

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

116 652

RÜZGAR ENERJİSİ VE ELAZIĞ ŞARTLARINDA  
BİR RÜZGAR SANTRALİ TASARIMI

Muhammet TOKLU

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI

ELAZIĞ

2002

116652

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

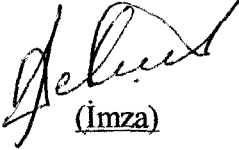
RÜZGAR ENERJİSİ VE ELAZIĞ ŞARTLARINDA  
BİR RÜZGAR SANTRALİ TASARIMI

Muhammet TOKLU

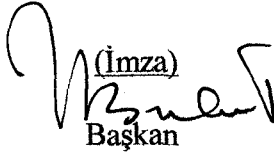
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI

Bu tez 13.10.2002 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından

Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ İle Başarılı / ~~Başarısız~~ Olarak Değerlendirilmiştir.

  
(İmza)

Danışman

  
(İmza)  
Başkan

  
(İmza)

Üye

Prof. Dr. Ata SELÇUK Doç. Dr. Muammer GÖKBULUT Doç. Dr. Hanifi GÜLDEMİR

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... / ..... / ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**ÖZET**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RÜZGAR ENERJİSİ**

**VE**

**ELAZIĞ ŞARTLARINDA BİR RÜZGAR SANTRALİ TASARIMI**

Muhammet TOKLU

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

2002, Sayfa : 98

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi bunlar arasında önemli bir yer tutar. Enerji kaynaklarının bir çoğu zamanla azalırken rüzgar enerjisi, Güneş var olduğu sürece yok olmayacaktır. Rüzgar enerjisi uzun zamandan beri bilinmektedir.

Bu çalışmada, rüzgar, rüzgar ölçen aletler, rüzgar enerjisi, rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü, rüzgar türbinleri, rüzgar santralleri ve Elazığ iklimi incelenmiştir.

Son bölümde, Elazığ şartları için bir rüzgar santrali tasarımı yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Rüzgar, rüzgar enerjisi, rüzgar türbini, rüzgar santrali, Elazığ

**ABSTRACT**

Master Thesis

**WIND ENERGY**

**AND**

**A WIND PLANT WHICH IS DESIGNED FOR ELAZIĞ CONDITIONS**

Muhammet TOKLU

Firat University

Graduate School of Naturel and Applied Sciences

Department of Electrical Education

2002, Page : 98

Wind energy has an significant importance among the renewable energy sources. Most of energy sources exhausts by the time, but the wind energy will never exhausts unless the sun disappears. Wind energy is known for long ages.

In this study; wind, anemometers, wind energy, conversions of wind energy into electrical energy, wind turbines, wind plants and the climate of Elazığ are investigated.

In the last chapter, a wind plant is designed for Elazığ conditions.

**Key Words :** Wind, wind energy, wind turbines, wind plant, Elazığ

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince yardımlarını esirgemeyen tez yöneticim Sayın Prof. Dr. Ata Selçuk'a, ilk çıktılarda düzeltmeleri yapan Elektrik Eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Yar. Doç. Dr. Selçuk Yıldırım'a , bazı dökümanların temininde yardımcı olan; Yar. Doç. Dr. Halil Günek'e, Yar. Doç. Dr. Mehmet Esen'e ve Öğr. Gör. Ayça Gökhan Ak'a, teşekkür ederim.

Ayrıca; kendi ölçüm sonuçlarını bana veren Bilgin Elektrik A.Ş. yetkililerine, rüzgar aletleri konusunda doküman ve bilgi veren DMİ Elazığ Bölge Müdürlüğü personeline teşekkür ederim.

Bu çalışmalar sırasında bana uygun bir çalışma ortamı hazırlayan eşime ve çocuklarıma da ayrıca teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                           | Sayfa |
|---------------------------|-------|
| ÖZET .....                | III   |
| ABSTRACT .....            | IV    |
| TEŞEKKÜR .....            | V     |
| İÇİNDEKİLER .....         | VI    |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....    | IX    |
| FOTOĞRAFLAR LİSTESİ ..... | X     |
| TABLolar LİSTESİ .....    | X     |
| SİMGELER .....            | XI    |
| KISALTMALAR .....         | XI    |

|                |                                                                 |    |
|----------------|-----------------------------------------------------------------|----|
| <b>BÖLÜM 1</b> | <b>GİRİŞ</b>                                                    | 1  |
| 1.1.           | İnsanlığın Enerji İhtiyacı .....                                | 1  |
| 1.2.           | Enerji Kaynakları .....                                         | 1  |
| 1.3.           | Fosil Yakıtların Çevre Etkileri .....                           | 2  |
| 1.4.           | Nükleer Yakıtların Çevre Etkileri ve Riskleri .....             | 3  |
| 1.5.           | Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....                           | 4  |
| 1.6.           | Türkiye Açısından Yeni Enerji Kaynaklarının Gerekliliği .....   | 4  |
| 1.7.           | Rüzgar Enerjisi .....                                           | 6  |
| <b>BÖLÜM 2</b> | <b>RÜZGAR</b>                                                   | 7  |
| 2.1.           | Rüzgarın Karakteristik Özellikleri .....                        | 7  |
| 2.1.1.         | Rüzgar Yönü .....                                               | 7  |
| 2.1.2.         | Rüzgarın Hızı .....                                             | 8  |
| 2.1.3.         | Rüzgarın Esme Sıklığı .....                                     | 9  |
| 2.2.           | Rüzgarı Etkileyen Faktörler .....                               | 10 |
| 2.2.1.         | Barometrik Gradyan .....                                        | 10 |
| 2.2.2.         | Dünyanın Dönmesi .....                                          | 11 |
| 2.2.3.         | Sürtünme Etkisi .....                                           | 11 |
| 2.2.4.         | Merkezkaç Kuvveti .....                                         | 12 |
| 2.3.           | Yer Yüzündeki Rüzgar Sistemleri .....                           | 12 |
| 2.3.1.         | Batı Rüzgarları .....                                           | 13 |
| 2.3.2.         | Kutup Rüzgarları .....                                          | 13 |
| 2.3.3.         | Alize Rüzgarları .....                                          | 14 |
| 2.3.4.         | Mevsim Rüzgarları .....                                         | 15 |
| 2.4.           | Yerel Rüzgarlar .....                                           | 16 |
| 2.4.1.         | Genel Hava Dolaşımına Bağlı Yerel Rüzgarlar .....               | 16 |
| 2.4.1.1.       | Orta Enlemdeki Gezici Siklonların Doğurduğu Yerel Rüzgarlar ... | 16 |
| 2.4.1.2.       | Föhn Rüzgarları .....                                           | 17 |
| 2.4.2.         | Yerel Sebeplerden Doğan Yerel Rüzgarlar .....                   | 18 |
| 2.4.2.1.       | Günlük Kara ve Deniz Rüzgarları .....                           | 19 |
| 2.4.2.2.       | Yeryüzü Şekillerine Bağlı Günlük Rüzgarlar .....                | 20 |
| 2.4.2.3.       | Ağırlaştırma Rüzgarları .....                                   | 20 |

|                |                                                                        |    |
|----------------|------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>BÖLÜM 3</b> | <b>RÜZGARIN ÖLÇÜLMESİ ve RÜZGAR ÖLÇEN ALETLER</b>                      | 21 |
| 3.1.           | Yeryüzüne Yakın Rüzgarın Ölçülmesi .....                               | 21 |
| 3.2.           | Rüzgar Hızının Ölçülmesi ve Tahmin Edilmesi .....                      | 22 |
| 3.2.1.         | Rüzgar Hızının Ölçülmesi .....                                         | 22 |
| 3.2.2.         | Rüzgar Hızının Tahmini .....                                           | 22 |
| 3.3.           | Rüzgar Ölçen Aletler .....                                             | 24 |
| 3.3.1.         | Jüriet .....                                                           | 24 |
| 3.3.2.         | Kepçeli Sabit Anemometre .....                                         | 24 |
| 3.3.3.         | Kepçeli El Anemometresi .....                                          | 25 |
| 3.3.4.         | Geliştirilmiş Tip Anemometreler .....                                  | 26 |
| 3.3.5.         | Mekanik Anemograf .....                                                | 27 |
| 3.3.6.         | Elektrikli Anemograf .....                                             | 28 |
| 3.3.7.         | Elektronik Anemograf .....                                             | 29 |
| <b>BÖLÜM 4</b> | <b>RÜZGAR MİLLERİ TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ</b>                          | 31 |
| 4.1.           | Rüzgar Gücünden Faydalanmanın Tarihi .....                             | 31 |
| 4.2.           | Rüzgar Millerinin Gelişimi .....                                       | 31 |
| 4.2.1.         | Dikey Eksenli Rüzgar Milleri .....                                     | 32 |
| 4.2.2.         | Yatay Eksenli Rüzgar Milleri .....                                     | 32 |
| 4.3.           | Elektrik Enerjisi Üretimi Amacıyla Yapılan İlk Çalışmalar .....        | 33 |
| 4.4.           | Kollu Rüzgar Türbinlerinin Gelişimi Çalışmaları .....                  | 34 |
| 4.5.           | Madaras Rotorlu Rüzgar Makinesi Denemesi .....                         | 35 |
| 4.6.           | Darrieus Türbinlerinin Gelişimi .....                                  | 36 |
| 4.7.           | Türbin Rotorundaki Gelişmeler .....                                    | 36 |
| <b>BÖLÜM 5</b> | <b>RÜZGAR GÜCÜNE AİT HESAPLAMALAR VE FORMÜLLER</b>                     | 37 |
| 5.1.           | Toplam Güç .....                                                       | 37 |
| 5.2.           | Maksimum Güç .....                                                     | 37 |
| 5.3.           | Gerçek Güç .....                                                       | 42 |
| 5.4.           | Kanatlardaki Kuvvet .....                                              | 43 |
| 5.5.           | Rüzgar Türbini İşlemleri ve Yük Faktörü .....                          | 45 |
| 5.6.           | Enerji ve Rüzgar Hızının Ortalaması .....                              | 46 |
| 5.7.           | Referans Yükseklikte Ölçülen Hızın Başka Yüksekliklere Taşınması ..... | 46 |
| <b>BÖLÜM 6</b> | <b>RÜZGAR TÜRBİNLERİ</b>                                               | 49 |
| 6.1.           | Rüzgar Türbini .....                                                   | 49 |
| 6.2.           | Rüzgar Türbininin Sınıflandırılması .....                              | 50 |
| 6.3.           | Rüzgar Türbinin Ana Elemanları .....                                   | 55 |
| 6.4.           | Rüzgar Türbinlerinde Güvenlik Sistemleri .....                         | 58 |
| 6.4.1.         | Kontrolör .....                                                        | 59 |
| 6.4.2.         | Pervane Uç Frenleri .....                                              | 60 |
| 6.4.3.         | Mekanik Fren .....                                                     | 61 |
| 6.5.           | Rüzgar Türbinlerinde Güç Kontrolü .....                                | 61 |
| 6.6.           | Rüzgar Santrali Türleri .....                                          | 62 |
| 6.6.1.         | Lokal Sistemler .....                                                  | 62 |

|                 |                                                                 |    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 6.6.2.          | Şebekeye Bağlı Çalışan Sistemler .....                          | 64 |
| 6.6.3.          | Deniz Üstü Sistemler .....                                      | 64 |
| 6.7.            | Rüzgar Türbinlerinde Uluslararası Standart .....                | 65 |
| <b>BÖLÜM 7</b>  | <b>RÜZGAR ENERJİSİNİN ÖZELLİKLERİ VE GÜNÜMÜZDEKİ KULLANIMI</b>  | 66 |
| 7.1.            | Rüzgar Enerjisinin Özelliklerinin Değerlendirilmesi .....       | 66 |
| 7.1.1.          | Rüzgar Enerjisinin Üstünlükleri .....                           | 66 |
| 7.1.2.          | Rüzgar Enerjisinin Olumsuz Yanları .....                        | 68 |
| 7.2.            | Rüzgar Türbininden Faydalanma Alanları .....                    | 70 |
| 7.2.1.          | Su Pompalanması .....                                           | 70 |
| 7.2.2.          | Isıtma Amaçlı Kullanım .....                                    | 70 |
| 7.2.3.          | Elektrik Enerjisi Üretimi .....                                 | 71 |
| 7.4.            | Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu .....                         | 71 |
| 7.5.            | Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu .....                      | 73 |
| 7.5.1.          | Çalışmaları Tarihçesi .....                                     | 73 |
| 7.5.2.          | Türkiye’nin Rüzgar Potansiyeli .....                            | 74 |
| 7.5.3.          | Türkiye’de Mevcut Rüzgar Santralleri .....                      | 75 |
| 7.5.4.          | Kurulmak İstenen Rüzgar Santralleri .....                       | 76 |
| <b>BÖLÜM 8</b>  | <b>ELAZIĞ İLİNİN İKLİMİ VE RÜZGAR POTANSİYELİ</b>               | 78 |
| 8.1.            | Elazığ’ın Konumu ve Yeryüzü Şekilleri .....                     | 78 |
| 8.2.            | İklim Özellikleri .....                                         | 78 |
| 8.2.1.          | Güneşlenme Süresi ve Radyasyon Miktarı .....                    | 79 |
| 8.2.2.          | Basınç .....                                                    | 80 |
| 8.2.3.          | Rüzgar .....                                                    | 80 |
| 8.2.4.          | Sıcaklık ve Yağışlar .....                                      | 84 |
| <b>BÖLÜM 9</b>  | <b>RÜZGAR SANTRALİ TASARIMI</b>                                 | 86 |
| 9.1.            | Yer ve Potansiyel Belirleme Çalışmaları .....                   | 86 |
| 9.1.1.          | Santral Yeri Belirleme .....                                    | 86 |
| 9.1.2.          | Rüzgar Gözlem İstasyonları .....                                | 87 |
| 9.1.3.          | Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi .....               | 88 |
| 9.2.            | Santral Kurulmasında Resmi Prosedür .....                       | 88 |
| 9.2.1.          | Otoprodüktör ve YİD Modeli .....                                | 88 |
| 9.2.2.          | Otoprodüktör Santral Kurulması İçin Yapılan İşlemler .....      | 89 |
| 9.3.            | Maliyet .....                                                   | 90 |
| 9.4.            | Elazığ’da Bir Rüzgar Santrali Kurulması İçin Yapılan Çalışmalar | 90 |
| 9.5.            | Elazığ’ın Rüzgar Güç Yoğunluğu .....                            | 92 |
| 9.6.            | Lokal Çalışacak Bir Rüzgar Santrali Tasarımı .....              | 93 |
| <b>BÖLÜM 10</b> | <b>SONUÇLAR ve TEKLİFLER</b>                                    | 95 |
|                 | <b>KAYNAKLAR</b>                                                | 97 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                       | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 2.1. Rüzgar Yönleri ve Türkiye’de Esen Başlıca Rüzgarlar .....                  | 7            |
| Şekil 2.2. Elazığ için Rüzgar Gülü .....                                              | 9            |
| Şekil 2.3. Dünyadaki Rüzgar Kuşakları .....                                           | 12           |
| Şekil 2.4. Föhn Rüzgarlarının Oluşumu .....                                           | 18           |
| Şekil 2.5. Deniz ve Kara Rüzgarlarının Meydana Gelmesi .....                          | 19           |
| Şekil 3.1. Rüzgar Oku .....                                                           | 24           |
| Şekil 3.2. Kepçeli Anemometre .....                                                   | 25           |
| Şekil 3.3. Ultrasonik Anemometrenin Ölçme Sistemi .....                               | 26           |
| Şekil 3.4. Bina Üzerine Kurulu Sabit Mekanik Anemograf .....                          | 28           |
| Şekil 3.5. Elektronik Anemografin Sensörlerinin Kule Üzerine<br>Yerleştirilmesi ..... | 29           |
| Şekil 5.1. Alanın ve Hızın Fonksiyonu Olarak Güç Değeri .....                         | 38           |
| Şekil 5.2. Çok Kanatlı Türbinde Basınç ve Hız .....                                   | 38           |
| Şekil 5.3. Çok Kanatlı Türbinde Hız ve Basınç Hareketinin Değişimi .....              | 39           |
| Şekil 5.4. Gelen Rüzgarın Kinetik Enerjisinin Tamamen İşe Dönüşmesi .....             | 41           |
| Şekil 5.5. Kanat Ucu Hızının Rüzgar Hızına Oranına Göre Güç Faktörleri ....           | 42           |
| Şekil 5.6. Sabit Verimde Pv Eğrisi .....                                              | 45           |
| Şekil 6.1. Dikey Eksenli Türbinler .....                                              | 51           |
| Şekil 6.2. Yatay Eksenli Türbinler .....                                              | 52           |
| Şekil 6.3. Propeller Türbinler .....                                                  | 54           |
| Şekil 6.4. Rüzgar Etkisine Göre Türbinler .....                                       | 54           |
| Şekil 6.5. Rüzgar Türbinin Elemanları .....                                           | 55           |
| Şekil 6.6. Kanat Profili ve Kesiti .....                                              | 56           |
| Şekil 6.7. Rüzgar Türbinin Basit Blok Diyagramı .....                                 | 58           |
| Şekil 6.8. Sabit Mıknatıslı Türbinin Basit Blok Diyagramı .....                       | 63           |
| Şekil 7.1. Rüzgar Enerjisinin Depolanması .....                                       | 67           |
| Şekil 8.1. Elazığ Şehir Merkezi İçin Hakim Rüzgar Yönü .....                          | 81           |
| Şekil 8.2. Elazığ İçin Tablo 8.8’e Göre Oluşturulmuş Ort. Rüzgar Hızları ...          | 84           |
| Şekil 9.1. Şubat 2001 Rüzgar Hızı Grafiği .....                                       | 91           |
| Şekil 9.2. Mart 2001 Rüzgar Hızı Grafiği .....                                        | 92           |

## FOTOĞRAFLAR LİSTESİ

|                                                              | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 3.1. Ultrasonik Anemometre .....                       | 27           |
| Resim 6.1. 5 kW'lık Bir Türbinin İç Görünüşü .....           | 57           |
| Resim 6.2. Montajı Yapılan Kanat ve Uç Freni .....           | 60           |
| Resim 6.3. Türbinin Pich Sistemi .....                       | 62           |
| Resim 6.4. Lokal Çalışan Boru Tipi Kuleli Küçük Türbin ..... | 63           |
| Resim 6.5. Mısır'da 60MW'lık Zafarana Rüzgar Santrali .....  | 64           |
| Resim 6.6. Deniz Üstü Santral .....                          | 65           |
| Resim 7.1. Çeşme Gemiyan Rüzgar Santrali .....               | 75           |
| Resim 7.2. Çeşme Alaçatı Rüzgar Santrali .....               | 76           |
| Resim 9.1. 7 m Kanat Çapına Sahip Bir Türbin.....            | 94           |

## TABLolar LİSTESİ

|                                                                       | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------|
| Tablo 1.1. Fosil yakıtları Zehirli Gaz Miktarları .....               | 3            |
| Tablo 1.2. Yerli Enerji Üretimi .....                                 | 5            |
| Tablo 3.1. EİE Tarafından Yapılan Rüzgar Ölçümleri .....              | 21           |
| Tablo 3.2. Bofor Ölçeği .....                                         | 23           |
| Tablo 5.1. Hellman Katsayısı .....                                    | 48           |
| Tablo 6.1. Seri Üretimi Yapılan Bazı Türbinlerin Özellikler .....     | 52           |
| Tablo 6.2. 500 KW'dan Büyük Türbinler ve Güçleri .....                | 53           |
| Tablo 6.3. 1 MW' dan Büyük Türbinler ve Güçleri .....                 | 53           |
| Tablo 7.1. Rüzgar Enerjinde Dünyada İlk 5 Ülke .....                  | 71           |
| Tablo 7.2. Almanya'nın Rüzgar Gücü ve Üretimi .....                   | 72           |
| Tablo 7.3. Bölgelere Göre Rüzgar Hızı ve Güç Yoğunluğu .....          | 74           |
| Tablo 7.4. Bazı Merkezlerin Rüzgar Potansiyelleri .....               | 75           |
| Tablo 7.5. Proje Aşamasındaki Santraller .....                        | 77           |
| Tablo 8.1. Elazığ İlinin Güneşlenme Özellikleri .....                 | 79           |
| Tablo 8.2. Elazığ İlinin Basınç Durumu .....                          | 80           |
| Tablo 8.3. Elazığ İlinin Rüzgar Frekansları .....                     | 81           |
| Tablo 8.4. Elazığ İli İçin 53 Yıllık Ortalama Rüzgar Hızları .....    | 82           |
| Tablo 8.5. Maksimum Rüzgar Hızları .....                              | 82           |
| Tablo 8.6. Kuvvetli Rüzgarlı ve Fırtınalı Gün Ortalaması .....        | 82           |
| Tablo 8.7. Elazığ İlinin 1987-2000 Arasındaki Rüzgar Hızları .....    | 83           |
| Tablo 8.8. Elazığ İçin 1987-2000 Arasındaki Ort. Rüzgar Hızları ..... | 83           |
| Tablo 8.9. İl Merkezinin Uzun Dönem Sıcaklık Ortalaması .....         | 84           |
| Tablo 8.10. İl Merkezinin Uzun Dönem Yağış Ortalaması .....           | 85           |
| Tablo 9.1. Şubat 2001 Ölçüm Sonuçları .....                           | 91           |
| Tablo 9.2. Mart 2001 Ölçüm Sonuçları .....                            | 91           |

## SİMGELER

|           |                                           |
|-----------|-------------------------------------------|
| A         | : Rüzgara karşı gelen alan ( $m^2$ )      |
| D         | : Rotor çapı (m)                          |
| $g_c$     | : Konversiyon faktörü ( $kg/Nsn^2$ )      |
| $H_r$     | : Referans yükseklik (m)                  |
| $H_x$     | : Hızı hesaplanacak yükseklik (m)         |
| M         | : Moment (N)                              |
| m         | : Kütle akış oranı ( $kg/sn$ )            |
| N         | : Rotor devri (d/sn)                      |
| $P_{top}$ | : Toplam güç (W)                          |
| $v_e$     | : Giden rüzgarın hızı (m/sn)              |
| $v_i$     | : Gelen rüzgarın hızı (m/sn)              |
| $v_r$     | : Referans yükseklikte ölçülen hız (m/sn) |
| $\mu$     | : Hellman katsayısı                       |
| $\rho$    | : Rüzgarın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )         |
| $\eta$    | : Verim                                   |
| $\omega$  | : Rotorun açısal hızı ((m/sn)             |

## KISALTMALAR

|                 |                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| AC              | : Değişken Akım                               |
| Btep            | : Bin ton petrol eşdeğeri                     |
| CENELEC         | : Avrupa Elektroteknik Standartlar Komisyonu  |
| CFC             | : Kloro flor carbon                           |
| CH <sub>4</sub> | : Metan                                       |
| CO <sub>2</sub> | : Karbondioksit                               |
| dB              | : Desibel (Ses Şiddeti Birimi)                |
| DC              | : Doğru Akım                                  |
| DMİ             | : Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü   |
| EİE             | : Elektrik İşleri Etüt İdaresi                |
| ETKB            | : Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı         |
| GWh             | : Gigawaat Saat (Elektrik Enerjisi Birimi)    |
| kW              | : Kilowaat (Elektrik Güç Birimi)              |
| kWh             | : Kilowaat Saat (Elektrik Enerjisi Birimi)    |
| MW              | : Megawat (Elektrik Güç Birimi)               |
| NO <sub>2</sub> | : Sülfürdioksit                               |
| ODTÜ            | : Orta Doğu Teknik Üniversitesi               |
| PV              | : Fotovoltaik Pil                             |
| SWECS           | : Küçük Rüzgar Enerjisi Çevrim Sistemleri     |
| TEAŞ            | : Türkiye Enerji Üretim-İletim Anonim Şirketi |
| TEDAŞ           | : Türkiye Enerji Dağıtım Anonim Şirketi       |
| TÜBİTAK         | : Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu |
| WASP            | : Rüzgar Atlası Hazırlama Programı            |
| WECS            | : Rüzgar Enerjisi Çevrim Sistemleri           |
| YİD             | : Yap İşlet Devret                            |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1. İnsanın Enerji İhtiyacı

Günümüzde gelişmiş toplumlarda yaşayan bir insanın kullandığı enerji kaynaklarına baktığımızda, bunların; yaşamını sürdürmek için gıdadan aldığı enerji, yaşadığı evde ve işyerinde kullandığı enerjiler (ısınma, aydınlanma, yemek yapmak vb. için), taşıtlarda kullanılan enerjiden kişi başına düşen pay, günlük hayatta kullandığı nesnelerin üretimi için harcanan enerjiden kişi başına düşen payı olarak sıralanabileceği görülür.

Gelişmiş ülkelerde kişi başına düşen günlük enerji tüketimi 950 milyon joule'dir. Bu tutarın içerisine yukarıda sıralanan tüm enerji türlerinden kişi başına düşen paylar da ilave edilmiştir.

Bugün dünyamızda 6 milyar insan yaşamaktadır. Bu sayı artma eğilimini sürdürmektedir. Tükenebilir enerji kaynaklarının yakın sayılabilecek bir sürede büyük oranda tükeneceği varsayıldığı için, yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulacaktır (İnan, 1996).

#### 1.2. Enerji Kaynakları

Alışlagelmiş enerji kaynaklarına konvansiyonel enerji kaynakları denir. Bunların en önemlileri;

- a) Fosil yakıtlar (Kömür, petrol, doğal gaz vb.),
- b) Nükleer yakıtlar (Uranyum, plütonyum),
- c) Hidrolik kaynaklar (Nehirler, göller )

olarak sıralanabilir. Bu kaynaklardan fosil ve nükleer yakıtlar belli bir rezerve sahiptir. Oluşumları milyonlarca yıl sürdüğünden mevcut rezervleri bitince tükeneceklerdir. Hidrolik kaynaklar yenilenebilir bir kaynaktır. Ancak

konvansiyonel kaynaklar arasında sayılır. Konvansiyonel enerji kaynaklarının dışında kalan kaynaklara yeni enerji kaynakları denir. Bu kaynaklar arasında;

- a) Güneş enerjisi,
- b) Rüzgar enerjisi,
- c) Jeotermal enerji,
- d) Biyokütle enerjisi,
- e) Biyogaz enerjisi,
- f) Dalga enerjisi

sayılabilir. Bu kaynakların çoğunun yenilenebilir özelliğe sahip olmasından dolayı bunlara yenilenebilir enerji kaynakları da denir. Ayrıca çevreye olan olumsuz etkileri de çok fazla değildir. Bu özellikleri sebebiyle temiz enerji kaynakları olarak da isimlendirilirler (Çevre Vakfı, 1999).

Gelişen teknoloji ve gelişmeler sebebiyle yenilenebilir enerji kaynakları, konvansiyonel kaynaklarla rekabet edebilecek duruma gelmiştir.

### 1.3. Fosil Yakıtların Çevre Etkileri

Enerji üretim ve tüketiminin en genel ve geri dönülmez zararı, sera etkisi olarak bilinen kutuplar üzerindeki ozon tabakasını incelten ve atmosferin ısınmasına yol açan gazların yayılmasıdır. Kirletici gazların sera etkisine toplam katkılarının, %55'i CO<sub>2</sub>, % 25'i CFC, %14'ü CH<sub>4</sub> ve % 6'sı NO<sub>2</sub> tarafından oluşturulmaktadır.

Kömür, petrol ve doğal gazlar yakıldığında atmosfere CO<sub>2</sub> yaymakta, kömür madenleri, petrol kuyuları ve doğal gaz borularından sızan CH<sub>4</sub> de bunlara eklenmektedir. Fosil yakıtların sera etkisine katkısı % 48'i bulmaktadır. Bunun % 8'i kömür, % 6'sı da sıvı yakıtların elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanımından kaynaklanmaktadır.

Enerji üretimi sırasında meydana çıkan kömür tozları ve NO<sub>2</sub>' nin miktarlarının azaltılmasında, enerji maliyetlerine % 2-20 arasında ek yük getiren teknolojiler kullanılarak iyileştirme sağlanmaktadır.

**Tablo 1.1.** Fosil Yakıtların Zehirli Gaz Miktarları

| Yakıt     | Üretilen enerji<br>(Milyar Kwh) | CO <sub>2</sub><br>(Milyon ton) | SO <sub>2</sub><br>(Bin ton) | NO <sub>2</sub><br>(Bin ton) |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Kömür     | 1 653                           | 1 754                           | 11 260                       | 6 514                        |
| Doğal gaz | 268                             | 180                             | 1                            | 614                          |
| Petrol    | 56                              | 55                              | 345                          | 102                          |
| Toplam    | 1 977                           | 1 991                           | 11 608                       | 7 233                        |

Fosil yakıtlardan elektrik enerjisi elde edilmesi sırasında çevreyi kirleten tek etki gaz atıkları değildir. Kül, cüruf, uçucu kül, küllü su en önemli katı ve sıvı atıklardır (Çevre Vakfı, 1999).

1995 yılında ABD’de elektrik enerjisi üretmek için kullanılan fosil yakıtların atmosfere yaydığı zehirli gazların miktarı Tablo 1.1 de yer almaktadır (Uyar, 1999).

#### 1.4. Nükleer Yakıtların Çevre Etkileri ve Riskleri

Nükleer santrallerde, nükleer yakıtlar kullanılarak elektrik enerjisi elde edilir. Nükleer yakıtların kullanılması atmosfere sera gazlarının atılması hızını yavaşlatmıştır. Ancak nükleer santrallerin belli riskleri ve çevre problemleri vardır.

Nükleer santrallerde ortaya çıkan kazalar işletme riski kapsamında düşünülür. Santrallerin nükleer bir silah gibi patlaması söz konusu değildir. Kaza sırasında reaktör kalbi, ısınmaya başlayınca kendi kendini kapatır. Zincirleme reaksiyon durur. Ancak reaksiyon durmasına rağmen reaktör koru erimeye devam eder. Buradaki radyoaktivite stoku ısınım yaymaya devam eder. 1979 yılındaki Three Mile Island ve 1986 yılındaki Çernobil kazaları bu şekilde meydana gelmiştir.

Nükleer yakıtlar reaktör korunda belli zaman kullanılması sonucunda fakirleşir, değiştirilmesi gerekir. Bu kullanılmış yakıtlar kimyasal yöntemlerle parçalanıp içindeki işe yarar izotoplar alınır. Geriye kalan kimyasal çözeltide üst düzeyde radyoaktif olan fakat işe yaramayan çekirdekler kalır. Bu atıkların radyoaktiviteleri zararsız hale gelinceye kadar depolanması, saklanması gerekir.

Bu süre en az 300 yıl kadardır. Plütonyumda ise bu süre 24 000 yıl kadardır (Altın, 2000).

### 1.5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle fosil ve nükleer kaynaklara göre en büyük üstünlüğü, yenilenebilir olmaları yani, kömür, ve petrol gibi bir kez kullanıldıklarında tükenmemeleridir. Bunun yanında çevreye ve insan hayatına olan olumsuz etkileri çok daha azdır. Hidrolik enerji bu türün en yaygın kullanılan türüdür. Bu nedenle klasik enerji kaynakları arasında sayılır. Diğer kaynaklar ise hem yeni hem de yenilenebilir kaynaklar olarak isimlendirilirler. Özellikle 1973 petrol krizi ve meydana gelen iki nükleer reaktör kazası bu tür enerji kaynaklarına olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bugün için bu enerji türleri enerji ihtiyacını tam ve ekonomik olarak karşılayacak durumda değildir. Ancak gelişen teknoloji ve azalan maliyetler, gelecek için yapılan enerji varsayımlarında bu enerjilere büyük ölçüde yer vermektedir (Köse, 1996).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyetlerine örnek olarak, rüzgar türbini maliyetlerini inceleyebiliriz. 1981 yılında yılda 45 000 kWh enerji üreten 25 kW kapasiteli bir rüzgar türbininin maliyeti 2600 \$/kW iken, bugünün tipik türbini olan 750 kW kapasiteli makine 800 \$/kW yatırım maliyeti ile yılda 2,5 milyon kWh üretebilmektedir. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin bir raporuna göre, rüzgar türbinlerinin fiyatı 1981-1991 yılları arasında 3 misli azalırken rüzgar enerji fiyatları yarı yarıya azalmıştır. Washington'daki Yenilenebilir Enerji Politikaları Projesi bulgularına göre 1997 yılında 1000 \$/kW olan rüzgar türbinlerinin yatırım maliyetleri 2006 yılında 600 \$/kW 'a düşecektir (Uyar, 1999).

### 1.6. Türkiye Açısından Yeni Enerji Kaynaklarının Gerekliliği

Türkiye'nin taşkömürü, linyit, petrol, doğal gaz, hidrolik, jeotermal, güneş, odun ve tezek ile karşılanan birincil enerji tüketimi 1999 yılında 76 631 Btep (bin ton eşdeğer petrol) olmuştur. Bu tüketimin 27 057 Btep kadarı yerli kaynaklardan

karşılanmıştır. Tüketimin yerli kaynaklarla karşılanma oranı 1999 yılı için % 35.3 tür (ETKB, 2000).

**Tablo 1. 2. Yerli Enerji Üretimi (ETKB, 2000)**

|                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| Taşkömürü            | 1990 bin ton              |
| Linyit               | 65019 bin ton             |
| Asfaltit             | 29 bin ton                |
| Doğal gaz            | 731 milyon m <sup>3</sup> |
| Petrol               | 2940 bin ton              |
| Hidrolik             | 34678 Gwh                 |
| Rüzgar-Jeotermal     | 83 Gwh                    |
| Odun                 | 17642 bin ton             |
| Hayvan-Bitkisel atık | 6529 bin ton              |
| Güneş                | 112 Btep                  |
| Toplam               | 27 057 Btep               |

Ülkemiz enerji hammaddeleri çeşitliliği açısından zengin olmakla birlikte, mevcut rezervler açısından linyit ve hidrolik hariç, ülke talebini karşılamaktan oldukça uzak bulunmaktadır. Zengin toryum yataklarımız ise, nükleer teknolojiye sahip olmadığımız için atıl durumda beklemektedir.

Enerji açığımızı petrol, doğal gaz ve kömür ithal ederek karşılamaktayız. Enerji ithalatının fiziksel büyüklüğünün yanında mali büyüklüğü ya da döviz ihtiyacı da büyük boyutlardadır. Petrol fiyatlarında görülen dalgalanmalar, 2000 sonrasında sürekli artış trendi biçiminde olacaktır. 2000-2020 arasında petrol fiyatlarının en az 22.4 - 42.0 ABD \$/varil, kömür fiyatlarının en az 52-68 \$/ton ve boru hattı doğal gaz fiyatlarının da 104-135 \$ / 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> sınırlarında olması beklenmelidir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın planladığı ithalat miktarlarına göre 2000-2020 döneminde yapılacak kümülatif ödeme toplamı 500 milyon dolar gibi büyük bir rakama yaklaşmaktadır (TÜSİAD, 1998).

Bütün bu sayılanlar Türkiye'nin enerji bakımından dışa bağımlılığını göstermektedir. Geçtiğimiz yıllarda bunu doğal gazda çok açık bir şekilde yaşadık. Bunun için yeni ve yerli enerji kaynakları bulmak zorundayız.

### 1.7. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi, güneş enerjisinin değişik bir şeklidir. Çünkü rüzgar, dünya yüzeyinin farklı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Rüzgarlar yerel ve gezegen rüzgarları olarak sınıflandırılır. Enerji kaynağı olarak kullanacağımız rüzgarlar atmosferin yeryüzüne yakın kısımlarında meydana gelen rüzgarlardır. İkinci bölümde rüzgarlar ve türleri geniş olarak ele alınacaktır.

Tahminlere göre dünyaya ulaşan güneş enerjisinin % 2'si kinetik enerjiye dönüşür. Bu enerjinin % 30'u 1000 metreden daha alçak kesimlerde meydana gelmektedir. Yer yüzünden 1000 m yüksekliğe kadar olan atmosfer içerisinde rüzgardan sağlanan kinetik enerji miktarı, ABD'nin (1980 yıllardaki ) enerji ihtiyacının 3 katı kadardır.

Rüzgar enerjisi herhangi bir kirliliğe sebep olmayan, hammaddesi bedava olan bir enerjidir. Ancak rüzgar enerjisinin güneş enerjisine göre bazı problemleri vardır. Güneş enerjisi tahmin edilebilir ve miktarı bellidir. Oysa rüzgarın miktarı birkaç yöre hariç tam olarak bilinemez. Sabit değildir, değişkendir ve biraz da güvenilmezdir. Bütün bunlara rağmen rüzgar gelecekte önemi artacak olan bir enerji kaynağıdır (El-Wakil, 1984).

## BÖLÜM 2

### RÜZGAR

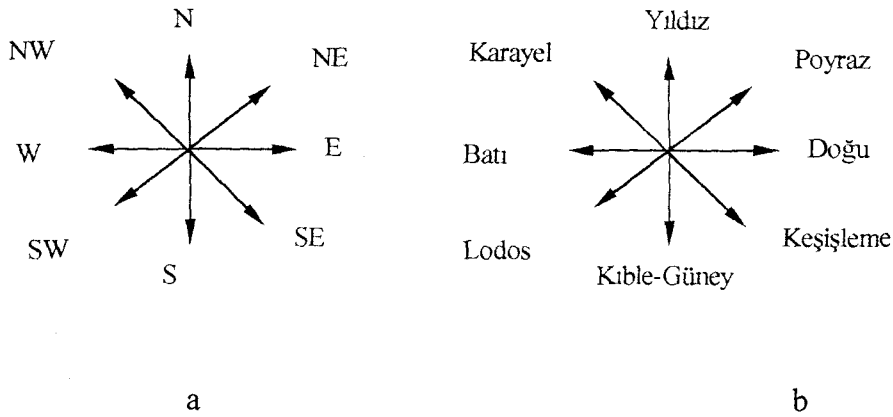
#### 2.1. Rüzgarın Karakteristik Özellikleri

Rüzgar yatay yönde yer değiştiren bir hava kütesinin hareketidir. Hava kütesinin bu hareketi ancak çevresine yaptığı etkilerle gözlenebilir veya cildimizde bir serinlik halinde hissedilir. Rüzgar etkileri bakımından üç belirgin özelliği olan bir iklim unsurudur. Bu özellikler; rüzgarın hızı (şiddeti), yönü ve esme sıklığı (frekansı) dır (Erol, 1993).

##### 2.1.1. Rüzgarın Yönü

Rüzgarın bulunduğu yere doğru geldiği yöne rüzgar yönü denir. Bu yön coğrafi yönlerle ifade edilir. Ancak ayrıntılı çalışmalarda bu yönlere ek olarak ara yönler de kullanılmaktadır.

Rüzgar yönlerini göstermek için kesişmek üzere çizilen çizgiler güle benzediği için bu şekillere rüzgar gülü denir. Daha ayrıntılı çalışmalar için rüzgar yönleri pusuladaki derecelere göre belirtilir.



Şekil 2.1 Rüzgar Yönleri ve Türkiye’de Esen Başlıca Rüzgarlar

Rüzgarlara yönler göre isimlendirme yapıldığı gibi mahalli olarak da özel isimler verilir. Bu isimlendirmeler yön bakımından tam bir kesinlik göstermez. Bu bakımdan bilimsel çalışmalarda coğrafi yönler göre isimlendirmeler tercih edilir (Erol, 1993).

Rüzgar yönünün iklimler ve özellikle günlük hava şartları bakımından önemi vardır. Çünkü rüzgarlar kendilerini oluşturan hava kütlelerinin özelliklerine göre sıcaklık, soğukluk veya nem getirirler ya da çevreyi kuruturlar. Kıyılarda rüzgar yönünün denizin dalgalanması bakımından da etkisi vardır. Karadan denize doğru esen rüzgarlar fazla dalga yapmazken, açık denizden karaya doğru esen rüzgarlar büyük fırtınalara neden olur.

Klimatoloji çalışmalarında rüzgar yönleri üzerinde önemle durulur ve özellikle egemen rüzgar yönlerinin saptanmasına çalışılır. Egemen rüzgar bir bölgede belirli süre içerisinde en çok esen rüzgara denilmektedir (Erol, 1993).

Rüzgar yönü rüzgar oklarıyla belirlenir. Bu gereç bir eksen üzerinde dönebilen, arka kısmında kanatçıkları bulunan basit bir yapıya sahiptir. Genellikle metalden yapılır. 3. bölümde rüzgar ölçen aletler geniş olarak ele alınacaklardır.

Modern meteoroloji çalışmalarında yüksek rüzgarların yönü ve hızı uçurulan gözlem balonlarıyla saptanır.

### 2.1.2. Rüzgarın Hızı (Şiddeti)

Rüzgarın hızı, kütesinin hareket hızıdır. Bu hız m/sn, km/h veya knot olarak ifade edilir. Bir yerde rüzgarın hızlı esmesi, hava olaylarının güçlü geliştiğini gösterir. Esen rüzgarlar çarptıkları yüzeylere basınç yaparlar. Rüzgarın yıkıcı etkisi bu basınçtan ileri gelir. Örneğin 1 m/sn hızdaki rüzgarın 1 m<sup>2</sup> alana yaptığı basınç 0,076 kg iken, 2 m/sn hızdaki rüzgarın basıncı 0,3 kg kadardır. Rüzgar basıncı hızının karesiyle orantılıdır.

Rüzgarı oluşturan hava akımı yol ve hız bakımından hiçbir zaman düzgün değildir. Yönü sık, sık değişen rüzgarın hızı da sürekli olarak azalır veya çoğalır. Yani rüzgar dalgalar halinde eser. Bu tür rüzgarlar karalar üzerinde ve yere yakın

katlarda çok görülür. Bu sebeple rüzgar türbinleri, sadece tek bir yönden gelen rüzgarlara göre değil, değişen yöndeki rüzgarları da alabilecek şekilde tasarlanır.

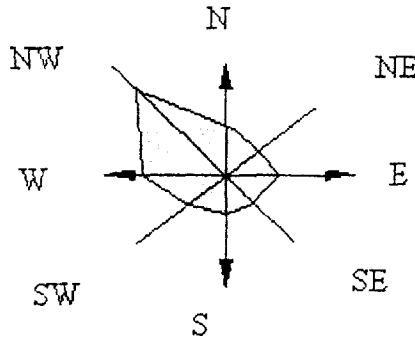
Açık denizlerde ve yükseklerde rüzgarlar daha düzgün ve sürekli eser. Rüzgarın bu özelliğinden faydalanmak için deniz üstü rüzgar santralleri kurulmaktadır. Karada yapılan santrallerde kule boyu mümkün olduğu kadar yüksek tutularak daha fazla rüzgar alması sağlanır. Bu konuların ayrıntıları daha sonraki bölümlerde ele alınacaktır.

Rüzgarların hızı anemometre ile ölçülür. Bunlar rüzgarın etkisiyle dönenen kepçe biçimli gereçlerdir. Bunların dışında rüzgar hızını ve yönünü yazan anemograf adı verilen aletler de vardır. Bu tip aletlerin yapısı da daha sonraki bölümde açıklanacaktır.

Rüzgar hızını tahmin etmek için Beaufort (Bofor) ölçeği kullanılır. Bir çizelge olan bu ölçek rüzgarın yeryüzündeki cisimler üzerine yaptığı etkilere göre rüzgar hızının tahminine yarar.

### 2.1.3. Rüzgarın Esme Sıklığı (Frekans)

Rüzgar yönleri zaman, zaman değişir ve bu değişimler hava şartları üzerinde önemli etkiler yapar. Bu nedenle rüzgarın hangi yönden ne kadar süreyle ve ne kadar sık estiğinin bilinmesi gerekir. Belirli bir rüzgarın esme sıklığına o rüzgarın frekansı denir. Frekans, söz konusu rüzgarın esme süresi veya sayısının belirli bir zaman ölçeğine göre (gün, ay, yıl) yüzde oranı belirtilerek ifade edilir.



Şekil 2. 2 Elazığ İçin Rüzgar Güllü (Güneş, 1998).

Rüzgarın esme sıklığı, rüzgar gülü diyagramı ile gösterilir. Bu diyagramlar rüzgar gülü üzerine, rüzgar frekanslarının bir oran içerisinde çizilmesiyle elde edilir.

Şekil 2.2 incelendiğinde Elazığ'da hakim rüzgar yönünün NW (Kuzeybatı) Rüzgarı olduğu görülür. Elazığ'ın rüzgar potansiyeli detaylı olarak 8. bölümde ele alınacaktır.

Rüzgar frekansı karışık gibi görünmekle beraber basıncın günlük, aylık ve mevsimlik değişmelerine ayak uydurarak az çok düzenli bir gidiş gösterir. Rüzgarın böyle özelliklerini göstermek için rüzgar sürekliliği kavramı kullanılır.

## 2.2. Rüzgarı Etkileyen Faktörler

Atmosferde her noktada basınç aynı değildir. Bu basınç farklılıkları rüzgar adı verilen hava hareketleri ile ortadan kaldırılmaya çalışılır. Basınç merkezleri arasındaki farka barometrik gradyan (basınç gradyanı ) denir. O halde rüzgarın yönü ve hızı gradyana bağlı olmalıdır. Gerçekte ise yön ve hız sadece gradyana bağlı değildir (Erinç, 1996).

Rüzgarın yönü, hızı ve frekansı çok çeşitli faktörlerin kontrolü altındadır. Bu faktörlerin birbirine karışan etkileri altında beliren bir dengeye göre rüzgarlar adı geçen özelliklerini kazanırlar. Genel olarak bu dengeye strofik denge denir. Bu faktörlerin ayrı ayrı incelenmesi gerçeklere tam uymasa da, olayları daha basit bir şekilde açıklayabilmek amacıyla bu faktörler kısaca ele alınacaktır (Erol, 1993).

### 2.2.1. Barometrik Gradyan

Rüzgarlar yüksek basınçlardan, alçak basınçlara doğru estiklerine göre onları harekete geçiren gücün yönü izobar eğrilerine diktir. Sadece bu barometrik gradyan etkisi altında hareket eden rüzgarlara da sapmamış barostrofik rüzgar denir. Ancak diğer faktörler çoğu rüzgarların gradyana uygun yönde esmelerine engel olur. Genellikle gradyan ile rüzgar yönü arasında az veya çok bir fark belirir.

Yeryüzünde sadece ekvator boyunca  $4^\circ$  kuzey ve güney enlemleri arasındaki bölgenin rüzgarları gradyana uyar (Erol, 1993).

### 2.2.2. Dünyanın Dönmesi

Dünya dönen bir küre olduğu için onun üzerinde hareket eden her cisim, bu arada rüzgarlar da, kuzey yarım kürede sağa, güney yarım kürede sola saparlar. Rüzgarları saptıran bu güce Coriolis etkisi denir. Bu etki ile rüzgarın sapması enleme ve rüzgarın hızına bağlı olarak değişir. Ekvatorda sapma sıfırdır. Rüzgar hızının artması sapmayı da artırır. Yeryüzüne sürtünme rüzgar hızını azaltır. Yeryüzüne yakın katmanlarda yere sürtünme etkisi ne kadar az olursa rüzgar hızı o derece fazla olur. 500, 600 metre yükseklikte sürtünme etkisi hiç kalmaz. Burada esen rüzgar sadece gradyan ve coriolis gücünün etkisi altındadır.

Rüzgar yere yaklaştıkça sürtünme etkisi altına girerek hızı azalır. Buna bağlı olarak coriolis etkisi zayıflar (Erol, 1993).

### 2.2.3. Sürtünme Etkisi

Rüzgarın yeryüzüne sürtünmesi rüzgarın hızını azaltan bir faktördür. Hızı azalan rüzgarda sapmada azalacağından, sürtünme sebebiyle rüzgar yönü de etkilenmiş olur. Genellikle havanın yeryüzüne temas eden 1-2 mm'lik kısmı hareketsizdir. Yerden yükseldikçe bu hız artar. Daha önce belirtildiği gibi 500, 600 metreden sonra sürtünme etkisi kaybolur. Rüzgarlar bu yükseklikte çok hızlı esebilirler. Bu yükseklikteki rüzgarın çok hızlı olmasının bir sebebi de, hava yoğunluğu azaldığı için hava hareketlerinin daha kolaylaşmasıdır.

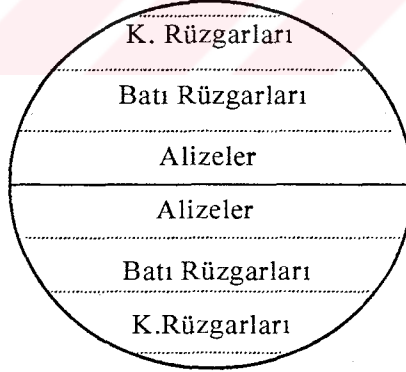
Sürtünmenin az veya çok olması yer yüzü şekillerine bağlıdır. Yüzeyi dümdüz olan denizlerde rüzgar hızı engebeli olan karalara göre daha fazladır. Düz ve çıplak alanlarda hız dağlık ve ormanlık alanlardan daha fazla olur. Dağlık yerlerde tepelerin arkası girdap ve geri akımlar sebebiyle daha sakindir. Ancak rüzgarlar vadilere dolarak o vadinin yönünü almaya zorlanınca yönleri değişir, hızları artar.

#### 2.2.4. Merkezkaç Kuvvet

Özellikle girdap hareketi gösteren hava bölümlerinde rüzgarın yönü ve hızı üzerinde merkezkaç (santrifüj) kuvvetin etkisi olur. Bir basınç alanında basınç eğrileri (izobarlar) ne kadar yuvarlak ise, havanın girdap içindeki dönüş hareketi o kadar hızlı, merkezkaç etkisi de o oranda çok olur. Bu etki izobarlar eğrileri düzleştikçe azalır.

#### 2.3. Yeryüzündeki Rüzgar Sistemleri

Hava kütleleri ve onların hareketleri olan rüzgarların yeryüzü iklim bölgelerinin oluşması üzerindeki etkileri açıktır. Rüzgar sistemleri, sürtünme ve yer şekillerinin etkileri daha az olduğu için genelde okyanuslar üzerinde gelişmiştir. Bu sistemler karaların çeşitli termik – dinamik etkileri altında, özellikle troposferde yer yer ve zaman zaman zayıflar veya tümüyle kaybolur. Aynı nedenden dolayı rüzgar sistemlerinin kuzey yarım kürede bölgeler, güney yarım kürede kuşaklar halinde bir coğrafi dağılışı gösterdiği görülür.



Şekil 2. 3 Dünyadaki Rüzgar Kuşakları

### 2.3.1. Batı Rüzgarları

Yeryüzündeki batı rüzgarları, subtropikal yüksek basınçlardan orta enlem alçak basınçlarına esen rüzgarlardır. Yön ve süreklilik bakımından oldukça değişken bir özellik gösterirler. Orta enlem okyanuslarının özellikle doğu bölümlerinde ve kışın güçlü batı yönlü rüzgarlar halinde belirirler. Yönleri ve hızları oldukça sık değişir. Bu değişimde, batı rüzgarları bölgesinde batıdan doğuya doğru hareket halinde bulunan akım dalgalarının ve özellikle gezici siklon ve antisiklonların önemli bir etkisi vardır. Bu yüzden bazen doğudan batıya doğru bile eser. Zaman zaman da fırtına karakteri kazanır.

Yeryüzündeki batı rüzgarları çoklukla 3-7 bofor şiddetindedir. Batı Avrupa'da yazın %60, kışın ise sadece %30 oranında batı rüzgarları eser. Durgun hava çok seyrek (Erol, 1993).

Batı rüzgarlarını doğuran hava kütleleri nemli olduğundan, bu bölgelerde hava genellikle fırtınalı, kapalı nemli ve yağışlıdır. Sık sık kutupsal hava baskınları olduğundan bu ılımlı hava şartları kuru, soğuk ve ayaz hava dönemleriyle aralanır.

Batı rüzgarları kuzey Atlas Okyanusunda kışın güçlüdür. Bu rüzgarlar, batı ve kuzey Avrupa'ya ve Akdeniz'e de etki yaparak önemli bir rol oynar. Yazın daha zayıf olan batı rüzgarları nemli, ılık hava kütleleri halinde Avrupa'ya gelir. Bu hava kütleleri İran, Basra alçak basıncının da etkisiyle Akdeniz'e yönelerek, Anadolu'da yaz poyrazı ve Ege Denizi'nde etesien (yıldız) rüzgarlarını oluşturur. Büyük Okyanusta 30-50° kuzey enlemleri arasında esen batı rüzgarları, Kuzey Amerika'nın batı kıyılarına Batı Avrupa' da kine benzer etki yapar.

### 2.3.2. Kutup Rüzgarları

Kutup bölgeleri aslında havanın soğuyarak alçaldığı ve yeryüzünde etrafa dağıldığı termik yüksek basınç alanlarıdır. Genellikle buralarda soğuk fakat durgun hava şartları egemen olur. Yeryüzündeki kutupsal antisiklonlar, Grönland ve Antartika gibi buzulla kaplı karalar üzerinde daha güçlüdürler. Bu antisiklon alanları çevresinde genellikle doğu yönlü rüzgarlar eser. Bu rüzgarlar yeryüzüne

sürtünme ve sapma yüzünden kuzey yarım kürede kuzeydoğu, güney yarım kürede güneydoğu yönünü almışlardır.

Kuzey yarımkürede kışın Kanada ve Sibirya'da oluşmuş bulunan yüksek basınçlar kutup üzerindeki yüksek basınçlarla bağlantı halinde olup çevreye soğuk hava kütleleri yani rüzgarlar gönderen bir yüksek basınç sırtı oluşturur. Bu mevsimde özellikle İzanda ve Aleuten kış alçak basınçlarının kuzey ve kuzeydoğusunda soğuk kutup rüzgarları çok güçlüdür.

Antartika daha geniş bir kutup kıtası olduğu ve burada çeşitli yer şekilleri bulunduğu için yeryüzündeki antisiklon her yerde ve her zaman hakim değildir. Ancak zaman zaman ve özellikle kıtanın çukur kenar ovalarında alçalan soğuk hava cereyanının (katabatik rüzgarlar) da yardımıyla gelişmiş, güçlü bir antisiklonun etkisi görülür. Antisiklon etkisi görülmediği yer ve zamanlarda kıtanın içlerine sokulan gezici siklonlar güçlü kar fırtınaları oluştururlar (Erol, 1993).

### 2.3.3. Alize Rüzgarları

Yeryüzünde alizeler subtropikal yüksek basınçlar arası karşılaşma kuşağı arasında , bütün yıl boyunca esen sürekli rüzgarlardır. Özellikle tropikal okyanusların doğusunda bu rüzgarların yönleri dikkati çekecek derecede belirlidir. Süreklilikleri % 90'a kadar çıkar. Hızları 15-40 km/h arasında değişir.

Kuzey yarımkürede suprtropikal yüksek basınç çekirdekleri denizlerden daha güçlü olduğu için yeryüzünde esen kuzeydoğu alizeleri daha çok Büyük ve Atlas Okyanuslarında belirgin ve güçlüdürler. Güney yarımkürede ise daha sürekli olan suprtropikal yüksek basınçlara bağlı olarak alizeler daha düzenli kuşak oluştururlar. Bu nedenle yeryüzündeki güneydoğu alizeleri, kuzeydoğu alizelerinden daha güçlü ve yönleri daha belirgindir. Alizelerin deniz yüzünde sahip oldukları bu süreklilik, belirli yön ve hızlar, yelkenli gemiler için çok uygun şartlar hazırlar. Alize rüzgarlarını meydana getiren hava kütleleri yukarı enlemlerde kurudur ve buralarda hava açık, rüzgarlar hafif olur. Deniz üzerinde hareket ederek ekvatora yaklaştıkça bu hava kütleleri ısınır, nemleri artar.

Alizeler kuşağı kuzey yarım küre okyanuslarında 2500 km, güney yarımküre okyanuslarında 3000 km kadar geniştir (Erol, 1993).

#### 2.3.4. Mevsim Rüzgarları

Yeryüzünde genel hava dolaşımına bağlı olarak çoğunlukla bütün yıl veya yılın uzunca bir bölümünde aynı esen rüzgarlardan başka yılın bir yarısında belirli bir yönden, öbür yarısında ise tam aksi yönden esen dönemli rüzgarlar vardır. Böyle rüzgarlar; kışın karalardan denizlere soğuk ve kuru, yazın denizlerden karalara sıcak estiklerinden iklim bakımından daha çok dikkati çekerler.

Böyle rüzgarların özellikle yaz ve kış arasındaki yön değiştirmelerinin nedeninin, yakın zamana kadar, karalarla denizlerin yazla kış arasındaki ısınma farkından kaynaklandığı düşünülürdü. Modern görüşe göre ise mevsim rüzgarları doğuş bakımından birbirinden ayrı, bağımsız sistemlerin yan yana gelmesinin sonucudur. Bu ayrı sistemler, yüksek batı rüzgarlarının kontrolü altında gelişmiş olup, yeryüzü musonları, coriolis kuvveti, yeryüzü şekilleri ve yerin ısınıp, soğuması etkisiyle şekillenmiştir. Başka bir deyişle musonlar yüksek rüzgar sistemlerinin yeryüzünün değiştirici, dinamik ve termik etkileri altında gelişmiş alt bölümleridir.

Tropikal musonlar, özellikle Hindistan ve Güneydoğu Asya adalarında dikkati çeker. Bu bölge musonları tropikler arası cephenin temmuzda 30 ° kuzey enlemine, ocakta ise Hint Okyanusunda 10 ° güney enlemine kadar inmesi sonucu ortaya çıkan yazdan kışa 180 ° yön değiştiren ekvatorial rüzgarlardan başka bir şey değildir.

Subtropikal ve orta enlem musonları özellikle Asya ve doğusunda, Japonya ve Kuzey Çin'de iyi gelişmiştir. Bu rüzgarlar yazın denizden karaya doğru esen sıcak ve nemli, kışın karadan denize doğru esen soğuk ve kurak rüzgarlardır.

İspanya ve Anadolu yarın adalarında kara ve denizlerin farklı ısınmalarından doğan, termik doğuşlu fakat dar alanlı muson benzeri rüzgarlar eser (Erol, 1993).

## 2.4. Yerel Rüzgarlar (Mahalli Rüzgarlar)

Yeryüzündeki rüzgarlar ve bu rüzgarların özellikleri aslında atmosferdeki genel hava dolaşım şartlarına bağlıdır. Ancak birçok yerel faktör etkisi altında bu genel sisteme bağlı rüzgarların özelliklerinde ve etkileri de yer yer farklar belirir. Çoğu zaman aynı sisteme ait rüzgarlar, farklı bölgelerde farklı isimle anılırlar.

Genel hava dolaşımının sebep olduğu yerel rüzgarların yanı sıra, tümüyle yerel nedenlerden doğan dar alanlı fakat tipik yerel rüzgarlar da doğabilir.

### 2.4.1. Genel Hava Dolaşımına Bağlı Yerel Rüzgarlar

Yeryüzündeki rüzgar sistemleri içinde genellikle hakim bir rüzgar yönü ve hava tipinden söz edilebilir. Ancak bu sistemin hiç değişmediğinden söz etmek mümkün değildir. Dünyanın en belirli ve sürekli rüzgarları olan alizeler de bile süreklilik % 60–90 arasındadır. Batı rüzgarları kuşağında bu süreklilik % 30–60 arasındadır. Hakim rüzgarların esmediği veya zayıfladığı dönemlerde yerel etkilerle doğmuş basınç farkları, genel hava akımında bazı değişiklikler yaparak, yerel özellikleri belirgin rüzgarların esmesine sebep olur (Erol, 1993).

#### 2.4.1.1. Orta Enlemdeki Gezici Siklonların Doğurduğu Yerel Rüzgarlar

Orta enlemdeki polar cephe boyunca gelişerek batıdan doğuya doğru hareket eden gezici alçak basınçlar, genellikle kutup yönünden yani kuzey yarımkürede kuzeyden soğuk, güneyden sıcak rüzgar çekerler.

Gezici siklonlar kışın Akdeniz boyunca batıdan doğuya doğru hareket ederlerse genellikle kuzey Afrika'dan sıcak, Avrupa'dan soğuk hava kütleleri çeker. Bu sıralarda rüzgarlar oldukça hızlıdır, fırtına halinde eser. Kuzey rüzgarları kar ve yağmur getirir.

Akdeniz'deki sıcak yerel rüzgarlar gezici bir alçak basıncın sıcak kesimini oluşturmak üzere genellikle güney yönlerden, yani güneydoğu, güney ve güney

batıdan eserler. Bu şartlar altındaki Batı Akdeniz'deki güney rüzgarları Büyük Sahra'dan doğar. Onun için bu rüzgarlar sıcak, kurak ve toz yüklüdür.

Anadolu'da, güney ve güneydoğudan esen sıcak ve kuru rüzgarlara samyeli denir. Bu rüzgarlar çöllerden doğmayıp, denizlerden doğarsa Akdeniz kuzeyindeki güney Anadolu, Ege, Kıbrıs ve Ege adalarına doğru lodos adı verilen, sıcak fakat nemli rüzgarlar halini alır. Lodos kıyıda yağış bıraktığı zaman Anadolu içlerinde, sıcak fakat rüzgar halinde olur.

Anadolu'da kışın kuzey yönlerden ve özellikle güneyden geçen derin bir siklonun soğuk kesiminde esen karayel, yıldız ve poyraz rüzgarları önemli etkiler yapar. Karayel ve yıldız özellikle Karadeniz ve kısmen de Marmara'da kar ve yağmurla karışık güçlü bir fırtına meydana getirirler.

Akdeniz'de yazın hava şartları kıştan çok farklı olduğu için yaz rüzgarları da kış rüzgarlarından farklıdır. Yaz aylarında oluşarak Batı Avrupa üzerinden Karadeniz'e ulaşan rüzgarlar, Anadolu üzerinde ters S harfine benzer bir yol izlerler. Bu rüzgarlara yaz poyrazı denir. Ege Denizi'nden yazın poyraz benzeri rüzgarlar tam kuzeyden eserler. Bunlara meltem denir (Erol, 1993).

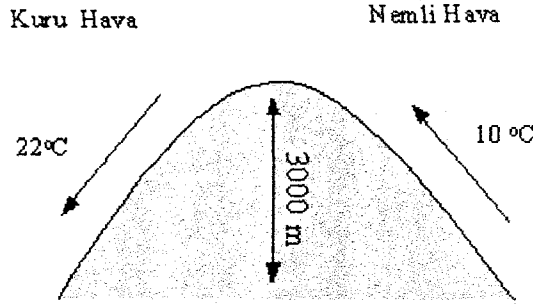
#### 2.4.1.2. Föhn Rüzgarları

Föhn rüzgarları dağ yamaçlarında veya başka nedenlerle alçaldıkları için adyabatik ısınmaya bağlı olarak doğmuş sıcak ve kuru havalardır. Bu rüzgarlar etkileriyle dikkati çekerler. Kış mevsiminde estikleri zaman çevre sıcaklığını bir iki saat içerisinde  $10-15^{\circ}\text{C}$  artırır, kısa zamanda karları eritir. Karların hızlı erimesi çığlara ve su baskınlarına sebep olur. Daha ılık mevsimlerde çevreyi kurutarak çayırılık ve orman yangınlarına, yazın ise mahsulün erken kuruyup sararmasına neden olur.

Klasik föhn rüzgarı, nemli hava kütlelerinin yüksek bir dağ sırasını aşması sonucunda ortaya çıkar. Dağın her iki yamacında basınç farkı mevcutsa föhn oluşur.

Bu tipin en klasik örneği Alplerin kuzey eteğinde olur. Dağın yamacında yükselen nemli hava her yüz metrede  $0.44^{\circ}$  sıcaklık kaybeder. 3000 metreye

yükselince  $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa iner. Nemin büyük bir bölümü yağış ve yoğunlaşma ile kaybedilmiştir. Bu hava kütlesi kuzey yamaçta alçalırken her yüz metrede  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ısınır. Eteklere ininceye kadar  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  kadar ısınır (Erol, 1993).



Şekil 2. 4 Föhn Rüzgarının Oluşumu

Antisiklon föhnleri ise yüksek basınç sahalarında hava kütlelerinin, dağların dış yamaçları boyunca alçalması ve çevreye doğru uzaklaşması sonucunda meydana gelir. Antisiklon föhnü, gradyan föhnün aksine dağın her iki yamacında da görülür. Isınma üst kısımlardan başladığı için yüksek yamaçlarda da hissedilir (Erinç, 1996).

Türkiye’de Kuzey Anadolu Dağlarının kuzey yamaçlarında, özellikle iç bölgelerde bir antisiklon egemen olduğu dönemlerde batıdan bir alçak basınç yaklaştığı zaman föhn rüzgarı eser. Bu rüzgarlar Sinop’tan Rize’nin doğusuna kadar çok belirgindir. Anadolu’nun güney kıyılarında da kuzey kadar belirgin olmasa da föhn rüzgarları eser. İç Anadolu’da Sultan Dağlarını aşan güney-güney batı rüzgarları, Akşehir ve Konya ovalarında sıcak ve kurutucu bir etki yapar.

#### 2.4.2. Yerel Sebeplerle Doğan Yerel Rüzgarlar

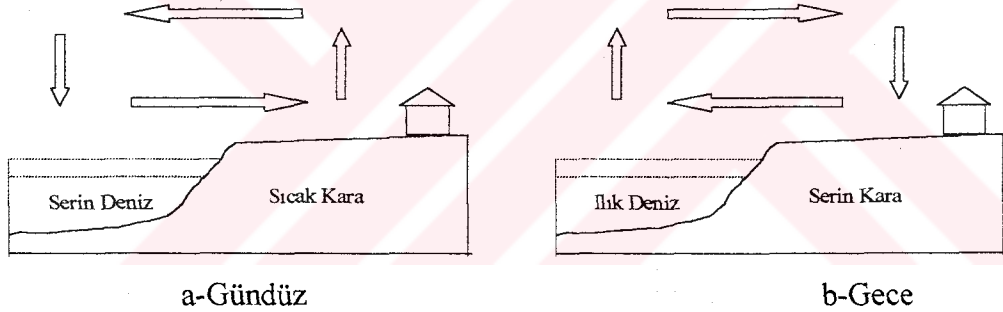
Atmosferdeki genel hava dolaşım sisteminin etkisinin zayıf olduğu durgun kuşaklarda veya o sisteme ait rüzgarların esmediği zamanlarda, yer şekillerinin farklı ısınıp soğumasından kaynaklanan kısa süreli ve dar alanlı yerel rüzgarlar doğar. Bu rüzgarlar genellikle gündüz ve gece arasındaki ısı farklarına bağlıdır. Onun için günlük rüzgarlar olarak da bilinir.

### 2.4.2.1. Günlük Kara ve Deniz Rüzgarları

Karalar, denizlere nispeten daha çabuk ve hızlı ısınır, daha çabuk soğuyan yerler olduğundan havanın durgun bulunduğu ekvator kuşağında ve orta enlemlerde, yaz aylarında gündüz denizden karalara, gecede karalardan denizlere rüzgarlar eser.

Gündüzleri karalar, özellikle öğlene doğru fazla ısınır. Buralarda denizlere göre alçak basınç oluşur. Isınan hava yükselirken yerini denizlerden gelen daha serin havaya bırakır. Bu hava hareketi denizden karaya doğrudur. Sebepleri yerel olduğu için meltemlerin kara içlerinde etkisi 20-40 km'den öteye gitmez. Asıl etkisi 3-5 km kadardır. Yerden 200-300 m yüksekliğe kadar hissedilirler.

Akşam saatlerinde karalar serinler. Bu kez deniz üzerinde alçak basınç oluşur. Rüzgar karadan denize doğru eser. Kara rüzgarı denilen rüzgarın denizdeki etki alanı azdır. Yükseklerde hissedilmezler (Erol,1993).



Şekil 2. 5 Deniz ve Kara Rüzgarlarının Meydana Gelmesi

Deniz meltemleri serin olduğu için estikleri karalar üzerinde sıcaklığın fazla yükselmesini önler, hatta birkaç derecede düşürürler. Yazın İzmit Körfezi kıyılarında bu durum gerçekleşir. Deniz meltemleri imbat adıyla da bilinir (Erinç, 1996).

Yurdumuzda Giresun, Sinop, Antalya ve Ege Bölgesinde bu rüzgarlar etkilidir. Rüzgar türbinin kule yüksekliğinin 20-70 m arasında olduğu dikkate alınırsa, bu rüzgarlar enerji üretimi açısından önemli sayılır.

#### 2.4.2.2. Yeryüzü Şekillerine Bağlı Günlük Rüzgarlar

Yer şekillerinin farklı ısınmaları günlük rüzgarlara neden olurlar. Bunlar dağ ve vadi rüzgarları ile ve onlara benzeyen yamaç ve drenaj rüzgarlarıdır.

Yan yana bulunan dağlar ile çukur bölgeler günlük ısınıp soğuma bakımından bir birine oranla farklı özellikler gösterirler. Yamaçlar genellikle aynı seviyedeki serbest atmosfer katmanlarına göre gündüzleri fazla ısınır. Bu ısınma sebebiyle öğleden sonraları yamaç yukarı hafif bir rüzgar doğar. Gece ise çevreye oranla daha fazla serinleyen yamaçlardan aşağı doğru bir rüzgar doğar. Bu rüzgarlara yamaç rüzgarları denir.

Yamaç rüzgarları dağlar ve ovaların farklı ısınmalarından doğan gradyana bağlı nedenlerden de doğabilirler. Ovalar gündüzleri fazla ısınır. Isınan yamaçlarında yardımıyla hava yamaç yukarı hareket eder. Geceleri ise tam tersi olur. Bunlara denkleşme rüzgarları denir.

Günlük değişime gösteren bu rüzgarlar vadiler içerisine kanalize olduğu zaman daha belirgin özellik kazanırlar (Erol, 1993).

#### 2.4.2.3. Ağırlaştırma Rüzgarları

Aşırı soğuk platolar veya iç buzulların üstünden, çevredeki çukur alanlara doğru soğuyup ağırlaşma sonucu olan tek yönlü rüzgarlardır. Bu rüzgarlar özellikle Antartika ve Grönland gibi iç buzul bölgelerin kenarlarında görülür.

Platolardaki soğumalar gibi yazın çukur ovalarda dar alanlı bir yerde havanın fazla ısınması ve hızla yükselmesinden doğan küçük hava girdapları görülür. İç Anadolu'da sıkça görülen bu girdaplar 200-300 m yer değiştirdikten sonra kaybolur.

## BÖLÜM 3

### RÜZGARIN ÖLÇÜLMESİ VE RÜZGAR ÖLÇEN ALETLER

#### 3.1. Yeryüzüne Yakın Rüzgarın Ölçülmesi

Enerji üretiminde yerden 100 metreye kadar olan rüzgarlardan faydalandığı için, yeryüzüne yakın rüzgarların ölçülmesi bu açıdan önemlidir. Bu rüzgarlar yıllarca DMİ tarafından ölçülmüştür. Bu ölçümler, zirai, askeri ve genel meteorolojik amaçlı olarak yapılmıştır. Günümüzde enerji üretmek amacıyla belli noktalarda rüzgar ölçümü yapılmaktadır. EİE bu amaçla belli yerlerde rüzgar ölçümleri yapmıştır. Tablo 3.1’de bu ölçüm merkezleri ve ölçüm sonuçları yer almaktadır.

**Tablo 3. 1.** EİE Tarafından Yapılan Rüzgar Ölçümleri (EİE, 2000)

| İstasyon  | 1   | 2   | 3    | 4   | 5   | 6    | 7    | 8    | 9    | 10  | 11  | 12   |
|-----------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|------|
| Nurdağı   | 3.8 | 4.7 | 4.5  | 4.0 | --- | 11.4 | 13.7 | 13.7 | 10.7 | 4.8 | 3.3 | 3.2  |
| Belen     | 5.4 | 4.6 | 4.7  | 5.1 | 6.2 | 8.7  | 11.0 | 11.0 | 8.3  | 5.3 | 5.0 | 4.5  |
| Akhisar   | 5.8 | 6.5 | 7.9  | 5.3 | 5.7 | 6.5  | 10.0 | 8.4  | 4.8  | 6.7 | 4.8 | 6.7  |
| Didim     | 5.4 | 5.2 | 5.7  | 4.7 | 3.7 | 4.3  | 5.3  | 4.5  | 4.0  | 4.1 | 4.8 | 5.5  |
| Kocadağ   | 9.5 | 9.4 | 10.0 | 7.1 | 7.4 | 7.2  | 10.3 | 8.3  | 6.4  | 8.3 | 8.3 | 10.6 |
| Datça     | 5.4 | 5.8 | 5.6  | 5.5 | 5.2 | 5.9  | 7.8  | 8.3  | 6.2  | 5.9 | 5.0 | 4.9  |
| Bandırma  | 5.5 | 5.6 | 6.9  | --- | --- | ---  | 6.9  | 5.4  | 4.1  | 6.4 | 6.8 | 5.7  |
| Karabiga  | 7.6 | 6.9 | 7.2  | 5.3 | 5.3 | 5.1  | 6.7  | 7.2  | 6.4  | 7.1 | 6.7 | 6.9  |
| Gökçeada  | 8.4 | 7.9 | 7.8  | 5.4 | 6.2 | 5.3  | 7.4  | 6.5  | 5.8  | 7.3 | 6.8 | 8.3  |
| Söke      | 4.2 | 4.4 | 4.5  | 3.4 | 3.8 | 6.4  | 6.7  | 6.5  | 3.0  | 3.6 | 3.2 | 3.5  |
| Sinop     | 5.7 | 4.8 | 4.6  | 5.5 | 4.4 | 4.9  | 5.3  | 3.8  | 4.6  | 4.4 | 4.5 | 4.4  |
| Yalıkavak | 6.0 | 7.7 | 6.8  | 7.8 | 5.7 | 5.8  | 6.9  | 6.6  | 5.5  | 5.2 | 5.3 | 7.0  |

Ticari firmalara rüzgar santrali kurma izni verilmesiyle birlikte bir çok firma gerekli izinleri alarak rüzgar ölçümüne başlamıştır. 6 ay veya 1 yıl boyunca

yapılan ölçümler o bölgenin rüzgar santrali kurmak için uygun yer olup olmadığının belirlenmesinde, eğer uygun ise santral gücünün tayininde kullanılmaktadır.

### 3.2. Rüzgar Hızının Ölçülmesi ve Tahmin Edilmesi

#### 3.2.1. Rüzgar Hızının Ölçülmesi

Rüzgar, genelde yatay veya yataya yakın yer değiştiren hava kütesinin hareketidir. Vektörel bir kuvvet olup, iki özelliği ölçülebilmektedir. Bunlar hızı ve yönüdür. Ayrıca kaydedilmiş sonuçların değerlendirilmesiyle rüzgarın esme sıklığı (frekans) tayin edilebilir.

Rüzgar hızı ölçümleri genelde 2 ve 10 m standart yükseklikte yapılır. Meteorolojik amaçlı olarak her iki yükseklikte ölçüm yapılmaktadır. Ticari amaçlı ölçümler 10 m yükseklikte yapılmaktadır. Aletler açık bir arazide kurulmalı, etrafında rüzgarı önleyen engeller bulunmamalıdır. Engeller rüzgarın hızını azaltmakta ve yönünü değiştirmektedir.

Rüzgar hızları metre/ saniye (m/sn), kilometre/saat (km/h) ve knots olarak ifade edilir. Bu hız birimleri arasında şu bağıntılar vardır:

$$1 \text{ m/sn} = 3,6 \text{ km/h} = 1,94 \text{ knots},$$

$$1 \text{ km/h} = 0,28 \text{ m/sn} = 0,54 \text{ knots},$$

$$1 \text{ knots} = 0,51 \text{ m/sn} = 1,85 \text{ km/h}$$

Rüzgar hızının ölçülmesi için mekanik ve elektronik cihazlar kullanılmaktadır. Bunların bazıları sabit tesis şeklindeyken, bazıları da taşınabilir (mobil) yapıdadır (Meteoroloji, 1985).

#### 3.2.2. Rüzgar Hızının Tahmini

Rüzgar hızının ölçülmesi için gerekli aletler mevcut değilse rüzgarın tabiatındaki etkilerine bakarak hızını yaklaşık olarak tahmin etmek mümkündür.

Tablo 2.1'de bofor değerleri yer almaktadır. Bu değerlere göre rüzgar hızı řu formüllerle hesaplanır.

$$V = 1,624 \sqrt{B^3} \quad (\text{knots cinsinden}),$$

$$V = 0,836 \sqrt{B^3} \quad (\text{m/sn cinsinden})$$

**Tablo 3. 2.** Bofor lęi (Waat, 1992)

| Bofor No | Rüzgar Adı           | Rüzgar Hızı (km/h) | Doęadaki Etkisi                                                               |
|----------|----------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 0        | Sakin                | 0                  | Duman dikey olarak yükselir.                                                  |
| 1        | Esinti               | 1-5                | Dumanın yönü rüzgarın yönünü gösterir.                                        |
| 2        | Hafif meltem         | 6-11               | Rüzgar yüzde hissedilir, yapraklar hışırdar.                                  |
| 3        | Tatlı meltem         | 12-19              | Yapraklar ve ince dallar sürekli hareket eder, bayraklar dalgalanmaya başlar. |
| 4        | Orta meltem          | 20-29              | Toz ve kağıt parçaları havalanır, küçük ağaç dalları hareket eder.            |
| 5        | Serin meltem         | 30-39              | Küçük ağaçlar sallanır, gllerde küçük dalgalar oluşur.                       |
| 6        | Kuvvetli meltem      | 40-50              | Ağaçların büyük dalları hareket eder, şemsiye kullanmak zorlaşır.             |
| 7        | Fırtınamsı rüzgar    | 51-61              | Bütün ağaçlar sallanır, rüzgara karşı yürümek zorlaşır.                       |
| 8        | Fırtına              | 62-74              | Ağaç daları kırılır, rüzgara karşı yürümek çok zordur.                        |
| 9        | Kuvvetli fırtına     | 75-87              | Evlerin bacaları, çatı kiremitleri uçar.                                      |
| 10       | Tam fırtına          | 88-101             | Ağaçlar köklerinden sklr, binalar zarar görür.                             |
| 11       | ok şiddetli fırtına | 102-117            | ok seyrek görülür, büyük hasarlara neden olur.                               |
| 12       | Kasırğa              | 118 >              | Toplu yıkım, afet.                                                            |

### 3.3. Rüzgar Ölçen Aletler

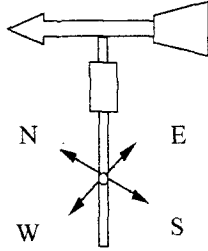
Rüzgar hızının ve yönünün tahminle ölçülmesi görünüşe dayandığı için hata payı yüksek olmaktadır. Bu nedenle hızın ve yönün kesin tespiti için alet kullanma ihtiyacı ortaya çıkmış ve ilk defa 1667 yılında rüzgar hızı aletle ölçülmüştür. Günümüzde bu aletler gelişme göstermiş, elektronik sistemlerin devreye girmesiyle çok hassas aletler yapılmıştır.

Rüzgar ölçen aletler şu şekilde sınıflandırılabilir:

- a) *Anemometreler* : Sallanabilen tablalı anemometre (Jüriet), kepçeli anemometre, pervaneli anemometre ve geliştirilmiş tip anemometreler.
- b) *Anemograflar* : Mekanik anemograflar, elektrikli anemograflar ve elektronik anemograflar.

#### 3.3.1. Jüriet (Sallanabilen Tablalı Anemometre)

İlk defa 1667 yılında Robert Hoeke tarafından imal edilmiştir. En basit rüzgar aletidir. Rüzgarın yönü ve hızı bofor kuvveti şeklinde tespit edilir. 3 ana kısmı vardır. Bunlar; kuvvet levhası, yön göstergesi ve yön işaretleridir. Ayrıca aletin toprağa sabitlenmesini sağlayan mesnet borusu vardır (Meteoroloji, 1985).



Şekil 3. 1 Rüzgar Oku

#### 3.3.2. Kepçeli Sabit Anemometre

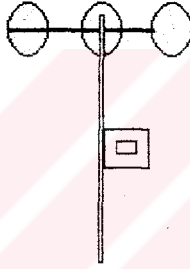
Jüriete göre daha hassas ölçüm yapabilen, daha gelişmiş bir alettir. Rüzgarın hızını ve yönünü direkt olarak ölçmeye yarar. İki ana bölümü vardır. Bunlar

anemometre ve jüriet kısımlarıdır.  $\pm 0,5$  m/sn hassasiyetle ölçüm yapılabilir. Sabit tesislerde 2 m yüksekliğinde olacak şekilde monte edilir.

Anemometre kısmının üç kollu, yarım konik kepçeleri vardır. Rüzgar hızını ölçen kısımdır. Kepçeler rüzgar etkisiyle dönerler. Kepçelere bağlı sonsuz vida mili, dişliler ve numaratoründen oluşur.

Jüriet kısmı rüzgar yönünü ölçmede kullanılır. Bir mil etrafında dönen tek plakalı bir kuyruk ve ek kısmı ile rulmanlardan meydana gelmiştir.

Aletin kepçeleri rüzgarın etkisiyle eksenini etrafında dönebilecek şekilde yapılmıştır. Kepçeler rüzgarın şiddetine uygun olarak dönerler. Bu dönme hareketiyle kepçelerin bağlı bulunduğu sonsuz dişli vida milini döndürür. Bu vida da karşısındaki dişliyi ve buna bağlı numaratorü döndürür.



Şekil 3. 2 Kepçeli Anemometre

**Ölçme İşlemi :** Her hangi bir başlangıç anında numarator değeri okunur ve kaydedilir. 10 dakika sonra yeni değerler okunur. Aradaki fark 60'a bölünerek m/sn cinsinden hız bulunur (Meteoroloji, 1985).

### 3.3.3. Kepçeli El Anemometresi

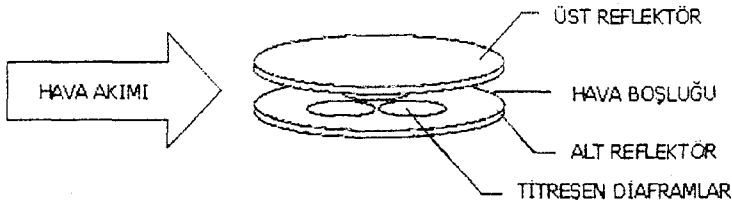
Yapı olarak sabit anemometreye benzer fakat daha küçük ebatlıdır. Seyyar olarak ölçme amaçlı kullanılır. El anemometresinde hız m / sn veya knot cinsinden doğrudan doğruya okunabilir. Yere dik konumda tutularak ölçüm yapılmalıdır (Meteoroloji, 1985).

### 3.3.4. Geliştirilmiş Tip Anemometreler

Rüzgarın enerji hammaddesi olarak kullanılmaya başlanmasından sonra, ticari amaçla yapılacak rüzgar ölçümleri önem kazanmıştır. Rüzgarlı tepelerde sürekli ölçüm yapmak ve kaydetmek amacıyla sürekli personel gerektirmeyen veya sonuçları uzaktan algılanabilen anemometreler geliştirilmiştir. Bu cihazlar küçük bir DC kaynakla beslenmekte, kayıtları belli aralıklarla alınmaktadır.

Bu anemometrelerin en gelişmiş örneklerinden biri ultrasonik anemometredir. Ölçüm sonuçları gsm teknolojisi ile kontrol noktasına ulaştırılmakta burada kaydedilmektedir. Beslenmesi için küçük bir güneş paneli yeterli olmaktadır. Yapısı ve çalışması basit olarak anlatılacaktır.

Ölçme sistemde birbirine paralel iki tabaka bulunmaktadır. Bu tabakaların üstü yansıtıcılar ile kaplıdır. Yatay düzlemde hava hiçbir engel ile karşılaşmadan iki tabakanın arasına girmektedir. Dikey olarak hava girişi yansıtıcılar tarafından engellenmekte, düşey rüzgar hızları ölçülmemektedir. Plakalar arasından geçen rüzgar akustik dalgalar meydana getirmektedir. Bu dalgalar plakaların üzerinde bulunan piezoelektrik elamanlardan oluşan diyafram sistemi tarafından algılanmaktadır. Diyaframlar üçgen biçimde yerleştirilmiştir. Ultra ses bu diyaframın yüzeyinden geçerek üst yansıtıcıya çarpmakta ve burada hemen hemen kayıpsız bir yansıma gerçekleşmektedir. Bu şekilde, enerji kayıplarıyla dalgalanma tamamen sönene kadar birbirini takip eden iki yüz kadar yansıma gerçekleşmektedir. Dar bir frekans bandı üzerinde yaşanan birim yansımalar faz olarak bütünlük oluşturarak sinyal gücünde çok büyük bir artışa sebep olur. Rezonans etkisi sürdüğü sürece rüzgar hızı ile ölçülen faz arasındaki bağıntı lineer olarak devam eder (www.aresenerji.com, 2002).



Şekil 3.3 Ultrasonik Anemometrenin Ölçme Sistemi



Resim 3.1. Ultrasonik Anemometre

### 3.3.5. Mekanik Anemograf

Mekanik anemograf rüzgarın yönünü, saatte ortalama hızını ve rüzgar hızındaki dalgalanmaları yani hamleyi yazarak ölçen bir alettir. Mekanik anemograflar 1,5 m/sn'den daha büyük hızları  $\pm 0,5$  m/sn'lik hassasiyetle ölçebilirler.

Mekanik anemograf iki ana bölümden oluşur.

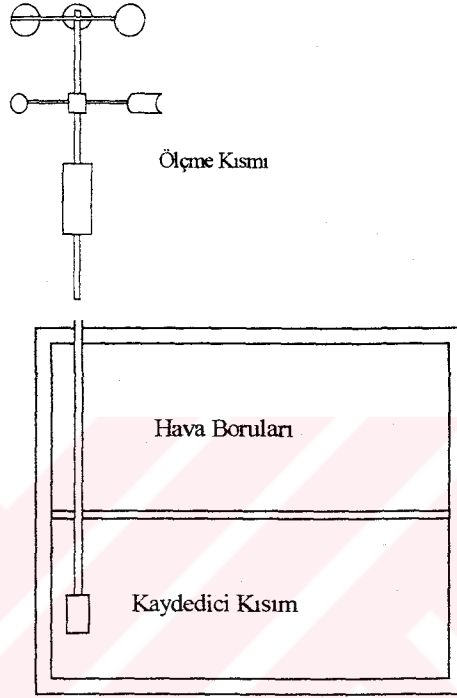
- Ölçme kısmı,
- Kaydedici kısım,

bunların dışında hareket çubukları, hava boruları ve taşıyıcı mesnet borusu vardır.

**Ölçme kısmı :** Bu kısım ölçmenin yapıldığı kısımdır. Anemometreye benzer. Kepçe ve jüriet elamanları vardır. Kepçeler 3 adet yarım küreden oluşmuştur. Kepçeler aralarında  $120^\circ$  açı bulunan kolla, sonunda sonsuz vida bulunan bir mile bağlıdır. Kepçeler genelde alüminyumdan yapılmıştır. Kepçelerin dönme hareketi sonsuz vida vasıtasıyla dişli donanuma iletilir. Bu hareket, hareket çubuğu vasıtasıyla kaydedici kısma iletilir.

**Jüriet :** Çift plakalı bir kuyruk ve bunu dengeleyen bir ağırlıktan ibarettir. Rüzgar etkisiyle kendi eksenini etrafında  $360^\circ$  dönebilir. Rüzgarın esme yönü dişli donanım yardımıyla kaydedici bölüme iletilir. Jürietin delikli ucundan giren hava, hava boruları vasıtasıyla kaydedici kısma iletilir.

**Kaydedici kısım :** Ölçme kısmından gelen bilgilerin kağıt üzerine kaydedildiği kısımdır. Bu kısımda kağıt diyagramın sarıldığı bir silindir parçasının içersinde zaman saati vardır. Bu kısım bir günde 360° dönecek şekilde yapılmıştır. Diyagram üzerine kalemle hız ve yön çizilir. kalemlemin çalışması için gerekli mekanik düzenekler mevcuttur (Meteoroloji, 1985).



Şekil 3. 4 Bina üzerine Kurulu Sabit Mekanik Anemograf

### 3.3.6. Elektrikli Anemograf

Yapı olarak mekanik anemografa benzer. Mekanik anemografla bilgiler sadece bir yere verilebilmekteydi. Halbuki hava limanlarında bilginin uçuş kulesi, meteoroloji istasyonu gibi birden çok yere iletilmesi gereklidir.

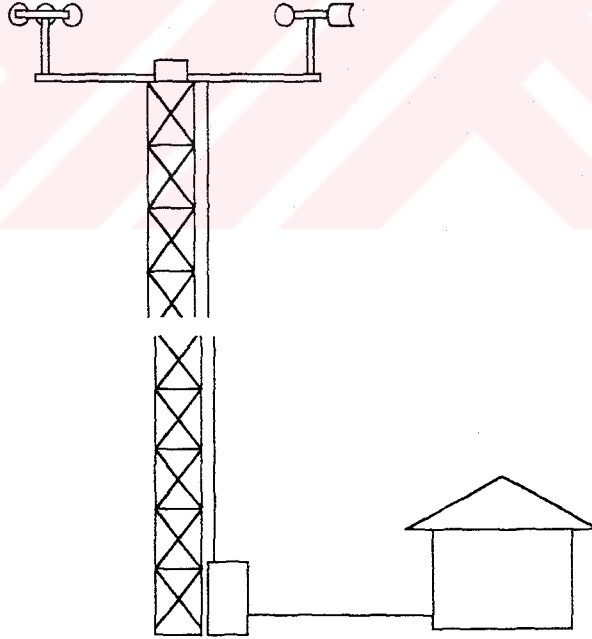
Bu alette ölçme kısmına küçük bir hız ölçer jeneratör (tako jeneratör) ve dağıtım motoru ilave edilmiştir. Kepçelerin dönmesiyle tako jeneratör de dönerek hızla orantılı bir gerilim üretir. Üretilen ac gerilim, doğrultucu tarafından dc

gerilime çevrilerek, dağıtım kutusuna aktarılır. Buradan, bilgi istenen noktalara bunlar dağıtım kutusundan iletilir.

Dağıtım motoru 36 dilimli kollektöre sahiptir. Her dilime ayrı bir direnç bağlıdır. Jürietin dönmesiyle dağıtım motoru aynı yönde döner. Fırçaların temas ettiği dilimlere göre dirençler devreye girer. Direnç değerine göre de gerilim ayarlanır. Gerilim bilgisi dağıtım tablosundan gerekli yerlere ulaştırılır (Meteoroloji, 1985).

### 3.3.7. Elektronik Anemograf

Bu cihaz rüzgar hızı ve yönündeki ani değerleri, 2 ve 10 dakikalık ortalama değerleri, mekanik göstergelerde doğrudan gösteren ve yazılı olarak kaydedebilen bir yapıdadır. Aletin iki ana bölümü vardır. Ölçme kısmı, göstergeler ve kaydedici kısım.



Şekil 3. 5 Elektronik Anemografin Sensörlerinin Kule Üzerine Yerleştirilmesi

**Ölçme kısmı :** Bu kısımda hız ve yön sensörleri bulunur. Hız sensörü: rüzgar hızıyla dönen 3 adet plastik kepçe ve elektronik devreden oluşur. Yön sensörü ise rüzgarın esme yönüne göre hareket eden bir jüriet ve onun bağlı bulunduğu gövdeden oluşur. İki sensör aynı direk üzerine, birbirinden 10-15 m uzaklıkta yerleştirilir.

Sensörlerden gelen iletkenler bir bağlantı kutusuna gelir. Bu kutuda sensörleri besleyen dc güç kaynağı, sensörlerden gelen gerilim bilgisini frekans bilgisine dönüştüren konvürtörler bulunur.

**Göstergeler ve yazıcı kısım :**Bağlantı kutusundan gelen bilgiler burada rüzgarın hızını, yönünü ve hamlesini gösteren analog ölçü aletlerinden okunur. Aynı bilgiler mikroişlemci tarafından kaydedilir. Bilgilerin dökümü bir bilgisayar tarafından yapılır (Meteoroloji, 1985).



## BÖLÜM 4

### RÜZGAR MİLLERİ TEKNOLOJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

#### 4.1. Rüzgar Gücünden Faydalanmanın Tarihi

Rüzgar enerjisi kullanımı günümüzden çok öncelere dayanmaktadır. Sanılanın aksine ilk defa, Asya medeniyetlerinden olan Çin, Tibet, Hindistan, Afganistan ve İran'da kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca M.Ö.700 yıllarında Farslıların düşey eksenli rüzgar türbinlerini kullandığı ispatlanmıştır (Durak, 2000).

Eski zamanlarda rüzgarın kinetik enerjisi gemilerin yüzdürülmesi için kullanılmıştır. Rüzgar millerine ait ilk bilgilere Arap yazıtlarında rastlanmıştır. Pers ve Afgan kitabelerinde de bu konuda bilgilere rastlanmıştır (El-Wakil, 1984).

Rüzgar gücü kullanımı Asya'dan Avrupa'ya 10. yy. civarında geçmiştir. O dönemlerde ve hala günümüzde bir çok ülkede çiftçiler tarafından kullanılan rüzgar milleri, daha çok kuyulardan su çekmek ve tahıl öğütmek amacıyla yönelik olarak kullanılmıştır.

Endüstri devrimi ile beraber 18.yy'da buhar makinelerinin ortaya çıkması sonucu dünya, enerji gücünün temini için termodinamik işlemlere dayanan makinelerden yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların kullanımı bu makineleri daha avantajlı duruma getirmiştir. İstenildiği zaman enerji sağladıkları için rüzgar enerjisinden daha popüler hale gelmiştir. Bu yüzden 19.yy'da ve 20.yy'ın ortalarına kadar rüzgar enerjisinin önemi azalmıştır. Sadece Amerika, Rusya ve Avusturalya gibi nüfusu dağınık olarak bulunan ülkelerde çiftçiler tarafından kullanılmıştır (Durak, 2000).

#### 4.2. Rüzgar Millerinin Gelişimi

Rüzgar türbinlerinin ilk uygulamaları olan rüzgar milleri çok eski zamanlardan beri kullanılmasına rağmen elektrik üretim amacıyla kullanımları

ancak 100 yıllık bir geçmişe sahiptir. Elektrik enerjisi üretimini amacıyla kullanılan türbinlerdeki önemli gelişmeler son 20-25 yıla rastlar. Bu sebeple günümüz teknolojilerine geçmeden önce 1980'li yıllara kadar olan gelişmeleri gözden geçirip daha sonra yeni teknolojileri incelemek daha doğru olacaktır.

#### 4.2.1. Dikey Eksenli Rüzgar Milleri

Bunlar ilk makinelerdir. Çoğu zaman Persion (Fars) rüzgar mili olarak da geçer. Gemiler için geliştirilmiştir. Önceleri çadır bezinden daha sonrada tahtadan yapılan yelkenler büyük tekerlere takılmıştır. Yelkene uygulanan rüzgar basıncı tekerlerin dönmesini sağlar. Dikey bir mile takılı teker genellikle değirmen taşı döndürür ve tahılları öğütürerek un yapar. Benzer miller 13.yy'da Çin'de de kullanılmıştır. Deniz suyunu ayrıştırarak tuz elde etmek için kullanılmıştır. Daha sonraları Kırım'da, Avrupa'da, ABD'de kullanılmıştır. Bunlardan bir kaç günümüze kadar gelmiştir.

Dikey eksenli millerin en başarılı örneklerinden biri Finlandiya'nın Savonius'u olarak adlandırılmıştır. Savonius mili tekli veya çoklu S şeklinde yelkenden ve bir dikey eksenenden oluşur. Dikey eksenli diğer miller Madaras ve Darrieus milleridir.

Dikey eksenli makinelerin bir üstünlüğü de; rüzgarın yönüne göre yalpalama ayarına gerek kalmadan ayarlanabilir olmasıdır (El-Wakil, 1984).

#### 4.2.2. Yatay Eksenli Rüzgar Milleri

Rüzgar milleri fikri Avrupa'ya gelince dikey eksenli miller yerini dikey tekerli, yatay eksenli şekillere bıraktılar. İlk örnekler bir kazık üzerine monte edilmiştir, herhangi bir rüzgar yönüne yüzeyini döndürebilirdi. Dikey tekerler dişlilerin içersindeki dikey mili döndürür. Bu tip makineler ilk olarak Fransa ve İngiltere'de 20. yüzyılın sonlarına doğru kullanılmaya başlandı. Bu miller Avrupa ve ABD'de geliştirilerek değişik modelleri 20.yy ortalarına doğru tahılları öğütmek, akıtma, pompalama ve testere mili olarak kullanılmıştır.

Hollanda'da deniz seviyesindeki geniş araziler devamlı su baskını tehdidi altındadırlar. Rüzgar milleri bu suları tarlalardan kanallara akıtarak oradan da denize ulaştırır (El-Wakil, 1984).

#### 4.3. Elektrik Enerjisi Üretimi Amacıyla Yapılan İlk Çalışmalar

Rüzgar gücünden elektrik enerjisi üretmeyi düşünen ilk kişi olan Poul La Cour Askov (1946-1908) Danimarka'da yaşamıştır. La Cour aslında meteoroloji eğitimi almış bir kişidir. Rüzgardan elektrik üreten ilk türbini 1891 yılında yapmıştır (Vosburgh, 1983' den Durak, 2000). La Cour aynı zamanda aerodinamik alanında yaptığı çalışmalar ile tanınmıştır. Bazı teorik deneyler için rüzgar tüneline de ilk defa o kullanmıştır. Askov FolkHigh School'da 1897 yılında yaptığı türbin 89 W gücündeydi (Durak, 2000).

Birinci Dünya Savaşından sonra rüzgar türbinleri uçak pervanelerinde olduğu gibi çok kollu tiplere dönüştürülmüştür. Bunlara propeller tipi rüzgar mili veya türbini adı verilir. 1931'de Kırım'da yapılan rüzgar mili düşük gerilimli elektrik üretmekte ve doğrudan doğruya mahalli bir şebekeyi beslemekteydi. Dönen kollu millerin çalışmaları ABD'de yapıldı ve 1940'larda Smith –Putman makinesi olarak adlandırılan büyük rüzgar mili meşhur aerodinamikçi Smith – Putman ve asistanı Theodore Von Karman tarafından tasarlandı. S.Mergen Company tarafından Pensilvanya yakınlarında Grandpa Knop Dağında 610 m yükseklikte kurulan santral 1,25 MW AC kurulu güce sahipti. Türbin mili tek kollu olarak 55 m çapında yapılmıştı. Propeller tipi türbin 16 ton ağırlığa ve 28 m/sn hıza sahipti. 34 metrelik kule üzerine monte edilmişti. 1945 yılında bu türbinin dönen kollarından biri göbeğe yakın yerden koptu. Bu kolun zayıflığı daha önceden tahmin edilmiş fakat savaş sebebiyle güçlendirilmemişti. Daha sonra bu projeden vazgeçilmiştir. Çünkü tamir edilse bile kömür veya su santrali gibi ekonomik değildi (El-Wakil, 1984).

La Coure 'nin ilk öğrencilerinden olan J.Juule 1950'lerde dünyada kullanılmaya başlanan AC üreten jeneratörlerin öncüsü olmuştur. Daha sonra 1956-57 yıllarında 200 kW gücünde ilk Gedser rüzgar türbini, Juule tarafından

Gedser'de SEAS elektrik şirketi için yapılmıştır. Gedser türbini ilk modern uygulama olarak kabul edilir.

1960'lı yıllardan sonra rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ekonomik nedenlerle azalma göstermiştir. 1970 petrol krizinden sonra, gelişmiş ülkelerin tekrar alternatif enerji kaynaklarına yönelmesi sebebiyle türbin teknolojisi yeniden gelişmeye başlamıştır (Durak, 2000).

#### 4.4. Kollu Rüzgar Türbinlerinin Gelişimi Çalışmaları

ABD'de NASA'nın önderliğinde yapılan çalışmalar sonucunda üç nesil türbin geliştirildi. İlk nesil türbinler MOD 0 adıyla bilindi. 100 kW gücünde ve 30 km/h hıza sahip bu makine 1975 de Ohio 'da Sandusky yakınlarında denendi. Bu türbinin devreye giriş hızı 13 km/h, devreden çıkma hızı 240km/h ve rotor dönme hızı 40 d/d olarak tasarlanmıştı. Rotor gövdesi 30 metrelik bir kule üzerine monte edilmişti. Büyük dişli oranı 45/1, alternatör ağırlığı 645 kg, 1800d/d hızdaki gücü 125 kVA idi. Maliyeti 5000 \$/kW, toplam maliyeti 500 000 \$ kadardı (Stephenson, 1986).

MOD 0'ın bir üst modeli olan MOD 0A 200 kW gücünde yapıldı. 1977-80 yılları arasında denendiler. Bu serinin en başarılı uygulaması Hawai'de kurulan türbindir. Bu türbin % 45 yük faktörü altında, haziran 1980, kasım 1981 yılları arasında 1,14 GWh enerji üretmiştir. MOD 0 türbinlerini, tek örneği 1979 da Güney Corilina'da inşa edilen MOD 1 takip etmiştir.

Birinci nesil makineler arazi uygulamaları için prototip olarak yapılmış, performansları, aerodinamik güçleri test edilmiş, buradan elde edilen bilgilerle ikinci nesil türbinler yapılmıştır.

İkinci nesil makineler olan MOD2'ler, 2 kollu pervanelere sahip üst rüzgarlı türbinlerdi. 2.5 MW gücünde olup, 61 m yüksekliğinde silindirik bir kule üzerine monte edilmişti. Orta göbek çıkıntısız olan kanatlar 91 m çapa sahipti. Devreye giriş, nominal ve devreden çıkış hızları sırasıyla 6.3, 12.3, 20.1 m/sn'dir. Bu seriden 5 türbin yapılmıştır. Türbinlerin üçü Washington, Goldendale'de 1980-

81 yıllarında inşa edilmiştir. Diğer bir türbin 1981'de Wyoming, Medicine Bow'da, sonuncusu da 1982 de California, Solano County'de kurulmuştur.

MOD5 olarak isimlendirilen üçüncü nesil makineler 1982'de dizayn edildi. Bu türbinler ileri multimegawatt sistemiyle yapıldılar. Maliyetleri ikinci nesil türbinlere göre %30 daha ucuzdur. Bu türbinlerden 2 adet yapılmıştır. Çift kollu ve üst rüzgarlı olarak yapılmışlardır. MOD 5A, 122 m rotor çapına ve 6.2 MW güce sahipti. MOD 5B ise 128 m rotor çapına ve 7.2 MW güce sahipti. Bu türbinler çift hızlı ve değişebilir hız işlemli olup, pervane kanatları kaplama ağaçtan yapılmıştı (El-Wakil, 1984).

#### 4.5. Madaras Rotorlu Rüzgar Makinesi Denemesi

Magnus etkisine göre göre çalışan madaras rotorlu güç santrali 1912'de J.D. Madaras tarafından icat edildi. Detroit Edison Şirketi tarafından 1933'de New Jersey'de bir pilot modeli kuruldu.

Mevcut rüzgar içinde kendi eksenini etrafında dönen birkaç uzun dikey silindirden meydana gelmiştir. Kaldırma ve itme kuvvetinin bileşkesi daha çok kaldırma kuvveti yönünde olur. Çünkü onun değeri daha büyüktür. Kaldırma kuvveti silindiri yatay bir ray sistemi üzerinde hareket ettirirdi.

Madaras tarafından tasarlanan güç santrali, daire şeklinde bir tren rayı ve bunun üzerindeki 4 tekerli düz bir arabadan oluşmuştur. Her araba, dakikada 120 devir yapan küçük bir motor ve 27 m boyundaki dikey eksenli silindirden meydana gelmişti. Her bir silindirde oluşan bileşke kuvvet, dairesel ray üzerinde arabaların dönmesini sağlardı. Kuvvetin yönünü tur boyuca aynı tutabilmek için her turda silindirin dönüş yönü iki kez ters döndürülürdü. Dönen tekerler elektrik jeneratörünü döndürürdü.

Bu sistem daha test edilmeden güçlü bir rüzgarda yıkıldı. Birkaç milyon dolar ve zaman kaybına sebep oldu (El-Wakil, 1984).

Madaras ve Putman'ın makinelerinin büyük maddi desteklere rağmen başarısız olması rüzgar türbinleri projelerinin 1970 enerji krizine kadar yavaşlamasına sebep oldu (Stephenson, 1986).

#### 4.6. Darrieus Türbinlerinin Gelişimi

Darrieus rüzgar türbinleri Georges Darrieus tarafından geliştirilmiş ve 1920'de patent alınmıştır  $\Phi$  ve  $\Delta$  şeklinde iki tipi vardır  $\Phi$  darrieuslar hem küçük, hem de büyük güçlü türbin olarak modern makinelerden farklı, eski persion türbinlerindeki gibi dikey eksenlidir. Bu türbin şekil olarak yumurtaya benzer. Kanat ve pervanesi yoktur. İki veya üç kolu, birbirine alttan ve üstten bağlanarak dikey bir eksen etrafında dönmesi sağlanır.

Darrieus türbinleri her türlü rüzgar yönünde dönebilme avantajına sahipti. Sarsıntı kontrol ünitesine ihtiyaç göstermezdi. Dikey eksenli güç elde etmek için bir pompaya yada bir elektrik jeneratörüne bağlanabilirdi.

Darrieus'un fikirleri DOE için Sandia Laboratuvarları tarafından araştırıldı. 1980' lerde test amaçlı olarak birkaç makine yapıldı. Bunlardan biri Texas, Bushland'da derin kuyulardan sulama yapmak amacıyla kullanıldı. Türbinin 11 m çapında iki kanadı ve 17 m yüksekliği vardı. 42 kW gücünde olup 13 m/sn hızında çalışırdı. Bu türbin 85 m derinlikten dakikada 128 litre su çekebilmekteydi. Pompa hızı dizel motor veya bir elektrik motoruyla çalışan bir pompa ünitesi tarafından sabit tutulurdu (El-Wakil, 1984).

#### 4.7. Türbin Rotorundaki Gelişmeler

Kanatlar üzerindeki ilk çalışmalar helikopter kanat araştırmaları sonuçları kullanılarak yapıldı. Bu makinelerin rotorları helikopter rotorundan daha geniş fakat kontrol üniteleri daha basittir. Kanat malzemeleri zamanla değişmektedir. Çelik, alüminyum, fiberglas, kaplama ağaç ve çelik alaşımlı çubuklar kullanılmıştır (El-Wakil, 1984).

Günümüzde kompozit bir malzeme olan karbon elyafı takviyeli plastikten yapılan rotorlar kullanılmaktadır (Özdamar, 2000) .

## BÖLÜM 5

### RÜZGAR GÜCÜNE AİT HESAPLAMALAR VE FORMÜLLER

#### 5.1. Toplam Güç

Rüzgar akımının toplam gücü,

$$P_{top} = m.KE_i = m.\frac{v_i^2}{2g_c} \quad (5.1)$$

olur. Burada;

$P_{top}$  : Toplam rüzgar gücü (W),

$m$  : Kütle akış oranı (kg/sn),

$v_i$  : Akışkan hızı(m/sn) ,

$g_c$  : Konversion faktörü (1kg/N.sn<sup>2</sup>)

değerlerini gösterir. Kütle akış oranı şu denklemle bulunur;

$$m = \rho.A.v_i \quad (5.2)$$

Bu ifade de;

$\rho$  : Gelen rüzgarın yoğunluğu (kg /m<sup>3</sup>) ,

$A$  : Rüzgara karşı gelen alan (m<sup>2</sup>)

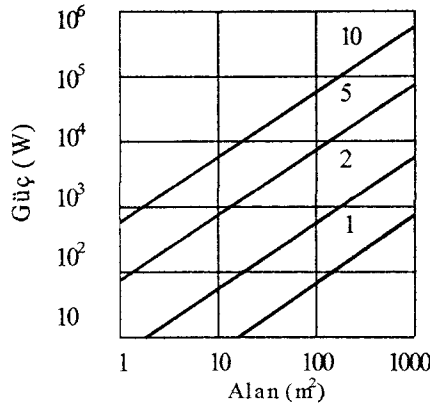
değerlerini göstermektedir. Bu durumda denklem

$$P_{top} = \frac{1}{2.g_c} \rho.A.v_i^3 \quad (5.3)$$

şeklini alır. Bu ifadeden rüzgar akımının toplam gücünün yoğunluk, alan ve hızın küpüyle orantılı olduğu görülür (Esposito, 1998 ve El-Wakil, 1984).

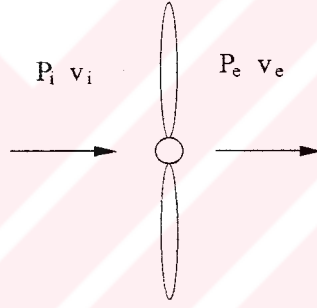
#### 5.2. Maksimum Güç

Toplam rüzgar gücünün tamamen mekanik enerjiye dönüştürülemeyeceği bilinmektedir. Günümüzde en yaygın türbin olan yatay eksenli üst rüzgarlı propeller tipi türbini göz önüne alarak, toplam gücün ne kadarının mekanik enerjiye dönüşebileceğini inceleyelim.



Şekil 5. 1 Alanın ( $m^2$ ) ve Hızın ( $m/sn$ ) Fonksiyonu Olarak Güç Değeri.

Gelen rüzgarın basıncı  $P_i$ , hızı  $v_i$ , giden rüzgar basıncı  $P_e$ , hızı  $v_e$  olursa  $v_e < v_i$  olur. Çünkü türbin gelen rüzgarın kinetik enerjisinin bir bölümünü alır.



Şekil 5. 2 Çok Kanatlı Türbinde Basınç ve Hız

Bir termodinamik sistemdeki gibi i ve a arasındaki gelen havayı göz önüne alalım. Hava yoğunluğunu sabit kabul edersek potansiyel enerjideki değişim 0 olur. i ve a arasında herhangi bir iş veya ısı ilave edilmez ve çıkarılmaz. Genel enerji denklemi sadece kinetik ve akış enerjisi terimleriyle değişir.

Enerji denklemleri;

$$P_i \cdot v + \frac{v_i^2}{2g_c} = P_a \cdot v + \frac{v_a^2}{2g_c} \quad (5.4.a)$$

veya

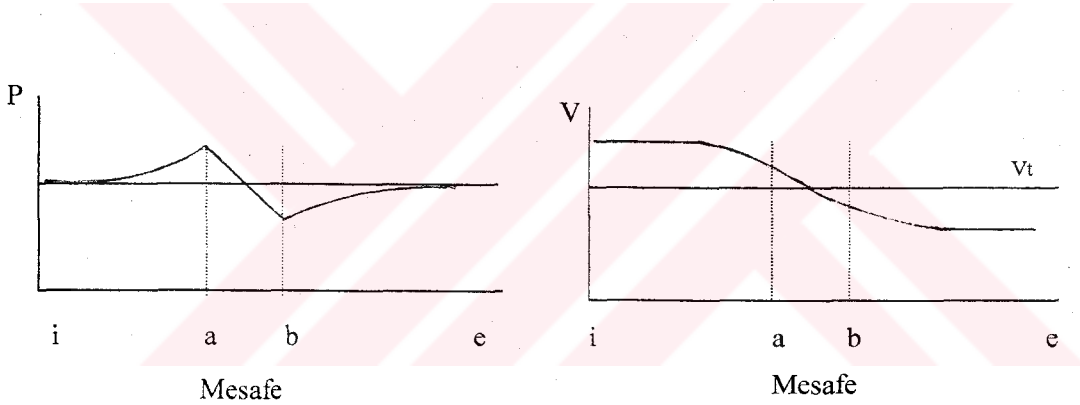
$$P_i + \rho \frac{v_i^2}{2g_c} = P_a + \rho \frac{v_a^2}{2g_c} \quad (5.4.b)$$

şeklinde yazılabilir. Denklemlerde yer alan  $v$  ve  $\rho$  belli değerlerdir. Birbirinin karşılığıdır. Yoğunluk ikisinde de sabittir. Denk. (5.4.b) Bernouilli denklemine benzer.

Türbinden sonraki b – e arası için de benzer denklem yazılabilir.

$$P_e + \rho \frac{v_e^2}{2g_c} = P_b + \rho \frac{v_b^2}{2g_c} \quad (5.5)$$

Rüzgar hızı a ve b arasında düşer. Çünkü kinetik enerjinin bir bölümü mekanik enerjiye dönüşmüştür. Gelen rüzgarın hızı  $v_i$  birdenbire azalmaz, türbine yaklaşırken  $v_a$ , türbinden uzaklaşırken de  $v_e$  değerine düşer. Şekil 5.3 den de görüldüğü gibi,  $v_i > v_a$  ve  $v_b > v_e$  olur. Aynı şekilden  $P_a > P_i$  ve  $P_b < P_e$  olduğu da görülür. Bunun anlamı şudur: Rüzgar basıncı türbin kanatlarına gelirken artar, kanatları terk ederken azalır.



Şekil 5.3 Çok Kanatlı Türbinde Hız ve Basınç Hareketinin Değişimi

Denk. (5.4) ve (5.5) birleştirilirse,

$$P_a - P_b = (P_i + \rho \frac{v_i^2 - v_a^2}{2g_c}) - (P_e + \rho \frac{v_e^2 - v_b^2}{2g_c}) \quad (5.6)$$

elde edilir. Şu kabulü yapmak mantıklı olur; türbinden uzaktaki e noktasında rüzgar basıncı çevre basıncıyla aynı olur. Öyleyse,

$$P_e = P_i \quad (5.7)$$

şeklinde yazılabilir. Türbindeki hız,  $v_t$  değişmez. Çünkü a-b arasındaki mesafe toplam mesafeye göre oldukça küçük sayılır. Bu yüzden,

$$v_i \approx v_a \approx v_b \quad (5.8)$$

yazılabilir. Denk. (5.8) deki kabule göre denk. (5.6) yeniden düzenlenirse,

$$P_a - P_b = \rho \left( \frac{v_i^2 - v_e^2}{2g_c} \right) \quad (5.9)$$

elde edilir.

$F_x$  eksenel kuvvet akışa dik olarak hesaplanan A alanına bağlı olarak, rüzgar akışının yönünde

$$F_x = (P_a - P_b).A = \rho.A \left( \frac{v_i^2 - v_e^2}{2g_c} \right) \quad (5.10)$$

şeklinde bulunur. Bu kuvvet ayrıca,  $\Delta(m.v) / g_c$  şeklinde ifade edilen rüzgarın momentumundaki değişime de eşittir. Burada m ;

$$m = \rho.v_t \quad (5.11)$$

şeklinde verilen kütle akış oranına eşittir. Böylece

$$F_x = \frac{1}{g_c} \rho A v_t (v_i - v_e) \quad (5.12)$$

şekline gelir. Denk.(5.10) ve (5.12) eşitlenirse,

$$v_t = \frac{1}{2} (v_i + v_e) \quad (5.13)$$

bulunur.

Şimdi i ve e ile sınırlandırılmış termodinamik sistemi göz önüne alalım. Potansiyel enerjideki değişim 0 civarındadır. Bunun yanı sıra iç enerji  $T_i = T_e$ , akış enerjisi  $P_i.v = P_e.v$  değerleri de eşittir. Her hangi bir ısı artışı veya azalması yoktur.

Genel enerji denkleminde W işi sabit akımla azalır. Kinetik enerji terimleri,

$$W = K.E_i - K.E_e = \frac{v_i^2 - v_e^2}{2g_c} \quad (5.14)$$

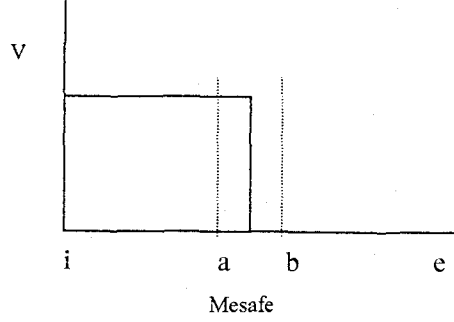
şekline gelir. Denk.(5.11) kullanılarak P gücü,

$$P = m \frac{v_i^2 - v_e^2}{2g_c} = \frac{1}{2g_c} \rho A v_t (v_i^2 - v_e^2) \quad (5.15)$$

şeklinde yazılabilir. Denk.(5.13) deki  $v_t$  ifadesi bu denklemde yerine yazılırsa,

$$P = \frac{1}{4g_c} \rho A (v_i + v_e)(v_i^2 - v_e^2) \quad (5.16)$$

elde edilir.  $v_i = v_i$  ve  $v_e = 0$  olduğu zaman,  $P_{top}$  için denk.(5.15), denk.(5.3)'e dönüşmüş olur. Burada gelen rüzgar türbini terk ettikten sonra tam bir durgunluğa kavuşur. Bu durumda kinetik enerjinin işe dönüşümü şekil 5.4'deki gibi olmalıdır. Ancak bu imkansızdır. Çünkü türbini terk eden rüzgar biriktirilemez.



Şekil 5. 4 Gelen Rüzgarın Kinetik Enerjisinin Tamamen İşe Dönüşmesi

Denk. (5.16)'dan da görüldüğü gibi,  $v_e$  nin bir terimi pozitif, diğer terimi negatiftir.  $v_e$  nin çok büyük ve çok küçük değerlerinde güç azalır. Denk.(5.16)'nın diferansiyeli alınarak, bulunacak olan  $v_{eopt}$  değerinde maksimum güç  $P_{max}$  elde edilir.  $dP/dv_e = 0$  alınarak  $v_e$  hızı,  $v_i$  cinsinden bulunur.

$$3.v_e^2 + 2.v_i.v_e - v_i^2 = 0$$

Bu eşitlik pozitif bir  $v_e$  değeri için çözülürse ,

$$v_{eopt} = \frac{1}{3} v_i \quad (5.17)$$

olarak bulunur. Bu ifade denk.(5.16)'da yerine yazılırsa ,

$$P_{max} = \frac{8}{27g_c} \rho . A . v_i^3 \quad (5.18)$$

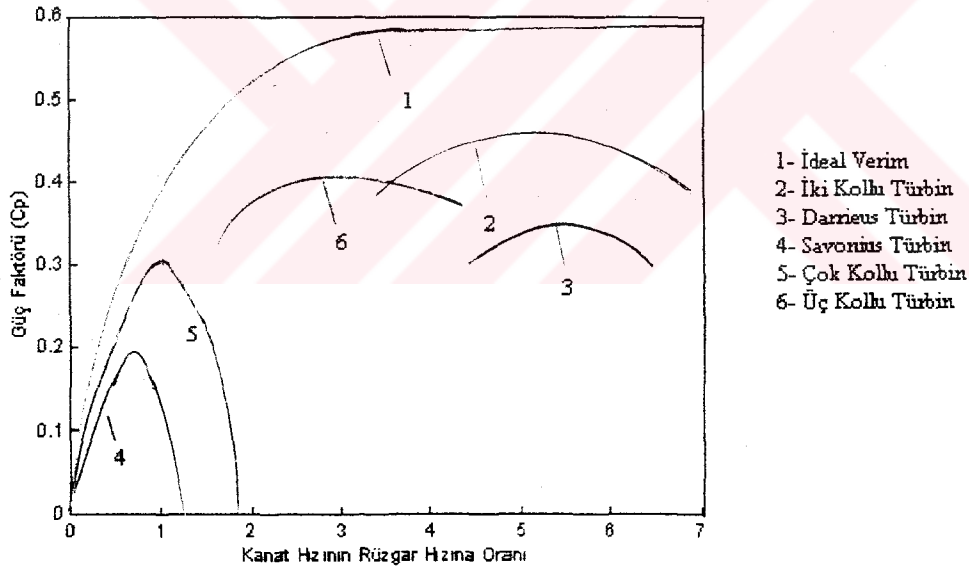
elde edilir. Denk.(5.18)'de elde edilen maksimum gücün, denk.(5.3)'de bulunan toplam güce oranı rüzgar türbinin maksimum veya teorik verimini verir. Bu değere  $C_p$  güç faktörü de denir.

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{top}} = \frac{8}{27g_c} . 2g_c = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (5.19)$$

Bu sonuç açıkça gösterir ki, bir rüzgar türbini kullanılabilir gücün en fazla % 60' ını faydalı enerjiye dönüştürür. Bu sonuç değere Bentz limiti de denir (Esposito, 1998 ve El-Wakil, 1984).

### 5.3. Gerçek Güç

Rüzgar türbinin kanatları gaz veya buhar türbinindeki kanatlar gibi, kanat hızlarına ve açılara bağlı olarak incelenebilir. Kanatlar buhar veya gaz türbini kanatlarından daha uzun olduğu için değişim daha fazla olur. Bütün kanat boyunca ideal şartlar sağlanırsa denk.(5.19)'da bulunan teorik verime ulaşılır. Propeller tipi türbinlerde maksimum verim olan % 60 değerine ancak maksimum kanat hızında ulaşılabilir. Uç noktadaki kanat hızı bazen rüzgar hızının 6 –7 katı olabilir, fakat kısa sürede 2 katına iner.



Şekil 5. 5 Kanat Ucu Hızının Rüzgar Hızına Oranına Göre Güç Faktörleri

Rüzgar türbini kanatları tamamen kapatılamadığından savrulmadan, ve diğer etkilerden dolayı pratikte türbinler ideal verimin % 50-70 oranına çıkabilirler. Gerçek verim  $\eta$  gerçek gücün, toplam güce oranıdır. Gerçek güç,

$$P = \eta . P_{top} = \eta . \frac{1}{2g_c} \rho . A . v_i^3 \quad (5.20)$$

şeklinde bulunur. Burada  $\eta$ , % 30 – 40 arasındadır (Esposito, 1998 ve El-Wakil, 1984)

#### 5.4. Kanatlardaki Kuvvet

Çok kollu rüzgar türbininin kanatlarına iki tür kuvvet etki eder. Biri kolların dönme yönünde olan ve moment üreten döndürme kuvveti, diğeri de rüzgar akımının yönünde olan ve aksenal itme sağlayan aksenal kuvvettir. Bu kuvvetler uygun tasarlanmış bir türbinde denge içerisinde bulunur.

Döndürme kuvveti veya moment,

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\pi . D . N} \quad (5.21)$$

şeklinde bulunur. Burada,

M = Moment (N),

$\omega$  = Türbin rotorunun açısal hızı (m/sn),

D = Türbin rotorunun çapı (m),

N = Rotor devri (d/sn)

şeklinde ifade edilmiştir. P gücündeki bir türbini döndürmek için gerekli moment,

$$M = \eta . \frac{1}{8g_c} \frac{\rho . D . v_i^3}{N} \quad (5.22)$$

ifadesiyle bulunur. Maksimum türbin verimi  $\eta_{max} = 16/27$  olduğundan, türbini maksimum verimde çalıştırmak için gerekli moment;

$$M_{max} = \frac{2}{27g_c} \frac{\rho . D . v_i^3}{N} \quad (5.23)$$

olur. Aksenal kuvveti veren denk.(10) aşağıdaki gibi düzenlenebilir;

$$F_x = \frac{1}{2g_c} \rho . A . (v_i^2 - v_e^2) = \frac{\pi}{8g_c} \rho . D^2 . (v_i^2 - v_e^2) \quad (5.10)$$

Türbini döndüren aksenal kuvvetin  $v_e = (1/3) . v_i$  olduğu zaman maksimum olduğu denk.(5.17)'de bulunmuştur.

$$F_{x\max} = \frac{4}{9g_c} \rho \cdot A \cdot v_i^2 = \frac{\pi}{9g_c} \rho \cdot D^2 \cdot v_i^2 \quad (5.24)$$

Dönmeyi sağlayan aksenal kuvvet kanat çapının karesiyle orantılıdır. Türbin kanat çapını çok büyük yapmak her zaman kolay değildir. Maliyet ve dizayn zorluğu çapın çok büyük olmasını sınırlar (El-Wakil, 1985).

**Problem 5.1 :** 15 °C ve 1 atmosfer basınç altında 10 m/sn hızdaki rüzgarın;

- Toplam güç yoğunluğunu,
- Elde edilebilecek maksimum güç yoğunluğunu,
- W/m<sup>2</sup> olarak gerçek güç yoğunluğunu ,
- 40 m çapındaki türbinde elde edilebilecek toplam gücü bulalım.

**Çözüm :** Hava için gaz sabiti R:287 J/ kg.K, 1 atm=1,01325x10<sup>5</sup> Pa olduğuna göre havanın yoğunluğu ,

$$\rho = \frac{P}{R.T} = \frac{1,01325 \times 10^5}{287(15 + 273,15)} = 1,226 \text{ kg/m}^3 \text{ olarak bulunur.}$$

a) Denk.(5.3)'den

$$\frac{P_{top}}{A} = \frac{1}{2g_c} \rho \cdot v_i^3 = \frac{1}{2 \times 1} \times 1,226 \times 10^3 = 613 \text{ W/m}^2$$

b) Denk.(5.18)'den

$$\frac{P_{\max}}{A} = \frac{8}{27 \cdot g_c} \rho \cdot v_i^3 = \frac{8}{27 \times 1} \times 1,226 \times 10^3 = 363 \text{ W/m}^2$$

c) Türbin verimi  $\eta = 0,4$  alınırsa,

$$\frac{P}{A} = 0,4 \cdot \frac{P_{top}}{A} = 0,4 \times 613 = 245 \text{ W/m}^2$$

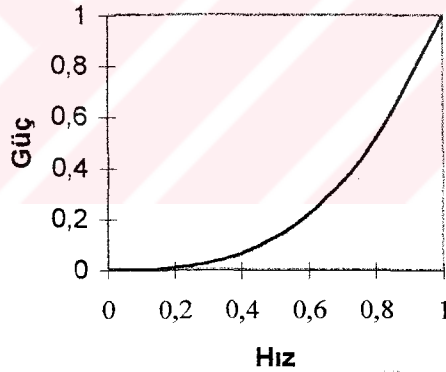
$$d) \quad P = 0,4 \cdot P_{top} \cdot A = 0,245 \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 0,245 \times \frac{\pi 40^2}{4} = 307,72 \text{ kW}$$

bulunur.

### 5.5. Rüzgar Türbini İşlemleri ve Yük Faktörü

Denklem (5.18) ve (5.20) incelendiği zaman bir rüzgar türbininin üreteceği gücün hızın küpüne ve pervane çapına bağlı olduğu görülür. Hızdaki %20 azalma, gücü % 50 azaltır. Makine kayıpları hızdan bağımsız olduğu için güçteki azalma aslında daha fazla olur. Düşük hızlarda kayıplar yüzde olarak daha büyük orana sahip olurlar. Verim düşer.

Gelen rüzgarın hızındaki değişiklikler sebebiyle güçte önemli değişiklikler kaçınılmazdır. Bu değişimler kanatlarda önemli burkulmalara sebep olur. Ekonomik açıdan bakılırsa tüm türbinler maksimum veya maksimuma yakın verim elde etmek üzere tasarlanmıştır. Rüzgar her zaman beklenen hızda esmediği için türbinler daha düşük verimle çalışmak zorunda kalırlar. Bu sebeple yüksek hızlara göre tasarlanmış türbinlerle düşük hızlarda enerji elde etmek pahalıdır. Onun için büyük güçlü tek türbin yerine küçük güçlü birkaç türbin kullanmak, bu yolla verimi sabite yakın tutmak mümkündür.



Şekil 5. 6 Sabit Verimde P-V Eğrisi

Düşük hızlardan kaynaklanan verim düşüklüğü problemini azaltmak için rüzgar türbinleri düşük hızlarda da çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Yüksek hızdaki rüzgarların zararlarından korunmak için, devreden çıkma düzeneği bulunmalıdır. Türbin dönmeye başlama hızı ile devreden çıkma hızı arasında her hızda çalışabilmelidir.

içersindeki üretim kapasitesine oranına yük faktörü veya kapasite faktörü denir. Burada üretim kapasitesi ortalama hıza göre belirlenir. Toplam üretimi düşüren diğer sebeplerde, bakım, onarım gibi işletme problemleridir. Ortalama yük faktörü %30-40 arasındadır (El-Wakil, 1984).

### 5.6. Enerji ve Rüzgar Hızının Ortalaması

Rüzgar gücü, potansiyeli belirli bir süre içersinde ölçülen ortalama rüzgar hızı  $v$  yardımıyla bulunabilir;

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (5.25)$$

Burada;  $\sum_{i=1}^n v_i$  rüzgar hızları toplamıdır. Güç santralleri ortalama rüzgar hızları değerlerine göre de sınıflandırılabilir. Hız olarak  $v_e$  ortalama enerji hızı esas alınırsa daha doğru sonuçlar alınır.

$$v_e = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n v_i^3}{n} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.26)$$

Ortalama enerji hızı  $v_e$  nin, ortalama hız  $v$  ye oranı incelenen hızın dağılımına bağlıdır. Belirli bir süre için bulunan ortalama hız değeri bilinen uzun dönem ortalama hız değerinden farklı olabilir (El-Wakil, 1984).

### 5.7. Referans Yükseklikte Ölçülen Hızın Başka Yüksekliklere Taşınması

Gerek ticari, gerekse meteorolojik amaçlı rüzgar ölçümlerinin 10 m standart yükseklikte yapıldığı 3. bölümde belirtilmişti. Yeryüzü şekillerinin sürtünme sebebiyle rüzgar hızını azalttığı 2. bölümde sürtünme etkisi başlığı altında açıklanmıştı. Yerden yükseldikçe bu etkinin azaldığı, rüzgar hızının yükseklerde arttığı gene aynı bölümde belirtilmişti.

Rüzgar türbinleri 25-100 m yüksekliğindeki kule üzerine monte edildiğinden, türbinler hesaplamalarında bu yükseklikteki hızların kullanılması gerekir. Bu sebeple standart yükseklikte ölçülen hızlar, bu yükseklikteki hızlara dönüştürülür. Her hangi bir yükseklikteki hız;

$$v_x = v_r \left( \frac{H_x}{H_r} \right)^\mu \quad (5.27)$$

şeklinde bulunur. Bu formülde,

$v_r$  = Referans yükseklikte ölçülen hız,

$H_r$  = Referans yükseklik,

$H_x$  = Hızı hesaplanacak yükseklik,

$\mu$  = Helimann katsayısı

olarak ifade edilir.  $\mu$  katsayısı formülle bulunmak istenirse;

$$\mu = \mu_o \left( 1 - \frac{\log v_r}{\log v_o} \right) \quad (5.28)$$

$$\mu_o = \left( \frac{z_o}{H_r} \right)^{0,2} \quad (5.29)$$

denklemleri kullanılır. Bu denklemlerde,

$z_o$  = Pürüzlülük katsayısı,

$v_o$  = sabit olarak 67.1 m /sn

olarak alınır (El-Wakil, 1984).

$\mu$  katsayısı farklı ortamlar için hesaplanarak tablo haline de getirilmiştir. Hesaplamalarda tablo değerleri kullanmak daha pratik olmaktadır (Özdamar, 2001).

**Tablo 5.1. Hellman Katsayısı**

| Ölçüm yeri                   | $\mu$ |
|------------------------------|-------|
| Açık deniz, kıyı şeridi      | 0,14  |
| Açık alan, tarlalar          | 0,18  |
| Ağaçlık alan, yerleşim alanı | 0,28  |
| Yüksek binalı yerleşim alanı | 0,4   |

## BÖLÜM 6

### RÜZGAR TÜRBİNLERİ

#### 6.1. Rüzgar Türbini

Tahrik edilen kısmı, dönme hareketi yapan ve bir akışkanda bulunan enerjiyi, milinde mekanik enerjiye dönüştüren makinelere türbin denir. Türbinler en genel halde; buhar, gaz, su ve rüzgar türbinleri olarak dört grupta incelenirler. Rüzgar türbinleri ile ilgili tanımlamalar farklı kaynaklarda birbirleriyle çalışmaktadırlar (Özdamar, 2001).

Bu konudaki en genel tanımlama şu şekildedir: Rüzgar enerjisinden faydalanarak mekanik veya elektrik enerjisi elde etmeye yarayan makinelere rüzgar türbini denir. Türbinlerin üç ana bölümü vardır. Bunlar türbin gövdesi, pervaneler ve kuledir.

Pervane kanatları, pervane göbeği (hub) ve pervane milinin tamamına rotor da denir. Pervane mili dişli kutusuna bağlıdır. Dişli kutusunu jeneratöre bağlayan mile de jeneratör mili denir. Rüzgar türbinlerinde kullanılan jeneratörlere aerogeneratör denir. Jeneratör, dişli kutusu ve fren düzenekleri tekne de denilen gövde içersinde bulunur. Gövde, çelikten yapılmıştır. Gövde titreşim gürültülerini ve dişli seslerini azaltmak için iç kısımdan yalıtılır (Ültanır, 1996).

Bunların tümü kule tarafından taşınır. Kule ile yer bağlantısı da temel vasıtasıyla sağlanır. Tüm bu elamanlara genel halde rüzgar enerjisi tesisi adı verilir. Buna rağmen yerli ve yabancı literatürde rüzgar enerjisi tesisi yerine, rüzgar türbini denilmesi alışkanlık olmuştur (Özdamar, 2001).

Yeni teknolojiler ile yapılmış sistemlere WECS (Rüzgar enerjisi çevrim sistemleri denir. Küçük makinelere ise SWECS denir (Ültanır, 1996).

Türbin tiplerinin üretici firma adı ile anılması bir gelenek olmuştur. Bazı firmalar isim sonuna ekledikleri rakamlarla rotor çaplarını belirtirken, bazı firmalar da nominal güçleri belirtmektedirler. Örneğin Enercon 40 türbinin kanat çapı 40 m'dir, Tache TW 600' ün nominal gücü 600 kW'tır.

## 6.2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbini teknolojisi her geçen gün gelişmekte, yenilenmektedir. Bu gelişim henüz tamamlanmamıştır. Bu yüzden herkes tarafından kabul görebilecek bir sınıflandırma yapmak zordur. Birçok kaynakta farklı özelliklerine göre sınıflandırmalar yapılmıştır. Her kaynak kaleme alındığı günün teknolojisine göre bir sınıflandırma yapılmıştır. Önce, literatürdeki bu farklı sınıflandırmalardan bazılarını aktarıp; daha sonra, genel kabul görebilecek bir sınıflandırma yapılmaya çalışılacaktır.

Rüzgar türbinleri; direnç veya kaldırma kuvvetinden yararlanmalarına göre, pervane ekseninin yatay veya düşey olmasına göre veya aynı rüzgar hızındaki devir sayılarına göre sınıflandırılabilirler.

Direnç kuvvetinden faydalanan türbinlerde rüzgara karşı bir yüzey tutulur ve rüzgar basıncından dönme hareketi oluşur. Örnek olarak kepçe tipi anemometreler, Fars çarkı ve Savonius türbini gösterilebilir. Direnç kuvvetinden yararlanan türbinler, pistonlu pompalar ile su pompalanması gibi yüksek moment gereken yerlerde kullanılırlar ve elektrik üretimi gibi yüksek güç gereken alanlarda kullanılmazlar.

Kaldırma kuvvetinden yararlanan türbinlerde rüzgar; yüzeye belli bir açıyla gelir ve yüzeye etki eden hava hızının doğrultusuna dik olarak oluşan kaldırma kuvveti, dönme hareketine dönüşür. Yüzey öncesinde yüksek basınç, yüzey arkasında ise alçak basınç oluşmaktadır. Örnek olarak, düşey eksenli Darrius türbini ve kanatlı, yatay eksenli rüzgar türbinleri (propeller türbin) gösterilebilir.

Rüzgar türbinleri nominal güçlerine göre de; 5 kW'a kadar olanlar küçük güçlü, 5 kW 'ın üstü ise büyük güçlü rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılırlar (Hanus B.1997 den; Özdamar, 2001).

Rüzgar türbinleri büyük ve küçük türbinler olarak sınıflandırılırlar. Küçük olanların gücü 100 kW'tan azdır. Bunlar genellikle belli bir bölgede, o bölgenin ihtiyacını karşılamak için kullanılırlar. Küçük makinelerin kullanımı için en önemli faktör rüzgarın özelliklerini iyi belirlemek ve rüzgar yönünde en uygun noktayı bulmaktır. Büyük türbinlerin gücü 100 kW veya daha fazladır. Bunlar

büyük enerji şebekelerine bağlı olup, üretimleri bu şebeke üzerinden dağıtılır. Yerleşimleri farklı şekilde olabilir. Geniş coğrafi alanlar kullanılabilir. Asıl amaç şebekeye sağladığı gücün maliyetinin en az olmasıdır (El-Wakil, 1984).

Yenilenebilir enerjiye verilen önem bir çok ülkede araştırmaya yönelik çalışmaları hızlandırmıştır. Bu çalışmalar sonucu her geçen gün rüzgar türbinlerinin yeni modelleri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle sınıflandırmadan daha çok günümüzde kullanılan rüzgar türbinlerinin çeşitleri olarak adlandırılabilir. Bu çeşitler aşağıda sıralanmaktadır.

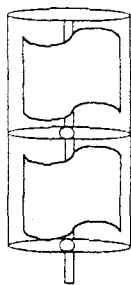
Devirlerine göre; düşük devirli ve yüksek devirli rüzgar türbinleri. Konumlarına göre ise, yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinleri ( Le Gourieres,1982'den ; Avşar, 2001).

Türbinler hız özelliklerine göre değişken ve sabit hızlı türbinler olarak ikiye ayrılırlar. Sabit hızlı türbinlerin rotor devirleri 30, 34, 35, 43 d/d düzeyindedir. Değişken hızlı rotorlarda ise bu değerler 15 - 44 d/d, 18 - 39 d/d, 36 -45 d/d, 40 -46 d/d, 58 -72 d/d arasındadır. Değişken hızlarda senkron, sabit hızlılarda indüksiyon jeneratörleri kullanılır (Ültanır, 1996) .

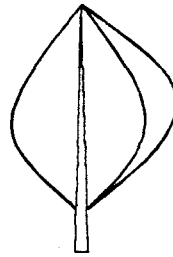
Literatürdeki bu farklı görüşleri bir arada değerlendirerek yaptığımız sınıflandırma aşağıdaki şekilde olmuştur:

**a- Eksenlerine göre sınıflandırma;**

- 1) *Dikey eksenli türbinler:* Savonius ve Darrieus türbinler bu sınıfın en bilinen örnekleridir.
- 2) *Yatay eksenli türbinler:* Fars çarkı (persion türbin), çapraz Savonius ve kanatlı türbin (propeller türbin) bu sınıfın akla ilk gelen örnekleridir.

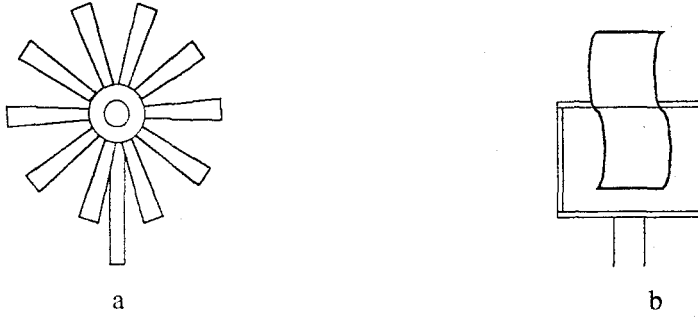


a



b

**Şekil 6.1** Dikey Eksenli Türbinler ( a- Savonius b- Darrieus)



Şekil 6.2 Yatay Eksenli Türbinler (a- Persion , b- Çapraz Savonius)

**b- Güçlerine göre sınıflandırma;**

- 1) *Küçük güçlü türbinler:* Güçleri 30 kw dan az olan türbinlerdir.
- 2) *Orta güçlü türbinler:* Güçleri 30-100 kw arasında olan türbinlerdir.
- 3) *Büyük güçlü türbinler:* Güçleri 100 kw –1 000 kw arasında olan türbinlerdir.
- 4) *Çok büyük güçlü türbinler:* Bu türbinlerin güçleri 1 MW veya daha fazladır.

Tablo 6.1. Seri Üretimi Yapılan Bazı Türbinlerin Özellikleri (Ertaş, 2000)

| Firma          | Türbinin  |          | Kule Yüksekliği (m) | Devir sayısı (d/d) | Rüzgar Hızı (m/sn) |                 |       | Jeneratör Tipi |
|----------------|-----------|----------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|-------|----------------|
|                | Gücü (kw) | Çapı (m) |                     |                    | Nominal Güçte      | Dönmeye Başlama | Durma |                |
| Danwind        | 200       | 24       | 30                  | 42                 | 15                 | 4               | 25    | Senkron        |
|                | 250       | 26       | 30                  | 41.6               | 15                 | 4               | 25    | Senkron        |
|                | 225       | 27       | 30                  | 37.8               | 14                 | 4               | 25    | Senkron        |
| Vestas         | 100       | 20       | 24                  | 46                 | 13                 | 4.5             | 25    | Asenkron       |
|                | 225       | 27       | 32                  | 43/32              | 13.5               | 3.5             | 25    | Ç.Sar.Ask.     |
|                | 400       | 34.8     | 30                  | 35                 | 13                 | 4.5             | 25    | Asenkron       |
| HMZ-Windmaster | 100       | 21.8     | 30                  | 48                 | 14                 | 4               | 24    | Asenkron       |
|                | 150       | 21.8     | 30                  | 48                 | 14                 | 4               | 24    | Asenkron       |
|                | 200       | 21.8     | 30                  | 48                 | 14                 | 4               | 24    | Asenkron       |
|                | 300       | 21.8     | 30                  | 48                 | 14                 | 4               | 24    | Asenkron       |
|                | 500       | 33       | 30                  | 45                 | 14                 | 5               | 22    | Mik.Pro.Kont   |
| Bonus          | 100/30    | 23       | 30                  | 40/30              | 13                 | 3-4             | 28    | Ç. Kutup Ask   |
|                | 150/30    | 23       | 30                  | 40/30              | 13                 | 3-4             | 28    | Ç. Kutup Ask   |
|                | 450       | 35       | 36                  | 35                 | 10                 | 4.5             | 28    | Asenkron       |

Tablo 6.1, 6.2 ve 6.3’de çeşitli firmalar tarafından üretilen türbinlerin güçleri yer almaktadır.

**c- Dişli özelliklerine göre türbinler;**

1) *Dişli kullanan türbinler:* Jeneratörleri az kutuplu, yüksek devirlidir. Bu yüzden pervanenin devir sayısı ile jeneratör devir sayısını uygunlaştırmak için 1/50, 1/70 gibi oranlarda dişli kullanılır.

2) *Dişli kullanmayan türbinler:* Jeneratörler çok kutuplu, düşük devirli olduğu için dişli sisteme gerek yoktur.

**Tablo 6.2. 500 kW’tan Büyük Türbinler ve Güçleri (Karma)**

| Türbin<br>Tipi | Nominal Gücü<br>(kw) | Türbin<br>Tipi | Nominal Gücü<br>(kw) |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Dewind 41      | 500                  | Enercon E 40   | 500                  |
| Dewind 46      | 600                  | Nordex N43     | 600                  |
| Dewind 48      | 600                  | Nordex N46     | 750                  |
| Vestas V47     | 600                  | Nordex N50     | 800                  |
| Vestas V52     | 850                  | Tache TW 600   | 600                  |

**Tablo 6.3. 1 MW’tan Büyük Türbinler ve Güçleri (Karma)**

| Türbin<br>Tipi | Nominal Gücü<br>(kw) | Türbin<br>Tipi | Nominal Gücü<br>(kw) |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Nordex N54     | 1000                 | Dewind 62      | 1000                 |
| Nordex N60     | 1300                 | Dewind 60      | 1250                 |
| Nordex N62     | 1300                 | Tache TW 1,5   | 1500                 |
| Nordex N70     | 1500                 | Vestas V 66    | 1750                 |
| Nordex N77     | 1500                 | Vestas V 66    | 2000                 |
| Nordex N80     | 2500                 | Vestas V 80    | 2000                 |

Günümüzde en çok kullanılan türbinler olan propeller türbinlerde, yukarıdaki sınıflandırmalara ilave olarak kendi içinde ayrıca sınıflandırılabilir.

**a- Kanat sayılarına göre :**

1) *Tek kollu türbinler:* Tek kanatlı pervaneye karşı ağırlık montajı gereklidir. Bu sebeple 2 kanatlı pervaneden hafif değildir. İlk zamanlar denenmiş, daha sonra kullanılmamıştır.

2) *Çift kollu türbinler:* Tek kanatlı pervaneye göre dinamik olarak daha iyi şekle sahiptir. MOD serisi olarak yapılan türbinler çift kollu olarak yapılmıştır.

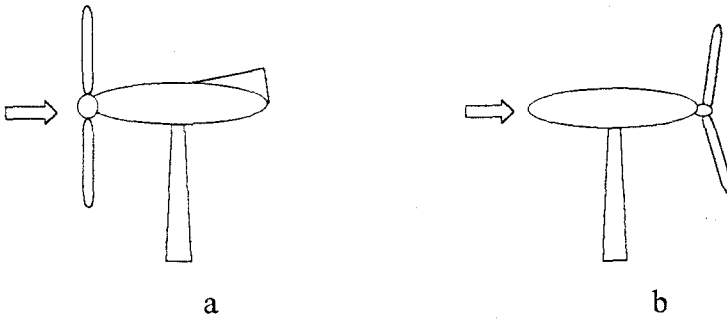


Şekil 6.3 Propeller Türbinler (a-Çift Kollu, b-Üç Kollu)

3) *Üç kollu türbinler:* Bu tip türbinler günümüzde en yaygın kullanımı olan türbinlerdir. 3 kollu pervane üretimindeki bu hakimiyetin başlıca sebebi; ilk 3 kanatlı Danimarka tasarımlarına tarihsel bağlantı ve bundan dolayı yavaşlama ayarlı (stall) basit pervane geliştirmesi ihtiyacıdır.

**b- Rüzgar etkisine göre :**

1) *Üst rüzgarlı (upwind) türbinler:* Rüzgar önce kanatlara, sonra gövdeye geliyorsa türbin üst rüzgarlı olarak adlandırılır.



Şekil 6.4 Rüzgar Etkisine Göre Türbinler (a- Üst Rüzgarlı, b- Alt rüzgarlı)

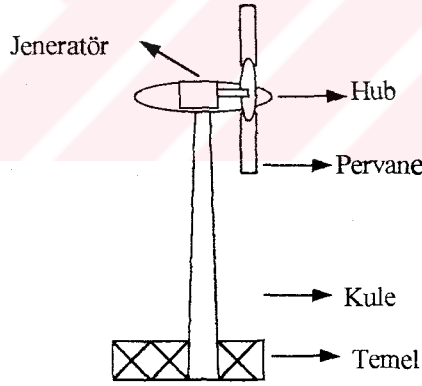
2) *Alt rüzgarlı (downwind) türbinler*: Rüzgar önce gövdeye, sonra kanatlara geliyorsa alt rüzgarlı olarak isimlendirilir.

### 6.3. Rüzgar Türbinin Ana Elemanları

Günümüzde en fazla kullanılan yatay eksenli, kanatlı rüzgar türbinlerini oluşturan ana elemanlar şunlardır:

**Temel** : Temel boyutları, türbin büyüklüğüne ve yerin özelliklerine göre belirlenir. Temelin boyutlandırılmasında sadece statik hesap yapılır, dinamik hesap yapılmaz. Statik hesapta da durmakta olan rüzgar türbinin yızyılda karşılaşabileceği rüzgar hızına ve nominal güçteki itmeye dayanması istenir. 40-50 m'lik bir kuleyi taşıyacak temel 120 m<sup>2</sup> kadar bir alanı kaplar (Hau,1996'dan, Özdamar, 2001).

**Kule** : Kuleler çelik veya betondan yapılır. Çelik kuleler kafes veya boru şeklinde olur. Beton kuleler ise boru şeklindedir. Kule boyları büyük olduğu için 2 veya 3 parçalı olarak yapılırlar. Parçalar yerinde monte edilir (Ültanır, 1996).



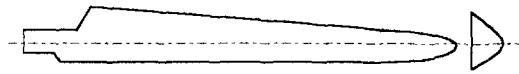
Şekil 6.5 Rüzgar Türbinin Elemanları

Kule yüksekliği, yükseklerdeki daha büyük rüzgar hızlarından yararlanmanın sağlayacağı güç ile baya bağlı olarak artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümle belirlenir. Kule boyutlandırmasındaki bir diğer parametre de kule eğilme katılığıdır. Özellikle kulenin birinci eğilme doğal

frekansı, kule malzemesi ve dolayısıyla maliyeti ölçüde etkilemektedir. Rüzgar türbinin toplam imalat giderinin %11-20'si kule için harcanır (Hau,1996 dan, Özdamar, 2001).

**Türbin Pervanesi :** Kanatlar da denilen pervaneler, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren en önemli parçadır. Kanatların yapı özellikleri türbinin tipine göre değişiklik göstermektedir (İlkılıç, 1990).

Rüzgar türbinlerinin pervaneleri; alüminyum, titan, çelik ve elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilebilmektedir. Modern türbinlerin kanatlarının hemen hemen tamamı cam elyafıyla güçlendirilmiş plastikten üretilir. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımları çok iyidir. Fakat yorulma dayanımları ve korozyon problem oluşturmaktadır. Alüminyum kanatlar çeliğe göre daha hafiftir. Yorulma dayanımları daha iyidir ve korozyona daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları, kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zorluğu ve pahalı olmasıdır. Cam elyafın kopma mukavemeti  $420 \text{ N/mm}^2$  ile St 52 çeliğinin kopma mukavemeti olan  $520 \text{ N/mm}^2$  'ye yakındır. Karbon elyaf ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin kopma mukavemeti ise  $550 \text{ N/mm}^2$  ile çelikten daha iyidir. Fakat daha pahalıdır ( Özdamar, 2001).

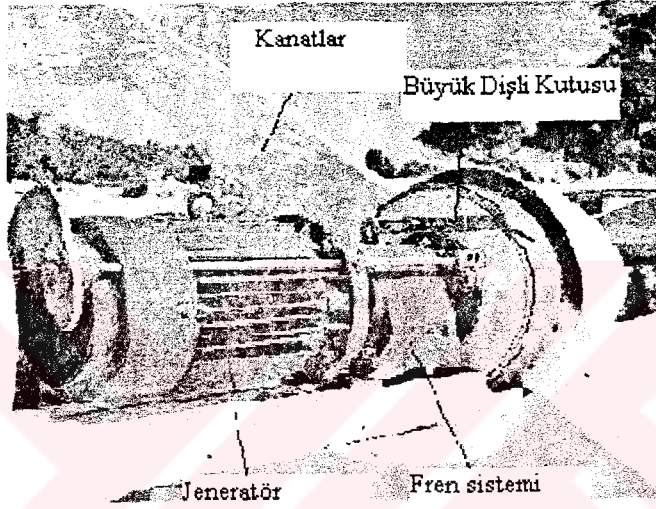


Şekil 6.6 Kanat Profili ve Kesiti (İlkılıç, 1990)

Rüzgar türbini kanatlarının şekillendirmesi yapılırken kanat profilinin rüzgara karşı gösterdiği direncin göz önünde bulundurulması gerekir. Hava zerreciklerinin kanat üst yüzeyine sürtünmesinden üst yüzey direnci oluşur. Buradaki sürtünme ile basınç dirençlerini küçültmek için kanatların rüzgar akış çizgilerine uygun biçimlendirilmesi gerekir. Kanatların merkezden uca doğru eğim açıları

azalır. Buna benzer şekilde kalınlığı da uç taraf doğru azalır (Paulsen, 1989 dan; İlkılıç, 1990).

**Dişli Kutusu :** Pervane milindeki enerji, jeneratöre bir dişli sistemi ile aktarılır. Dişli sistemi, pervane milinin devir sayısını jeneratörün ihtiyaç duyduğu devir sayısına çıkarır. Örneğin, Nordex N-54 türbininde dişli kutusu çevrim oranı 1:70'dir. Bu türbinde pervane rotorunun devir sayısı 22 d/d iken jeneratör milinin devir sayısı 1500 d/d olmaktadır.



Resim 6. 1. 5 kW'lık Bir Türbinin İç Görünüşü (www.windpower.com)

**Jeneratörler:** Rüzgar enerjisi tesislerinde kullanılan jeneratörler, DC jeneratör, senkron veya asenkron jeneratör olabilirler. Asenkron jeneratörler çift sargılı veya çift kutuplu da olabilir. Burada elde edilen elektrik akımı, yeterli kalitede olmasa bile güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilmektedir (Özdamar, 2001).

Günümüzde lokal çalışan türbinlerde sabit mıknatıslı DC jeneratörler tercih edilmektedir. Şebekeye bağlı santrallerde, uyartım akımı bağlı bulunduğu şebekeden sağlanmaktadır. Çok kutuplu jeneratörlerin kutup sayısı pervane devir sayısına göre mikro işlemciler yardımıyla ayarlanmaktadır.



Burada, yaygın olarak kullanılan 600 kW'lık bir türbinin güvenlik sistemi anlatılmaya çalışılacaktır.

Rüzgar türbinlerinin devamlı olarak kendi kendini kontrol edebilecek mekanizmaları yoktur. Kontrol sistemi rüzgar türbininin çalışma şartlarında olup olamamasına göre iki fonksiyonlu olarak kurulmalıdır. Rüzgar türbinlerinin kendi kendilerini kontrol edebilecek mekanizmaya sahip olmasının yanı sıra, hataları kayıt edebilme ve kayıtlı bilgileri tekrar ele alarak olabilecek sorunlara mümkün olduğu kadar tam olarak cevap verebilme özelliğine sahip olması gerekmektedir (Bonus İnfö, 1999 dan; Güney, 2001).

Rüzgar türbinlerindeki bir başka problem, türbinler eğer kontrol edilmezse, yüksek rüzgar hızlarında kendiliğinden aşırı hızlanması ya da nominal hızın üzerine çıkmasıdır. Türbin aşırı hızlandığı zaman ürettiği güç, nominal güçten fazla olabilir. Bu yüzden rotor devir hızı sınırlandırılır. Şebekeye bağlı jeneratör, türbini nominal şartlarda çalıştırır. Türbin normal şartlarda çalışırken şebeke bağlantısı kesilince, türbin ani olarak ivmelenmeye başlar. Bu anda türbin aşırı hızlandığından, güvenlik sisteminin kontrolsüz aşırı hızlanma durumuna çok hızlı cevap verebilmesi gerekir (Bonus İnfö, 1999 dan; Güney, 2001).

#### 6.4.1. Kontrolör

Rüzgar türbini kontrolörü, türbinin çalışma şartlarını devamlı olarak denetleyen, istatistikleri toplayan belirli sayıda bilgisayardan oluşmaktadır. Kontrolör ayrıca türbindeki butonları, hidrolik pompaları, valfleri ve motorları da denetler. Türbin gücü ve boyutları arttıkça kontrolörün önemi de aynı ölçüde artmaktadır. Kontrolör sistemi telefon hattı üzerinden veya diğer haberleşme sistemi aracılığı ile RT operatörü ile iletişime geçebilir. Herhangi bir yerden rüzgar türbini telefon veya başka bir aracı sistem yardımıyla aranıp, istatistikler alınarak o andaki durum ile karşılaştırmak mümkündür. Rüzgar santralindeki türbinlerden biri verileri toplamak veya denetlemek için bilgisayarla donatılır.

Genellikle türbin kulesinin tabanında ve üzerinde bir kontrol ünitesi bulunur. Son yıllardaki RT modellerinde kontrolörler arasındaki iletişim fiber

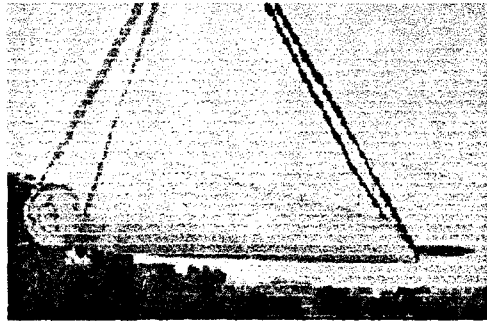
optik sistemlerle yapılmaktadır. Bazı modellerde ise rotor göbeğine üçüncü bir kontrolör yerleştirilmiştir.

Bilgisayar birçok elektromekanik cihaz, kontaktör, anahtarlar, sigortalar vb. ile beraber kontrol kabinine yerleştirilir. Kontrolör görevini çok sayıda farklı bileşenden oluşan karmaşık yapı içinde yapar. Dolayısıyla denetim ne kadar karmaşık bir yapı içerisinde gerçekleşirse hata ihtimali de o kadar fazla olur. Bu sorun arıza güvenlik denetim sistemi geliştirilerek çözümlenebilir (Bonus Info,1999 dan; Güney, 2001).

Modern türbinlerde 100-500 arasındaki parametreler herhangi bir yerden monitörle takip edilebilir. Kontrolör aşağıdaki şu parametreleri analog olarak ölçer: 3 faz gerilimi, frekans, göbek içi sıcaklığı, jeneratör sıcaklığı, dişli kutusu sıcaklığı, dişli yatağı sıcaklığı, rüzgar hızı, yalpalama açısı, düşük hızdaki mil hızı ve yüksek hızdaki mil hızı. Kontrolör ayrıca şu parametreleri de dijital olarak ölçer: Rüzgar yönü, jeneratör sargı sıcaklığı, valf fonksiyonu, titreşim seviyesi, güç kablosu burkulması, acil fren devresi, fren ayarı, merkezkaç ayırma işlemi, hidrolik pompaların esnemediği dolayısı ısınması vb. ([www.windpower.com](http://www.windpower.com)).

#### 6.4.2. Pervane Uç Frenleri

Pervane uç frenleri, pervane kanadının kendi boyuna eksenini boyunca bir karbon mil üzerinden yaklaşık 90° döndürülmesiyle gerçekleştirilir. Pervanenin kanat ucu, kanadın ana gövdesi içerisindeki mil yatağına bağlanan bir karbon fiber



**Resim 6.2.** Montajı Yapılan Kanat ve Uç Freni ( [www.Nordex.com](http://www.Nordex.com) )

miline sabitlenir. Kanat içerisindeki milin son kısmındaki mekanizma, kanat ucu herhangi bir dış etkene maruz kaldığında kanadın dönmesini sağlar. Ayrıca milin içerisinde çelik bir tel vardır. Bu çelik tel kanat ucundan göbeğe kadar uzunlukta olan bir tüp içerisinden geçirilerek göbeğe bağlanır. Çalışma esnasında pervane kanadının ucu, göbek içerisindeki hidrolik silindir tarafından ana kanadın hızında döner. Pervanenin kanat ucunun ana kanat gövdesiyle aynı hızda dönmesi çelik telin yaklaşık 1 tonluk kuvvet ile çekilmesiyle gerçekleşir.

Türbini durdurmak gerekirse, silindirdeki yağ boşaltılarak harcanan güç kesilir. Bu yolla merkezkaç kuvveti kanat ucunu dışarı doğru iter ve uç milindeki mekanizma kanat ucunu 90° frenleme pozisyonuna doğru döndürür. Hidrolik yağın boşalması küçük bir delik ile sağlandığı için, hidrolik yağ tamamen boşalınca kadar pervane yavaş yavaş dönmeye devam eder. Böylece frenleme yavaş bir şekilde gerçekleşir ve oluşabilecek şok etkisi önlenmiş olur (Bonus Info, 1999 dan; Güney, 2001).

#### 6.4.3. Mekanik Fren

Mekanik fren aerodinamik frenleme için bir güvenlik sistemi olarak kullanılır. Mekanik fren dişli kutusuna yerleştirilen bir diskten oluşmaktadır. Fren diski çelikten yapılır ve mil üzerine sabitlenir. Asıl frenlemeyi yapan fren pergelidir (brake caliper). Frenleme sistemini, meydana gelebilecek arızalara karşı korumak için hidrolik yağ basıncı gerekmektedir. Yağ basıncı olmadığında, fren blokları fren diskini sıkıştıracaktır. Frenleme, fren bloğu ile disk arasındaki sürtünmenin bir sonucudur (www.windpower.com.dan; Güney, 2001 ).

#### 6.5. Rüzgar Türbinlerinde Güç Kontrolü

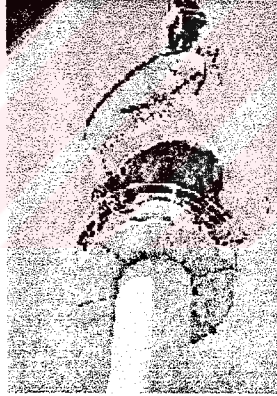
Modern türbinlerde güç üretimini jeneratörün nominal gücünde tutabilmek için iki farklı aerodinamik kontrol prensibi kullanılır. Bunlardan pasif olanına *stall kontrol*, aktif olanına *pitch kontrol* adı verilir. Geçmişte daha basit olan *stall*

kontrol sistemi kullanılırken günümüzde pitch sistemi daha çok tercih edilmektedir.

Pitch (adım) kontrolü aktif bir kontrol sistemi olduğundan jeneratörden gelen giriş sinyaline ihtiyaç duyar. Jeneratör gücü nominal gücün üzerine çıkarsa, giren hava akışının hücum açısını azaltmak için pitch açısını değiştirir. Bu açı değişince rotoru döndüren aerodinamik kuvvetler azalır ve türbin gücü azalmış olur.

Stall (durma) kontrol, rüzgar hızına tepki veren pasif bir sistemdir. Nominal rüzgar hızından daha yüksek hızlarda pervane profili etrafındaki hava akışı, pervane yüzeyinden kısmen de olsa ayrılır. Böylece kaldırma kuvvetleri azalırken çekme kuvvetleri artmış olur.

Stall kontrol hala geçerli bir sistemdir. Son yıllarda iki sistemin karışımı olan aktif stall kontrolü de kullanılmaya başlanmıştır (Dewi,1998 den; Güney, 2001 ).



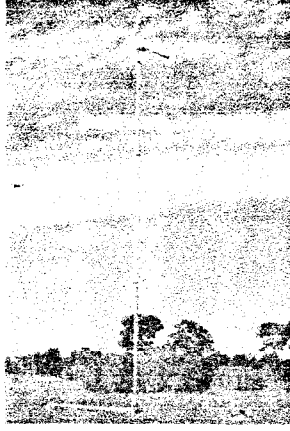
Resim 6. 3. Türbinin Pitch Sistemi (www.demirer. com)

## 6.6. Rüzgar Santrali Türleri

### 6.6.1. Lokal (Şebekeden Bağımsız ) Sistemler

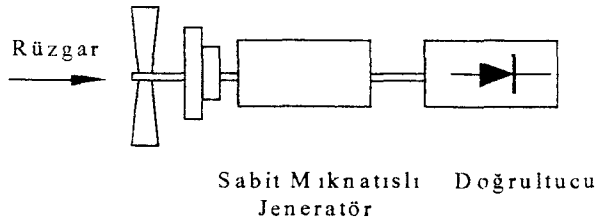
Şebekeden bağımsız rüzgar elektrik sistemleri birkaç kW ile 100 kW arasında kullanılmakla birlikte, çoğunlukla 30 kW'ı aşmamaktadır. Bu tür rüzgar

jeneratörleri üç palli bir çark, transmisyon sistemi, DC jeneratör, yöneltici kuyruk ve fren sisteminden oluşur. Makine daha çok direk tipi pilon üzerine yerleştirilir. Elde edilen DC enerji bir akü ile depolanabilir.



Resim 6. 4. Lokal Çalışan Boru Tipi Kuleli Küçük Türbin

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 DC/AC inverter kullanılarak, tüketici AC ile beslenmektedir. Türkiye'de özellikle 10 kW'dan küçük güçlerde rüzgar+güneş pilleri elektrik sistemlerine bir talep olduğu ve bu tür sistemlerin piyasaya çıkarıldığı da görülmektedir. Bu sistemler DC karakterli ve akülüdürler. Ancak, pahalı olmaları yaygınlaşmalarını engellemektedir.



Şekil 6. 8 Sabit Mıknatıslı Türbinin Basit Blok Diyagramı

### 6.6.2. Şebekeye Bağlı Çalışan Sistemler

Bugün rüzgar santralleri tek türbinli olarak değil, genellikle birden fazla türbin içeren ve şebeke bağlantılı rüzgar çiftlikleri biçiminde kurulmaktadır. Büyük denilen türbinlerin güçleri 1990 yılında 100-250 kW iken, günümüzde 450-2000 kW arasında bulunmaktadır. Bugünkü uygulamada daha çok 400-1500 kW'lık türbinler yaygındır.



**Resim 6.5.** Mısır'da 60 MW'lık Zafarana Rüzgar Santrali (Re-Focus, 2001)

Ancak, 2 MW'lık türbinler de vardır. Bununla beraber uzunca bir dönem 600 kW-1 MW'lık türbinlerin revaçta olmaları beklenmektedir. Rüzgar santralleri teknolojisinin geleceğine ilişkin tahminlerde, 3 MW'lık türbinlerin önümüzdeki 25 yıl içerisinde ticari olarak uygulamaya konulabileceği yönündedir. Şebeke bağlantılı rüzgar santralleri genellikle elektrik iletim hatlarına yakın yörelerde kurulmakta ya da oraya iletim hattı ulaştırılmaktadır. Ayrıca, yöredeki transformatör kapasitesinin santrale uygun olması gerekmektedir.

### 6.6.3. Deniz Üstü (Off-Shore) Sistemler

Rüzgar enerjisi bakımından deniz alanları karalara göre daha büyük zenginlik gösterdiği için denizlerde de deniz üstü (off-shore) rüzgar santrallerinin kurulmasına başlanmıştır. Birinci etapta kıydan uzaklığı 10 km'yi ve derinliği 10

m'yi geçmeyen alanlar hedeflenmiştir. İlk deniz üstü rüzgar çiftliği 5 MW güçle Danimarka'da Lolland Adası yakınında kurulan Vindeby rüzgar çiftliğidir. Diğer ülkeler (İngiltere, İsveç) ile birlikte Avrupa'da şu anda toplam 12 MW'lık deniz üstü rüzgar santrali çalışır durumdadır. Avrupa'da deniz üstü kurulu gücün kısa zamanda 180 MW'a çıkarılması planlanmıştır. 2030 yılında Avrupa'da 100 000 MW'a çıkması hedeflenen rüzgar kurulu gücünün deniz üstü santral payının % 25 'den az olmayacağı beklenmektedir.



Resim 6.6. Deniz Üstü Santral (www.Nordex.com)

#### 6.7. Rüzgar Türbinlerinde Uluslararası Standartlar

1987 yılında IEC rüzgar enerjisi alanında standartlar geliştirilmesine karar verdi.

Yapılan çalışmalar sonunda aşağıdaki standartlar geliştirildi ve onaylandı:

- a- IEC 1400-1 Rüzgar türbin jeneratör sistemleri emniyeti,
- b- IEC 1400-2 Küçük Rüzgar Türbinlerinin Emniyeti.

Bu standartların dışında, akustik ölçüm teknikleri ve güç performansı ölçüm teknikleri alanında iki yeni standart hazırlama çalışmaları son aşamadır. Kanat test yöntemleri, güç kalitesi, mekanik güç ölçümleri konularında standart hazırlama çalışmaları ise başlangıç aşamasındadır.

Avrupa'da iç pazarda uyumluluğu sağlamak amacıyla CENELEC standart hazırlama çalışmalarına başlamıştır.(www.artemis.efes.net)

## BÖLÜM 7

### RÜZGAR ENERJİSİNİN ÖZELLİKLERİ VE GÜNÜMÜZDEKİ KULLANIMI

#### 7.1. Rüzgar Enerjisinin Özelliklerin Değerlendirilmesi

Buraya kadar olan bölümlerde rüzgar enerjisinin, güneş enerjisinin yeryüzünü farklı ısıtmasından kaynaklanan bir enerji türü olduğu, rüzgardan elde edilecek enerjinin rüzgar hızının küpüyle ve türbin kanat yüzeyi ile orantılı olduğu belirtilmiştir. Bu bölümde rüzgar enerjisinin ve rüzgar enerjisi tesislerinin olumlu ve olumsuz özellikleri irdelenerek, olumsuz sayılan özelliklerin iyileştirilmesi için yapılabilecekler açıklanacaktır.

##### 7.1.1. Rüzgar Enerjisinin Üstünlükleri

**Tükenmez :** Fosil yakıtlar gibi rezervi sınırlı değildir. Güneş var olduğu sürece rüzgarda var olacaktır. Güneş yok olduğunda da artık insanoğlunun enerjiye ihtiyacı kalmayacaktır ! Bu kaynağın kullanılması, petrolün enerji üretimi için değil de petrokimya sanayisi için hammadde olarak daha uzun süre kullanılmasına imkan verecektir.

**Hammadde Masrafı Yoktur :** Petrol, kömür ve doğal gaz gibi hammadde tüketimi olmadığından hammaddeye para ödenmez.

**Dışa Bağımlılık Azdır :** Rüzgar santrallerinde hammadde ithali olmadığından sadece türbin ithali yönünden dışa bağımlılık vardır. Bu da bir defaya mahsustur. Türbin imalatının yurdumuzda yapılması durumunda bağımlılık belli malzemelerle sınırlı kalacaktır.

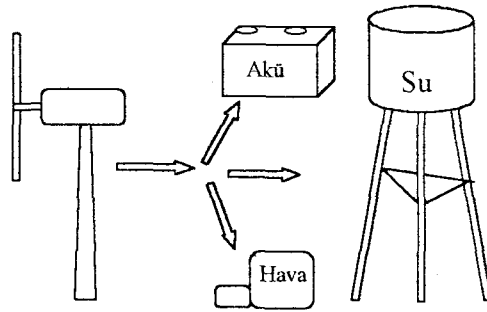
**Yerli Sanayii Teşvik Eder :** Türbinlerin montajı, işletilmesi, bakımları için personel istihdamı gerekecektir. Türbin imalatının yapılması durumunda, ana sanayi yanında birçok yan sanayi de gelişecektir. Bu da daha fazla iş imkanı demektir. Danimarka'da bu iş kolunda 12000 insanın çalıştığı bilinmektedir.

**Hızla Kurulup Devreye Alınabilir :** Hidrolik santrallerin yapımı, devreye alınması yıllarca sürmektedir. Termik santrallerde de durum farklı değildir. Halbuki rüzgar santralleri 6 ay gibi kısa süre içerisinde kurulup faaliyete geçebilmektedir. Almanya'da sadece 2000 yılı içerisinde 1495 türbin kurulmuş, kurulu gücü 1665 kW artmıştır.

**Çevre Kirliliğine Sebep Olmaz :** Rüzgar enerjisi temiz bir enerji kaynağı olduğu için enerji üretimi sırasında atmosfere  $\text{CO}_2$  ve  $\text{NO}_2$  gibi zehirli gazlar bırakmaz. Yatağan Termik Santralinin çevreye yaydığı zehirli gazlar sebebiyle her yıl birkaç defa kapatıldığı, havadaki zehirli gaz oranının normale dönmesi ile tekrar devreye alındığı artık sıradan haberler arasında yer almaktadır. Bu santrallerde üretim sonunda kül ve uçucu madde atığı da yoktur. Nükleer santraller gibi radyasyon riski ve radyoaktif atık problemi bulunmaz.

2020 yılında tüm dünyada üretilen elektrik enerjisinin % 10'nun rüzgar enerjisinden elde edilmesi planlanmaktadır. Bu programın gerçekleşmesi durumunda 2005 yılında 69 milyon ton, 2010 yılında 267 milyon ton, 2020 yılında ise 1780 milyon ton  $\text{CO}_2$  gazı atmosfere bırakılmayacaktır (www.ekopya.tripod.com, 2000).

Sera gazı emisyonunun sınırlanmasıyla, ozon tabakasının delinmesi ve buna bağlı küresel ısınma problemleri de büyük ölçüde çözüme kavuşacaktır.



Şekil. 7. 1 Rüzgar Enerjisinin Depolanması (Stepson, 1986)

**Depolanabilir :** Rüzgarı depolamak mümkün değildir. Ancak rüzgardan elde edilen enerjiyi depolamak mümkündür. Üretilen elektrik enerjisi akümülatörde depolanabilir. Bu uygulama daha çok lokal çalşan türbinlerde tercih edilir.

Üretilen enerji basınçlı hava üretiminde kullanılabilir. Buna bir hava olayını yine hava cinsinden depolama diyebiliriz. Türbin elektrik enerjisi üretmeden, bir pompayı çalıştırıp derinlerdeki suyu yükseklerde depolayabiliriz. Bu, potansiyel enerji cinsinden depolamadır.

### 7.1.2. Rüzgar Enerjisinin Olumsuz Yanları

**Rüzgarın Sürekli Olmaması :** Rüzgarlar her zaman sürekli esmezler. Bu yüzden rüzgarın hiç esmediği veya az estiği zamanlarda enerji üretimi olmaz. Bir tek türbin kullanılıyorsa enerji üretilip, depolanabilir. Seçilecek akünün kapasitesi rüzgarın yetersiz olduğu zamanlar da dikkate alınarak seçilmelidir.

Bir ülkede tüm rüzgar santralleri aynı yerde olmadığından, farklı yerlerdeki dağınık yapıda bu sakınca belli ölçüde ortadan kalkar. Üretilen güçteki değişiklik %1-5 arasında değişir.

**Kapladığı Alan :** Rüzgar tarlaları ilk bakışta çok büyük alanlar işgal ederler. Bunun sebebi türbinlerin birbirinden belli uzaklıkta bulunma zorunluluğudur. Bu uzaklık kanat çapının en az yedi katı olmalıdır. Bu suretle türbinler birbiri için rüzgar engeli oluşturmazlar. Ancak bu alanlar içerisinde türbin temelleri dışında kalan alanlar tamamen boştur. Bu geniş alanlar tarım ve hayvancılık gibi amaçlarla kullanılabilir.

Çeşme-Germiyan'da bulunan E-40 türbinlerinin temel alanı  $120 \text{ m}^2$ 'dir. Türkiye' nin enerji ihtiyacının %10'u olan 13 Milyar kWh enerjiyi üretmek için rüzgar türbini kullanılması durumunda, yaklaşık 9000-10000 türbin gereklidir. Bu türbinlerin kaplayacağı toplam temel alanı  $12 \text{ km}^2$ 'dir.

**Gürültü :** Türbinlerde aerodinamik ve mekanik olmak üzere iki tür gürültü oluşur. Bu gürültülerden en önemlisi pervane kanatları arasında akan havadan kaynaklanan aerodinamik gürültüdür. Bu gürültünün ana nedeni, pervane kanat profiline sınır tabakasındaki türbülanslı hava ve kanat profiline çıkış uçlarında

oluşan girdaptır. Pervane kanatlarının uç noktalarının profili uygun seçilerek bu gürültü azaltılabilir.

Diğer gürültüler mekanik kaynaklıdır. Dişli kutusu, hidrolik pompalar ve jeneratör soğutma sistemi bu gürültünün kaynağıdır. Aerodinamik gürültü, mekanik gürültüden fazladır. Gövde, iç kısımdan yalıtılarak bu gürültülerin azaltılması sağlanır. Türbin yakınlarında gürültü 70-80 dB iken, 300 m uzakta 45 db'e düşmektedir. Rüzgar tarlalarıyla yerleşim birimleri arasında 1 km uzaklık bulunursa bu problem ortadan kalkar (Özdamar, 2001).

**Kuş Ölümleri :** Hızla dönen rotorların kuş ölümüne sebep olduğu gözlenmiştir. Ancak yerli kuşların zamanla yeni duruma alıştıkları, kuş ölümünün ilk zamanlara göre çok azaldığı görülmüştür. Göçmen kuşlar genelde 100- 200 m yüksekten uçtukları için ölüm tehlikesi onlar için daha azdır. Bütün bunların yanı sıra, avcılarının spor adı altında avladıkları kuşların sayısının yanında türbinlerin sebep olduğu kuş ölümüne devede kulak misalidir.

**Gölge Etkisi :** Tüm yüksek yapılarda olduğu gibi türbinlerinde gölge olur. Kule çapları 1-2 m kadar olduğundan önemli bir sakıncası yoktur. Birkaç yüz metre sonra bu etki tamamen kaybolur.

**Kanat Kopması :** Bu etki malzeme yorulmasından kaynaklanmaktadır. Bu konudaki tek önemli kaza Putman Türbininde meydana gelen kanat kopmasıdır. 4. bölümde bu olaydan bahsedilmişti. Günümüzde kullanılan karbon takviyeli elyaf kanatlar ile malzeme yorulması ve kaza riski ortadan kalkmıştır.

**Estetik Kirlilik :** Oldukça geniş alanların yüksek kulelerle kaplanması estetik açıdan hoş olmayan görüntüler ortaya çıkaracağı doğrudur. Rüzgar tarlalarının yerleşim birimlerinin dışına yapılması birçok sıkıntıları ortadan kaldıracaktır. Yüksek fakat estetik harikası yapılar konusunda geniş bir tecrübesi bulunan mimari kültürümüzün bu konuda tüm dünyaya örnek olabileceğini düşünüyorum.

## **7.2. Rüzgar Enerjisinden Faydalanma Alanları**

### **7.2.1. Su Pompalanması**

Rüzgar enerjisi; insan ve hayvanlar için içme suyu sağlanmasında, tarlalar için sulama suyunun taşınmasında ve gerektiğinde bataklık alanların suyunun başka yerlere aktarılması sonucunda kurutulmasında kullanılabilir (Özdamar, 2001).

Su pompalanmasında genellikle pistonlu ve merkezkaç pompalar kullanılmaktadır. Pistonlu pompaların verimi % 80-90 olmakta, devir sayısı düşse bile bu verim sabit kalmaktadır. Merkez kaç pompaların verimi ise % 50-75 arasındadır. Bu verim, devir sayısı düştüğünde daha da azalmaktadır. Pistonlu pompalarda debi ile devir sayısı doğru orantılıdır ve debi, basma yüksekliğinden hemen hemen bağımsızdır. Merkezkaç pompalarda ise debi basma yüksekliğine bağlıdır.

### **7.2.2. Isıtma Amaçlı Kullanım**

Soğuk iklim bölgelerinde bir evin enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü odaların ısıtılması için gerekli enerji oluşturmaktadır. Isıtma için fosil yakıtlar kullanılması yerine rüzgar enerjisinin kullanılması, çevreyi daha az kirletecektir. Rüzgar türbininin jeneratöründen elde edilecek akımın direnç tellerinden geçirilmesiyle ısı elde edilecektir. Burada elde edilen akımın frekansı ve gerilim değeri önemli değildir. Bu sebeple şebeke bağlantılı türbinlerde bulunan devir ayar sistemlerinin burada kullanılmasına gerek yoktur. Bu ise tesis masrafını azaltacaktır.

Bu ısıtma önce suyu ısıtarak, ortamı sıcak su ile ısıtma şeklinde olursa daha kaliteli ve düzenli ısınma sağlanacaktır.

### 7.2.3. Elektrik Enerjisi Üretimi

Rüzgardan elektrik enerjisi elde etmeye yarayan sistemlere rüzgar türbini veya aerogeneratör denilmektedir. Yukarıda anlatılan sistemlere göre çok daha fazla detay içermektedir. Günümüzdeki çalışmalar bu konuda yoğunlaşmaktadır.

### 7.4. Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu

Bugün mevcut olan toplam işe yarar rüzgar potansiyeli yılda 53 000 Twh elektrik enerjisi üretimine imkan sağlayabilecek durumdadır. Bu miktar 1998 yılında tüm dünyanın elektrik enerjisi üretiminin dört katıdır. 2020 yılında dünya elektrik üretiminin %10'unun rüzgardan elde edilmesi planlanmaktadır. 2040 yılı için bu değerin % 20 olması düşünülmektedir (Uyar, 2001).

Dünyada rüzgar santrallerinin kurulu gücü hızlı artış göstermektedir. 1990 yılında dünyanın kurulu rüzgar gücü 2 160 MW iken, 1995 yılında 4 843 MW'a, 1996 yılında 6 184 MW'a ve 1997 yılında da 7 202 MW'a çıkmıştır (Guey-Lee,1998). Avrupa Enerji Birliği'nin 2010 yılı hedefi 25 000 MW, 2030 yılı hedefi ise 100 000 MW kurulu güçtür.

Tablo 7.1'de 2000 yılı sonu itibarıyla dünyada kurulu güç bakımından ilk beş ülke yer almaktadır. Değerler kolaylık olması bakımından yuvarlatılmıştır. Bugün için dünyadaki kurulu gücün yarısı Avrupa'da diğer yarısı da diğer ülkelerdedir.

**Tablo 7.1.** Rüzgar Enerjisinde Dünyadaki İlk 5 Ülke (Re-Focus, 2001)

| Ülke      | Kurulu Gücü (MW) |
|-----------|------------------|
| Almanya   | 6000             |
| İngiltere | 4000             |
| ABD       | 2500             |
| Danimarka | 2200             |
| İspanya   | 2000             |

Tablodan da görüldüğü gibi dünyadaki en büyük kurulu güce sahip ülke Almanya'dır. Almanya'da 2000 yılında faaliyette bulunan 9359 türbinin kurulu gücü 6094 kW, elde edilen enerji miktarı 11492 GWh olmuştur.

**Tablo 7.2.** Almanya'nın Rüzgar Gücü ve Üretimi (www.dewi.de, 2002)

| Türbin Gücü(kW) | Türbin Sayısı | Kurulu Güç (kW) | Üretim (GWh) |
|-----------------|---------------|-----------------|--------------|
| 5-80            | 746           | 43              | 57           |
| 80-200          | 620           | 94              | 170          |
| 200-400         | 859           | 227             | 428          |
| 400-750         | 4913          | 2771            | 5146         |
| >750            | 2221          | 2958            | 5690         |
| TOPLAM          | 9359          | 6094            | 11492        |

Dünyanın en büyük rüzgar çiftliği ABD California bölgesinde 370 MW gücündeki Altamount Pass Rüzgar Çiftliğidir. Kapladığı alan 81600 dekadır. Toplam olarak 3540 (3500 adedi 100 kW, 40 adedi 300-405 kW) adet türbin bulunmaktadır (Tümerterkin, 1997).

Asya'da, Hindistan ve Çin rüzgar santrallerine önem vermektedir. Hindistan 1999 yılında 1004 MW gücüne ulaşmıştır. Çin'in kurulu gücü 233 MW'a ulaşmıştır. Ortadoğu'da İran, Ürdün ve İsrail'de rüzgar santrali bulunmaktadır.

Mısır'da 2001 yılı içerisinde Kızıldeniz kıyısındaki Zafarana'da Nordex firması tarafından 105 adet 600 kW'lık N 43 tipi türbinden oluşan rüzgar santrali kurulmuştur. Santralin kurulu gücü 60 MW'tır. Yılda 40 milyon kWh enerji üretimi planlanmıştır. Bu miktar Mısır'ın enerji ihtiyacının % 0.5'ine denk gelmektedir. Rüzgar tarlası 12 km<sup>2</sup> alanı kaplamıştır (Re-Focus, 2001).

Meksika'da yaklaşık 4000 MW'lık rüzgar gücü potansiyelinin bulunduğu tahmin edilmektedir. Bu gücü değerlendirmek için milyonlarca dolarlık yatırım yapmaktadır.

Dünyada yaklaşık 60 kadar imalatçı üretim yapmaktadır. Bu konuda en gelişmiş ülke Danimarka'dır. 12000 Danimarkalı bu iş kolunda çalışmaktadır.

Tüm Avrupa'da toplam (imalat + enerji üretimi) 20 000 kişinin bu konuda çalıştığı tahmin edilmektedir.

## 7.5. Türkiye'de Rüzgar Enerjisinin Durumu

### 7.5.1. Çalışmaların Tarihçesi

Türkiye'de rüzgar enerjisiyle ilgili ilk bilimsel çalışmalar 1960'larda Ankara Üniversitesi'nde yapılmıştır. 1970'lerde ise Ege Üniversitesi, ODTÜ ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi bu konuda çalışmaya başlamıştır. 1981'den itibaren ise EİE tarafından rüzgar enerjisi çalışmaları başlatılmıştır. 1989 tarihinde Rüzgar Enerjisi Şube Müdürlüğü kurulmuştur.

Rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla sürdürülen çalışmaların ilkinin potansiyel belirleme çalışmaları oluşturmaktadır. Türkiye'de genel amaçlı rüzgar ölçümleri, diğer meteorolojik ölçümlerle birlikte DMI tarafından yapılmaktadır. Ülke genelinde rüzgar enerjisi kaynağına dayalı plan ve programların yapılabilmesi, bu kaynağın potansiyelinin belirlenmesi ile mümkündür. Bu amaçla, DMI'ne ait istasyonların 1970-1980 yılları arasındaki kayıtları değerlendirilmiş ve ülke genelindeki doğal rüzgar enerjisi dağılımı genel olarak belirlenmiştir. Ancak, rüzgardan elektrik enerjisi üretimine yönelik çalışmalarda ayrıntılı rüzgar potansiyel değerlendirme çalışmaları gerekli olmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, ilk aşamada belirlenmiş olan ve rüzgar enerjisi yönünden umut verici yerlerde yapılan etütler ile rüzgardan enerji üretimine elverişli olabilecek bölgelerde Rüzgar Enerjisi Gözlem İstasyonları kurulup veri toplanmaya başlanmıştır. Bu istasyonlarda düşük güçlü mikroişlemci kontrollü veri toplama sistemleri kullanılmaktadır. Ölçümler 10 m. standart yükseklikte yapılmaktadır. Veriler birer saatlik periyotlarla toplanmakta ve yazılım programı kullanılarak işlenmektedir. Elde edilen aylık rüzgar istatistik raporları; özet hız istatistikleri, ortalama rüzgar hızları grafikleri, frekans dağılım tablosu, rüzgar yönleri ortalama türbülans yoğunluğu ve rüzgar gücünü içeren bu veriler ve değerlendirmeler diskette veya

kağıt çıktı olarak kurum ve kuruluşlara ücreti karşılığında verilebilmektedir (EİE, 2000).

EİE'nin ölçüm istasyonlarından elde edilen ortalama hızlar, bu bölgelerin birçoğunun rüzgar enerjisi uygulamaları için elverişli olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar bazı firmaları rüzgar tarlaları kurmak için cesaretlendirmiş, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına Yap-İşlet-Devret ve Otoprodüktör statüsünde fizibilite başvuruları yapılmasına teşvik etmiştir.

### 7.5.2 Türkiye'nin Rüzgar Potansiyeli

Türkiye'nin rüzgar potansiyeli ve rüzgar haritası tam olarak belirlenmiş değildir. DMİ'nin raporlarına göre; yıllık ortalama rüzgar hızı 10 m yükseklikte 2.54 m/sn, rüzgar gücü yoğunluğu 24 W/m<sup>2</sup>'dir. Bu değerler bölgeler arasında farklılık göstermektedir. Rüzgar enerjisinden genel amaçlı yararlanmak için rüzgar hızının 3 m/sn'den fazla olması göz önüne alınırsa, Türkiye yüz ölçümünün % 20'sinde rüzgar enerjisinden faydalanmak mümkündür (Berdiyev, 1995).

**Tablo 7. 3.** Bölgelere Göre Rüzgar Hızı ve Güç Yoğunluğu

| Bölge       | Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m <sup>2</sup> ) | Ortalama Rüzgar Hızları (m/sn) |
|-------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| D.Anadolu   | 13.19                                              | 2.12                           |
| İç Anadolu  | 20.14                                              | 2.46                           |
| Karadeniz   | 21.31                                              | 2.38                           |
| Akdeniz     | 21.36                                              | 2.45                           |
| Ege         | 23.47                                              | 2.65                           |
| G.D.Anadolu | 29.33                                              | 2.69                           |
| Marmara     | 51.91                                              | 3.29                           |

Tablo 7.3'de yer alan değerlere göre, rüzgar potansiyeli en yüksek bölge Marmara Bölgesi, en düşük bölge ise Doğu Anadolu Bölgesi'dir.

**Tablo 7.4.** Bazı Merkezlerin Rüzgar Potansiyeli ( Ültanır, 1996)

| Yerleşim<br>Birimi | 10 m'deki Rüzgar<br>Hızı (m/sn) | 10 m'deki Rüzgar Gücü<br>Yoğunluğu (W/m <sup>2</sup> ) | 50 m'deki Rüzgar Gücü<br>Yoğunluğu (W/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Bozcaada           | 6.2                             | 317                                                    | 675                                                    |
| Bandırma           | 5.8                             | 300                                                    | 474                                                    |
| Mardin             | 4.3                             | 186                                                    | 321                                                    |
| Çanakkale          | 3.9                             | 92                                                     | 205                                                    |
| Malatya            | 2.7                             | 51                                                     | 108                                                    |

Yukarıdaki tablolarda verilen güç yoğunlukları teorik güç yoğunluklarıdır.

### 7.5.3. Türkiye’de Mevcut Rüzgar Santralleri

Ülkemizde genel kullanım amacıyla ilk defa 1986 yılında Çeşme Altinyunus tesislerinde 55 kW’lık Vestas marka türbinle elektrik enerjisi üretilmiştir. Bu türbinin göbek yüksekliği 24.5 m, pervane çapı 14 metredir. Nominal güce 12 m/sn rüzgar hızında ulaşmaktadır. Bu türbin tesisin ihtiyacının % 4’ünü karşılamaktadır.



**Resim 7.1.** Çeşme Germiyan Rüzgar Santrali (www.egetek.com)

Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyelinin kullanımına yönelik ciddi anlamda ilk adımlar 1996 yılında atılmış, ilk rüzgar santrali olan Çeşme-Germiyan Rüzgar Santrali, 1.5 MW gücü ile 21 Şubat 1998’de açılmıştır. Bu ilk rüzgar santrali 500 kW’lık 3 türbinden meydana gelmektedir. Enercon-40 marka

dişli kutusuz türbin kullanılmıştır. Pervane çapları 40.3 m olup, nominal güce 14 m/sn hızda ulaşılmaktadır.

İkinci rüzgar santrali olan Çeşme-Alaçatı Rüzgar Santrali ise, YİD modeli ile kurulmuştur. 600 kW gücündeki 12 adet türbinden oluşan santralin toplam kurulu gücü 7.2 MW'tır. Türbinler Vestas V44 tipi olup pervane çapları 44 m'dir. Kule yükseklikleri ise 45 m'dir. 28 Kasım 1998 tarihinde üretime başlamıştır.



Resim 7. 2. Çeşme –Alaçatı Rüzgar Santrali (www.egetek.com)

Üçüncü rüzgar santrali 25 Haziran 2000 tarihinde faaliyete geçen Çanakkale-Bozcaada Santralidir. Bu santralde 600 kW gücünde 17 türbin kullanılmıştır. Pervane çapı 44 m, toplam kurulu gücü 10.2 MW'tır.

Ülkemizde Haziran 2000 itibarıyla toplam kurulu gücümüz 18.9 MW'dır.

#### 7.5.4. Kurulmak İstenen Rüzgar Santralleri

Mevcut üç santrale ilave olarak çalışmaları muhtelif seviyelerde olan birçok santral projesi vardır. Bunlar Yap-İşlet-Devret modeliyle yapıp işletilecektir.

**Tablo 7. 5. Proje Aşamasındaki Santraller (ETKB, 2000)**

| Proje Aşaması                        | Proje Adı                          | Gücü (MW) |
|--------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| Sözleşmesi aşamasında olanlar        | Çeşme -Kocadağ                     | 50.4      |
| Fizibilite raporu değerlendirilen    | Bozcaada                           | 5         |
|                                      | Çanakkale                          | 30        |
| Revize fizibilite raporu bekleyenler | Akhisar                            | 12        |
|                                      | Gökçeada                           | 1.6       |
| Fizibilite raporu bekleyenler        | Akhisar                            | 30        |
|                                      | Datça                              | 30        |
|                                      | Mazıdağı                           | 39        |
|                                      | Hacıömerli                         | 45        |
|                                      | Kocadağ                            | 43.6      |
|                                      | Yaylaköy                           | 15        |
|                                      | Şenköy                             | 12        |
|                                      | Çeşme                              | 12        |
|                                      | Yahkavak                           | 15        |
|                                      | Beyoba                             | 15        |
|                                      | Lapseki                            | 15        |
|                                      | Bandırma                           | 15        |
|                                      | Datça                              | 15        |
|                                      | Karaburun                          | 22.5      |
| Başvuru raporu değerlendirilen       | Bodrum - Karabiga                  |           |
|                                      | Kapıdağı - Belen                   |           |
|                                      | İntepe-1 - İntepe-2                |           |
| Ölçümleri devam edenler              | Karabiga-1 - Karabiga-2<br>Yellice |           |

## BÖLÜM 8

### ELAZIĞ İLİNİN İKLİMİ VE RÜZGAR POTANSİYELİ

#### 8.1. Elazığ'ın Konumu ve Yeryüzü Şekilleri

Elazığ ili Doğu Anadolu Bölgesinin güneybatısında, bölgede Yukarı Fırat Bölümü olarak adlandırılan saha içerisinde yer almaktadır. Toplam alanı 9151 km<sup>2</sup> 'yi bulan ve bu alan ile Türkiye topraklarının % 12 sini meydana getiren il sahası 38° 30' - 40° 21' doğu boylamları, 38° 17' - 39° 11' kuzey enlemleri arasında kalmaktadır. Bu çerçeve içinde şekil olarak kabaca dikdörtgene benzeyen Elazığ ili topraklarının doğu-batı doğrultusundaki uzunluğu yaklaşık 150 km, kuzey-güney yönündeki genişliği ise 65 km civarındadır. İli doğudan Bingöl, kuzeyden Keban Baraj Gölü vasıtasıyla Tunceli, batı ve güneybatıdan Karakaya Baraj Gölü aracılığıyla Malatya, güneyden ise Diyarbakır illerinin arazileri çevirmektedir.

Elazığ ili arazileri, içinde bulunduğu Doğu Anadolu Bölgesinin diğer yörelerine göre ortalama yükseltisinin daha düşük (1300-1400 m) ve nispeten az engebeli bir topografyaya sahip olma özelliği ile dikkati çeker. İlin güney, batı ve doğusunda yükseltileri 2000 metreyi biraz geçen dağlık alanlar bulunmasına karşılık, orta bölümde yer yer bu dağlık kuşak arasına sokulmuş, fakat genelde bu kuşağın kuzey kenarında kabaca doğu - batı doğrultulu bir oluk boyunca uzanan ovalık alanlar ile bunları genelde kuzeyden çevreleyen platolar da önemli bir yere sahiptir (Tombul, 1990).

#### 8.2. İklim Özellikleri

Doğu Anadolu Bölgesinin güneybatısında yer alan Elazığ ilinde bölgenin diğer bölümlerinden oldukça farklı ve karakteristik bir iklim dikkati çekmektedir. İlin gerek coğrafi konumu, gerekse morfolojik özellikleri bu elverişli durumun ortaya çıkmasında en büyük etken olmuştur. Gerçekten Elazığ ve çevresi 1300-1400 m dolaylarındaki ortalaması ile, bölgenin diğer bölümlerine oranla düşük bir

yükseltiye sahiptir. Ayrıca, sahanın güneyinde bir duvar gibi uzanan Güneydoğu Toroslar'da mevcut Maden Oluğu ve Kömürhan Boğazı gibi geçitler, özellikle kış mevsiminde, güneyin daha ılık ve nemli hava kütlelerinin yöreye zaman zaman sokulmasına yardımcı olmaktadır. Bütün bunlara bağlı olarak, sonuçta yöre iklimi özellikle kuzeydoğuda tipik olarak gördüğümüz bölgenin karasal iklimine oranla oldukça ılıman bir yapıya bürünmüştür. İlin bu iklim özellikleri meteorolojik rasatlar yardımıyla açıklanmaya çalışılacaktır.

### 8.2.1. Güneşlenme Süresi ve Radyasyon Miktarı

Bilindiği gibi yeryüzünde herhangi bir yerin aldığı radyasyon miktarı, coğrafi enleme göre farklılık gösteren gün uzunluğuna, güneş ışınlarının denklasyon açısına, atmosfer aktivitesine ve yer şekillerinin durumuna göre değişir. 39° kuzey enleminde yer alan Elazığ ilinde güneş ışınları 21 Haziran'da 74° 13', 21 Aralıkta ise 27° 47', 21 Mart ve 23 Eylül'de 50° 46' açıyla ulaşmaktadır.

**Tablo 8.1. Elazığ İlının Güneşlenme Özellikleri**

| Aylar                     | Ocak       | Şubat      | Mart       | Nisan      | Mayıs      | Haziran    | Temmuz     | Ağustos    | Eylül      | Ekim       | Kasım      | Aralık     | Yıllık |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|
| T.Güneşlenme<br>Saat/dak. | 9.4        | 10.3       | 11.4       | 13.0       | 14.1       | 14.4       | 14.3       | 13.3       | 12.1       | 10.6       | 9.5        | 9.2        | 12.0   |
| G.Güneşlenme<br>Saat/dak. | 2.3        | 3.5        | 5.2        | 7.0        | 9.2        | 12.1       | 12.2       | 11.6       | 10.1       | 7.2        | 4.4        | 2.3        | 7.3    |
| İşınların<br>Geliş Açısı  | 38°<br>03' | 45°<br>33' | 50°<br>44' | 61°<br>58' | 69°<br>58' | 74°<br>13' | 64°<br>34' | 56°<br>23' | 48°<br>48' | 40°<br>53' | 33°<br>08' | 27°<br>17' |        |

Yaz aylarında güneş ışınlarının yüksek açılarla gelmesinden dolayı radyasyon miktarı yüksek olmakta, kışın ise düşük açılarla geldiğinden radyasyon miktarı düşük gerçekleşmektedir. Radyasyon miktarı üzerinde, güneşlenme süresi ve günün uzunluğu etkilidir. Yazın günlerin uzun ve bulutluluğun düşük

olmasından dolayı radyasyon miktarı yüksektir. Bu durum güneş enerjisinden faydalanmayı olumlu yönde etkilemektedir. Kışın ise günlerin kısa ve bulutlu olmasından dolayı radyasyon miktarı düşük olmaktadır. Bu özelliği ile Elazığ ili bölgede güneş enerjisinden faydalanma açısından oldukça elverişli bir durum göstermektedir (Güneş, 1998).

### 8.2.2. Basınç

İlin ortalama basınç miktarı 890 mb'dır. Yıllık basınç değerlerine baktığımız zaman aylar arasındaki basınç farkının fazla olmadığı dikkati çeker. Sonbahar ve kış mevsimindeki basınç yıllık ortalamanın üzerinde, ilkbaharda ortalamaya yakın, yaz mevsiminde ise ortalamanın altında bir değere sahiptir (Tombul, 1990).

Tablo 8.2. Elazığ İlinin Basınç Durumu (mb)

| Aylar            | Ocak  | Şubat | Mart  | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim  | Kasım | Aralık | Yıllık |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Ort.Yerel Basınç | 893.8 | 891.6 | 890.8 | 889.3 | 889.4 | 887.1   | 885.1  | 886.6   | 891.2 | 894.0 | 894.8 | 893.9  | 890.6  |
| E.Y.Yerel Basınç | 917.0 | 911.5 | 916.8 | 907.4 | 906.5 | 906.9   | 903.1  | 903.2   | 914.6 | 915.2 | 914.1 | 913.4  | 917.0  |
| E.D.Yerel Basınç | 871.7 | 871.5 | 868.4 | 873.0 | 876.6 | 876.5   | 877.2  | 877.4   | 880.0 | 882.7 | 876.8 | 872.4  | 868.4  |

### 8.2.3. Rüzgar

İlin rüzgar özellikleri iki açıdan ele alınacaktır. Bunlardan biri hakim rüzgar yönü, diğeri rüzgar hızı bakımından olacaktır. Tablolardaki değerler 38° 40'

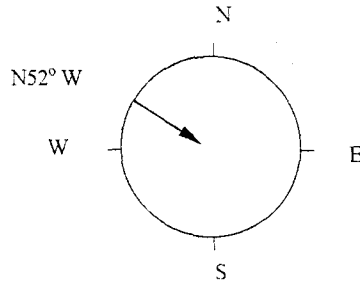
enlem, 39° 14' boylam derecesinde, 990.54 m rakıma sahip noktada kurulu DMI rasat istasyonunda ölçülen ve kaydedilen değerler baz alınarak hesaplanmıştır.

1950-95 yılları arasındaki 45 yıllık rasat değerleri teker teker sayılarak ilin uzun dönem rüzgar frekansları elde edilmiştir.

**Tablo 8. 3.** Elazığ İlinin Rüzgar Frekansları (Güneş, 1998)

| Yön | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haz. | Tem. | Ağus. | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık | Top. |
|-----|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|--------|------|
| N   | 318  | 301   | 377  | 355   | 386   | 462  | 591  | 535   | 490   | 504  | 423   | 340    | 5082 |
| NE  | 380  | 326   | 394  | 373   | 349   | 227  | 239  | 239   | 298   | 380  | 412   | 395    | 4005 |
| E   | 618  | 552   | 503  | 530   | 435   | 195  | 157  | 175   | 196   | 347  | 424   | 602    | 4737 |
| SE  | 444  | 401   | 398  | 410   | 388   | 225  | 155  | 174   | 190   | 252  | 337   | 382    | 3756 |
| S   | 261  | 210   | 278  | 325   | 350   | 243  | 219  | 232   | 240   | 228  | 238   | 251    | 3077 |
| SW  | 167  | 190   | 234  | 268   | 330   | 353  | 343  | 334   | 317   | 257  | 210   | 176    | 3182 |
| W   | 301  | 327   | 409  | 383   | 453   | 701  | 730  | 688   | 588   | 424  | 355   | 316    | 5677 |
| NW  | 384  | 444   | 538  | 498   | 504   | 871  | 1042 | 962   | 725   | 571  | 425   | 381    | 7346 |

Tablo 8.3'deki değerler kullanılarak, Elazığ için oluşturulan rüzgar gülü şekil 2.2'de gösterilmişti. Hakim rüzgar yönleri Rubinstein formülüne göre, kış ve ilkbahar aylarında güneydoğu, yaz ve son baharda ise kuzeybatı görülmektedir. Tüm yıl dikkate alındığı zaman kuzeybatı rüzgarları hakim yön olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra diğer yönlerden esen rüzgarların frekansları oransal olarak yüksektir. Çok belirgin bir rüzgar yönünden bahsedilemez (Güneş,1998).



**Şekil 8.1** Elazığ Şehir Merkezi İçin Hakim Rüzgar Yönü

53 yıllık rasat sonuçlarına göre elde edilen, ortalama rüzgar hızı Tablo 8.4'de yer almaktadır. Elazığ istasyonunda ölçülen uzun dönem yıllık ortalama hız 2.01 m/s olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 8. 4.** Elazığ İçin 53 Yıllık Ortalama Rüzgar Hızları (Meteoroloji, 2001)

| Aylar               | I   | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X   | XI  | XII | Yıllık |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|--------|
| Ortalama Hız (m/sn) | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 2.1 | 2.2 | 2.5 | 2.6 | 2.2  | 1.9 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 2.01   |

Yine aynı döneme ait maksimum rüzgar hızları ve bu hızların yönleri Tablo 8.5'de gösterilmiştir. Ortalama en yüksek hız 30.3 m/sn, ya da 110 km/h olarak bulunmuştur. Tablo 8.3'ün analizi sonucunda tam bir hakim yönün bulunmadığı rüzgar gülünün çok yönlü olduğu sonucu ortaya çıkmıştı. En yüksek hız bakımından da bu özellik mevcuttur.

**Tablo 8. 5.** Maksimum Rüzgar Hızları (Meteoroloji, 2001)

| Aylar                | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII  |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| En Yüksek Hız (m/sn) | 23.5 | 24.6 | 24.5 | 24.9 | 25.1 | 30.3 | 26.5 | 20.9 | 24.7 | 20.7 | 21.3 | 25.2 |
| Yön                  | WSW  | S    | S    | WNW  | SSE  | NW   | NW   | WSW  | W    | NW   | SE   | SE   |

Bu dönemde kuvvetli rüzgarların estiği günlerin yıllık ortalama sayısı 34.2 gün olarak bulunmuştur. Bu ortalama, fırtınalı günler için 3.7 olmuştur.

**Tablo 8. 6.** Kuvvetli Rüzgarlı ve Fırtınalı Gün Ortalaması (Meteoroloji, 2001)

| Aylar            | I   | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X   | XI  | XII | Yıllık |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|--------|
| Kuvvetli Rüz.Gün | 1.9 | 1.9 | 3.3 | 3.9 | 4.0 | 4.6 | 3.8 | 3.2  | 2.3 | 1.8 | 1.5 | 1.9 | 34.2   |
| Fırtınalı Gün    | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 0.1  | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 3.7    |

İlin son 15 yıl içindeki ortalama rüzgar hızları ve hakim rüzgar yönleri yıllara ve aylara göre ayrı ayrı hesaplandığında Tablo 8.7 ortaya çıkmaktadır.

**Tablo 8.7.**

Elazığ İlının 1987-2000 Yılları Arasındaki Aylık Ortalama Rüzgar Hızları (Meteoroloji, 2001)

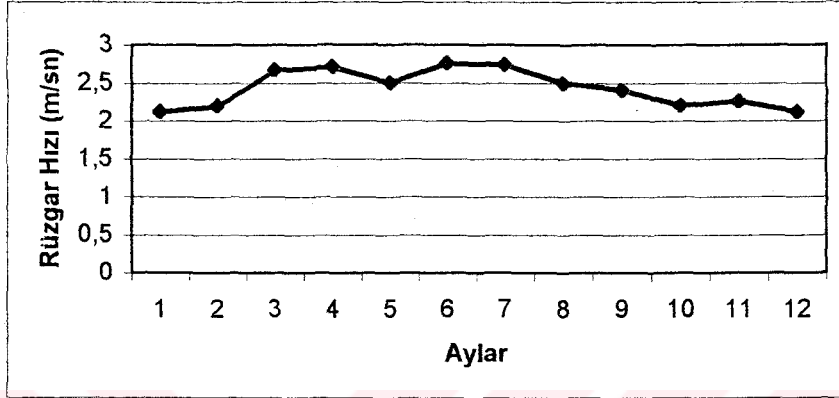
| Aylar | I   | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X   | XI  | XII |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 1987  | 1.2 | 1.2 | 1.8 | 1.8 | 1.4 | 1.8 | 1.6 | 1.6  | 1.5 | 1.2 | 0.9 | 1.2 |
| 1988  | 0.9 | 1.2 | 1.7 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 1.7  | 1.4 | 1.0 | 1.3 | 1.1 |
| 1989  | 1.4 | 1.2 | 1.8 | 1.5 | 1.8 | 1.7 | 2.2 | 1.5  | 1.6 | 2.5 | 3.7 | 2.5 |
| 1990  | 2.1 | 2.9 | 3.5 | 3.2 | 2.6 | 4.0 | 3.3 | 3.3  | 3.0 | 2.7 | 2.3 | 2.6 |
| 1991  | 2.2 | 2.6 | 2.9 | 3.2 | 3.9 | 3.1 | 3.4 | 3.1  | 2.9 | 2.4 | 2.3 | 3.0 |
| 1992  | 2.6 | 2.6 | 2.7 | 3.5 | 3.1 | 2.8 | 3.6 | 3.2  | 3.0 | 2.9 | 3.1 | 2.1 |
| 1993  | 2.6 | 2.2 | 3.0 | 3.6 | 2.9 | 3.3 | 3.4 | 3.0  | 2.8 | 2.5 | 2.5 | 2.1 |
| 1994  | 2.9 | 2.9 | 3.2 | 3.1 | 2.9 | 3.7 | 3.1 | 3.4  | 2.7 | 2.2 | 2.6 | 2.5 |
| 1995  | 2.2 | 1.0 | 3.2 | 3.4 | 2.5 | 3.0 | 3.2 | 2.7  | 2.7 | 2.8 | 3.0 | 1.7 |
| 1996  | 2.4 | 2.7 | 3.4 | 2.9 | 2.8 | 3.3 | 2.7 | 2.6  | 2.8 | 2.5 | 1.9 | 2.5 |
| 1997  | 2.9 | 2.5 | 3.1 | 3.6 | 2.5 | 3.1 | 3.2 | 2.6  | 2.8 | 2.4 | 2.4 | 2.5 |
| 1998  | 2.3 | 3.0 | 2.5 | 2.5 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 2.4  | 2.7 | 2.6 | 2.2 | 2.4 |
| 1999  | 1.9 | 3.3 | 2.9 | 2.7 | 3.1 | 2.7 | 2.4 | 2.3  | 2.3 | 2.3 | 2.5 | 2.4 |
| 2000  | 3.1 | 2.4 | 2.8 | 2.8 | 2.7 | 3.0 | 2.6 | 2.8  | 2.4 | 2.1 | 2.2 | 1.8 |

Tablo 8.7’de yer alan değerlere göre son 15 yıllık ortalama rüzgar hızları hesaplandığında Tablo 8.8 ‘deki değerler ortaya çıkmaktadır.

**Tablo 8. 8.** Elazığ İçin 1987-2000 Yılları Arasındaki Ortalama Rüzgar Hızları

| Aylar               | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII  | Ort. |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ortalama Hız (m/sn) | 2.12 | 2.19 | 2.66 | 2.71 | 2.50 | 2.76 | 2.74 | 2.50 | 2.40 | 2.20 | 2.26 | 2.12 | 2.45 |

Tablo 8.4 ve Tablo 8.8 karşılaştırıldığı zaman son 15 yıllık ortalama rüzgar hızının 53 yıllık dönem ortalamasından daha fazla olduğu görülmektedir. Bu il ikliminin değişmekte olduğunun belirgin bir ölçüsüdür. Hesaplamalarda son değerlerin kullanılması daha doğru olacaktır.



Şekil 8.2 Elazığ İçin Tablo 8.8'deki Değerlere Göre Oluşturulmuş Ortalama Rüzgar Hızları

#### 8.2.4. Sıcaklık ve Yağışlar

İl merkezinin sıcaklık değerleri, içerisinde bulunduğu Doğu Anadolu Bölgesinin diğer illerine ve bölge ortalamasına göre daha yüksektir. Fakat karasal iklimin bütün özelliklerini taşır. Yıllık ortalama 12.9 °C'dir. Bazen kış ortasında nisan, mayıs ayı ortalamalarına yakın sıcaklıklar görülürken, bazen de -20 °C sıcaklıklar ölçülmektedir. Yaz aylarında 40 °C sıcaklıklara rastlanmaktadır.

Tablo 8.9. İl Merkezinin Uzun Dönem Sıcaklık Ortalamaları (Meteoroloji, 2001)

| Aylar        | I     | II    | III   | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI    | XII   |
|--------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Ortalama °C  | -1.2  | 0.2   | 5.0   | 11.8 | 17.3 | 22.8 | 27.2 | 26.8 | 22.0 | 14.5 | 7.4   | 1.5   |
| En Yüksek °C | 11.1  | 17.3  | 24.5  | 30.0 | 34.4 | 37.8 | 42.0 | 40.6 | 37.8 | 32.0 | 24.3  | 16.0  |
| En Düşük °C  | -22.6 | -21.4 | -17.0 | -7.0 | 0.0  | 4.0  | 10.4 | 10.2 | 4.0  | -2.2 | -10.6 | -22.6 |
| t ≤ 0 °C Gün | 24.8  | 20.5  | 12.0  | 0.8  | -    | -    | -    | -    | -    | 0.4  | 5.7   | 17.5  |

Yıllık ortalama yağış miktarı 427.1 mm'dir. Yağışın aylara dağılışı düzensiz olup, en yağışlı ay genellikle nisan, en kurak ay ise ağustostur. İlkbahar aylarındaki yağışlar toplam yağışların % 42'sini oluşturur.

İl merkezinde zeminin karla örtülü olduğu gün toplamı 32.4'tür. En yüksek kar kalınlığı ortalaması Aralık ayında 68 cm olarak ölçülmüştür (Günek, 1998).

**Tablo 8. 10.** İl Merkezinin Uzun Dönem Yağış Ortalamaları (Günek, 1998)

| Aylar                 | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII | VIII | IX  | X    | XI   | XII  | Yıllık |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|--------|
| Yağış Miktarı (mm)    | 42.8 | 45.8 | 55.2 | 67.4 | 54.2 | 14.4 | 2.4 | 1.1  | 7.3 | 39.1 | 51.4 | 46.0 | 427.2  |
| Yağışlı Gün Sayısı    | 12.4 | 11.6 | 12.0 | 12.0 | 10.3 | 4.0  | 1.0 | 0.6  | 1.8 | 6.8  | 9.2  | 11.6 | 93.4   |
| Karla Kaplı Gün Say.  | 13.3 | 10.2 | 2.9  | 0.1  | -    | -    | -   | -    | -   | -    | 0.6  | 5.3  | 32.4   |
| En Yük. Kar .Kal.(cm) | 56   | 48   | 31   | 8    | -    | -    | -   | -    | -   | 1    | 11   | 68   | 68     |

## BÖLÜM 9

### RÜZGAR SANTRALİ TASARIMI

#### 9.1. Yer ve Potansiyel Belirleme Çalışmaları

##### 9.1.1. Santral Yerinin Belirlenmesi

Rüzgar santralleri tasarlanırken santralin hangi amaçla kullanılacağı önemlidir. Lokal çalışacak bir santralle, şebekeye bağlı santralin tasarımında aynı kriterler göz önüne alınmaz. Amaçlar farklı olduğu için göz önüne alınacak özelliklerde farklıdır.

Lokal çalışacak santralde, genelde tek, bazen de birkaç türbin kullanılır. Türbinlerin kurulacağı yer enerjinin tüketileceği yer olacaktır. Yer seçimi ancak dar bir alanda en uygun yerin belirlenmesiyle sınırlı kalacaktır. Türbin güçleri ise mevcut tesisin ihtiyacına göre belirlenecektir.

Şebekeye bağlı santralde; en önemli ölçü üretilecek enerjinin miktarıdır. Elde edilecek enerjinin rüzgar hızının küpüyle orantılı olduğu daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Bu nedenle rüzgar hızlarının yüksek olduğu alanlara kurulan santralde daha fazla enerji üretilecektir. Bu nedenle uygun alanların belirlenmesi gerekir. Bu alanların belirlenmesi amacıyla rüzgar datası elde etmeye yönelik enerji amaçlı rüzgar ölçümleri yapılmalıdır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar çok olumlu olsa bile seçilen alan çevre, elektrik bağlantıları ve topografik bakımdan rüzgar enerjisi santrali kurmak için elverişli olmayabilir. Bu nedenle yatırımcı enerji santrali kurmayı düşündüğü alana 1/25000 ölçekli haritalarla bizzat giderek araziye incelemeli ve aşağıda sıralanan hususların değerlendirilmesini yapmalıdır (Baysal, 1998'den; Çalışkan, 2001).

- 1-Yöre halkıyla görüşerek yeterli ve sürekli rüzgar olup olmadığı,
- 2-Rüzgar santrali kurmaya elverişli yeterli genişlikte arazi olup olmadığı,
- 3-Arazinin mülkiyet durumu, doğal park, milli park veya sit alanı olup olmadığı,

- 4-Arazinin hakim rüzgar yönüne göre durumu,
- 5-Arazinin yerleşim yerlerine ve ulaşım yollarına uzaklığı,
- 6-Enerji nakil hatlarına uzaklığı, en yakın ana şalt merkezinin güç kapasitesi,
- 7-Televizyon verici ve yansıtıcılarına, link istasyonlarına, gsm baz istasyonlarına uzaklığı.

Değerlendirme sonunda olumlu bir düşünce ortaya çıkmışsa, arazi büyüklüğüne ve topografyasına göre bir veya birkaç noktaya rüzgar gözlem aleti kurmak için yasal girişimlere başlamalıdır.

### 9.1.2. Rüzgar Gözlem İstasyonları

Enerji amaçlı rüzgar ölçümlerinde rüzgar hızı, rüzgar yönü gibi değerler 10 m, 30 m ve mümkünse kule yüksekliğinde olan bir ölçüm direği üzerine yerleştirilmiş cihazlarla en az 1 yıl süreyle periyodik olarak ölçülmelidir.

Rüzgar gözlem istasyonlarındaki sistem elamanları; şiddetli yağmur ve 1200 W/m<sup>2</sup> den fazla güneş ışınımına dayanabilmeli, hareketli parçaların yağlanma ihtiyacı karşılanmalı, paslanma ve korozyona karşı korunmuş olmalı, yıldırım koruması bulunmalı ve ağır kış şartlarına dayanıklı olmalıdır. Rüzgar ölçüm aletleri doğal ortamda çalışacakları için kapalı ortamda çalışacak benzerlerine göre daha yıpranırlar. Doğal ortamda paslanma, buzlanma gibi etkiler cihazın ölçüm değerlerinin normalden sapmasına sebep olur. Bu nedenle belli aralıklarla kontrol edilmeli, bakımları ve kalibrasyonları cihazın teknik kılavuzundaki bilgilere göre yapılmalıdır. Rüzgar gözlem istasyonunun yerinin belirlenmesi önemlidir. İstasyonun kurulacağı nokta o alanı temsil etmelidir. Tepe arkalarında yer seçilmemelidir. Bu durumda türbülans sebebiyle rüzgar hızı gerçek değerlerden farklı çıkar. İstasyonun kurulacağı noktada rüzgar akışı laminar olmalıdır.

Rüzgar gözlem istasyonları civarındaki yakın çevresel engeller, ölçülen hız ve yön değerlerinde kayda değer hatalara ve sapmalara sebep olmaktadır. Binalar, ağaçlar gibi yakın çevresel engeller rüzgar yönünü değiştirmekte, engel etrafında türbülansa sebep olmakta ve rüzgar verilerinin sağlıklı olmasını engellemektedirler. Bu nedenle gözlem istasyonlarının yeri, etrafında fazla engel

olmayacak şekilde seçilmelidir. Bir nesnenin ölçüm direğine olan uzaklığı, yüksekliğinin 50 katı kadar mesafedeyse bu nesne yakın çevresel engel olarak tanımlanır. Daha uzak mesafedeki nesneler engel sınıfına girmez.

Rüzgar ölçüm verileri mümkün olduğunca sürekli olmalı, kesintili ve eksik olmamalıdır (Çalışkan, 2001).

### 9.1.3. Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

Çeşitli ülkelerce hazırlanıp kullanıma sunulan, bir alandaki rüzgar ölçüm parametrelerini kullanarak rüzgar atlası hazırlamaya ve rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesine yardımcı olan bilgisayar programları mevcuttur. Bu bilgisayar programlarının en tanınmış olanı, Danimarka RISO Laboratuvarlarında geliştirilmiş olan WASP bilgisayar programıdır. Avrupa rüzgar atlası da bu programla hazırlanmıştır. WASP bilgisayar programı rüzgar hız ve yön bilgileri ile rüzgar gözlem istasyonu çevresindeki engellerden, arazi yüzey pürüzlülüğü ve arazinin topografik özelliklerinden yola çıkarak bölgesel rüzgar atlası istatistiklerinin ve enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Rüzgar gözlem istasyonlarından alınan ölçüm kayıtlarının bilgisayar ortamında düzenlenmiş hali ve bu istasyonlara ait 1/25000 ölçekli harita üzerinde belirlenmiş koordinatları WASP ortamına aktarılıp değerlendirilmesiyle ölçüm yüksekliğine ait frekans dağılım tablosu elde edilir. Bu tablo yardımıyla ölçüm yüksekliğindeki rüzgarın yönlere göre esme sıklığı, hakim rüzgar yönü ortalama rüzgar hızı, ortalama enerji yoğunluğu ve Weibull parametreleri gibi değerler belirlenmiş olur.

## 9.2. Santral Kurulmasında Resmi Prosedür

### 9.2.1. Otoprodüktör ve YİD Modeli

Yurdumuzda kamu eliyle işletilen rüzgar santrali yoktur. Rüzgar santralleri iki farklı statüde yapılıp işletilmektedir. Bunlar otoprodüktör statü ve Yap İşlet

Devret (YİD) modelidir. Otoprodüktör statüde, üreticinin asıl amacı enerji üretip, satmak değildir. Elektrik enerjisi tüketimi fazla olan kurum ve kuruluşlar öncelikle kendi tükettikleri enerjiyi üretmek amacıyla santral kurarlar. YİD modelinde amaç, yatırımın kamu eliyle değil de özel teşebbüs eliyle yapılmasını sağlamaktır. Bu modelde enerji santralini kuran kuruluş sözleşme süresi boyunca tesisi işletir, süre sonunda tesis kamuya devredilir.

### 9.2.2. Otoprodüktör Santral Kurulması İçin Yapılan İşlemler

1 - İstekli şirket ETKB'na bir dilekçe ile başvurur. Dilekçeye 15 nüsha olarak hazırlanmış fizibilite raporu eklenir. Bu raporda bulunması gereken bilgi ve belgeler şunlardır:

- a) Kurulmak istenen santralin gücü ve yıllık toplam enerji üretim kapasitesi,
- b) 1/25000 ölçekli harita üzerinde santralin kurulacağı yer,
- c) Otoprodüktör şirketin veya grubun kurulu gücü ve yıllık enerji tüketimi,
- d) Şirketin 10 yıl boyunca TEAŞ / TEDAŞ'dan talep edeceği enerji miktarı,
- e) Ortakların tam listesi ve adresleri, şirketi temsile yetkili kişilerin imza sirküleri,
- f) Santralde uygulanacak teknoloji ve özellikleri,
- g) Yatırım tutarı ve tahmini gerçekleşme tarihi,
- h) Tesisin bağlı olduğu elektrik şebekesinin basitleştirilmiş tek hat şeması,
- i) Tesisin ekonomik ömrü,
- j) Şirkete ait ticaret kaydını gösteren Ticaret Sicili gazetesi,
- k) Başka bir oto prodüktör santrale ortak olmadığına ilişkin taahhütname,
- l) Elektrik enerjisi fonu katkı payının yatırıldığına ait dekont,

2- Fizibilite raporu, ETKB tarafından incelenir ve ilgili kuruluşların görüşleri alınır.

3- Fizibilite raporunun uygun olduğuna ilişkin bakanlık ve ilgili kuruluşların görüşleri tamamlandıktan sonra, bakanlık şirketten teyit ister.

4- ETKB ile şirket arasında “ Otoprodüktör Statüsünde Üretim Tesisi Kurulması, İşletilmesi ve Enerji Fazlasının Satışına İzin Verilmesine İlişkin Sözleşme” imzalanır.

5- Sözleşme onaylandıktan sonra 6 ay içinde santralle ilgili projeler hazırlanır ve bakanlığa teslim edilir. Bakanlık projeleri 3 ay içerisinde inceler ve onaylar. Aynı süre içerisinde “Enerji Satış Anlaşması” imzalanır.

6- Santral, bakanlık tarafından geçici kabulünün yapılmasından sonra ticari üretime başlar.

### 9.3. Maliyet

Sistemin maliyeti ve faydası analiz edilirken ömür boyu maliyet hesabı yöntemine göre yapılmalıdır. Dikkate alınacak zaman dilimi türbinin yaklaşık ömrü kadar olmalıdır. Bir rüzgar enerjisi sisteminde maliyeti oluşturan elamanlar şunlardır.

- 1 – Türbin maliyeti,
- 2 – Temel maliyeti,
- 3 – Kule maliyeti,
- 4 – Nakliye giderleri,
- 5 – Montaj giderleri,
- 6 – Arazi maliyeti,
- 7 – Alt yapı maliyeti,
- 8 – Vergiler ve harçlar,
- 9 – Bağlantı ekipmanı maliyeti,
- 10 – İşletme ve bakım maliyeti.

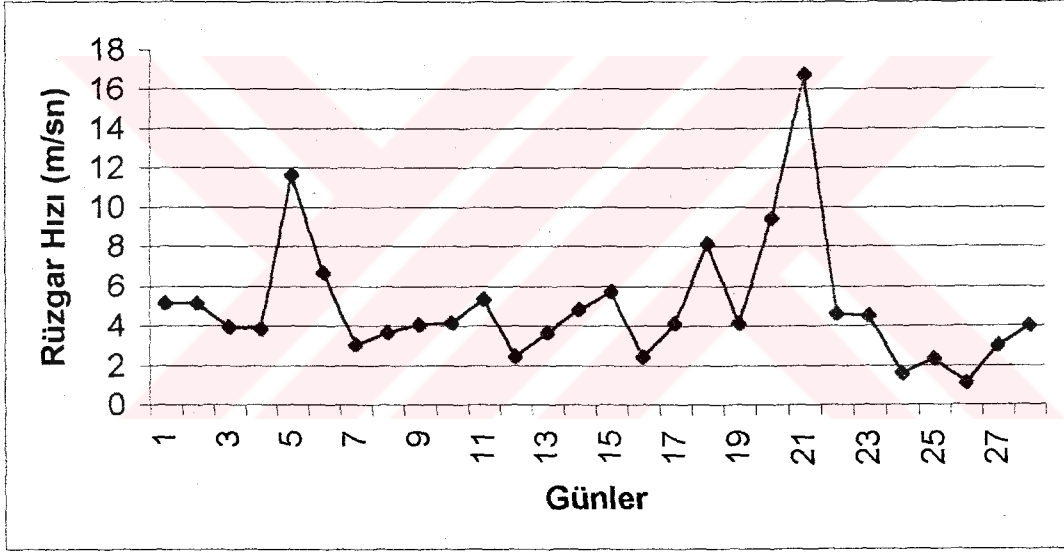
### 9. 4. Elazığ’da Bir Rüzgar Santral Kurulması İçin Yapılan Çalışmalar

Elazığ’da ticari amaçlı bir rüzgar santrali yapmak amacıyla özel bir müessese tarafından, Maden İlçesi sınırları içindeki bir tepede rüzgar ölçüm çalışmaları 2000 yılında başlanmıştır. Eldeki verilerden, rüzgar hızı ortalamasının ticari amaçlar için

yetersiz olduğu düşüncesiyle 2001 yılı mart ayında ölçüm cihazları sökülüştür. Müessese tarafından Şubat 2001 ve Mart 2001 sonuçlarının çalışmamızda kullanılmasına izin verilmiştir.

**Tablo 9.1. Şubat 2001 Ölçüm Sonuçları**

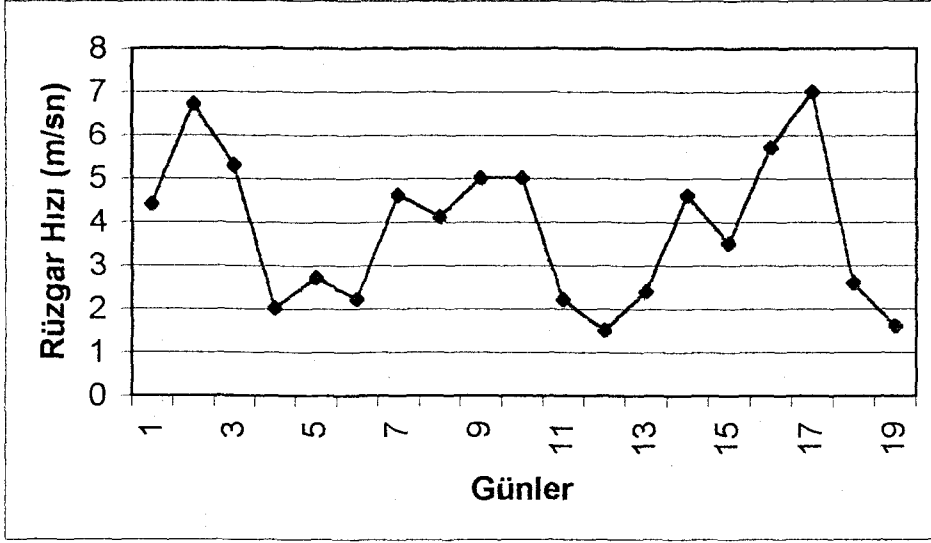
|                                       |     |     |     |     |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Günler                                | 1   | 2   | 3   | 4   | 5    | 6   | 7    | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  |
| Hız(m/Sn)                             | 5.1 | 5.1 | 3.9 | 3.8 | 11.6 | 6.6 | 3.0  | 3.6 | 4.0 | 4.1 | 5.3 | 2.4 | 3.6 | 4.8 |
| Günler                                | 15  | 16  | 17  | 18  | 19   | 20  | 21   | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  |
| Hız(m/Sn)                             | 5.7 | 2.4 | 4.1 | 8.1 | 4.1  | 9.4 | 16.7 | 4.6 | 4.5 | 1.6 | 2.3 | 1.1 | 3.0 | 4.0 |
| Şubat Ayı Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn) |     |     |     |     |      |     |      |     |     |     |     |     | 4.9 |     |



**Şekil 9.1 Şubat 2001 Rüzgar Hızı Grafiği**

**Tablo 9.2. Mart 2001 Ölçüm Sonuçları**

|                                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Günler                               | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  |
| Hız(m/Sn)                            | 4.4 | 6.7 | 5.3 | 2.0 | 2.7 | 2.2 | 4.6 | 4.1 | 5.0 | 5.0 | 2.2 | 1.5 | 2.4 | 4.6 |
| Günler                               | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  |
| Hız(m/Sn)                            | 3.5 | 5.7 | 7.0 | 2.6 | 1.6 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| Mart Ayı Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 3.9 |     |



Şekil 9.2 Mart 2001 Rüzgar Hızı Grafiği

### 9.5. Elazığ'ın Rüzgar Güç Yoğunluğu

Elazığ'da şehir merkezi yakınındaki açık arazilerde ortalama rüzgar hızı olarak, Tablo 8.8'de verilen 2.45 m/sn'lik hız alınabilir. Tepelerde ve kırsal arazideki ortalama rüzgar hızı olarak da Tablo 9.1 ve Tablo 9.2'de verilen değerlerin ortalaması alınacaktır. Bu hız denk.5.26 'dan,

$$v_{ort} = \sqrt[3]{\frac{4.9^3 + 3.9^3}{2}} = 4.45 \text{ m/sn}$$

olarak bulunur. Toplam güç yoğunluğu; havanın yoğunluğu  $\rho = 1.226 \text{ kg/m}^3$  olarak alınarak denk.5.3'den hesaplanır.

Şehir merkezi yakınlarındaki açık arazilerde güç yoğunluğu;

$$\frac{P_{top}}{A} = \frac{1}{2} 1.226 \times 2.45^3 = 9 \text{ W/m}^2$$

olarak bulunur. Kırsal arazideki güç yoğunluğu ise ;

$$\frac{P_{top}}{A} = \frac{1}{2} 1.226 \times 4.45^3 = 54 \text{ W/m}^2$$

olur. Bu yoğunluklar ölçüm çalışmalarının yapıldığı, yerden 10 m yükseklikteki yoğunluktur. Daha yükseklerde yoğunluk artacaktır. Elde edilecek enerji türbin verimine ve kanat çapına bağlı olacaktır.

### 9.6. Lokal Çalışacak Bir Rüzgar Santrali Tasarımı

Rüzgar türbinin seçiminde en etkili parametre rüzgarın ortalama hızı olmaktadır. Ortalama rüzgar hızlarının düşük olduğu yerlerde türbinin harekete geçme hızı da düşük olmalıdır. 8. bölümde verilen şehir merkezi ortalamaları ve 9. bölümde verilen açık arazi ölçüm sonuçlarına göre Elazığ'ın rüzgar hızı düşüktür.

Mevcut ölçüm sonuçlarına göre, Elazığ'da büyük güçte ticari bir santralin kurulması ekonomik değildir. Bu nedenle lokal çalışacak küçük bir santral tasarlanmaya çalışılacaktır.

Hesaplamalar açık arazide bir tepe üzerine kurulması düşünülen, ortalama hızda 1 kW güç üretebilecek bir türbin için yapılacaktır. Türbin olarak, dünya piyasalarında yaygın olarak üretilen 3 kollu türbin seçilmiştir. Bu tip türbinlerin verimi 0.35 – 0.4 arasında değişmektedir. Ortalama rüzgar hızı  $v = 4.45$  m/sn alınacaktır. Türbinin 20 m'lik kule üzerine yerleştirilmesi planlanmıştır.

Kule yüksekliği 20 m olacağı için bu yükseklikteki rüzgar hızı, denk.5.27'den bulunur.  $\mu$  katsayısı Tablo 5.1'den 0.18 seçilmiştir.

$$v = 4.45 \cdot \left[ \frac{20}{10} \right]^{0.18} = 5 \text{ m/sn}$$

Denklem 5.20'deki A terimi yerine  $A = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$  ifadesi yazılarak D değeri

bulunur. Bu değer, istenilen gücü üretebilecek gerekli türbin kanat çapıdır.

$$P = \eta \cdot \frac{1}{2 \cdot g_c} \rho \cdot A \cdot v^3 = \eta \cdot \frac{1}{2 \cdot g_c} \rho \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot v^3$$

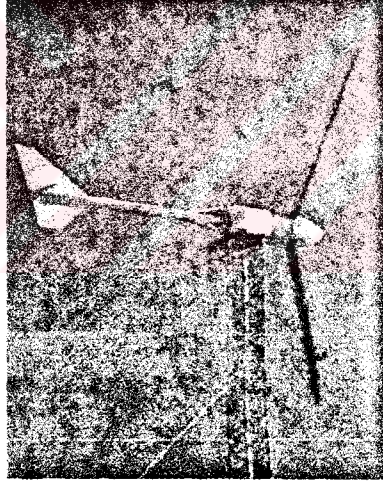
$$D = \sqrt{\frac{8 \cdot P \cdot g_c}{\eta \cdot \rho \cdot \pi \cdot v^3}} = \sqrt{\frac{8 \times 1000 \times 1}{0.4 \times 1.226 \times \pi \times 5^3}} = 6.4 \text{ m}$$

Hesaplama verim  $\eta = 0.4$ , havanın yoğunluğu  $\rho = 1.226 \text{ kg / m}^3$  olarak alınmıştır. Şu anda dünya piyasalarında 7 m kanat çapına sahip türbinler 7-10 kW güçte yapılmaktadır. Bu güçteki türbinin maliyeti dikkate alındığında 1 kW güç üretimi için ekonomik olmamaktadır. Daha ekonomik bir çözüm için bu kanat çapına sahip daha küçük güçte bir türbin seçilmelidir.

9. bölümdeki tablo ve grafikler incelendiği zaman Elazığ'daki rüzgar hızının 7 - 8 m/sn hızın üzerine ender olarak çıktığı görülür. Bu durumda kullanılacak türbinin 8 m/sn hızda nominal güce ulaşması yeterli olacaktır. Bu hızda ulaşılacak güç;

$$P = 0.4 \times \frac{1}{2 \times 1} \times 1.226 \times \pi \times \frac{7^2}{4} \times 8^3 = 4829 \text{ W}$$

Bu sonuçlara göre en uygun çözüm 5 kW güce ve 7 m kanat çapına sahip bir türbinin seçilmesidir.



Resim 9.1. 7 m kanat çapına sahip bir türbin (www.aresenerji.com)

## BÖLÜM 10

### SONUÇLAR ve TEKLİFLER

Elazığ şehir merkezi için çok belirgin bir hakim rüzgar yönünden bahsedilemez. Tüm yıl dikkate alındığı zaman hakim rüzgar yönü N 52 ° W (kuzey batı ) yönüdür. Kış aylarında ise hakim yön güneydoğu olmaktadır. Esme sıklığı bakımından kış aylarında doğu yönlü rüzgarlar daha fazladır.

Şehrin uzun dönem (53 yıllık) rüzgar hızı ortalaması 2.01 m/sn iken, son 15 yıllık ortalama rüzgar hızı 2.45 m/sn olarak ölçülmüştür. Kırsal arazide ise çok kısa dönemde yapılan ölçümlere göre ortalama hız 4.45 m/sn bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, şehir merkezi yakınlarındaki açık arazilerde güç yoğunluğu 9 W/m<sup>2</sup>, kırsal arazideki yükseltilerde bu yoğunluk 54 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. En yüksek hızların ortalaması 30.3 m/sn (110 km/h) olmuştur.

Elazığ'da yapılacak ticari amaçlı bir rüzgar santrali, mevcut ölçüm sonuçlarına göre karlı bir yatırım değildir. Bu sebeple ortalama rüzgar hızında 1 kW güç üretebilecek ve lokal çalışacak küçük bir santral tasarlanmıştır. Türbinin kanat çapı 7 m, nominal gücü 5 kW olarak bulunmuştur. Türbinin 20 m'lik bir kule üzerine yerleştirilmesi düşünülmüştür.

Şehrin rüzgar potansiyeli ticari üretim için yeterli olmasa bile, düşük hızlarda verimli çalışabilen savonius veya çok kollu fars türbinleri 10-15 m'ye kadar olan kuyulardan su çekilmesi amacıyla kullanılabilir.

Elazığ ili elektromekanik üretim bakımından belli bir alt yapısı olan bir ildir. Elektrik panoları, dalgıç su motorları, küçük elektrik motorları üreten işletmeler vardır. Bunlar arasına küçük rüzgar türbini imal eden fabrikalar da eklenebilir.

Hakim rüzgar yönü şehirleşme ve sanayileşme açısından önemlidir. Elazığ ilinin yeryüzü şekilleri detaylı olarak incelendiği zaman şehir merkezinin etrafı dağlarla çevrili bir ova üzerine kurulduğu görülür. Bu yapı bir çanağa benzetilebilir. İlin ortalama sıcaklıklarını gösteren Tablo 8.9 incelendiğinde yılın

beş ayı (kasım, aralık, ocak, şubat ve mart) boyunca sürekli, nisan ve mayıs aylarında da kısmen, konut ve bina ısıtılmasına gerek olduğu görülür. Isınma amacıyla tüketilen fosil yakıtların havaya bıraktığı zehirli gazlar, eğer rüzgar tarafından dağıtılmazsa çanak şeklindeki yapıdan dolayı şehir merkezi üzerinde birikecek, insan hayatını tehdit eder noktalara gelecektir. Bu sebeple kışın hakim yön olan güney-doğu yönünde yapılaşmanın fazla olmaması, binaların rüzgarı engellemeyecek şekilde az katlı olması gerekmektedir. Bu yönde geniş ana arterler açılmalı, mevcutları genişletilmelidir.

Elazığ'ın daha geniş çaplı rüzgar atlasının çıkartılması, rüzgar potansiyeli uygun alanların belirlenmesinde faydalı olacaktır. DAP kapsamında ilimizin ve Doğu Anadolu Bölgesinin rüzgar potansiyelinin belirlenmesi planlanmış, fakat daha sonra bu çalışmalar yapılmamıştır.

Ülkemizde rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi için en uygun bölgeler Marmara, Ege ve Güney Doğu Anadolu Bölgesidir. Rüzgar enerjisi kullanımının yaygınlaşması ülkemizin fosil yakıt ithalatını azaltacak, elektrik enerjisi üretimi amacıyla fosil yakıt tüketimini sınırlayacaktır. Türbin imalatına geçilmesi durumunda yeni istihdam kapıları açılacaktır.

## KAYNAKLAR

- Avşar, H., Çetinkaya, K., 2001, Afyon Yöresinin Rüzgar Potansiyeli ve Elektrik Enerjisi Üretimi için Savonius Tasarımı, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, sayfa 171-178, Kayseri
- Çalışkan, M., 2001, Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, sayfa 179-189, Kayseri
- Güney, İ., Noğay, S., 2001, Rüzgar Türbinlerinde Kontrol ve Güvenlik Sistemleri, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, sayfa 137-144, Kayseri
- Hayli, S., 2001, Rüzgar Enerjisinin Önemi , Dünya' da ve Türkiye'deki Durum, F.Ü. Sosyal Bilimler Dergisi, cilt 11 sayı 1, sayfa 1-26, Elazığ
- Özdamar, A., 2001, Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Türbinlerine Genel Bakış, TEKSEN 2001 Sempozyumu, sayfa, 242-254, İzmir
- Altın, V., 2000, Nükleer Enerji Dostumuz mu ? Düşmanımız mı ?, Bilim Teknik Dergisi Mart 2000 Sayısı
- Durak, M., 2000, Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinin Durumu, Çevre Teknolojileri Sempozyumu, sayfa 437- 444, İstanbul
- Ertaş, E., 2000, Temiz Enerji Kaynağı Olarak Rüzgar Türbinleri IV. Türk-Alman Enerji Sempozyumu, sayfa 108-114,
- Uyar, T.S, 2000, Türkiye Enerji Sektöründe Karar Verme ve Rüzgar Enerjisinin Entegrasyonu, ELECO'2000 Sempozyumu, sayfa 1-19, Bursa
- Çevre Vakfı, 1999, Türkiye'nin Çevre Sorunları, Türkiye Çevre Vakfı, Ankara
- Esposito, A., 1998, Fluid Mechanics With Application, Prentice-Hill Inc., New Jersey, USA
- Günek, H., Harput ve Elazığ Şehrinin İklim Elamanlarının Karşılaştırılması ve İklim Koşullarının Çevresel Etkileri, Dünü ve Bugünüyle Harput Sempozyumu, Sayfa 365-379, Elazığ
- Erinç, S., 1996, Klimatoloji ve Metodları, Alfa Dağıtım, İstanbul
- İnan, D., 1996, Tükenmez Enerjiler, Bilim Teknik Dergisi Ocak 1996 Sayısı
- Ültanır, M.Ö., 1996, Yel Değirmenlerinden Günümüze Rüzgar Enerjisi Bilim

Teknik Dergisi Nisan 1996 Sayısı

- Berdiyev, A., 1995, Rüzgar Enerjisi İle Çalışan Bir Elektrik Üreticisinin Bornova Şartları İçin Tasarımı, Yük.Lis.Tezi. Ege Ün.Güneş Enerjisi Enst., İzmir
- Sayındı, M., 1994, Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Türbini Dizaynı, Yük.Lis.Tezi, Yıldız Ün. Fen Bil. Enst., İstanbul
- Erol, O., 1993, Genel Klimatoloji, Gazi Büro Kitapevi, Ankara
- Watt, F., Wilson, F., 1992, Weather and Climate (Bağcı, G.B., 1997, Hava ve İklim , Tübitak, Ankara
- İlkılıç, C., 1990, Rüzgar Enerjisinin Mekanik Enerjiye Dönüştürülmesi, Yük.Lis. Tezi, Fırat Ün. Fen Bil. Enst., Elazığ
- Tombul, S., 1990, Elazığ ve Çevresinin İklim Özellikleri ve Keban Barajı'nın Yöre İklimi Üzerine Olan Etkileri, F.Ü. Coğrafya Sempozyumu, sayfa 275-294, Elazığ
- Stephanson, G.E., 1986, Power Technology, Delmar Publishers, Newyork, USA
- Meteoroloji, 1985, Meteorolojik Rasat Aletleri, Meteoroloji Genel Müd., Ankara
- El-Wakil, M.M., 1984, Power Plant Technology, Mc Graw Hill, USA
- Bilgin Elektrik, Şubat 2001, Mart 2001 Ölçüm Sonuçları
- DMİ , 2000 Yılı Elazığ Rasat Raporları
- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 1998 Enerji Raporu
- Re-focus, November/December 2001, October 2001, July/August 2001 Sayıları
- [www.artemis.efes.net](http://www.artemis.efes.net)
- [www.demirer.com](http://www.demirer.com)
- [www.dewi.de](http://www.dewi.de)
- [www.ekotopya.triod.com](http://www.ekotopya.triod.com)
- [www.enerji.gov.tr/Enerji.html](http://www.enerji.gov.tr/Enerji.html)
- [www.meteor.gov.tr/webler/arge/argealt25.html](http://www.meteor.gov.tr/webler/arge/argealt25.html)
- [www.Nordex.com](http://www.Nordex.com)
- [www.unimedya.net.tr/egetek](http://www.unimedya.net.tr/egetek)
- [www.tubitak.gov.tr/btspd/platform/enerji](http://www.tubitak.gov.tr/btspd/platform/enerji)
- [www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec10.html](http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec10.html)