

**TÜRKİYE’NİN RÜZGAR ENERJİSİ POLİTİKALARI**  
**ve**  
**ENTERKONNEKTE SİSTEMLERE ENTEGRASYONU**

**Semih İlker TÜRKÇÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2005**  
**ANKARA**

Semih İlker TÜRKÇÜ tarafından hazırlanan TÜRKİYE’NİN RÜZGAR ENERJİSİ POLİTİKALARI ve ENTERKONNEKTE SİSTEMLERE ENTEGRASYONU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

Üye : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Üye : Dr. Nursel AKÇAM

Üye : \_\_\_\_\_

Üye : \_\_\_\_\_

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

# **TÜRKİYE’NİN RÜZGAR ENERJİSİ POLİTİKALARI ve ENTERKONNEKTE SİSTEMLERE ENTEGRASYONU**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Semih İlker TÜRKÇÜ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Kasım 2005**

## **ÖZET**

Fosil yakıt kaynaklarının sınırlı oluşu ve hava kirliliği, asit yağmurları ile sera etkisi şeklinde ortaya çıkan çevresel sorunlar nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynakları tüm dünyada giderek artan bir ilgi ile karşılanmakta ve enerji gereksiniminin karşılanmasında önemli bir kaynak olarak görülmektedir. Yenilenebilir, temiz, ucuz bir enerji olan rüzgar enerjisi de bu yenilenebilir enerji kaynaklarına bir örnektir. Dünyadaki kurulu rüzgar gücü 1991’den 2004’ün sonuna kadar 2 GW’dan 34 GW’a yükselmiştir. Dünyanın gelişmiş ülkelerinde bu gelişmeler olurken; ne yazık ki Türkiye’nin rüzgar enerjisi ile ilgilenmeye başlaması büyük ölçüde 1990’lı yılların ortalarına rastlar. Türkiye’nin kurulu rüzgar enerji kapasitesi 1998’de 9 MW iken 2004’de 20 MW’a yükselmiştir. Rüzgar santrallerinin enterkonnekte sistemlere bağlanması, teknik ve fiziksel problemleri bu yenilenebilir enerji kaynağının önemli bir yönüdür. Bu çalışmada rüzgar türbin teknolojisindeki ilerlemeler ve son 20 yıldaki araştırmalar rüzgar türbinlerinin ve rüzgar çiftliklerinin elektrik şebekesine integrasyonundaki problemler analiz edilmiştir. Türkiye’nin rüzgar enerjisi politikalarını ve rüzgar santrallerinin enterkonnette sistemlere entegrasyonu ile karşılaşılan problemler için öneriler sunulmuştur.

**Bilim Kodu : 905**  
**Anahtar Kelimeler : Rüzgar Enerjisi, Enterkonnekte Sistemler**  
**Sayfa Adedi : 100**  
**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU**

**WIND ENERGY POLICIES OF TURKEY AND INTEGRATION OF THE  
WIND POWER PLANTS TO INTERCONNECTED SYSTEM**

**(M.Sc. Thesis)**

**Semih İlker TÜRKCÜ**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**November 2005**

**ABSTRACT**

**Due to limited fossil fuels and their negative impact on environment such as air pollution, acid rains and greenhouse effect, the interest on renewable energy resources has been increasing, gradually, all over the world. Wind energy is also an example for these renewable, clean and cheap energy resources. From 1991 until the end of 2004, global installed capacity has increased from about 2 GW to over 34 GW. While these developments are going on in the leader countries of the world, unfortunately wind energy is noticed on late 1990's in Turkey. The installed capacity of Turkey's wind energy has increased 9 MW in 1998 to 20 MW in 2004. Technical, physical problems and connection of interconnected system of the wind power plants are important aspect of these renewable energy sources. In this study, advances in wind-turbine technology and the results of nearly two decades of research mean that the integration of wind-turbine and wind farms into electricity networks generally analyzed problems. The proposals are presented wind energy policies of Turkey and the solution of these problems and integration of the wind power plants to interconnected system.**

**Science Code : 905**

**Key Words : Wind Energy, Interconnected Systems**

**Page Number : 100**

**Adviser : Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU**

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim sırasında her zaman yakın ilgisini ve desteğini esirgemeyen, çalışmalarım süresince bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, danışman hocam Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanmasında emeği geçen ve manevi desteğini ile her zaman yanımda olan sevgili eşim Dr. Ümmühani ÖZEL TÜRKÇÜ'ye çok teşekkür ediyorum.

Ayrıca beni bugünlere getiren sevgili aileme sonsuz sevgilerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                               | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------|--------------|
| ÖZET.....                                     | iii          |
| ABSTRACT.....                                 | iv           |
| TEŞEKKÜR.....                                 | v            |
| İÇİNDEKİLER .....                             | vi           |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                     | x            |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                      | xi           |
| RESİM LİSTESİ .....                           | xiii         |
| HARİTALARIN LİSTESİ.....                      | xiv          |
| SİMGE VE KISALTMALAR .....                    | xv           |
| 1. GİRİŞ .....                                | 1            |
| 2. ENERJİ KAYNAKLARI VE RÜZGAR ENERJİSİ ..... | 4            |
| 2.1 Enerji Kaynakları .....                   | 4            |
| 2.1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....   | 6            |
| 2.2 Rüzgar Enerjisi.....                      | 8            |
| 2.3 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi.....         | 9            |
| 2.4 Rüzgardaki Enerji.....                    | 13           |
| 3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ .....                    | 20           |
| 3.1. Rüzgar Türbinlerinin Tipleri .....       | 21           |
| 3.2 Yatay Eksenli Türbinler .....             | 22           |
| 3.3 Dikey Eksenli Türbinler .....             | 22           |
| 3.4 Deniz-üstü Rüzgar Türbinleri .....        | 26           |

**Sayfa**

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5.1. Dişli kutusu .....                                                     | 27 |
| 3.5.2. Rotor (pervane) .....                                                  | 28 |
| 3.5.3. Anemometre .....                                                       | 29 |
| 3.5.4. Otomatik yöneltme düzeni .....                                         | 29 |
| 3.5.5. Frenleme düzeni .....                                                  | 30 |
| 3.5.6. Rüzgar türbini yaw mekanizması.....                                    | 30 |
| 3.5.7. Türbin kuleleri.....                                                   | 31 |
| 3.6. Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Prensipleri.....                            | 32 |
| 3.7. Rüzgar Türbinünün Güç Eğrisi .....                                       | 32 |
| 3.8. Rüzgar Türbini Ömrü .....                                                | 34 |
| 3.9. Rüzgar Türbinlerinin Bakımı .....                                        | 34 |
| 3.10. Rüzgar Türbinin Güvenliği .....                                         | 35 |
| 3.11. Rüzgar Türbinlerinin Gelişiminde Ulaşılan Düzey.....                    | 35 |
| 3.12. Rüzgar enerjisinden faydalanma yolları .....                            | 37 |
| 4. DÜNYADAKİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ VE UYGULAMALAR ...                   | 41 |
| 4.1. Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli .....                                  | 41 |
| 4.2. Rüzgar Enerjisi Kullanımının Dünyadaki Gelişimi ve Uygulamaları .....    | 42 |
| 4.3. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli .....                             | 46 |
| 4.4. Rüzgar Enerjisi Kullanımının Türkiye’deki Gelişimi ve Uygulamaları ..... | 50 |
| 4.5. Türkiye’de Ar-Ge Çalışmaları .....                                       | 51 |
| 4.6. Türkiye’de Yürütülen Rüzgar Enerjisi Projeleri .....                     | 52 |
| 5. RÜZGAR ENERJİSİNİN ELEKTRİKSEL UYGULAMALARI.....                           | 56 |

**Sayfa**

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Şebekeden Bağımsız AC/DC Uygulamaları .....                          | 56 |
| 5.2. Uzak DC Uygulamaları .....                                           | 57 |
| 5.3. Şebeke Bağımlı Rüzgar Elektrik Sistemleri .....                      | 57 |
| 5.3.1. Rüzgar türbinlerinin dağıtım şebekesine bağlantısı .....           | 60 |
| 5.3.2. Rüzgar türbinleri iletim şebekesine bağlantısı .....               | 60 |
| 5.4. Rüzgar Enerjisi ile Şebeke Beslenmesinde Karşılaşılan Sorunlar ..... | 61 |
| 5.4.1. Kararlı durum gerilimi .....                                       | 61 |
| 5.4.2. Gerilim adım değişimi .....                                        | 62 |
| 5.4.3. Kırpışma .....                                                     | 63 |
| 5.4.4. Harmonikler .....                                                  | 63 |
| 5.4.5. Gerilim dengesizliği .....                                         | 64 |
| 5.4.6. Güç kalitesi .....                                                 | 64 |
| 5.5. Şebekeye Katkıları ve Faydaları .....                                | 65 |
| 5.5.1. Kayıpların azaltılması .....                                       | 65 |
| 5.5.2. İletim şebekesine katkısı .....                                    | 65 |
| 5.5.3. Dağıtım şebekesine katkısı .....                                   | 66 |
| 6. RÜZGAR SANTRALLERİNDE ELEKTRİK ÜRETİMİ .....                           | 68 |
| 6.1. Dönüşüm Sistemleri ve Kontrol Teknikleri ..                          | 68 |
| 6.1.1. Sabit hız sabit frekans dönüşüm sistemleri (SHSF) ..               | 68 |
| 6.1.2. Değişken hız sabit frekans dönüşüm sistemleri (DHSF) ..            | 69 |
| 6.1.3. Değişken hız değişken frekans dönüşüm sistemleri (DHDF) ..         | 71 |
| 6.2. Üç fazlı PWM inverter kullanarak yüklerin beslenmesi ..              | 73 |
| 6.2.1. D.a./d.a. konverter devresi ..                                     | 74 |

**Sayfa**

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.2. Üç fazlı dört telli PWM inverter . . . . .                                                   | 76  |
| 6.3. Rüzgar Türbin Generatörlerinde Dengesiz Gerilim Problemi .. . . .                              | 77  |
| 7. SENKRON MAKİNALI ENERCON E-40 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN<br>ÖZELLİKLERİ .. . . .                       | 78  |
| 7.1. 600 KW Senkron Makinalı Enercon E-40 Rüzgar<br>Türbinlerinin Çalışma Prensipleri .. . . .      | 78  |
| 7.1.1. Generatörün gerilim üretmesi .. . . .                                                        | 79  |
| 7.1.2. Güç üretme ve şebekeye paralel bağlanması .. . . .                                           | 81  |
| 7.1.3. Gerilim ve frekans ayarı .. . . .                                                            | 81  |
| 7.1.4. Reaktif güç ayarı .. . . .                                                                   | 81  |
| 7.1.5. Devreden çıkma .. . . .                                                                      | 82  |
| 7.1.6. Kısa devre .. . . .                                                                          | 82  |
| 7.1.7. Şebekeye bağlanma .. . . .                                                                   | 82  |
| 7.2. Enercon E-40 Modeli Ana Techizata Ait Tanıtıcı Bilgiler ve teknik<br>Karakteristikler .. . . . | 83  |
| 7.2.1. Makine tipi .. . . .                                                                         | 83  |
| 7.2.2. İşletme verileri .. . . .                                                                    | 83  |
| 7.2.3. Şebeke ile bağlantı .. . . .                                                                 | 88  |
| 7.3. Enercon E-40 Modeli ile Dewind D48 Türbin Modelinin<br>Karşılaştırılması .. . . .              | 89  |
| 8. SONUÇLAR .. . . .                                                                                | 92  |
| 8.1. ÖNERİLER .. . . .                                                                              | 93  |
| KAYNAKLAR .. . . .                                                                                  | 96  |
| ÖZGEÇMİŞ .. . . .                                                                                   | 100 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                               | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Yenilenebilir ve Sonlu enerji sistemlerinin karşılaştırılması .....                                                                      | 5     |
| Çizelge 2.2. Yenilenebilir enerji kaynakları .....                                                                                                    | 7     |
| Çizelge 2.3. Yıllık dünya yenilenebilir enerji potansiyeli.....                                                                                       | 7     |
| Çizelge 2.4. Pürüzlülük ile Shear'ı Kesmesi Faktörü (n) arasındaki bağıntı .....                                                                      | 17    |
| Çizelge 2.5. Pürüzlülük Faktörü ile Pürüzlülük Uzunluğu arasındaki bağıntı.....                                                                       | 18    |
| Çizelge 4.1. Avrupa Birliği ülkelerine ait kurulu rüzgar güçleri (MW) .....                                                                           | 45    |
| Çizelge 4.2. Aday ülkelere ait kurulu rüzgar güçleri (MW) .....                                                                                       | 46    |
| Çizelge 4.3. Diğer ülkelere ait kurulu rüzgar güçleri (MW).....                                                                                       | 46    |
| Çizelge 4.4. Bölgelere göre ortalama rüzgar gücü yoğunluğu ve hızları.....                                                                            | 47    |
| Çizelge 4.5. EİE rüzgar enerjisi gözlem istasyonlarında 10m yükseklikte ölçülen aylık ortalama rüzgar hızları (m/s).....                              | 49    |
| Çizelge 4. 6. 2000 Ekim itibariyle Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü .....                                                                               | 51    |
| Çizelge 4.7. Lisans almak için EPDK'ya başvurmuş Rüzgar Enerjisi Santrali Projeleri .....                                                             | 55    |
| Çizelge 7.1. EİE rüzgar enerjisi gözlem istasyonlarında 10m yükseklikte ölçülen aylık ortalama rüzgar hızları (m/s).....                              | 87    |
| Çizelge 7.2. Enercon E48 model rüzgar türbini ile Dewind D48 model rüzgar türbinin karşılaştırılması.....                                             | 89    |
| Çizelge 7.3. Enercon E48 model rüzgar türbini ile Dewind D48 rüzgar türbinlerinin rüzgar hızına bağlı olarak hesaplanmış üretilebilecek güçleri ..... | 90    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Enerji kaynakları.....                                                    | 4     |
| Şekil 2.2. Doğal enerji akışını ve faydalanılan enerji akışı .....                   | 5     |
| Şekil 2.3. Pers Uygarlığında görülen dikey eksen tipli yel değirmeni diyagramı ..... | 10    |
| Şekil 2.4. Pers Uygarlığında kullanılan bir başka yel değirmeni .....                | 10    |
| Şekil 3.1. Önden ve arkadan rüzgarlı makineler .....                                 | 23    |
| Şekil 3.2. Yatay ve düşey eksenli sistemler .....                                    | 23    |
| Şekil 3.3. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması:.....                              | 25    |
| Şekil 3.4. Bir Rüzgar Türbini Üzerindeki Ekipmanlar ve Konumları .....               | 27    |
| Şekil 3.5. Dişli kutusu .....                                                        | 28    |
| Şekil 3.6. Rotor (Pervane).....                                                      | 28    |
| Şekil 3.7. Anemometre.....                                                           | 29    |
| Şekil 3.8. Otomatik yön düzeltme düzeni .....                                        | 30    |
| Şekil 3.9. Basit bir frenleme tertibatı .....                                        | 30    |
| Şekil 3.10. Yaw mekanizması.....                                                     | 31    |
| Şekil 3.11. Farklı rüzgar türbinleri için kanat uç hız oranları .....                | 33    |
| Şekil 3.12. Rüzgarın gücü formülü .....                                              | 34    |
| Şekil 3.13. Düşük hızlı rüzgar türbini ve su pompalama sistemi .....                 | 38    |
| Şekil 3.14. Yüksek hızlı rüzgar türbinine sahip su pompalama sistemi .....           | 39    |
| Şekil 3.15. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi .....                                    | 40    |
| Şekil 5.1. Şebekeden bağımsız bir rüzgar türbinin şematik gösterimi.....             | 56    |
| Şekil 6.1. Senkron generatör alan uyarımlı SHSF dönüşüm sistemi.....                 | 69    |

| <b>Şekil</b>                                                                        | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 6.2. Rotor direnç kontrolü DHSF dönüşüm sistemi.....                          | 70           |
| Şekil 6.3. Bilezikli asenkron generatörlü kayma enerjisi kontrolü dönüşüm sistemi . | 71           |
| Şekil 6.4. Senkron generatör alan sargı kontrolü DHDF dönüşüm sistemi .....         | 72           |
| Şekil 6.5. Kapasitör uyartımlı asenkron jeneratörlü dönüşüm sistemi .....           | 73           |
| Şekil 6.6. Rüzgardan elektrik enerjisi üretiminin blok diyagramı .....              | 74           |
| Şekil 6.7. D.a/d.a boost konverter devresi .....                                    | 75           |
| Şekil 6.8. Rüzgar enerji sistemi ve kontrol birimi .....                            | 76           |

**RESİMLERİN LİSTESİ**

| <b>Resim</b>                                                      | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 2.1. Aydın'ın Didim İlçesinden bir yel değirmeni resmi..... | 11           |
| Resim 2.2. Putnam rüzgar türbini .....                            | 11           |
| Resim 3.1. Kopenhag Limanı rüzgar tarlası.....                    | 26           |
| Resim 5.1. Tipik Şebeke Bağlantılı Rüzgar Türbinleri.....         | 58           |

**HARİTALARIN LİSTESİ**

| <b>Harita</b>                                                             | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Harita 4.1. Avrupa’da 2004 yılı sonuna kadar kurulu rüzgar gücü (MW)..... | 44           |
| Harita 4.2. Türkiye Rüzgar Atlası .....                                   | 48           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Kısaltmalar | Açıklama                                      |
|-------------|-----------------------------------------------|
| (AB)        | Avrupa Birliği                                |
| (TEİAŞ)     | Türkiye Elektrik İletim A.Ş.                  |
| (WECS)      | Çağdaş Rüzgar Enerjisi Çevrim Sistemleri      |
| (DMİ)       | Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü     |
| (EİEİ)      | Elektrik İşleri Etüt İdaresi                  |
| (AREB-TŞ)   | Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi |
| (EPDK)      | Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu              |
| (UCTE)      | Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyonu Birliği |
| (d.a.)      | Doğru Akım                                    |
| (a.a)       | Alteratif Akım                                |

## 1. GİRİŞ

Enerjinin yeterli, zamanında, kaliteli, ekonomik, güvenilir ve temiz olarak sunumu günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen en önemli göstergelerden biridir. Artan dünya nüfusu, modern hayatın getirdiği yenilikler ve teknolojinin gelişimi enerjiye olan bağımlılığı ve ihtiyacı son yıllarda daha belirgin bir biçimde artırmış ve enerji, en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir (1).

Gelişmişliğin göstergesi olarak elektrik enerjisi kurulu gücü ve buna bağlı olarak kişi başına düşen tüketim miktarlarının değerlendirildiği günümüzde, fosil enerji kaynaklarının bilinçsizce kullanılarak insanlığın hizmetine sunulması, hem sınırlı ve yenilenemeyen doğal kaynakların kısa zamanda tükenmesine hem de bilinçsiz tüketim yoluyla çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır. Bu sorunlar mevcut enerji kaynaklarının iyi kullanılması ve yeni enerji kaynaklarının bulunması ile aşılmaya çalışılmaktadır (2).

Yenilenebilir, temiz, ucuz bir enerji olan rüzgar enerjisi de bu yeni enerji kaynaklarına bir örnektir. Rüzgar enerjisi çağdaş ülkelerin gündemine 1980'li yıllarda girmiş ve hızla önemini arttırmıştır (3).

Avrupa Birliği (AB) ülkeleri Kyoto protokolü çerçevesinde CO<sub>2</sub> emisyon oranını 2012 yılına kadar mevcut duruma göre % 8 düşürmeyi hedeflemektedir. Herhangi bir önlem alınmadığı takdirde 2010 yılında CO<sub>2</sub> emisyon oranının mevcut duruma göre %50 daha fazla olacağı bildirilmektedir. Bu nedenle AB ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim yapılması teşvik edilmektedir (4).

AB standartlarına göre yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi teşvik edilmekle birlikte, kaynak seçimi konusunda herhangi bir hedef gösterilmemektedir. Her ülke bağımsız olarak, ulusal çıkarları ve programları doğrultusunda, en ekonomik ve en güvenilir yenilenebilir enerji kaynağını öncelikle değerlendirebilir. Halihazırda, ülkemizde ekonomik olarak enerji üretiminde değerlendirilebilecek hidrolik kaynakların 2003 yılı sonu itibarıyla %35'i kullanılmış ve % 8'i inşa halinde olup, % 57'si de değerlendirilmeyi beklemektedir (4).

AB ülkelerinde hidrolik potansiyelin hemen tamamına yakını elektrik üretiminde değerlendirilmiştir. Mevcut durumda İspanya'daki bir proje dışında AB ülkelerinde büyük hidrolik santral potansiyeli kalmamıştır. AB ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynakların kullanımı konusunda büyük hidrolik santrallerin gündemde olmamasının nedeni budur. AB ülkelerindeki hidrolik kaynakların tamamına yakını değerlendirildiğinden, hidrolik dışındaki yenilenebilir yeni enerji kaynakların ekonomik olarak kullanımı konusundaki çalışmalar ön plana çıkmaktadır (4).

Almanya ve Danimarka'da, diğer yenilenebilir kaynakların kıtlığı ve tamamına yakınının değerlendirilmiş olması, ayrıca bu ülkelerin rüzgar santralleri üretimi ve geliştirilmesi teknolojisinin önde gelen temsilcilerinden olmaları nedeniyle, ulusal çıkarlarına uygun olarak rüzgar santrallerinden elektrik üretimi teşvik edilmektedir (5).

Türkiye'de enerjinin; maliyeti, yeterli ölçüde sağlanması ve çevreye etkileri halen tartışılmaktadır. Bu durum, incelenmesi gereken sorunlar olduğunu açıkça göstermektedir. Bir sorunun aşılması için problemin doğru olarak tanımlanması ve uygulanabilir çözümler bulunması gerekmektedir. Bunun için, doğru ve taze bilgiye ulaşılması, en gelişmiş karar destek araçlarının kullanılması ve toplumdaki bu konuda deneyimli kişilerle görüş alış-verişi içinde olunması gerekmektedir (6).

Türkiye'deki enerji profili gözden geçirildiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının yeri ve önemi açıkça görülmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı oldukça düşük düzeylerde (%1 ve altında) ve bu enerji türleri ile yeterince ilgilenilmemektedir. Özellikle, güneş ve rüzgar enerjisinin kullanımı, Türkiye 'nin enerji bütçesine ciddi katkılar sağlayacaktır (7). Enerji açığının kapatılması amacıyla yenilenebilir doğal enerji kaynaklarından yararlanılması bir yöntem olarak düşünülebilir (8).

Rüzgar santral başvuruları otoprodüktör statüsünde artarak devam etmektedir. Rüzgar enerjisi santralleri, yapıları gereği sisteme bağlandıkları noktada elektrik enerjisinin kalitesi üzerinde ani gerilim değişimi, fliker, harmonik gibi bazı bozucu etkiler yapmaktadır. Bu etkilerin aynı noktadaki diğer müşteriler için izin verilen

limitler içinde kalmasını sağlamak üzere bağlanabilecek kapasite ile ilgili bazı kısıtlar getirilmektedir. Bu kısıtlar konusunda bugüne kadar belli bir standart belirlenmemiş olup, her ülkede değişik uygulamalar yapılmaktadır. Ülkemizde ise bağlantı noktasında sistemin kısa devre gücüne bakılarak santrallerin kurulması için direkt ya da dağıtım sistemi üzerinden bağlı olduğu indirici merkez kısa devre gücünün %5'i kadar rüzgar santrali bağlanabileceğinin belirtildiği Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) kararına uyması gerekmektedir. Bu sebeple erken yapılacak bir başvuruda firma diğer firmaların önüne geçecektir (9).

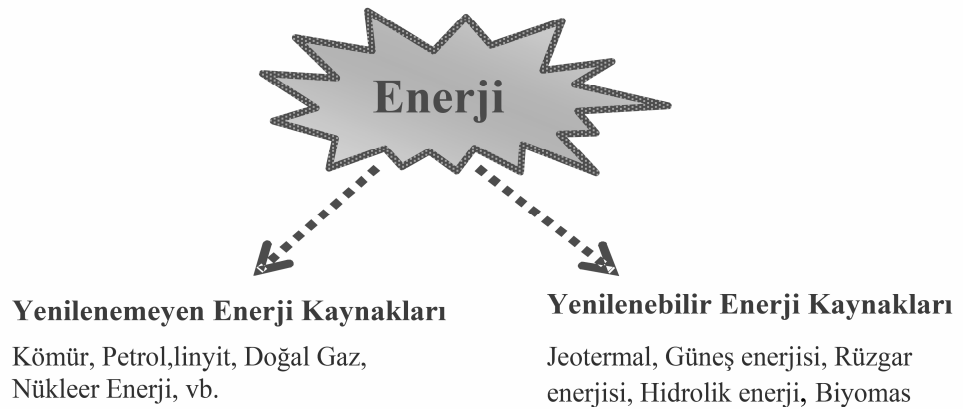
Bağlantı noktasında santralin yarattığı ani gerilim değişimi, fliker ve harmonikler gibi bozucu etkiler hesaplanarak belirtilen sınırlar içinde kalıp kalmadığı araştırılmakta ve buna göre karar verilmektedir. Bunun için TEİAŞ'a başvuru aşamasında tesis edilecek santralin teknik karakteristiği ile ilgili olarak detay bilgilere ihtiyaç duyulmakta, bu bilgilerin temininde güçlük yaşanmakta ve montajı yapılan tesis ile farklılık yaşanabilmektedir. Ayrıca bu metotla belli teknolojileri dolayısıyla türbin jeneratör üreticilerini adresleme riski bulunmaktadır. Bu nedenle bugüne kadar uygulana gelmiş yöntemle rüzgar santrallerinin sisteme bağlantısının incelenmesi uygun görülmektedir (9).

Bu çalışmada rüzgar enerjisi hakkında genel bilgiler ortaya konularak, Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Politikaları ve Enterkonnekte Sistemlere Entegrasyonu araştırılmış olup, bağlantı aşamasında karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri ile rüzgar türbinlerinin şebekeye katkıları ve faydaları incelenmiştir. Bu amaçla, rüzgar enerjisi ile ilgili araştırma yapan kamu kuruluşları ve özel sektör kuruluşlarından, uzman kişilerden; rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri hakkında genel bilgiler alınarak, Türkiye'de rüzgar enerjisi potansiyeli ve kurulu rüzgar enerjisi santralleri ile kurulması hedeflenen santraller araştırılarak, Türkiye ekonomisine katkıları araştırılmıştır.

## 2. ENERJİ KAYNAKLARI VE RÜZGAR ENERJİSİ

### 2.1. Enerji Kaynakları

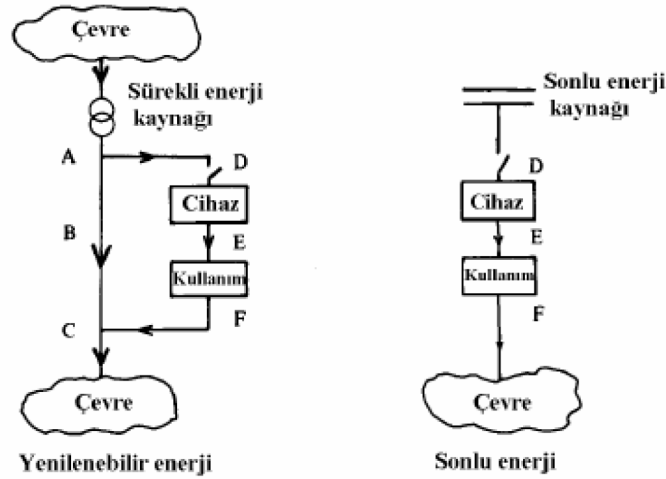
Enerji, değişik kriterlere göre sınıflandırılrsa da en genel haliyle 7 grupta incelenmektedir. Bu gruplar; mekanik (kinetik ve potansiyel) enerji, ısı (termik) enerji, kimyasal enerji, elektrik enerjisi, ışın enerjisi, atom (çekirdek) enerjisi ve birleşme (fizyon) enerjisidir (10). Eğer bu sınıflandırmada dünyanın varolma süresi referans alınırsa enerji; tükenebilen enerji ve yenilenebilir enerji olmak üzere iki grupta incelenir (Şekil 2.1.) (10).



Şekil 2.1. Enerji kaynakları

Enerji ekonomik kalkınmanın bir lokomotifidir (11). Dünyada enerji tüketiminin sürekli büyüdüğü gözlenmektedir. Ekonomik yönden işletilebilir olup olmadıkları dikkate alınmaksızın teknolojik araçlarla yararlanılabilir duruma getirilebilen doğadaki enerji kaynaklarının tümü "enerji varlıkları" olarak belirtilebilir. Bu varlıkların bir bölümü ekonomik yönden işletilebilir durumda ya da ileride ekonomik olarak değerlendirilebileceği bilinen veya beklenen tükenebilir enerji kaynaklarıdır. Bunların diğer bir bölümü de yine ekonomik yönden işletilebilir durumda olan ve sürekli yenilenebilen doğal enerji kaynaklarıdır. Tükenebilir enerjilere "stok enerjiler", yenilenebilir enerjilere "akım enerjileri" de denilmektedir. Katı yakıtlar, petrol, doğal gaz ve nükleer enerjiler tükenebilir enerjileri oluştururlar. Şekil 2.2.'de

yenilenebilir ve tükenebilir enerji sistemlerindeki enerji akış şeması verilmiştir. Burada ABC hattı doğal enerji akışını DEF hattı ise faydalanılan enerji akışını göstermektedir (12). Çizelge 2.1.'de ise sonlu enerji ile yenilenebilir enerji değişik şekillerde karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.2. Doğal enerji akışını ve faydalanılan enerji akışı (12).

Çizelge 2.1. Yenilenebilir ve Sonlu enerji sistemlerinin karşılaştırılması (12).

|                           | Yenilenebilir Enerji Kaynağı            | Sonlu Enerji Kaynağı                                        |
|---------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Örnekler                  | Rüzgar, Güneş, Biyokütle, Gel-git       | Kömür, petrol, doğal gaz                                    |
| Kaynak                    | Doğal çevreden                          | Konsantr kaynaklardan                                       |
| Normal durum              | Sürekli enerji akışı                    | Statik enerji deposundan                                    |
| Başlangıç yoğunluğu       | Düşük yoğunluk < 300 W/m <sup>2</sup>   | > 100 kW/m <sup>2</sup>                                     |
| Kaynak ömrü               | Sonsuz                                  | Sonlu                                                       |
| Kaynağın fiyatı           | Bedava                                  | Gittikçe artıyor                                            |
| Ekipman fiyatı            | Yüksek 2000 \$ / kW                     | Orta 500 \$ / kW                                            |
| Değişim ve kontrol        | Düzensiz, geri besleme ile yük kontrolü | Sabit, geri besleme kontrolü ile kaynağın ayarlanması       |
| Kullanım yeri             | Kent ve küçük yerleşim                  | Büyük yerleşim yeri, uluslararası                           |
| Boyut                     | Küçük ölçekli                           | Büyük ölçekli                                               |
| Çevre                     | Kırsal ve endüstrileşmemiş bölgeler     | Şehir ve endüstri                                           |
| Bağımlılık                | Kendi kendine yeter                     | Sistem dış girdilere bağlı                                  |
| Emniyet                   | İşletme anında yerel tehlike olabilir   | Hata durumunda ciddi tehlike                                |
| Kirlilik ve çevresel etki | Genellikle düşük çevresel zarar         | Özellikle hava ve suda çevresel kirlilik mümkün             |
| Estetik                   | Genellikle kabul edilebilir düzeyde     | Küçük yapılar kabul edilebilir düzeyde büyük yapılar çirkin |

### 2.1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları

Gelişen sanayi, nüfus artışı, sınırlı olan doğal kaynakların ziyan edilmeden ve zarar verilmeden kullanımı; insanoğlunun gündeminde artık en üst sıraları işgal eder duruma gelmiştir. Özellikle medeniyetlerin oluşmasını sağlayan su, yiyecek, enerji gibi doğal ve sınırlı kaynakların etkin ve temiz bir şekilde kullanılması çok önemli bir yer tutmaya başlamıştır (13).

Yenilenebilir enerji kaynakları, kendisini dünya varoldukça yenileyen, yani tükenmeyen enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları enerjinin ana kaynağına göre, güneş kaynaklı, dünya kaynaklı ve ay kaynaklı olarak üç grupta incelenebilir (Çizelge 2.2.) (13).

Yenilenebilir enerji kaynakları bilindiği gibi sürekliliği itibariyle sürdürülebilirliklerinden başka, dünyanın her ülkesinde var olabilen bir özelliği ile de büyük önem taşımaktadır. Fosil yakıtları esas olan enerji kullanımı; yakıt konusunda dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri ve çevre sorunları gibi önemli olumsuzlukların yanında, dünya fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmaktadır. Diğer taraftan çevresel etkileri, yenilenemeyen enerji kaynaklarına oranla çok azdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, mevcut teknik ve ekonomik sorunların çözülmesi halinde 21. yüzyılda en önemli enerji kaynağı olacağı kabul edilmektedir (14-16).

Çizelge 2.2. Yenilenebilir enerji kaynakları (13)

| YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI |                            |                            |                           |                            |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Ana Kaynak                      | Birincil Enerji Kaynakları | Doğal Enerji Dönüşümü      | Teknik Enerji Dönüşümü    | Kullanım Enerjisi          |
| Güneş                           | Su                         | Buharlaştırma, Yağış       | Su Güç Tesisleri          | Elektrik Enerjisi          |
|                                 | Rüzgar                     | Atmosferdeki Hava Hareketi | Rüzgar Enerjisi Tesisleri | Elektrik ve Mekanik Enerji |
|                                 |                            | Dalga Hareketi             | Dalga Enerjisi Tesisleri  | Elektrik ve Mekanik Enerji |
|                                 | Güneş Işınları             | Yer ve Atmosferin Isınması | Isı Pompaları             | Isı Enerjisi               |
|                                 |                            | Güneş Işınları             | Kolektörler               | Isı Enerjisi               |
|                                 |                            |                            | Güneş Pilleri             | Elektrik Enerjisi          |
|                                 | Biyomas                    | Biyomas Üretimi            | Isı Güç Tesisleri         | Isı ve Elektrik Enerjisi   |
|                                 |                            |                            | Dönüşüm Tesisleri         | Yakıt Enerjisi             |
| Dünya                           | Yer Merkezi Isısı          | Jeotermal Enerji           | Jeotermal Güç Tesisleri   | Isı ve Elektrik Enerjisi   |
| Ay                              | Ay Çekimi Gücü             | Gel-Git Olayı              | Gel-Git Güç Santralleri   | Elektrik Enerjisi          |

Çizelge 2.3.'te çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık potansiyelleri belirtilmiştir (13).

Çizelge 2.3. Yıllık dünya yenilenebilir enerji potansiyeli (13)

| YILLIK DÜNYA YENİLENEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ |                |                 |                           |                 |                |
|-----------------------------------------------|----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|----------------|
| Güneş Kaynaklı Enerji Türü                    | Güneş Enerjisi | Rüzgar Enerjisi | Dalga ve Gel-Git Enerjisi | Hidrolik Enerji | Biyomas Enerji |
| Dünya Potansiyeli (Milyar kWh)                | 1.524.240.000  | 30.844.000      | 7.621.000                 | 46.000          | 1.524.000      |

## 2.2. Rüzgar Enerjisi

Günümüzün yenilenebilir enerji kaynaklarının en çok gelecek vaad edenlerinden birisi rüzgar enerjisidir. Elektriğin temiz ve yenilenebilir kaynağı olan rüzgar enerjisi, dünyanın en kolay ve çabuk üretilen enerjisidir. Rüzgar gücü yenilenebilir enerji teknolojilerinin en ileri ve ticari olarak mevcut olanıdır. Tamamen doğal bir kaynak olarak kirliliğe neden olmayan ve tükenme olasılığı olmayan bir güç sağlamaktadır (17).

Rüzgar enerjisi, dönüşüme uğramış güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmamasından dolayı oluşan sıcaklık ve buna bağlı basınç farkları rüzgarı oluşturmaktadır (18).

Rüzgar, yüksek basınç alanından alçak basınç alanına yer değiştiren havanın dünya yüzeyine göre bağlı hareketidir. Bu enerji yerel coğrafi farklılık ve homojen olmayan ısınmaya bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler gösterir.

Rüzgar enerjisinde; rüzgarın hızı, yönü ve esme saat sayısı gibi özellikleri değerlendirilir. Rüzgarın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgarın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (18).

*Niçin Rüzgar enerjisi sorusuna;*

Asit yağmurlarına yol açmayan,

Atmosferik ısınmaya neden olmayan,

CO<sub>2</sub> emisyonu olmayan ve oksijen tüketmeyen,

Radyoaktif etkisi olmayan,

Ham madde sıkıntısı olmayan,

Teknolojik gelişim hızlı ve modern,

Dışa bağımlı olmayan,

Kısa sürede devreye alınabilen ve tevsii edilebilen,

Rüzgar enerjisi tesisleri kuruldukları alanın sadece %1'lik bölümünü kullanırlar. Geri kalan alan diğer faaliyetlerde (tarımsal, hayvancılık vb.) rahatlıkla kullanılabilir.

Doğal bitki örtüsü ve insan sağlığına olumsuz etkileri olmayan,

1 Türbin (0,6 MW) rüzgar enerjisinde 86 000 ağaca eşdeğer oksijen tasarrufu sağlayan ekonomik ve sağlıklı bir enerji üretim kaynağıdır. Nedenlerini sıralayarak cevap verebiliriz.

Ayrıca diğer enerji türlerini destekleyerek doğal kaynakların tüketilmesini geciktirecek ve yeni teknolojilerin gelişmesi için zaman sağlayacaktır.

Tabii bazı olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Ancak bu mahsurların gelişen teknoloji ile beraber ortadan kalkacağı değerlendirilebilir. Bu mahsurlar şunlardır;

Görsel ve estetik olarak olumsuzdur.

Gürültülüdürler ve kuş ölümlerine neden olur.

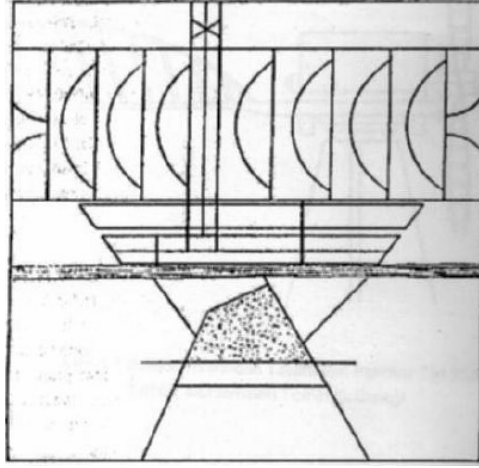
Radyo ve tv alıcılarında parazitlenme yaparlar. Bu nedenle İngiltere başta olmak üzere bir çok Avrupa ülkesinde büyük rüzgar türbinlerinin yarattığı çevre sorunları nedeniyle milli park alanlarının sınırları içine ve çok yakınlarına kurulması yasaklanmıştır (19).

### **2.3. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi**

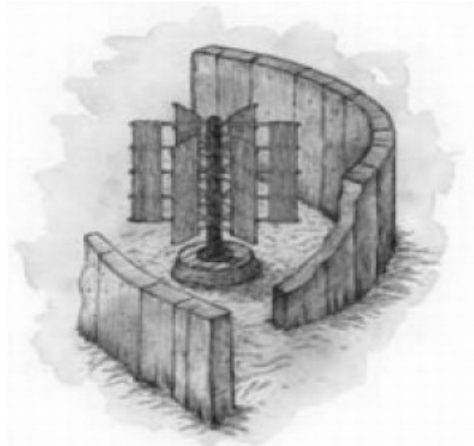
Milattan önceki yıllarda kullanılmaya başlanılan rüzgar enerjisi, denizlerde yelkenli gemilere, karalarda ise yel değirmenlerine ve rüzgar millerine ana güç kaynağı olmuştur. Özellikle buğday, mısır öğütme ve su pompalama gibi gereksinmeler uzun yıllar bu yolla çözülmüştür (20).

Rüzgar enerjisi kullanımı M.Ö. 2800'lü yıllarda Orta Doğu'da başlamıştır. M.Ö.17. yüzyılda Babil Kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgar enerjisinin aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Yel değirmenleri ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Türklerin ve İranlıların ilk yel değirmenlerini M.S.7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın,

Avrupalılar yel değirmenlerini ilk olarak haçlı seferleri sırasında görmüşlerdir. Fransa ve İngiltere’de yel değirmenlerinin kullanılmaya başlaması ise 12. yüzyılda olmuştur. Hollanda’da çatısı dönen rüzgar değirmenleri XVIII. yüzyıl başlarında kullanılmıştır (20).



Şekil 2.3. Pers Uygarlığında görülen dikey eksen tipli yel değirmeni diyagramı (21).



Şekil 2.4. Pers Uygarlığında kullanılan bir başka yel değirmeni (22).



Resim 2.1. Aydın'ın Didim İlçesinden bir yel değirmeni resmi (23)

1918 yılında Danimarka'da başlatılan bir çalışma ile 120 kırsal merkezde elektrik üretimini 20-30 kW'lık rüzgar türbinlerinin kullanımı sağlanmıştır. Rusya'da 1931 yılında 100 kW'lık rüzgar türbini yapılmıştır. 1941 yılında ABD'de Vermont yakınlarında Granpa's Knop'da kurulan Putnam rüzgar türbini 1250 kW gücü ile dönemin en büyük rüzgar kuvvet makinesi olmuştur. İki kanatlı rotorun çapı 53 m idi. Putnam türbini, modern rüzgar makinelerinin ilkidir (Resim 2.2.). Toplam ağırlığı 250 ton olan bu rüzgar santraline, bir milyon dolar yatırım yapılmıştı. Ancak titreşim ve malzeme yorgunluğundan dolayı 26 Mart 1945 sabahı olan bir kazada kanatlarından biri kopmuş, yaklaşık 8 tonluk kanat 230 m uzağa fırlamıştır (20).



Resim 2.2. Putnam rüzgar türbini (22)

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından 1945'de İngiltere'de başlatılan deneysel çalışmalar sonucunda Enfeld'da 10 kW gücündeki Andreu makinesi kurulmuştur. Bu rüzgar türbininin rotoru üç kanatlı olup, çapı 15 metreydi. 1947 yılında Danimarka'da başlatılan ve modern yaklaşımlar içeren elektrik üretim amaçlı bir başka çalışmanın son ürünü ise 1959 yılında işletmeye sokulan 200 kW'lık Gedser türbini olmuştu. Bu makinenin 24 metre çaplı rotoru üç kanatlı idi. Aynı dönemde Fransa'da yapılan makinelerden Noeget Le Roi'deki rüzgar türbini 300 kW gücündedir. Bu yıllardaki ilgi artışının sebepleri şu şekilde sıralanabilir (24-25).

Hızla artan elektrik enerjisi talebi karşısında, ekonomik olarak geliştirilebilen hidroelektrik kaynakların yakıt tedarikinin yetersiz kalması,  
 Hidroelektrik santrallerinin ve buhar türbinlerinin oluşturulmasında, hem ilk yatırım sırasında, hem de enerjinin iletilmesi esnasında hızla artan yüksek maliyetler,  
 Savaş sonrasındaki zor ekonomik ve politik koşullar nedeniyle ülkelerin enerji üretiminde ithal yakıtlar yerine kendi öz kaynaklarına yönelmesi,  
 Kömür ve petrol türevli kaynakların yakıt olarak kullanımının yüksek hızla artması ve dolayısıyla rezervlerin azalmaya başlaması,  
 Savaş sırasındaki araştırma-geliştirme çalışmalarının sonucunda uçak konstrüksiyonlarında uygulanan aerodinamik bilgi birikiminin büyük bir oranda artması ve bu bilginin büyük rüzgar türbinlerinin konstrüksiyonu yolunda kullanılabilirliği,  
 Yaygın enerji ağına farklı kaynaklardan enerji ve güç bağlanabilmesinin avantajlarının değerlendirilmesi,  
 Rüzgar türbinleri ile ilgili denemelerin yapılması ve bu tip uygulamaların ekonomik bir tesis olarak başarılı olmamasına karşın, rüzgar enerjisinden faydalanarak elektrik üreten büyük tesislerin pratik olarak iyi bir performansla çalışabileceğinin kanıtlanması (24-25).

1961 yılında Roma'da Birleşmiş Milletler tarafından düzenlenen "Enerjinin Yeni Kaynakları Konferansı'nda" ele alınan üç kaynaktan biri rüzgar enerjisi idi. Böylece, çok eskiden bugüne tanınan rüzgar enerjisi, teknolojik gelişmelerle ele alınıyor yeni ve yenilenebilir kaynaklar arasına sokuluyordu. Ucuz petrol döneminde güncellik

kazanmayan rüzgar enerjisi, 1974-1978 yılları arasındaki yapay petrol bunalımları ardından gündeme daha çok girmiştir. Bu noktadan sonra da Rüzgar Enerjisi eski popülerliğine kavuşmuştur (24).

Rüzgar enerjisinin gelişimine, 1980'li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Artık eski tip rüzgar jeneratörleri yerine, modern ve çağdaş rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (WECS) kurulmaktadır. Ayrıca rüzgar türbinleriyle beraber dizel motor ve güneş fotovoltaik (PV) jeneratörü içeren rüzgar-dizel-PV hibrid sistemler de geliştirilmiştir. Bir tüketiciyi besleyecek tek makine yerine, birden çok türbin içeren rüzgar çiftlikleri ile elektrik şebekeleri için üretimi yapılır hale gelmiştir. ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç'in katkıları sonucunda, deniz üstünde, kıyıdan uzakta rüzgar santralleri kurulmuştur (24).

#### 2.4. Rüzgardaki Enerji

Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi için temel veriler rüzgarın hızı ve esme saat sayısıdır. Bu veriler kullanılarak bir yöreye ait potansiyel enerji değerini ortaya koymak olanaklıdır. Bunun için, rüzgar potansiyelini tanımlayan kinetik enerjinin hesaplanması gerekir. Havanın ağırlığı ve hızı olması nedeniyle kinetik enerjisi vardır. Belirli bir yöredeki rüzgar enerjisi kinetik enerji bağıntısıyla ortaya konulur (20).

Kinetik enerji formül ;

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m_h \cdot v_{\delta}^2 \quad [2.1]$$

olup burada;

$E_K$  : Rüzgardaki kinetik enerji (J),

$v_{\delta}$  : Ölçüm yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s),

$m_h$  : Havanın kütlesi (kg) dir.

Havanın kütlesi ( $m_h$ ) aşağıdaki formül ile belirlenir:

$$m_h = \rho_h \cdot V_h \quad [2.2]$$

Burada;

$\rho_h$  : Havanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ),

$V_h$  : Hava hacmi ( $\text{m}^3$ )dir.

Hava hacmi ( $V_h$ )ise;

$$V_h = v_{\ddot{o}} \cdot s \cdot t \quad [2.3]$$

formülü ile hesaplanır.

Burada;

$v_{\ddot{o}}$  : Ölçüm yüksekliğindeki rüzgar hızı ( $\text{m/s}$ ),

$s$  : Rotor süpürme alanı ( $\text{m}^2$ ),

$t$  : Ölçüm zamanını ( $\text{s}$ ) dır.

Böylece, (3) eşitliği (2) eşitliğinde yerine konularak, kinetik enerji eşitliğinde gerekli düzenlemeler yapılacak olursa, (Er) Rüzgar enerjisi (J);

$$E_r = \frac{1}{2} \rho_h \cdot s \cdot v_{\ddot{o}}^3 \cdot t \quad [2.4]$$

bağıntısı ile tanımlanmış olur.

Bu eşitlikte  $t = 1$  alınacak olursa,

Birim zamandaki enerji yani (P), rüzgarın anlık gücü ;

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho_h \cdot s \cdot v_{\ddot{o}}^3 \quad [2.5]$$

olmaktadır.

Burada;

P : Rüzgarın anlık gücü (W) dır.

Değişik rüzgar hızlarına sahip yörelerin rüzgar güç ve enerjilerini karşılaştırmak amacıyla, rüzgar güç ve enerji yoğunluğu teriminden yararlanılır. Buna göre [2.5] eşitliği düzenlenecek olursa, (Py), Ölçüm yüksekliğindeki güç yoğunluğu (W/m<sup>2</sup>);

$$P_y = P/s = \frac{1}{2} \rho_h \cdot v_o^3 \quad [2.6]$$

(Ey), Enerji yoğunluğu ise (Wh/m<sup>2</sup>yıl) ;

$$E_y = P \cdot f / s = \frac{1}{2} \rho_h \cdot v_o^3 \cdot f \quad [2.7]$$

Burada;

s : Rotor süpürme alanını (m<sup>2</sup>),

f : Esme saat sayısını (h/yıl) göstermektedir.

Yukarıda yazılan (4), (5), (6) ve (7) nolu eşitlikler rüzgar hızının ölçüm yüksekliğindeki güç ve enerjilerinin doğal potansiyellerini ortaya koymak amacıyla kullanılırlar. Rüzgar enerjisini bir başka enerjiye dönüştüren çevrim sistemleri yer yüzünden belirli yükseklikte kurulduklarından, (P<sub>yt</sub>), türbin yüksekliğinde rüzgarın güç yoğunluğu (W/m<sup>2</sup>);

$$P_{yt} = P \cdot O_r^3 / s = \frac{1}{2} \rho_h \cdot v_o^3 \cdot O_r^3 \quad [2.8]$$

(E<sub>yt</sub>), Türbin yüksekliğinde enerji yoğunluğu da (Wh/m<sup>2</sup> yıl) aşağıdaki eşitlikler ile belirlenir,

$$E_{yt} = P \cdot f \cdot O_r^3 / s = \frac{1}{2} \rho_h \cdot v_o^3 \cdot f \cdot O_r^3 \quad [2.9]$$

Burada ;

$O_r$  : yükseklik katsayısını gösterir.

Bu da;

$$O_r = v_{t\ddot{u}} / v_{\ddot{O}} \quad [2.10]$$

Burada;

$v_{\ddot{O}}$  : Ölçüm yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s),

$v_{t\ddot{u}}$  : Türbin yüksekliğindeki rüzgar hızını (m/s) göstermektedir.

Bir rüzgar türbininin üretebileceği elektrik enerjisi miktarı, rüzgar hızına son derece bağlıdır. Enerjisi, ortalama rüzgar hızının enerji bileşenidir. Örnek olarak, 8m/s’de elde edilecek güç 314 watt/m<sup>2</sup> iken, 16m/s’de bu güç 2509 watt/m<sup>2</sup> değerine ulaşmaktadır. Görüldüğü gibi, rüzgar hızı iki kat artarken elde edilecek güçte sekiz kat artma olmaktadır.

Yeryüzeyinden yaklaşık 1 km’ye kadar rüzgar, yeryüzeyinin yüzey yapısından oldukça etkilenir. Havakürenin alt katmanlarında rüzgar hızları sürtünme etkisi altında kalırlar. Bu duruma arazinin pürüzlü oluşu neden olur. Bir arazide pürüzlülük ne kadar çok ise rüzgar hızı o kadar azalır. Su yüzeyi, rüzgar hızını az etkileyen en pürüzsüz yüzeydir. Uzun ot, çalı ve çöp gibi pürüzlülük öğeleri rüzgar hızını daha çok etkiler ve azaltır.

Rüzgar enerjisinin hesaplanmasında pürüzlülük faktörü dikkate alındığında; ( $v_{t\ddot{u}}$ ), türbin yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s) hesabı iki eşitlikle ifade edilir.

Birinci eşitlik;

$$v_{t\ddot{u}} = v_{\ddot{O}} [\ln (H_t / Z_0) / (H_{\ddot{O}} / Z_0)] \quad [2.11]$$

Burada;

$v_0$  : Ölçüm yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s),

$H_t$  : Türbin yüksekliğini (m),

$H_0$  : Ölçüm yüksekliğini (m),

$Z_0$  : Pürüzlülük uzunluğu katsayısını ( $0,0001 \geq Z_0 < 1$ : genelde)

göstermektedir. İkinci bir eşitlik ise; rüzgar hızının yükseklikle değişimini veren “Hellman Bağıntısı” dır.

Bu da;

$$v_{ti} = v_0 \left( H_t / H_0 \right)^n \quad [2.12]$$

Burada;

$v_0$  : Ölçüm yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s),

$H_t$  : Türbin yüksekliğini (m),

$H_0$  : Ölçüm yüksekliğini (m),

$n$  : Pürüzlülük faktörünü göstermektedir.

Düz arazilerde pürüzlülük ile pürüzlülük faktörü ( $n$ ) ve pürüzlülük uzunluğu ( $Z_0$ ) arasında ampirik bağlantılar bulunmaktadır. (Çizelge 2.4 ve 2.5)

Çizelge 2.4. Pürüzlülük ile Pürüzlülük Faktörü ( $n$ ) arasındaki bağıntı (26)

| Pürüzlülük                         | Pürüzlülük faktörü ( $n$ ) |
|------------------------------------|----------------------------|
| Su veya buz düzeyi                 | 0,1                        |
| Küçük ot veya bozkır               | 0,14                       |
| Engelibeli kırsal alan             | 0,2                        |
| Ormanlık alan ve küçük yerleşimler | 0,25                       |

Çizelge 2.5. Pürüzlülük Faktörü ile Pürüzlülük Uzunluğu arasındaki bağıntı (26)

| Pürüzlülük Faktörü (n)                | 0,0    | 0,5    | 1,0  | 1,5   | 2,0 | 3,0 | 4,0 |
|---------------------------------------|--------|--------|------|-------|-----|-----|-----|
| Pürüzlülük Uzunluğu (Z <sub>0</sub> ) | 0,0002 | 0,0024 | 0,03 | 0,055 | 0,1 | 0,4 | 1,6 |

Rüzgar enerjisi hesaplamalarında rüzgarın önündeki engel etkisi büyük önem taşımaktadır. Engeller arka taraflarında bozulmuş akış alanları oluştururlar. Bunlara “Engel Dalgaları” denir. Engel dalgaları rüzgarın hızını azaltır. Hız ve yönde ani değişiklikler oluşturur. Buna “türbulans” denir. Engellerden ne kadar yükseğe çıkılırsa o kadar rüzgar gölgelemesi etkisi azalmaktadır. Yatay olarak engelin rüzgar gölgelemesi, engel yüksekliğinin 20-30 kat yüksekliğe kadar etkisini göstermektedir. Eğer engel yüksekliği kanat göbeği yüksekliğinin yarısından daha fazla ise, elde edilecek enerji üretim sonuçları daha da belirsizleşecektir. Mevcut engelin geometrisi de sonuçları büyük ölçüde etkilemektedir.

Engel etkisi açısından türbin ve engel arası uzaklık çok önemlidir. Genelde, engel etkisi, engelden uzaklaştıkça azalmaktadır. Düşük pürüzlü arazi üzerinde engel etkisi, engelden 20 km ilerde bile ölçülebilmektedir. Engel ve türbin arasındaki arazi pürüzlüğü, engel etkisi büyüklüğü konusunda önemli rol oynamaktadır. Düşük pürüzlü araziler, havanın, engelin etrafından geçmesine ve karışmasına daha kolay izin verir. Eğer engel türbine baskın rüzgar yönünden 1000 m’den daha yakın ise, dikkate alınmalıdır. Daha uzak mesafede ise rüzgar üzerinde etkisi o kadar fazla olmamaktadır. Engel türbine, yüksekliğinin beş katından daha yakın ve yüksekliği kanat göbeği düzeyinin yarısından fazla ise, önemli oranda rüzgara etki yapacaktır. Bu durum türbin yerleşimlerinde dikkate alınmalıdır. Engelin genişliği, bulunduğu kesim rüzgarın baskın yönünden dolayı çok önemlidir. Ayrıca, “engelin geçirgenliği” de önemli bir faktördür. Engelin geçirgenliği; rüzgarın ilgili engelin içinden geçme kolaylığı olarak tanımlanır. Örneğin geçirgenlik binalarda 0, ağaçlarda 0,5, kafes direklerinde 0,7-0,8 değerleri arasındadır (26).

Deniz ve göl yüzeyleri oldukça düşük pürüzlülüğe sahiptir ve buralarda hemen hemen hiçbir engel bulunmaz. Ancak denizlerde yüksek rüzgar hızlarında dalgalanmadan dolayı yüksek pürüzlülük olacağı unutulmamalıdır. Düşük pürüzlülükte “makaslama” denilen üstel çarpan denizde çok düşüktür. Yani rüzgar hızı, türbin göbek yüksekliğinde çok fazla değişmez. Bu nedenle daha düşük kule kullanımı mümkün olduğu için daha ekonomik olmaktadır. Denizde kurulacak rüzgar türbinin rotor çapları yerel koşullara bağlı olmaktadır (26).

### 3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi, seçilecek bölgenin meteorolojik özelliklerine ve en önemlisi de kullanılacak türbinin tasarımına bağlıdır (18). Seçilen bölgeden ekonomik olarak enerji üretebilmek için rüzgar hızı ve yön ölçümleri, topografik yapı ve arazi pürüzlülüğü çok iyi belirlenmelidir. Rüzgar türbinlerinin kurulması tasarlanan bölgede türbin tarafından üretililecek elektrik enerjisinin hesaplanabilmesi için, meteorolojik ve bölge verilerinin çok iyi analiz edilmesi gerekir. En yaygın olarak kullanılan hesaplama yöntemi Danimarka'da RISO Laboratuvarlarında geliştirilmiş bulunan "Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı (WASP)" 'dır. Rüzgar çiftliği kurulmadan önce seçilen araziye en az 10 m veya mümkünse 30 m yüksekliğinde bir çubuk üzerine anemometre<sup>1</sup> yerleştirilerek en az 6 ay süre ile ölçüm yapılmalıdır. Eğer seçilen alanda yükseklik farkları varsa birden fazla anemometre dikilmesi daha yararlı sonuçlar verecektir. Arazi seçiminden sonra kapasiteyi belirleyen en önemli unsur üretilen elektriğin nereye verileceğidir. Ulusal dağıtım sistemine verilecekse araziye en yakın iletim hattı belirlenerek gerekli düzenlemeler yapılmalıdır. Bölge seçimini kısıtlayan bir faktör de rüzgar çiftliği için (bir çok rüzgar türbininin bir arada bulunduğu yerler) geniş arazi gerektirmesidir. Bu santral alanlarında türbinlerin birbirlerine çok yakın yerleştirilmesi birbirlerinin rüzgarlarını keseceği için uygun değildir. Santral alanının efektif olarak kullanıldığı alan %1'i geçmez ve geri kalan arazi tarım ve hayvancılık amacıyla kullanılabilir. Rüzgar santralleri için ileri sürülen gürültü kirliliği de çok yüksek düzeyde değildir. Rüzgar santrali içinde türbinlerin bulunduğu ortamın gürültü seviyesi 80 dB'dir. Bu değer trafiğin yoğun olduğu bölgelerdeki gürültü düzeyine eşittir. Bundan dolayı rüzgar santralleri ile yerleşim birimleri arasındaki mesafe 500 m'den az olmayacak şekilde dizayn edilir (18).

---

<sup>1</sup> Anemometre: Rüzgarın hızını ve yönünü gösteren alettir.

### 3.1. Rüzgar Türbinlerinin Tipleri

Rotorların konumlarına (şaft eksenlerine) göre iki temel rüzgar türbin sistemi vardır. Bunlar yatay eksenli ve dikey eksenli türbinler olup, teknolojik ve ticari olarak en çok kullanılan türbinler yatay eksenli olanlarıdır (26).

### 3.2. Yatay eksenli türbinler

Elektrik üretim amaçlı modern rüzgar türbinlerinin çoğunluğu yatay eksenlidir. Dönme eksenli rüzgarın akım çizgilerine paralel olan türbinlerdir (Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.a.). Yatay eksenli türbinler, rüzgarın kuleyi yalamadan rotora çarpması durumunda ileri ya da önden rüzgarlı (up-wind), önce kuleye dokunup sonra geri gelmesi koşulunda geri ya da arkadan rüzgarlı (down-wind) türbin adını alırlar. Propeller, Difüzörlü ve Tornado türbinler olarak üçe ayrılır.

Rotor bir göbek (hub) ile şafta bağlıdır. Üç kanatlı türbinler daha fazla enerji üretirler. Görüntüleri daha estetikdir. Ancak daha pahalı, daha ağır ve kurulmasının daha zor olması gibi dezavantajları vardır. İki kanatlı sistemler, daha ucuz daha hafif ve daha kolay kurulma üstünlüğüne karşın, daha yüksek hızlı olmayışı ve gürültülü çalışmaları önemli dezavantajlarıdır. Rüzgarın kinetik enerjisi rotor tarafından mekanik enerjiye çevrilir ve şaftın dönüş hareketi gövde içersindeki transmisyon sistemine, oradan jeneratöre aktarılır. Transmisyon sistemi, jeneratör ve yardımcı üniteler gövde içersinde yer alır. Rüzgar türbinleri nispeten düşük rüzgar hızlarında çalışırlar. Dişli kutusu ile devir sayısı yükseltilir. Bu nedenle, “senkron jeneratörde” ihtiyaç duyulan devir sayısı dişli kutusu çıkış milinden temin edilir. Dişli kutularının transmisyon oranı 1/20 ile 1/60 arasında olup, “helisel dişli kutularının” yanı sıra “güneş-planet dişli sistemli transmisyon kutuları” kullanılabilmektedir. Dişli kutusu bulunmayan türbinler de yapılmış olup, bunlarda değişken hızlı, direkt iletimli özel senkron jeneratörler bulunur. Açıklanan makinelerde rüzgar enerjisi, “Betz limiti” uyarınca maksimum %59,3 teorik verimle mekanik enerjiye çevrilebilmektedir. Türbinlerin tanıtılan üniteleri dışında; hidrolik iletimli mekanik ve aerodinamik frenleme düzenleri, yönlendirme için elektrik motorlu yay mekanizmaları, mikro

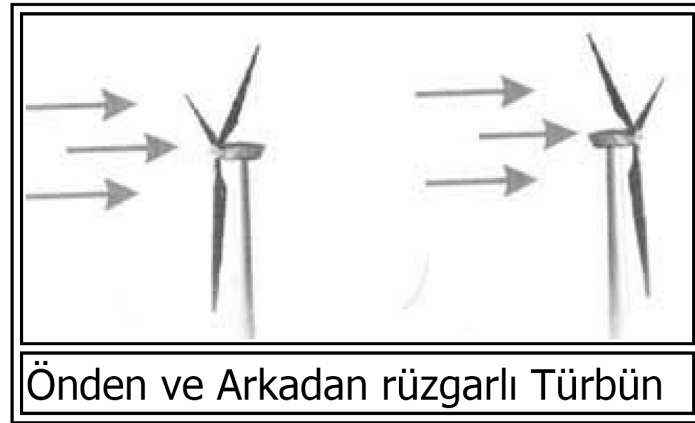
işlemcili logic kontrol-kumanda ve bilgisayar monitör sistemleri bulunmaktadır. Sistemlerin şebekeye bağlantısı soft starter ve konvertörlerle yapılmakta, şebeke bağlantı gerilimi 380-690 V, bağlantı frekansı 40-80 Hz arasında olmaktadır (26).

#### *Önden rüzgarlı makinalar*

Bu makinalarda rotor yüzü rüzgara doğru yönlenmiştir. Bu makinaların en önemli üstünlüğü kulenin arkasında yapacağı gölgeleme etkisine maruz kalmamaktır. Yıllardır yaygın olarak bu makinalar kullanılmıştır. Öte yandan yine de kulenin önünde, az da olsa, bir rüzgar gölgelemesi vardır. Yani, rüzgar kuleye eğilerek varır. Kule yuvarlak ve düz olsa bile bu nedenle kanatın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. İşte bu nedenle rüzgar çekilmesinden dolayı kanatların çok sert yapılması gerekir ve kanatların kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekir. Ayrıca, önden rüzgarlı makineler, rotoru rüzgara karşı döndürmek için “yaw” mekanizmasına gerek duyarlar (26).

#### *Arkadan rüzgarlı makinalar*

Bu makinaların rotorları kule arkasına konur. Bunların önemli üstünlüğü rüzgara dönmek için “yaw” mekanizmasına gerek duymayışlarıdır. Eğer “nacelle” ve rotor uygun tasarlanırsa nacelle rüzgarı pasif olarak izler. Üreteçten inen akım kabloları, rotor pasif olarak belli bir periyotta her yöne döndüğü zaman kablo dolanır. İşte “yaw” bu sorunu ortadan kaldırır. Daha önemli bir üstünlük, kanatların esnek özelliğe sahip olarak yapılmasıdır. Bu hem ağırlık, hem de makinanın güç dinamiği açısından önemli bir üstünlük sağlar. Böylece kule yükü azalmış olur. Arkadan rüzgarlı makinaların temel üstünlüğü böylece önden rüzgarlı makinalara göre daha hafif yapılması şeklinde ortaya çıkar (26).



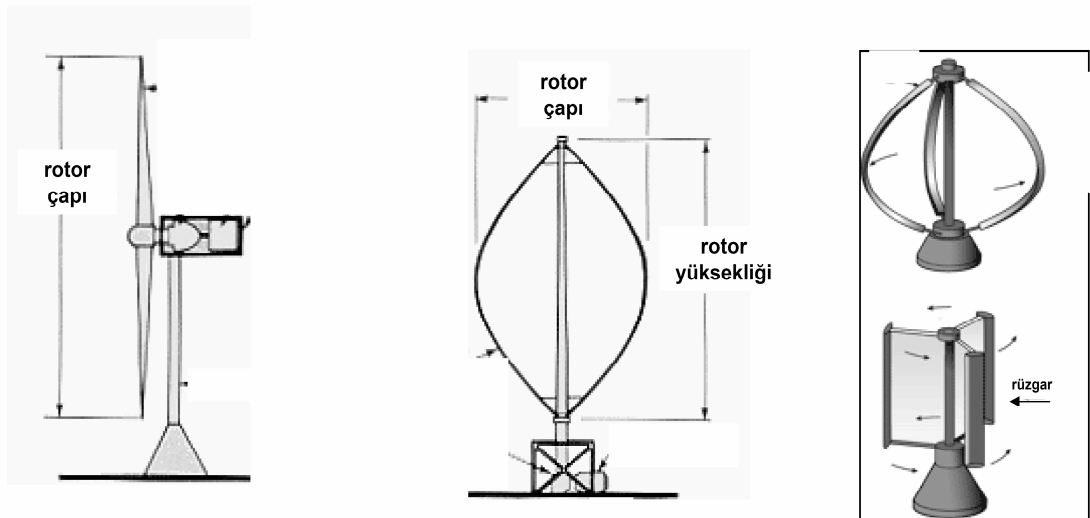
Şekil 3.1. Önden ve arkadan rüzgarlı makinalar (21).

### 3.3. Dikey eksenli türbinler

Dönme eksenini rüzgarın akım çizgilerine dik olan türbinlerdir. Bunların başlıcaları Darrieus ve Savonius tipinde olanlardır (Şekil 3.2.b.). Bunların birincisi ilk hız alamaması, ikincisi ise veriminin düşük olması en olumsuz yanlarıdır. Nispeten daha pratik olan yatay eksenli türbinlerden çok kanatlılar düşük devirlerde, tek ve birkaç kanatlılar ise yüksek devirlerde çalıştırılmaktadır (26).

➤ Yatay eksenli sistemler

➤ Düşey eksenli sistemler



Şekil 3.2. Yatay ve düşey eksenli sistemler (22)

Propeller rotorların verimleri %45 iken, Darrieus rotorlarda verim %32'ye düşmektedir (27). Yaygın olan propeller türbinler, hız karakteristiğine göre değişken hızlı ve sabit hızlı olarak da ayrılırlar. Değişken hızlı türbinler daha çok kullanılmaktadır. Dikey eksenli türbinler genellikle Darrieus tipi makinelerdir.

*Dikey eksenli türbinlerin üstünlükleri şöyle sıralanabilir:*

Üreteç ve vites kutusu gibi donanımlar yeryüzündedir. Bu nedenle kuleye gerek duyulmayabilir.

Dikey eksenli türbinlerde yön saptırma “Yaw” mekanizması bulunmamaktadır.

*Olumsuz yanları ise:*

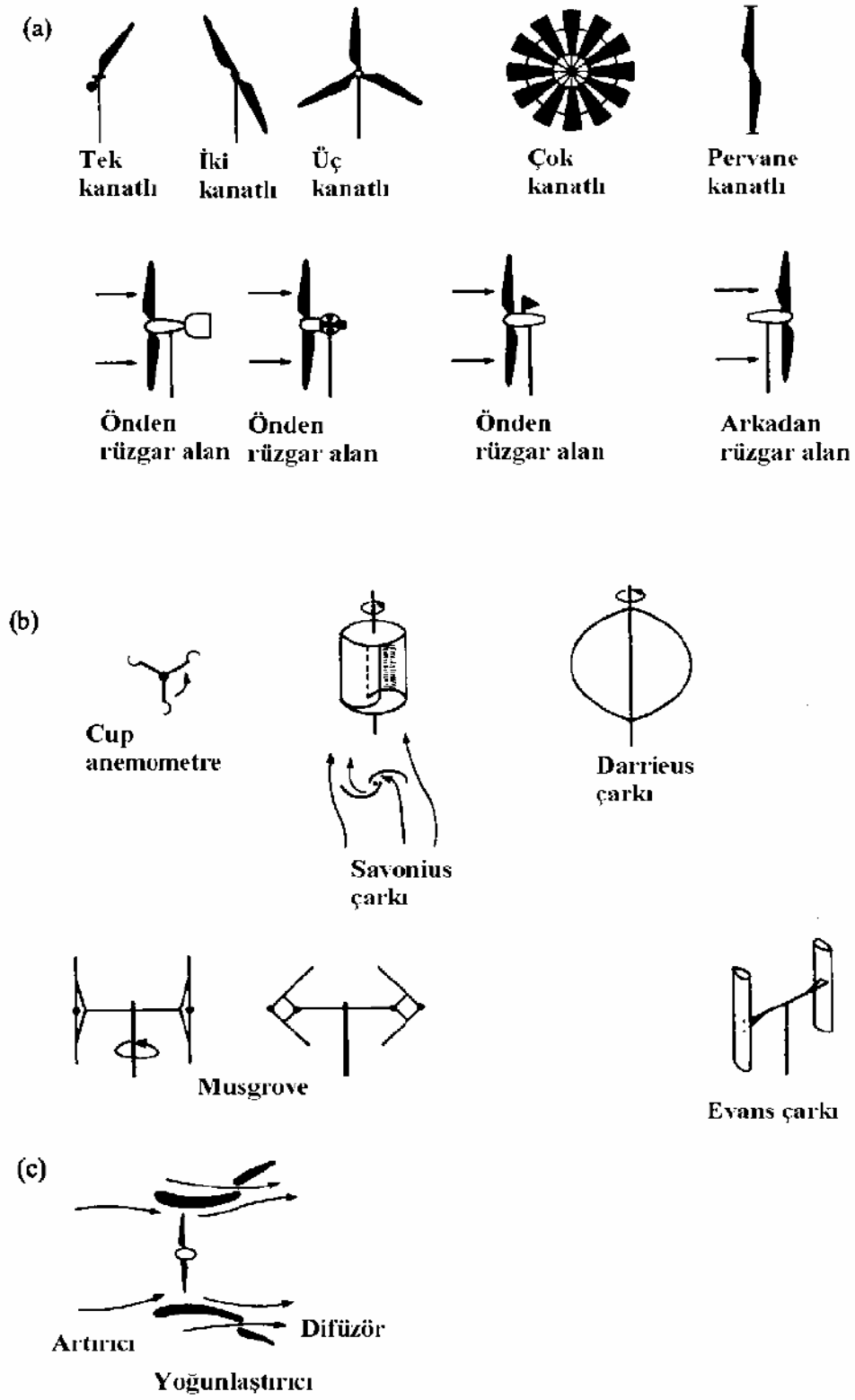
Kule mekanizmasına gerek olmamasına karşın, yere yakın oldukları için düşük rüzgar hızlarında çalışmak zorunda kalmaktadırlar.

Bu türbinler çalışmaya kendi kendine başlamazlar. İlk hareket momentine ihtiyaç duyarlar.

Bu türbinlerin yer yüzeyine bağlanmaları için çelik halatlara gereksinim duyulmaktadır (27).

*Yoğunlaştıran yapıdakiler (Şekil 3.2.c.).*

Tüm üç sistemle ilgili detaylı gösterim şekil 3.3'te verilmiştir (18).



Şekil 3.3. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması

(a) Yatay eksenli, (b) Dikey eksenli, (c) Yoğunlaştırıcı. (18)

### 3.4. Deniz-üstü Rüzgar Türbinleri

Deniz-üstü rüzgar türbinlerinin en önemli üstünlüğü ve özelliği, maliyetlerinin daha az olmasıdır. Deniz altı kablo, lama ve temeller, kıyıdan uzak rüzgar enerjisinin son zamanlara kadar pahalı bir seçenek yapmış iken, yeni temel teknolojileri ve Megawatt boyutlu rüzgar türbinleri şimdi kıyıdan uzak rüzgar türbinleri en azından 15 m ye kadar deniz derinliği için, karadaki türbinler ile yarışabilir. Kıyıdan uzaktaki rüzgarlar, karadaki düz arazilerden %50 daha çok enerji üretebildiği için, kıyıdan uzak bütün yerleşimleri oldukça çekici olmuştur. Yeni teknolojiler 15 m su derinliğine kadar ekonomik olunacağını göstermektedir. 1,5 MW büyüklükteki türbinleri şebekeye bağlantısı ve temel işleri 450-500 kW lık türbinlerinkinden yalnızca %10-20 oranında yüksektir. Deniz-üstü petrol platformları ile ilgili deneyimler, bu platformların korozyon önlemleri ile korunabildiğini göstermektedir. Yüzey koruma ile kara türbinlerinden daha yüksek koruma sistemi deniz üstü rüzgar türbinlerinde de olacaktır.

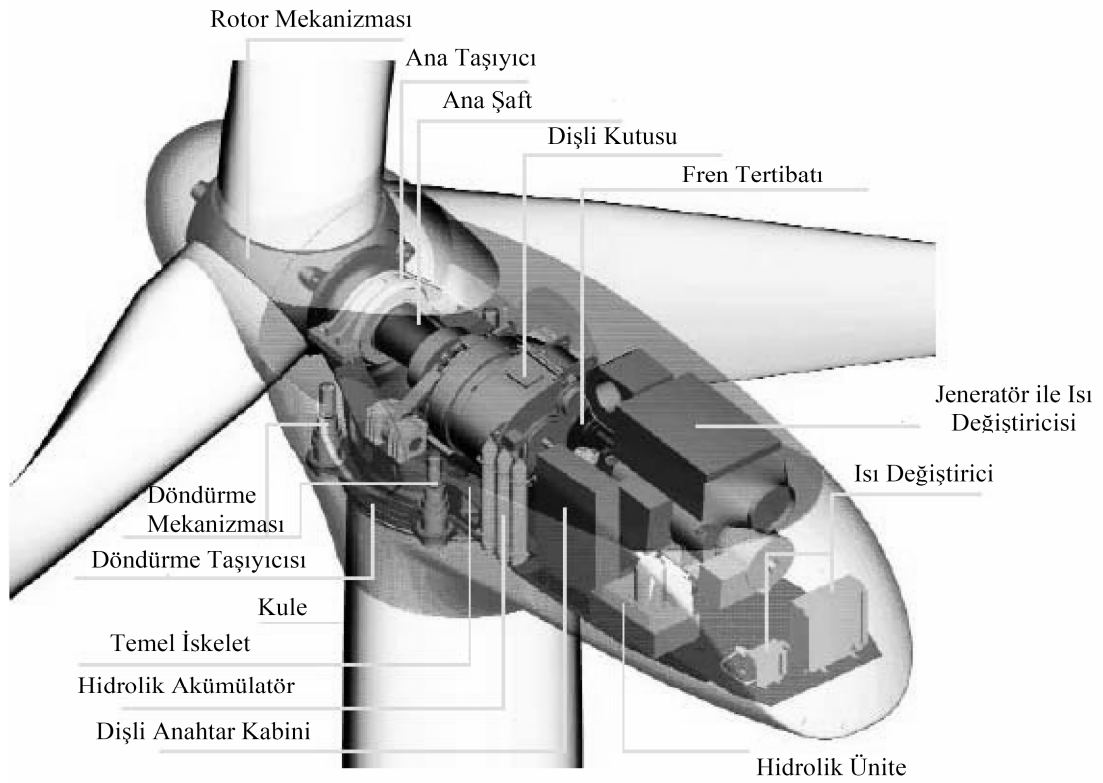
İlk ticari deniz-üstü rüzgar parkı, kıyıdan 15-40 km uzaklıkta 5, 10, 15 m derinliklerde 120-150 MW olarak Danimarka da kurulması planlanmaktadır. Kullanılacak türbinler 1,5 MW güçte olup, işletmeye yaklaşık 5 yılda geçilecektir. Bu tür türbinlerin şebekeye bağlantısı deniz altı kabloları ile yapılacaktır (27).



Resim 3.1. Kopenhag Limanı rüzgar tarlası, (28)

### 3.5. Rüzgar Türbin Ekipmanları

Bir rüzgar türbini başlıca; dişli kutusu, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, frenleme düzeni, yaw mekanizması ve kuleden meydana gelmektedir. Şekil 3.4'te tipik bir rüzgar türbinine ait ekipmanlar ve konumları görülmektedir (2).

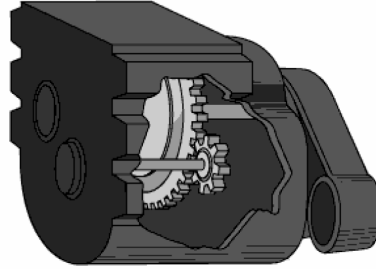


Şekil 3.4. Bir Rüzgar Türbini Üzerindeki Ekipmanlar ve Konumları

#### 3.5.1. Dişli kutusu

Rüzgar türbini rotorunun (pervanesinin) dönmesiyle elde edilen güç, ana şaft, dişli kutusu ve yüksek hız şaftından oluşan güç ünitesiyle jeneratöre aktarılır. Rüzgar türbini rotorundan elde edilen yavaş dönme hızı ve yüksek tork, dişli kutusuyla jeneratör için kullanılan yüksek hız, düşük tork gücüne dönüştürülür. Genellikle rotorun dönüşüyle jeneratör arasında, tek bir dişli oranı vardır. 600 ya da 750 kW'lık

bir makine için iletim oranı yaklaşık olarak 1/50'dir. Dişli kutusunun kesit görünümü Şekil 3.5.'de yer almaktadır (2).



Şekil 3.5. Dişli kutusu

### 3.5.2. Rotor (Pervane)

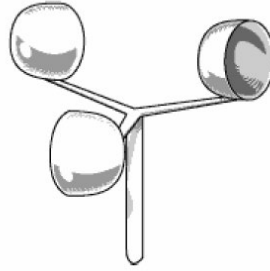
Pervane; gelen rüzgar hareketini, şaft vasıtasıyla dişli kutusuna, oradan da jeneratöre gönderen en dış birimdir. Rotor kanadından etkiyen rüzgar, kanadın gövdesine ve rotorun merkezine doğru hareketlendikçe, daha dik bir açıdan gelir. Eğer rotor kanadı çok dik bir rüzgar geliş açısı etkisinde kalırsa, rüzgarın kanadı kaldırma kuvveti azalır ve sıfırlanır. Bu nedenle, rotor kanadı burulmak zorundadır ve kanadın arka ucu esen rüzgarla aynı yöne doğru itilir. Çoğu modern rüzgar türbin rotor kanatları GRP (glass fibre reinforced plastics) yani cam elyaf plastikten yapılır (Şekil 3.6.). Diğer kullanılan malzeme ise karbon fiber veya aramid'dir. Ancak bunlar, büyük türbinler için ekonomik değildir. Çelik veya alüminyum karışımlarının ağırlık ve yorulmadan kaynaklanan problemleri olmakla beraber küçük türbinler için günümüzde sıkça kullanılmaktadır (2).



Şekil 3.6. Rotor (Pervane)

### 3.5.3. Anemometre

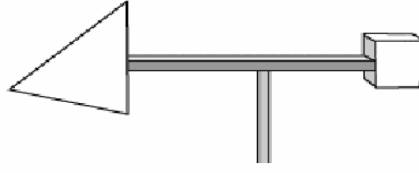
Anemometre; Şekil 3.7.'de de görüldüğü gibi, bir dikey eksene ve rüzgarı tutan üç fincana sahiptir. Dakikadaki devir sayıları elektronik olarak kaydedilir. Anemometreler fincanlar yerine, pervanelerle de donatılabilirler, ama bu yaygın değildir. Bunların yanısıra, sesin fazla yükselmesi ve hava moleküllerinden yansıyan coherent ışığını tespit eden ses üstü ve lazer anemometreleri de vardır. Sıcak kablo anemometreleri, rüzgar ve rüzgar altına yerleştirilen kabloların arasında meydana gelen dakikalık sıcaklık farkından dolayı rüzgar hızını tespit eder. Mekanik olmayan anemometrelerin avantajı, buzlanmaya karşı az hassas olmalarıdır. Bununla beraber uygulamada fincan anemometreleri her yerde kullanılmakta olup elektrikle ısıtılan mil ve fincanlı özel modeller kutuplarda da bile kullanılmaktadır (2).



Şekil 3.7. Anemometre

### 3.5.4. Otomatik yöneltme düzeni

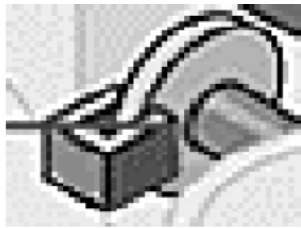
Çeşitli yönlerden esen rüzgarlardan yararlanabilmek için, dönen çarkın, her an rüzgar doğrultusuna dikey konumda olması istenir. Bu yöneltme, ya çark düzlemine dikey olan büyük düzeyli bir dümenle veya yardımcı bir çarkla otomatik olarak sağlanabilmektedir. Klasik bir yön kontrol düzeneği Şekil 3.8.'de görülmektedir (2).



Şekil 3.8. Klasik yön düzeltme düzeni

### 3.5.5. Frenleme düzeni

Devir sayısının belirli bir değerden sonra sabit tutulması, belirli bir sınırı aşmasına engel olması, çarkın ve kanatların korunması yönünden çok önemlidir. Özellikle fırtınalı havalarda rüzgara karşı küçük bir yüzey çıkarmak, hatta tesisten yararlanılmayacaksa tamamen durdurmak gerekir. Bu sonuçları elde etmek amacıyla çeşitli sistemler uygulanmaktadır. Bunlardan birisi Şekil 3.9.'daki mekanik fren düzenidir. Mekanik fren, dişli kutusuna yerleştirilen bir diskten oluşmaktadır. Fren diski çelikten yapılır ve mil üzerine sabitlenir. Olabilecek arızalara karşı frenleme sistemini korumak için hidrolik yağ basıncı gerekmektedir. Yağ basıncı olmadığına, fren blokları fren diskini sıkıştıracaktır. Frenleme, fren bloğu ile disk arasındaki sürtünmenin bir sonucudur (29).



Şekil 3.9. Basit bir frenleme tertibatı

### 3.5.6. Rüzgar türbini yaw mekanizması

Rotorun rüzgara dik olmadığı durumlarda rüzgar türbinin bir yaw (rotadan çıkma) hatasına sahip olduğu söylenir. Bir yaw hatası, rüzgardaki enerjinin düşük bir

parçasının rotor alanına doğru akmasını ifade eder. Yaw kontrolü rüzgar türbin rotorunun güç giriş kontrolünün en iyi yoludur.

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin hemen hemen hepsinde yaw döndürme kuvveti kullanılır. Bu türbinlerde, rüzgara karşı elektrik motoru ve dişli kutuları kullanarak döndürülen türbini tutan bir mekanizma vardır. 750 kW'lık tipik bir türbinin yaw mekanizması Şekil 3.10.'da verilmiştir. Türbin çalıştırıldığında, pervane kanadı, konumunu belirli zaman aralıklarında elektronik kontrollere yaw mekanizması vasıtasıyla hareket ettirir (26).



Şekil 3.10. Yaw mekanizması

### 3.5.7. Türbin kuleleri

Rüzgar türbinlerinde kafes veya boru biçiminde olmak üzere iki temel kule tipi vardır. Boru biçiminde olan kuleler genelde görünüm itibariyle daha uygundur. Kuleler çelik kafes, çelik konik boru, çelik silindir, beton konik boru ya da silindir biçiminde yapılmaktadır. Kafes kulelerin dışındaki konstrüksiyonlar iki ya da üç parçalıdır. Kafes kule ucuzdur ancak görüntü kirliliği nedeni ile hemen hemen terk edilmiştir. Rotor 3-26 ton, gövde 10-56 ton ve kule ağırlığı 12-88 ton arasında değişmektedir. Türbin gücü, rüzgar hızının, süpürme alanının ve güç faktörünün fonksiyonudur. Rüzgar hızı yükseklikle arttığından, aynı çaplı bir rüzgar rotorunun daha yüksek kuleye yerleştirilmesi ile elde edilebilecek güç artmakta ise de, kule ağırlığının ve maliyetin artması bir sınır koymaktadır (26).

### 3.6. Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Prensibi

Rüzgar türbinleri, bir rotor, bir güç şaftı ve rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirecek bir alternatörden oluşur. Rüzgar rotordan geçerken, aerodinamik bir taşıma kuvveti oluşur ve rotoru döndürür. Bu dönel hareket jeneratörü hareket ettirir ve elektrik üretir (30). Konu elektrik üretimi olduğu zaman, rüzgarın denetlenemez olmasından dolayı bağdaştırılması gereken konu, tüketici gerekleri, yani gerilim ve frekansın sabit olması ve üretilen gücün de talebi karşılaması olmaktadır. Bunun sağlanması için iki yöntem izlenmiştir. Bunlardan birincisi doğru gerilim üretmek, ikincisi ise şebeke gerilim ve frekansında gerilim üretmek ve ayar için şebekeyi kullanmaktır. Türbinlerde ayrıca, dönme oranını ayarlayacak ve kanatların hareketini durduracak bir rotor kontrolü bulunur (30).

### 3.7. Rüzgar Türbinünün Güç Eğrisi

Bir türbinün güç eğrisi, çizim olarak verilir ve hangi rüzgar hızında ne kadar güç üretileceğini gösterir. Güç ölçümleri, araziye kurulan ve rüzgar türbinüne belli bir yakınlıkta göbek yüksekliği ile aynı yükseklikte bulunan bir anemometre ile ölçülür. Anemometre, türbin kanatlarının üreteceği türbülans nedeniyle türbinün üzerine konmaz. Eğer rüzgar hızı çok hızlı dalgalanmıyorsa, ölçülen rüzgar hızında türbinden alınan elektriksel güçler elde edilir. Ve iki değer çizimsel olarak karşılaştırılır. Ancak rüzgar hızı ölçümlerinin kusursuz olması gerekir. Çünkü rüzgar hızı ölçümünde yapılacak %3'lük bir hata enerji hesaplamalarında  $\pm$  %9'luk bir hataya neden olacaktır (30). Bu nedenle, sertifikalanmış güç eğrisinde dahi  $\pm$  %10 bir hata olabilir. Güç eğrileri, düşük türbülanslı alanlarda yapılan ve türbinüne doğru doğrudan gelen akışkan ölçümlerine dayalıdır. Yerel türbülans ve karmaşık arazilerde hamleler, rüzgar türbinüne değişik yönlerden etki eder. Bu nedenle herhangi bir yerde kesin güç eğrisi elde etmek zor olabilir. Gerçekte, bir güç eğrisi ortalama bir hızda rüzgar türbinünün ne kadar kesin güç üreteceğini göstermez. Ayrıca, türbinün farklı sıcaklık ve yoğunluk koşullarında çalışacağı, bu nedenle farklı güçler üreteceği unutulmamalıdır (30).

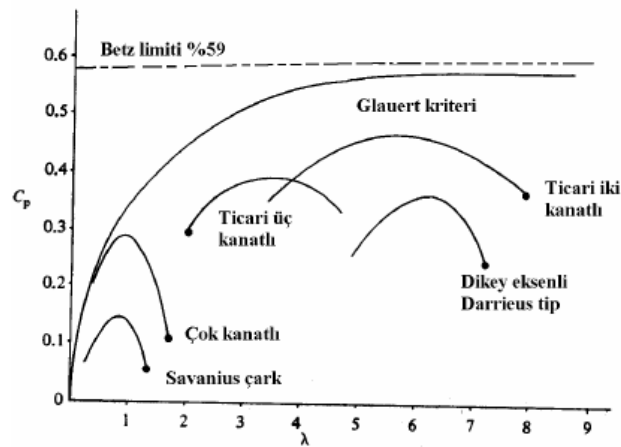
Bir rüzgar türbin-jeneratör sistemi kurmadan önce seçilen yörenin rüzgar enerjisi potansiyelinin ve buna ait teorik hesapların yapılması gerekmektedir. Sağlıklı bir hesaplama için; rüzgar hızı ölçümleri, türbin kanat çapı, kanat sayısı, türbinin yerden yüksekliği ve kanat ucu hız oranı gibi parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Rotorsuz durumda rüzgarın akış yönüne dik herhangi bir A alanı içinden birim zamanda taşınan güç şu şekilde verilir:

$$P = (A \rho V_o^3) / 2 \quad [3.1]$$

Burada  $\rho$  havanın yoğunluğunu, A kanat alanını ve  $V_o$  ise rüzgar hızını göstermektedir. Bu gücün tamamı rüzgar türbini tarafından faydalı güce dönüştürülemez. Faydalı rüzgar gücü  $P_T$  şu şekilde hesaplanmaktadır:

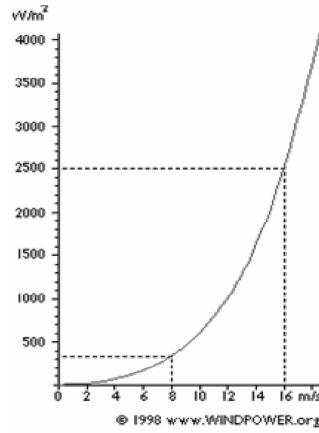
$$P_T = (C_P A \rho V_o^3) / 2 \quad [3.2]$$

Burada  $C_P$ , güç faktörü veya verim olup maksimum değeri %59,3 dür. Bu değere Lanchester Betz limiti denir. Bu limit değer, rüzgar enerjisi elektrik santrallerinin en fazla %59,3 verime sahip olacaklarını göstermektedir. Şekil 3.12.'de farklı rüzgar türbinleri için kanat uç hız oranı olan  $\lambda$ 'nın ( $\lambda = wR/V_o$ )  $C_p$ 'ye göre değişimi verilmiştir (30).



Şekil 3.11. Farklı rüzgar türbinleri için kanat uç hız oranları (26)

### Rüzgar Gücü Formülü:



$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \pi r^2$$

r: rotor yarıçapı

Güç hava hızının küpü ile orantılıdır.

Şekil 3.12. Rüzgar gücü formülü (30).

### 3.8. Rüzgar Türbini Ömrü

Günümüzde 20-25 yıldan daha fazla çalışan türbin olmadığı için kesin bir ömür verilmemekle birlikte, beklenen türbin ömrünün 25-30 yıl olabileceği düşünülmektedir. Dünyada bugün için yaklaşık 30000 türbinin çalıştığı bilinmektedir. Rüzgar türbinlerinin kanatları fiberglas polyester malzemeden, nadiren de tahtadan yapılmaktadır. Kuleler ise; çelik boru şeklinde, kafes tipi veya betondan üretilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinleri yaklaşık 3-5 m/s de çalışmaya başlar. Maksimum güce yaklaşık 15 m/s'de ulaşır ve yaklaşık 25 m/s'ye ulaştığı zaman çalışmayı durdurur. Kanatlar dakikada yaklaşık 15-50 kez döner, ancak değişken kanat hızlı türbin çeşitlerinin sayısı giderek artmaktadır. Türbinlerdeki 20 yıllık tasarım ömrü üreticiler tarafından belirlenmektedir. Ancak gerçek ömür hem türbin kapasitesine hem de lokal klimatolojiye bağlıdır. (26).

### 3.9. Rüzgar Türbinlerinin Bakımı

Modern rüzgar türbinleri 20 yıllık ömürlerinde 120 000 saat çalışacak şekilde tasarlanırlar. Bu süre, bir otomobilin 4000-6000 saatlik çalışma aralığından çok daha fazladır. Pratikteki deneyimler, yeni türbinlerde bakım maliyetlerinin de azaldığını göstermektedir. Danimarka'da 1975'den beri kullanılan 4400 türbin üzerinde yapılan

alışmalar, yeni üretim türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinin, eski üretim türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinden oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Eski Danimarka türbinlerinin yıllık bakım maliyetleri, türbin yatırım maliyetinin % 3' dolayındadır. Yeni üretim türbinlerde ise bu oran, yatırım maliyetlerinin % 1,5-2,0'si dolayındadır. Tek türbinin bakım maliyeti, bir rüzgar parkındaki türbinlerin ortalama bakım maliyetinden daha pahalı olmaktadır. Bazı rüzgar türbini parçaları, bozulmaya ve değiştirilmeye, diğer parçalardan daha çok maruz kalırlar. Bu, özellikle rotor kanatları ve vites kutusunda görülür. Özellikle kanatlar, vites kutusu ve üreteç, türbin fiyatının %15-20 arasında değişen kısmını oluşturmaktadır (26).

### **3.10. Rüzgar Türbinin Güvenliği**

Büyük modern rüzgar türbinlerinde normal olarak konik elik boru şeklinde kuleler kullanılır. Bu kulelerin kafes kulelere göre en büyük üstünlüğü, daha güvenli olması ve rüzgar türbininin bakım ve onarımını personel tarafından daha rahat ve güvenli yapılmasını sağlamasıdır. Kusuru ise, maliyetinin yüksek olmasıdır. Kafes tipi kulelerin en büyük kusurları, rüzgar çiftliğine daha az uygun olması ve bakım onarım sırasında yanına ulaşılabilirliğin zor olmasıdır. Bakım, onarım ve servis için güvenlik açısından bazı sakıncalar içermektedir. Kule yüksekliğinde, türbinleri kurarken ve bakım-onarım çalışması yaparken tehlikeli sonuçlar doğurabilir. Fakat yeni rüzgar türbinlerinde personelin düşmemesi için inerken ve çıkarken her türlü güvenlik önlemi alınmıştır. Bakım anında makinelerin tamamen durdurulması gerekmektedir. Kritik parçaların bozulması durumunda veya şebekeden ayrılma durumunda, rotorun ve türbinin durması gerekmektedir. Bu durma olmazsa, rotor çok kısa sürede hızlanmaya başlayacaktır. İşte bu durumlarda aşırı hızlanma koruması olmalıdır. Yeni modern türbinlerde bu önlem mevcuttur (26).

### **3.11. Rüzgar Türbinlerinin Gelişiminde Ulaşılan Düzey**

Ucuz petrol döneminde güncellik kazanamayan rüzgar enerjisi, 1974-1978 yapay petrol bunalımının ardından, artan uygulamalar ve teknolojik aşamalarla gündeme

girmiştir. Artık geçmişteki rüzgar jeneratörleri yerine, modern ve çağdaş rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (WECS) üzerinde durulmaya başlanmıştır. Az sayıda tüketiciyi besleyecek tekil makineler yerine, birden çok türbin içeren rüzgar çiftlikleri ile elektrik şebekelerinin beslenmesi amaçlanmıştır. Rüzgar türbinlerinin ve teknolojisinin geliştirilmesine, 1980’li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı koordinatörlüğünde yürütülen Ar-Ge çalışmalarının büyük etkisi olmuştur.

Yapılan sistem analizlerinde, rüzgar enerjisi gelişiminde 60-100 m çapındaki sistemler (1-3 MW) optimum büyüklük olarak tespit edilmiştir. 1981’de ABD’de tesis edilen sistemler ortalama 50 kW’lık makinelerden sonra, makine başına ortalama olarak 1987’de 110 kW ve 1997 yılında ise 750 kW’a yükselmiştir. Bu trend, büyük boyutlu türbinlere doğru kararlılıkla devam etmektedir. Bu günlerde piyasalarda bulunan makinelerin 500-750 kW arasında olanları en düşük fiyattan elektrik enerjisi üretebilmektedir.

“The World Directory of Renewable Energy” içersinde yer alan rüzgar türbini üreticisi 18 büyük firmadan alınan verilere göre, bugün için dünya piyasasında bulunan ve santral kurmak için kullanılabilecek rüzgar türbinlerinin güçleri 100 kW ile 3 MW arasında değişmektedir. 250-750 kW arası türbinler yaygın biçimde bulunmaktadır. Tümü yatay eksenli, propeller tip türbinler olup, rotor kanat sayıları iki ile üç arasında değişmektedir. Yaklaşık %93’ü üç kanatlı, geriye kalan %7’si iki kanatlıdır. Genellikle önden rüzgarlı (upwind) tip türbinlerdir. Rotor çapları 18-65 m, rotor süpürme alanları 255-3320 m<sup>2</sup>, rotor dönüş hızları 28-60 rpm arasındadır. Çalışma başlangıç rüzgar hızı 3-4 m/s kadar olup, nominal güçlerini 11-14 m/s rüzgar hızlarında üretmektedirler. Çalışmanın durdurulması (frenleme) rüzgar hızı 20-28 m/s arasındadır. Rotorların zarar görebileceği rüzgar hızı 50 ve 70 m/s’den büyüktür. Rüzgar hızına göre rotor güç ayarı için, kanat eğimi (pitch) denetimli veya aktif durdurma (stall) denetimli düzen kullanılmaktadır. Makinelerin teknolojisi itibariyle verimleri %98-99 civarındadır. Kanatlar polyester ile kuvvetlendirilmiş fiberglas veya epoksi ile güçlendirilmiş fiber karbondan yapılmakta ve çelik omurga ile desteklenmektedir. Rotor huba (kanatların bağlantı noktası) direkt bağlanmakta,

şaftın  $2-8^{\circ}$  arasında bir eğimi olmaktadır. Mekanik frenleri disk fren iken, aerodinamik frenleri aktif negatif kanat ayarı olmaktadır.

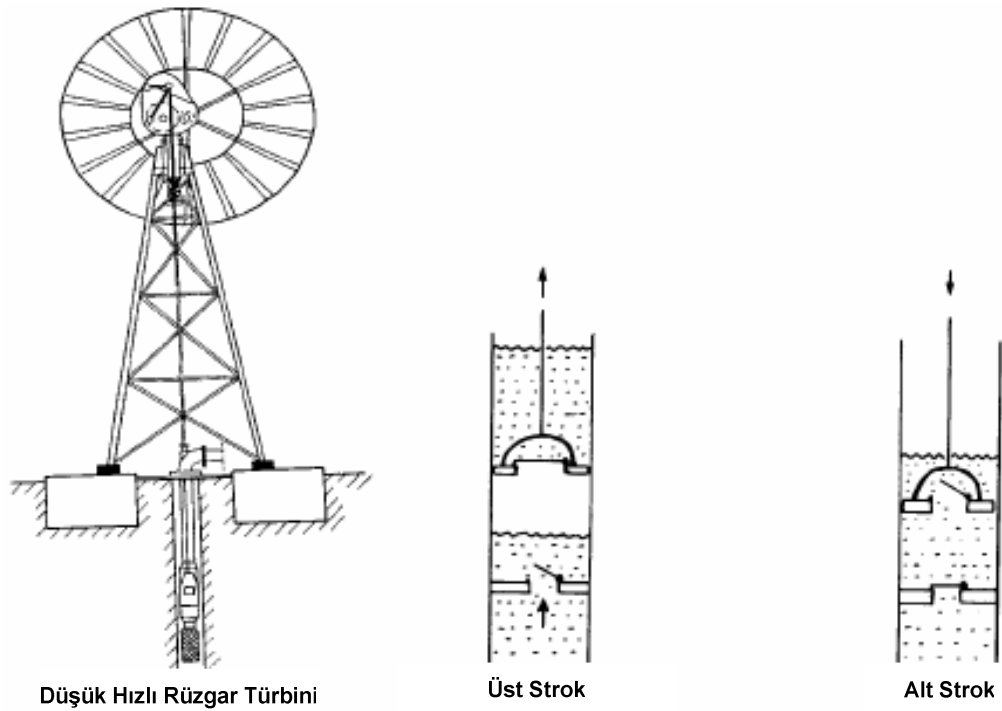
Rüzgar enerjisi için diğer bir uygulama alanı, küçük güçlerde olmak üzere otoprodüktör elektrik üretimi ve mekanik enerji ile su pompajıdır. Küçük güçlü rüzgar jeneratörleri birkaç yüz W ile birkaç kW arasında güce sahiptirler. Elektrik şebekesinden bağımsız olarak çalıştırılan bu makinelerde akülü depolama sistemleri bulunmaktadır. Bunlar küçük ve uzak yerler için güvenilir güç üretebilmekte ve diğer enerji çevrim sistemleri (fotovoltaik veya dizel jeneratörler) ile entegre biçimde kullanılabilir. Deniz fenerleri ve telekomünikasyon alanında tipik uygulama örnekleri de vardır.

1990 yılında dünya çapında bir milyonun üzerinde rüzgar su pompaj sisteminin işletilmekte olduğu tahmin edilmektedir. Halen bir yılda tesis edilen rüzgar pompaj sistemleri tahminen 10 binin üzerindedir. Rüzgar enerjisi ile yapılan mekanik su pompajında, temelde klasik çok kanatlı çarklar kullanılmaktadır. Bu makineler düşük rüzgar hızında çalışabilen, yüksek ilk hareket momenti sağlayabilen ve su pompası ile bağlantılı olarak çalışan ünitelerdir. Rüzgarla su pompajı konusunda geliştirilmiş olan mekanik sistemlerden elde edilen suyun maliyeti  $m^3$  başına mekanik eşdeğer enerji maliyeti olarak verilmektedir. Bu değer 3 m/s rüzgar hızı için 3 \$/kWh civarındadır. Yapılacak iyileştirmeler ile bu rakamın 0,8 \$/kWh'a kadar düşürülebileceği tahmin edilmektedir (31).

### 3.12. Rüzgar Enerjisinden Faydalanma Yolları

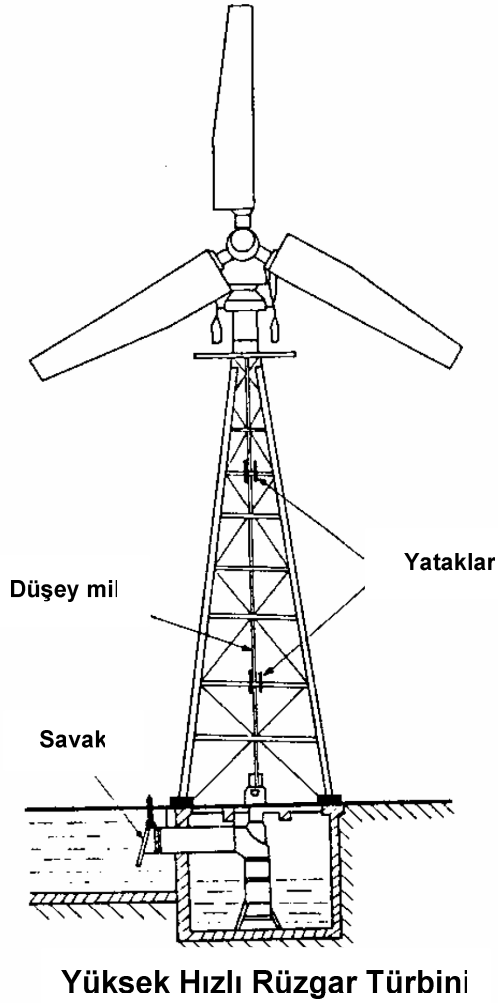
Rüzgar enerjisinden genel olarak mekanik enerji üretimi ve elektrik enerjisi üretimi şeklinde yararlanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin şaft gücünden faydalanılarak elde edilen mekanik enerji, su pompalama, tahıl öğütme, kesme, sıkıştırma ve yağ çıkarma alanlarında kullanılmaktadır. Rüzgar enerjili pompalama sistemlerinin elektrik veya dizelli pompalara göre bir çok avantajları vardır. Rüzgar enerjisi doğada bol miktarda bulunan bedava bir enerji kaynağıdır. Karmaşık bir yapıya sahip

olmadıkları için bakım ve onarım masrafları da yok denecek kadar azdır. Rüzgar enerjili su pompalama sistemlerinde hem düşük hem de yüksek hızlı türbinler kullanılabilir. Çok kanatlı rüzgar türbinleri düşük hızda çalışırlar. Şekil 3.13.'te düşük hızlı bir su pompalama sistemi görülmektedir. Bu sistemde genellikle tek hareketli pompa kullanılır. Rüzgar türbini milinden hareket alan bir krank sistemiyle pistonun aşağı yukarı hareketiyle su pompalama işlemi gerçekleşir (18).



Şekil 3.13. Düşük hızlı rüzgar türbini ve su pompalama sistemi (18).

Şekil.3.14.'de ise yüksek hızlı bir sistem görülmektedir. Başlangıç momentinin düşük olması nedeniyle bu sistemlerde direkt olarak pistonlu pompa kullanılmaz. Yüksek dönme hızına sahip oldukları için ya santrifuj ya da helisel pompa kullanılır (18).

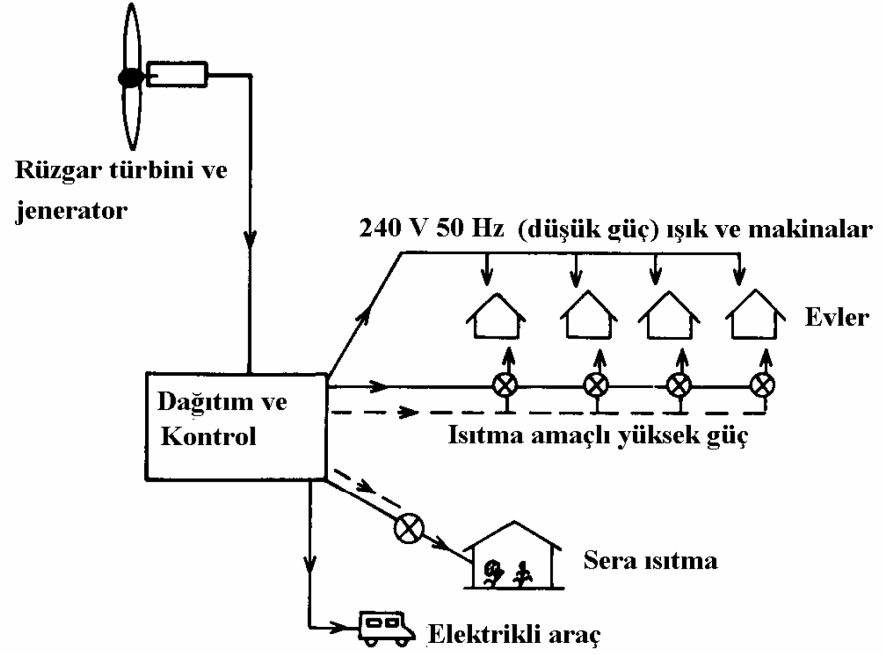


Şekil 3.14. Yüksek hızlı rüzgar türbinine sahip su pompalama sistemi (18).

Gerekli su, arzu edilen zamanda ve yeterli miktarda temin edilemediği takdirde, su depolama tesislerinin yapılması gerekmektedir. Fazla suyun araziden uzaklaştırılması için kurulan rüzgar türbinleri de aynı sisteme dayanmaktadır. Rüzgar enerjisinin değirmenlerde kullanılması da pompalama ve depolama yoluyla olmaktadır.

Rüzgar enerjisinden faydalanarak üretilen elektrik özellikle; enterkonnekte sistemin ulaşamadığı uzak yerleşim merkezlerinde, kırsal alanlarda, ormanlık ve dağlık bölgelerde, adalarda, deniz fenerlerinde, çiftliklerde, yangın kulelerinde yaygın

olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.15.'de rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi görülmektedir (18).



Şekil 3.15. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi (12).

## 4. DÜNYADAKİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ VE UYGULAMALAR

### 4.1. Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar, atmosferde bol ve özgürce bulunan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir kaynaktır. Doğasına bağlı olarak taşıdığı enerji, kinetik enerjidir. Rüzgar kinetik enerjisi nedeniyle doğal bir potansiyele sahiptir. Bunun bilinen fiziksel kanun ve eldeki teknolojik imkanlar dahilinde enerjiye çevrilebilen kısmına rüzgar teknik potansiyeli denir. Diğer enerji kaynaklarına göre ekonomik olarak kullanılabilen kısmı ise rüzgar enerjisi ekonomik potansiyeli olarak adlandırılabilir (32).

Dünyanın rüzgar enerjisi potansiyelini kesin olarak belirtmek zordur. Fakat bilimsel çalışmalar ham rüzgar potansiyelinin % 10'nun kullanılmasıyla, dünyanın elektrik enerjisi gereksiniminin hemen hemen tamamının karşılanacağını göstermektedir. Dünyanın 50<sup>0</sup> kuzey ve güney enlemleri arasında rüzgar gücü potansiyelinin  $3 \times 10^9$  kW olmasına karşın, ekonomik ve fiziksel planlama limitlerinden ötürü  $1 \times 10^9$  kW kapasitenin kullanılabileceği hesaplanmıştır. Bugün dünyadaki mevcut toplam teknik olarak kullanılabilir rüzgar kaynağı yılda 53.000 TWh ve bu dünyanın 1998'deki elektrik tüketiminin dört katıdır. Dünyadaki rüzgar kaynakları hiçbir zaman elektrik üretimi için rüzgar gücü kullanımını sınırlayan bir faktör olmayacaktır (33).

Birçok ülkenin rüzgar potansiyelinden yararlanmaya yönelik yoğun araştırmalar yaptıkları ve önemli teknolojik gelişmeler kaydettikleri ve hatta günümüz koşullarında ekonomik potansiyelin bir kısmını kullandıkları bilinmektedir. Dünyanın önde gelen, sürekli gelişme gösteren ve piyasaya girmiş rüzgar türbin imalatçıları Avrupa kaynaklıdır (32).

Pek çok Avrupa ülkesindeki çalışmalar, elektrik şebekesinin işleyiş ve yapısında herhangi bir değişiklik yapmadan elektrik talebinin % 10 - 20' sinin rüzgar türbinleri ile karşılanabileceğini göstermiştir (32).

Rüzgar enerjisi bakımından, denizler karasal alanlara göre daha büyük zenginlik

göstermektedir. Avrupa'da karada ve deniz üstündeki kombine rüzgar potansiyeli 2020 yılı için öngörülen elektrik talebinin %20'sinden fazlasını karşılamaya yetecektir. Özellikle deniz üstü projeler için iyileştirilmiş teknoloji ve daha ucuza mal olan temeller bu yüzdeyi önemli ölçüde arttırabilecektir. 1990-1995 yılları arasında Avrupa Birliği'nde, kıyıdan uzaklığa ve su derinliğine bağlı olarak deniz üstü rüzgar türbini kurulma durumuna göre potansiyel belirleme çalışması yapılmıştır. Kıyıdan 10 km. açıklıkta ve 10m. su derinliğindeki alanların potansiyeli 750 TWh/yıl iken, kıyıdan uzaklığı 30 km ve su derinliği 40m olan yerlerde 3500 TWh/yıl düzeyine çıkmaktadır. Bu değer 1727 TWh/yıl olan Avrupa Birliği'nin elektrik tüketiminin iki katına karşılık gelmektedir. Dünya Meteoroloji Organizasyonu dünya çapında bir rüzgar kaynağı haritası geliştirmiştir. Buna göre, dünya yüzeyinin ( $506.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) %27'sinde ( $137.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) yıllık ortalama rüzgar hızı 10 m yükseklikte 5.1 m/s den büyük saptanmıştır. Bu alan rüzgar enerjisi zengin yörelerin toplamıdır (32).

ABD, Avrupa, Latin Amerika, Çin, İspanya, Peru, Mısır, Somali, Etiyopya, Rusya için rüzgar atlası çıkarılmıştır. Rüzgar atlası, yer seviyesinden 10 m yükseklikte ölçülmüş olan rüzgar hızı ve yönüne ilişkin yeterli süre ve sayıdaki meteoroloji istatistiklerinin özel bilgisayar programları yardımıyla değerlendirilmesi sonucunda elde edilmektedir. Sonuçta yer yüzeyinden 50m yukarıdaki rüzgar hızları (m/s) ve rüzgar gücü yoğunlukları ( $\text{W/m}^2$ ) isovent eğrileri biçiminde çıkarılır. Rüzgar atlası enerji planlarına ve yatırımcılara, rüzgar gücü ve kapsadığı alanlar hakkında fikir vermekle birlikte, yer seçiminde tek başına yeterli olmamakta, özel ölçümlere de gerek duyulmaktadır.

#### **4.2. Rüzgar Enerjisi Kullanımının Dünyadaki Gelişimi ve Uygulamaları**

Son yıllarda rüzgar enerjisi için en başarılı pazarlar başta Danimarka, Almanya ve İspanya olmak üzere Avrupa'dır. Bu teknolojinin kullanımında A.B.D ve bunun yanı sıra gelişmekte olan ülkelerden Hindistan, Çin ve Güney Amerika'da büyük bir patlama olmuştur. Gelişen teknoloji ve azalan maliyetler bu tabloya önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Elektrik şebekeleri büyük miktarlardaki kesintili enerji girişini

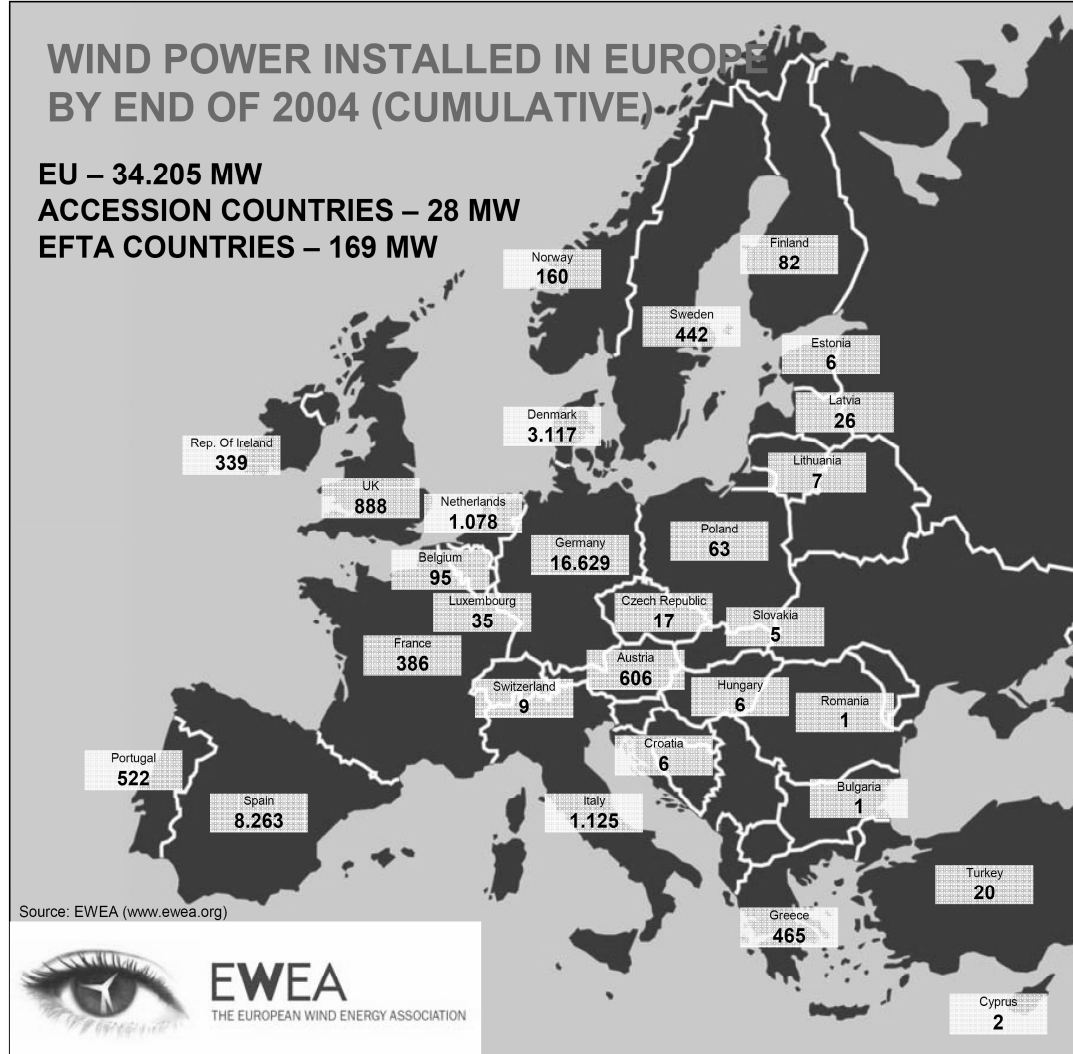
kaldırabilecek düzeydedir. Danimarka hükümeti 2030 yılına kadar enerjisinin %50'sini rüzgardan karşılamayı hedeflemektedir. Dünyadaki diğer ülkeler için ise, rüzgar enerjisi bu ülkelerin elektrik üretiminin %20'sini karşılayacaktır. Uluslararası Enerji Ajansı 2020 yılında dünya elektrik tüketiminin ikiye katlanacağını tahmin etmektedir. Bu durumda rüzgar gücü önümüzdeki 20 yılda büyüyen elektrik talebinin % 10'unu karşılayabilmek için yılda 2.500- 3.000 TWh enerji üretmelidir (31).

Rüzgar türbinlerinin ve teknolojilerinin geliştirilmesine, Uluslararası Enerji Ajansı koordinatörlüğünde 1980'li yıllarda yürütülen AR-GE çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Buna bir örnek ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç'in katkısı sonucu deniz üstüne kıyıdan uzak (off-shore) rüzgar santralleri teknolojisinin geliştirilmiş olmasıdır. Artık şamandıra üzerine yerleştirilen yüzer rüzgar türbinleri kurulabilmektedir. Avrupa'da ilk deniz üstü rüzgar türbini, İsveç'in 1990 yılında çalışmaya başlayan 220 kW' lık Nordersund türbini olmuştur. İlk deniz üstü rüzgar türbini çiftliği ise Danimarka Windeby adasında kurulmuş 11x 450 kW' lık makine içeren 5 MW' lık bu çiftlik 1991 yılının ortalarında işletmeye alınmıştır (34).

1982-1992 arasında Kaliforniya'da yaklaşık 15.000 rüzgar türbini kurulmuştur. 1993 yılında Kaliforniya'nın rüzgar çiftliklerinden 3 milyar kWh elektrik üretilmiş ve bununla Kaliforniya tüketiminin % 1,2'si karşılanmıştır. Bugün dünyanın en büyük rüzgar çiftliği 370 MW gücü ile Amerika'da bulunan KENTECH Windpower'ın Altamount Pass rüzgar tesisidir. 8160 hektar alan kaplayan bu çiftlikte 100 kW'lık 3600 adet ve 300 - 405 kW' lık 40 adet türbin bulunmaktadır (31).

1990 yılında dünyada kurulu rüzgar gücü 2160 MW iken 1993 yılının başlarında 2500 MW' a, 1994'de 3488 MW' a, 1995'de 4778 MW' a, 1996'da 6070 MW' a, 1997'de 7636 MW' a, 1998'de 10 153 MW' a, 1999'da 13 932 MW' a, 2000 yılında 18 449 MW' a ulaşmıştır (31).

Avrupa ülkeleri ve diğer ülkeler için rüzgar enerjisi durumu Çizelge 4.1, 2 ve 3'te gösterilmiştir (34).



Harita 4.1. Avrupa’da 2004 yılı sonuna kadar kurulu rüzgar gücü (MW), (34).

Çizelge 4.1. Avrupa Birliği ülkelerine ait kurulu rüzgar güçleri (MW), (34).

|                 | 2003 yılı sonuna kadar<br>kurulu kapasite | 2004 ocak-aralık<br>kurulu kapasite | 2004 yılı sonuna kadar<br>kurulu kapasite |
|-----------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| Avusturya       | 415                                       | 192                                 | 606                                       |
| Belçika         | 68                                        | 28                                  | 95                                        |
| Kıbrıs          | 2                                         | 0                                   | 2                                         |
| Çek Cumhuriyeti | 9                                         | 9                                   | 17                                        |
| Danimarka       | 3.115                                     | 9                                   | 3.117                                     |
| Estonya         | 2                                         | 3                                   | 6                                         |
| Finlandiya      | 52                                        | 30                                  | 82                                        |
| Fransa          | 253                                       | 138                                 | 386                                       |
| Almanya         | 14.609                                    | 2.037                               | 16.629                                    |
| Yunanistan      | 375                                       | 90                                  | 465                                       |
| Macaristan      | 3                                         | 3                                   | 6                                         |
| İrlanda         | 191                                       | 148                                 | 339                                       |
| İtalya          | 904                                       | 221                                 | 1.125                                     |
| Letonya         | 26                                        | 0                                   | 26                                        |
| Litvanya        | 0                                         | 7                                   | 7                                         |
| Lüksemburg      | 22                                        | 14                                  | 35                                        |
| Malta           | 0                                         | 0                                   | 0                                         |
| Hollanda        | 910                                       | 197                                 | 1.078                                     |
| Polonya         | 63                                        | 0                                   | 63                                        |
| Portekiz        | 296                                       | 226                                 | 522                                       |
| Slovakya        | 3                                         | 3                                   | 5                                         |
| Slovenya        | 0                                         | 0                                   | 0                                         |
| İspanya         | 6.203                                     | 2.065                               | 8.263                                     |
| İsviçre         | 399                                       | 43                                  | 442                                       |
| UK              | 648                                       | 240                                 | 888                                       |
| <b>EU-15</b>    | <b>28.460</b>                             | <b>5.678</b>                        | <b>34.073</b>                             |
| <b>EU-10</b>    | <b>108</b>                                | <b>24</b>                           | <b>132</b>                                |
| <b>EU-25</b>    | <b>28.568</b>                             | <b>5.703</b>                        | <b>34.205</b>                             |

Çizelge 4.2. Aday ülkelere ait kurulu rüzgar güçleri (MW), (34).

|               | 2003 yılı sonuna kadar<br>kurulu kapasite | 2004 Ocak-Aralık<br>kurulu kapasite | 2004 yılı sonuna kadar<br>kurulu kapasite |
|---------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| Bulgaristan   | 0                                         | 1                                   | 1                                         |
| Hırvatistan   | 0                                         | 6                                   | 6                                         |
| Romanya       | 1                                         | 0                                   | 1                                         |
| Türkiye       | 19                                        | 1                                   | 20                                        |
| <b>Toplam</b> | <b>20</b>                                 | <b>8</b>                            | <b>28</b>                                 |

Çizelge 4.3. Diğer ülkelere ait kurulu rüzgar güçleri (MW), (34).

|               | 2003 yılı sonuna kadar<br>kurulu kapasite | 2004 Ocak-Aralık<br>kurulu kapasite | 2004 yılı sonuna kadar<br>kurulu kapasite |
|---------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| İzlanda       | 0                                         | 0                                   | 0                                         |
| Lihtenştayn   | 0                                         | 0                                   | 0                                         |
| Norveç        | 101                                       | 59                                  | 160                                       |
| İsveç         | 5                                         | 4                                   | 9                                         |
| <b>Toplam</b> | <b>106</b>                                | <b>63</b>                           | <b>169</b>                                |

#### 4.3. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli, mevcut verilerdeki yetersizlik nedeniyle bu güne kadar güvenilir bir şekilde hesap edilememiştir. Ancak, Türkiye rüzgar enerjisi bakımından zengin yöreleri bulunan bir ülkedir. Türkiye’nin yıllık ortalama rüzgar hızı 2,5 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğu  $24 \text{ W/m}^2$  olarak bulunmuştur. Yerleşim alanları dışında 10 m yükseklikte ölçülmüş olan rüzgar hızı yıllık ortalaması, Ege Bölgesi ve diğer kıyı alanlarımızda 4,5–5,6 m/s, iç kesimlerde ise 3,4–4,6 m/s arasındadır. 10 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızı 4–5 m/s olan yörelerimizde, türbin kurulması açısından önemli olan 50–60 m yükseklikteki güç yoğunluğu  $500 \text{ W/m}^2$  düzeyini aşmaktadır (35).

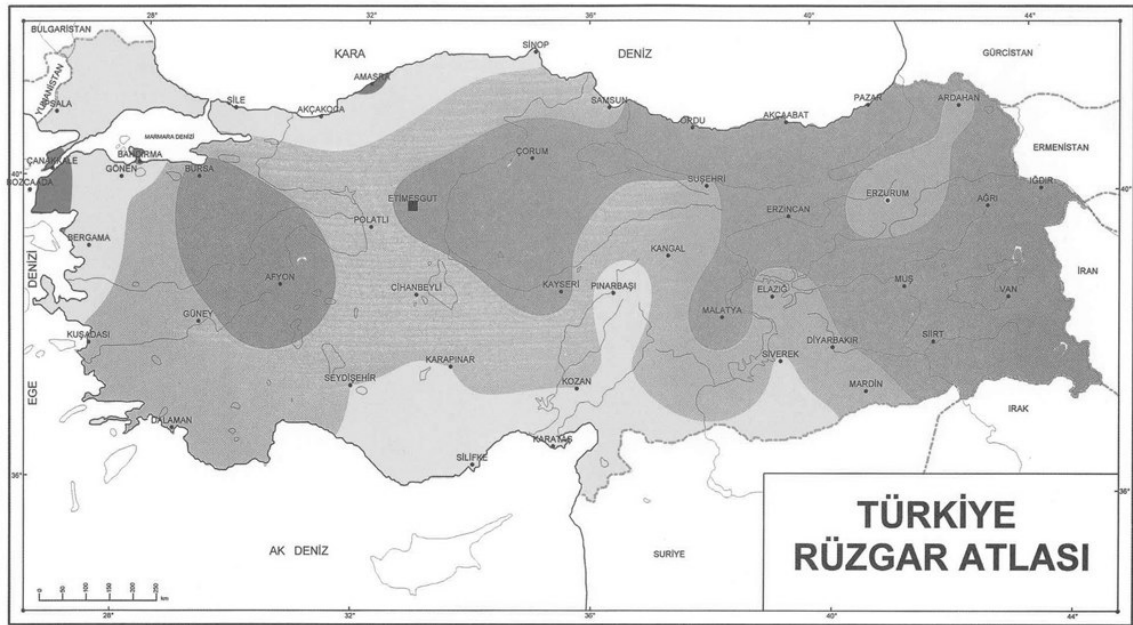
Rüzgar enerjisinin kullanılması ülkemiz açısından önemli olduğundan değişik yörelerdeki rüzgar enerjisi potansiyellerinin belirlenmesi için çeşitli kurumlar ve kuruluşlar tarafından çalışmalar yapılmaktadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ), uzun süreden beri klimatolojik rüzgar verileri toplamaktadır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) ise, rüzgar enerjisi alanında Ar-Ge projeleri sürdürmek amacıyla, 1983 yılında bir çalışma başlatmıştır (36).

İlk adım olarak DMİ Genel Müdürlüğü'ne ait istasyonların 1970-1980 yılları arasındaki aylık rüzgar hızı ve yönüne ait 10 yıllık veriler değerlendirilmiş ve ülke genelindeki doğal rüzgar dağılımı “Türkiye Rüzgar Enerjisi Doğal Potansiyeli” adı altında yayımlanmıştır (36). Bu çalışmalardan alınan Çizelge 4.4.'de, yedi coğrafik yörenin ortalama rüzgar gücü yoğunluğunu ve rüzgar hızlarını göstermektedir (37).

Çizelge 4.4. Bölgelere göre ortalama rüzgar gücü yoğunluğu ve hızları (37).

| Bölge Adı         | Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m <sup>2</sup> ) | Ortalama Rüzgar Hızı (m/s) |
|-------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|
| Akdeniz           | 21.36                                              | 2.45                       |
| İç Anadolu        | 20.14                                              | 2.46                       |
| Ege               | 23.47                                              | 2.65                       |
| Karadeniz         | 21.31                                              | 2.38                       |
| Doğu Anadolu      | 13.19                                              | 2.12                       |
| Güneydoğu Anadolu | 29.33                                              | 2.69                       |
| Marmara           | 51.91                                              | 3.29                       |

Bu çalışmaya göre Türkiye'nin % 64,5'inde rüzgar enerjisi güç yoğunluğu 20 W/m<sup>2</sup>, yi aşmazken, % 16,11 'inde 30-40 W/m<sup>2</sup> arasında, %5,9'unda 50 W/m<sup>2</sup>'nin ve % 0,08'inde de 100 W/m<sup>2</sup>'nin üzerindedir.



| Beş farklı topografik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri <sup>1</sup> |                           |                     |                         |                            |                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|------------------|
| Kapalı Alanlar <sup>2</sup>                                                                             | Açık Alanlar <sup>3</sup> | Köyler <sup>4</sup> | Açık Deniz <sup>5</sup> | Tepe ve Bayır <sup>6</sup> |                  |
| ms <sup>-1</sup>                                                                                        | Vm <sup>-1</sup>          | ms <sup>-1</sup>    | ms <sup>-1</sup>        | ms <sup>-1</sup>           | Vm <sup>-1</sup> |
| >6.0                                                                                                    | >250                      | >7.5                | >500                    | >8.5                       | >700             |
| 5.0-6.0                                                                                                 | 150-250                   | 6.5-7.5             | 300-500                 | 7.0-8.5                    | 400-700          |
| 4.5-5.0                                                                                                 | 100-150                   | 5.5-6.5             | 200-300                 | 6.0-7.0                    | 250-400          |
| 3.5-4.5                                                                                                 | 50-100                    | 4.5-5.5             | 100-200                 | 5.0-6.0                    | 150-250          |
| <3.5                                                                                                    | <50                       | <4.5                | <100                    | <5.0                       | <150             |

1. Rüzgar potansiyeli, rüzgarın gücünü temsil etmektedir. Rüzgar türbini halihazırda potansiyelin % 20 ile % 30 luk bölümünü kullanabilir. Potansiyel hesaplamaları; deniz seviyesinde 1 Atm ilk standart basınç ve 15 °C sıcaklığa karşılık gelen 1.23 kg/m<sup>3</sup> 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 alanlar (pürüzlülük sınıfı 1). İç bölgelerde en fazla tercih 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. Tam tersi durumda ise potansiyel daha az olabilir.
5. Köylardan 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.

Harita 4.2. Türkiye Rüzgar Atlası (36).

Rüzgar enerjisi potansiyelinin enerji üretimi amacıyla belirlenmesi kapsamında EİE İdaresi Genel Müdürlüğü'nce "Rüzgar Enerjisi Gözlem İstasyonu Projesi" başlatılmıştır. Proje kapsamında kurulan istasyonlarda, rüzgar verilerini toplama çalışmaları sürdürülmektedir. Bu arada ölçüm süresi tamamlanan Karabiga (Çanakkale), Nurdağı (Gaziantep), Şenköy (Hatay), Karaburun (İzmir) ve Bandırma (Balıkesir), Söke, Yalıkavak (Bodrum), Sinop, Eğirdir (Isparta) ve Foça istasyonları sökülerek, bölge etütleri sonucunda belirlenmiş olan Bababurnu, Belen (Hatay), Datça (İzmir), Kocadağ (İzmir), K.Karabekir (Karaman) ve Van istasyonları kurulmuştur. Mevcut gözlem istasyonlarına ait aylık ortalama hızlar çizelge 4.5'te verildiği gibidir (36).



Bu güne kadar yapılan çalışmaların sonucuna göre, ülkemizdeki doğal rüzgar potansiyeli hakkında bir fikir vermesi bakımından; Çanakkale Boğazı civarı, Bozcaada, Gökçeada, Sinop, İnebolu, Bozkurt, Samsun, Bandırma, Balıkesir, Çorlu, Edremit, Ayvalık, Dikili, Çeşme, Bodrum, Bergama, Antakya, Anamur, Silifke, Mardin, Malatya, Erzurum, Seydişehir, Karaman, Afyon yöreleri rüzgar enerjisinden yararlanılabilir alanlardır (36).

Rüzgar enerjisi üzerinde yapılan teorik çalışmalara göre, Türkiye'nin karasal alanlarında 400 milyar kWh/yıl brüt potansiyel ve 120 kWh/yıl teknik potansiyel olduğu hesaplanmıştır. Brüt potansiyel 160.000 MW, teknik potansiyelde 48.000 MW rüzgar gücüne karşılıktır.

Uydu ile uzaktan algılanan verilerine dayalı yapılmış, çoğunluğu batıda olmak üzere Türkiye kıyı alanlarında 82.000 MW'lık bir potansiyelin varlığını göstermektedir. Bugün Türkiye'de ölçümlerle kanıtlanmış güvenilir 12,4 Milyar kWh/yıl rüzgar potansiyeli, yaklaşık 5000 MW kurulu güçle değerlendirilmeyi beklemektedir.

Söz konusu karasal potansiyellerin dışında Türkiye deniz alanlarında da rüzgar potansiyelinin 60.000 MW (150 milyar kWh/yıl) düzeyini aşkın olduğu kestirilmektedir. Ancak, bunun teknik ve ekonomik değerlendirilmesi ile ilgili henüz hiçbir etüt mevcut değildir (37).

#### **4.4. Rüzgar Enerjisi Kullanımının Türkiye'deki Gelişimi ve Uygulamaları**

Türkiye'de rüzgar enerjisinden elektrik üretimi konusunda, MW mertebesinde sadece Çeşme-Alaçatı, Germiyan ve Bozcada'da olmak üzere 3 rüzgar parkı mevcuttur. Bunlardan birincisi 1995 yılında Danimarka'dan ithal edilip, İzmir-Çeşme Altinyunus Turistik tesislerine kurulan sistem olup, yatay eksenli ve 3 kanatlı, 7.2 MW gücünde, "up-wind" türündedir ve halen işletilmektedir. Üretilen elektrik enerjisi turistik tesiste kullanılmakta geri kalan kısmı ise sisteme satılmaktadır. Yapılan anlaşmayla satış fiyatı; ilk on yıl için 9 Cent/kWh, ikinci on yıl için 4 Cent/kWh 'dir. Germiyan rüzgar enerjisi santralının kurulu kapasitesi 1.5 MW olup,

otoprodüktör amaçlı bu santralden, sisteme elektrik satışı olmamaktadır. Bozcaada’da kurulan rüzgar enerjisi santralının kurulu kapasitesi ise 10.2 MW gücündedir. Bu santralden sisteme ortalama 5.75 Cent/kWh fiyat ile elektrik satılmaktadır (Çizelge 4.6.) (38-39).

Çizelge 4.6. 2000 Ekim itibariyle Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü (39).

|               | İlk Yatırım               | İkinci Yatırım           | Üçüncü Yatırım    |
|---------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|
| Kurulma Yılı  | 1998                      | 1998                     | 2000              |
| Bölge         | Germiyan - Çeşme<br>(Ege) | Alaçatı - Çeşme<br>(Ege) | Bozcaada<br>(Ege) |
| Güç           | 1,5 MW                    | 7,2 MW                   | 10,2 MW           |
| Yatırım Şekli | Otoprodüktör              | Yap-İşlet -Devret        | Yap-İşlet-Devret  |
| Yatırımcı     | Demirer Holding           | Güçbirliği Holding       | Demirer Holding   |

#### 4.5. Türkiye’de Ar-Ge Çalışmaları

Ülkemizde rüzgar enerjisi Ar-Ge çalışmaları başta EİEİ Genel Müdürlüğü Rüzgar Enerjisi Şubesi olmak üzere, bazı üniversitelerde sürdürülmektedir. EİEİ tarafından Türkiye’deki rüzgar enerjisi potansiyeli üzerindeki çalışmalar sürdürülmektedir. EİEİ 1990 yılından itibaren seçilmiş potansiyelli rüzgar alanlarında nispeten açık ortamlarda serbest rüzgar hızlarını tespit etmek için hafızalı rüzgar ölçüm aletleriyle ölçüm yapmaktadır. Rüzgar türbinleri ve rüzgar enerjisi potansiyeli konularında İstanbul Teknik Üniversitesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara Üniversitesi ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi’nce (MAM) yapılmış ve devam eden çalışmalar mevcuttur (40).

#### 4.6. Türkiye’de Yürütülen Rüzgar Enerjisi Projeleri

TEİAŞ, Avrupa Birliği’ne üye Akdeniz ülkeleriyle (İspanya, Portekiz, Fransa, İtalya, Yunanistan) birliğe üye olmayan Güney Akdeniz ülkelerinin (Fas, Cezayir, Tunus, Mısır, Filistin, Türkiye) ortaklaşa yürüteceği “INTERSUD-MED” projesine katılmıştır. Projenin amacı, Güney Akdeniz ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimine entegrasyonunu sağlamak üzere ön fizibilite çalışmaları yapmaktır. Türkiye’nin öncelikli seçimi; maliyet ve potansiyel yönünden konvansiyonel enerji kaynaklarıyla en fazla rekabet edebilecek düzeyde olduğu görülen rüzgar enerjisiyle elektrik üretimi olmuştur.

Bu projenin sonucunda projeye katılan her ülkede, rüzgar türbini, fotovoltaik güneş santrali, biyokütle santralleri ile jeotermal santrallerin kurulabilme potansiyeli; ülkelerin elektrik enerjisi ihtiyacı, altyapısı, yer bilgileri, teknolojiye yönelik imalat kapasitesi, mevcut iş kaynağı vb. konular göz önüne alınarak tespit edilecektir. Proje çerçevesinde gerçekleştirilecek iş programı, yedi ayrı görevden meydana gelmektedir. Bunlar ana hatları itibarıyla aşağıda sıralanmıştır.

Verilen yerel şartlarda yer ve teknoloji seçimi,

Güney Akdeniz ülkelerinin, elektrik üretimi açısından kurumsal yapılanmalarının analizi,

Yenilenebilir enerji kaynaklı üretim tesisleri için, sisteme bağlantılarını da içeren temel mühendislik ve tekno-ekonomik çalışmalar,

Ülkenin üretim tesisi imalatı ve teknoloji transferi açısından yerel endüstriyel kapasitesinin saptanması,

Sosyal ve ekonomik etkilerin belirlenmesi,

Çevresel etkileri,

Finansman modellerinin geliştirilmesi.

EİE İdaresi Genel Müdürlüğü'nden mevcut ölçüm istasyonlarına ait rüzgar hız ve yön değerleri alınmış ve temin edilen harita, yer bilgileriyle birlikte ENDESA'ya (İspanya) gönderilmiştir. Çalışmalar sonucu aday bölgeler arasında rüzgar çiftliği kurmaya en uygun yerlerden biri İzmir-Kocadağ olarak seçilmiştir. TEİAŞ, bu proje kapsamında yapılacak çalışmalarda kullanılmak üzere WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) programını, Danimarka'dan satın almıştır.

Türkiye'de yürütülen diğer bir proje, Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi (AREB-TŞ) girişimi sonucunda, EİEİ ile bir protokol çerçevesinde ortaklaşa yürütülmesi kararlaştırılan Avrupa Yatırım Bankası destekli proje olup, "Rüzgar Enerjisi Fizibilite Çalışması" adını taşımaktadır. 300.000 ECU'lük harcamayı ön gören bu proje için yerli ve yabancı müşavir firma seçimleri yapılmıştır. Proje, "ön çalışmalar" aşamasındadır. Bundan sonra rüzgar kaynağı değerlendirmeleri, rüzgar çiftliği dizaynı, ekonomik analiz, çevre etkilerini değerlendirme çalışması ve sonuçların genel değerlendirilmesi aşamaları gerçekleştirilecektir.

Ülkemizde özel sektör tarafından yapılan iki adet rüzgar santrali, "Yap-İşlet-Devret Modeli" çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Bu model çerçevesinde; yatırımcılar tarafından gerçekleştirilen rüzgar enerjisi projeleri, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nca onaylanmakta ve Bakanlıkla 20 yıllık enerji alım garantisini de kapsayan bir sözleşme imzalanmaktaydı. Böylelikle rüzgar enerjisi santrali kurulduktan sonra üretilen enerji 20 yıl boyunca devlet tarafından ihtiyaç olsun olmasın sözleşme fiyatı üzerinden alınmak zorunda idi. Rüzgar enerjisi santrallerinin faydalı ömürlerinin yaklaşık 20-25 yıl olduğu göz önüne alınırsa yapılan ve 20 yıl boyunca işletilen bu santrallerin bu süre sonunda devlete devredilmesinden söz etmek mümkün değildir. Ayrıca, devlet tarafından üretilen enerji sözleşmede belirlenen nispeten yüksek (subvanse edilmiş) fiyattan satın alınmak zorunda idi. Asıl amacı, rüzgardan enerji üretmek konusunda özel girişimi yönlendirme ve teşvik olan bütün bu hususlar, uygulama içinde rüzgar enerjisini pahalı bir enerji kaynağı olarak göstermiş ve devleti zarara sokar hale getirmiştir.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) kurulduktan sonra enerji yatırımlarında Yap-İşlet-Devret modeli terk edilmiştir. Bunun yerine yapılan enerji yatırımlarında EPDK Lisansı zorunluluğu getirilmiştir. Yani bir yatırımcı enerji yatırımı yapmadan önce EPDK'ya lisans için başvuracak ve lisans aldıktan sonra bazı yatırım indirimlerinden faydalananarak yatırımını tamamlayacaktır.  retime geçtikten sonra üretilcek enerjinin devlet tarafından hiçbir alım garantisi bulunmamaktadır. Böylelikle bir rekabet ortamı doğacak ve daha önceleri aşırı karlılık ve garanti nedeniyle rahatlık içeren projelerin daha gerçekçi bir boyuta oturtulması sağlanmış olacaktır. Aşağıdaki tabloda Lisans almak için EPDK'ya başvurmuş Rüzgar Enerjisi Santrali Projeleri verilmektedir ( izelge 4.7.) (3, 24, 32, 40-41).

Çizelge 4.7. Lisans almak için EPDK'ya başvurmuş Rüzgar Enerjisi Santrali Projeleri (41).

| Projenin Adı               | Başvuran Firma    | Yeri                | Gücü (MW) |
|----------------------------|-------------------|---------------------|-----------|
| Kocadağ Santrali           | AS MAKİNSAN       | İzmir-Çeşme Kocadağ | 50,4      |
| Çanakkale Rüzgar Santrali  | AS MAKİNSAN       | Çanakkale           | 30        |
| Mazıdağı Rüzgar Santrali   | DEMİRER HOLDİNG   | İzmir-Çeşme Alaçatı | 39        |
| İntepe Rüzgar Santrali     | INTERWIND         | Çanakkale- İntepe   | 30        |
| Datça Rüzgar Santrali      | DEMİRER HOLDİNG   | Muğla-Datça         | 28,8      |
| Datça Rüzgar Santrali      | ATLANTİS TİCARET  | Muğla-Datça         | 12,54     |
| Yalıkavak Rüzgar Santrali  | ATLANTİS TİCARET  | Bodrum Yalıkavak    | 7,92      |
| Bandırma Rüzgar Santrali   | ATLANTİS TİCARET  | Balıkesir-Bandırma  | 15        |
| Çeşme Rüzgar Santrali      | PROKON            | İzmir-Çeşme         | 12        |
| Akhisar Rüzgar Santrali    | DEMİRER HOLDİNG   | Manisa-Akhisar      | 12        |
| Akhisar Rüzgar Santrali    | AK -EN İNŞAAT     | Manisa-Akhisar      | 30        |
| Beyoba Rüzgar Santrali     | ATLANTİS TİCARET  | Akhisar Beyoba      | 7,92      |
| Karaburun Rüzgar Santrali  | ATLANTİS TİCARET  | İzmir-Karaburun     | 22,5      |
| Hacıömerli Rüzgar Santrali | DEMİRER HOLDİNG   | İzmir-Hacıömerli    | 45        |
| Kocadağ Rüzgar Santrali    | MAGE A.Ş.         | İzmir-Çeşme Kocadağ | 26,25     |
| Gökçeada Rüzgar Santrali   | SİMELKO           | Çanakkale-Gökçeada  | 5         |
| Yaylaköy Rüzgar Santrali   | MAGE A.Ş.         | İzmir-Karaburun     | 15        |
| Lapseki Rüzgar Santrali    | ATLANTİS TİCARET  | Çanakkale-Lapseki   | 15        |
| Şenköy Rüzgar Santrali     | AKFIRAT A.Ş.      | Hatay-Şeriköy       | 12        |
| Belen Rüzgar Santrali      | TEKNİK TİCARET    | Hatay-Belen         | 20-30     |
| Kumkale Rüzgar Santrali    | DEMİRER HOLDİNG   | Çanakkale-Kumkale   | 12,6      |
| Mazıdağı-2 Rüzgar Santrali | DEMİRER HOLDİNG   | İzmir-Çeşme         | 90        |
| Mazıdağı-3 Rüzgar Santrali | YAPISAN LTD       | İzmir-Çeşme         | 39,6      |
| Kapıdağ Rüzgar Santrali    | AS MAKİNSAN       | Erdek-Balıkesir     | 20-35     |
| Karabiga Rüzgar Santrali   | AS MAKİNSAN       | Çanakkale-Karabiga  | 15-50     |
| Yellice Rüzgar Santrali    | AS MAKİNSAN       | Belen-Karaburun     | 70-100    |
| Zeytinbağ Rüzgar Santrali  | DER YALAR LTD.    | Bursa-Zeytinbağ     | 30-60     |
| ÇEREŞ (Çeşme) Rüzgar Sant. | INTERWIND         | Çeşme               | 18-25,5   |
| Taştepe Rüzgar Santrali    | FORA A.Ş.         | Bandırma- Taştepe   | 37,8      |
| Kocaali Rüzgar Santrali    | DERİN LTD.        | Tekirdağ-Şarköy     | 31.2      |
| Topdağ Rüzgar Santrali     | DERİN LTD.        | Sinop               | 33        |
| Paşalimanı Rüzgar Santrali | AS MAKİNSAN       | Kapıdağ-Marmara     | 9         |
| Seyitli Rüzgar Santrali    | DERİN LTD.        | Aliağa              | 51        |
| Güzelyer Rüzgar Santrali   | EN DA ÜRETİM A.Ş. | Çeşme               | 50,4      |
| Yenişakran Rüzgar Santrali | YAPISAN İNŞAAT    | Aliağa-Bahçedere    | 54        |
| Ekinli Rüzgar Santrali     | DER YALAR LTD.    | Karacabey- Bandırma | 39,6      |

## 5. RÜZGAR ENERJİSİNİN ELEKTRİKSEL UYGULAMALARI

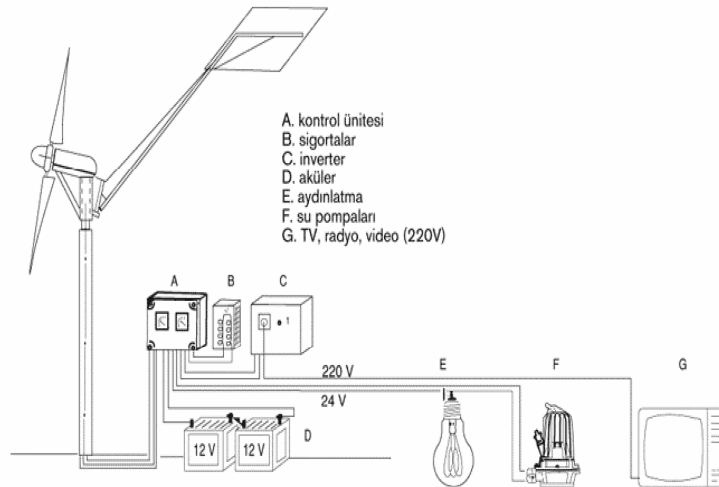
Rüzgar enerjisi, hem kırsal alanların elektrik enerjisinin yerel üretim ve tüketiminde hem de elektrik şebekesini beslemek amacıyla kullanılır. Rüzgar enerji parklarından elde edilen elektrik enerjisi elektrik şebekesine aktararak satılmaktadır veya tesis sahipleri tarafından doğrudan tüketilmektedir (40).

Rüzgar enerjisinin elektriksel uygulamalarını üç grup altında toplanmak mümkündür;

- 1) Şebekeden bağımsız AC/DC uygulamaları,
- 2) Uzak DC uygulamaları,
- 3) Şebeke bağımlı rüzgar elektrik sistemleri.

### 5.1. Şebekeden Bağımsız AC/DC Uygulamaları

Tarımsal amaçlı su pompalama, ürünlerin kurutulması veya soğutulması, ısıtıcıların işletimi, arıtma, soğutma ve havalandırma işlemleri örnek verilebilir. Bu tür rüzgar jeneratörleri üç rotorlu bir çark, transmisyon sistemi, DC jeneratör, yöneltici kuyruk ve fren sisteminden oluşmaktadır. Makine daha çok direk tipi kule üzerine yerleştirilir. Elde edilen d.a elektrik enerjisi akü ile depolanabilir. Şekil 5.1.'de gösterilen, şebekeden bağımsız rüzgar elektrik sistemleri birkaç kW ile 100 kW arasında kullanılmakla birlikte, çoğunlukla 30 kW'ı aşmamaktadır (19,40).



Şekil 5.1. Şebekeden bağımsız bir rüzgar türbinin şematik gösterimi (19).

Şebekeden bağımsız büyük güçlü (10-100 kW) sistemler, yedek enerji kaynağı olarak diesel jeneratörlerle paralel çalıştırılmaktadır. Böyle bir sistemde diesel jeneratörün rüzgardan yararlanarak %40-50 yakıt tasarrufu sağlaması amaçlanmaktadır. Rüzgar-Diesel sistemlerde d.a/a.a dönüştürücü kullanılarak tüketici a.a ile beslenmektedir. Bu tür sistemler özellikle kırsal alanlarda ve enterkonnekte şebekeye uzak olan bölgelerde tercih sebebidir. Türbinden elde edilen elektrik enerjisi Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi çeşitli ünitelerden geçerek kullanıma sunulmaktadır. Rüzgarın esmediği durumlarda ise, yani türbin tarafından elektrik üretimi olmadığında; akü içerisinde depolanmış olan elektrik kullanıma sunulur.

Türkiye'de özellikle 10 kW'dan küçük güçlerde rüzgar+güneş fotovoltaik (PV) elektrik sistemlerine bir talep olduğu ve bu tür sistemlerin piyasaya çıkarıldığı da görülmektedir. Bu sistemler d.a. karakterli ve akülüdürler. Ancak, pahalı olmaları yaygınlaşmalarını engellemektedir (42).

## **5.2. Uzak d.a. Uygulamaları**

Röle ve meteoroloji istasyonları, demiryolu sinyalizasyonu, deniz - hava yolu ulaşım sistemleri ve uzak pompa istasyonları bu uygulamaların en iyi örnekleridir.

Dizel veya gaz jeneratörü kullanılan uzak d.a. çıkışlı sistemlerin yerine RED sistemi kullanılması, yakıt giderlerinde tasarruf sağlar. Ayrıca, sürekli bakım-onarım gerektirmeden işletimi mümkündür. Bu sistemler uzak yerleşim yerlerinde ısı ve ışık kaynağı olarak da kullanılabilirler (32).

## **5.3. Şebeke Bağımlı Rüzgar Elektrik Sistemleri**

Rüzgar enerjisi çok kesintili bir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisini, hiçbir sınırlamaya tabi tutmadan elektrik enerjisine çevirerek şebekeye veren bir rüzgar konvertörünün de çok kesintili bir elektrik enerjisi üretmesi kaçınılmazdır. Ancak, rüzgar konvertörleri son 5-10 yılda büyük bir gelişme göstermiştir. Bugün kullanılan

modern rüzgar türbinlerinde olduğu gibi rüzgar enerjisi, elektrik enerjisine çevrilerek şebekeye verilmeden önce çeşitli kademelerden geçmektedir (43).

Türbinler, personelsiz işletildikleri için türbini her türlü şebeke olayına ve türbin arızasına karşı koruyan bilgisayarlı bir kontrol sistemi içermekte, çok nadir olarak meydana gelen arızalarda türbin kontrol sistemi tarafından sinyal yollanmakta ve uzaktan müdahale ile veya teknisyen yollanarak arıza giderilmektedir.

Ülkemizde ise, trafoları, türbinleri ve bağlantı kablolarını korumak için kesici, ayırıcı gibi ilave teçhizat ve kablo arızalarına karşı ring sisteminin kullanılması şart koşulmakta, mükerrer sayılabilecek bu teçhizat ise santral maliyetlerini arttırmaktadır (43).

Kısa süreli periyotlar içindeki enerji üretimindeki dalgalanmalar elektrik dağıtım şebekesine küçümsenmeyecek zararlar verebilmektedir. Kesintili yük çeken tesislerin elektrik şebekesindeki olumsuz etkileri çok eskiden beri bilinmektedir. Bu nedenle kesintili üretim yapan bir rüzgar konvertörünün de şebekeye yaptığı olumsuz etkileri sınırlamak için, diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de sınırlamalar getirilmiştir (43).



Resim 5.1. Tipik Şebeke Bağlantılı Rüzgar Türbinleri (44)

Rüzgar konvertörlerinin şebekeye yaptığı olumsuz etki, şebekeye bağlantı noktasındaki kısa devre gücüne bağlıdır. Bugün ülkemizde tesis edilecek bir rüzgar santralının kurulu gücü, bağlantı noktasındaki minimum kısa devre gücünün yüzde beşi ile sınırlıdır (Bu güç, bir veya daha fazla rüzgar santrali arasında paylaştırılabilir).

İletim sistemlerine artan miktarlarda rüzgar santrallerinin bağlanması nedeniyle ortaya çıkan sorunların çözülmesi, elektriğin arz güvenliği ve kalite kriterlerinin sağlanabilmesi için rüzgar türbinlerinin arıza ve arıza sonrasında uyması gereken kriterler Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyonu Birliği (UCTE), İletim Sistem İşletmecileri tarafından incelenmekte ve İletim Şebeke Yönetmeliklerine ilave edilmektedir. Temel prensip, şebeke işletmesinde sistemin her türlü gereksinimini karşılayan konvansiyonel üretim santrallerine benzer şekilde, rüzgar santrallerinin de sistem işletme güvenliğinin sağlanmasında gerekli bazı sorumlulukları taşımasıdır. Bu kapsamda, arıza veya sistem dengesizliklerinde, üretim tesisleri tarafından sisteme güç sağlanarak destek verilmesi; reaktif güç sağlanarak gerilim kontrolünün sağlanması; sistem dengelenmesi ve frekans kontrolü için sisteme aktif güç verilmesinin sağlanması gibi konularda rüzgar santrallerinin sistem işletmesine katkıda bulunması gerekmektedir (45).

Türbinlerin ilk devreye girerken çektiği akım sınırlandırılarak, şebekeye etkisi azaltılmaktadır. Rüzgar hızına göre üretimi sabit tutmak amacıyla kanat açıları sürekli değiştirilmektedir. Bir kısım rüzgar türbinleri ise, ani gelen rüzgar darbeleri ile üretim yapmadan dönüş hızını artırmakta, bu şekilde rüzgar darbesinin elektrik darbesi olarak şebekeye aktarılmasını nispeten engellemektedir (43).

Diğer yandan bugün geliştirilen çoğu rüzgar türbinlerinde, türbinlerin gerilim seviyesini, şebekenin mevcut geriliminden daha yüksek veya daha düşük tutmak suretiyle şebekenin gerilim regülasyonuna katkıda bulunmak ta mümkün olmaktadır (43).

### **5.3.1. Rüzgar türbinlerinin dağıtım şebekesine bağlantısı**

Dağıtım gerilimi seviyesinde şebekeye bağlanması planlanan bir rüzgar santrali, diğer enerji santralleri veya otoprodüktör santrallerde olduğu gibi, ancak bağımsız bir enerji nakil hattı ile bir dağıtım merkezine veya TEİAŞ trafo merkezine bağlanabilir. Sistem emniyeti ve can güvenliği açısından dağıtım hatlarına direkt bağlanmalarına müsaade edilmemektedir (43).

Ülkemizin elektrik dağıtım şebekesi genelde 34,5 kV ve daha düşük gerilim seviyesindedir. Rüzgarın bol olduğu kıyı bölgelerimizde trafo merkezlerinin güçleri 25-50 MW olduğu, bu bölgedeki iletim sistemimizin genelde radyal olduğu ve minimum sistem empedansı göz önüne alınırsa, kısa devre güçleri 200-300 MVA ile sınırlı kalmaktadır. Bu durumda dağıtım şebekelerine bağlanacak rüzgar santrallerinin gücü azami 15 MW civarında olmaktadır.

Rüzgar türbinleri çoğu gelişmiş ülkelerde basit sigortalı ayırıcılar ve her bir türbin için trafo ile şebekeye bağlanmakta ve başında personel bulunmadan işletilmektedir. Personelsiz işledikleri için türbinin her türlü şebeke olayına ve türbin arızalarına karşı koruyan bilgisayarlı bir kontrol sistemi içermekte, çok nadir olarak meydana gelen arızalarda türbin kontrol sistemi tarafından sinyal yollanmakta ve uzaktan müdahale ile teknisyen yollanarak arıza giderilmektedir (43).

### **5.3.2. Rüzgar türbinleri iletim şebekesine bağlantısı**

İletim şebekesine bir rüzgar santrali ya en yakın TEİAŞ trafo merkezine çekilecek bir iletim hattı ile ya da en yakın iletim hattına girdi-çıkı yapılarak şebekeye bağlanabilir (43).

İletim şebekemizin gerilim seviyesi 154 veya 300 kV'tur. Bu gerilimdeki trafo merkezlerimizin kısa devre güçleri 300-400 MVA dan başlamakta, 10.000 MVA'ya kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle büyük güçte rüzgar santrali tesis etmek isteyenler ancak iletim şebekesine bağlanabilecektir.

Dağıtım sistemine bağlanacak bir rüzgar çiftliğindeki elektrik bağlantılarının gerilim seviyesi, tercihen bağlanacak trafo merkezinin gerilim seviyesi olarak seçilmektedir. Bu durumda santral çıkışına ilave bir yükseltici (veya düşürücü) trafo tesis maliyeti olmayacaktır.

İletim şebekesine bağlanacak rüzgar santralinde ise gerilim seviyesi olarak en ekonomik dağıtım gerilim seviyesi seçilir. Bu durumda, santral çıkışında kullanılacak yükseltici trafonun, ülkemizde kullanılan standartlardan farklı olması durumunda, yedekleme sorunu ortaya çıkabilir (43).

Rüzgar santrallerinin üretim şebekesine diğer bir bağlanma şekli ise, kısa devre gücünün oldukça yüksek olduğu bir 380 kV merkeze bağlanmalıdır. Ülkemizde 380 kV merkezlerinin minimum kısa devre gücü genelde 5000 MVA'nın üzerinde olduğundan böyle bir merkeze çok sayıda rüzgar santralı, şebekeyi rahatsız etmeden bağlanabilir.

Burada önemli olan, çok sayıda trafo maliyetinden tasarruf etmek için, gerektiğinde sadece rüzgar santrallerinin bağlanacağı bir ilave bara tesis edilerek en ekonomik çözümün bulunmasıdır (43).

## **5.4. Rüzgar Enerjisi ile Şebeke Beslenmesinde Karşılaşılan Sorunlar**

### **5.4.1. Kararlı durum gerilimi**

Rüzgar tarlası veya rüzgar türbininin ürettiği aktif ve reaktif güç, şebeke empedansı üzerinden akarken şebeke gerilimini etkileyecektir. Bu etkiler düşük güçlü (zayıf) şebekeler için daha büyük olacaktır. Etki, olağan dışı haller hariç diğer tüketicilerin şebekeye bağlı olduğu (veya bağlanabileceği) bağlantı noktasında (ppc) ise en yüksek değerde olacaktır (46).

Eşdeğer sistem empedansının endüktif bileşeninin rezistif bileşene oranı da ( $X/R$  oranı) önemlidir. Bu oran genellikle 2 civarındadır ve bu değer sabit hızlı rüzgar türbinlerinin etkilerinin en aza indirildiği değeri gösterir. “Şebeke empedansı terimi için faz açısı” terimi de kullanılır.

Basit bir analiz, düğüm noktasından bakıldığında eşdeğer şebeke empedansını gerektirir. Gerilim değişimi (sıfırdan rüzgar tarlasının tam yük çıkışına kadar) elektrik şirketi tarafından belirlenmiş bir sınır değerle karşılaştırılabilir. Buradan rüzgar türbininden elde edilen maksimum sürekli çıkışın, türbinin işaret plakası üzerindeki değerden önemli oranda daha büyük olabileceğine dikkat edilmelidir.

Bu basit yaklaşımın dezavantajları şunlardır:

Elektrik şirketi kabul edilebilir gerilim aralığını sadece rüzgar tarlasına göre değil, bütün yük ve üretime göre belirleyebilir.

Basit analiz tüketici yüklerinin şebeke üzerindeki etkilerini göz önüne almaz.

Otomatik şebeke gerilim kontrolünün etkileri (trafo kademe değiştiricileri veya anahtarlama kapasitör bankları tarafından oluşturulan) ihmal edilmiştir (46).

Dağıtım sistemlerinde kabul edilebilir tipik gerilim aralıkları şunlardır:

|           |              |
|-----------|--------------|
| İspanya   | : $\pm$ % 7, |
| İngiltere | : $\pm$ % 6, |
| Fransa    | : $\pm$ % 5, |

Düşük gerilim tüketicileri tarafındaki kabul edilebilir gerilim aralığı, yukarıdaki rakamlardan farklıdır.

#### **5.4.2. Gerilim adım değişimi**

Elektrik şirketleri, müşterilerinin neden olabileceği maksimum ani gerilim adım değişimi için sınırlar belirler. Tipik değerler şunlardır :

İspanya : Endüksiyon generatörlü geleneksel üretim türleri için % 5, rüzgar türbinleri için % 2.

Fransa : % 5,

Almanya : % 2,

İngiltere : % 3

Rüzgar türbinleri devreye girerken veya generatörler arasında değişimlerde, gerilim adım değişimine neden olabilir. Büyük rüzgar tarlaları hariç, birden fazla türbinin aynı anda devreye alınması olasılığı çok düşüktür ve bu durum gözardı edilebilir.

Şebeke üzerindeki çok zayıf noktalarda bu husus, bağlanabilecek rüzgar türbininin sayısı ve büyüklükleri konusunda sınırlayıcı faktör olabilir. Daha güçlü noktalarda oluşacak gerilim adım değişiminin büyüklüğü azalacaktır. Özellikle kararlı durum gerilimi gibi diğer sorunlar, rüzgar tarlası boyutu konusunda daha sonra sınırlayıcı faktör olacaktır (46).

#### **5.4.3. Kırpışma**

Rüzgar türbinleri aktif ve reaktif güçte ve bu nedenle de elektrik şirketinin şebeke geriliminde dalgalanmalara sebep olur. Gerilim dalgalanmaları kırpışma olayından dolayı müşteri şikayetine neden olur. Kırpışma şiddeti, ölçülebilir, hesaplanabilir ve muhtemel müşteri şikayetlerinin olasılığının bir tahminini verir. Kırpışma şiddetinin hem kısa dönem (10 dakikalık ölçme periyodu,  $P_{ST}$ ) hem de uzun dönem (120 dakikalık ölçme periyodu,  $P_{LT}$ ) ölçümleri yapılır. Değişken hızlı rüzgar türbinleri genellikle sabit hızlı makinalara göre önemli oranda daha az kırpışma oluştururlar (46).

#### **5.4.4. Harmonikler**

Harmonikler yumuşak başlatma (soft start) üniteleri tarafından üretilirler (46). Ancak kısa süreli olmaları ve türbinlerin aynı zamanda başlama olasılığının düşük olması nedeni ile ihmal edilebilir.

Değişken hızlı türbinlerde, sürekli olarak harmonik akımlar üretildiğinde filtreler gerekli olabilir. Filtre tasarımı rüzgar tarlasına özgü olabilir, filtreler hacimlidir ve ek maliyet gerektirir. Sonuç olarak, şebeke tarafındaki konvertörü düşük dereceli harmonik yayılımlarını büyük oranda azaltan darbe genişlik modülasyon (PWM) kontrollü olan rüzgar türbinlerine doğru büyük bir yönelim vardır. PWM konvertörleri gerilim kontrolünü sağlamak için reaktif gücün kontrolüne olanak sağlar. Klasik konvertörlerden farklı olarak, bunların ürettiği harmoniklerle, rüzgar tarlası içindeki türbinler arasında güçlü bir ilişki olmayabilir (46).

Harmonikler genelde invertörlü rüzgar türbinlerinde oluşmaktadır. Bugün geliştirilmiş çoğu türbinde kısmide olsa invertör kullanılmakta ve gerekli filtreler kullanılarak harmonikler istenilen seviyelere indirilmektedir (46).

#### **5.4.5. Gerilim dengesizliği**

Kırsal alanlardaki zayıf şebekelerde müşteri yüklerinin büyük bir kısmı tek fazlıdır. Bu yükler, fazlar arasında doğru olarak paylaşılmazsa gerilim dengesizliği oluşur. Bu tür şebekelere bağlanan endüksiyon makinaları dengesizliği azaltacak şekilde davranacak, fakat bu işlem de aşırı ısınmaya neden olacaktır. Bazı durumlarda gerilim dengesizliğinin belirlenmiş sınırların üzerinde olduğu ve rüzgar türbininin arızası esnasında önemli olduğu bilinmektedir. Bu problem belli bir yer için önceden biliniyorsa, elektrik aksamın uygun belirlenmesiyle üstesinden gelinebilir (46).

#### **5.4.6. Güç kalitesi**

Titreme, harmonikler ve ilgili diğer sorunlar “güç kalitesi”ni ilgilendirir. Rüzgâr türbinlerinin güç kalite standardı halen uluslararası rüzgâr endüstrisinden üyelere sahip IEC (International Electrotechnical Commission) Çalışma Grubunca tasarlanmaktadır. Avrupa’nın rüzgâr enerjisi kaynağından tam yararlanılması için şebeke bağlantısını düzenleyen duyarlı ve iyi değerlendirilmiş düzenlemeler gereklidir. Rüzgâr endüstrisinin gereksiz derecede pahalı şebeke bağlantılarında doğan kısa devre gücü ile rüzgâr türbini kapasite arası orantıya dayalı esnek olmayan

elektrik şirketi kriterlerini sorgulaması gereklidir. “Kabul edilebilir asgari şebeke gücü” tek bir rüzgâr türbininin diğer tüketicilere yetersiz etkiler (kötü güç kalitesi) yaratmadan bağlanabileceği bağlantı noktasının asgari kısa devre düzeyidir. Bu değer küçüldükçe bir noktaya kötü etkiler yaratmadan bağlanabilecek türbin kapasitesi açıkça artmaktadır. Bu parametreye duyulan ilgi Alman elektrik şirketlerinin şebekeye çok sayıda rüzgâr türbini bağlama davranışına yol açmıştır. Bu, sektör için hem teknolojik gelişmenin önemli bir alan olduğuna hem de tekno-politik endişe alanına işaret etmektedir (46).

## **5.5. Şebekeye Katkıları ve Faydaları**

### **5.5.1. Kayıpların azaltılması**

Ülkemizde üretim kaynakları ile tüketim birimleri arasında uzun mesafeler bulunmaktadır. Çok yüksek gerilim ile taşınan bu gerilim daha sonra yüksek ve orta gerilime indirilerek tüketicilere taşınmaktadır (43).

Bilindiği gibi ülkemizin doğusundaki enerji tüketim kaynakları tüketimin yoğun olduğu batıdaki merkezlere taşınmasında ve daha sonraki dağıtım şebekelerinde ihmal edilemeyecek kadar yüksek oranda enerji kayıpları oluşmaktadır.

Rüzgar kaynakları genelde ülkemizin batısında ve Ege kıyılarında yoğunlaşmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından çalışmalarda, ülkemizde fizibil olarak tesis edilebilecek on bin MW dolaylarında rüzgar gücü olduğu belirlenmiştir (43). Batı yörelerimizdeki uygun bölgelere dağıtılmış olarak tesis edilecek bir-iki bin MW dolaylarındaki rüzgar santrali, gerek çok yüksek gerilimle gerekse yüksek ve orta gerilimle enerjinin kayıplarının azalmasında az da olsa rol oynayacaktır (43).

### **5.5.2. İletim şebekesine katkısı**

İletim sistemimizin işletme maliyetleri arasında, iletim kayıplarına ilaveten, gerekli

iletim hatlarının ve indirici trafo merkezlerinin tesis maliyeti de önemli bir yer tutmaktadır (43).

Rüzgar enerjisi kesintili bir enerji kaynağıdır. Bu nedenle, dağıtım şebekelerinde, tüketiciye götürülecek enerji için dağıtım ve trafo merkezi planlamasında, lokal olarak tesis edilecek rüzgar santrallerinin önemi çok sınırlıdır. Ancak her bölgenin rüzgar rejimi sınırlıdır. Bir bölgede rüzgar olmadığı halde diğer yörede rüzgar esebilir. Bu güne kadar yapılan rüzgar ölçümlerinde, birbirinde 100 km kadar uzak olan iki bölgede farklı rüzgar rejimlerinin olabildiği görülmüştür. Bu nedenle iletim şebekelerinin ve trafo merkezlerinin planlanmasında daha büyük bir bölge göz önüne alındığından, rüzgar santrallerinin üretimi önemli bir rol oynayabilir ve enerji iletimi planlaması açısından tesis maliyetlerinde nispeten bir tasarruf sağlayabilir (43).

Bilindiği gibi, rüzgar santralleri gibi dağıtılmış ve yüklere yakın olarak tesis edilmiş üretim kaynakları, enterkonnekte iletim şebekesinin stabilite açısından gerekli olan iletim hatlarının tesis maliyetinden de tasarruf sağlanabilir (43).

### **5.5.3. Dağıtım şebekesine katkısı**

Türkiye'deki dağıtım şebekelerinin tasarımında, genelde o bölgedeki dağıtım yükleri göz önünde bulundurulur. Özellikle kıyı bölgelerinde yüklerin düşük olması nedeni ile bu bölgelerde dağıtım şebekeleri radyal ve nispeten zayıf olarak tasarlanmıştır. Bunun sonucunda şebekelerin kısa devre gücü düşüktür. Bu ise bu bölgelerde dağıtım şebekelerine bağlanacak rüzgar santrallerinin güçlerinin düşük olmasını gerektirmektedir (43).

Buna örnek olarak, Alacatı'da kurulan Türkiye'nin ilk Yap-İşlet-Devret rüzgar santrali olan ARES'i (Alacalı Rüzgar Enerji Santrali) gösterebiliriz. Alacatı trafo merkezinde 34,5 kV'luk şalt sahasının kısa devre gücünün 200 MVA civarında olması nedeni ile buraya bağlanacak rüzgar santrallerinin toplam gücü 10 MW ile sınırlandırılmıştır. Diğer yandan ARES, Alacatı-Çeşme'nin enerji gereksiniminin

belirli bir oranını karşılamaktadır. Bu ise ilerideki yük artışlarında, ilave trafo tesis maliyetinden tasarruf sağlayacaktır. Şebekeye verilen enerji, 34,5 kV orta gerilim seviyesinden verildiğinden, 154/34,5 kV trafoların reaktif kayıplarındaki azalma tasarruf sağlanmaktadır (43).

Ülkemizin çoğu bölgesinde rüzgarın yoğun olduğu, ancak enterkonnekte şebekelerin uzak ve kısa devre gücünün düşük olduğu yerler bulunmaktadır. Bu bölgelerdeki kısa devre gücü, 1-2 MW gibi, ancak lokal enerji ihtiyacının karşılayacak kadar düşük güçte bir rüzgar santralının tesisine olanak sağlamaktadır (43).

Rüzgar enerji santrallerinin bu özelliği göz önüne alınarak, dağıtım şebekelerine direkt bağlanmasına olanak tanınır. Diğer taraftan, bu santrallerde minimum salt cihazının kullanımına onay verilirse, bu yerlere bir veya birkaç rüzgar türbininin tesis edilmesi fizibil olacaktır (43).

Böylece lokal ihtiyacının bir bölümü karşılanacak ve dağıtım olarak tesis edilecek bu rüzgar türbinleri ile dağıtım şebekelerinin hat ve trafo tesis maliyetlerinden ve kayıplardan tasarruf sağlanması mümkün olacaktır (43).

## 6. RÜZGAR SANTRALLERİNDE ELEKTRİK ÜRETİMİ

### 6.1. Dönüşüm Sistemleri ve Kontrol Teknikleri

Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerin çoğunda güç elektroniği teknikleri kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde üretilen enerjinin istenen forma çevrilmesi ve belirlenen kontrol mantığı çerçevesinde rüzgardan optimum enerji elde edilmesi amaçlanmaktadır. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, güç kapasitesi yüksek anahtarlama elemanları ve hızlı işlemcileri ortaya çıkarmış ve böylece rüzgar enerjisinden optimum güç elde edilmesini sağlayan sistemlerin tasarımına imkan sağlamıştır (47).

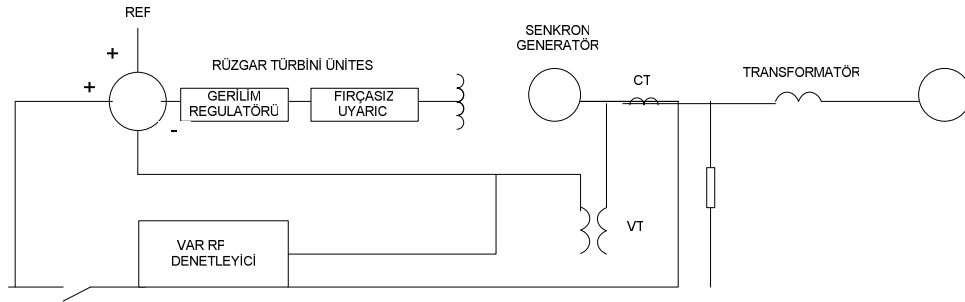
Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, türbin hızı ve üretilen gerilimin frekansı esas alındığında, çalışma prensiplerine göre 3 gruba ayrılabilir:

- a) Sabit hız, sabit frekans dönüşüm sistemleri,
- b) Değişken hız, sabit frekans dönüşüm sistemleri,
- c) Değişken hız, değişken frekans dönüşüm sistemleri,

#### 6.1.1. Sabit hız sabit frekans dönüşüm sistemleri (SHSF)

Bu tür sistemlerde rüzgar türbininin mili generatöre, generatör stator terminalleri ise enterkonnekte sisteme doğrudan bağlanmaktadır. Generatör olarak senkron veya asenkron generatör kullanılmaktadır. Senkron generatör kullanıldığı zaman uyarma akımı güç elektroniği devreleri ile kontrol edilerek güç faktörü ayarlanabilir. Asenkron generatör kullanılması durumunda rotor hızını senkron hızın üzerinde tutabilmek için türbin ile rotor arasında hız dönüşüm sistemi kullanılmalıdır (47).

Şekil 6.1 'de verilen sistem şebekeden bağımsız olarak çalışan, düşük ve orta güçler için uygun bir uygulamadır. Yüksek güçteki dönüşüm sistemleri benzer şekilde enterkonnekte şebekeye bağlanır ve generatörün gerilim seviyesi ile güç faktörü kontrolü aynı uyartım tekniğiyle gerçekleştirilir.



Şekil 6.1. Senkron generatör alan uyarımlı SHSF dönüşüm sistemi

### 6.6.2. Değişken hız sabit frekans dönüşüm sistemleri (DHSF)

Bir rüzgar türbininden elde edilebilecek güç denklemi eşitlik 6.1’de verilmiştir. Bu eşitlik türbin güç katsayısı ( $C_p$ ) ve devirlik oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P_{Top} = \frac{1}{2g_c} \rho A v^3 \quad [6.1]$$

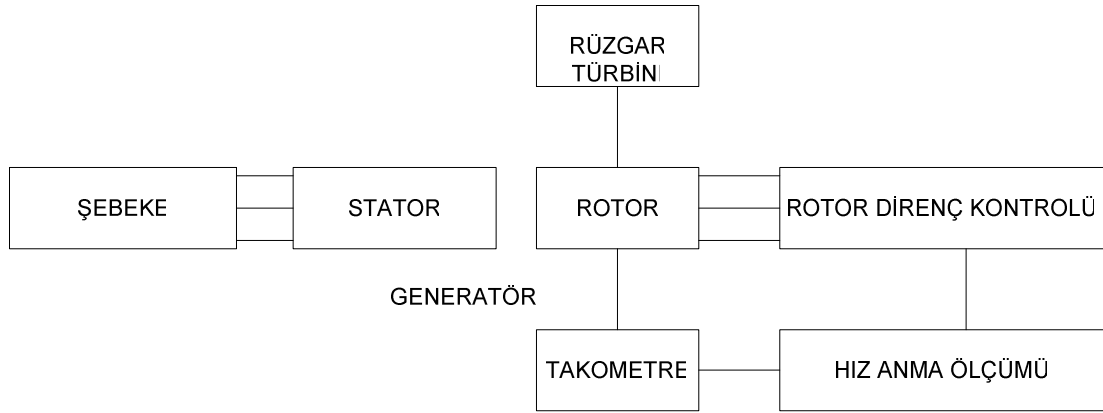
$$P = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho A v^3 \quad [6.2]$$

$$\lambda = \frac{\omega r}{v} \theta \quad [6.3]$$

$\omega_1$  türbin milinin açısal dönüş hızı,  $r$  türbin yarıçapı,  $\theta$  ise türbin kanat açısıdır.

Rüzgar hızının değiştiği durumlarda, uç-hız oranı optimum bir değerde tutulmak suretiyle rüzgardan elde edilecek gücün maksimum transferi sağlanabilir. Rüzgar türbininden maksimum güç elde etmek için uç-hız oranı, kanat aralık açısı değiştirilmek suretiyle optimum değerde tutulabilir (47).

Şekil 6.2' de gösterilen sistemde değişken hız uygulaması, generatör olarak kullanılan bilezikli asenkron makinanın rotor dirençleri değiştirilerek sağlanmaktadır.



Şekil 6.2. Rotor direnç kontrolü DHSF dönüşüm sistemi

Bu sistemde asenkron generatör bir çeviriciye ihtiyaç olmaksızın, doğrudan enterkonnekte şebekeye bağlanabilmektedir. Rotor dirençleri değiştirilmek suretiyle asenkron generatörün tork-hız eğrisi değiştirilerek güç akışı kontrol edilmektedir. Sistemin dinamik denklemi yazılacak olursa;

$$T_{\alpha} = J \frac{d\omega}{dt} = T_{\omega} - T_D \quad [6.4]$$

Burada;  $T_{\alpha}$  hızlanma torku (Nm),  $T_{\omega}$  rüzgar türbininden elde edilen tork (Nm),  $T_{\omega}$  asenkron generatörünün ürettiği tork (Nm),  $J$  tüm sistemin eylemsizlik momenti ( $\text{kg.m}^2$ ),  $\omega$  rotor milinin açısal hızı (rad/s) dır.

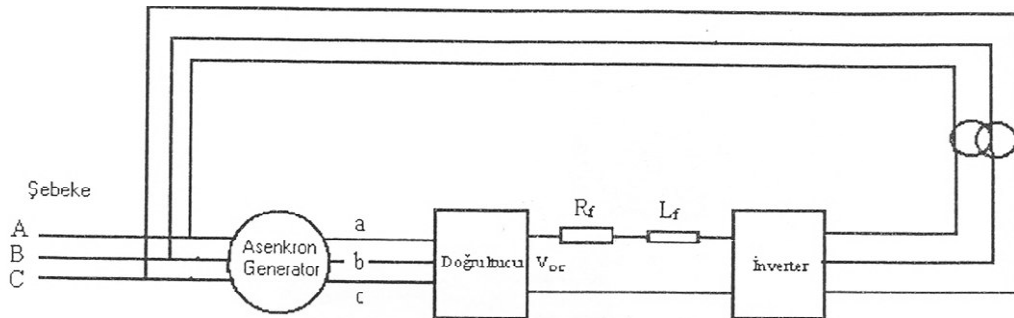
$T_{\omega}$ , rüzgar hızı ile mil hızının bir fonksiyonudur.  $T_{\omega}$  ise, mil hızı ve rotor direncinin bir fonksiyonudur. Asenkron generatörün ürettiği tork, mil hızı sabit kaldığı sürece, rotor direnci arttıkça azalır veya azaldıkça artar. Buna göre  $T_{\alpha}$  değeri sıfır olacak şekilde, türbin hızı artma eğilimi gösteriyorsa  $\left(J \frac{d\omega}{dt}\right)_{>0}$  rotor direnci azaltır veya azalma eğilimindeyse  $\left(J \frac{d\omega}{dt}\right)_{<0}$  rotor direnci artırılır. Böylece rotor direnci değiştirilerek asenkron jeneratör sabit hız uygulamasından değişken hız uygulamasına geçirilir ve türbin verimi optimum değerinde tutulmuş olur.

Fırçasız çift beslemeli asenkron generatör tipi makinalarda stator kısmında farklı kutup sayılarında 2 adet sargı bulunmakta olup, sırasıyla güç sargıları ve kontrol sargıları olarak adlandırılmaktadır (47). Stator sargı frekansları ile rotor mil hızı arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$f_c = f_r (P_p + P_c) - f_p \quad [6.5]$$

Burada;  $P_p$  ve  $P_c$  sırasıyla stator güç ve kontrol sargılarının kutup sayısı,  $f_p$  şebeke frekansı,  $f_r$  mil hızı,  $f_c$  gerekli kontrol sargıları frekansdır (47).

Şekil 6.3'te gösterilen sistemde, generatör olarak bilezikli asenkron makina kullanılmaktadır. Buradaki sistemde makinanın rotor dirençlerinde kaybolabilecek enerji bir a.a-d.a.-a.a. çevirici yardımıyla kaynağa geri gönderilmektedir.



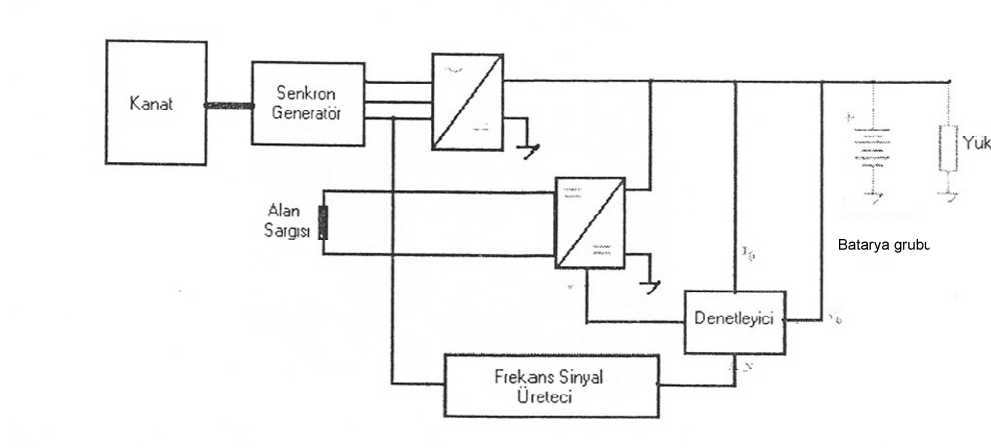
Şekil 6.3. Bilezikli asenkron generatörlü kayma enerjisi kontrolü dönüşüm sistemi

### 6.1.3. Değişken hız değişken frekans dönüşüm sistemleri (DHDF)

Üretilen enerjinin enterkonnekte şebekeye bağlanması zorunluluğu olmayan sistemlerde kullanılır. Bu tür sistemlerde genel olarak kapasitör yardımıyla kendinden uyarımlı asenkron generatörler, alan sargılı senkron generatörler veya sabit mıknatıslı alternatörler kullanılır. Generatör çıkışları bir kontrollü a.a.-d.a. doğrultucu yardımıyla doğru akıma çevrilip batarya şarjında kullanılabilir.

Kontrol edilmesi gereken parametreler, çıkış gerilim seviyesi olup değişen rüzgar hızı şartlarına göre uyarımı sağlayan asenkron generatörün mıknatıslama akımını sağlayan kapasitörlerin değerinin denetlenmesi gerekir. Alan sargılı senkron generatörlerde hem ikaz akımı hem de kontrollü a.a.-d.a. doğrultucu yardımıyla çıkış gerilimi denetlenebilir.

Şekil 6.4'te gösterilen sistemde rüzgar hızının aşırı yükseldiği durumlarda türbini korumak amacıyla kanat aralık açısı değiştirilmektedir. Bu sistemde çıkış gücü kontrol değişkeni olarak kullanılmaktadır.



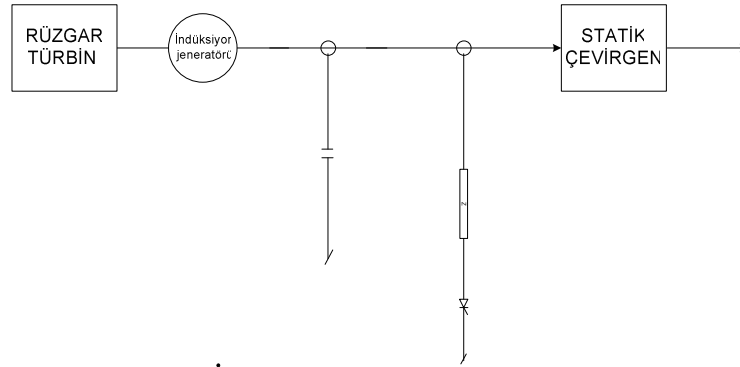
Şekil 6.4. Senkron generatör alan sargısı kontrolü DHDF dönüşüm sistemi

Buna göre sistemin dinamik denklemi şöyledir;

$$j\omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} = P_1(\omega_1) - P_m(\omega_1) \quad [6.6]$$

Buradan da görüleceği gibi, rüzgar hızı arttıkça  $j\omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} > 0$  olur ve türbin daha fazla güç üretmeye başlar. Benzer şekilde rüzgar hızı azaldıkça  $j\omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} < 0$  olur ve türbin gücü düşer. Buna göre batarya ve yükün güç ihtiyacına bağlı olarak d.a referans akımı ayarlanır. Böylece sistemin maksimum güç veya gerilim/akım kontrolü altında çalışması sağlanır. Şekil 6.5'te gösterilen sistemde ise generatör olarak sincap kafesli

asenكرون makinası kullanılmakta olup, generatörün uyardımı terminallerine bağlanan uyardım kapasitörleriyle gerçekleştirilmektedir. Generatör çıkışı bir kontrollü a.a-d.a. çevirici yardımıyla d.a. forma çevrilmektedir.



Şekil 6.5. Kapasitör uyardımlı asenkron jeneratörlü dönüşüm sistemi (47).

## 6.2. Üç Fazlı PWM İnverter Kullanarak Yüklerin Beslenmesi

Şekil 6.6 'da, rüzgardan elektrik enerjisi üretiminin blok diyagramı görülmektedir. Rüzgar hızı ile türbin harekete geçmekte ve üç fazlı elektrik enerjisi üretilmektedir. Üretilen güç; rüzgar hızı, türbin sayısı, türbin verimi gibi parametrelere bağlıdır. Bu durum aşağıdaki formülle belirtilmiştir.

$$P_{wd} = (P_L + P_B) / (n_w + \mu_w) \quad [6.7]$$

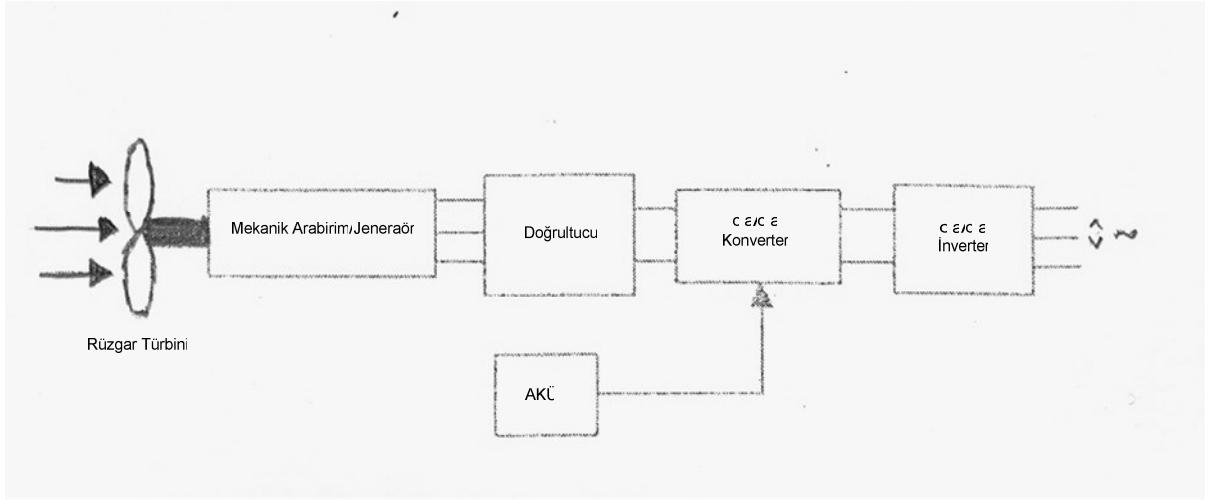
$P_{wd}$  : Rüzgar türbininden elde edilen güç

$P_L$  : Yükün gücü

$P_B$  : Akü gücü

$n_w$  : Rüzgar türbini sayısı

$\mu_w$  : Rüzgar türbini verimi



Şekil 6.6. Rüzgardan elektrik enerjisi üretiminin blok diyagramı

Rüzgar hızı, sürekli olarak değişse bile, d.a./d.a. konverter ve inverter yardımıyla 3 fazlı sabit frekanslı a.a çıkış elde etmek mümkündür. Akü grubu ile sistem desteklenmekte ve yükün enerjisiz kalması önlenmektedir.

Rüzgar türbininin ürettiği üç fazlı a.a gerilimi doğrultmak için a.a/d.a. doğrultucu ve bu d.a. gerilimi invertere uygulamak için bir d.a./d.a. konvertör kullanılmıştır. Sürekli yükün beslenebilmesi için, sistem bir akü grubuyla desteklenmiştir. d.a./d.a. dönüştürücünden sonra, inverter katında altı adet IGBT anahtar ve çıkışta LC filtre devresi kullanılarak d.a. gerilimden 4 telli 3 faz elde edilmiştir (48).

Kontrol birimi; rüzgar türbinini, akü grubunu, d.a./d.a konvertörü, d.a./a.a. invertörü kontrol etmektedir. Böylece sistem, bir veya üç fazlı olarak, yükü besleyecek şekilde kullanılabilir.

### 6.2.1. D.a/d.a konverter devresi

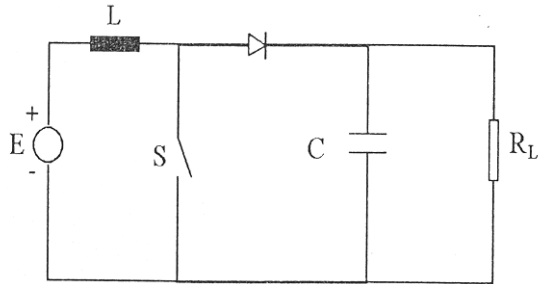
Sabit frekans ve gerilimde enerji üretiminin sağlanabilmesi için rüzgar türbininin ürettiği gerilimin önce doğru akıma dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla da, bir doğrultucu ve bir konvertör devresi kullanır. Türbinden elde edilen 3 fazlı a.a. gerilim ilk önce doğrultucuya verilmekte, ardından gerekli frekans ve gerilim

değerinin elde edilebilmesi için d.a./d.a. konvertöre girmektedir. Burada istenilen d.a. gerilim değeri elde edildikten sonra, inverter vasıtasıyla istenilen 1 veya 3 fazlı çıkış değeri elde edilebilmektedir (49).

Şekil 6.7'de, bir Boost konvertör devresi görülmektedir. Bu devrede kullanılan yarıiletken S anahtarına istenilen frekansta açma-kapama yaptırılabilir. Anahtar iletimde iken ( $T_{ON}$ ), L indüktansında enerji depo edilir. Anahtar açıldığında L üzerindeki enerji yüke ve kondansatöre aktarılır. Devredeki diyot, anahtar kapalıyken kondansatörün deşarj olmasını önler. Anahtarın yalıtımda olduğu süre  $T_{OFF}$  olmak üzere çıkış gerilimi;

$$V_Y = E \cdot (T_{ON} + T_{OFF}) / T_{OFF} \quad [6.8]$$

şeklinde verilebilir.

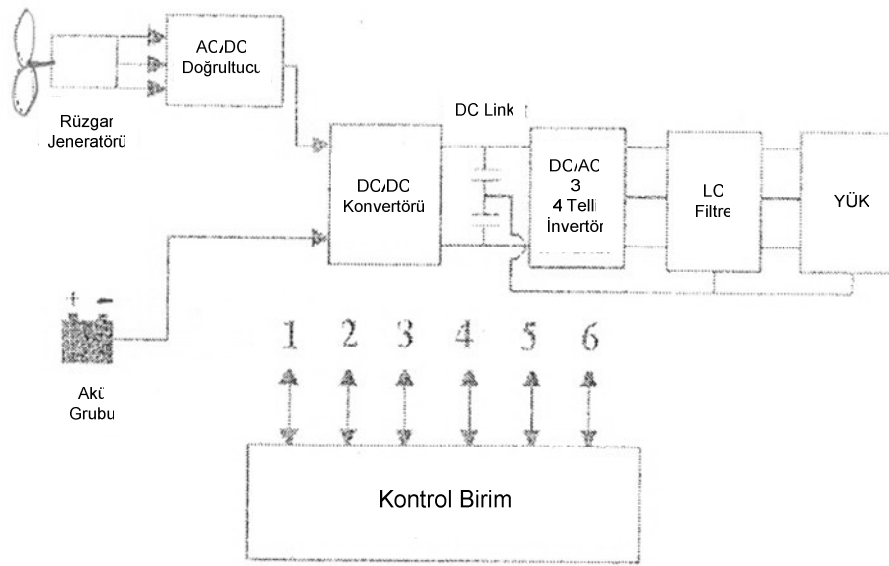


Şekil 6.7. d.a/d.a boost konverter devresi

Boost konverter, rüzgar türbininin ürettiği ve rüzgar hızına bağlı olarak değeri sürekli olarak değişen a.a. gerilimin istenilen gerilim değeri ve frekansa inverter tarafından dönüştürülebilmesi için, üretilen bu a.a. sinyali gerekli d.a. değerine dönüştürür. Inverter bu şekilde girişine gelen d.a. sinyali, istenilen gerilim değeri ve frekansta a.a. 'ya dönüştürebilir. Akü grubu da uygun anahtarlama yapıldığı takdirde, bu konverterler üzerinden şarj olur, aynı zamanda yine bu konverterler üzerinden yükü besleyebilir.

### 6.2.2. Üç fazlı dört telli PWM inverter

Şekil 6.8'deki sistemin amacı, istenilen sabit frekans ve gerilim değerinde bir ve üç fazlı yükleri beslemektir. Bunun için d.a./d.a. konvertörlerden elde edilen sabit d.a. gerilim, d.a.. link kapasitelerine uygulanmış, bu kapasitelerin orta noktasından alınan bir uç, LC çıkış filtresi ve yüke bağlanırken, diğer uçlar PWM invertere giriş olarak verilmiştir. PWM invertere uygulanan d.a. gerilim, İnverterde üç faza dönüştürülerek sabit frekanslı, sinüzoidal a.a. gerilim elde edilmiştir. LC filtresi vasıtasıyla inverter çıkışındaki parazitler elimine edilir. Çıkışta üç fazlı, dört telli, sabit frekanslı a.a. gerilim elde edilir. Elde edilen bu gerilim ile hem bir, hem de üç fazlı yükler beslenebilir (50).



Şekil 6.8. Rüzgar enerji sistemi ve kontrol birimi

PWM tekniğinde, darbe (pulse) boşlukları korunmak şartıyla, darbe genişlikleri değiştirilerek çıkış ana dalgasının temel bileşeni değiştirilir (51).

İnverterdeki altı adet IGBT, istenilen dalga şeklini üretmek için periyodik olarak açılır ve kapanır. Anahtarlamamanın durumu kontrol edilerek çıkış gerilim ve frekans

değeri belirlenebilir. Kullanılan inverter, DC Link üzerinden beslendiğinden gerilim, kaynaklı inverter olarak da tanımlanabilir (52).

### **6.3. Rüzgar Türbin Generatörlerinde Dengesiz Gerilim Problemi**

Rüzgar türbinlerini kırsal bölgedeki uzun iletim hatlarının sonunda kullanmak doğru olmaz. Yük dağılımının yanlış ve dengesiz olarak yapıldığı bir şebeke, asenkron generatörlü bir rüzgar santraliyle beslenirse, dengesiz yüklenmeler sonucu ciddi problemler ortaya çıkar.

Asenkron ve senkron makinaların dengesiz işletilmesi ısı problemi ve verim kaybını ortaya çıkarır. Dengesiz işletmenin asıl sebebi, sistemdeki tek faz yüklerin 3 fazlı yüklere dengeli olarak dağıtılmamasıdır. Bu özellikle, uzun dağıtım hatlarına ve rüzgar türbinleriyle sürülen asenkron jeneratörlerine sahip olan kırsal elektrik güç sistemlerinde olur.

Büyük santraller iyi dengelenmiş gerilim kaynağı olabilirler. Fakat tek fazlı yükler, üç faza dengeli olarak dağıtılmadığı takdirde dengesiz durumlar ortaya çıkabilir. Simetrik olmayan transformatör, iletim empedansları, iletim hatlarındaki dengesiz yükler ve daha bir çok sebepler dengesiz gerilim hallerine sebep olabilir (52).

## **7. SENKRON MAKİNALI ENERCON E-40 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ÖZELLİKLERİ**

Bu bölümde Enercon E-40 rüzgar türbinine ait özellikler hakkında bilgi Demirer Holding'den sağlanmıştır. Enercon E48 ve Dewind D48 bilgileri ise Enercon ve Dewind firmalarının web sayfalarından alınmıştır.

E40 modeli, tüm dünyada tercih edilen bir model olup, 1992'den beri bu model türbinler aktif olarak çalışmaktadır. Aynı zamanda Türkiye'nin alt yapısına en uygun olan türbin modeli olup, kule ve kanat yapıları ülkemizde üretilmektedir. Ayrıca şu anda ülkemizde faaliyette olan 4 rüzgar santralinden 3'ünde ( İzmir-Alaçatı, Çanakkale-Bozcaada ve İstanbul-Çatalca ) Enercon E-40 kullanılmıştır.

### **7.1. 600 KW Senkron Makinalı Enercon E-40 Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Prensibi**

600 kW makinalar en az 44 metre yükseklikte çelik bir kule üzerine yerleştirilmiştir. Generatör mili, arada her hangi bir kavrama veya dişli düzeni olmaktan doğrudan kompozit malzemeden imal edilmiş üç kanada bağlanmıştır. Generatörün açısal hızı, kanatların dönme hızına eşittir. Bu açısal hız, rüzgar hızına bağlı olarak, 18 devir/dakika ile 38 devir/dakika arasında değişmektedir. Halbuki senkron veya asenkron makinalarda bu hız sabit ve makina kutup sayısına bağlı olarak 1800 devir/dakika kadar yüksek değerlere çıkabilmektedir. Düşük devirli makina kullanılarak yüksek devirlerin sonucu mekanik zorlanma ve aşınmalar en aza indirgenmekte ve bakımı kolay, uzun ömürlü makinalar elde edilmiştir.

Türbin ile generatör arasına generatör hızını, dolayısı ile üretilen gerilimin frekansını ayarlamak amacı ile ara bir dişli ve kavrama konmamasının sebebi, dişlilerin getireceği ilave ağırlık ve kayıplardan kaçınmaktır. Böylece aşınma, yağlama ve bakım gibi sorunlar baştan önlenmiş, bakım ve tamir süreleri de en aza indirilmiştir. Ayrıca, durma süresinin kısalığı, enerjinin kesintisiz verilmesini sağlamaktadır

Generatörün doğrudan kanatlara bağlı olması türbinin ve dolayısı ile generatörün hızının değişken olmasını gerektirir. Değişken devir kullanılmasının amacı, rüzgar enerjisini verimli kullanmaktır. Bu da üretilen frekansın değişken olması anlamına gelir. Bu değişken frekanstaki gerilim ilk önce doğrultulur. Şebekeye sabit frekanslı güç aktarmak için aşağıda da görüleceği gibi bu iş için hazırlanmış bir yazılım ile desteklenen ve güç devreleri için özel olarak geliştirilmiş IGBT olarak adlandırılan güç transistörlerinin kullanıldığı güç elektroniği devresi kullanılmaktadır.

Kullanım düzenini; değişken frekanlı alternatif gerilim » doğru gerilim » 50 Hz alternatif gerilim olarak özetlemek mümkündür.

Şebekeye verilen akım, gerilim ile aynı fazdadır. Ancak şebeke durumu ve ihtiyacına göre, yazılıma gerekli komutlar verilerek faz açısı  $\cos \phi \pm 0,94$  olacak şekilde ayarlanabilir.

#### **7.1.1. Generatörün gerilim üretmesi**

Enercon E-40 rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerin temel yapısal özellikleri şöyledir.

*Stator:* Birbiri arasında  $30^\circ$  elektrik açısı olan ve her birinin gücü 300 kW olan yıldız bağlı iki ayrı sargı bulundurmaktadır. Kutup sayısı 48'dir.

*Rotor:* Bilezikli yapıda olup dıştan uyarmalıdır.

Bütün çalışma koşulları yerine geldiğinde, yazılım güç elektroniği devresini çalıştırarak şebekeden, rotor ikaz akımını çekmeye başlar. Rotor uyarma akımı tam yükte 40 A'dır. Diğer taraftan şebeke gerilimine göre daha önce ayarlanan faz açısına bağlı olarak bir reaktif enerji de şebekeye verilebilir.

Generatör uçlarında üretilen gerilimin frekansı sabit değildir. Oysa şebeke ile paralel çalışmanın sağlanması için 50 Hz sabit frekans gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek

için, ilk önce generatör gerilimi doğrultulur. Güç elektroniği devresinde kullanılan tranzistörlerin gücü sınırlı olduğu için, generatörün gücü de elektroniği devresinin güç iletim yeteneğine bağlı olarak ikiye bölünmüştür. Generatörün statorunda aralarında  $30^\circ$  elektrik açısı olan iki sargı bulunmasının sebebi budur.

### 7.1.2. Güç üretme ve şebekeye paralel bağlanma

Gerilim üretmeye başlayan generatör ilk önce birinci sargıyı devreye sokar. Burada dikkat edilmesi gereken iki ana nokta bulunmaktadır.

1. Sargının devreye sokulması kesici, kontaktör gibi alışlagelmiş bir mekanik düzen ile değil, IGBT güç transistörlerinin tetiklenmesi ile olmaktadır. Bunun sonucunda iletilen güç yavaş yavaş artar.
2. Güç elektroniği devresi düşünüldüğü gibi bir gerilim üretmemektedir. Generatör tarafından üretilen 400 V ve 20-40 Hz aralığında bir frekanstaki gerilimi önce doğrultup, daha sonra uçlarında 400 V olan trafonun üzerine, rüzgar hızına bağlı olarak, 50 Hz frekansta akım olarak iletmekte olup, uçlarında 400 V olan bir trafo üzerinden devresini tamamlayan bir akım kaynağı olarak davranmaktadır. Dolayısı ile bütün kontrol ve ayarlar, trafonun uçlarındaki 400 V gerilimin şebeke tarafından sağlanmasına ve trafo sargılarına güç elektroniğinin verdiği akıma göre yapılmaktadır. 400 V gerilim olmaması, bir diğer deyişle şebeke geriliminin kesilmesi veya herhangi bir nedenle düşmesi, transistörlerin tetiklenmesinin kesilmesine ve güç iletiminin durmasına neden olmaktadır.

Bu durumda, rüzgar türbini, generatörün uyarmasının sağlanmasında ve trafonun boşta çalışmasında, ürettiği güce bakılmaksızın, bir tüketici gibi davranmaktadır.

Çalışma koşullarının uygun olması durumu devam ettikçe güç iletimi devam eder. İlk önce birinci sargı şebekeye 10 kW/sn bir artışla güç vermeye başlar. Üretilen güç 100 kW olunca da, yazılım kendiliğinden şebekeye iletilen güç artışını 40 kW/sn'ye çıkarır ve en büyük güce kadar da böyle devam eder.

Statordaki ikinci sargının devreye girmesi rotor hızının 18 devir/dakika olması ile gerçekleşir.

### 7.1.3. Gerilim ve frekans ayarı

Şebeke gerilimi ve frekansı sürekli geri beslemeli olarak izlendiği için, E-40 türbini şebekedeki dalgalanmaları her an izlemekte ve şebekeye verilen gücü de aynı hızda ve oranda ayarlamaktadır. Diğer bir deyişle, enerji talebi neyse şebekeye verilen güç de odur. Buna göre, şebekeden güç istenmediği durumlarda rüzgar türbinlerinin durdurulmasına gerek yoktur.

Şebekeye verilen güç, akım darbe modülasyonu ile yapıldığı için akım ve gerilim eğrilerinin şekli transistörlerin tetikleme hızına bağlı olarak değişmektedir. Gerilim eğrilerinin şekli 50 Hz temel bileşen üzerinde her biri farklı frekansa karşı düşen yüksek frekanslı eğrilerin toplamı olmaktadır.

Bu yüksek ve değişken frekanslı akım ve gerilimlerin değerleri yazılım tarafından sınırlanan belli aralıklar arasındadır. Güç elektroniği devresindeki uygun filtrelerden başka trafo empedansı ve şebekenin kapasiteleri, yüksek frekanslı bileşenleri bastırarak orta gerilim barasında temiz bir sinüs eğrisi elde edilmesini sağlamaktadırlar. Esasen, tek bir türbin için bile şebekeler tarafından kabul edilebilir sınırlar içinde kalan yüksek frekanslı bileşenler çok farklı değerlerde olduklarından özellikle türbin sayısı çoğaldıkça azalmaktadır.

### 7.1.4. Reaktif güç ayarı

Akım ve gerilim arasındaki faz açısı ( $\cos\phi$ ) yazılıma girilerek bir değere ayarlanabilir. Eğer böyle bir değer girilmez ise E-40 türbini otomatik olarak kendisini  $\cos\phi = 1$  değerine ayarlar. Bu durumda şebekeye yalnız aktif güç verilir ve 0 ile 600 kW arası  $\cos\phi$  değeri 1 değerinde sabit tutulmaktadır. Akımın hem aktif hem de reaktif bileşeni aynı anda kontrol edildiği için güç katsayısını 0,94 endüktif ve 0,94 kapasitif arasında sabit bir değere ayarlamak mümkündür. Deneyisel olarak

da 1 yıl boyunca yapılan ölçü sonuçları bu durumu doğrulamaktadır.

#### **7.1.5. Devreden çıkma**

E-40 rüzgar türbininin devreden çıkması da yine güç elektroniği devresindeki IGBT tranzistörlerinin tetiklenmesinin kesilmesi ile olmaktadır. Her iki stator sargısı da aynı anda devreden çıkmaktadır.

Burada tekrar vurgulanması gereken nokta anahtarlamamanın bilinen mekanik cihazlar ile değil de, güç elektroniği devresi aracılığı ile yapılmasıdır. Bu anahtarlamada, şebekeye verilen akım, dolayısı ile güç aniden değil, anahtarlamamanın türüne göre değişen bir hızda olmak üzere, yavaş yavaş kesilmektedir. Bunun sonucunda, aynen devreye girerken olduğu gibi, şebekeden ayrılma da darbesiz ve son derece yumuşak bir şekilde olmaktadır.

#### **7.1.6. Kısa devre**

E-40 ın kontrol düzeni, şebekeye verilen akımı transistörlerin ateşleme periyodu aralığı kadar sıklıkla denetlemekte ve akım, anma akımını %5 aşınca zaten sınırlamaktadır. Buna göre kısa devre durumunda en çok 10 ms içinde transistörlerin ateşlerini durdurularak generatör şebekeden ayrılmaktadır. Tetikleme sıklığı kHz mertebesinde olan transistörlerin 10 ms ( $= 1/2$  periyot) kadar uzun .süreyi beklemelerinin nedeni, akımın doğal sıfırını bekleyerek, şebekede hiç bir aşırıgerilime neden olmamaktır. 10 ms süre en uzun kesme süresidir. Kısa devrenin başlangıç anına göre bu süre 10 ms ( $1/2$  periyot) olabilmektedir.

#### **7.1.7. Şebekeye bağlanma**

E-40 rüzgar türbini şebekeye trafolar aracılığı ile bağlanmaktadır. Trafo boşa çalışma kayıpları ve bakır kayıpları göz önüne alınarak, verimli bir işletme için trafo gücü, rüzgar türbini gücünden yaklaşık % 15 kadar fazla tercih edilmektedir.

Trafo ve hat koruma, şebeke işleticisinin kurallarına uygun olarak, sekonder röle ve sigortalar ile yapılmaktadır.

Bu koruma, arızanın hat tarafından beslenmesi yönünde çalışmakta ve trafoyu korumaktadır. Arızanın türbin tarafında beslenmesi yönünde, korumalar güç elektroniği devresindeki yazılım tarafından yapılmakta ve transistörlerin iletimi 10 ms'den kısa sürelerde kesilmektedir. Bu hızda bir koruma, sekonder korumalı bir sisteminkinden 10 kat daha az sürmektedir.

Trafo korumada, aşırı akım, sıcaklık artışı ve Buccholz korumaları yapılmaktadır.

Hat korumasındaki esas amaç, arızanın şebekeden beslenmesine karşıdır. Çünkü rüzgar türbinine ait akım kaynağı transistörler, akımları % 5 artınca iletimi kesmektedirler.

## **7.2. Enercon E-40 Modeli Ana Teçhizata Ait Tanıtıcı Bilgiler ve Teknik Karakteristikler**

### **7.2.1. Makina Tipi : E-40**

|                       |   |        |
|-----------------------|---|--------|
| Anma gücü             | : | 600 kW |
| Rotor çapı            | : | 44 m   |
| Rotor mili yüksekliği | : | 46 m   |

### **7.2.2. İşletme verileri**

*Rüzgar hızı*

|           |   |                               |
|-----------|---|-------------------------------|
| Alt sınır | : | 2,5 m/s                       |
| Anma      | : | 12,5 m/s                      |
| Duruş     | : | 25 m/s (ortalama 10 dakikada) |
| Ani duruş | : | 30 m/s (tepe değeri)          |

### *Rotor hızı*

Çalışma aralığı: 18 - 38 devir/dakika

### *Kanat ayar hızı*

Nominal çalışmada : 0 - 11 derece/sn

Acil duruş : 11 derece/sn

Sapma ayar hızı: 45 derece/dakika

Acil duruşun tepki süresi : 0,2 sn

### *Dayanabileceği en yüksek hız değerleri*

Mil yüksekliğinde 5 saniye süreli rüzgar darbesi: 70 m/s

Güvenlik katsayısı yükleme için : 1,5

Güvenlik katsayısı malzeme için : 1,1

### *Rotor*

Tip: Rüzgara karşı etkin hatve kontrollu rotor

Kanat sayısı : 3

Kanat malzemesi: GRP / epoksi reçine

Süpüme alanı : 1.520,5 m<sup>2</sup>

Hız: Değişken, 18 - 38 devir/dakika

Kanat: Her kanat için kesintisiz güç kaynaklı bağımsız kontrol düzeni

Yıldırımdan korunma: Her kanatta Enercon yıldırım iletkeni bulunmaktadır.

Kanat uzunluğu : 22 m

### *Generatör*

Tip: Senkron

Üretici. : Enercon

Anma gücü: 600 kW

En büyük güç: 610 kW

Anma akımı: 2x435 A

Anma frekansı : 50/60 Hz

Yalıtım seviyesi: F sınıfı (155° C)

Soğutma yöntemi : Doğal hava soğutma

Maksimum işletme sıcaklığı : 105°C

Stator termistörlerinde en yüksek ayar sıcaklığı: 155°C

### *Tahrik düzeni*

Mil: Rijit

Generatör: Rotoru doğrudan akuple

Şebekeye bağlantı : Enercon doğrultucu-evirici ile sinüsoidal akım

( Yol almada darbe akımları oluşmaz. )

Frenleme düzenekleri : Birbirinden bağımsız 3 adet kanat hat ve kontrol sistemi

- rotor kanadı

- her 30° de kilitleyerek rotor kilitlemektedir.

Sapma kontrol : Çalışma: Ayar dişlisi aracılığı ile olmaktadır.

Amortisman : Sürtünme rulmanları aracılığı ile olmaktadır.

### *Kule*

Yükseklik: 44m

Tip:Konik çelik kule, birbirine eklenen 2 parçalı

### *Mil yüksekliğinde gürültü seviyesi*

Koşullar: 10 m yükseklikte 8 m/s rüzgar hızı

44 m yükseklikte : 98,3 dB(A) ölçülen değer

50 m yükseklikte : 98,6 dB(A) ölçülen değer

65 m yükseklikte : 99,3 dB(A) hesaplanan değer

*Çalışma için sıcaklık sınırları*

Sıcaklık aralığı: 20°C ile + 50°C arası

*Duruş ve tekrar yol alma karakteristikleri*

Yol alma: 2,5 m/sn rüzgar hızında olmaktadır.

Üretilen en küçük güç: 2,5 m/sn rüzgar hızında olmaktadır.

Üretilen en büyük güç: 12,5 ile 25 m/s arasında olmaktadır.

Duruş: 25 m/sn rüzgar hızında olmaktadır.

Tekrar yol alma kriteri : 0-25 m/s rüzgar hızında

Generatörün tam güç vermesi : 13 m/sn olmaktadır.

*Tahmini ömür*

Asgari ömür: 25 - 30 yıl

Ortalama rüzgar hızı : Mil yüksekliğinde 10 m/s

Rüzgar dağılımı: 11,28 m/sn parametresi ve 2,0 şekil faktörü ile Weibull dağılımı

Dayanabileceği rüzgar hızı: Mil yüksekliğinde 70m/s rüzgar hızında 5 s'lik darbe  
olmaktadır.

Türbülans şiddeti : 0,2

Yük Çevrimi:  $9,5 \times 10^8$  (Kanatlar)

*Rüzgar hızına bağlı olarak çekilebilecek güçler*

Rüzgar hızına bağlı olarak çekilebilecek güçler aşağıdaki meteorolojik koşullar altında çıkarılmıştır.

Basınç: 1013,3 mbar

Sıcaklık: 15° C

Hava yoğunluğu :  $1,225 \text{ kg/m}^3$

Çizelge 7.1. Rüzgar hızına bağlı olarak hesaplanmış üretilebilecek güçleri

| Rüzgar hızı (m/sn) | Güç (kW) |
|--------------------|----------|
| 1                  | 0,0      |
| 2,5                | 0,5      |
| 3,1                | 1,7      |
| 3,5                | 6,8      |
| 4,0                | 14,7     |
| 4,5                | 26,9     |
| 5,0                | 40,8     |
| 5,5                | 58,1     |
| 6,0                | 79,6     |
| 6,5                | 104,0    |
| 7,0                | 134,8    |
| 7,5                | 171,8    |
| 8,0                | 207,1    |
| 8,5                | 246,6    |
| 9,0                | 292,6    |
| 9,5                | 357,0    |
| 10,0               | 403,4    |
| 10,5               | 460,8    |
| 11,1               | 508,1    |
| 11,5               | 535,6    |
| 11,9               | 554,6    |
| 12,5               | 604,8    |
| 13                 | 613,2    |

### 7.2.3. Şebeke ile Bağlantı

#### *Şebeke geriliminin kontrolü*

Aşırı gerilim ( adım genişliği = 1 V ) : % 100 = 230 V en küçük kontrol değeri

% 106 = 245 V anma değeri

% 115 ==265 V en büyük kontrol değeri

Düşük gerilim ( adım genişliği = 1 V ): %100 = 230 V en büyük kontrol değeri

%91 = 207 V anma değeri

% 70 = 160 V en küçük kontrol değeri

Açma zamanı: 100 ms

#### *Frekans kontrolü*

Frekans artışı ( adım genişliği = 0,05 Hz ) : 50,0 Hz = en küçük kontrol değeri

50,4 Hz = anma değeri

57,0 Hz = en büyük kontrol değeri

Frekans düşmesi ( adım genişliği = 0,05 Hz ): 50,0 Hz = en büyük kontrol değeri

49,6 Hz = anma değeri

43,0 = en küçük kontrol değeri

Açma zamanı :100 ms

#### *Cos $\phi$ ayar aralığı*

Sabit: 1 (bütün güç değerleri için)

Değişken : 0,94 kapasitif ile 0,94 endüktif arası

### 7.3. Enercon E48 Türbin Modeli ile Dewind D48 Türbin Modelinin Karşılaştırılması

Hala ülkemizde kullanılmakta olan Enercon E40 model rüzgar türbinleri Enercon firması tarafından üretimden kaldırılarak aynı tipte Enercon E48 modelinin üretimi başlamıştır. Bu bölümde, teknolojinin gelişmesiyle birlikte teknik özellikleri E40 modelinden daha üstün olan Enercon E48 modeli ile aynı rotor çapına sahip Dewind firmasına ait Dewind D48 rüzgar türbinleri karşılanılmıştır (53-54).

Çizelge 7.2. Enercon E48 model rüzgar türbini ile Dewind D48 model rüzgar türbinin karşılaştırılması

| Model                  | Enercon E-48                       | Dewind D-48                 |
|------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Rotor çapı             | 48 m                               | 48 m                        |
| Anma gücü              | 800 kW                             | 600 kW                      |
| Kanat sayısı           | 3                                  | 3                           |
| Rotor mili yüksekliği  | 50-56-66-76 m                      | 70 m                        |
| Süpürme alanı          | 1,810 m <sup>2</sup>               | 1,808 m <sup>2</sup>        |
| Rüzgar hızı alt sınırı | 3 m/sn                             | 2,5 m/sn                    |
| Rüzgar anma hızı       | 13 m/sn                            | 11,5 m/sn                   |
| Ani duruş              | 28 - 34 m/s                        | 19 m/sn                     |
| En büyük güç           | 810 kW                             | 600 kW                      |
| Kule tipi              | Konik çelik kule, 2 veya 3 parçalı | Konik çelik kule, 2 parçalı |
| Generatör tipi         | senkron                            | asenkron                    |
| Uzaktan kumanda        | Scada                              | Scada                       |

Çizelge 7.3. Enercon E48 ve Dewind D48 rüzgar türbinlerinin rüzgar hızına bağlı olarak hesaplanmış üretilebilecekleri güçleri

|                    | Enercon E48 | Dewind D48 |
|--------------------|-------------|------------|
| Rüzgar hızı (m/sn) | Güç (kW)    | Güç (kW)   |
| 1                  | 0           | 0          |
| 2                  | 2           | 0          |
| 3                  | 12          | 0          |
| 4                  | 32          | 7          |
| 5                  | 66          | 22         |
| 6                  | 120         | 52         |
| 7                  | 191         | 93         |
| 8                  | 284         | 158        |
| 9                  | 405         | 244        |
| 10                 | 555         | 354        |
| 11                 | 671         | 489        |
| 12                 | 750         | 590        |
| 13                 | 790         | 600        |
| 14                 | 810         | 600        |
| 15                 | 810         | 600        |
| 16                 | 810         | 600        |
| 17                 | 810         | 600        |
| 18                 | 810         | 600        |
| 19                 | 810         | 600        |

Çizelgelerde de görüldüğü gibi aynı sınıfa ait iki rüzgar türbininden Enercon E48 model rüzgar türbini, Dewind D48 rüzgar türbini ile aynı rotor çapına sahip olmasına rağmen aynı rüzgar hızlarında daha fazla güç üretmektedir. Aynı zamanda Enercon E48 modelinin senkron generatör tipine sahip olması ve kule tipinin iki veya üç

parçadan oluşabilmesi diğer modele göre avantaj sağlamaktadır. Kule yüksekliğinin 56-76 m aralığında olması bu türbin modelinin farklı yerlerde kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Sonuç olarak; rüzgar santralinin kurulacağı yerin tespitinin iyi bir şekilde yapılarak bölgenin şartlarına en uygun tipte rüzgar türbinin seçilmesidir.

## 8. SONUÇLAR

Rüzgar enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi insanlığın gelecekte büyük ölçekte kullanmayı tasarladığı, çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Yeni enerji kaynakları arayışı çalışmalarında öncelikli bir yeri vardır. Bunun nedeni tükenmez, temiz ve ekonomik olmasıdır.

Dünyanın geleceğinin, yeni ve yenilenebilir yani temiz enerji kaynaklarında olduğu açıktır. Ancak tüm ihtiyaçların rüzgar gücü ile sağlanması mümkün değildir. Bu yüzden rüzgar enerjisi başlı başına bir çözüm olmaktan ziyade enerji çeşitliliği içinde yerini almış bir enerji kaynağı olacaktır. Ancak yararları düşünüldüğünde rüzgar enerjisinin gelişmesinde özellikle çevreye zarar vermemesinin etken olacağı muhakkaktır.

Kalkınmakta ve nüfusu hızla artan bir ülke olan Türkiye'nin büyük bir hızla elektrik tüketimi artmaktadır. Bu yüzden tıpkı kalkınmakta olan diğer ülkeler gibi Türkiye'nin de yeterli elektrik enerjisine şiddetle ihtiyacı vardır.

Türkiye'de son yıllarda gittikçe artan enerji darboğazı, üretimin sabit kalması ya da çok az artması, tüketimin ise çok büyük bir hızla artması karşısında, gelecekte de büyüyecek bir sorun olarak karşımızda durmaktadır. Bu durum karşısında ülkemizin doğal kaynaklarından yararlanarak alternatif enerji sistemlerinin uygulanması, soruna genel ve kesin olmayan, ancak gelecek için umut verici bir çözüm olması nedeniyle gün geçtikçe artan bir önem kazanmaktadır. Bu enerji kaynaklarından rüzgar, ülkemizde de çok iyi değerlere sahip, sınırsız, temiz, çevreyi kirletmeyen bir enerji kaynağı olması dolayısıyla öne çıkmaktadır.

Ülkemizde henüz çok yeni ve tanınmamış bir kaynak olan rüzgar enerjisinin tanıtımı ve yaygınlaştırılması için konuyla ilgili tüm kişi, kuruluş ve örgütler ile medyaya ve devlete de büyük iş düşmektedir. Özellikle yerli kaynak, malzeme, teknik bilgi ve işgücü kullanılarak üretilecek türbinler, iç pazarda olduğu kadar dış pazarlarda da rekabet edebilecek düzeyde olacaktır. Yakın gelecekte bu tip çalışmaların artmasıyla,

büyük yerleşim birimlerinin elektriğini sağlayan, büyük türbinlerden oluşan rüzgar çiftliklerinin kurulması, Türkiye'nin enerji darboğazından kendi çabalarıyla kurtulup enerji ihraç eden bir ülke konumuna gelmesine yardımcı olacaktır.

Şu anda Türkiye'de işletmede bulunan ve şebeke bağlantılı rüzgar santrali kurulu gücü 20 MW'tır. 2004 yılında tüketime sunulan üretimin 61,6 milyon kWh'ı rüzgar kaynağından karşılanmıştır. Şebekeye bağlantılı rüzgar santralleri dışında Yap-İşlet-Devret modeli ile ETKB tarafından değerlendirilen 30'un üzerinde rüzgar çiftliği projesi bulunmaktadır. Bu projelerin kapasiteleri 1370 ile 1440 MW'tır.

Dünya yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Rüzgar enerjisi de gün geçtikçe daha fazla ilgi çekmektedir. Teknolojinin hızla geliştiği göz önüne alındığında 80'li yılların türbinleri şimdi çok küçük güçte kaldıysa da bugünün son teknolojileri de bundan bir süre sonra yerini daha büyük güçte türbinlere bırakacaktır. Uygun şartlardaki yerlere rüzgar santralleri kurulabilecek ve bunlardan elde edilen elektriğin enterkonnekte şebekeye verilmesi ile de temiz bir enerji elde edilebilecektir.

Bu çalışmada rüzgar enerjisi hakkında genel bilgiler ortaya konularak, Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Politikaları ve Enterkonnekte Sistemlere Entegrasyonu araştırılmış olup, bağlantı aşamasında karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri ile rüzgar türbinlerinin şebekeye katkıları ve faydaları incelenmiştir.

## 8.1. ÖNERİLER

İletim Sistemlerine artan miktarlarda rüzgar santrallerinin bağlanması nedeniyle ortaya çıkan sorunların çözülmesi, elektriğin arz güvenliği ve kalite kriterlerinin sağlanabilmesi için rüzgar türbinlerinin arıza ve arıza sonrasında uyması gereken kriterler UCTE iletim Sistem İşletmecileri tarafından incelenmekte ve İletim Şebeke Yönetmeliklerine ilave edilmektedir. Temel prensip, şebeke işletmesinde sistemin her türlü gereksinimini karşılayan konvansiyonel üretim santrallerine benzer şekilde, rüzgar santrallerinin de sistem işletme güvenliğinin sağlanmasında gerekli bazı sorumlulukları taşımasıdır. Bu kapsamda, arıza veya sistem dengesizliklerinde,

üretim tesisleri tarafından sisteme güç sağlanarak destek verilmesi; reaktif güç sağlanarak gerilim kontrolünün sağlanması; sistem dengelenmesi ve frekans kontrolü için sisteme aktif güç verilmesinin sağlanması gibi konularda rüzgar santrallerinin sistem işletmesine katkıda bulunması gerekmektedir(46).

UCTE ve Kuzey Avrupa Elektrik Sistemleri içinde kalan ve elektrik tüketiminin yaklaşık %12,4'ü rüzgar santrallerinden karşılayan Danimarka'nın Almanya, İsveç ve Norveç'le güçlü enterkonneksiyon hatları bulunmakta ve bu blokların rezervlerini paylaşmaktadır. Güçlü blokların rezervlerinin paylaşılması neticesinde Danimarka sisteminin rezerv maliyeti artmamaktadır. Aynı şekilde UCTE sisteminde coğrafik olarak UCTE enterkonneksiyon ağının ortasında bulunan ve güçlü enterkonneksiyon hatlarıyla bağlantıları olan Almanya'nın da ortak rezerv paylaşımı imkanları vardır.

Türkiye Elektrik Sisteminin, 2007 yılında UCTE sistemi ile paralel çalıştırılması hedeflenmektedir. Ancak ülkemizin UCTE içindeki coğrafik konumunun Almanya'ninkinden farklı olduğunun dikkate alınması gerekmektedir. UCTE ile paralel çalışma başladığında bile elektrik sistemimiz sadece kuzeybatıdan enterkonnekte olacağından, UCTE sisteminin uç bölgesinde kalacak, çok yönlü enterkonneksiyon yapma fırsatına sahip olamayacaktır. Dolayısıyla rezerv paylaşımı açısından enterkonneksiyonun katkısı Almanya'da olduğu oranda Türkiye için gerçekleştiremeyecektir.

Özellikle Türkiye, İngiltere gibi UCTE enterkonneksiyon ağının ortasında olmayan ve güçlü enterkonneksiyon hatlarıyla bağlanarak senkron paralel çalışma imkanı bulunmayan ülkelerde, rüzgar santralleri ile yapılacak elektrik üretiminin kontrolsüzce artması durumunda, elektriğin arz güvenliği ve kalitesinin sağlanması için gereken sıcak yedek maliyeti, güçlü bir senkron blokla çalışmayan sistemlerde karşılanamaz derecede yükselmektedir. Ayrıca bu değişken üretim tesisleri, elektrik arz güvenliği ve kalitesinin sağlanamamasına neden olan çok önemli teknik sorunları da iletim sistemine yüklemektedir.

Rüzgar santrallerinin büyük çoğunluğu Asenkron Rüzgar Türbinlerine sahip olup,

bunlar gerilim regölasyonuna katkıda bulunmadıkları gibi, üretim yaparken ihtiyaç duydukları reaktif enerjiyi de şebekeden çekerek gerilim düşümüne neden olmaktadır. Türbin çıkışında 0,8-0,85 civarında olan güç faktörü alınacak kompanzasyon önlemleriyle daha yukarı seviyelere çıkarılabilmektedir. Reaktif enerji bakımından rüzgar santrallerinde enerji teslim noktasında istenecek güç faktörünün belirlenmesi gerekmektedir. Buradaki temel felsefe rüzgar santrallerinin şebekeden çekeceği reaktif enerjinin, dolayısıyla bu konuda sisteme vereceği rahatsızlığın minimuma indirilmesini sağlayacak düzenlemelerin yapılmasıdır. Rüzgar santrali projelerinin yoğunlaştığı bölgelerde, güç faktörünün mümkün olduğunca yüksek tutularak şebekenin rahatsız edilmemesi gerekmektedir. Bu nedenle bu santrallerinin güç faktörünün 0,99'dan az olmayacak şekilde kompanzasyon tesisleriyle birlikte yapılması gerekmektedir.

Enterkonnekte sisteme rüzgar santrallerinin bağlantısı da, bozucu etkiler kadar önemli diğer bir unsur olup; bağlantı noktalarında iletim kapasitesinin yetersiz kalabilmesidir. Rüzgar potansiyeli yerleşim merkezlerinden uzak bölgelerde olup bu bölgeler şebekenin zayıf olduğu noktalardır. İletim sistemi, bu bölgelere başka noktalardan bölgenin tüketimi kadar güç ve enerji taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır. Özellikle iletim sistemine büyük güçte rüzgar santrali bağlantısı durumunda üretilecek elektrik enerjisini her durumda sistemin güçlü tüketim noktalarına taşımak için yeni iletim tesisleri gerekecektir. Bunun için ya bağlantı noktası ile sistemin güçlü tüketim noktaları arasındaki iletim sisteminin yeni hatların tesisi ile güçlendirilmesi, ya da bağlantının doğrudan uzun hatlarla güçlü noktalara yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla büyük kapasitelerin sisteme bağlantısı için oldukça büyük iletim tesisi yatırımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Türkiye Elektrik Sistemi ile UCTE sistemi, senkron paralel işletilinceye kadar komşu elektrik sistemlerinden rezerv paylaşımı konusunda destek alınamaması nedeniyle yenilenebilir kaynaklardan, özellikle rüzgar santrallerinden yapılacak elektrik üretiminin, yukarıda da ifade edildiği şekliyle şebekeye verdiği teknik ve ekonomik olumsuzluklar nedeniyle sınırlandırılması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Özerdem, B., “Türkiye’de rüzgar enerjisi uygulamalarının gelişimi ve geleceği”, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 526, 1-10 (2003).
2. Özgür, M.A., “Kütahya’da seçilen bir konumda rüzgar verileriyle elektrik enerjisi üretim potansiyelinin bulunması”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 1-72 (2002).
3. Övet, L., “Türkiye’de rüzgar enerjisi potansiyeli ve kullanım alanları”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 1-105 (2002).
4. Luis J. Sánchez de Tembleque “Costs of wind power integration into electricity grids Spain” *Spanish National Energy Commission IEA*, Paris, 1-8 (2004).
5. Renewable Energy Policy Review Spain, *European Renewable Energy Council*  
26, rue du Trone B-1000 Brussels, 1-13 (2004).
6. Uyar, T.S., “Türkiye enerji sektöründe karar verme ve rüzgar enerjisinin entegrasyonu”, *Rüzgar Raporu*, 1-8 (2001).
7. Öztürel, N., Zilan R., Ecevit, A., “Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları için izlenmesi gereken strateji, planlama politikaları ve bunların sosyal ve siyasi etkileri”, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, İzmir, 28-32 (2001).
8. Stout, B.A., Myers, C.A., Hurand, A., Faidley, L.W., “Energy for World Agriculture”. *Food and Agriculture Organization of The United Nations*. FAO Agriculture Rome Series, 7, (1979).
9. İnternet: <http://www.ruzgarenerjisibirli.org.tr/bilimsel/diger/teras-ruzgar-rapor-21mart.pdf>
10. Özdamar, A., “Alman yenilenebilir enerjiler yasası ve ülkemiz rüzgar enerjisi açısından değerlendirilmesi”, *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, Sayı:B.30.2.EGE.0.96.00.00, 34 (2000).
11. Atılğan, İ., “Türkiye’nin enerji potansiyeline bakış”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15 (1), 31 (2000).
12. Twidell, J.W, Weir, A.D., Renewable Energy Resources. E. and F. N. SPON, University Press, Cambridge, 25 (1990).

13. Özdamar, A., “Dalga enerjisinden elektrik enerjisi eldesi üzerine bir araştırma: Çeşme örneği”, *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, Sayı:B.30.2.EGE.0.96.00.00, 29 (2000).
14. 1999 Enerji İstatistikler Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara, 1-15 (2000).
15. 1999 Enerji Raporu, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara, 23-28 (2000).
16. VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Elektrik Enerjisi, 11-17 (2001).
17. Watson, S.J., Landberg, L., Halliday, J.A., “Wind speed forecasting and its application to wind power integration”, *Proceeding of the 1<sup>st</sup> British Wind Energy Association Conference*, 291-298 (1993).
18. İnternet: <http://www.ouysal.home.anadolu.edu.tr/yayinlar/proje1.htm>
19. İnternet: <http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/ruzgar/cevresel.html>
20. Özbek, T., Doğal enerji kaynakları ders notları, Gazi Üniversitesi ESEF, Ankara, Yayınlanmamış ders notları.
21. Yalçın, C., “Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan alternatif enerji kaynaklı sistemler ve birleşik ısı-güç santralleri ile karşılaştırılması”, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, (1998).
22. İnternet: <http://www.ch2bc.org/index5.htm>, 2005
23. İnternet: <http://www.didimli.com/degirmen.htm>, 2005
24. Şen, Ç., “Gökçeada’nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar enerjisi ile karşılanması”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, 1-146 (2002).
25. Golding, E.W., “The Generation of Electricity by Wind Power”, *Pitman Press*, London, 108-116 (1955).
26. İnternet: [http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/ruzg\\_enerji](http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/ruzg_enerji)
27. Karadeniz, Z., “Rüzgar enerjisi ve elektrik üretimi amaçlı kullanımı”, *Dokuz Eylül Üniversitesi*, Bitirme Projesi, İzmir, 48 (2002).
28. İnternet: <http://www.windpower.org/composite-848.htm>, 2005
29. Güney, İ., Noğay, S., Taşkın, S., “Rüzgar türbinlerinde kontrol ve güvenlik sistemleri”, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, 137-144, (2001).

30. Acar, H., “Rüzgar enerjisi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi*, Ders Notu
31. Ultanır, M.Ö., “Rüzgar ve güneş santrallerindeki gelişmeler ve Türkiye’de kurulma olasılıkları”, *Türkiye 7. Enerji Kongresi Teknik Tebliğleri*, Ankara, 3. baskı, 55-71 (1997).
32. Krossgaard, P., (2001). “Global Status Of Wind Power”, Rüzgar Enerjisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 5-7 Nisan 2001, 3-31 İzmir.
33. Uyar, T.S., “Rüzgar enerjisi”, *Popüler Bilim Dergisi*, 78, 19-22 (2000).
34. İnternet: <http://www.ewea.org>, 2005
35. TUSİAD, “21.yüzyıla girerken Türkiye’nin Enerji stratejisinin değerlendirilmesi”, Yayın no: TUSİAD-T/98-12/239, İstanbul, 78: 42 (1998).
36. İnternet: <http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar>, 2005.
37. Hepbasli, A., Özdamar, A. and Özalp, N., “Present status and potential of renewable energy sources in Turkey”, *Energy source*, 23 (7): 613-648 (2001).
38. “Türkiye’nin en büyük enerji santrali: BORES”, *Ecogeneration World*, 5: 44-47(2001)
39. Hanagasioglu, M., “Wind energy in Turkey”, *Renewable Energy*, 16: 822-827 (1999).
40. Deniz, M., “Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli ve Türkiye enerji ihtiyacına katkısı”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 1-122 (2002).
41. İnternet: <http://www.epdk.org.tr/lisans/elektrik/lisansdatabase/verilenuretim.asp>, 2005
42. İnternet: <http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec10.html>
43. Arsan, F., “Şebeke Bağlantı Yöntemleri”, *Rüzgar Enerjisi Sempozyumu*, Alaçatı-İzmir, 143-147 (2001).
44. İnternet: <http://www.ontario-sea.org/pdf/OSEA-2005-r1-v3.pdf>
45. İnternet: [http://www.irish-energy.ie/content/content.asp?section\\_id=1096&language\\_id=1-58k](http://www.irish-energy.ie/content/content.asp?section_id=1096&language_id=1-58k): Sustainable Energy Ireland (SEI) Dynamic modelling of wind farms in transmission networks by Karsten Burges.

46. Mitchell, C., “A fair price for renewables”, *Wind Directions*, 16 (1): 19-21 (1996)
47. Velayudhan, C., “A Solid State Controller For a Wind Driven Si ip-Ring Induction Generator” *Proceedings of IEEE*, 8 (1994).
48. Barbari, S. Hoffmann, W.; “Discrette Time Control of a Three Phase 4 Wire PWM Inverter with Variable DC Link Voltage and Battery Storage for PV Application” *Chemnitz*, 25 (1999).
49. Khater, F, M, H., “Power Electronic in Wind Energy Conversion Systems” *Proceedings of Energy Conversion Engineering Conference*, 44 (1996).
50. Rashid, H, M., “Power Electronics Circuits and Devices” , New Jersey, 320-323, (1993).
51. Gürdal, O., “Güç Elektroniği Analiz, Tasarım ve Simülasyonu”, Ankara, 261, (2000).
52. Çakır, H., Güç Sistemleri Analizi, Nesil Yayınları, İstanbul,190, (1986).
53. İnternet: [http://www.enercon.de/en/\\_home.htm](http://www.enercon.de/en/_home.htm), 2005
54. İnternet: <http://www.dewind.de/en/produkte/index.htm>, 2005

**NOT:** Kaynaklarda internet ortamından alınan bilgiler Cd olarak tezin ekinde sunulmuştur.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1976 yılında Muğla'nın Fethiye ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Fethiye'de tamamladı. 1999 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendislik Bölümünden mezun oldu. Nisan 2001 yılında Başkent Elektrik A.Ş Genel Müdürlüğünde Elektrik Mühendisi olarak göreve başladı. 2002 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Bölümünde Yüksek Lisans çalışmalarına başladı.

---