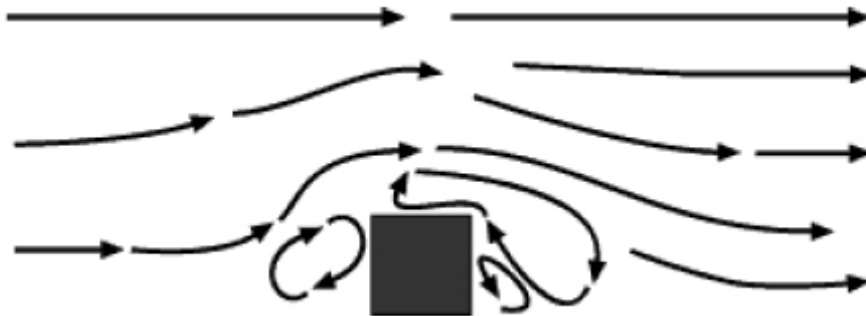
h_1 : rüzgâr hızının ölçümünün yapıldığı yükseklik (m)

h_2 : rüzgâr hızının hesaplanacağı yükseklik (m)

a : yeryüzü engebeliğine bağlı katsayı

2.4.2. Rüzgâr engelleri

Binalar, ormanlar, kayalar gibi rüzgârın hızını azaltan engellerin çevresinde türbülanslar meydana gelir. Şekil 2.2’de bir engelin çevresindeki rüzgâr akışı gösterilmiştir [1]. Türbülansın oluştuğu alan, engelin yüksekliğinin üç katına kadar çıkabilir. Türbülans, engelin arka tarafında daha belirgin haldedir. Bu nedenle türbinin kurulacağı alanda bu tür engellerden kaçınılmalıdır. Engellerin rüzgâr hızına olan etkisi engelin porozitesine bağlıdır. Porozite, rüzgârın çarptığı nesnenin açık alanlarının yüzdesidir. Binaların porozitesi %0, sık ağaçların porozitesi %30, ağaçların porozitesi %50 ve yaprakları seyrek olan ağaçların porozitesi %70’dir [1].



Şekil 2.2. Bir engelin çevresindeki rüzgâr akışı

2.5. Weibull Dağılımı

Rüzgâr hızındaki değişimleri saptayabilmek ya da hangi yönde nasıl değişimlerin olacağını önceden tahmin edebilmek, rüzgâr endüstrisinde çok önemli konuların başında gelmektedir. Türbin üreticileri, türbin tasarımını optimize üretim maliyetlerini minimize etmek için bu bilgilere ihtiyaç duyarlar. Rüzgâr değişimlerini tanımlayabilmek için weibull dağılımından faydalanılır. Rüzgâr enerjisinin frekans dağılımına en uygun istatistiksel dağılımının Weibull dağılımı olduğu başta Justus (1978) ve Lyons tarafından ifade edilmiştir. Rüzgâr hız değerlerinin hâkim yön ve şiddetlerinin bulunması, bu dağılımın kullanılmasının esas sebepleri arasında yer

almaktadır. Rüzgârın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgâr endüstrisinde çok önemlidir. Eğer bir yıl boyunca rüzgâr ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgârların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgârların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir site için rüzgâr dağılımı ya ölçülerek, ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde Weibull dağılımı ile belirlenir. Bu dağılım, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olasılığı “1” dir [1]. Yani, sakin havalar da bunun içinde olmak üzere, belli bir periyotta rüzgârın her aralıkta toplam olma olasılığı %100 dür. Weibull dağılımı eğrisi simetrik değil çarpıktır. Bu eğriyi oluşturan her bir hız frekansı, ortalama hızın bulunmasını da sağlar. Buna göre Weibull dağılımı;

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \left| -\left(\frac{v}{c}\right)^k \right| \quad (2.2)$$

$p(v)$: weibull dağılımı

V : rüzgâr hızı (m/sn)

c : ölçek değişkeni (m/sn)

k : şekil değişkeni

BÖLÜM 3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

3.1. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri; yapılarına göre, güçlerine göre ve şebekeye göre olmak üzere 3 ana kategori altında sınıflandırılabilir.

3.1.1. Yapılarına göre rüzgâr türbinleri

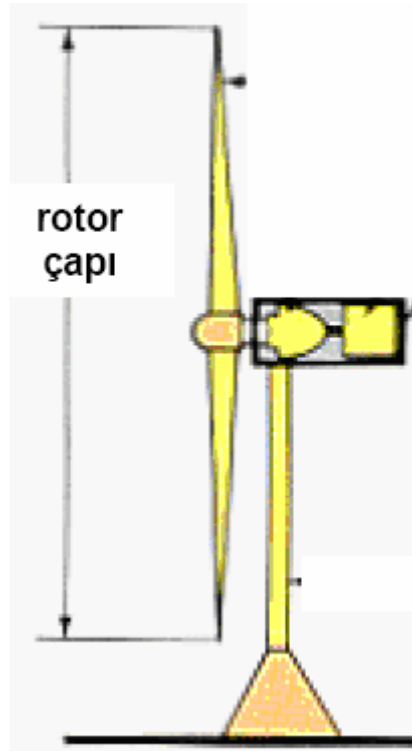
3.1.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yer konumuna göre rotoru yatay ekseninde çalışan türbinlerdir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (Horizontal Axis Wind Turbine = HAWT)'nin maksimum enerji tutabilmeleri için rotorları sürekli rüzgâr akış yönünde olmalıdır. Bu da rotorun kule üzerinde dönmesi ile sağlanır. Rüzgârın yönüne dönme hareketi iki ayrı konstrüksiyonla sağlanır. Bunlar “öne-rüzgâr” ve “arkaya-rüzgâr” olarak adlandırılır. Eğer kanat, rüzgârı ön yüzünden alıyorsa rotorun arkasına bir kılavuz kanat takılır. Diğer durumda ise kanat rüzgârı arka kısımdan alır veya kanatlar biraz konik yapılıdır. Böylece sistem rüzgârı takip ederek maksimum fayda sağlanır.

Teknolojik ve ticari olarak en yaygın kullanılan türbinler yatay eksenli rüzgâr türbinleridir. Modern rüzgâr türbinleri 2 veya 3 kanatlı ve kanat çapları yaklaşık 30 m civarındadır. Yatay eksenli türbinlerde rotor, dişli çark, jeneratör ve fren bir kulenin bir kulenin üzerinde yatay şafta bağlanmışlardır. Ticari amaçlı kullanılan türbinlerin hemen hepsi bu guruba girmektedir. Aşağıdaki şekillerde yatay eksenli sistemler ile yatay eksenli kanat şekilleri gösterilmiştir [20, 21]:



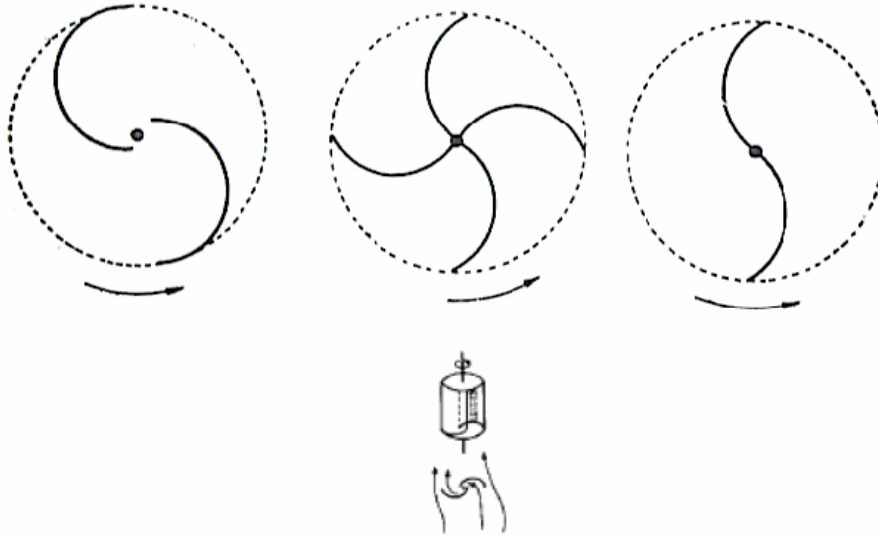
Şekil 3.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Çeşitli Kanat Şekilleri



Şekil 3.2. Yatay Eksenli Sistem

3.1.1.2. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

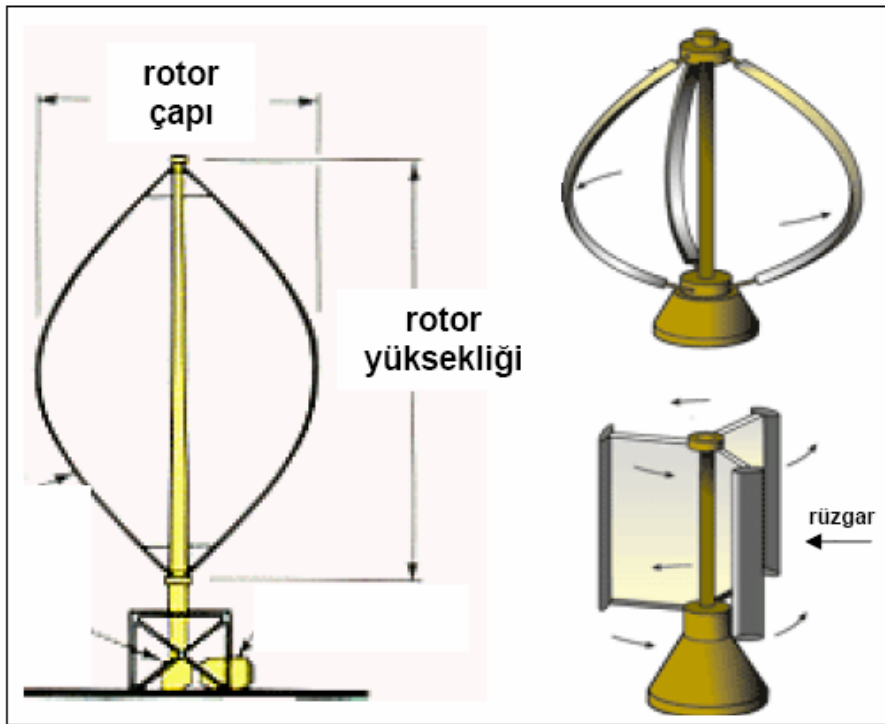
Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgâr yönüne dik ve kanatları düşeydir. Bunların başlıcaları Darrieus ve Savonius tipinde olanlardır. Aşağıdaki şekillerde dikey eksenli rüzgâr türbinleri gösterilmiştir (Vertical Axis Wind Turbine = VAWT).



Şekil 3.3. Savonius çarkı dikey eksenli rüzgâr türbini



Şekil 3.4. Darrieus çarkı dikey eksenli rüzgâr türbini



Şekil 3.5. Düşey Eksenli Sistemler

Şekillerde de görüldüğü gibi düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde kanatlar düşey şafta bağlanmıştır. Bu türbinlerin yatay eksenli türbinlere göre bazı avantajları ile dezavantajları vardır:

Avantajları;

- Rüzgâr doğrultusundan etkilenmez dolayısıyla yönlendiriciye ihtiyaç yoktur.
- Bütün elektromekanik aksam yerde olduğu için yatırım ve bakım masrafları daha azdır.

Dezavantajları;

- Türbin kanatları tasarımı nedeniyle verimleri daha düşüktür.
- Kanatların yere yakınlığı sonucu düşük rüzgâr hızına maruz kalırlar ve dolayısıyla enerji üretimini azaltır.
- Verim düşüklüğü nedeniyle dikey eksenli rüzgâr türbinleri fazla uygulama alanı bulamamışlardır.

3.1.1.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

Dönme eksenleri düşey ile rüzgâr yönünde bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenini arasında belirli bir açı bulunmaktadır. Eğik eksenli rüzgâr türbinlerinin geniş bir uygulama alanı yoktur [21].

3.1.2. Güçlerine göre rüzgâr türbinleri

3.1.2.1. Mikro türbinler

Genellikle sabit mıknatıslı jeneratörlerle birlikte batarya şarj etmek üzere kullanılmakta ve güçleri 50 W ile 2 kW arasında değişen türbinlerdir. Bu türbinler uzak iletişim sistemlerinde, ev içi sistemlerde ve gezi teknelerinde kullanılabilir. Şebekeden bağımsız olarak akü şarj prensibiyle çalışır. Rotor çapları 3 m den küçüktür.

3.1.2.2. Küçük güçlü rüzgâr türbinleri

Güçleri 2 kW ile 40 kW ve rotor çapları 3 m ile 12 m arasında değişen rüzgâr türbinleridir. Küçük rüzgâr türbinleri genellikle şebekenin olmadığı veya ulaştırmanın ekonomik olmadığı ya da sorunlu olduğu yerlerde kullanılır. Genellikle akü şarj prensibine göre çalışır.

3.1.2.3. Orta güçlü rüzgâr türbinleri

Güçleri 40 kW ile 999 kW ve rotor çapları 12 m ile 45 m arasında değişen rüzgâr türbinleridir.

3.1.2.4. Büyük güçlü rüzgâr türbinleri

Rüzgârdan elde edilen elektrik enerjisi gücünü 1 MW' tan büyük, rotor çapının ise 46 metreden büyük olduğu türbinlerdir. Büyük güçlü türbinler, rüzgâr çiftliği olarak adlandırılan diziler halinde kurulurlar. Bir rüzgâr çiftliğinin toplam gücü 1–150 MW arasındadır.

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

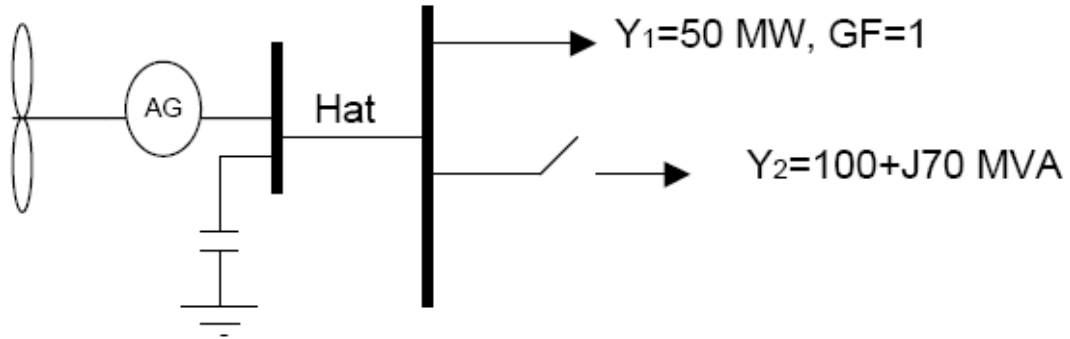
Büyük güçlü türbinlerden oluşan rüzgâr çiftliklerinin yatırım maliyeti kabaca bir yaklaşımla 1000 \$/kW' tır. Yıllık bakım masrafı ise yatırımın % 1–1,5 oranında

gerçekleşir. Bu şartlar altında kurulacak türbinlerden elde edilen elektrik enerjisi, şebekeye; maliyeti düşük, çevreyi kirliletmeyen, güvenli ve yenilenebilir bir kaynaktan üretilmiş olarak verilebilir.

3.1.3. Şebeke açısından rüzgâr türbinleri

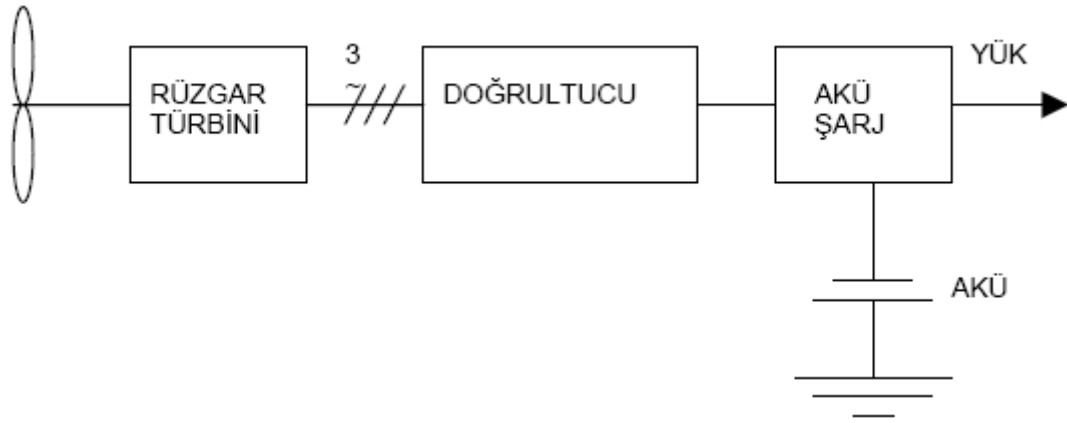
3.1.3.1. Şebekeden bağımsız sistemler

Merkezî tüketim merkezlerinden uzaktaki yerleşim merkezlerinin elektrik enerjisi ihtiyacının, merkezî şebekeden karşılanması pahalı bir tesis masrafı gerektirmektedir. Özellikle adalarda su altından yüksek gerilim kabloları ile enerji nakli söz konusu olduğunda bu durum daha da belirginleşmektedir. Rüzgâr hızı ve sürekliliği yeterli olan bu tür yerleşim birimlerinin enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilen rüzgâr santralleri genellikle şebeke ile herhangi bir bağlantı içerisinde değildir [22]. Şekil 3.6’da şebekeden bağımsız çalışan büyük güçlü rüzgâr türbini gösterilmiştir:



Şekil 3.6. Şebekeden bağımsız çalışan büyük güçlü rüzgâr türbini

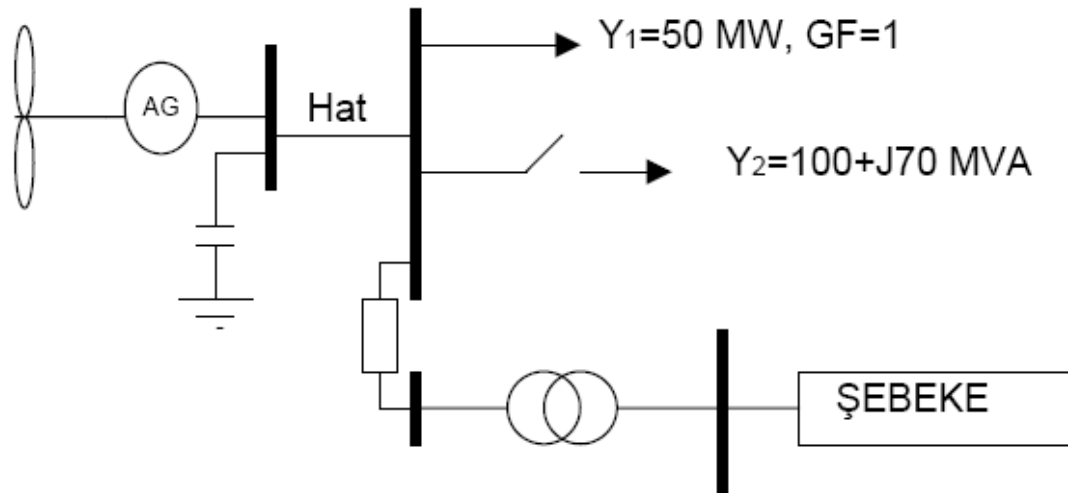
Büyük güçlü şebekeden bağımsız çalışan büyük rüzgâr türbinlerinden başka küçük rüzgâr türbinleri de mevcuttur. Şebekeden bağımsız olarak çalışan küçük rüzgâr türbinleri akü şarj etme prensibine göre çalışır. Akü şarj eden sistemler, genellikle şebekeden uzak bölgelerde kullanılmaktadır. Şehir dışı yerleşimler, çiftlik evleri, telekomünikasyon aktarıcıları, radyo ve orman kuleleri, askeri tesisler, demiryolu sinyalizasyonu, balık çiftlikleri, meteoroloji istasyonları, bilimsel ve diğer araştırma istasyonları gibi yerlerde elektrik ihtiyacını karşılar. Şekil 3.7’de akü şarj prensibine göre şebekeden bağımsız çalışan rüzgâr türbini gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Şebekeden bağımsız akü şarj prensibine göre çalışan rüzgâr türbini

3.1.3.2. Şebekeye bağlı sistemler

Rüzgâr türbini şebekeye paralel olarak bağlanır. Bu sistemde öncelikle rüzgârdan üretilen elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Rüzgâr koşullarının az olması durumunda ise, rüzgâr türbininden sağlanan elektrik dışında kalan ihtiyaç şebekeden sağlanmaktadır. Şebekeye paralel bağlı rüzgâr türbinleri büyük güçlü rüzgâr türbinleridir. Şekil 3.8’de şebekeye paralel bağlı rüzgâr türbini gösterilmiştir:



Şekil 3.8. Şebekeyle paralel bağlı rüzgâr türbini

3.1.4. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri

3.1.4.1. Tek kanatlı rüzgâr türbinleri

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin kullanımının temel amacı, pervanelere etkiyen yüksek dönme hızın düşürülmesidir (Şekil 3.9). Öte yandan tek kanatlı rüzgâr türbinleri aerodinamik olarak dengesizdir ve bu durumda ek hareketler ile istenmeyen bazı yüklere sebep olur. Bu mekanizmayı kontrol etmek için, göbek kısmına ek yapıların yerleştirilmesini gerektirir. Diğer dezavantajlarından birisi de, yüksek aerodinamik gürültü seviyesidir. Uç hız oranı 120 m/sn civarındaki üç kanatlı pervanelerle kıyaslandığında uç hızı iki kat daha yüksektir. Dolayısı ile üç kanatlı rüzgâr türbinlerinden daha gürültülüdür.

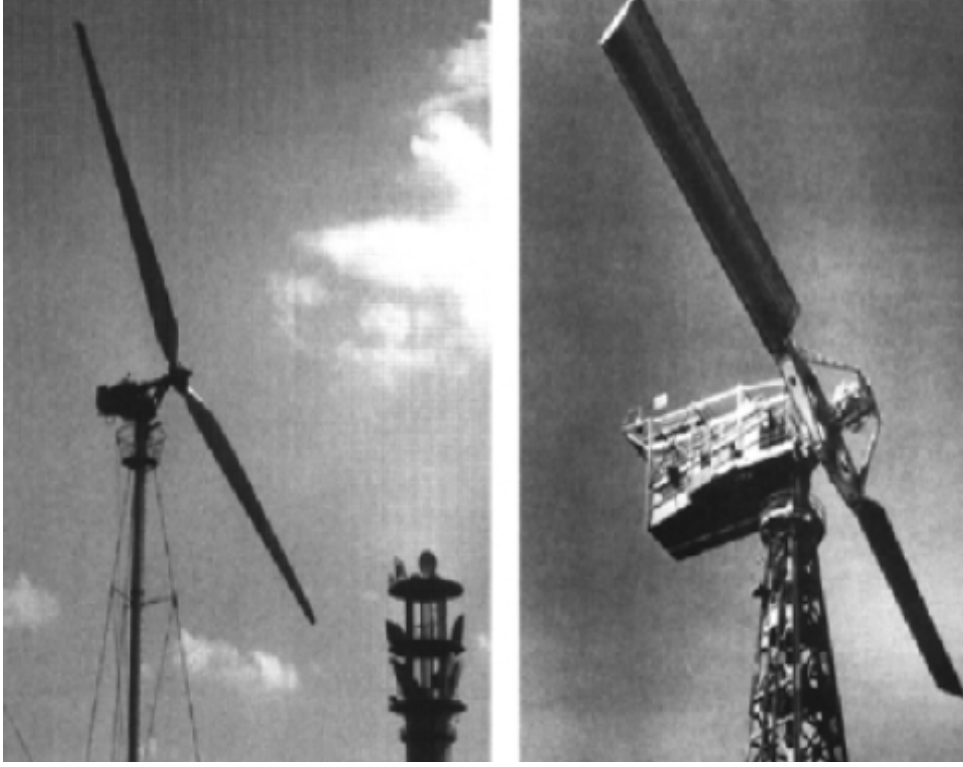


Şekil 3.9. Tek kanatlı rüzgâr türbini

3.1.4.2. İki kanatlı rüzgâr türbinleri

20 yıl öncesine kadar iki kanatlı rüzgâr türbinleri yaygın bir şekilde kullanılırdı (Şekil 3.10). 10 metreden 100 metreye kadar değişen farklı pervane çaplarında Avrupa'da ve Amerika'da kullanılmıştır. İki kanatlı rüzgâr türbinleri, üç kanatlı rüzgâr türbinlerinden daha ekonomik gibi görünmesine rağmen, iki kanatlı rüzgâr türbinleri dinamik etkilerden dolayı bir takım ek ekipmanlar gerektirdiğinden, üç kanatlı rüzgâr türbinleri ile hemen hemen aynı maliyete gelmektedir. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinden farklı olarak dönmeden meydana gelen ve kulenin yatay eksenine göre olan bir atalet momentine sahiptir. Bu durum rüzgâr türbini 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 rüzgâr hızlarında (örneğin 3 m/sn) pervane devreye girememektedir.



Şekil 3.10. İki kanatlı rüzgâr türbinleri

3.1.4.3. Üç kanatlı rüzgâr türbinleri

Modern rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan model üç kanatlı olanıdır (Şekil 3.11). 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 rüzgâr türbini üzerinde ek bir yük getirmemektedir.

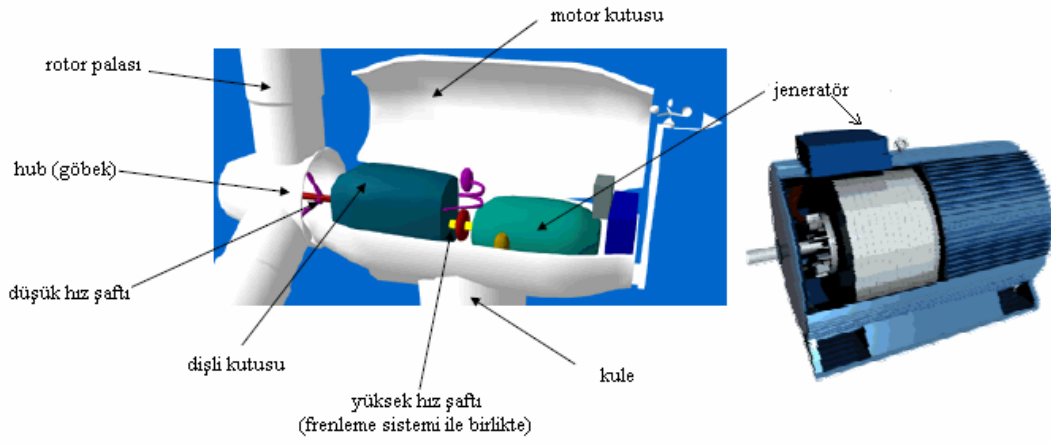


Şekil 3.11. Üç kanatlı rüzgâr türbini

3.2. Rüzgâr Türbinlerinin Parçaları

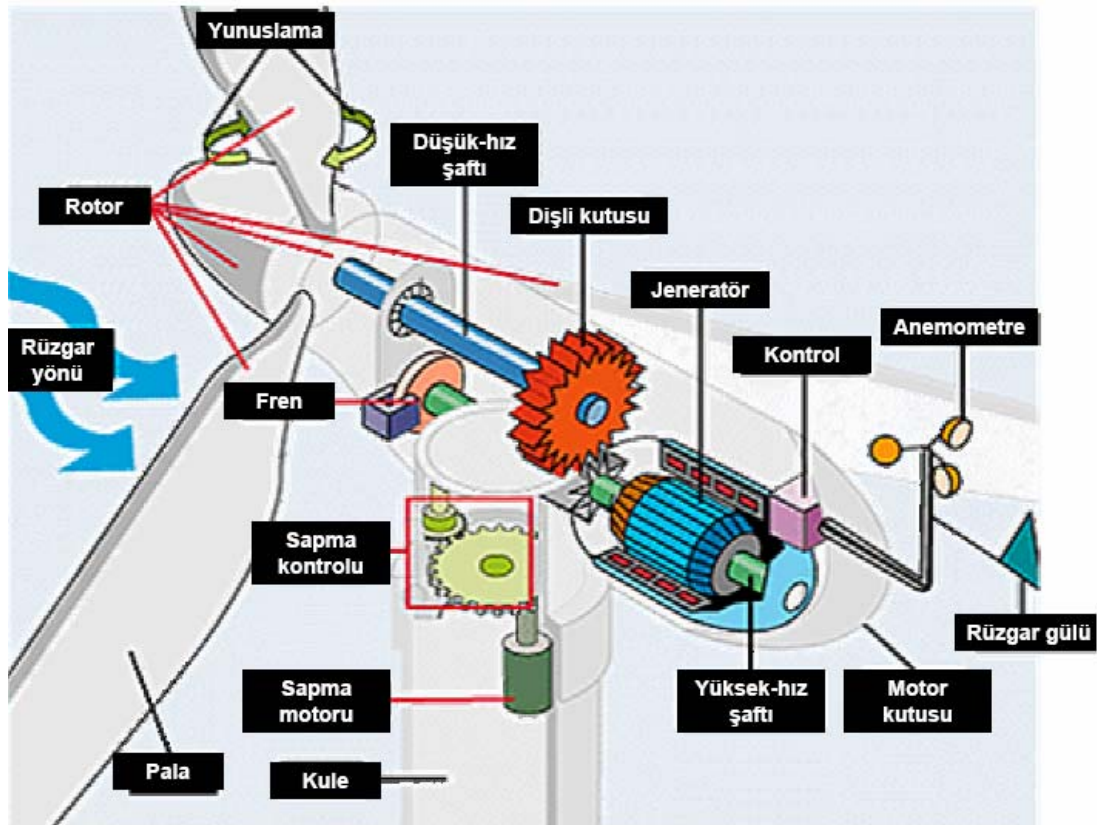
Bir rüzgâr türbini, çevredeki engellerin rüzgâr hız profilini değiştirmeyeceği yükseklikteki bir kule üzerine yerleştirilmiş gövde ve rotordan oluşur. Kanatlar ve göbek, rotor olarak adlandırılır. Rüzgârın kinetik enerjisi rotor tarafından mekanik enerjiye çevrilir ve düşük devirli ana milin dönüş hareketi gövde içerisindeki iletim sistemine, oradan jeneratöre aktarılır. Rotorun dönüş hızı sabit veya değişken olabilmektedir.

Rüzgâr türbininin en önemli parçası mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren jeneratörlerdir. Orta ve büyük güçlü sistemlerde senkron ve asenkron jeneratörler yaygın olarak kullanılırlar. Bir rüzgâr türbininde bulunan genel parçalar Şekil 3.12’de gösterilmiştir:



Şekil 3.12. Türbinin bileşenleri [23]

Bir rüzgâr türbinine ait aksamlar, Şekil 3.13'te daha detaylı biçimde gösterilmektedir:



Şekil 3.13. Bir rüzgâr türbininde bulunan aksamlar

3.2.1. Kanatlar ve kuyruk

Kanatlar; genellikle 1, 2, 3, 4 veya daha çok parçadan yapılır. Malzeme olarak paslanmaya dayanıklı galvanizli sac, ahşap veya özel karbon ile karıştırılmış kompozit malzemeler kullanılır. Kanatlar plastikle güçlendirilmiş camdan (GRP, Glass Reinforced Plastic), tahtadan, tahta laminetten, plastikle güçlendirilmiş karbon fiberden (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic), çelikten veya alüminyumdan yapılmaktadır. Dünyada yapılan çoğu kanatlarda GRP kullanılmaktadır.

Kanatlar yapılırken, reçine içine yatırılıp mukavemeti arttırılmakta ve pürüzlerin oluşmaması için vakum içinde tutulmaktadır. Küçük türbinlerin ağırlık problemini gidermek için hafif malzemeler kullanılırken, büyük türbinler için ağırlıktan çok aerodinamiklik önem taşımaktadır. İyi bir kanat için bazı kriterler vardır. Bunlar; yüksek kaldırma ve sürüklenme kuvveti, çok yüksek rüzgârlarda ani duruş veya yavaşlama karakteristiği, pürüzsüzlük, düşük gürültü karakteristiği olarak belirlenmiştir. Yakın geçmişe kadar mühendisler kanat olarak helikopter ve gemi pervaneleri kullandı. Fakat bunlar rüzgâr türbinleri için ideal değildir. Rüzgâr için kaldırma gücünü maksimum yapan ve bunun yanında ani duruşları önleyecek ve böylece sürüklenme gücünü azaltacak türbinler uygundur. Fakat bazen de yüksek hızlarda tahribatı önlemek için yavaşlatma gerekmektedir. Bunun için kanatın açısı ile oynanmakta ve kararsız kaldırma gücünün etkisi en aza indirilmektedir [24]. Şekil 3.14'de kanatlar gösterilmektedir:



Şekil 3.14. Kanatlar

Küçük rüzgâr türbinlerinde kuyruk, türbinin rüzgârı karşısına alıp konumlandırmak için kullanılır. Yamuk veya kare şeklinde bir levha olabilir. Şekil 3.15'te kuyruk gösterilmiştir:



Şekil 3.15. Kuyruk

3.2.2. Kule

Yaygın olarak kullanılan kule çeşitleri, kafes ya da tüp şeklinde ve çelik ya da beton malzemeden yapılır. Genelde, küçük ve ucuz kulelerin kenarlarından tellerle yere montesi yapılır. Modern büyük kuleler tüp şeklindedir ve kötü hava şartlarında içerisinden makine kabineye ulaşmayı sağlayabilir. Kuleler, rüzgârı iyi alacak şekilde, ama büyük rüzgârlardan da etkilenmeyecek şekilde yapılmalı ve yerleştirilmelidir. Ayrıca rotorda oluşan frekanslardan hiç birinin, kulenin rezonans frekansı olmamasına dikkat edilmelidir. Yoksa sistem çökebilir. Çok kısa kulelerin inşası, istenilen rüzgârın alınamaması ve sonuçta verimin düşük olmasını beraberinde getirir. Rüzgâr yükseklerde daha az türbülansa sahip olduğu için büyük kuleler tercih edilir. Ayrıca bina ve ağaçlarında rüzgâr akışını kesmesi engellenir. Bu yüzden büyük kanattan önce yüksek kuleler tercih sebebidir [24].

3.2.3. Rotor

Rüzgâr türbinlerinin en önemli parçası rotorlarıdır. Rotor, rüzgârın akış hızını mekanik enerjiye çevirip jeneratörün şaftına aktarmaya yarar. Rüzgâr, türbinleri daha çok uçak pervaneleri gibi çevirir. Arkaya doğru atmaya çalışmaz. Hava kanatın üstünden daha hızlı akar. Sonuçta basınç farkından dolayı hareket oluşur ve dönen kanatlar kendilerine bağlı olan jeneratörü çevirmeye başlarlar. İki çeşit rotor vardır. Birincisi, kaldırma kuvvetinin uygulandığı ve ikincisi de sürüklenme kuvvetinin uygulandığı rotorlardır. Düşük hızlı sistemler, sürüklenme kuvveti ile rotoru çevirirler ve genelde rüzgâr hızından yavaş hızla dönerler. Bu tür sistemlerde dönme momenti fazladır. Yüksek hızlarda çalışan sistemlerde hız, rüzgâr hızının bir kaç katına çıkabilir. Fakat dönme momenti düşüktür [24].

3.2.4. Vites kutusu

Rüzgâr türbinleri göreceli olarak düşük hızlarda çalışmaktadır. Kanat uç hızları tipik olarak 55–90 m/sn mertebesinde. 30 metre çapındaki bir türbinin kanatları yaklaşık 35 ila 50 devir/dakika hızla dönmektedir. Jeneratörün senkron hızında (tipik olarak 1500 devir/dakika) dönen bir şaft çıkışı için hız yükseltici vites kutusu gerekmektedir. En sık kullanılan iki vites kutusu tipi paralel şaft ve büyük bir dişli çarkın içinde dönen küçük dişli vites kutularıdır. Paralel, şaft tasarımları basit olmakla beraber göreceli olarak ağır ve şaft çıkışı ana eksenle çakışmamaktadır. Dişli çark vites kutuları daha hafif, daha düzenli ve çıkış şaftları giriş şaftları ile aynı doğrultu üzerindedir. Daha büyük rüzgâr türbinleri (çapı 25 metreden büyük) için dişli çark vites kutularının maliyet ve ağırlık üstünlükleri giderek artmaktadır.

3.2.5. Eğim donanımı

Dikey eksenli türbinlerde makine kabini, gelen rüzgârın yönüne göre çeviren bir mekanik aksam vardır. Bu aksama “eğim donanımı (rotadan sapma veya yaw hareketi aksamı)” denilir. Rüzgâr yönü, bu türbinlerde rotorun taradığı alana dik olmalıdır. Eğim donanımı sürücüsünü bir kapalı-döngü kontrol sistemi kontrol

etmektedir. Bir rüzgâr türbin kuyruğu, makine kabini tepesine yerleştirilerek, rüzgâr yönüne göre eğim donanımını ayarlaması için kontrol mekanizmasını uyarır. Eğim donanımı yüksek rüzgâr hızlarında da gücü azaltmak için makine kabini çevirir.

3.2.6. Fren sistemi

Rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olduğu için yüksek hızlarda çok büyük kuvvetler elde etmek mümkündür. Bu yüzden bir fren sistemine ihtiyaç duyulacağı açıktır. Fren sistemleri, sistemin yüksek hızlarda veya acil durumlarda güvenli bir hale getirilmesini sağlarlar. Aşırı rüzgâr hızlarında devreye giren fren sistemi, öngörülen güçten daha fazlasının üretilmesini engeller ve dolayısıyla şebekeye verilecek olan harmonik bozulmaların önüne geçmiş olur. Ayrıca aşırı hızdan dolayı meydana gelebilecek kanat, kuyruk veya diğer aparatların kopması engellenmiş olur.

3.2.7. Elektriksel aksamlar

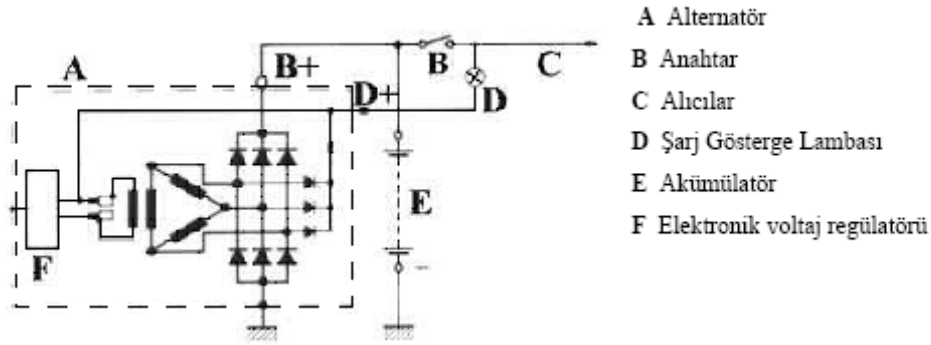
Elektrik enerjisinin üretilmesi sürecinde sistemde jeneratör, inverter, doğrultucu, akü gibi elektriksel aksamlar olmalıdır. Elektriksel aksamlar sistemin frekans, voltaj ve elde edilen sinyalin harmoniklerinin düzenlenmesi işini kurulmuş durumdadır.

3.2.7.1. Jeneratör

Rüzgâr türbinlerinden elektrik enerjisi elde etmek için iki türlü jeneratör kullanılır: İndüksiyon jeneratörleri ile değişken hızlı jeneratörler. Fırçalı veya fırçasız, bir ya da 3 fazlı olabilir. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan indüksiyon motorları, geleneksel endüstriyel indüksiyon motorlara benzerdir. İndüksiyon jeneratörlerin hızları kutup sayılarına göre değişmektedir. 4 kutup için hız 1500 devir/dakika, 6 kutup için 1000 devir/dakika ve 8 kutup için 750 devir/dakikadır [3].

3.2.7.2. Doğrultucu ve gerilim regülâtörü

Rüzgâr hızı sürekli değişkenlik gösterdiğinden üretilen gerilimin frekansı ve genliği de sürekli değişecektir. Üretilen enerji şebekeye verilmeden önce sinüs halinde ve 50 Hz frekansta olmalıdır. Bunun için önce doğrultulması gereklidir. Daha sonra ise regülâtör ile gerilim genliklerinde kararlılık sağlanmalıdır. Kullanılan üç fazlı jeneratörün, alternatif çıkış gerilimi dokuz diyottan oluşan bir doğrultucuyla doğrultulur. Doğrultucunun çıkış gerilimi elektronik voltaj regülâtörüyle düzenlenir. Doğrultucu ve gerilim regülâtörü alternatörde dâhili olarak bulunmaktadır ve elektrik devresi Şekil 3.16’da verilmektedir:



Şekil 3.16. Doğrultucu ve gerilim regülâtörü elektrik devresi

3.2.7.3. Akü

Jeneratörden çıkıp doğrultulan ve regüle edilen gerilim çeşitli gerilim ve akım değerlerindeki aküleri şarj eder. Yani bir nevi enerji depolaması yapılır.

3.2.7.4. İnverter

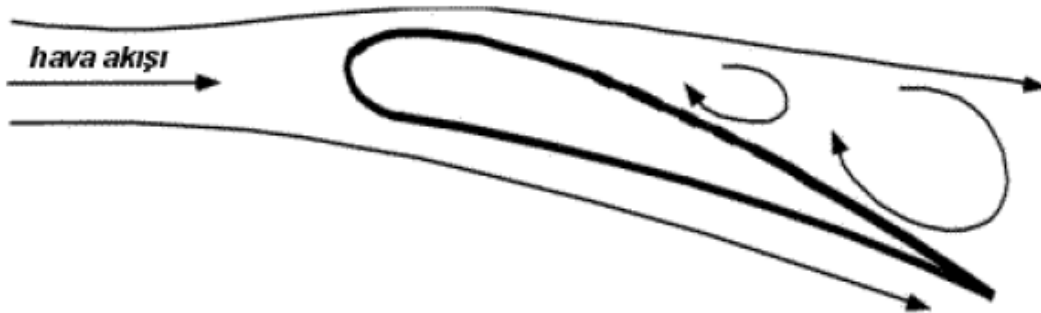
Alternatif akımla çalışan yüklerin ihtiyacını karşılamak için akü çıkışındaki doğru gerilimin alternatif gerilime çevrilmesi gereklidir. Bunun için uygun güçte inverter kullanılır. Bu uygulama için gerekli en küçük güç 1 kW olmalıdır.

3.3. Rüzgâr Türbinlerinin Güç Kontrolü

Pervane kanatlarının üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetlerden dolayı rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi dönme mekanik enerjisine çevirir. Pervane kanatlarındaki bu kuvvetler uçak kanatlarının maruz kaldığı kuvvetlere çok benzerdir. Günümüzde kullanılan modern rüzgâr türbinlerinde, iki farklı aerodinamik kontrol mekanizması kullanılır. Bunlar Stall (pasif) ve Pitch (aktif) kontrol mekanizmalarıdır. Bu iki mekanizma, jeneratörün rüzgârdan çıkarabileceği enerjiye göre ayarlanır. Eskiden çoğu küçük ve orta büyüklükte türbinler stall kontrol kullanırken, günümüzde rüzgâr türbinleri üzerinde daha etkin bir kontrolü sağlayan pitch kontrol mekanizması kullanılmaktadır. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle “stall” olayının bilinmesinde yarar vardır.

3.3.1. Stall kontrol mekanizması

Stall olayı, akışın kanat profilinin negatif basınç bölgesini aniden terk ederken meydana gelen bir durumdur. Stall meydana geldiği zaman, hücum açısı büyüyerek kaldırma kuvvetinin azalmasına, sürüklenme kuvvetinin ise artmasına neden olur (Şekil 3.17). Uçaklarda uçuş esnasında meydana gelen bu durum çok tehlikelidir. Bazı rüzgâr türbinlerinin kanatları bu durumu bir avantaj olarak kullanıp yüksek rüzgâr hızlarında pervane kontrolü için yararlanılır. Stall kontrol, rüzgâr hızı üzerinde kuvvet gösteren pasif bir kontrol sistemidir. Pervane kanatları pitch açılarında sabitlenmiştir ve yatay ekseninde dönme yapamazlar. Kanat etrafındaki hava akışı Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Stall olayının meydana gelmesi



Şekil 3.18. Profil etrafındaki hava akışı [25]

Rüzgâr türbininin sabitlenmiş pitch açısında sabit dönme hızda döndüğünü varsayalım. Rüzgâr hızı arttıkça, uç hız 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. Bu sürecin etkisi, kanat profilinin kalınlık ve kiriş dağılımının ve kanat biçiminin uygun seçimi ile yönlendirilebilmektedir [25]. Şekil 3.18’den de görüleceği gibi, nominal rüzgâr hızından yüksek rüzgâr hızlarında, profil etrafındaki hava akışı kanat yüzeyinden ayrık bir şekilde meydana gelir. Stall kontrollü rüzgâr türbinleri, pitch kontrollü rüzgâr türbinlerine 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,

Dünyada halen stall kontrollü rüzgâr türbinleri daha çok kullanılmaktadır. Türbin üreticileri basit güç kontrol sistemi ile çalışan türbinleri seçmektedir ve sabit bir pervane hızında indüksiyon (asen kron) jeneratör aracılığı ile ulusal şebekeye geçiş yapılmaktadır. Son yıllarda stall ile pitch kontrol sistemlerinin karışımı olan “aktif stall” sistemi geliştirilmiştir [1]. Bu sistemin avantajlarını şöyle saymak mümkündür:

- Çok küçük pitch açıları gerektirmesi,

- Düşük rüzgâr hızlarında bile güç kontrolünü mümkün kılması,
- Ekstrem rüzgârlarda pervane kanatlarının düşük yüklenmesi için pozisyon değiştirmesi sayılabilir.

3.3.2. Pitch kontrol mekanizması

Pitch kontrol, jeneratörden girdi işareti bekleyen aktif bir sistemdir. Pitch kontrollü rüzgâr türbinlerinde 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 rüzgârın estiği yönden hafifçe çevirerek güç kontrolü yapar. Tersi durumda da yani, rüzgâr hızı azaldığında aynı hız kontrol ve sinyal gönderme işlemi meydana gelir ve pervane bu kez rüzgârın estiği yöne doğru yönelir. Jeneratör nominal güçte (rated power) çalışırken, rüzgâr hızı düştüğü zaman pervane kanatları yatay eksenleri etrafında dönecektir; yani pitch açıları değişerek hücum açısını azaltıp hava akışının etkilerini düzenleyecektir. Nominal rüzgâr hızından yüksek hızlarda sadece nominal güçte üretebileceği kadar enerji üretilir. Fakat bu durum rüzgâr türbinine göre de değişmektedir. Bütün rüzgârlı durumlarda pervane kanadının etrafındaki hava akışı Şekil 3.19'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.19. Profil etrafındaki hava akışı [25]

Şekil 3.19'dan da görüleceği gibi, hava akışı kanat yüzeyine çok yakındır ve bu yüzden çok küçük sürüklenme kuvveti meydana gelmektedir. Pitch kontrol sisteminin başlıca avantajları arasında:

- Bütün rüzgârlı durumlarda aktif güç kontrol olanağı sağlaması,

- daha yüksek enerji üretimi,
- Pervanenin acil durumlarda durabilmesi için güçlü fren sistemi gerektirmemesi,
- Nominal gücün üzerindeki rüzgâr hızlarında pervane kanatlarına binen yükün azalması,
- Ekstrem rüzgârlarda pervane kanatlarına düşük yükleme için pozisyon değişimine olanak sağlaması,
- Kanatların hafif olmasından dolayı daha hafif bir yapıya sahip olması sayılabilir.

3.4. Türbinin Çalışma Prensibi

Rüzgâr türbinleri; bir rotor, bir güç şaftı ve rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirecek bir alternatörden oluşur. Rüzgâr, rotordan geçerken aerodinamik bir taşıma kuvveti oluşur ve rotoru döndürür. Bu dönel hareket jeneratörü hareket ettirir ve elektrik üretir. Türbinlerde ayrıca, dönme oranını ayarlayacak ve kanatların hareketini durduracak bir rotor kontrolü bulunur. Rüzgâr şiddeti yükseklikle arttığı için rüzgâr türbinleri kule tepelerine yerleştirilir. Betz yasasına göre rüzgâr türbini, rüzgâr kinetik enerjisinin en fazla %59'unu mekanik enerjiye çevirebilir. Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinlerine bu oran %10 ile %30 arasında değişmektedir. Son yıllarda bu oranı %40–50'ye çıkarmak için türbin tasarımı konusunda ciddi araştırmalar ve çalışmalar yapılmaktadır.

3.5. Pervane Hızı

Modern rüzgâr türbinleri elektrik şebekesine iki türlü bağlanabilmektedir. Birincisi, rüzgâr türbini 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 rüzgâr hızlarında) bağlanmasıdır.

3.5.1. Değişken hızlı pervaneler

Rüzgâr türbinleri için en iyi aerodinamik verimin belirlenmesinde kullanılan temel yöntem rüzgâr türbini pervane uç hızı ile (tip speed) rüzgâr hızı arasındaki oranı en iyi şekilde belirlemektir (uç hız oranı - tip speed ratio, λ). Maksimum aerodinamik verimi yakalayabilmek için pervanenin dönme hızını rüzgâr şiddetine göre değiştirmesi gerekir; yani düşük hızlı rüzgârlarda düşük şiddette pervane hızı; yüksek hızlı rüzgârlarda ise, büyük şiddette pervane hızı meydana gelmelidir. Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinlerinde bu durum ancak değişken hızlı pervane kullanımı ile mümkün olabilmektedir. Bu tip rüzgâr türbinleri, dönüştürücü sistemler ile çift beslemeli indüksiyon jeneratörler kullanırlar.

Değişken hızlı pervaneleri sabit hızlı pervanelere göre bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar; daha fazla enerji kazanımı, nominal güç işlemi sırasında çok küçük bozulmalar, hamleli rüzgârlara karşı daha düşük yüklenmeler, düşük şiddetteki rüzgârlarda daha az gürültü sayılabilir.

3.5.2. Sabit hızlı pervaneler

Sabit hızla dönen pervaneler basit yapıdadır, çünkü pervane hızı şebeke frekansına göre ayarlanır. Uç hız oranı λ , çalışma sırasında sabit kalmayabilir, yani en iyi aerodinamik verim sadece sabit bir rüzgâr hızında alınır. Dolayısıyla türbin için hesaplanmış özel rüzgâr hızı dışındaki değerlerde tam verim alınamaz. Rüzgâr türbini çalışırken en iyi aerodinamik verimliliği alabilmek için, türbin üreticileri çift-sabit hızlı indüksiyon jeneratör kullanmışlardır. Bu durum, pervane hızının iki adımda değişmesine imkân tanımaktadır. Düşük rüzgâr hızlarında jeneratör düşük hızlarda hareket ederken; yüksek rüzgâr hızlarında yüksek dönme hızları ile çalışmasını sürdürmektedir. Pervane hızının, sabit bir veya iki adımda kontrolü kolaydır. Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinlerinin büyük bir çoğunluğu sabit hızlı pervane sistemine göre tasarlanmıştır.

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.

BÖLÜM 4. RÜZGÂR ENERJİSİ KALİTESİ

4.1. Rüzgâr Türbini Güç Üretimi

Rüzgâr türbinleri rüzgâr akışının kinetik enerjisini kullanırlar. Türbinlerde bulunan pervane bozulmamış (undisturbed) rüzgâr hızını düşürerek pervane arkasında bulunan daha düşük şiddette rüzgâr hızına çevirir [23]. Çünkü pervane rüzgâr hızını yavaşlatmıştır. Hızlar arasındaki farklılık, rüzgârdan çıkarılan enerjiyi ifade etmektedir [26]. Rüzgâr türbininin rüzgârdan çıkarabileceği enerji miktarı aşağıdaki denklem ile verilir:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p \eta A V^3 \quad (4.1)$$

ρ : hava yoğunluğu (kg/m³)

η : mekanik-elektrik katsayısı

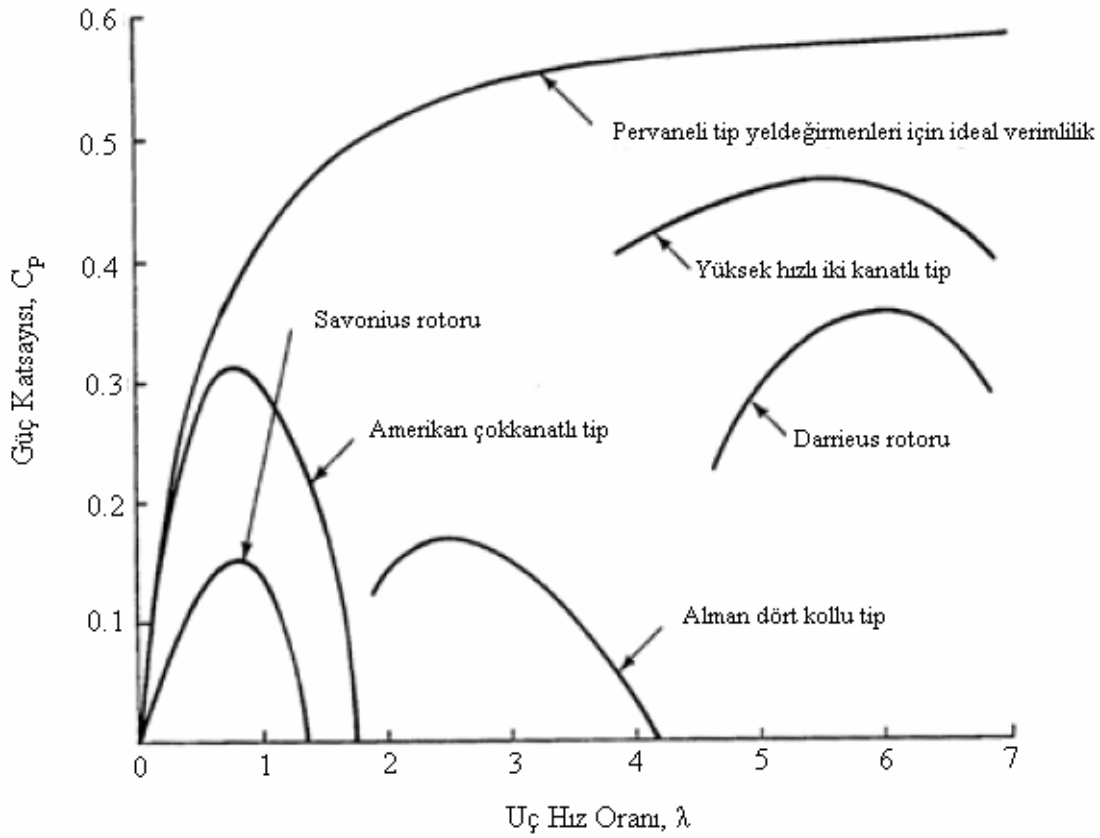
A: kanat alanı (m²)

V: pervane önünde bulunan bozulmamış rüzgâr hızı (m/sn)

C_p: Betz limiti (güç katsayısı)

İdeal şartlarda C_p' nin alabileceği maksimum değer 16/27=0.593 olmaktadır [26]. Buna Betz Limiti de denmektedir. C_p parametresi maksimum değerine pervane önündeki bozulmamış rüzgâr hızının, pervane gerisinde bulunan rüzgâr hızının 3 katı olduğu durumda ulaşır. Bu yüzden rüzgâr çiftlikleri kurulurken bu husus dikkate alınmalıdır.

Rüzgâr türbinleri farklı kanat sayılarına sahiptir. Temel kural, kanat sayısının azalması, dönüş hızının artmasıdır. Bu dönüşün ölçüsü olarak uç hız oranı denen bir parametre tanımlanmıştır. λ ile gösterilen bu oran, pervane dönüş hızının rüzgâr hızına oranı olarak tanımlanır. Eğer $\lambda = 1$ ise, pervanenin dönüş hızının rüzgâr hızına eşit olduğu görülür. Şekil 4.1'de λ ile C_p arasındaki ilişki gösterilmiştir [27].



Şekil 4.1. λ - C_p ilişkisi [27]

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri dönüştürme tekniğinin basit, işletim ve bakımının kolay olması nedeniyle, diğer enerji kaynakları arasında ayrı bir avantaja sahiptir.

4.2. Rüzgâr Santralleri Teknolojisi

Dünyada rüzgâr santrallerinin kurulu gücünün artışıyla birlikte değişken üretim yapan yenilenebilir kaynaklardan üretim yapan bu üretim tesislerinin şebeke işletimi üzerindeki etkilerinin anlaşılması önem kazanmaktadır. İletim Sistemi İşletmecileri, farklı rüzgâr türbin tiplerinin sisteme olan bozucu etkileri ve bunların, kararlı sistem işletme koşullarının sağlanmasını destekleyen konvansiyonel santrallerden farklılıkları üzerinde dikkatlerini yoğunlaştırmaktadır. Bazı ülkelerdeki rüzgâr santralleri türbinlerinin kullanılan farklı teknolojilere göre dağılımı Tablo 4.1'de sunulmaktadır.

Tablo 4.1. Kullanılan jeneratör tiplerinin ülkelere göre değişimi

Jeneratör Tipi	Almanya	Danimarka	İspanya
Sincap Kafesli	46	77	40,5
Wound rotor	0	12	0
Doubly fed	19	11	58
Senkron	34	0	2,5

4.2.1. Sincap kafesli indüksiyon jeneratörleri

Sincap kafesli indüksiyon jeneratörleri, asenkron makinelerdir. Sincap kafesli rotor ve şebekeye doğrudan bağımlı (coupled) 3 sargılı statordan oluşur. Rüzgâr türbini rotoru ile jeneratör birbirine bağımlı olup bunların arasında dişli mekanizma bulunmaktadır. Bilindiği gibi sincap kafesli indüksiyon jeneratörleri, sabit hızlı rüzgâr türbinleri olup, türbin rotoru artan rüzgâr hızıyla birlikte verimliliği düşürecek şekilde tasarlandığından rüzgârdan elde edilecek güç sınırlandırılmaktadır. Bu jeneratörler reaktif güç tüketirler, gerilim kontrolüne katkıda bulunamazlar. Bağlantı noktasında gerilim düşüşünü engellemek için kapasitörler kullanılması gerekmektedir.

4.2.2. Rotoru sargılı indüksiyon jeneratörleri

Rotoru sargılı indüksiyon jeneratörleri, back-to-back gerilim kaynağı elektronik güç çeviricisi üzerinden şebekeye bağlıdır. Çevirici, ikaz sistemini kontrol etmekte, mekanik frekansın ve elektriksel rotor frekansının birbirinden bağımsız (decoupled) olmasını, ancak şebeke ile rotor frekansının birbiriyle uyumlu olmasını sağlamaktadır. Sabit hızlı jeneratörlerdeki gibi rüzgâr türbin rotoru dişli mekanizma üzerinden jeneratöre bağlıdır.

4.2.3. Senkron jeneratörler

Senkron rüzgâr jeneratörlerinin en önemli özellikleri stator sargılarına bağlı elektronik güç çeviricisi ile şebekeden tamamen bağımsız olmalarıdır. Çevirici, şebeke tarafında gerilim kaynağı çeviricisi ve jeneratör tarafında da doğrultucu veya

gerilim kaynağı çeviricisinden oluşmaktadır. Senkron jeneratör, ikaz sistemi veya mıknatıs (permanent magnet) ile uyarılmaktadır.

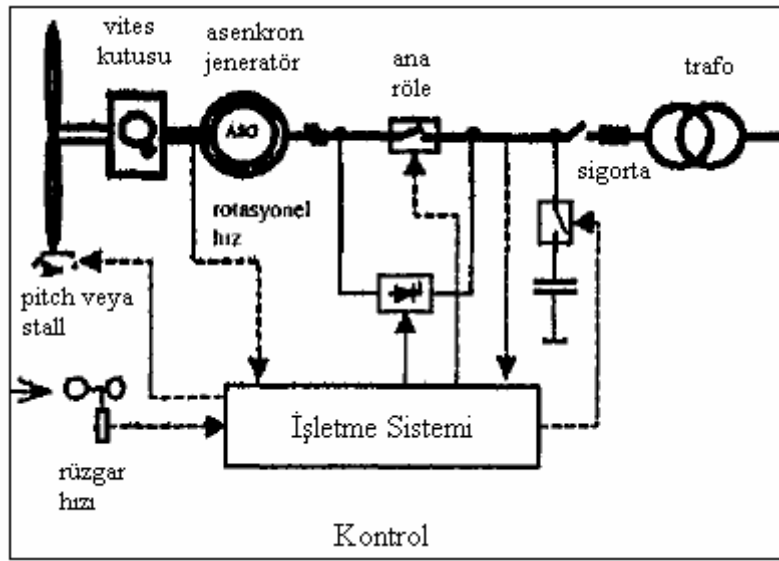
4.3. Rüzgâr Türbinlerinin Şebekeye Bağlantısı

Rüzgâr türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisi mevcut elektrik şebekesine verilmektedir. Her ülkenin kendi sistemine göre değişmekle birlikte genel olarak 300 kW'a kadar olan küçük rüzgâr türbinleri alçak gerilim sistemine, 10–15 MW'a kadar olan küçük ve orta büyüklükteki rüzgâr santralleri orta gerilim sistemine, 15 MW'tan daha büyük rüzgâr santralleri ise yüksek gerilim sistemine bağlanmaktadır (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Gerilim sistemi çeşitleri ve rüzgâr türbini kapasiteleri [28]

Gerilim Sistemi	Bağlanacak Santral Kapasitesi
Alçak Gerilim Sistemi	Küçük ve orta kapasitede rüzgâr türbinleri (300 kW' a kadar)
Orta Gerilim Sistemi	Orta ve büyük kapasiteli rüzgâr türbinleri ile 10–15 MW' a kadar rüzgâr santralleri
Yüksek Gerilim Sistemi	Büyük güçlü rüzgâr santralleri (>15 MW)

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan dönüşüm sistemlerini üç gruba ayırmak mümkündür. Bunlar, sabit hızlı makinalar, bir veya iki hızlı makinalar ile değişken hızlı makinalardır. Rüzgâr türbinlerindeki enerji dönüşümü sırasında kullanılan üç temel eleman, pervane, vites kutusu ve jeneratördür. Pervane, rüzgâr 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 bağlıdır (Şekil 4.2). Sabit hızlı rüzgâr türbininin 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 4.2. Sabit hızlı jeneratörün şebekeye bağlanması [29]

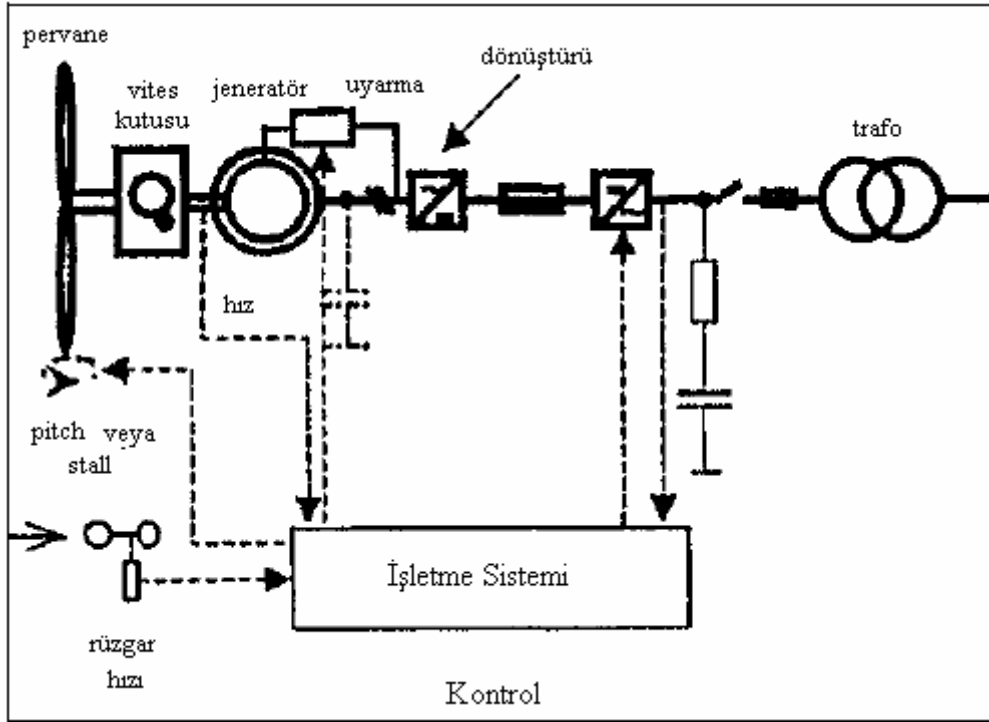
Şebekenin frekansı jeneratör ve dolayısı ile pervane hızını belirler. Pervanenin düşük dönme hızı olan n_{pervane} , jeneratörün dönme hızı olan $n_{\text{jeneratör}}$ 'e çevrilir. Bu işlemler vites kutusu yardımı ile ve iletim oranı r ile beraber yapılır. Jeneratör hızı, kutup sayısı p ile şebeke frekansına ($f_{\text{şebeke}}$) bağlıdır, izleyen eşitliklere bakılırsa konu daha iyi anlaşılabilir olacaktır [29]:

$$n_{\text{pervane}} = \frac{n_{\text{jeneratör}}}{r} \quad (4.2)$$

$$n_{\text{jeneratör}} = \frac{f_{\text{şebeke}}}{p} \quad (4.3)$$

$$n_{\text{pervane}} = \frac{f_{\text{şebeke}}}{r \cdot p} \quad (4.4)$$

Değişken hızlı makinalarda, jeneratör şebekeye elektronik bir dönüştürücü veya jeneratör uyarıcı bir sistem vasıtası ile bağlanmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Değişken hızlı jeneratörün şebekeye bağlanması [29]

Rüzgârdan üretilen elektrik enerjisinin şebekeye aktarılmasında temel unsur, enerjinin iletim ve dağıtım şebekesine verimli entegrasyonudur. Rüzgârın kesikli ve değişken olan yapısı, sistem bağlantı noktasında sürekli gerilim yükselmesi, ani gerilim değişimleri, kırpışma (flicker), harmonikler ve gerilim dengesizliği gibi şebeke kararlılığını etkileyen bazı bozucu etkilere sebep olabilmektedir. Bu etkiler özellikle şebekenin zayıf olduğu yerlerde türbinlerin artan sayılarda şebekeye bağlanmasında kısıtlayıcı faktör olmaktadır. Bununla birlikte bu etkiler; şebeke kararlılığına katkı sağlayan türbinlerin seçimi, mevcut sistemdeki hatların ve kullanılan teçhizatın güçlendirilmesi, gerekirse yeni hatların tesisi ile en aza indirilebilir.

Şebeke bağlantısı açısından AB (AB-15) ülkelerinin durumu incelendiğinde; bazı ülkelerde rüzgâr enerjisi sistemlerinin şebekeye bağlanmasında sorunla karşılaşmazken bazılarında önemli zorluklar yaşandığı görülmektedir. Rüzgârdan üretilen elektrik enerjisinin şebekeye bağlanması konusunda karşılaşılan engeller açısından AB ülkelerinin durumu Tablo 4.3'te verilmektedir.

Tablo 4.3. Rüzgârdan üretilen elektrik enerjisinin şebekeye bağlanması konusunda karşılaşılan engeller açısından AB ülkelerinin durumu [30]

Şebeke Engellerinin Durumu	AB-15 Ülkeleri
Engel bulunmayan ülkeler	Almanya, Danimarka, Finlandiya, Hollanda, İspanya, İsveç
Orta seviyede engel bulunan ülkeler	Avusturya, Belçika, İngiltere
Güçlü engel bulunan ülkeler	Fransa, İrlanda, Portekiz, Yunanistan
Yeterli bilgi olmayan ülkeler	İtalya, Lüksemburg

Rüzgâr enerjisinin kesikli olan yapısı değişkenlik ve tahmin edilebilirlik konularında araştırmalar yapılmasına yol açmış ve bu araştırmalar neticesinde rüzgâr santrallerinin üretilen enerjinin önceden tahmin edilmesi için yeni teknikler geliştirilmiştir. Ancak bu konuda geliştirilen teknikler ve programlar henüz çok yenidir. Bu konuda sağlanacak gelişmeler, sistemdeki rüzgâr gücünün artmasına, sistem işleticilerinin de tahmin hatalarının azalmasına ve rüzgâr enerjisinin daha güvenilir bir kaynak haline gelmesine neden olacaktır.

4.4. Güç Kalitesi ve Şebeke Etkileşimi

Güç kalitesi demekle rüzgâr türbininin elektrik enerjisi üretim performansı ile şebeke üzerine yapacağı etkiler kastedilmektedir. Rüzgâr santrali kurulurken zayıf şebeke ve iletim hatlarının bulunduğu bölgelerden kaçınılmalıdır. Rüzgâr türbininin şebekeye yapacağı etki genellikle gerilim değişimi (artış veya azalış) şeklinde kendini gösterecektir. Bu durum aşağıdaki biçimlerde olur [29]:

- Harmonik (>50 Hz),
- Flicker (0.01-35Hz),
- Gerilim artışı (<0.01 Hz),
- Ani değişimler (rastgele değerler).

Gerilim değişimlerine ek olarak rüzgâr türbininin şebekeden reaktif güç çekmesi de şebeke için istenmeyen bir durumdur. Güç üretimi, türbülans yoğunluğu ve rüzgâr kayması gibi olaylar arazi yapısı ve meteorolojik koşullara bağlıdır. Aktif ve reaktif gücün üretimi ve tüketimi sırasında gerilim yükselmesi ve düşmesi meydana gelebilir.

Gerilim değişimlerinden meydana gelebilecek aksaklıklar Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Bu gerilim değişimleri, güç ve şebeke empedansından faydalanılarak hesaplanabilir. Flicker, gerilimde 35 Hz' e kadar meydana gelen salınımı ifade etmektedir.

Tablo 4.4. Gerilimde meydana gelen değişiklikler ve neden olduğu aksaklıklar [29]

Parametre	Neden Olduğu Aksaklık
Gerilim yükselmesi/düşmesi	Güç üretimi
Gerilim salınımları ve flicker	Devreye giriş, kule gölgeleme etkisi, rüzgâr kayması, rüzgâr hızı, türbülans yoğunluğu, yönerge hatası
Harmonik	Frekans dönüştürücü, tristör kontrolü
Reaktif güç tüketimi	Jeneratör işlemleri
Gerilim uç değerleri (ekstremleri), ani değişimler (transient)	Açılıp-kapanma (switching) işlemleri

Ülkemizde, rüzgâr santrallerinin ulusal şebekeye bağlanırken dikkat edilmesi gereken temel noktada, santralin kapasitesinin bölgede bulunan trafo kısa devre gücünün %5'ini geçmemesidir [25].

4.5. Rüzgâr Santrallerin İletim ve Dağıtım Sistemine Etkileri

Türkiye'de rüzgâr kaynağı açısından cazip olan yerler, genellikle bölgesel tüketimin düşük olduğu kıyı bölgelerinde yer almaktadır. Bu alanlar hat kapasiteleri sınırlı olan şebekenin zayıf uç noktalarıdır. Rüzgâr santrallerinin sisteme bağlandıkları noktada şebeke kararlılığını etkileyen ani gerilim değişimi, flicker, harmonik gibi bazı bozucu etkiler yapması sebebiyle TEİAŞ tarafından bağlanacak kapasite ile ilgili bazı kısıtlamalar getirilmektedir. Limit, bağlantı noktasındaki sistemin kısa devre gücünün %5'ine kadardır. Bu durum, söz konusu bölgelerdeki yüksek potansiyelin değerlendirilmesinde sorun teşkil etmektedir.

Rüzgâr santrallerinin sisteme bağlantısında bozucu etkiler kadar önemli diğer bir unsur da bağlantı noktalarında iletim kapasitesinin yetersiz kalabilmesidir. Türkiye'de rüzgâr kaynağı açısından elverişli olan kıyı bölgelerindeki iletim/dağıtım sistemi, bölgenin tüketimi kadar güç ve enerji taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Rüzgâr santrali başvurularının yoğun olarak yapıldığı bölgeler Çanakkale, İzmir, Balıkesir, Bandırma ve Hatay illeri çevresidir. Bu yerlerde özellikle iletim sistemine büyük güçte rüzgâr santrali bağlanması durumunda üretilecek elektrik enerjisini

sistemin güçlü tüketim noktalarına taşımak için yeni iletim sistemleri gerekmektedir. Bunun için ya bağlantı noktası ile sistemin güçlü tüketim noktaları arasındaki iletim sisteminin yeni hatların tesisi ile güçlendirilmesi ya da bağlantının doğrudan uzun iletim hatlarıyla yapılması gerekmektedir.

Enterkonnekte sistemden tüketiciye sunulan elektrik enerjisinin arz kalitesinin korunması amacıyla; Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği ile Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde tanımlanan sınırlar içinde sistem frekansının nominal değer olan 50 Hz'de tutulabilmesi için üretim yedeği bulundurulmaktadır. Sistem işletimi sırasında sisteme eklenecek rüzgâr santralleri ve belirsizlik arz eden üretiminin, tutulan yedeği aşması halinde, primer ve sekonder frekans kontrol yedeğinin artırılması gerekecektir. Bu da gerekenden daha fazla güvenilir üretim yatırımı yapılması ve işletme giderlerinin artması anlamına gelmektedir. Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde “rüzgâr hızının belirli limitleri aşması durumunda rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinin otomatik olarak devre dışı kalma özellikleri dikkate alınarak sistemde ani gerilim değişimi ve frekans dalgalanmalarını önlemek amacıyla sistem döner yedeği miktarını aşmayacak kurulu güçte rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisi bağlantısına izin verilir” ibaresi geçmektedir. Mevcut durumda en büyük ünite kurulu gücüne göre (770 MW) sıcak yedek bulundurulmakta ve TEİAŞ tarafından hazırlanan raporda sistem emniyeti için tutulan sıcak yedek miktarını aşmayacak kadar üretim yapan rüzgâr santrali kurulması ekonomik nedenlerle uygun görülmektedir.

4.6. Rüzgâr Türbinlerinin Arz Güvenliği ve Kalitesi Üzerindeki Bozucu Etkileri

4.6.1. Reaktif güç üretimi ve gerilim kontrolü

Sincap kafesli indüksiyon jeneratörleri için rotor hızı, aktif güç, reaktif güç ve gerilim arasında sabit ilişki bulunur. Bu sebeple bu tip türbinler gerilim kontrolünü reaktif güç çıkışıyla yapma imkânına sahip değildir. Gerilim çıkışının kontrolü için kontrol edilebilir reaktif üretebilecek ilave teçhizatın tesisi gerekmektedir. Değişken karakteristikli (aniden dalgalanan) rüzgâr ile üretim yapan sabit hızlı türbinler şebekede flickere (türbinin ürettiği dalgalı güç çıkışına bağlı olarak şebeke

geriliminde oluşan gerilim dalgalanmaları) neden olmaktadır. Değişken hızlı türbinler, reaktif güç çıkışlarını ayarlayarak gerilim kontrolü yapabilmektedir. Ancak söz konusu gerilim kontrolü yeteneği çevirici ve kontrol sistemlerinin kapasiteleriyle sınırlıdır. Genel olarak rüzgâr türbinlerinin özellikle şebekenin zayıf olduğu uç noktalarında gerilim sorununa neden olacağı dikkate alınmalıdır.

4.6.2. Kısa devre arızası durumunda rüzgâr türbinlerinin tepkisi

Şebekede meydana gelen herhangi kısa devre arızası sonrasında gerilim düşümü oluşur ve sistemde ilerleyerek rüzgâr santrallerine kadar ulaşır. Rüzgâr santralına ulaşan gerilim düşümünün karakteristiği, arızanın yerine, tipine, bölgedeki senkron jeneratörlerinin sayısına ve kurulu gücüne ve bunların gerilim kontrolüne katkıda bulunmak için üretecekleri reaktif güç çıkışı miktarına dayalı olarak farklılıklar göstermektedir.

Rüzgâr santrali kurulu gücünün fazla, senkron santral kurulu gücünün de az olduğu bölgelerde, gerilim düşümü son derece önemli sorunlara sebep olmaktadır.

Alışıldığı üzere, gerilim düşüşü olduğunda rüzgâr santralleri (saniyeler içinde) hızla sistemden ayrılmaktadır. Elektronik güç çeviricilerin arıza akımlarından korunması amacıyla, bağlantı noktasındaki gerilim şebeke geriliminin %10–20 altına düştüğünde, jeneratör salınımlarının yol açacağı gerilim dalgalanmalarının ve jeneratörler tarafından şebekeden aşırı reaktif güç çekişinin önlenmesi için rüzgâr santralleri sistemden ayrılmaktadır.

Sincap kafesli makineli bir rüzgâr türbinine gerilim düşüşü ulaştığında, aktif mekanik güç sabit kalmakta, üretilen aktif güç azalmakta, jeneratör hızlanmakta, akım ve reaktif güç tüketimi önemli ölçüde artmakta, indüksiyon jeneratörünün tüketimini kompanze etmek amacıyla kurulmuş olan kapasitörler tarafından üretilen reaktif güç hızla azalmakta ve iletim/dağıtım hatlarında reaktif güç kayıpları artmaktadır. Makine, atalet sabitinin (inertia) küçük olması durumunda, çok çabuk hızlanmaktadır. Arıza temizlendikten sonra, makinenin hızlanmış olmasına bağlı olarak aktif güç çıkışı arıza öncesindeki değerinden daha fazla olma eğilimindedir.

Ancak bu durumda daha yüksek akımlar gerekecek, hat ve trafolarında daha fazla gerilim düşüşü olacak ve indüksiyon jeneratörü arıza öncesi gerilimi sağlayamayacaktır. Sonuç olarak, aşırı akım koruma sistemi nedeniyle makine trip edecektir.

Sincap kafesli indüksiyon makinelerinin ilk 100 mili saniye için kısa devre arıza akımına katkısı, senkron jeneratörlere oldukça benzemektedir. Ancak bu tip rüzgâr türbinlerinin arıza temizlendikten sonra aşırı reaktif tüketerek gerilim kararsızlığına (instabilite) neden olması senkron makinelerden farklı bir davranıştır. Arıza süresi uzadıkça ve rüzgâr santrali şebekenin zayıf olduğu bir bölgede bulunuyorsa, gerilim kararsızlığı riski (ve rotor hızı kararsızlığı) artmaktadır. Normalde gerilim veya rotor hızı kararsızlığı olmadan önce aşırı akım koruma sistemi devreye girmektedir.

Rotoru sargılı indüksiyon jeneratörlü türbinler de kısa devre arıza akımına katkıda bulunurlar. Günümüzde, aşırı akıma çok duyarlı olan elektronik güç çeviricileri koruma sistemleri, arıza durumunda şebekeden hızla ayrılmayı sağlamaktadır. Bir çözüm olarak bazı durumlarda rotor tarafındaki çeviriciyi, aşırı rotor akımlarından korumak için, arıza sırasında rotor bypass edilmektedir. Buna “crow bar”/manivela koruma denilmektedir. Rotor akımının sınırlandırılması, makinenin hız-tork karakteristiğinin etkilenmesi amacıyla rotor tercihen direnç üzerinden by-pass edilebilir. Makine hızlanabilir ve şebekeden önemli miktarda reaktif güç çekebilir. Ancak gerilim düzelmedikçe, makine çok hızlı olarak sistemden ayrılacaktır [4].

Elektronik çeviricinin kapasitesine bağlı olarak, senkron jeneratörler kısa devre arıza akımına katkıda bulunmaktadır. Eski çeviricilerin çoğu, ucuz olmalarının sağlanması için, en çok nominal akım değerine dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çeviriciler (ve kontrol sistemleri) arıza akımını nominal akım değeriyle sınırlandırmaktadır. Mevcut durumda, senkron jeneratörler arıza durumunda hızla şebekeden ayrılmaktadır.

Rüzgâr santrallerinin kurulduğu bölgede, arıza sonrası (gerilim düşümü nedeniyle) bütün rüzgâr santrallerinin aniden devre dışı olması, bölgede önemli bir üretim

açığına sebep olmaktadır. Bu, sistem emniyeti, arz güvenliği ve kalitesi açısından büyük olumsuzluklara neden olabileceğinden, istenen bir durum değildir.

Sonuç olarak Arz Güvenliği ve Kalite Yönetmeliği'nde de yer alan (Madde 7-k), rüzgâr santrallerinin arıza ve arıza sonrası sağlaması gereken tepkinin, arıza sonrasında belirli süre ve büyüklükte gerilim düşüşü olmasına rağmen sisteme bağlantılarını sürdürebilme ve şebekenin toparlanmasına katkıda bulunma yeteneğinin bulunması gerekmektedir [14].

4.6.3. Frekans kontrolü

Değişken karakteristikli rüzgâr enerjisi ile üretim yapan rüzgâr santrallerinin primer frekans kontrolüne katkıda bulunması mümkün görülmemektedir. Ancak, frekanstan bağımsız (frequency independent mode) işletme prensibiyle çalıştırılmadıkları sürece frekans kontrolüne katkıda bulunamazlar. Teknik olarak bazı rüzgâr türbinleri (blade control) nominal çıkış gücünün altında işletilmesi durumunda frekans kontrolüne katkı yapabilmektedir. Frekansın yükselmesi durumunda rüzgâr santrallerinin güç çıkışının azaltılması veya sınırlandırılmasıyla problemlerin önüne geçilebilir.

Rüzgâr türbinlerinin sebep olduğu güç dalgalanmaları ancak konvansiyonel santrallerle dengelenebilmektedir. Şebeke arızası veya aşırı rüzgâr hızı nedeniyle santralin durması gibi nedenlerle rüzgâr santrali üretimindeki beklenmeyen ani kayıplar için yeterli yedek kapasite ayrılması gerekmektedir. Artan rüzgâr santrali kurulu gücünün sebep olacağı frekans dalgalanmalarının ilgili yönetmeliklerdeki sınırlar içinde tutulabilmesi için yedekte tutulan konvansiyonel santrallerin artan sistem gereksinimlerine cevap vermesi gerektir [4].

4.7. Rüzgâr Santrallerinin Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri

Değişken üretim yapma karakteristikleri nedeniyle rüzgâr santralleri konvansiyonel santrallerden çok farklıdır. Rüzgâr santralleri toplam kurulu gücü arttıkça sistem üzerindeki bozucu etkileri ve bunların sebep olacağı tehlike de artmaktadır. Rüzgâr

santrallerinin arz güvenliği ve kalite kriterlerine bozucu etkileri incelenerek rüzgâr santrallerinin bölgesel etkileri ve şebeke etkileri ayrı ayrı değerlendirilmektedir.

Bölgesel etkiler, her bir santralin bağlı olduğu trafo merkezinde diğer rüzgâr santrallerinden bağımsız olarak görülmektedir. Rüzgâr santrallerinin şebekeye olan toplu bozucu etkileri sonucunda ise bütün sistem rahatsız olmaktadır. Bölgesel bozucu etkiler:

- İletim hatlarında ve trafolarında akışlarda, trafo merkezlerinde gerilimlerde değişiklikler,
- Koruma sistemleri, kısa devre arıza akımları ve şalt tesislerinde değişiklikler,
- Arz kalitesinde değişiklikler (Harmonik, fliker...) olarak özetlenmektedir.

İlk iki konu yeni bir rüzgâr santrali bağlantı başvurusu yapılması durumunda incelenmektedir. Bu çalışmalar, sadece rüzgâr santrallerine mahsus olmayıp genel olarak tüm santral bağlantı başvurularında standart olarak yapılmaktadır. Ancak rüzgâr santrallerinin arz güvenliği ve kalitesine yerel etkileri türbin tipine göre (sabit hızlı veya değişken hızlı) farklılık göstermektedir. Arıza akımlarına rüzgâr türbinlerinin katkısı üç rüzgâr türbin tipi için de farklılık göstermektedir. Arz kalitesiyle ilgili olan üçüncü konu da kendi içinde ikiye ayrılmaktadır: Harmonikler, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan elektronik güç çeviricilerinden kaynaklanmaktadır. Fliker, sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin, mekanik dalgalanmaları elektriksel çıktıya aynen yansıtılmalarının sonucunda oluşmaktadır.

Şebekeye olan bozucu etkileri arasında:

- Sistem dinamiği ve kararlılığı,
- Reaktif güç kontrolü ve gerilim,
- Frekans kontrolü ve konvansiyonel santrallerde sık sık yük alma/yük atma sorunları bulunduğu bildirilmektedir.

Rüzgâr santrallerinin sistem dinamiği ve kararlılığı (stabilitesi) üzerindeki bozucu etkileri, bu santrallerin türbinlerindeki jeneratör sistemlerinin konvansiyonel

santrallerdeki senkron jeneratörlerden farklı olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu jeneratörlerin bağlantı noktasındaki gerilim ve frekansa bağlı tepkileri, diğer senkron jeneratörlerden farklılık göstermektedir. Değişken hızlı türbinlerin elektronik güç çeviricileri, gerilim düşümüne bağlı aşırı akımlara çok duyarlı olduğundan, küçük bir gerilim düşümünde bile bir bölgedeki rüzgâr santralleri topluca trip edebilmekte, bu durumda şebekede çok önemli sorunlara yol açabilecek sistem kararlılığının korunması konusunda problemler meydana gelmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin reaktif güç üretimi ve gerilim kontrolü üzerindeki etkileri:

- Rüzgâr türbinlerinin reaktif güç çıkışı (bütün rüzgâr türbinleri değişken reaktif güç çıkışı kapasitesine sahip değildir) kapasitesine,
- Rüzgâr santrallerinin (konvansiyonel santraller şebekenin gereksinim duyduğu yerlere kurulabilmektedir) tesis edileceği yere,
- Şebekeye (Rüzgâr türbinlerinin çıkış gerilimleri göreceli olarak daha düşük olup, şebekenin genellikle zayıf olduğu uzak noktalarda kurulmaktadır. Bu nedenle gerilim kontrolüne katkıda bulunmazlar. Bölgede konvansiyonel senkron jeneratörlerin yerine büyük kurulu güçte rüzgâr santralı tesis edilmesi teklif edilmesi durumunda, bölgedeki gerilim kontrolü yönetiminin dikkatle incelenmesi gerekmektedir. Bazı durumlarda, reaktif güç üretecek senkron kompanzator -must run conventional power plants- tesisi, FACTS -Flexible AC Transmission Systems- tesisi, bütün rüzgâr santrallerinin aktif gerilim kontrolüne katılım kapasitesine sahip olmasının sağlanması gerekmektedir) uyumluluğuna bağlı olarak değişmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin frekans kontrolü ve yük eğrisinin takibi (load following) konularına etkileri:

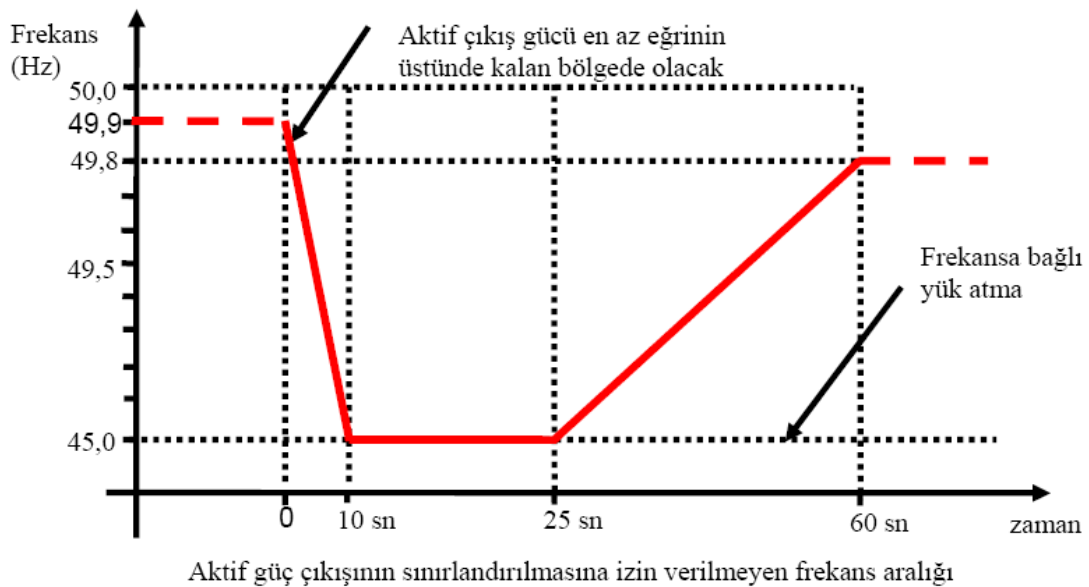
- Rüzgâr santrallerinin kontrolsüz ve dalgalı karakteristikli rüzgâr enerjisine dayalı üretim yapmaları nedeniyle, üretim programının yapılamaması (12-72 saat sonrası tahminlerdeki belirsizlik), tahmin edilebilen ve tahmin edilemeyen (kısa devre arızası, rüzgârın fazla hızlı esmesi nedeniyle santralin trip etmesi) üretim dalgalanmalarının dengelenmesi ve yük eğrisinin izlenmesi için yeterli yedek konvansiyonel santral bulundurulması,

- Rüzgâr santrallerinin frekans üzerindeki bozucu etkilerini kompanze etmek, üretim dengesizliklerini gidermek ve yük eğrisini takip etmek için ayrılan konvansiyonel santrallerden oluşan yedek jeneratörlerde, artan rüzgâr santrali kurulu gücü nedeniyle, teknik yeteneklerinin artırılması gerekmektedir. Sistem frekansının ilgili yönetmeliklerdeki kriterlere uygun sınırlar içinde tutulabilmesi için yedek konvansiyonel santrallerin çok daha hızlı ve daha yüksek kapasitede (tepki süresi kısa ve ulaştığı üretim miktarı yüksek - ramping capacities) devreye alınmalarının sağlanması gerekli görülmektedir.

4.8. Rüzgâr Santrallerinin Şebekeye Bağlantısı için İlave Teknik Şartlar

4.8.1. Anormal frekans ve gerilimler

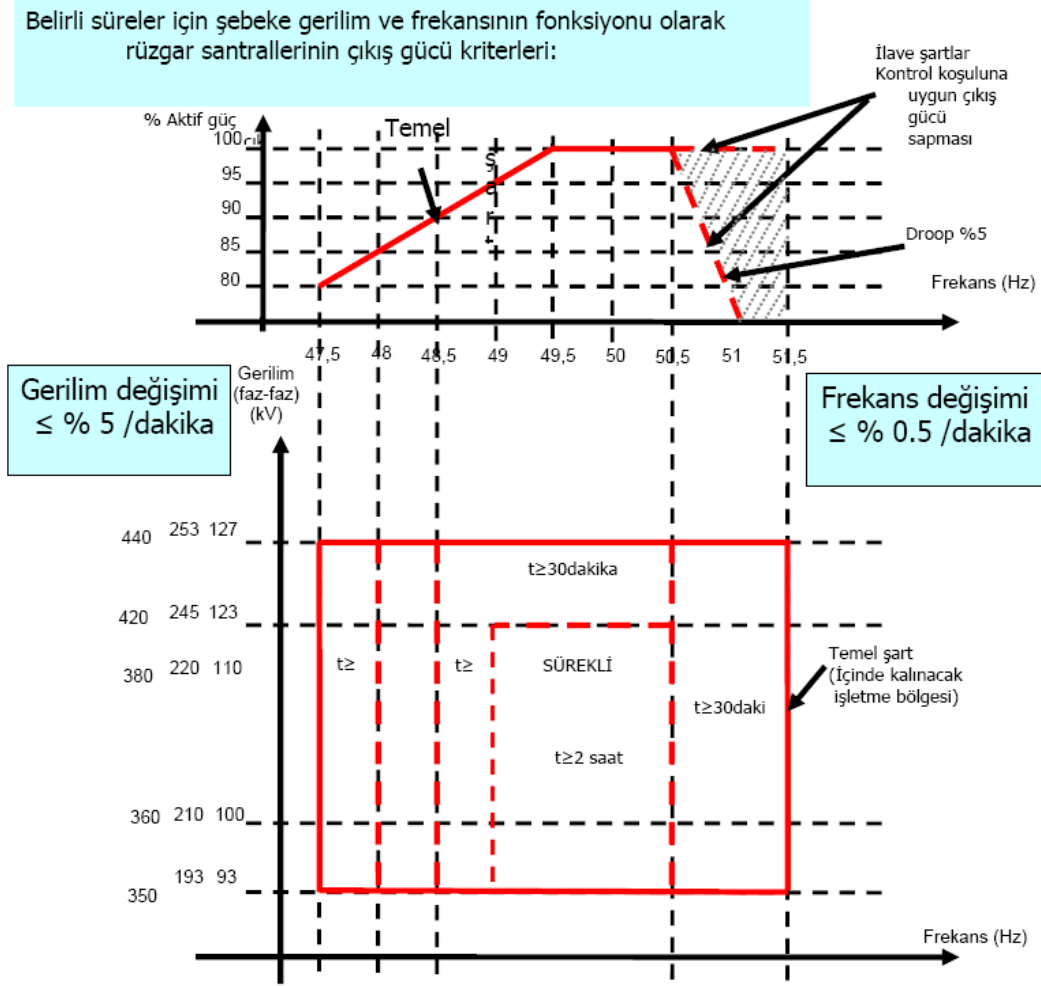
Anormal frekans ve gerilimler için rüzgâr santralleri de diğer santraller gibi Şekil 4.4'te bulunan grafikteki çalışma şartlarını sağlamaları gerekmektedir.



Şekil 4.4. Anormal frekanslar için çalışma şartları [31]

Koyu çizgiyle belirlenmiş bölgenin üstündeki frekanslarda aktif güç çıkışının azaltılmasına izin verilmemektedir. Daha büyük frekans sapmaları üretim azaltılmasına neden olabilir; ancak frekans düşmeden önce en çok çıkış gücünün

%15'ine kadar üretim azaltılmasına izin verilmektedir. Bu işlemle ilgili süre kısıtlamaları da Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Anormal gerilim ve frekansta rüzgâr santrallerinin işletme şartları [31]

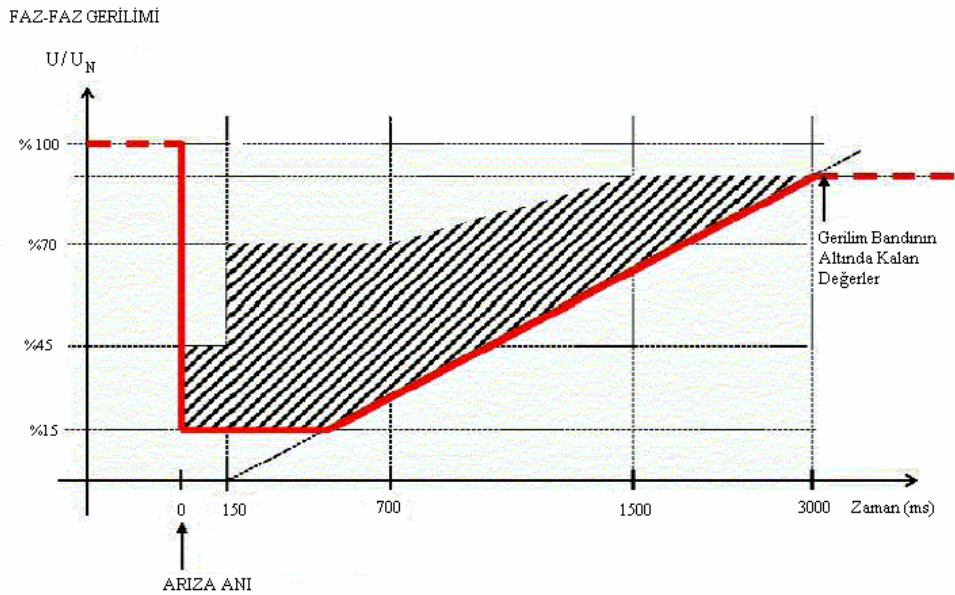
Yukarıda sunulan Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'teki şartlar şebekeye bağlanacak rüzgâr santralleri tarafından karşılanacaktır. Bu konudaki çalışmalar sürdürülmekte olup ilave şartlar daha sonra belirlenerek UCTE üyeleri tarafından daha sonra ilgili yönetmeliklere eklenecektir. Yenilenebilir enerji santralleri genellikle şebekeden ayrıldıktan sonra izole çalışma koşulundan muaf tutulmakta sistemin toparlanmasına katkıda bulunmamaktadır.

4.8.2. Arz kalitesi

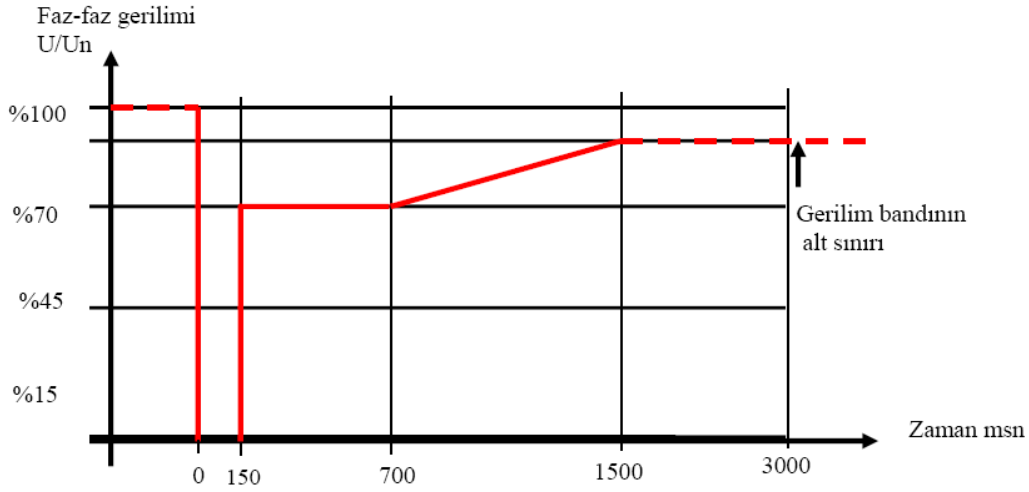
Arz kalitesinin sağlanması için rüzgâr santrallerinin sebep olduğu bozucu etkilerin sınırlandırılması gerekmektedir. Ani gerilim değişiklikleri, flicker, üretim-tüketim dengesizlikleri ve harmoniklerin, ilgili yönetmeliklerdeki sınırlar içinde tutulması gerekmektedir. TEİAŞ tarafından da yıllardır uygulanmakta olan bağlantı noktasının minimum kısa devre gücünün (MVA) en çok yüzde beşi (%5) kadar kurulu güçte rüzgâr santrali bağlantısına izin verilmesi koşulu UCTE Uzman Çalışma Grubu Raporu'nda da aynen kabul görmüş ve elektriğin arz kalitesi şartı olarak vurgulanmıştır.

4.8.3. Sistem kararlılığı

Rüzgâr santrallerinin de arıza durumunda (3 faz kısa devre arızası ve belirli bir arıza temizleme süresi boyunca veya faz-faz arızası sonrasında başarısız bir tekrar kapama için gerekli sürede) belirli süre sistemden ayrılmaksızın sistem kararlılığına gerekli desteği sağlamaları gerekmektedir. UCTE Uzman Çalışma Grubu tarafından aşağıda sunulan EON İletim Şirketinin kriterleri örnek olarak raporlarında sunulmuştur. Arızanın yakınındaki rüzgâr santrallerinin şebekeden ayrılmamaları, arıza temizlenir temizlenmez şebekeye aktif güç vermeleri (saniyede nominal gücün %20'si) gerekmektedir [4].



Şekil 4.6a. Rüzgâr santrallerinin arıza anında ve arıza sonrası vermesi gereken tepkiler [31]



Şekil 4.6b. Rüzgâr santrallerinin arıza anında ve arıza sonrası vermesi gereken tepkiler [31]

Aktif güç çıkışı artışı, gerilimin toparlanmasının gecikmesi durumunda, Şekil 4.6a'daki taralı bölge içinde de yer alabilir. Arıza sonrasında yeterli gerilim toparlanması sağlanamadığı durumlarda jeneratörlerin uygun desteği sağlaması gerekmektedir. Şebeke gerilimi %10'dan fazla düştüğünde, jeneratörlerin gerilim destek işletme koşuluna uygun çalışmaya geçmesi gerekmektedir. Bu desteğin gerilimdeki düşüş tespit edilir edilmez sağlanması ve birkaç saniye içinde tamamlanması gerekmektedir.

4.9. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Rüzgâr enerjisini sağlayacağı avantajlar şunlardır:

- Rüzgâr bedavadır, tükenmez ve boldur.
- Düşük maliyetlidir.
- Temiz enerjidir, karbon dioksit emisyonlarına yol açmaz.
- Yakıt fiyatlarının kararsızlığına karşı koruyucu olabilir.
- Kaynak güvenliği sebebiyle ithal yakıtlara olan bağımlılığı azaltır.
- Modülerdir ve çabuk kurulur.
- Çift yönlü arazi kullanımına uygundur.

Rüzgâr enerjisi temiz bir teknolojidir, ancak bazı yan etkileri de vardır. Rüzgâr türbinlerinin kullanımına bağlı olarak görülebilecek bu etkiler; görüntü rahatsızlığı, arazi kullanımı, gürültü, elektromanyetik girişim ve kuşlara olan etkidir. Rüzgâr santrallerinin en çok tartışılan çevresel etkisi türbinlerin görsel ve onları çevreleyen manzara üzerine olan etkisidir. Makinaların uyumlu yerleşimi bu yüzden büyük önem taşımaktadır.

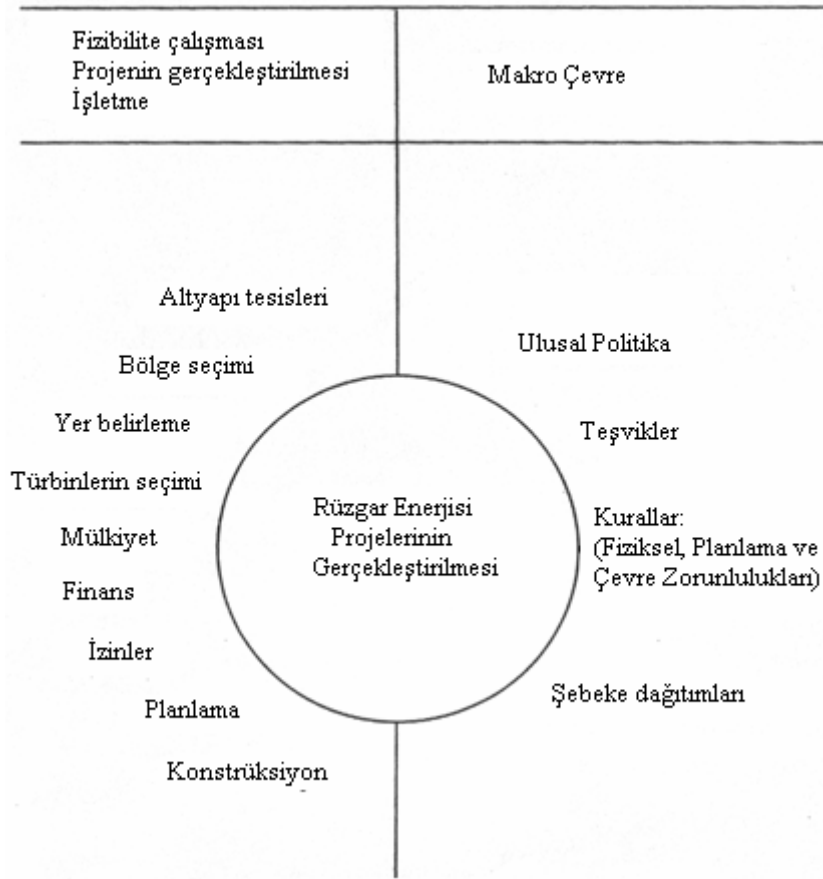
Rüzgâr santralleri geniş bir arazi üzerinde belli aralıklarla yerleştirilmiş birçok türbinden meydana gelir. Bu sebeple rüzgâr santralleri iki yönlü arazi kullanımına uygundur. Hesaplamalar arazinin ancak % 1'inin rüzgâr türbinleri tarafından kullanıldığını göstermektedir. Arazinin % 99'unun ise tarımsal amaçlar için veya doğal alanlar olarak kullanımına devam edilebilir

Rüzgâr türbinleri, mekanik ve aerodinamik olmak üzere iki ayrı gürültü ortaya çıkarır. Modern rüzgâr türbin tasarımları mekanik gürültüyü önemsiz kılacak şekilde üretilmektedir. Dönen kanalların çıkardığı ritmik hışırtı sesi şeklindeki aerodinamik gürültünün azaltılması için de optimum kanat tasarımı ile ilgili çalışmalar sürdürülmektedir. 1 MW'lık bir rüzgâr türbininden 300 metre uzaklıkta gürültü seviyesinin 45 dB olması beklenmektedir.

Rüzgâr enerji dönüşüm sistemlerinin dönen kanatları, radyo, televizyon, uydu servisleri, radarlar gibi elektromanyetik iletişim cihazlarının kullanımında girişime (electromagnetic interference) yol açabilir. Bu sebeple rüzgâr santrallerinin kurulacağı yerlerde mevcut telekomünikasyon sistemleri üzerine olası etkiler incelenmelidir. Kule veya kanatlarla çarpışma sonucu kuşların ölmesi veya türbinler çevresindeki kuş dinlenme veya beslenme yerlerinin bozulması da, özellikle doğal yaşam alanlarına yakın yerlerde sorun olabilmektedir. Bu etki daha çok bazı eski rüzgâr santrallerinde görülmüştür. Almanya ve Danimarka' da kazanılan deneyimler, uygun planlamalarla bu etkilerden kaçınılabileceğini göstermektedir

BÖLÜM 5. RÜZGÂR ENERJİSİ PROJELERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi girişimini başarıyla sonuçlandırabilmekte en önemli faktörler sistemin kurulacağı yerin karakteristikleri, kamuoyu ve hukuk, enerjinin gelecekteki değeri sistemin performans yeterliliği ve güvenilirliği ve yetkin bir hareket planının verimli bir şekilde uygulanmasıdır. Bu anlamda Şekil 5.1’de kurulabilecek herhangi bir tesis için düşünülmesi gereken ana başlıklar verilmiştir.



Şekil 5.1. Rüzgâr enerjisi projesindeki ana başlıklar [32]

5.1. Rüzgâr Kaynakları ve Yer Seçimi

Rüzgâr tahrikli düşük maliyetli bir santral ekonomi için gerekli olmakla birlikte, tesislerin maliyetlerini etkileyen demiryolları ve ana yollara uzaklık, yerin ulaşılabilirliği ve zeminin türü gibi faktörler önemlidir. Bir tepe zirvesindeki arazinin fiyatı da düşünülmelidir. Neyse ki, çoğu rüzgârlı tepeler de bitki örtüsü çok zayıftır; fundalık ve kaba ot dışında zirai değerleri oldukça düşüktür.

Elektrik hatlarından uzaklık da bir tesis yerinin seçimini etkiler. Bunun önemi, tepeye kurulacak olan tesisin kapasitesine ve diğer olası tesislerden uzaklığına bağlıdır. Eğer yüksek kapasiteli bir tesis kurulacaksa, elektrik ağına bağlanmak tüm yatırım içinde önemsiz bir yer tutabilir. Ayrıca, uzun iletim mesafelerinde istenmeyen enerji kayıpları önlenmelidir.

Rüzgâr makinelerinin oluşturacağı tepe gruplarının oluşumu hidroelektrik tesislerle kıyaslanabilir bir “rüzgâr gücü alanı” oluşturacaktır. Hidroelektrik tesisler bir ağa stratejik olarak yerleştirilmiş olsalar bile rüzgâr gücü alanlarının bazı avantajları olacaktır [32]. Bunlar:

- Enerji hattına uzak bir yerdeki tesis grubu için enerji iletim masrafları azalacaktır.
- İnşaat için malzeme iletim masrafı azalacaktır; merkezi bir depo, ambar ve atölye kurulabilir.
- Küçük bir personel grubu birbirine yakın tesisler üzerine yoğunlaşacağı için bakım masrafları azalır.
- Bu tür bir yerleşime uygun tepe gruplarının zirai değeri yoktur ve yumuşak - yuvarlak şekilleri doğal manzara olarak beğenilmez; bu tür tesisler bir enerji kaynağı olarak görünür, ama aynı zamanda ciddi bir malvarlığıdır.

Hâkim rüzgâr yönünde önü açık olma ve perdelemenin az olması rüzgâr tepelerinin seçimini etkiler. Gruptaki tepelerin yaklaşık aynı yükseklikte olması ve böylece iç perdelemenin önemsiz olması sık karşılaşılan bir durumdur. Bir tesisin, hâkim rüzgâra göre durması rüzgâr gücü amaçlı seçimlerde önemli bir kriterdir, ancak abartılmamalıdır. “Hâkim Rüzgâr” terimi rüzgârın diğer yönlere nazaran bir yönden

daha sık esmesi demektir. Ancak, genelde bir yıl üzerinden, bir yönden esme oranı diğerlerine göre çok farklı değildir.

Listenin bir numarasında yeterli rüzgârın olması dışında, yer seçiminde ya da bir yerin uygun olup olmamasında rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri için birçok önemli nokta vardır. Buna karşın, iyi rüzgâr yoksa önemli bir noktada yoktur. Başarılı bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi projesi için gerekli rüzgâr miktarı üzerinde anlaşma azdır, gerçekte minimum miktar elektrik ve yakıt masraflarının oranına ve rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin performansı ve yatırım masrafına bağlıdır. Ancak, rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpüyle orantılı olduğundan rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi rotorundaki mevcut rüzgâr kaynağı en önemli kriterdir. Bu yüzden, sorulması gereken ilk soru yerin gerekli rüzgârları alıp alamadığıdır.

5.2. Yerel Rüzgâr Analizi

Bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi planlandığında rüzgâr mevcudiyetinin önemini vurgulamak için rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin kurulacağı yerde rüzgâr kaynağı iyi tahlil edilmelidir. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin kinetik rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğini belirlerken, formülde rüzgâr hızının küpü kullanıldığı için, rüzgâr rejimindeki küçük bir hata rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin ömrü boyunca üreteceği elektrik miktarında büyük değişmelere neden olur. Rüzgâr, bedava bir yakıt olmasına rağmen ekonomik olarak kullanılması gereken bir faktördür.

Eğer, türbinin kurulması için bir kaç yer mevcutsa, aralarında kıyaslama için her birinde bulunan rüzgâr kaynağı detaylı bir şekilde analiz edilmelidir. Detay ve doğruluğun planı araştırma aşamasında ve ekonomik olarak çekici bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri geliştirilmesi ciddi bir plan ise değişecektir.

Rüzgâr kaynakları bu kadar değişken olduğu için ve yerinde analiz masrafları yüksek olacağı için, rüzgâr enerjisi potansiyelini yerinde ölçüm yapmadan tahmin etmek daha çekicidir. Aday bir yerin elenmesi veya belirli bir yerdeki rüzgâr enerjisi

karakteristiklerini belirlemek için çeşitli teknikler vardır [33]. Rüzgâr potansiyelinin göstergeleri:

- Başkalarının hazırlanmış bilgileri,
- Topoğrafik deliller,
- Diğer görsel olaylar,
- Sosyal ve kültürel bilinç,
- Rüzgârın ölçülüp kaydedilmesidir.

Aday yerlerin elemesi yapılırken, topoğrafik göstergeler iyi bir yeri kötüsünden ayırt etmek için yardımcı olabilirler. Eğer, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri yerleşimi için iki aday yer, yaklaşık, aynı rüzgâr gücü potansiyelini gösteriyorsa, biri diğerinden daha yüksek oranlarda türbülânsa maruz kalıyor olabilir. Bu sonuca, üst rüzgâr topoğrafik çıkıntılarının şekilleri neden olabilir [33].

Aşağıdaki özellikler yüksek ortalama rüzgâr hızlarını gösterirler:

- Sık güçlü basınç gradyan bölgelerinde boşluk, aralık ve geçitler,
- Sıradağlardan aşağıya uzanan uzun vadiler,
- Yüksek irtifadaki ova ve platolar,
- Sürekli aşağı esen rüzgârlarla güçlü basınç gradyanlarının birleştiği ova ve vadiler,
- Bayır ve dağ zirveleri,
- Rüzgâra maruz kalan sahil evleri.

5.3. Proje Planlaması ve Analizi

Eğer, iyi rüzgârlı uygun bir yer bulduysa ve pratik, yasal ve politik olarak rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri kurulabileceğine inanılıyorsa, bir sonraki adım potansiyel projeyi tanımlama ve değerlendirmedir. Oluşabilecek beklenmeyen durumları da içine alan bir toplam geliştirme stratejisi düşünülmelidir. Neyin başarılmak istendiği bilinmelidir. Teknik veya finansal desteğin gerekli olup olmadığı tespit edilmelidir. Gerekiyorsa bir ortak bulunmalı ve danışman

tutulmalıdır. Devam etmeden önce projenin detaylı bir çalışması yapılmalıdır. Yer, bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi projesinde, en önemli mal varlığıdır [33].

Denetimsiz güç üreticileri ya da kullanıcıları (devlet, belediye kamu hizmetleri, kırsal elektrik kooperatifleri ve diğer özel amaçlı toplum ajanları) statülerinden dolayı finansal dürtülerine düşük faizli para (bonolar, vergiler vs.) şeklinde sahip olurlar; ancak, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri vergi kredilerinin avantajlarından yararlanamazlar. Hâlbuki üçüncü parti girişimcilerle ortaklık yaparak veya rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerini kiralayarak (leasing) masraflarını aşağı çekecek kaynaklar oluşturabilirler. Denetimsiz oldukları için bu potansiyel rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri yatırımcı sınıfı daha fazla hareket özgürlüğüne sahip olup seçmenleri için yararlı olduklarına inandıkları davranışları sergilerler. Kar amaçlı, vergi ödeyen kuruluşlar özel rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri girişimlerinden yararlanabilirler, ancak, tüm çalışmalar rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerine uymak zorundadırlar.

Bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi projesinin ekonomik fizibilitesini belirlemek aşırı karmaşık olabilir ve her zaman yere özeldir [33]. Tam ölçekli bir fizibilite çalışmasına para ve zaman yatırmadan önce şunlara dikkat edilmelidir:

- Güç (kW) için yatırım (\$) kıyaslamaları göz ardı edilmemelidir; yakıt gibi kesintili bir rüzgârla, rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin çıkış gücü değişir. Ne var ki yatırım değişmez.
- Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri imalatçısından güç ve enerji projelerini tahmin etmesi beklenmemelidir, imalatçının ilgili makineye ait mevcut en iyi güç eğrileri veya rüzgâr hızı - güç tabloları alınmalıdır. Eldeki güç datası gerçek yer rüzgâr koşullarına uyarlanır. Rüzgâr verilerinin daha fazla doğruluğu enerji gösterimlerinde aranmamalıdır.
- Eğer ilgili yer için gerçek rüzgâr verileri yoksa ancak yeterli miktarlarda güvenilir rüzgâr hızı verilmelidir varsa rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerine bağlı olarak her rüzgâr hızında beklenen enerji Rayleigh rüzgâr hızı frekansı dağılımına göre belirlenmelidir. Çoğu imalatçı, enerjiyi tipik rüzgâr rejimlerine göre belirler. Onlar yere özel koşullara uygulanmalıdır.

- Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin tesis masrafları, beklenmeyen şantiye dışı (mühendislik, idari, transport vs.) ve şantiye içi (transformatörler, yollar, çitler vs.) masrafları içine alacak şekilde belirlenmelidir. Eğer, yer ve konstrüksiyon süresi belli ise imalatçılar bu masraflar hakkında yeterli bilgi sağlayacak durumda olmalıdırlar.
- Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri çıkışlı enerjiye, kaçınılan elektrik alımları veya elektrik satışı veya ikisinin beklenen karışımını temel alarak bir değer biçilmelidir. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri çıkışlı beklenen enerjiyi (kWh) enerji değeriyle (\$/kWh) çarparak her rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin yıllık veya aylık geçerli değeri bulunmalıdır.

5.4. Rüzgâr Enerjisi Ekonomisi

Rüzgâr enerjisi ekonomisini belirleyen ana faktörler; rüzgâr türbinleri, temel ve şebeke bağlantısı dâhil yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, elektrik üretimi veya ortalama rüzgâr hızı, türbin ömrü ve faiz oranıdır. Bu faktörler arasında rüzgâr türbinlerinden elektrik üretimi ve onlarla ilgili yatırım maliyetleri en önemlileridir. Elektrik üretiminin rüzgâr koşullarına çok bağlı olması nedeniyle, uygulama yerinin doğru seçilmesi, ekonomik uygulanabilirlikte kritik öneme sahiptir.

Teknoloji geliştikçe rüzgâr türbinlerinin gücü ve boyutları büyümekte, kule yükseklikleri artmaktadır. Bu gelişmelere paralel olarak türbin verimleri de artmakta, buna karşılık yatırım maliyetleri düşmektedir. 1989–2001 yılları arasında maliyetlerde yıllık %3 oranında düşüş sağlanmıştır. Günümüzde kurulu rüzgâr gücü kapasitesinin kW başına ortalama maliyeti 900–1100 €/kW arasında değişmektedir. Türbinler bu toplam maliyetin yaklaşık %80' ini; temeller, elektrik tesisleri, şebeke bağlantısı, arazi, yol yapımı, danışmanlık ve finansman maliyetleri de geriye kalan %20'yi teşkil etmektedir [34, 35].

Türbinin ömrü boyunca işletme ve bakım maliyetleri 1.2 ¢cent/kWh'tir. Daha büyük boyutlu türbinlere doğru olan eğilim, işletme ve bakım maliyetlerini azaltacaktır [14].

5.5. Rüzgâr Üretim Maliyetleri

Bütün faktörler göz önünde bulundurulduğunda rüzgârdan enerji üretim maliyetleri şu şekilde belirtilebilir:

4–5 €cent/kWh : Oldukça iyi rüzgâr hızına (50 m yükseklikte 6,9 m/sn ortalama rüzgâr hızına) sahip olan yerlerde. Genelde kıyı bölgelerde

6–8 €cent/kWh : Düşük rüzgâr hızına (50 m yükseklikte 5,3 m/sn yıllık ortalama rüzgâr hızına) sahip olan yerlerde

Bu maliyet hesaplamaları 850–1500 kW kapasite aralığındaki orta büyüklükteki rüzgâr türbinleri, 900–1100 €/kW arasında yatırım maliyeti, 20 yıllık ömür süresince 1,2 €cent/kWh işletme ve bakım maliyeti ve yıllık %7,5 faiz oranı varsayımına göre yapılmıştır [34, 36].

Rüzgârdan üretilen elektrik enerjisinin maliyeti, teknoloji geliştikçe düşmektedir. Kıyıda türbinlerin ortalama maliyeti 1980’lerin ortalarında kurulan 95 kW’lık türbin için 8,8 €cent/kWh’ ten 1000 kW’lık makine için 4,1 €cent/kWh’e düşmüştür. Maliyetlerde 15 yıl süresince %50’den fazla oranda bir düşüş sağlanmıştır.

Rüzgârdan mümkün olan en fazla enerjinin, en düşük maliyetle elde edilmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalar, daha güçlü rotorlar daha uzun kanatlar, geliştirilmiş elektronik kontrol sistemleri, kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve kullanımı, rüzgâr tahmin sistemlerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi, kıyı ötesi sistemler ve yerleştirme gibi konuları içermektedir.

5.6. Rüzgâr Enerjisine Verilen Piyasa Teşvikleri

Ekonomik literatürde “teşvik” kavramı, belirli ekonomik faaliyetlerin diğerlerine oranla daha fazla ve hızlı gelişmesini sağlamak amacıyla, kamu tarafından çeşitli yöntemlerle verilen maddi ve/veya gayri maddi destek, yardım ve özendirme

olarak tanımlanır. Ülkelerarası rekabet, ülkelerin endüstrilerine değişik biçimlerde devlet yardımları vermelerine yol açmıştır. Ancak, uygulanan teşvikler, yani devlet yardımları öngörülen hedeflere ulaşmaya yardımcı olmasına karşın, uluslararası ticarete olumsuz etkiler yaratmış olmasından dolayı dünya ticaretinde serbestlik sağlama amacına ters düştüğü de kabul edilmektedir. Bundan dolayı bu konuda politik, yasal ve ekonomik şeffaflık önerilmektedir.

Rüzgârdan üretilen enerjiye ödenen fiyat, ülkeden ülkeye değişmektedir. Rüzgâr enerjisine ödenen fiyat genellikle bu kaynağın sağlayacağı çevresel faydaları yansıtmak üzere piyasa fiyatı üzerine prim verilmesidir. Uygun finansal destek sistemlerinin varlığının yanı sıra kısa zamanda sonuçlanan lisanslama prosedürleri, bölgesel ve yerel planlarda yeterli kapasite tahsisi, üretilen elektriğin şebekeye girişi için açık ve adil koşulların sağlanması, rüzgâr enerjisi piyasa payının artırılmasında temel unsurlardır.

2001/77/EC İç Elektrik Piyasasında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimini Teşvik Eden AB Direktifi ile de bu kaynaklardan elektrik üretiminin Avrupa Birliği ülkelerinde teşvik edilmesi uygun görülmektedir.

Projenin ilk yatırım maliyetlerinin karşılanabilmesi için kullanılmakta olan diğer sistemlerin yanı sıra halen Avrupa'da uygulanmakta olan iki ana tip teşvik sistemi vardır. Bunlar sabit fiyat sistemleri ve sabit miktar sistemleridir. Diğer sistemler ise ilk yatırımın maliyetlerinin hafifletilmesine yönelik hibeler, yatırımcılar için vergi muafiyetleri ve yeşil enerji tüketicilerinin bu enerjiye gönüllü olarak piyasa fiyatı üzerinde para ödemelerine dayanan “Yeşil Enerji” piyasa uygulamalarıdır.

Sabit fiyat sistemleri: Bu sistemlerde yenilenebilir enerji üreticilerine, ürettikleri her bir kWh enerji için piyasa fiyatı üzerinde sabit bir fiyat ödenir. Ödenen ilave maliyet, vergi mükellefleri elektrik tüketicilerinden alınır. Örneğin Almanya'da “Yenilenebilir Enerji Kanunu” kapsamında yaklaşık ayda 1 Euro olan “feed in tariff” in ilave maliyeti, evsel tüketicilerin faturalarına eklenmektedir. Almanya'dan başka bu sistemi uygulayan diğer ülkeler Avusturya, Fransa, Yunanistan, Lüksemburg, Hollanda ve Portekiz'dir.

Sabit miktar sistemleri: Aynı zamanda yenilenebilir kota sistemleri olarak da bilinir. Bu sistemler, yenilenebilir elektriğin belirli bir seviyeye ulaşması gerçekleştirilinceye kadar belirlenecek bir sürede, hükümetin fiyatın piyasa güçleri tarafından belirlenmesinden uzaklaşılması kararını gerektirir. İrlanda'da uygulandığı şekilde bu sistemin ihale versiyonunda, belirli sayıda enerji satın alam sözleşmesi için rekabete dayalı teklifler alınır. Yeşil sertifika modelinde ise; belirlenen kotaya ulaşmak amacıyla, üretilen yenilenebilir elektriğin ilave maliyetlerini yansıtmak üzere ticareti yapılabilen sertifikalar yayınlanır. Ticareti yapılabılır yeşil sertifika sistemi İngiltere, Belçika, İsveç ve İtalya'da uygulanmaktadır.

5.7. Çevresel Etkiler

Rüzgâr santrallerinin en çok tartışılan çevresel etkisi, türbinlerin görsel ve onları çevreleyen manzara üzerine olan etkisidir. Marinaların uyumlu yerleşimi bu yüzden büyük önem taşımaktadır. Rüzgâr santralleri geniş bir arazi üzerinde belli aralıklarla yerleştirilmiş birçok türbinden meydana gelir. Bu sebeple rüzgâr santralleri iki yönlü arazi kullanımına uygundur. Hesaplamalar arazinin ancak %1'inin rüzgâr türbinleri tarafından kullanıldığını göstermektedir. Arazinin % 99'unun ise tarımsal amaçlar için veya doğal alanlar olarak kullanımına devam edilebilir.

Rüzgâr türbinleri, mekanik ve aerodinamik olmak üzere iki ayrı gürültü ortaya çıkarır. Modern rüzgâr türbin tasarımları mekanik gürültüyü önemsiz kılacak şekilde üretilmektedir. Dönen kanalların çıkardığı ritmik hışırtı sesi şeklindeki aerodinamik gürültünün azaltılması için de optimum kanat tasarımı ile ilgili çalışmalar sürdürülmektedir. 1 MW'lık bir rüzgâr türbininden 300 metre uzaklıkta gürültü seviyesinin 45 dB olması beklenmektedir.

Rüzgâr enerji dönüşüm sistemlerinin dönen kanatları, radyo, televizyon, uydu servisleri, radarlar gibi elektromanyetik iletişim cihazlarının kullanımında girişime (electromagnetic interference) yol açabilir. Bu sebeple rüzgâr santrallerinin kurula-

cağı yerlerde mevcut telekomünikasyon sistemleri üzerine olası etkiler incelenmelidir.

Kule veya kanatlarla çarpışma sonucu kuşların ölmesi veya türbinler çevresindeki kuş dinlenme veya beslenme yerlerinin bozulması da, özellikle doğal yaşam alanlarına yakın yerlerde sorun olabilmektedir. Bu etki daha çok bazı eski rüzgâr santrallerinde görülmüştür. Almanya ve Danimarka'da kazanılan deneyimler, uygun planlamalarla bu etkilerden kaçınılabileceğini göstermektedir.

5.8. Rüzgâr Enerjisi ve Karbondioksit Emisyonları

Günümüzde rüzgâr enerjisi, enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklar arasında en ucuz olan ve fosil yakıtlı santrallerle en fazla rekabet edebilecek olan enerji kaynağıdır. Atmosfere yayılan karbondioksit seviyesinin düşürülmesi, rüzgâr enerjisinin en önemli çevresel faydalarından birisidir. CO₂ azaltılmasından sağlanacak yararların miktarının belirlenmesi rüzgâr enerjisinin hangi enerji üretim türü yerine kullanılacağına göre değişir. AB'de 2000 yılında rüzgâr enerjisi kullanılarak yaklaşık 15 milyon ton CO₂ emisyonun engellendiği belirtilmiştir [34].

BÖLÜM 6. TÜRKİYE' NİN RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ

6.1. Bölgesel Rüzgâr Yoğunlukları

Türkiye genelinde iklim amaçlı rüzgâr ölçümleri 1930lu yıllardan beri Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Ancak Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli DMİ istasyonlardan elde edilen verilerin yetersizliği nedeniyle bugüne kadar güvenilir bir biçimde belirlenememiştir. Enerji amaçlı rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi amacıyla doğrudan rüzgâr verilerinin toplanmasının yanı sıra EİE, DMİ Genel Müdürlüğü ile birlikte Türkiye genelindeki meteoroloji istasyonlarının rüzgâr verileri WASP programında kullanılarak Türkiye Rüzgâr Atlası hazırlanmıştır. Rüzgâr atlası, Türkiye'deki rüzgâr enerji dağılımı ile ilgili genel olarak bir fikir vermekte olup yer seviyesinden 50 metre yükseklikteki rüzgâr potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz bölgelerinin yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Atlas verilerine dayanarak Türkiye'nin bugünkü teknik koşullarda rüzgâr enerjisi teknik potansiyeli 88000 MW, ekonomik potansiyelinin 10000 MW civarında olduğu tahmin edilmektedir [37]. Türkiye rüzgâr potansiyeli konusunda yurt içinde çeşitli üniversitelerin yapmış olduğu çalışmaların yanı sıra Utrech Üniversitesinin 1993 yılında OECD ülkeleri kapsamında yapmış olduğu bir çalışmada Türkiye'nin teknik rüzgâr potansiyeli 80 GW olarak belirtilmektedir [38].

Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesine yönelik EİE İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen bir başka çalışma ise rüzgâr gözlem istasyonu projesidir. Bu proje, Türkiye enerji amaçlı rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesi amacıyla noktasal rüzgâr hız ve yön ölçümlerinin yapılmasına dayanır. Proje kapsamında halen Türkiye'nin farklı yerlerinde kurulmuş olan 21 adet rüzgâr gözlem

istasyonunun büyük bir bölümünde 10 metrede, bazılarında ise 10 metre ve 30 metre yükseklikte olmak üzere mikroişlemci kontrollü kaydedicilerle sürekli olarak rüzgâr hız ve yön değerleri ölçülmektedir. Yapılan ölçümler saatlik bazda depolanmaktadır.

EİE tarafından halen veri toplama çalışmaları sürdürülen gözlem istasyonlarının coğrafi bölgelere göre dağılımı aşağıdaki şekildedir [5]:

Ege Bölgesi	: 3 adet
Marmara Bölgesi	: 5 adet
Karadeniz Bölgesi	: 4 adet
Akdeniz Bölgesi	: 2 adet
İç Anadolu Bölgesi	: 2 adet
Güney Doğu Anadolu	: 4 adet

Türkiye’de, yıllık ortalama rüzgâr hızı 2,54 m/sn (10 metre yükseklikte) olarak ve ortalama güç yoğunluğu ise 1 m² alan başına 24 W olarak hesaplanmıştır [39]. Bu çalışmaya ait detaylar, bölgesel bazda Tablo 6.1’de sunulmaktadır. Bu değerlere göre, Marmara ve Güney Doğu Anadolu bölgelerinin diğerlerine göre daha yüksek rüzgâr hızlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışma, rüzgâr enerjisi açısından zengin bölgeler için de özelleştirilmiştir. Bu anlamda da Enerji İşleri Etüt İdaresi Rüzgâr Enerjisi Dairesi’nin elde ettiği değerler Tablo 6.2’de sunulmaktadır.

Tablo 6.1. Türkiye’nin bölgelere göre rüzgâr enerjisi potansiyeli [39]

Bölge	Ortalama Güç Yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/sn)
Marmara	51,91	4,3
Güney Doğu	29,33	3,5
Ege	23,47	3,3
Akdeniz	21,36	3,2
Karadeniz	21,31	3,2
Orta Anadolu	20,14	3,1
Doğu Anadolu	13,19	2,7

Tablo 6.2. Türkiye'deki rüzgâr enerjisi açısından zengin bölgeler [40]

Yerleşim Yerleri	Ortalama Güç Yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/sn)
Bandırma	152,6	5,0
Antakya	108,9	4,4
Kumköy	82	4,0
Mardin	81,4	4,0
Sinop	77,9	3,9
Gökçeada	74,5	3,9
Çorlu	72,3	3,8
Çanakkale	71,2	3,8

6.2. Rüzgâr Enerjisi Olanakları

Rüzgâr enerjisinden mekanik enerji ve elektrik enerjisi olmak üzere iki temel yararlanma olanağı vardır. Mekanik uygulamalarda, rüzgâr enerjisi mekanik enerjiye çevrilerek ev ve çiftliklerde hayvanların su ihtiyacının sağlanması, arazilerin kurutulması gibi amaçlarda ve ayrıca su pompalamada, çeşitli ürünleri kesme, biçme, öğütme ve sıkıştırmada, yağ çıkartmada vb. işlerde de kullanılmaktadır. Rüzgâr enerjisi, hem kırsal alanda elektrik enerjisinin yerel üretim ve tüketiminde, hem de elektrik şebekesini beslemek için kullanılmaktadır.

Türkiye'nin çoğu yerinde rüzgârlı günlerin belirgin bir sayısı olmasına rağmen, rüzgâr enerjisi üretimini değerlendirme olasılığı henüz açığa kavuşturulamamıştır. Bu yüzden yerel araştırmalar devam etmektedir. Yerel rüzgâr enerjisi sadece küçük kasabalarda ve köylerde su pompalamak ve değirmende tahıl öğütmek için kullanılmaktadır. 1973' teki dünya enerji krizinden sonra Dünya Meteoroloji Örgütü, potansiyeli belirlemek için elde olan bilgiyle rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek amacıyla bir araştırma başlatmıştır. Türkiye'de hemen hemen güney kıyı kısımlarından, değişen alanlarıyla İstanbul'u da kapsayan ülkenin kuzey batı kısımlarına kadar uzayan Akdeniz tipi iklim vardır. Özellikle bölgenin güney

kısımları, yılın mevsimlerine bağılı olarak Azor yüksek basınç ve Basra alçak basınç merkezlerinden gelen rahatsız edici kasırgaların sebep olduğu güneybatı ve batı rüzgârlarından etkilenir. Diğer yandan, Türkiye'nin kuzeybatı kısmı, özellikle Ege denizinin kuzeyinde görülen, kuzey ve kuzeybatı rüzgârlarıyla gelen Antartika alçak basıncının etkisi altındadır. Sözde Etesian rüzgârları, en önemli rüzgâr enerjisi potansiyelini içeren ve Bozcaada ve Gökçeada gibi adaları kapsayan Türkiye'nin Ege kıyıları boyunca önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, kıyı bölgeleri boyunca kara ve deniz esintileri oldukça sık görülür ve rüzgâr enerjisi üretimi sağlanabilir.

Karadeniz kıyıları boyunca, Türkiye Sibiry'a'dan gelen kuzey ve kuzeybatı rüzgârlarına maruz kalır ve orta Karadeniz uzantısı, rüzgâr enerjisinin çoğuna ve sonuç olarak enerjisine sahiptir. Türkiye'nin iç bölgelerinde, rüzgâr hızının çoğu vadi boyunca önemli enerji üretim seviyelerine ulaştığı doğu bölgeleri gibi engebeli dağları olan bazı yerlerinde kara iklimi vardır.

6.3. Bölgesel Rüzgâr Değişimler

Türkiye'de yükseklik genellikle İran sınırındaki Ağrı dağının deniz seviyesinin üstünde yaklaşık 6000 m yüksekliğe ulaştığı doğuya doğru düzenli bir şekilde artış göstermektedir. Türkiye'nin kuzeybatı kısmının nispeten düz olması ve Akdeniz'e paralel uzanan Toros dağlarını içeren güneyde yerel bir deniz seviyesinden yüksekte merkez bölgede bir platonun olması doğuya gittikçe yükseklik artacaktır. Bu topoğrafik ayarlamalara göre, kuzeybatı Etesian (senede bir devirli) rüzgârların çok potansiyel rüzgâr enerjisi üretim yerlerinin olduğu Ege denizi kıyıları boyunca bağlantılıdır. Diğer birçok düşük bölge, İskenderun gibi yüksek potansiyelli rüzgâr enerjisi üretim yerlerinin olduğu Akdeniz boyunca Türkiye'nin güneydoğu kısmında uzanır. Ege denizinin kuzeyinde bulunan Gökçeada ve Marmara denizinin güney kıyısındaki Bandırma'yı açık bir şekilde birbirinden ayıran rüzgâr enerjisi potansiyelinin yükseklik ölçümleri gösterilmektedir. Diğer yerler ise kuzeyde Sinop, doğu Akdeniz'de İskenderun ve Türkiye'nin kuzeybatısında Diyarbakır'ı kapsayan potansiyel bölgeler olarak gösterilmektedir. Daha yüksek deniz seviyelerinde rüzgâr enerji miktarı yüksek olmadığı için Türkiye'nin rüzgâr enerji potansiyelinin topoğrafik deniz seviyesiyle uyuşmadığı açıktır. İç bölgelerin rüzgâr enerjisi üretimi

yönünden fakir olmasına karşın deniz kıyılarında önemli rüzgâr enerji potansiyeli olmasından dolayı genel bir izlenim edinmek mümkündür. Örneğin Türkiye'nin doğusu dünyadaki en engebeli ve çok yüksek yerlerden birisi olmasına rağmen rüzgâr enerjisi üretim potansiyeli düşüktür. Bu daha çok yüzeysel kabalıktan dolayıdır ve bunun sonucunda anaför etkileri rüzgâr gücünü ve etkisini kırmaktadır. Ege ve Karadeniz kıyıları boyunca, rüzgâr enerjisi üretim miktarı yaz aylarına göre kışın daha yüksektir. Aynı şey Doğu Anadolu'daki Diyarbakır bölgesi için de geçerlidir. Zıt durumların olduğu Doğu Akdeniz bölgesinde yaz değerleri kışa göre daha yüksektir. Genellikle kış ayları boyunca kara-deniz esintileri bölgelerden uzakta geniş ölçüde oluşamaz. Ancak rüzgâr enerjisi potansiyelinin hâkimiyeti kıyı bölgelerde yoğunlaşır. Bununla birlikte özellikle yaz aylarında Ege kıyıları boyunca doğuya doğru oluşan rüzgâr, rüzgâr enerjisi üretimi için geniş bir alan olduğunu gösterir.

Türkiye'nin rüzgâr hızı ve enerjisi haritaları dikkate alındığında potansiyel alanların önemli olduğu kolayca anlaşılabilir. Genellikle Türkiye'deki potansiyel rüzgâr enerjisi alanları kuzeybatı ve kuzey bölgelerde ve Ege denizi kıyıları boyunca uzanmaktadır. Ancak en çok rüzgâr enerjisi alanları, Gökçeada ve Bandırma bölgesindedir. Diğer potansiyel bölge ise Orta Karadeniz ve Doğu Akdeniz'dir. Bunların hepsi deniz kıyılarındadır, ancak iç bölgelerde Güneydoğu Anadolu'da Diyarbakır potansiyel bir alan teşkil eder. Özetle Türkiye'deki rüzgâr enerjisi üretimi alçak alanlarda gerçekleştiği söylenebilir.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde tüm dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında bir artış görülmektedir. Özellikle son zamanlarda yaşanan enerji krizleri ve fosil yakıtların sürekli azalması, tüm dünyayı alternatif enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının doğada bol miktarda bulunmaları, bedava ve çevre dostu olmaları onları daha da cazip hale getirmiştir.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi ele alınmıştır. Rüzgâr enerjisi, dünya üzerinde birçok alanda enerji temininde önemli bir rol oynamaktadır. Geçtiğimiz son on yıl içinde rüzgâr türbini teknolojileri büyük bir gelişme göstermiştir. Bu gelişmeleri büyük ölçekli türbin dizaynları takip etmektedir. Bu gelişme ve ilerlemeler maliyetleri azaltarak rüzgâr enerjisi teknolojisinin bilinen fosil yakıtlarla rekabet edebilmesini sağlayacaktır. Rüzgâr enerjisi teknolojisi gelişimini henüz tamamlamamış olduğundan bu alanda daha fazla çalışmalar yapılması gereklidir.

Rüzgâr elektrik santrallerinin projelendirilmesinde öncelikle santralin kurulacağı bölgeye ait rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Rüzgârın yönü ve şiddetinin yanı sıra sürekliliği de üretilen elektrik enerjisinin kaliteli ve güvenilir olması açısından dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir. Rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlandığı noktalarda kapasite artırılmalı gerekirse yeni bir hat çekilmeli, ayrıca iletim ve dağıtım sistemine olan olumsuz etkiler en aza indirilmelidir.

Rüzgâr enerjisi konusunda ülkemizde yatırım yapmak isteyen yerli ve yabancı yatırımcılar teşvik edilmeli ve cazip koşullar için gerekli yasal ve hukuki düzenlemeler yapılmalıdır. Rüzgâr enerjisi teknolojileri alanında üniversitelerimizde verilen eğitim yeterli değildir. Bu konuda mühendislik eğitimi veren okullarda rüzgâr enerjisi ile ilgili derslerin sayısı artırılmalı, uygulamalar geniş ölçekte yapılmalıdır.

Rüzgâr enerjisi konusu disiplinler arası bir çalışma olduğundan bölümler arası işbirliği kurulmalı, projeler birlikte gerçekleştirilmelidir.

Sonuç olarak, uygun bölgelere rüzgâr santralleri kurularak mevcut şebekenin yükü hafifletilebilir, dışa bağımlılık azaltılabilir, enerji arzı artırılarak ülke ekonomisine katkıda bulunabilir.

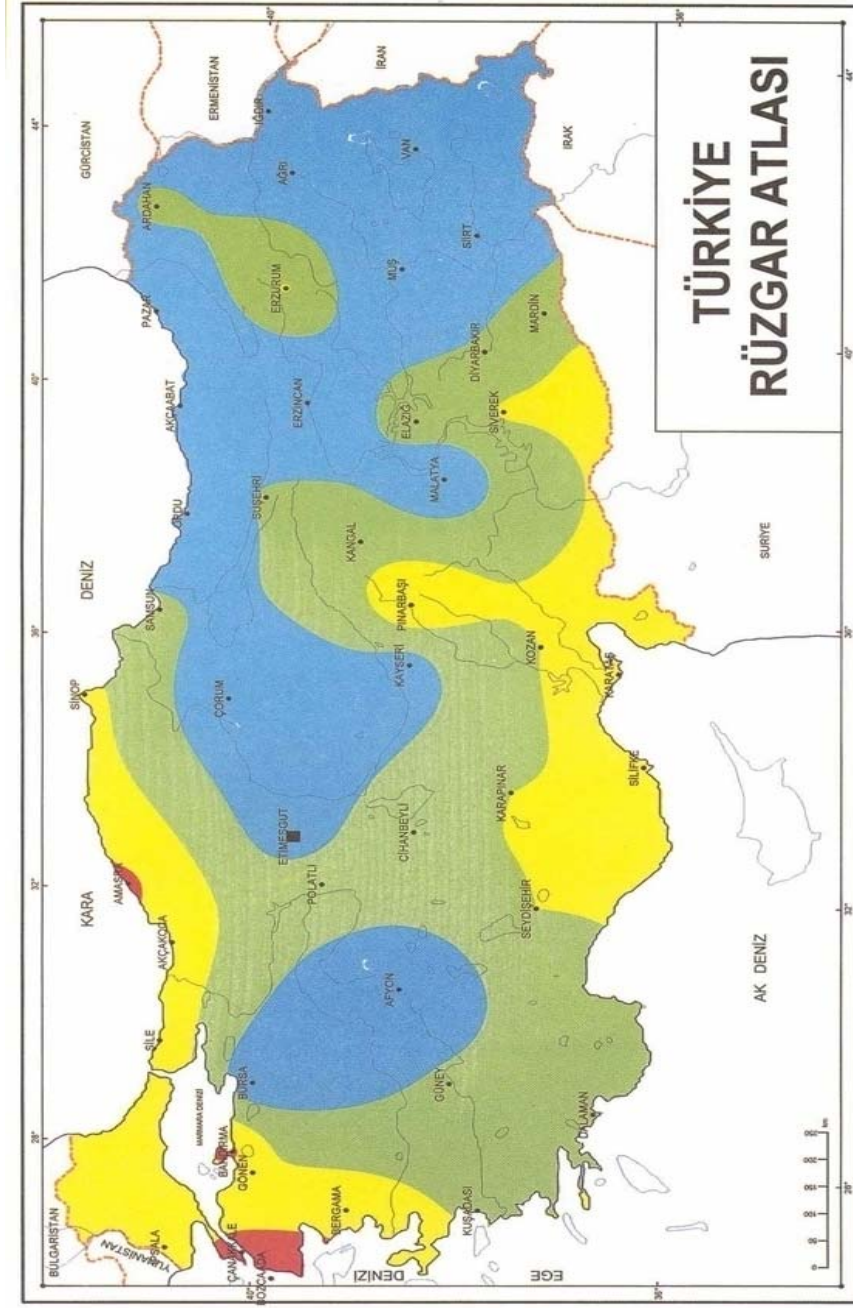
KAYNAKLAR

- [1] Guided Tour on Wind Energy, Danish Wind Industry Association, www.windpower.org, 2002.
- [2] PATEL, M., R., Wind and Solar Power System, Taylor and Francis, 2006
- [3] BURTON, T., SHARPE, D., JENKİNS, N., BOSSANYİ, E., Wind Energy Handbook, John Willey & Sons, 2001.
- [4] TEİAŞ APK Dairesi Başkanlığı, Yenilenebilir Kaynaklardan Değişken Üretim Yapan Santrallerin Elektrik Üretim-İletim Sistemine Teknik ve Ekonomik Etkileri ve AB Uygulamaları, Mart 2005.
- [5] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Raporu, Ocak 2005.
- [6] The Windicator, Wind Power Montly, July 2004.
- [7] AWEA, <http://www.awea.org/projects/>
- [8] STEFFEN, E., German Wind Market and Industry –Current Developments and Perspectives, German Wind Energy Association (BWE), Energy Tech 2007, Thessaloniki, Greece, www.wind-energie.de, March 31st, 2007.
- [9] New World Record in Wind Power Capacity, World Wind Energy Association (WWEA), www.wwindea.org, 29 January 2007.
- [10] STEFFEN, E., Wind Energy – a German Success Story, German Wind Energy Association (BWE) at the “German RenewableEnergy Day” Chiba, 12th October 2006.
- [11] Global Wind Energy Council (GWEC), www.gwec.net, February 2007.
- [12] Europe’s Energy Crisis, The No Fuel Solution, EWEA Briefing, February 2006.
- [13] International Wind Energy Development World Market Update 2006 Forecast 2007–2011, BTM Consult ApS, www.btm.dk, 26 March 2007.
- [14] Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Türkiye Çevre Vakfı Yayını, Aralık 2006.

- [15] U.S. Department of Energy Wind Energy Program Produced for the U.S. Department of Energy by the National Renewable Energy Laboratory, A DOE National Laboratory, DOE/GO-102002-1567 May 2002.
- [16] EİE, [www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/RUZGAR POTANSİYELI BELIRLENMESI.doc](http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/RUZGAR_POTANSİYELI_BELIRLENMESI.doc)
- [17] EİE, [www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/RUZGAR ENERJISI GOZLEM ISTASYONU.doc](http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/RUZGAR_ENERJISI_GOZLEM_ISTASYONU.doc)
- [18] GELBERİ, H., Rüzgâr Türbinlerinin Dağıtım Şebekelerine Bağlanması ve Dinamik Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2003.
- [19] ÖZARSLAN, M., İ., Rüzgâr Türbinleri ile Enerji Üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2004.
- [20] ACAR, H., Rüzgâr Enerjisi, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Ders Notları-5.
- [21] UĞURLU, M., Alternatif Enerji Kaynakları, Rüzgâr Enerjisi ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2004.
- [22] GELBERİ, H., YILMAZ, S., YILDIZ, M., YALÇIN, M.A., “Rüzgâr Türbinlerinde Dinamik Kararlılık”, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 7, s. 199-204, Temmuz 2003.
- [23] Danish Wind Industry Association, Updated 10 May 2003, <http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/comp/index.htm>.
- [24] WALKER, J. F., JENKINS, N., “Wind Energy Technology”, John Willey & Sons, England, 1997.
- [25] DURAK, M., “Rüzgâr Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması: Akhisar Rüzgâr Elektrik Santrali”, İTÜ, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2000.
- [26] TAYLOR, D., “Energy Resources Package”, Open University Publications, England, 1995.
- [27] JHONSON, G., L., “Wind Energy Systems”, Electronic Edition, Manhattan, Kansas State University, United States, 2001.
- [28] DEWI, “Grid Connection of Wind Turbines”, German Wind Energy Institute, 1998.
- [29] DEWI, “Wind Energy Information Brochure”, Deutschland Wind Energy Institue, www.dewi.de, Wilhekmshaven, 2003.

- [30] Communication from the Commission to the Council and the European Parliament, Brussels, Mayıs 2004, COM (2004) 366 final.
- [31] E.ON Netz GmbH, Grid Connection Regulations for High and Extra High Voltage, Bayreuth, Status: 1st April 2006.
- [32] GOLDING, E. W., “The Generation of Electricity by Wind Power”, Pitman Press, London, 1955.
- [33] VOSBURGH, N. P., “Commercial Applications of Wind Power”, Van Nostrand Reinhold Company, USA, 1983.
- [34] EWEA, “Wind Energy The Facts, An Analysis of Wind Energy in EU-25”, February 2004.
- [35] EWEA, “Wind Industry Factsheet, Wind Power Economics”, February 2004.
- [36] EWEA, “Wind Power Economics Factsheet, 2003.
- [37] EİE&DMİ, Türkiye Rüzgâr Atlası, Haziran 2002, EİE Matbaası, Ankara.
- [38] VAN, VIJK, A.J.M., COELINGH, J.P., OECD Ülkelerinde Rüzgâr Enerji Potansiyeli 93091, Utrecht Hollanda Utrecht Üniversitesi, 1993, Dr. Tanay Sıtkı Uyar Türkiye Enerji Sektöründe Karar Verme ve Rüzgâr Enerjisinin Entegrasyonu Raporu (Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynak ve Teknolojileri Araştırma Birimi).
- [39] ALTUNTAŞOĞLU, Z., T., “Wind Energy Potential of Some Sites in Turkey”, Wind Energy Investment in Turkey, Ankara, 1997.
- [40] EİE, “Türkiye Rüzgâr Enerjisi Doğal Potansiyeli”, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara, 1994.
- [41] EİE, http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/tr_ruzgar_atlasi_buyuk.jpg.

Ek A



Beş farklı topografik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri¹

Kapalı Arazi ² m ²	Açık Arazi ³ m ²	Kıyılar ⁴ m ²	Açık Deniz ⁵ m ²	Topo ve Bayırt ⁶ m ²
>60	>75	>85	>700	>115
50-60	65-75	70-85	80-90	100-115
45-50	60-70	60-70	400-600	120-180
35-45	50-60	50-60	200-400	85-100
<35	<45	<50	<55	<70

1. Rüzgar potansiyeli, rüzgarın gücünü temsil etmektedir. Rüzgar türbini halihazırda potansiyelin % 20 ile % 30 luk bölümünü kullanabilir. Potansiyel hesaplamaları, deniz seviyesinde 1 Atm lik standart basınç ve 15 °C sıcaklığa karşılık gelen 1.23 kg/m³ hava yoğunluğuna göre yapılmıştır.
2. Yerleşim alanları, ormanlar ve rüzgar kırıcıları yoğun olduğu tarım alanları (pürüzlülük sınıfı 3)
3. Az sayıda rüzgar kırıcının olduğu açık araziler (pürüzlülük sınıfı 1). İç bölgelerde en fazla terah edilen alanlar genellikle bu sınıfta bulunmaktadır.
4. Düzgün kıyı alanları ve çok az sayıda rüzgar kırıcı içeren kara yüzeyleri (pürüzlülük sınıfı 1). Eğer hakim rüzgar yönü deniz tarafından ve sürekli ise, potansiyel daha fazla olabilir.
5. Kıyılardan en az 10 km uzaklıktaki açık denizler (pürüzlülük sınıfı 0).
6. Bütün sınıflarda % 50 ye varan bir hız artışı görülmektedir ve bu sonuç 400 m yüksekliğinde ve 4 km çapındaki simetrik bir tepede yapılan hesaplamalarda elde edilmiştir. Rüzgar hızındaki artış; tepenin yüksekliğine, uzunluğuna ve yapısına bağlıdır.

Şekil A.1. Türkiye Rüzgar Atlası [41]

ÖZGEÇMİŞ

22.10.1982 tarihinde İskenderun' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Hatay' da tamamladıktan sonra 2001 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2005 yılında lisans mezunu olduktan sonra ara vermeden aynı üniversitede yüksek lisans eğitimine başladı. 21 Aralık 2005 ile 09 Şubat 2007 tarihleri arasında Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı.