



T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RÜZGÂR TÜRBİNLERİ VE KONTROL SİSTEMLERİ

SEDAT TURHAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Antakya/HATAY

KASIM -2009

MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR TÜRBİNLERİ VE KONTROL SİSTEMLERİ

SEDAT TURHAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yrd. Doç.Dr Yıldız KOÇ danışmanlığında hazırlanan bu tez 26/11/2009 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd.Doç.Dr.Yıldız KOÇ Yrd.Doç.Dr.Emin ÜNAL Yrd.Doç.Dr.N.Adil ÖZTÜRK
Başkan Üye Üye

Bu tez Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod no:

Prof. Dr. Bünyamin YILDIZ
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
1. GİRİŞ.....	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
2.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi.....	4
2.1.1 Rüzgarın Enerji Üretimi İçin İlk Kullanımı.....	5
2.2. Rüzgâr Enerjisi Nasıl Yer Değiştirir	7
2.2.1 Hava Akımı Nasıl Oluşur.	8
2.2.2 Coriolis Kuvveti.....	9
2.3. Rüzgârın Gücü.....	9
2.3.1 Rüzgardaki Mümkün Güç Miktarı.....	10
2.4. Rüzgar ve Coğrafya.....	12
2.5. Neden Rüzgâr Enerjisi Kullanmalıyız	13
2.5.1. Rüzgar Enerjisi ve Diğer Enerji Türleri.....	13
2.5.2. Maliyet.....	15
2.5.3. Emisyon Değerleri.....	15
2.5.4. Rüzgâr Enerjisi Çevre Kirliliği Yaratmaz	17
2.5.5. Rüzgâr Enerjisi Sürdürülebilir Bir Kaynaktır.....	17
2.5.6. Rüzgâr Enerjisinin Farkı.....	18
2.6. Rüzgar Enerjisinin Kullanım Alanları.....	19
2.7. Dünyada Rüzgar Enerjisi Durumu.....	20
2.8. Türkiyede Rüzgar Enerjisi Durumu.....	22
2.9. Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları.....	34
2.9.1. Üstünlükleri	34
2.9.2. Dezavantajları.....	35
3. METERYAL VE YÖNTEM.....	36

3.1	Meteryal.....	36
3.1.1.	Rüzgar Türbinleri.....	36
3.2.	Yöntem.....	37
3.2.1	Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	37
3.2.1.1	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	37
3.2.1.1.1.	Rüzgârı Önden Alan Makineler.....	39
3.2.1.1.2.	Rüzgârı Arkadan Alan Makineler.....	39
3.2.1.2.	Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	39
3.2.3.1.	Savonious Rüzgâr Türbinleri.....	40
3.2.3.2.	Darrieus Rüzgar Türbinleri.....	42
3.2.3.3.	H-Darrieus Rüzgar Türbinleri.....	42
3.2.1.3.	Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	44
3.3.	Kanat Sayısına Göre Rüzgar Türbinleri.....	44
3.3.1	Tek Kanatlı Rüzgâr Türbinleri.....	44
3.3.2.	Çift Kanatlı Rüzgâr Türbinleri.....	45
3.3.3.	Üç Kanatlı Rüzgâr Türbinleri.....	46
3.3.4.	Çok Kanatlı Rüzgâr Türbinleri.....	46
3.4.	Kanat Yapımında Kullanılan Malzemeler.....	47
3.5.	Rüzgâr Türbinlerinin Birbirleri ile Karşılaştırılması.....	48
3.5.1.	Büyük Türbinlerin Seçimi için Sebepler.....	49
3.5.2.	Küçük Türbinlerin Seçimi için Sebepler.....	49
3.6.	Rüzgar Türbin Yapısı.....	51
3.6.1	Rotor Kanatları.....	52
3.6.1.1.	Aerodinamik Kuvvetler.....	52
3.6.1.2.	Kanat Profili.....	53
3.6.2.	İletim Sistemi.....	55
3.6.3.	Fren Sistemi.....	56
3.6.4.	Kule.....	57
3.6.5.	Jeneratörler.....	58
3.6.5.1.	Senkron Jeneratörler.....	59
3.6.5.2.	Asenkron Jeneratörler.....	60
3.7.	Rüzgar Türbinleri Kontrol Sistemleri	61

3.7.1. Açık Kontrol Sistemi	63
3.7.2. Yön Kontrol Sistemi	63
3.7.3. Fırtına Kontrol Sistemi	64
3.7.4. Şebeke Kontrol Sistemi.....	65
3.7.5. Üreteç Kontrol Sistemi	66
3.7.6. Uzaktan Erişim Kontrol Sistemi	66
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	68
4.1. Rüzgar Türbinlerinin Geleceği.....	68
4.2. Rüzgar Türbinleri Kuruluş Yerinin Seçimi.....	69
4.2.1. Kuruluş Yeri Seçim Faktörleri.....	69
4.2.1.1. Ortalama Rüzgar Hızı.....	69
4.2.1.2. Kuruluş Yerinin Topoğrafyası	69
4.2.1.3. Altyapı.....	71
4.2.1.4. Arazinin Kullanımı.....	71
4.2.1.5. Yüzey Şekillerinin Etkisi.....	71
4.2.1.6. Çevresel Etkileşim.....	72
4.3 Rüzgar Türbinlerinin Yerleşimi.....	73
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR.....	76
TEŞEKKÜR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	79

ÖZET

Fosil yakıtların sınırlı oluşu, maliyetlerinin sürekli artması ve küresel ısınmanın, çevre kirliliğinin yoğun yaşandığı günümüzde insanoğlu artık her alanda bu üç faktörü minimize edecek alternatif çevre dostu enerji eldesine yönelmiştir. Bu anlamda rüzgâr enerjisi de çok büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmamda rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik daha sonrada elektrik enerjisine çeviren rüzgâr türbinleri ve kontrol sistemlerini incelemesi ayrıca rüzgâr enerjisini kullanılabilir enerjiye çeviren rüzgâr türbinleri ve kontrol sistemlerinde uygulanan tüm yaklaşımları tanıtmak amaçlanmıştır. Bunun dışında rüzgâr türbinin diğer bileşenlerini de tanıtmak gerektiği unutulmamış ve bunlara da yer verilmiştir. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin farklı kullanımlarına ve değişik uygulamalarına da yer vermeye çalışılmıştır.

2009, 79 sayfa

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbinleri, rüzgâr türbinleri kontrol sistemleri

ABSTRACT

Because of limited fossil fuels, continuous increase in their costs and global warming, human beings have tended to produce alternative energy sources in order to minimize the three factors in every field due to intense environmental pollution. On these grounds, wind energy also has become very important.

This study aimed to present all methods of approaches that is used in wind turbines and control systems which converts kinetic energy in wind to first mechanic energy then electrical energy. Furthermore, it is not forgotten to cite the other components of wind turbines. Besides, the different usages and varied applications of the turbines are mentioned too.

2009, 79 pages

Key Words: Wind energy, wind turbines, the control systems of wind turbines

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Kanat Alanı
Cd	Sürüklenme Katsayısı
CL	Kaldırma Katsayısı
D	Sürüklenme Kuvveti (N)
DERT	Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri
p	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)
RT	Rüzgâr Türbinleri
R	Hava Yoğunluğu
T	Sıcaklık (Fahrenheit)
v	Rüzgâr Hızı
YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri
W	Rüzgârdaki Mümkün Güç Miktarı

ÇİZELGELER DİZİNİ**Sayfa**

Çizelge 2.1. Tükenebilirliğine göre enerji türleri.....	8
Çizelge 2.2. Beaufort rüzgar ölçeği.....	11
Çizelge 2.3. Enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri açısından kıyaslaması.....	13
Çizelge 2.4. Enerji üretim metotlarının maliyet ömür ilişkisi.....	14
Çizelge 2.5. Enerji üretiminde kullanılan farklı yöntemlerden elde edilen elektriğin maliyet karşılaştırılması.....	15
Çizelge 2.6. Küresel ısınmaya yol açan karbondioksit için elektrik üretimi sırasında karşılaştırmalı emisyonlar.....	16
Çizelge 2.7 Asit yağmuruna yol açan kükürtdioksit için elektrik üretimi sırasında karşılaştırmalı emisyonlar.....	16
Çizelge 2.8 Asit yağmuruna ve duman oluşumuna yol açan azotoksitler için elektrik üretimi sırasında karşılaştırmalı emisyonlar.....	17
Çizelge 2.9. Türkiye’ de bölgelere göre ortalama rüzgar gücü yoğunluğu.....	18
Çizelge 2.10. Dünyadaki toplam kurulu rüzgar gücü kapasitesi.....	21
Çizelge 2.11 Türkiye’de kurulu rüzgar santralleri ve üretilen güç.....	32
Çizelge 2.12.Türkiye’de inşaatı devam eden rüzgar santralleri ve güçleri.....	33
Çizelge 3.1. Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması.....	48
Çizelge 3.2. Rüzgârı alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması.....	50
Çizelge 3.3. Kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırılması.....	50
Çizelge 5.1. Arazilerin pürüzlüğe bağlı katsayıları.....	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Smith-Putnam rüzgar türbini.....	5
Şekil 2.2 Gedser rüzgar türbini.....	6
Şekil 2.3. Rüzgar enerjisinin tarih boyunca gelişimi.....	20
Şekil 2.4. Yıllara göre dünyada rüzgar enerjisinden güç elde edimi.....	22
Şekil 2.5. Türkiye rüzgar atlası.....	23
Şekil 2.6. Türkiye’de 30 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı	24
Şekil 2.7. Türkiye’de 100 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı	24
Şekil 2.8. İlkbahar mevsimi 50 m yükseklikte rüzgar hız dağılımı	25
Şekil 2.9. Yaz mevsimi 50 m yükseklikte rüzgar hız dağılımı.....	25
Şekil 2.10. Sonbahar mevsimi 50 m yükseklikte rüzgar hız dağılımı	26
Şekil 2.11. Kış mevsimi 50 m yükseklikte rüzgar hız dağılımı	26
Şekil 2.12. Ocak ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı	27
Şekil 2.13. Şubat ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	27
Şekil 2.14. Mart ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı	27
Şekil 2.15. Nisan ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	28
Şekil 2.16. Mayıs ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	28
Şekil 2.17. Haziran ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	28
Şekil 2.18. Temmuz ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	29
Şekil 2.19. Ağustos ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	29
Şekil 2.20. Eylül ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	29
Şekil 2.21. Ekim ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	30
Şekil 2.22. Kasım ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	30
Şekil 2.23. Aralık ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı.....	30

Şekil 2.24. Türkiye de kurulu veya inşaatı devam eden rüzgar türbinleri.....	31
Şekil 2.25. Hatay/ Samandağ rüzgar tesisi 30 Mw	34
Şekil 3.1. Modern bir rüzgar türbinin iç yapısı.....	36
Şekil 3.2. Yatay eksenli rüzgar türbini.....	38
Şekil 3.3. Dikey eksenli rüzgar türbini.....	40
Şekil 3.4. Savonius tipi rüzgar türbini.....	41
Şekil 3.5. Darrieus rüzgâr türbini.....	42
Şekil 3.6. H-Darrieus rüzgâr türbini.....	43
Şekil 3.7. Tek-çift ve üç kanatlı rüzgâr türbinleri.....	45
Şekil 3.8. Çok kanatlı rüzgar türbini.....	47
Şekil 3.9. Rüzgar türbini elemanları.....	52
Şekil 3.10. Sürüklenme ve kaldırma kuvvetinin kanat üzerindeki etkisi.....	55
Şekil 3.11. Rüzgar türbini dişli kutusu.....	56
Şekil 3.12. Çeşitli kule tipleri.....	57
Şekil 3.13. Jeneratör.....	58
Şekil 3.14. Modern bir rüzgar türbini.....	61
Şekil 3.15 Rüzgar türbini kontrol sistemleri.....	62
Şekil 3.16. Açık kontrol sistemi çalışma prensibi.....	63
Şekil 3.17. Yön kontrol sistemi çalışma prensibi.....	64
Şekil 3.18. Fırtına kontrol sistemi çalışma prensibi.....	64
Şekil 3.19. Fırtına kontrol sistemi olmayan rüzgar türbini güç eğrisi.....	65
Şekil 3.20. Fırtına kontrol sistemi olan rüzgar türbini güç eğrisi.....	65
Şekil 3.21. Şebeke kontrol sistemi çalışma prensibi.....	65
Şekil 3.22. Üreteç kontrol sistemi çalışma prensibi.....	66
Şekil 3.23. Uzaktan kontrol sistemi çalışma prensibi.....	67
Şekil 4.1. Rüzgar türbinlerinin kara taşıtına uygulanması.....	68
Şekil 4.2. Rüzgar türbinlerinin yerleşimi.....	73

1.GİRİŞ

Teknolojik ve endüstriyel gelişmelerin sonucunda enerji ihtiyacı artarak, dünya fosil yakıt (kömür, petrol ve doğal gaz) rezervlerini her geçen gün azaltmaktadır. Fosil yakıt rezervleri bazı ülke toprakları altında bulunmakta, aralarında Türkiye'nin de bulunduğu bazı ülkeler dış alımla temin ettikleri enerji için büyük harcamalarda bulunmaktadır. Böylece, enerji rezervine sahip ülkelere, sahip olmayanlar bağımlı kalarak, enerji rezervleri siyasi baskı ve yatırım unsuru olarak kullanılmaktadır.

Yapılan araştırmalara göre 1-2 asırlık ömrü kalan fosil yakıtlar dinamik süreçte enerji isteminin artması ile, tüm dünyada alışıla gelmiş enerji kaynaklarının geliştirilmesinin nedenidir. Bu grupta nükleer olmayan alternatif kaynaklar yer almakta olup bunlar güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, deniz enerjisi ve biomas enerjisidir. 1990'dan sonraki gelişmelerle bu grup içerisinde atılımla öne geçen kaynak rüzgâr enerjisi olmuştur. Rüzgâr kurulu gücü hızla artmakta, rüzgârdan elde edilen elektrik enerjisi öteki kaynaklardan elde edilen de rekabet edebilmektedir. Ayrıca güneş enerjisinin %1-2'lik kısmı rüzgâr enerjisine dönüşmekte ve oluşan bu rüzgâr enerjisi günlük miktarının %1'ide mevcut dünya enerji tüketimine eşit bulunmaktadır (Karedeli, 2001).

Enerjiye olan büyük ihtiyaç ve enerji maliyeti yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli gündemde olmasının nedenidir. Alternatif kaynaklar diye de adlandırılan bu enerji kaynaklarından birisi de rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisinin kaynağı güneştir. Rüzgâr denilen hava akımları, güneşin yer yüzünü ve atmosferi homojen ısıtmamasından kaynaklanan basınç ve sıcaklık farklarından doğmaktadır.

Rüzgâr yüzyıllarca teknelerin yelkenlerini şişirmek, tarımsal ürünleri öğütmek ve su pompalamak gibi amaçlarla kullanılmıştır. Ancak bugün insanoğlu rüzgâr enerjisinden elektrik üretmektedir. İnsanlık, yel değirmenlerinden, modern rüzgâr santrallerine uzanan teknolojik bir süreç yaşamıştır. Yıllar önce kullanılan yel değirmenlerinde, rüzgâr estikçe dönen pek çok kanat bulunmaktaydı, bugünün rüzgâr türbinlerinde ise yalnızca iki veya üç kanat bulunmaktadır. Bu kanatlar, yel değirmenlerinde görüldüğünden çok daha uzun 100 metre üzeri kadar olabilmektedir. Kanatlar, buhar türbinlerine çok benzer olarak, elektriği üreten jeneratörü çalıştırır.

Kanatların daha uzun olması ve rüzgâr şiddetinin artması türbinin elektrik üretimini artırır. Rüzgâr türbinleri çevredeki engellerin rüzgârı kesemeyeceği yükseklikte bir kule üzerine yerleştirilirler. Zira rüzgâr hızı hem yükseklikle artmakta, hem de daha az değişken olmaktadır.

Rüzgâr türbini: Rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir.

Kontrol; Rüzgâr türbinlerinde enerji eldesini arttıran ve dinamik yükleri azaltan bir etkidir.

1970 ve 1980'lerde rüzgâr türbinlerinde güç ve hız regülasyonu yapan klasik kontrol sistemleri bulunmaktaydı. (BERGEY. B., 1997). Kullanılan metotlar da başarılı olmaktan uzaktaydılar. Bu sistemlerde büyük ihtimalle var olan stabilize düşük-sönümlü modlar, yüksek dinamik yüklere ve yorulma hatalarına sebep olmaktadır. Modern türbinler artık daha büyük ebatlı, daha yüksek kuleler üzerine inşa edilmiş ve önceki tiplere oranla daha dinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle özellikle kontrol sisteminin tasarımı türbinin gelecekteki çalışması için hayati önem taşır. Bilinen yöntemlerin haricinde yeni ve gelişmiş kontrol yaklaşımları özellikle dinamik yüklerin azaltılmasına yardımcı olacak biçimdedir ve 20-25 yıllık ömür boyunca da bu işlevlerine devam ederler.

Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır. Rüzgâr türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir Bunlar sürüklenme ve kaldırma kuvvetleridir. Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelebilecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine 90° dik geldiği durumda iken; minimum sürüklenme kuvveti ise hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir.

Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen bir kuvvettir. Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır. Sürüklenme kuvvetine en iyi örnek olarak paraşüt verilebilir. Bu kuvvet sayesinde paraşütün hızı kesilmektedir. Sürüklenme kuvvetinin etkilerini minimuma

indirebilmek için yapılmış özel cisimlere akış hatlı (streamlined) cisimler denir. Bu cisimlere örnek olarak elips, balıklar, zeplin verilebilir.

Düz bir plaka üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı plaka yüzeyine 0° açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasıyla düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Bu bölgelere akış altı da denir. Dolayısıyla, hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelmiş olur. Yani hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça basınç artar. Bu olaya Bernoulli etkisi denir. Kaldırma kuvveti de cismin üzerinde emme veya çekme meydana getirir.

2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi

Rüzgâr enerjisinin kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. İlk olarak, Asya Medeniyetlerinden Çin, Tibet, Afganistan ve İran'da kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgâr tribünlerinin kullanımına ait ilk yazılı bilgiler Büyük İskender tarafından M.Ö. 200-300 yıllarında basit yapıdaki yatay-eksenli rüzgâr türbinler hakkındadır. Düşey eksenli ilk rüzgâr türbinleri, M.Ö.500-900 yıllarında Farslılar tarafından dizayn edilip, buğday öğütme ve su pompalama amaçlı kullanılmıştır. Bu rüzgâr türbinler merkezi düşey bir shafta bağlı, ağaç ve kamış dallarından yapılan düşey yelkenlerden oluşmuş bir yapıya sahiptir (Golding, 1955).

Rüzgâr gücü kullanımı Asya'dan Avrupa'ya 10.yüzyıl civarında geçmiştir. Bu geçişin ilk belirtileri olarak 11. ve 12.yüzyılda İngiltere de rüzgâr değirmenlerinin kullanıldığı bilinmektedir. Mesela, 1190'lı yıllarda Alman haçlıları rüzgâr değirmenlerini Suriye'ye getirmiştir. Dolayısıyla Orta çağ döneminde rüzgâr enerjisinin Avrupa da kullanıldığını görmekteyiz. Hala günümüzde birçok ülkede çiftçiler tarafından kullanılan rüzgâr değirmenleri daha çok kuyulardan su çekmek amaçlı kullanılmaktadır (Bergey. B., 1997).

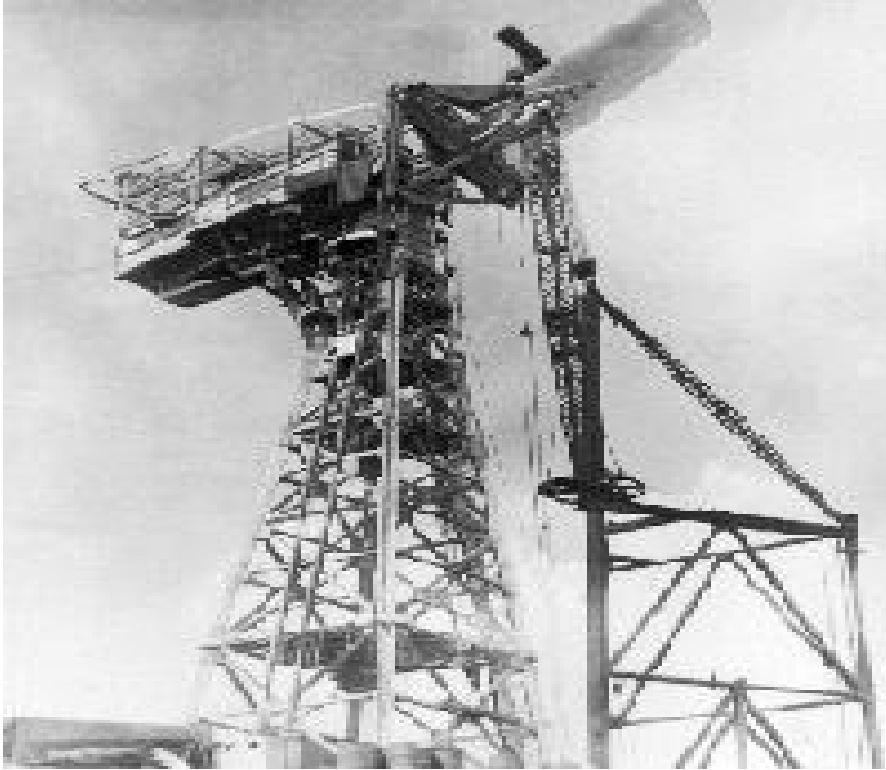
Endüstri devrimi ile birlikte, 18.yüzyılda buhar makinelerinin ortaya çıkması sonucunda dünya, enerji ihtiyacı temini için termodinamik işlemlere dayanan makinelerden yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile beraber, bu makineler daha avantajlı bir duruma gelmiştir

İstenildiği anda enerji üretimi olanağı sağlamasından dolayı, rüzgâr enerjisinden daha popüler hale gelmişlerdir. Bu nedenle 19.yüzyılda ve 20.yüzyılın ortalarına doğru rüzgâr enerjisinin önemi azalmıştır. Sadece, Amerika, Rusya ve Avustralya gibi nüfusu geniş bir alana yayılmış olan ülkelerde rüzgâr enerjisi çiftçiler tarafından su çekmek için kullanılmıştır (Golding, 1955).

2.1.1 Rüzgârın Enerji Üretimi İçin İlk Kullanımı

1981 yılında Paul la Cour ve Danimarka Askov Folk High School bilim adamlarının oluşturduğu bir grup rüzgârdan elektrik enerjisi üreten ilk tribünü yaptılar. Danimarka hükümetinin desteğiyle de test amaçlı bir rüzgâr santrali kurdular (Bergey, 1997). 1918 yılına gelindiğinde Danimarka'da rüzgârdan elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulan 120 adet RT bulunmaktaydı. Güçleri 20-30 KW arasında değişen bu rüzgâr türbinlerin toplu güçleri 3 MW civarındaydı. Bu değer bugünkü tek bir rüzgâr türbininin bile gücü altında.

İkinci Dünya Savaşı yıllarında rüzgâr enerjisinde büyük gelişmeler oldu. Danimarkalı bir şirket olan F.L Smith 2 ve 3 kanatlı rüzgâr tribünleri inşa etmiştir. Bunların en büyüğü 1941 yılında Vermont' da inşa edilen 1.25 mega watt Smith-Putnam makinesidir (Şekil 2.1). Yatay eksenli, 2 kanatlı ve 175-foot rotor çapına sahiptir.



Şekil 2.1 Smith-Putnam rüzgar türbini



Şekil 2.2 Gedser rüzgar türbini

Bu zamana kadar inşa edilen türbinler doğru akım ürettiyordu. 1951 yılından sonra doğru akım jeneratörlerinin yerini alternatif enerji üreten 35 kW asenkron makineler almaya başladı. 1960 yılların başında, 200 kW gücünde Gedser türbine Juul tarafından SEAS elektrik şirketi için Gedser 'de yapılmıştır. Bu türbin 3 kanatlı, elektromanyetik yaw (yönerge) sistemini ve asenkron jeneratör kullanmaktaydı. Stall (durdurma) kontrol sistemine göre çalışan Gedser türbinin de ayrıca, aerodinamik üç fren bulunmaktaydı. Bu sistem günümüzde kullanılan türbinlerde de bulunmaktadır (Şekil 2.2).

1960 lı yıllardan sonra rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde ekonomik nedenlerden dolayı azalma meydana gelmiştir. Daha ucuz olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb.) kullanılarak yapılan termik santraller popüler olmaya başlamıştı.

1973 dünya petrol krizi, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilginin artmasına sebep olmuştur. Dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü

karşıl原因 fosil yakıtların kısıtlı kullanım sürelerinin olması, enerjinin elde edilmesi sırasında çevreye yapılan tahribat ve gelecek nesillerin de enerji ihtiyacı dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha iyi anlaşılmaktadır (Yiğitgüden, 2001).

Rüzgâr Enerjisi, özellikle 1990'lı yıllardan itibaren önemli bir gelişme göstermiş, Amerika ve Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yapılan araştırmalara göre; şu an yürütölmekte olan politikaların devam etmesi durumunda dünya üzerindeki elektrik enerjisi üretimindeki payının hızla artacağı tahmin edilmektedir.

2.2. Rüzgâr Enerjisi Nasıl Yer Değiştirir

Güneş yaşadığımız gezegen için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Tüm yenilenebilir enerji türleri (gelgit enerjisi ve jeotermal hariç) ve fosil yakıt enerjisi dahi sonuç olarak güneşten kaynaklanır. Güneş yeryüzüne saatte 100.000.000.000.000 kW enerji gönderir. Başka deyişle yeryüzü, 10 üzeri 18 watt kadar güç kazanır. Güneşten gelen enerjinin %1-2'si rüzgâr enerjisine dönüşür. Bu, yeryüzündeki tüm bitkilerin biyolojik kütleye dönüştürdüğü enerjinin 50 – 100 katıdır (Anonim, 2008).

Çizelge 2.1. Tükenebilirliğine göre enerji türleri (İzmir, 2001)

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

2.2.1 Hava Akımı Nasıl Oluşur

En basit anlatımıyla sıcaklık farkları hava akımını oluşturur. Ekvator çizgisi yakınındaki bölgeler dünyanın diğer bölgelerine göre daha fazla ısınır. Bu sıcak bölgeler, kızıl ötesi fotoğraflarda sıcak renklerle (karalarda kırmızı, turuncu ve deniz yüzeyinde sarı) görünür.

Sıcak hava soğuk havadan hafiftir ve yaklaşık 10 km'ye ulaşıncaya kadar gökyüzüne yükselir. Bu sıcak hava kütlesi hareket ederek Kuzey ve Güney Kutbuna yaklaşıncaya aşağı çöker ve ekvatora geri döner. Özetle sıcaklık farkları hava akımını oluşturur.

2.2.2. Coriolis Kuvveti

Dünya döndüğü için kuzey yarıküre üzerindeki her hareket, kendi konumumuza göre sağa doğru (güney yarıküre için sola) yönelir. Bu belirgin bükücü kuvvet Coriolis Kuvveti (Coriolis Force) olarak bilinir (Anonymous, 2003).

Bu kuvveti keşfeden Fransız Matematikçi Gustave Gaspard Coriolis'in ismiyle anılmaktadır (1792 – 1843). Kuzey yarıküre üzerinde hareket eden bir parçacığın sağa doğru döneceği pek açık görünmeyebilir. Bu olayı şöyle canlandırabiliriz:

Uç kısmı güneye doğru hareket eden bir koni düşünün ve dünyanın döndüğü gerçeğini de eklersek, koninin sanki sağa doğru kaydığını görürüz.

Coriolis Kuvveti gözle görülebilir bir olaydır. Tren yolu hatlarının bir tarafı diğerinden daha hızlı aşınır. Nehir yataklarının bir tarafı diğerinden daha derine iner (hangi taraf olduğu bulunduğumuz yarıküreye bağlıdır ve kuzey yarıkürede hareket eden bir parçacıklar sağa yönelir).

Kuzey yarıkürede rüzgâr, bir alçak basınç alanına yaklaştıkça saat yönüne ters yön alır. Güney yarıkürede ise rüzgâr, alçak basınç alanları etrafında saat yönünde döner.

2.3. Rüzgârın Gücü

Rüzgâr hızı, bir rüzgâr türbininin elektriğe çevirebileceği enerji miktarı açısından önemlidir. Rüzgâr gücü rüzgâr hızının küpünün bir fonksiyonudur. Rüzgârın enerji içeriği, ortalama rüzgâr hızının küpü oranında değişir. Yani rüzgâr hızı 2 katına

çıkarsa, 8 kat enerji içerir. Bunun anlamı şudur; rüzgâr hızındaki küçük değişiklikler rüzgâr enerjisinde büyük değişikliklere neden olurlar. Örneğin, 10 mph bir hız ölçümü yapan birine karşı başka biri aynı zamanda komşu bir yerde 12.6 mph hız ölçümü yapsın. Bu 2.6 mph farkına karşılık rüzgar gücünde % 100 oranında bir fark vardır ($10^3 = 1000$, $12.6^3 = 2000$).

Öyleyse, rüzgârın enerji içeriği rüzgâr hızının küpü oranında değişir. Günlük yaşamdan, bir otomobilin hızı 2 katına çıkarsa frenlemesi ve durdurulması için 4 kat enerji gerektiğini fark edebilirsiniz (Aslında bu Newton'un 2. hareket yasasıdır). Rüzgâr türbini örneğinde, rüzgârın hızını 2 katına çıkarırsak her saniye pervaneden geçen dilim sayısını da 2 kat artır ve bu dilimlerin her biri otomobilin frenlemesi Yer seçimi veya ölçme hataları ile yapılabilecek küçük rüzgâr hızı hataları bir rüzgâr türbini yatırımında büyük hatalara neden olabilmektedir. Ekonomik olarak uygulanabilir olması için, bir rüzgar türbini kurulacak yerde yıllık ortalama en az 12 mph (5.4 m/s) rüzgar hızı olmalıdır. Hâkim rüzgâr yönünün bilinmesi rüzgâr türbinin en az engel bulunan yöne kurmak açısından çok önemlidir (Walker and Jenkins, 1998).

2.3.1. Rüzgârdaki Mümkün Güç Miktarı

$w = 1/2rAv^3$ eşitliği ile verilir.

w = güç/enerji

r= hava yoğunluğu

A= kanat alanı

v= rüzgar hızı

Hava yoğunluğu yükseklikle, sıcaklıkla ve hava cepheleri ile değişir. Rüzgâr gücü hesaplamalarında, hava cephelerinin etkisi önemsenmeyecek kadar küçüktür, böylece hava yoğunluğu formülü şöyledir:

$$P=(1.325xP)/T$$

T= Fahrenheit + 459.69 olarak sıcaklık

P= Yüksekliğe göre düzeltilmiş Mercury basıncı (inch)

Tipik ortalama hava sıcaklığı (59°F) deniz seviyesine indirgenerek hava yoğunluğu için bir standart değer kullanılabilir. Bu durumda güç eşitliği basit olarak aşağıdaki hale gelir:

Basitleştirilmiş Güç Eşitliği

Metrik birimler

$$w = 0.625Av^3$$

w= güç (watt)

A= rüzgâr türbini kanatları tarafından süpürülen alan (m²)

V= rüzgâr hızı (m/s)

Bu güç eşitliği rüzgâr hızındaki artış ile rüzgâr gücünde bir küplü artış gösterse de bile, uygulamada bir rüzgâr türbininde gerçek güç artışı eşitlikte öngörülenden daha doğrusaldır. Bunun nedeni rüzgâr türbininin mükemmel bir oranda verimli olmamasıdır.

Sonuç olarak denilebilir ki, ortalama rüzgâr hızındaki 2 mph artış bir türbin tarafından üretilen elektrik miktarında % 50 bir artış anlamına gelir.

Çizelge 2.2. Beaufort rüzgar ölçeği (Karadeli, 2001)

Beaufort no	Rüzgâr hızı, km/h	Rüzgâr hızı, m/s	Tanım	Açıklama
0	<1	0-0,2	Sakin	Duman dikey olarak yükselir.
1	1-5	0,3-1,5	Esinti	Duman hafif esinti ile yükselir. Rüzgâr yönü belirsizdir.
2	6-11	1,6-3,3	Hafif rüzgâr	Yapraklar kıpırdar. Esinti yüzde hissedilir.
3	12-19	3,4-5,4	Tatlı rüzgâr	Yapraklar ve ince dallar hareket eder.
4	20-28	5,5-7,19	Orta rüzgâr	İnce dallar hareket eder. Kâğıt ve tozlar yükselir.
5	29-38	8,0-10,7	Sert rüzgâr	Ağaçlar sallanmaya başlar.
6	39-49	10,8-13,8	Şiddetli rüzgâr	Büyük ağaç dalları hareket eder. Şemsiye kontrolü zorlaşır.
7	50-61	13,9-17,1	Çok şiddetli rüzgâr	Büyük ağaçlar sallanır. Yürüme zorluğu fark edilir.
8	62-74	17,2-20,7	Fırtına	İnce dallar kırılır. Yürümek iyice zorlaşır.
9	75-88	20,8-24,4	Şiddetli fırtına	Binalarda hafif hasar oluşur.
10	89-102	24,5-28,4	Tam fırtına	Büyük ağaçlar kökünden sökülür. Binalarda hasarlar oluşur.
11	103-1117	28,5-32,6	Çok şiddetli fırtına	Geniş ölçekli hasarlar olur.
12	>118	>32,7	Tayfun	Aşırı derecede hasarlar meydana gelir.

2.4. Rüzgâr ve Coğrafya

Eğer tüm arazi düz ve pürüzsüz olsa idi, bir yerden diğerine rüzgâr değişimi çok küçük olurdu. Tepelerin, vadilerin, akarsu vadilerinin, göllerin katılması ile bir karmaşık ve değişken rüzgâr rejimi oluşur. Küçük ölçeklerde ağaçlar ve binalar da bu karmaşıklığa ilave edilir.

Tepeler, platolar ve uçurumlar bir rüzgâr türbini için yüksek rüzgâr hızı bulunabilecek yerlerdir. Daha alçak ve kapalı olan vadilerde rüzgâr hızı düşük olur. Bununla beraber, tüm vadilerde rüzgâr hızının düşük olması zorunlu değildir. Rüzgâr akışına paralel olduklarında vadiler kanal gibi davranabilir ve rüzgâr kaynağını artırabilir. Vadideki bir daralma dar bir alanda havayı hunileyerek rüzgâr akışını daha da kuvvetlendirebilir. Bu genellikle rüzgâra bakan dar dağ geçitlerinde olur.

Yakınındaki tepe üstleri rüzgârlı olsa bile vadiler genellikle geceleri sakindir. Soğuk ve ağır hava tepelerden aşağıya doğru akar ve vadilerde toplanır. Bunun üzerindeki bir seviyede soğuk havanın sonuç katmanı genel rüzgâr akışından atılarak alçak arazilerde sakin durum oluşur. Bunun sonucu olarak, bir tepeye kurulan bir rüzgar türbini, daha alçak seviyeli bir yere kurulan rüzgar türbini çalışmazken, tüm gece boyunca güç üretebilir. Bu durum daha çok etrafına göre en az birkaç yüz feet yüksekliği olan yüksek arazilerde olur.

Yüksek arazi özellikleri rüzgâr akışını hızlandırabilir. Yaklaşan bir hava kütlesi zirveyi aşarken genellikle ince bir tabaka içine sıkıştırılır, bunun sonucu hızı artar. Bir sırt üzerinde, rüzgâr sırt hattına dik estiği zaman en büyük hız oluşur. İzole tepeler ve dağlar rüzgârları sırtlara göre daha az hızlandırır, çünkü daha fazla hava yanlara akışa meyyleder. Yüksek rüzgâr türbülansı olmasından dolayı yüksek arazilerin downward tarafından sakınılmalıdır.

Büyük su kütlelerine yakın kara alanları iki nedenden dolayı iyi rüzgârlı alanlar olabilir. İlk olarak, bir su yüzeyi bir kara yüzeyine göre çok daha düzgündür, bu nedenle su üzerinde akan hava daha az sürtünmeye tabidir. Hâkim rüzgâr yönünün sahile doğru olduğu sahil şeridi en iyi rüzgâr alanıdır. İkinci, güneşli ir yaz gününde olduğu gibi, bölgesel rüzgâr hafif olduğu zaman, deniz veya göl meltemi olarak bilinen yerel rüzgârlar oluşur, çünkü kara ve deniz ısınmaları farklı oranlardadır. Karalar suya göre

çok daha çabuk ısındığı için, kara üzerindeki ısınan ve yükselen havanın yerine su üzerindeki soğuk hava gelir. Bu şekilde denizden karaya 8 ile 12 mph veya üzeri hızında meltem oluşur. Geceleri kara çok daha çabuk soğuduğu için meltem durur veya ters yönde eser.

2.5. Neden Rüzgâr Enerjisi Kullanmalıyız

Rüzgâr enerjisi temiz, çevre kirliliği yaratmayan, işletme maliyeti düşüktür. Ayrıca rüzgâr enerjisi günümüzde, 21. yüzyılda ve onların ötesinde en çok gelecek vadeden teknolojilerden bir tanesidir.

2.5.1. Rüzgâr Enerjisi ve Diğer Enerji Türleri

Enerji üretimi için seçilecek metoda karar verilmesinde etkili olan dört önemli faktörden söz edilebilir. Kaynağın Elde Edilebilirliği, Çevreye Etkisi, Yatırım ve Üretim Maliyetleri, Kaynağın Ömrü. Rüzgâr enerjisini çevresel etkiler konusunda diğer enerji üretimi metotları ile kıyaslayacak olursak;

Çizelge 2.3. Enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri açısından kıyaslaması (Samsun, 2004)

	İklim Değişikliği	Asit Yağmuru	Su Kirliliği	Toprak Kirliliği	Gürültü	Radyasyon
Petrol	X	X	X	X	X	-
Kömür	X	X	X	X	X	X
Doğal Gaz	X	X	X	-	X	-
Nükleer	-	-	X	X	-	X
Hidrolik	X	-	-	-	-	-
* Rüzgar	-	-	-	-	X	-
Güneş	-	-	-	-	-	-
Jeotermal	-	-	X	X	-	-

Çizelge 2.3’de görüldüğü gibi rüzgar enerjisinin tek çevresel etkisi gürültü olmakla birlikte, rüzgar enerjisinden faydalanmak açısından tercih edilen arazilerin genel olarak yerleşim yerlerinden ve ormanlar gibi doğal yaşamın olduğu yerlerden uzakta olması bu sorunu hafifletmekte. Diğer üç kriter (1,3,4) açısından kıyaslanma ise aşağıdaki çizelgede sunulmaktadır.

Rüzgâr enerjisi, maliyeti açısından hidrolik ve doğal gaza karşı dezavantajlı durumda olsa da, pek çok ülkede devlet teşviki uygulaması ile desteklenmektedir. Bunun yanında, ülkemizde doğal gaz bilindiği gibi yurt dışından sağlanmakta olup, ülkenin enerji ihtiyacı konusunda bu dışa bağımlılık çeşitli sakıncalar doğurmaktadır. Ayrıca, uzun vadeli düşünüldüğünde rüzgâr enerjisi alanında yapılacak yatırımlar ve araştırmalar, enerji kaynağı üzerinde bir ömür sınırı olmadığından her zaman için geçerliliklerini koruyacaklardır. Çizelge 2.4. Enerji üretim metotlarının kaynak elde edilebilirliği, maliyet ve ömür açısından kıyaslaması ise şu şekildedir.

Çizelge 2.4. Enerji Üretim Metotlarının Maliyet Ömür İlişkisi (Cotrell, 2002)

	Dışa Bağımlı / Yerel	Kalan Ömür (yıl)	Yatırım Maliyeti (\$/kWh)
Petrol	Dış	40-45	1500-2000
Kömür	Yerel/Dış	200-250	1400-1600
Doğal Gaz	Dış	60-65	600-700
Nükleer	Dış	-	3000-4000
Hidrolik	Yerel	-	750-1200
* Rüzgar	Yerel	-	1000-1200
Güneş	Yerel	-	Yüksek
Jeotermal	Yerel	-	1500-2000

2.5.2. Maliyet

Günümüzde türbinlerin ortalama ömürleri 20 yıldır. Tabii sürekli geliştirilen rüzgâr türbinleri için bu değer ileride çok daha uzun olacaktır. Bu değer, atmosferik nem, kararlı rüzgâr yapısı vb. gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca diğer önemli bir nokta da, rüzgâr santrali kurulduktan sonra yapılan harcamalar sadece işletme ve bakım masraflarından ibarettir. Bu miktar da son derece düşüktür. California Enerji Komisyonu çeşitli enerji seçeneklerinin maliyetlerini ve pazara hazırlılıklarını incelemektedir. Çizelge 2.5 temel yakıt tiplerinin maliyetini rüzgar enerjisi ile karşılaştırmaktadır

Çizelge 2.5. Enerji üretiminde kullanılan farklı yöntemlerden elde edilen elektriğin maliyet karşılaştırılması (Karadeli, 2001)

Yakıt	Maliyet (sent/kWh)
Kömür	4.8 – 5.5
Gaz	3.9 – 4.4
Hydro	5.1 – 11.3
Biomass	5.8 – 11.6
Nükleer	11.1 – 14.5
Rüzgâr	4.0 – 6.0

2.5.3. Emisyon Değerleri

Amerikan Rüzgâr Enerjisi Birliği ABD elektrik sektörü endüstrisinde bilgi toplayan Amerikan Enerji Bakanlığının Bilgi Kuruluşu EIA tarafından derlenen verileri esas alarak rüzgâr ve diğer yakıtların karşılaştırmalı emisyonlarını bulmak için bir dizi istatistik geliştirmiştir.

Çizelge 2.6. Küresel ısınmaya yol açan karbondioksit için elektrik üretimi sırasında karşılaştırmalı emisyonlar (EIA, 1995)

Yakıt	Üretilen kWh basına salınan CO2 (pound)	Üretilen kWh, 1995 (milyar)	Salınan CO2,Toplam Üretim (milyon ton)
Kömür	2,12	1,653	1,754
Doğal gaz	1,34	268	180
Petrol	1,96	56	55
ABD ortalama yakıt karışımı	1,33	2,995	1,991
Rüzgâr	0	3	0

Çizelge 2.7 Asit yağmuruna yol açan kükürtdioksit için elektrik üretimi sırasında karşılaştırmalı emisyonlar (EIA, 1995)

Yakıt	Üretilen kWh basına salınan SO2 (pound)	Üretilen kWh, 1995 (milyar)	Salınan SO2,Toplam Üretim (bin ton)
Kömür	0,0136	1,653	11,26
Doğal gaz	0,000007	268	1
Petrol	0,123	56	345
ABD ortalama yakıt karışımı	0,0078	2,995	11,608
Rüzgâr	0	3	0

Çizelge 2.8. Asit yağmuruna ve duman oluşumuna yola çan azotoksitler için elektrik üretimi sırasında karşılaştırmalı emisyonlar (EIA, 1995)

Yakıt	Üretilen kWh basına salınan Nox (pound)	Üretilen kWh, 1995 (milyar)	Salınan Nox,toplam üretim (bin ton)
Kömür	0,0136	1,653	11,26
Doğal gaz	0,000007	268	1
Petrol	0,123	56	345
ABD ortalama yakıt karışımı	0,0078	2,995	11,608
Rüzgâr	0	3	0

2.5.4. Rüzgâr Enerjisi Çevre Kirliliği Yaratmaz

Rüzgâr türbinlerinden herhangi bir çevre kirliliği olmaz. Modern bir 600 kW gücündeki rüzgâr türbini ortalama bir yerde, bir yılda genellikle kömürle iletilen diğer elektrik santrallerinin 1.200 ton karbondioksitinin yerine geçecektir.20 yıllık bir işletme süresi içinde (ortalama bir yerde) bir rüzgâr türbini tarafından üretilen enerji imalâtı, bakımı, faaliyeti, demontajı ve parçalanması için gerekli olan enerjinin sekiz misli fazladır. Başka bir deyişle, genellikle bir rüzgâr türbinini imal etmek ve çalıştırmak için gerekli olan enerjiyi geri kazanmak için sadece iki ya da üç ay yeterli olacaktır (Anonim, 2008).

2.5.5. Rüzgâr Enerjisi Sürdürülebilir Bir Kaynaktır

Rüzgârdaki enerji gerçekten de sürdürülebilir bir kaynaktır. Rüzgâr hiç bitmeyen bir şeydir. Hali hazırda, rüzgâr enerjisi Danimarka elektrik tüketiminin %31,1'ini karşılamakta ve bu rakamın 2009 yılında yüzde 40 mertebesine yükselmesi beklenmektedir. Avrupa'yı çevreleyen sığ denizlerin üzerindeki rüzgâr kaynakları, teori olarak Avrupa'nın kullandığı tüm elektriği birçok misli ile karşılar niteliktedir. Türkiye'de ise bölgelere göre rüzgâr yoğunluğu çizelge 2.9 da belirtilmiştir.

Çizelge 2.9. Türkiye' de bölgelere göre ortalama rüzgar gücü yoğunluğu (Kızıltuğ, 2002)

Bölge adı	Ortalama Rüzgâr Gücü Yoğunluğu (W/m²)
Akdeniz Bölgesi	21.36
İç Anadolu Bölgesi	20.14
Ege Bölgesi	23.47
Karadeniz Bölgesi	21.31
Doğu Anadolu Bölgesi	13.19
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	29.33
Marmara Bölgesi	51.91

2.5.6. Rüzgâr Enerjisinin Farkı

Rüzgâr türbinleri boyutlar ve üretim kapasiteleri açısından çok büyümüşlerdir. 1980'lerden kalma tipik bir Danimarka malı rüzgâr türbini, 26 kW gücünde bir jeneratöre ve 10,5 metrelik bir pervane çapına sahiptir. Modern bir rüzgâr türbini 43 metrelik bir pervane çapına ve 600 kW gücünde bir jeneratöre ulaşmaktadır. Yılda 1 ile 2 milyon kW/saat enerji üretmektedir. Bu da Avrupa'da 300 ile 500 konutun yıllık elektrik tüketimine eşit bulunmaktadır. Son nesil rüzgâr türbinlerinin 5.000 kW üzeri güce ve 100 metreden büyük pervane çapına ulaşmıştır. Rüzgâr enerjisi, rüzgârı

oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket (kinetik) enerjisidir. Bu enerjinin bir bölümü yararlı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

Rüzgârın gücünden yararlanılmaya başlanması çok eski dönemlere dayanır. Rüzgâr gücünden ilk yararlanma şekli olarak yelkenli gemiler ve yel değirmenleri gösterilebilir. Daha sonra tahıl öğütme, su pompalama, ağaç kesme işleri için de rüzgâr gücünden yararlanılmıştır. Günümüzde daha çok elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır.

Fosil, nükleer ve diğer yöntemlerde atmosfere zararlı gazlar salınmakta, bu gazlar havayı ve suyu kirletmektedir. Rüzgârdan enerji elde edilmesi sırasında ise bu zararlı gazların hiçbiri atmosfere salınmaz, dolayısıyla rüzgâr enerjisi temiz bir enerjidir, yarattığı tek kirlilik gürültüdür. Pervanelerin dönerken çıkardığı sesler günümüzde büyük ölçüde azaltılmıştır (Anonim, 2009).

2.6. Rüzgâr Enerjisinin Kullanım Alanları

- Elektrik üretme
- Pilleri şarj etme
- Su depolama
- Taşımacılık
- Su pompalama
- Tahılların öğütülmesi
- Soğutma

Çok büyük bir kapasiteye sahip olan bu rüzgâr enerjisi çeşitli yöntemlerle başka enerji türlerine dönüştürülebilmektedir. Aslında tarihin eski çağlarından beri rüzgâr gücünden çeşitli şekillerde yararlanılmıştır. Aşağıda şekil 2.3 de rüzgâr enerjisinin tarih boyunca gelişimi verilmiştir.

MÖ 3000 Yelkenli gemiler kullanılmaya başlandı	MÖ 200 İrakta ilk yel değirmeni kullanıldı.	18. YY İngiliz J. Semeaton rüzgâr hızı ve enerji arasında bir bağıntı kurdu.	1890 Danimarka'da rüzgârdan elektrik üreten ilk tesis kuruldu
20. YY Danimarka'da 10.000 kadar yel değirmeni kuruldu. Amerika'da su pompalamak için 1000 yel değirmeni kuruldu.	1970 rüzgâr enerjisi ciddi bir sektör olmaya başladı		



































Şekil 2.3. Rüzgar enerjisinin tarih boyunca gelişimi

Rüzgar enerjisi eski zamanlarda gemi yelkenlerinde hareketi sağlamakta, yel değirmenlerinde öğürme ve su pompalama işlemlerinde; günümüzde ise gelişmiş rüzgar türbinleri sayesinde elektrik üretiminde kullanılmaktadır; rüzgar enerjisi sulama tesisleri, uzak dağ evleri, telekomünikasyon santralleri ve şehir şebekesi alanlarında rahatlıkla kullanılabilir (Özerdem, B., Türkeli, M., 2003).

2.7. Dünyada Rüzgâr Enerjisi Durumu

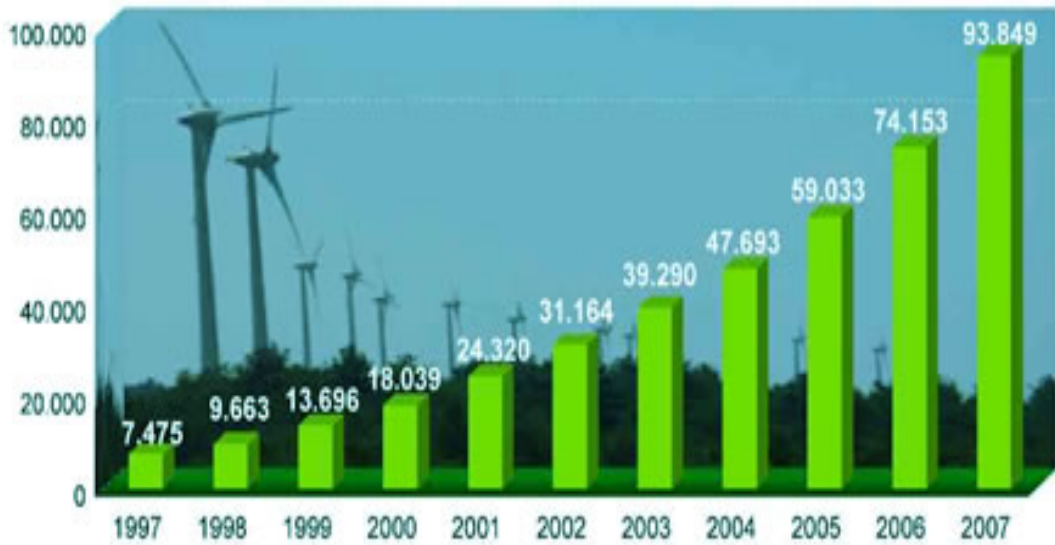
Rüzgâr Gücü, dünyada kullanımı en çok artan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Günümüzde dünyadaki kullanım oranının çok düşük olmasına karşılık, 2020 yılında dünya elektrik talebinin %12'sinin rüzgâr enerjisinden karşılanması için çalışmalar yapılmaktadır

Çizelge 2.10. Dünyada toplam kurulu rüzgâr gücü kapasitesi (EİE, 2009)

Rüzgar enerjisi kapasitesi (MW)					
#	Ülke	2005	2006	2007	2008
1	 Amerika	9,149	11,603	16,819	25,170
2	 Almanya	18,428	20,622	22,247	23,903
3	 İspanya	10,028	11,630	15,145	16,740
4	 Çin	1,266	2,599	5,912	12,210
5	 Hindistan	4,430	6,270	7,850	9,587
6	 İtalya	1,718	2,123	2,726	3,537
7	 Fransa	779	1,589	2,477	3,426
8	 İngiltere	1,353	1,963	2,389	3,288
9	 Danimarka	3,132	3,140	3,129	3,164
10	 Portekiz	1,022	1,716	2,130	2,862
11	 Kanada	683	1,460	1,846	2,369
12	 Hollanda	1,236	1,571	1,759	2,237
13	 Japonya	1,040	1,309	1,528	1,880
14	 Avustralya	579	817	817	1,494
15	 İrlanda	495	746	805	1,245
16	 İsveç	509	571	831	1,067
17	 Avusturya	819	965	982	995
18	 Yunanistan	573	758	873	990
19	 Polonya	83	153	276	472
20	 Türkiye	20	65	207	433
21	 Norveç	268	325	333	428
22	 Mısır	145	230	310	390
23	 Belçika	167	194	287	384
24	 Tayvan	104	188	280	358
25	 Brezilya	29	237	247	339
26	 Zelanda	168	171	322	325
27	 Güney Kore	119	176	192	278
28	 Bulgaristan	14	36	57	158
29	 Çek Cumhuriyeti	30	57	116	150
30	 Finlandiya	82	86	110	140
31	 Macaristan	18	61	65	127
32	 Fas	64	64	125	125
33	 Ukranya	77	86	89	90
34	 Meksika	2	84	85	85
	Dünyanın geri kalanı	407	489	562	645
	Dünya toplamı (MW)	59,024	74,151	93,927	121,188

1970'li yıllarda baş gösteren petrol kriziyle beraber yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilginin artması rüzgâr enerjisinin önemli bir enerji kaynağı olarak ortaya çıkmasını sağlamıştır. Özellikle rüzgâr verimi yüksek bölgelerde kullanılan rüzgâr türbinleri sınırlı alan uygulamalarının ötesine geçerek şehir şebekesine katkı yapmaya da başlamıştır.

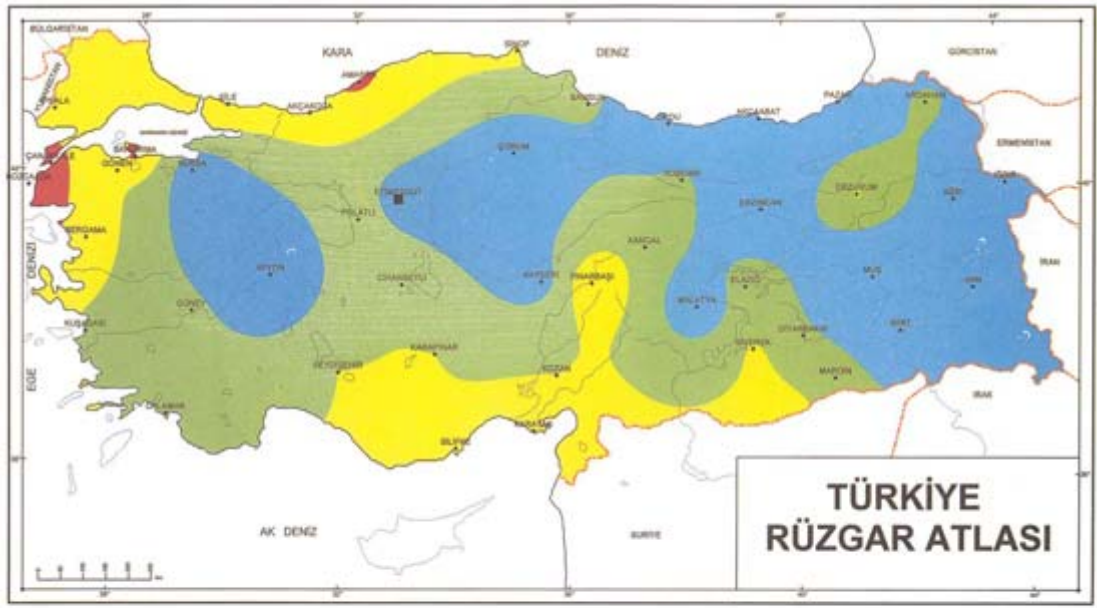
Rüzgâr enerjisi dünyanın birçok ülkesinde geleceği en parlak yenilenebilir enerji türü olarak kabul edilmektedir. Bunda rüzgârdan elde edilen elektrik enerjisinin oldukça tatmin edici seviyeye ulaşmasının etkisi büyüktür. Almanya'da rüzgâr enerjisi sektöründe istihdam edenlerin sayısı 35 bine ulaşmıştır. Avrupa ülkeleri 2010 vizyonunda enerji ihtiyaçlarının yüzde 13'ünü rüzgârdan karşılamayı kararlaştırmıştır. Rüzgâr teknolojisinin beşiği sayılan Danimarka'nın yıllık teknoloji ihracatı 2.5 milyar dolara çıkmıştır. Dünya ülkelerinin 1997 – 2007 yılları arasındaki rüzgâr potansiyeli MW biriminden aşağıda şekil 2.4 'de verilmiştir.



Şekil 2.4. Yıllara göre dünyada rüzgâr enerjisinden güç elde edimi (EİE, 2008)

2.8. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Durumu

Ülkemizde son yıllarda rüzgâr enerjisine olan ilgi her geçen gün hızla artmaktadır. Türkiye'de rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretim amaçlı kullanılan rüzgâr çiftlikleri sayısı 17'ye ulaşmıştır (Anonim, 2009).



Bey farklı topografik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri ¹										
	Kapak Arazi ² m ² / yıl ³	Açık Arazi ² m ² / yıl ³	Kıyı ² m ² / yıl ³	Açık Deniz ² m ² / yıl ³	Tepe ve Bayır ² m ² / yıl ³					
+	+5.0	+300	+7.5	+100	+8.5	+100	+6.0	+800	+11.0	+1800
0-0	5.0-6.0	100-200	6.5-7.5	300-500	7.5-8.5	400-700	8.0-9.0	800-1000	9.0-11.0	1000-1800
0-0	4.5-6.0	100-180	5.5-6.5	300-300	6.5-7.5	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
0-0	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
0-0	+3.5	+50	+4.5	+100	+5.0	+100	+5.5	+200	+7.0	+400

1. Rüzgar potansiyeli, rüzgarın gücünü temsil etmektedir. Rüzgar türbini hatlı potansiyelin % 20 ile % 30 luk bölümünü kullanabilir. Potansiyel hesaplamaları; deniz seviyesinde 1 Adm ile standart basınç ve 15 °C sıcaklığa karşılık gelen 1.23 kg/m³ hava yoğunluğuna göre yapılmıştır.
2. Yerküresel alanlar, ormanlar ve diğer kısımların yoğun olduğu tarım alanları (görünürlük sınıfı 0).
3. Az sayıda rüzgar kırınım olduğu açık araziler (görünürlük sınıfı 1). İç bölgede en fazla tercih edilen alanlar genellikle bu sınıfta bulunmaktadır.
4. Düzgün kıyı alanları ve çok az sayıda rüzgar kırınımları içeren kara yüzeyleri (görünürlük sınıfı 1). Eğer hakim rüzgar yönü deniz tarafından ise, potansiyel daha fazla olabilir. Tarihî terim durumunda ise potansiyel daha az olabilir.
5. Kıyılardan en az 10 km uzaklıktaki açık denizler (görünürlük sınıfı 0).
6. Bölünmüş sınıflarda % 50 ye varan bir hız artışı görülmektedir ve bu sonuç 400 m yüksekliğinde ve 4 km yarıçapındaki sarmal bir tepede yapılan hesaplamalarda elde edilmiştir. Rüzgar hızındaki artış, tepenin yüksekliğine, uzunluğuna ve yapısına bağlıdır.

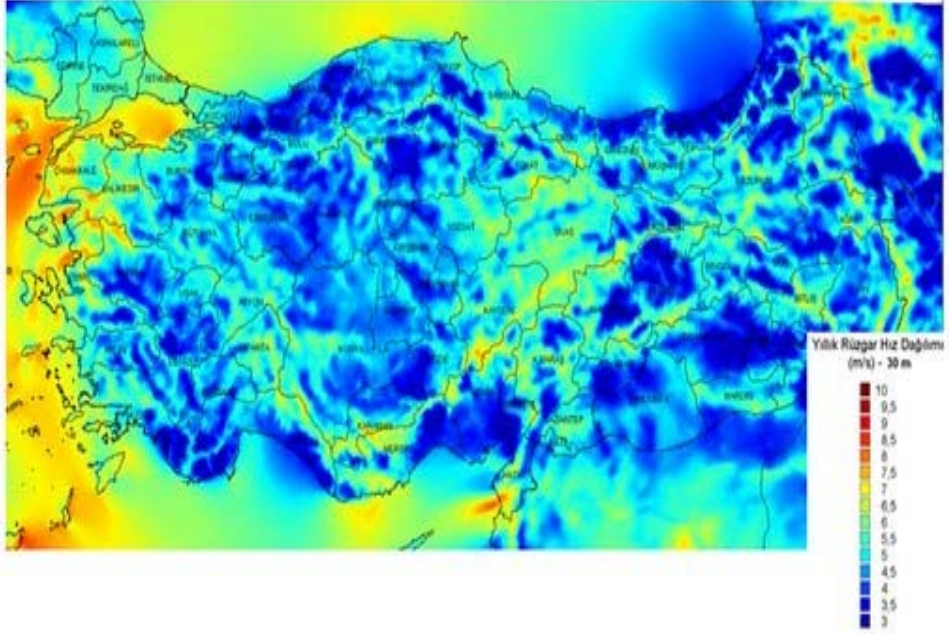
Şekil 2.5. Türkiye rüzgâr atlası (EİE, 2008)

Türkiye'nin toplam kurulu rüzgâr gücü 433,35 MW' tır (Anonim, 2009).2009 Yılı sonunda yeni işletmeye alınacak rüzgâr çiftlikleri ile beraber bu rakam 711 MW olacaktır. Bu rüzgâr çiftliklerinin yeri, kapasiteleri, kaç adet türbinden oluştuğu aşağıda tablo halinde verilmiştir. Bununla birlikte, yakın bir gelecekte ülkemizde rüzgâr santrallerinin önemli bir artış göstereceği resmi kaynaklar tarafından doğrulanmaktadır.

TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI

Rüzgar Hızı Haritası

30 m Yükseklikte Yıllık Ortalama

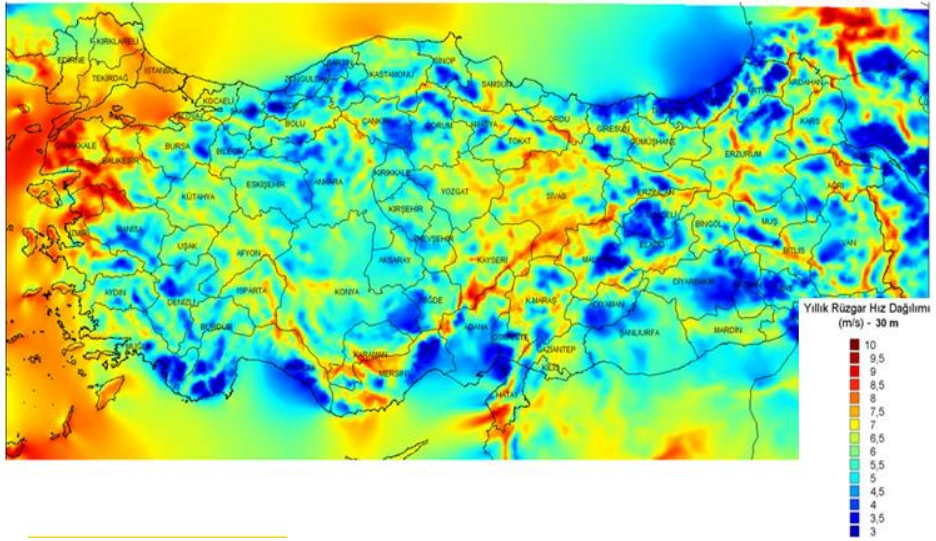


Şekil 2.6. Türkiye’de 30 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).

TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI

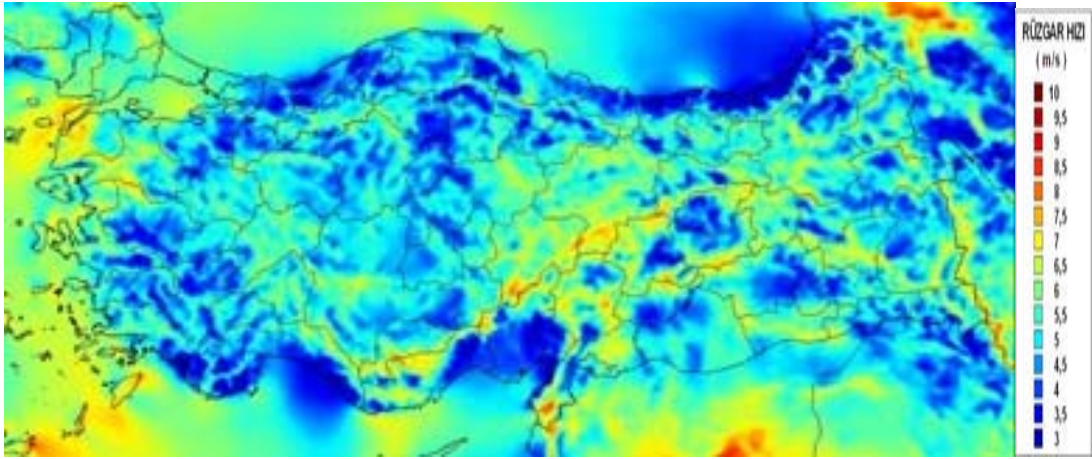
Rüzgar Hızı Haritası

100 m Yükseklikte Yıllık Ortalama

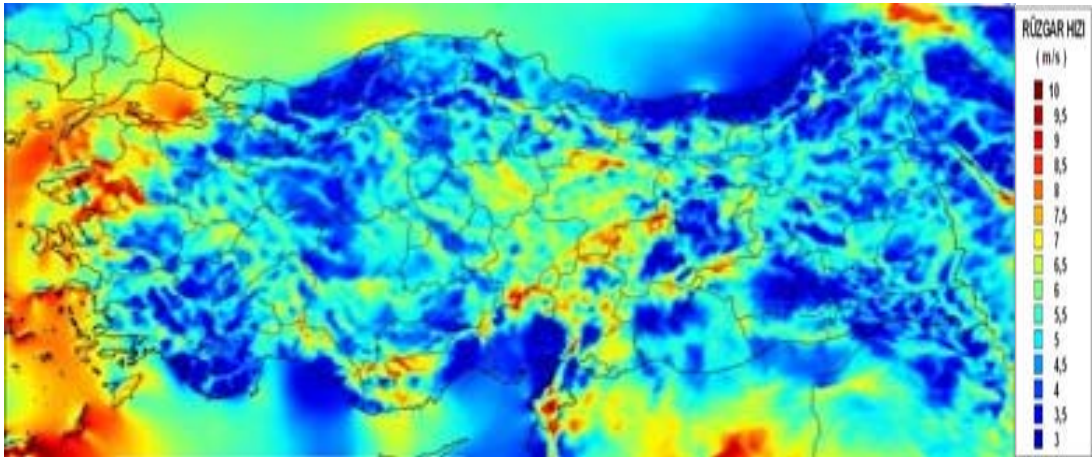


Şekil 2.7. Türkiye’de 100 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).

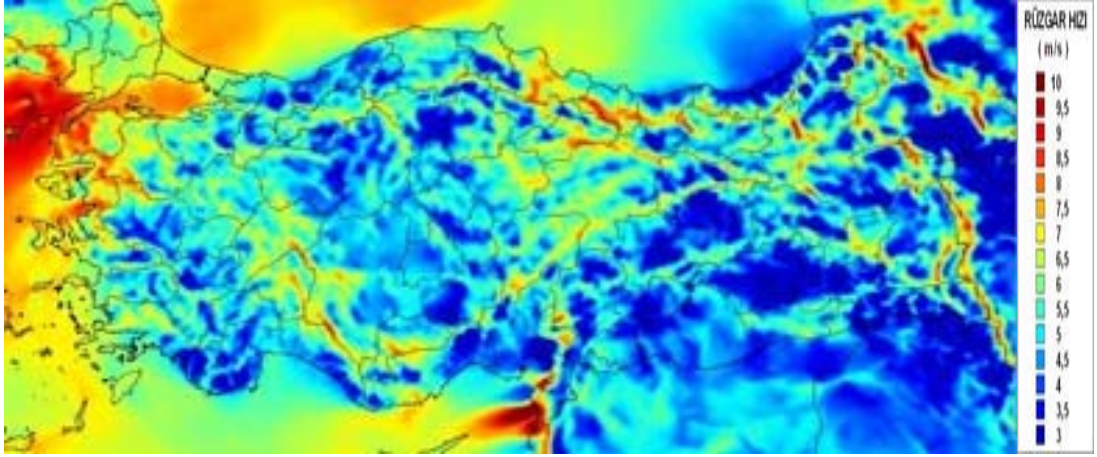
Türkiye çapında rüzgâr kaynağının mevsime bağlılığı ülkeyi etkileyen sinoptik sistemlere bağlıdır. Birçok mevkide, özellikle sahil boyunca ve doğudaki dağlarda kışları daha güçlü rüzgâr hızları tecrübe edilir. Termal sirkülasyonların önemli olduğu diğer yerlerde rüzgâr hızları yazları daha güçlü olma eğilimindedir. Türkiye'nin orta kesimleri boyunca çoğu yerde rüzgâr hızı değerleri mevsimden mevsime nispeten sabittir.



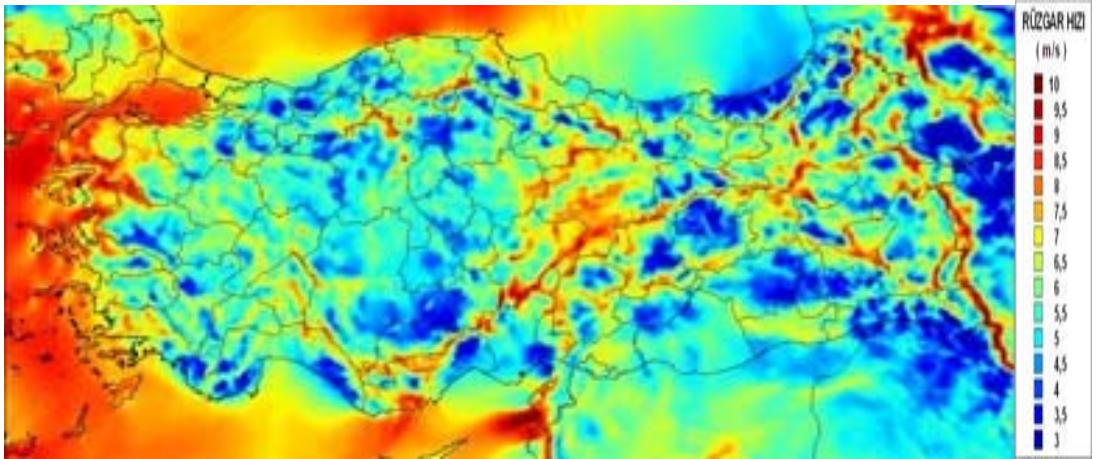
Şekil 2.8. İlkbahar mevsimi 50 m yükseklikte rüzgar hız dağılımı (Anonim, 2009).



Şekil 2.9. Yaz mevsimi 50 m yükseklikte rüzgâr hız dağılımı (Anonim, 2009).

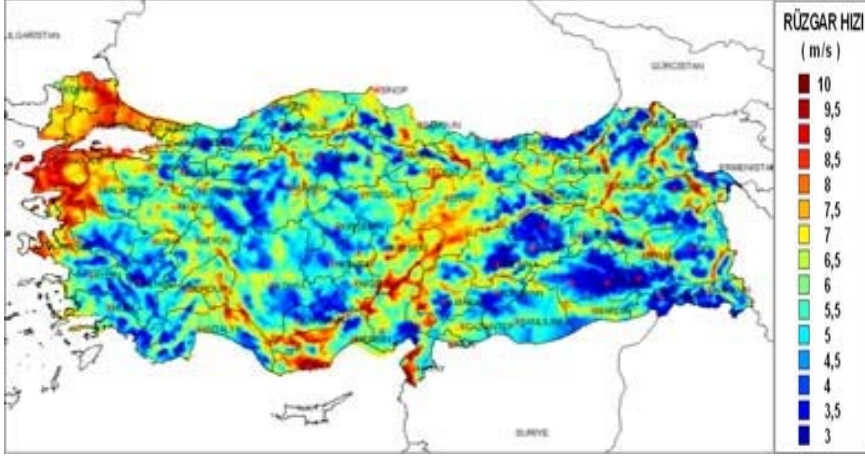


Şekil 2.10. Sonbahar mevsimi 50 m yükseklikte rüzgâr hız dağılımı (Anonim, 2009).

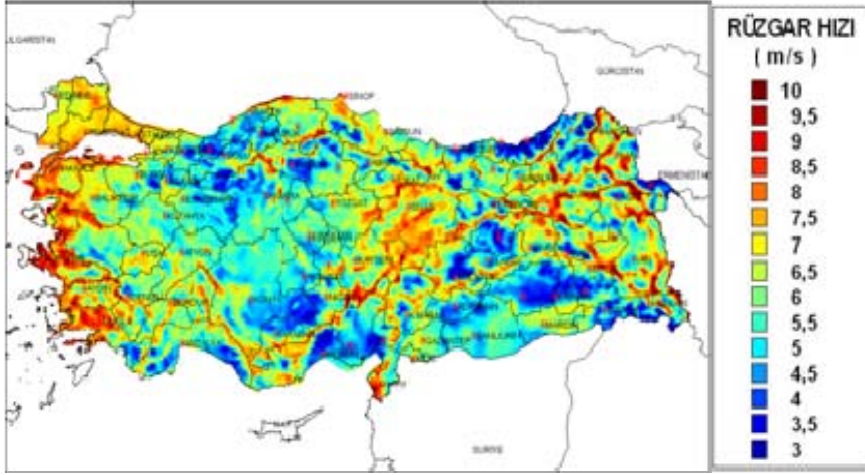


Şekil 2.11. Kış mevsimi 50 m yükseklikte rüzgâr hız dağılımı (Anonim, 2009).

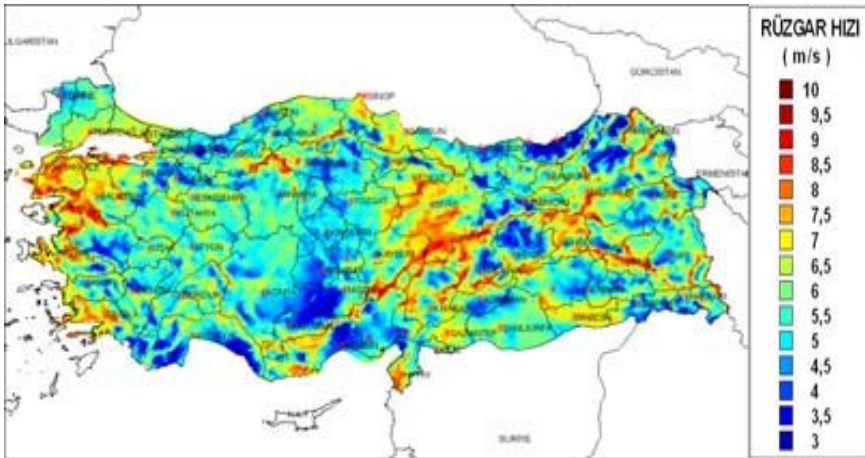
Türkiye üzerinde rüzgar hızlarının aylara göre değişimi aşağıda şekillerle verilmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi yer ve zamana göre aylık rüzgâr hızlarındaki değişim önemli olmaktadır.



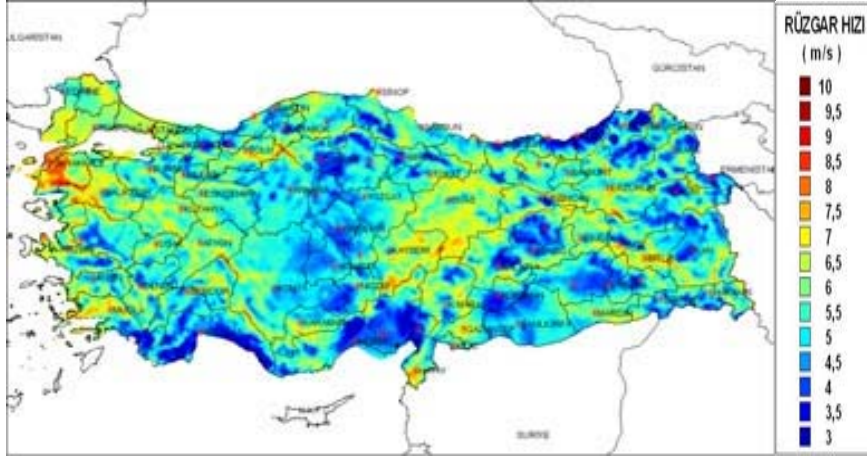
Şekil 2.12. Ocak ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



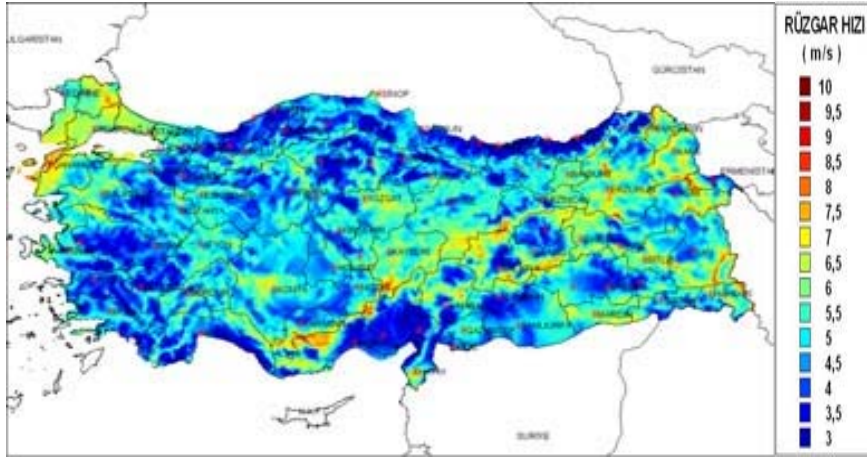
Şekil 2.13. Şubat ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



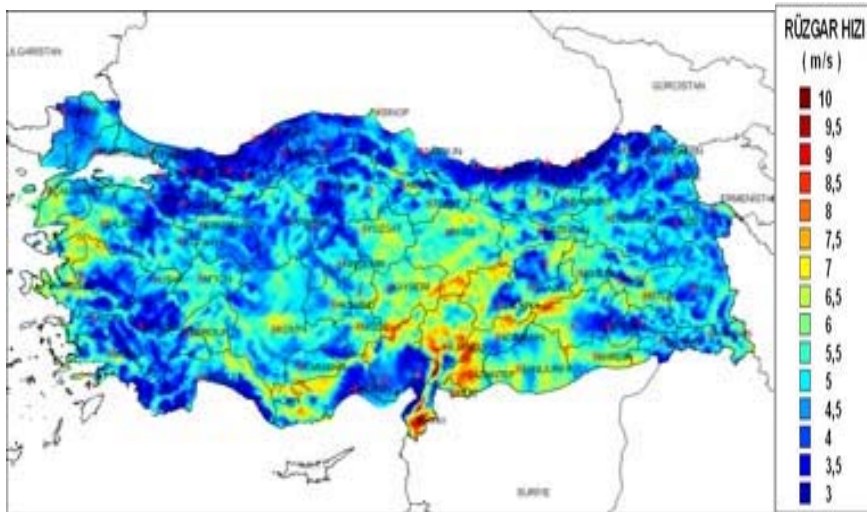
Şekil 2.14. Mart ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



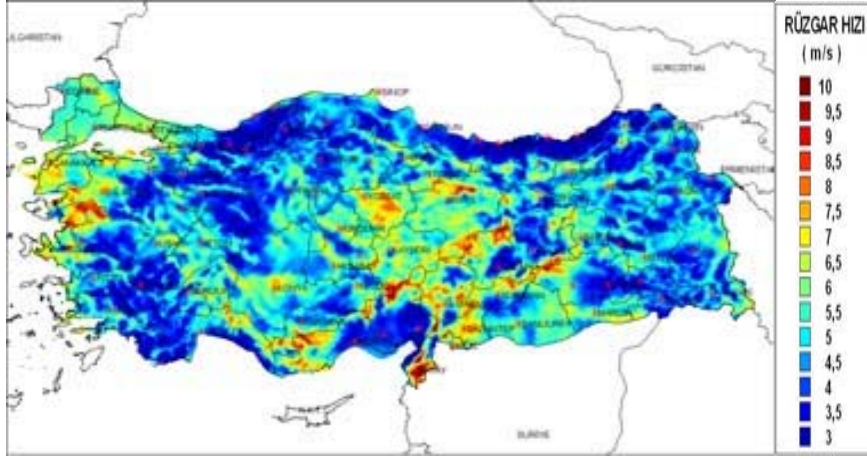
Şekil 2.15. Nisan ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



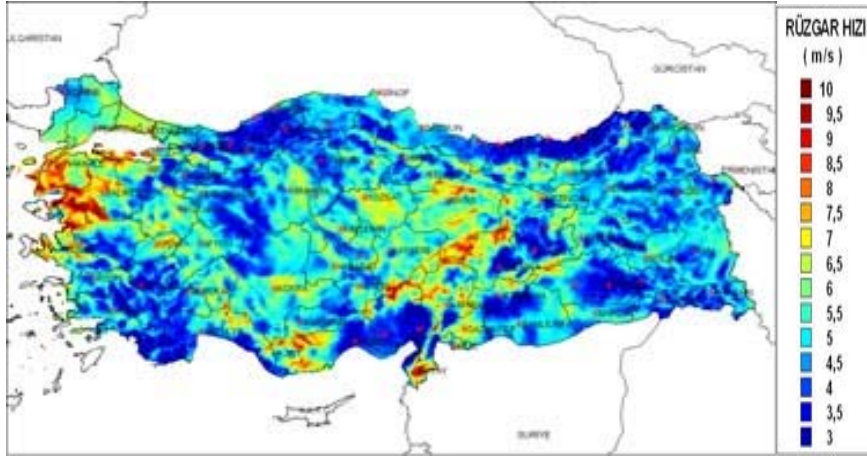
Şekil 2.16. Mayıs ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



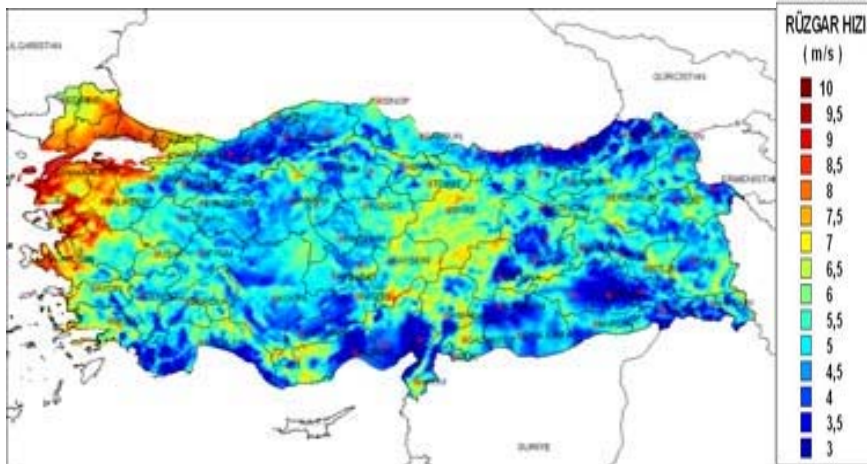
Şekil 2.17. Haziran ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



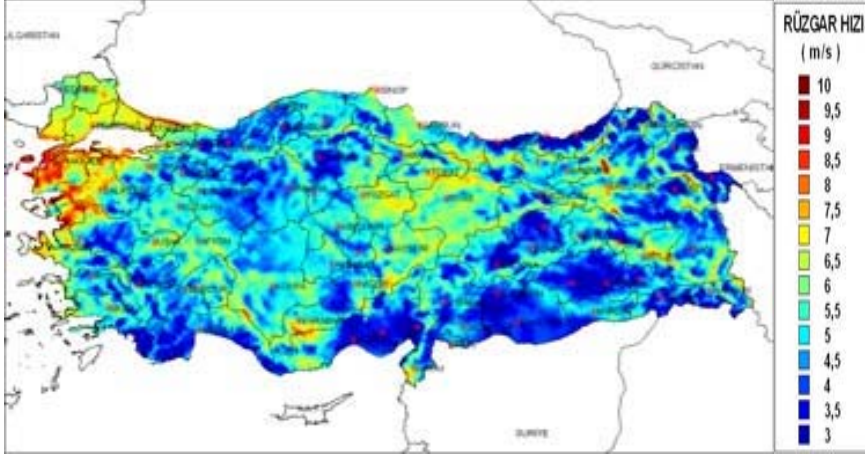
Şekil 2.18. Temmuz ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



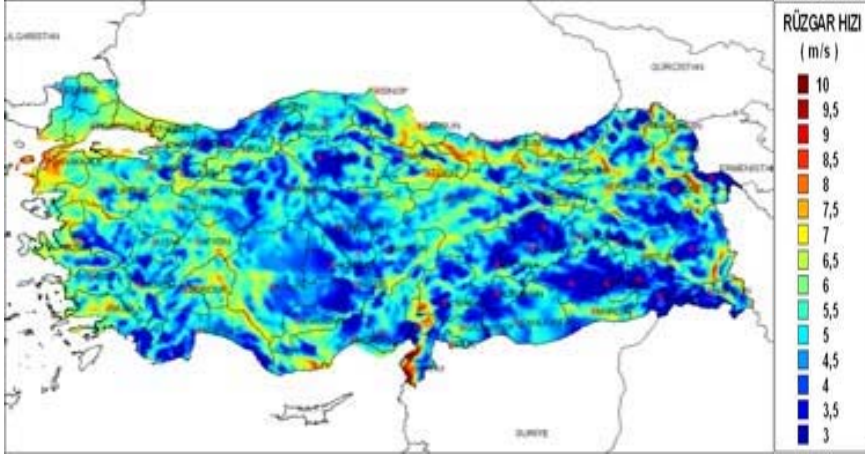
Şekil 2.19. Ağustos ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



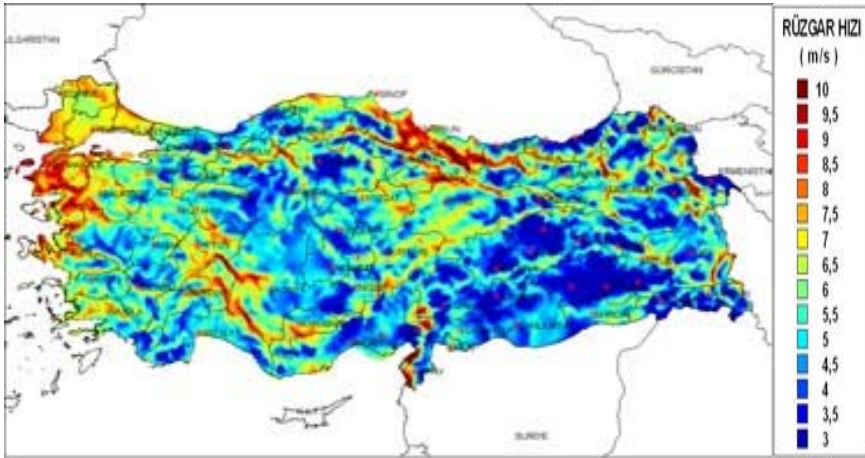
Şekil 2.20. Eylül ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



Şekil 2.21. Ekim ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).

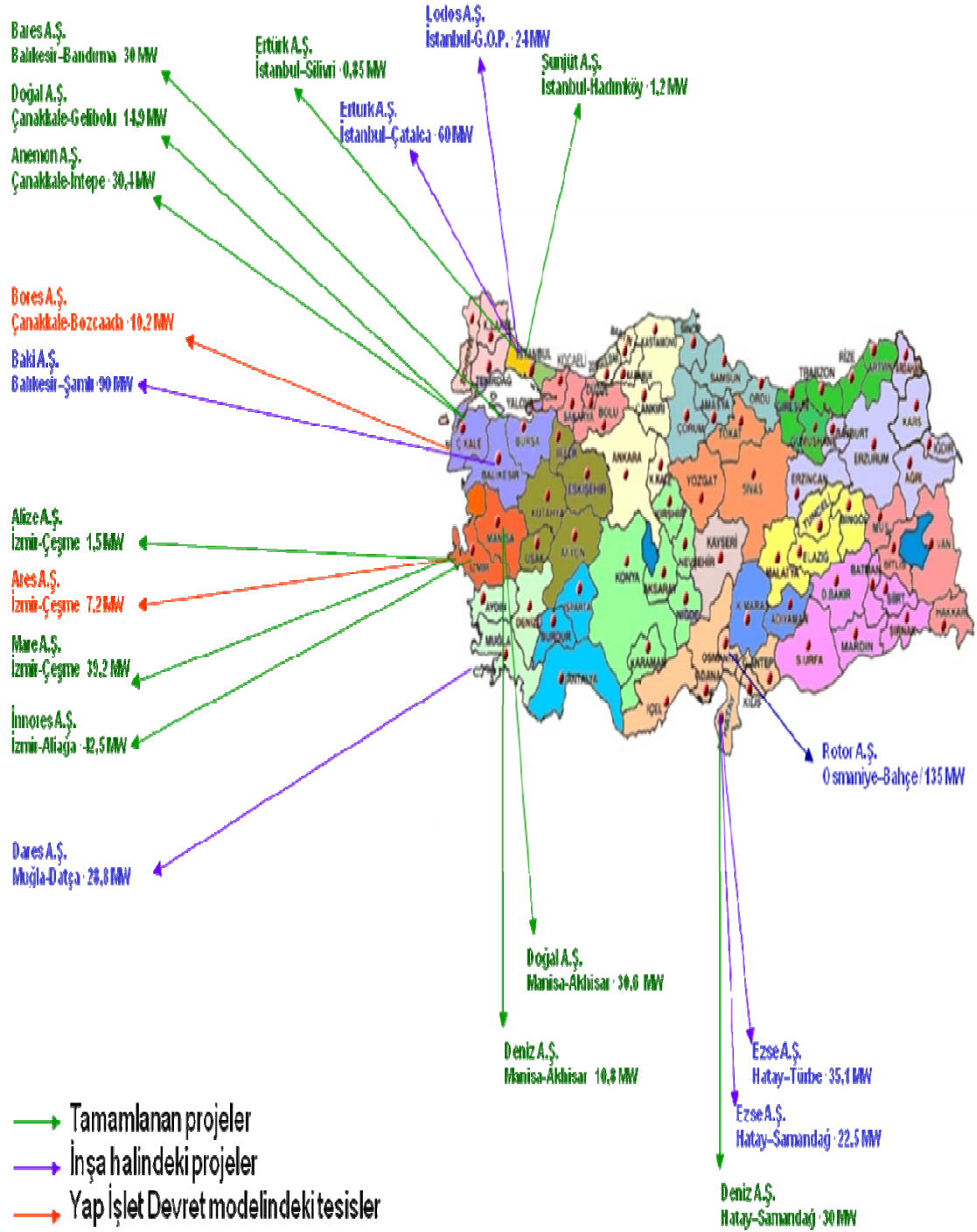


Şekil 2.22. Kasım ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).



Şekil 2.23. Aralık ayı 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı (Anonim, 2009).

TÜRKİYE'DEKİ RÜZGAR SANTRALLARI



Şekil 2.24. Türkiye de kurulu veya inşaatı devam eden rüzgâr türbinleri (TÜREB, 2009)

Çizelge 2.11 Türkiye’de Kurulu rüzgâr santralleri ve üretilen güç (TÜREB, 2009)

Mevkii	Şirket	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Kullanılan RT	RT Kurulu Gücü	Adedi
İzmir-Çeşme	Alize A.Ş.	1998	1,50	Enercon	600 kW	3
İzmir-Çeşme	Güçbirliği A.Ş.	1998	7,20	Vestas	600 kW	12
Çanakkale-Bozcaada	Bores A.Ş.	2000	10,20	Enercon	600 kW	17
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt A.Ş.	2003	1,20	Enercon	600 kW	2
Balıkesir-Bandırma	Bares A.Ş.	I/2006	30,00	GE	1.5 MW	20
İstanbul-Silivri	Ertürk A.Ş.	II/2006	0,85	Vestas	850 kW	1
İzmir-Çeşme	Mare A.Ş.	I/2007	39,20	Enercon	800 kW	49
Çanakkale-İntepe	Anemon A.Ş.	I/2007	30,40	Enercon	800 kW	38
Manisa-Akhisar	Deniz A.Ş.	I/2007	10,80	Vestas	1.8 MW	6
Çanakkale-Gelibolu	Doğal A.Ş.	II/2007	14,90	Enercon	13X800 Kw 5x900kW	18
Hatay Samandağ	Deniz A.Ş.	I/2008	30,00	Vestas	2,0 MW	15
Manisa Sayalar	Doğal A.Ş.	I/2008	30,60	Enercon	2,0 MW	38
İzmir-Aliğa	İnnores A.Ş.	I/2008	42,50	Nordex N90	2.5 MW	17
İstanbul-G.paşa	Lodos A.Ş.	I/2008	24,00	Enercon E82	2MkW	12
İstanbul-Çatalca	Ertürk A.Ş.	I/2008	60,00	Vestas V90	3 MW	20
Muğla-Datça		II/2008	10	Enercon	27x800 8x900 kW	35
Balıkesir-Şamlı		II/2008	90	Vestas	3 Mw	38
İŞLETMEDEKİ KURULU GÜÇ			433,35			

Çizelge 2.12. Türkiye’de inşaatı devam eden rüzgâr santralleri ve güçleri (TÜREB, 2009)

Ayen A.Ş.	Aydın-Didim I/2009	31,50	Suzlon	2.100 kW
Ezse Ltd. Şti.	Hatay-Samandağ II/2009	35,10	Nordex	900 kW
Ezse Ltd. Şti.	Hatay-Samandağ II/2009	22,50	Nordex	2.500 kW
Rotor A.Ş.	Osmaniye-Bahçe II/2009	135,00	GE	54 adet 2.500 kW
Mazı-3 Res Elk. Ür. A.Ş.	İzmir - Çeşme II/2009	22,50	Nordex	9 adet 2500 kW
Kores A.Ş.	İzmir-Çeşme II/2009	15,00	Nordex	2.500 kW
Soma A.Ş.	Manisa-Soma II/2009	140,80	Enercon	176 adet 800 kW
Alize A.Ş.	Balıkesir-Susurluk	19,00	Enercon	17 adet 800 kW ve 6 adet 900 kW
İNŞA HALİNDEKİ KAPASİTE TOPLAMI: 402,20 MW				
Borasco A.Ş.	Balıkesir-Bandırma	45,00	Vestas	15 adet 3000 kW
Alize A.Ş.	Tekirdağ-Şarköy	28,80	Enercon	14 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW
Alize A.Ş.	Balıkesir-Havran	16,00	Enercon	8 adet 2000 kW
Alize A.Ş.	Çanakkale-Ezine	20,80	Enercon	10 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW
Belen A.Ş.	Hatay-Belen	30,00	Vestas	10 adet 3000 kW
Alize A.Ş.	Manisa-Kırkağaç	25,60	Enercon	32 adet 800 kW
Boreas A.Ş.	Edirne-Enez	15,00	Nordex	6 adet 2.500 kW
Doruk A.Ş.	İzmir-Aliğa	30,00	Enercon	15 adet 2.000 kW
Yapısan İnş. Elk. San.Tic. A.Ş.	İzmir-Aliğa	90,00	Nordex	36 adet 2500 kW
Doğal A.Ş.	İzmir-Aliğa	30,00	Enercon	15 adet 2000 kW
Doğal A.Ş.	İzmir-Foça	30,00	Enercon	15 adet 2000 kW
Poyraz A.Ş.	Balıkesir-Kepsut	54,90	Enercon	61 adet 900 kW
Bilgin Elektrik Üretim A.Ş.	Manisa-Soma-Kırkağaç	90,00	Nordex	36 adet 2500 kW
Bares Elektrik Üretim A.Ş.	Balıkesir-Kepsut	142,50	Nordex	57 adet 2500 kW
TÜRBİN TEDARİK SÖZLEŞMESİ İMZALI PROJE TOPLAMI :667,60 MW				
GENEL TOPLAM 1.503,35 MW				



Şekil 2.25. Hatay/ Samandağ rüzgâr tesisi

2.9. Rüzgâr Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları

2.9.1. Üstünlükleri

- Fosil yakıtların fiyat değişkenliğinden kaynaklanan karmaşıklığı önler
- Bölgesel olması ve dolayısıyla kişilerin kendi elektriğini üretebilmesi.
- Atmosferi kirletici etkiye sahip gazların salınmaması, İklim değişikliği sorununa çözüm
- Temiz bir enerji kaynağı olması, Hava kirliliği sorununu azaltır
- Kaynağının tükenmemesi, küresel rüzgâr kaynağı küresel enerji talebinden daha büyük (güneş, dünya ve atmosfer olduğu sürece),
- Rüzgâr tesislerinin kurulumu ve işletilmesinin diğer tesislere göre daha kolay olması,
- Enerji üretim maliyetlerinin düşük olması,

- Güvenilirliğinin artması,
- Enerji arzını çeşitlendirir
- Yakıt ithalini önler
- Yakıt maliyetleri yok
- Ulusal kaynaklar için devletler arası anlaşmazlıkları önler
- Kırsalda elektrik ağını geliştirir
- İstihdam ve bölgesel kalkınma sağlar
- Modülerdir ve çabuk kurulur
- İthalat bağımlılığı yok
- Yakıt fiyatı riski yok
- Karbon emisyonu yok
- Arazi dostu – rüzgâr santrali içinde veya etrafında tarım/sanayi faaliyetleri yapılabilir
- Uygulama esnekliği – büyük ölçekli ticari santraller veya ev tipi uygulamalar mümkün
- Ulusal yarar – Geleneksel yakıtların aksine, enerji güvenliği açısından yakıt maliyetlerini ve uzun dönemli yakıt fiyatı risklerini eleyen ve ekonomik, politik ve tedarik riskleri açısından diğer ülkelere bağımlılığı ortadan kaldıran yerli ve her zaman kullanılabilir bir kaynaktır.

2.9.2. Dezavantajları

- Rüzgârın sürekliliği olmadığı için enerji üretim değerinin sabit olmaması,
- Rüzgâr türbinlerinin büyük alan kaplaması,
- Gürültü kirliliği oluşturması (Son Jenerasyon türbinlerde bu sorun büyük oranda çözülmüştür)
- Fosil ve nükleer yakıtlardan elde edilen enerjiye oranla enerji üretiminin düşük olması
- Yatırım maliyetlerinin yüksek olması,
- Kullanım ömrü dolan kompozit parçaların doğada geri dönüştürülmesinin mümkün olmaması.

3. METERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1 Rüzgâr Türbinleri

1981 yılında Paul la Cour ve Danimarka Askov Folk High School bilim adamlarının oluşturduğu bir grup rüzgârdan elektrik enerjisi üreten ilk tribünü yaptılar. Danimarka hükümetinin desteğiyle de test amaçlı bir rüzgâr santrali kurdular. 1918 Yılına gelindiğinde Danimarka'da rüzgârdan elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulan 120 adet RT bulunmaktaydı. Güçleri 20–30 KW arasında değişen bu rüzgâr türbinlerin toplu güçleri 3 MW civarındaydı.

Rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjii önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Pervane milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır. Genel hatları ile bir rüzgâr türbini aşağıda özetle anlatıldığı gibi çalışır (Yerebakan, 2001).



Şekil 3.1. Modern bir rüzgar türbininin iç yapısı

1. Jeneratör kanatlardan gelen mekanik enerjiyi 2. stator ve 3. rotor arasında elektrik enerjisine dönüştürür 4. Ana mil kanatları taşır 5. Kanatlar rüzgârın enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür 6. Kanat flanşı ve 7. Kanat çevirme motoru kanadın ideal açısını ayarlar 8. Kabin çevirme motoru 9. Rüzgâr ölçüm sensöründen gelen bilgilere göre kabin önünü rüzgâra çevirir. 10. Kule pervaneyi rüzgârın fazla olduğu yükseklerle taşır

3.2. Yöntem

3.2.1. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Kullanımdaki rüzgâr türbinleri boyut ve tip olarak çeşitlilik gösterse de, genelde dönme eksenine göre sınıflandırılır. Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri” (YERT) ve “Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri” (DERT) ve “Eğik Eksenli Rüzgâr Türbinleri” olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar

3.2.1.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgâr yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgâr yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgârı en iyi alacak şekilde, döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir (Yerebakan, 2001) Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanır. Rüzgârı arkadan alan türbinlerin yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgârı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgâr gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgâra bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır (Gipe, 1993). Yatay eksenli türbinlere örnek olarak pervane tipi rüzgâr türbinleri verilebilir. Bu tip türbinlerin kanatları tek parça olabileceği gibi iki ve daha fazla parçadan da oluşabilir. Günümüzde en çok kullanılan tip üç kanatlı olanlardır. Bu türbinler elektrik üretmek için kullanılır.



Şekil 3.2. Yatay eksenli rüzgar türbini

Ticari amaçlı türbinlerin hemen tamamı bu gruba girmektedir. Yukarıdaki fotoğrafta ve görüldüğü gibi, rotor, dişli çark, jeneratör ve fren bir kule üzerinde yatay safta bağlanmışlardır. Büyük türbinlerde (1 MW' dan büyük) transformatör de kulenin tepesinde türbin gövdesinde yer alır. Küçüklerde, transformatör şebeke bağlantı sistemleri ile birlikte yerde bulunur.

Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanır. Rüzgârı arkadan alan türbinlerin yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgârı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgâr gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgâra bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır.

Yatay eksenli türbinlere örnek olarak pervane tipi rüzgâr türbinleri verilebilir. Bu tip türbinlerin kanatları tek parça olabileceği gibi iki ve daha fazla parçadan da oluşabilir. Günümüzde en çok kullanılan tip üç kanatlı olanlardır. Bu türbinler elektrik üretmek için kullanılır. Geçmişte çok kanatlı türbinler tahıl öğütmek, su pompalamak ve ağaç kesmek için kullanılmıştır.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, farklı sayıda rotor kanadına sahip olan ve rüzgârı önden alan veya rüzgârı arkadan alan sistemler olarak da çeşitlilik gösterirler.

3.2.1.1.1. Rüzgârı Önden Alan Makineler

Yıllardır yaygın olarak kullanılan bu makinelerde rotor yüzü rüzgâra dönüktür. En önemli üstünlüğü kulenin arkasında olacak rüzgâr gölgeleme etkisine çok az maruz kalmasıdır, yani rüzgâr kuleye eğilerek varır. Kule yuvarlak ve düz olsa bile kanadın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır (Cotrell, 2002). Bu nedenle rüzgâr çekilmesinden dolayı kanatların sert yapılması gerekir ve kanatların kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekir. Ayrıca, önden rüzgârlı makineler, rotoru rüzgâra karşı döndürmek için “Yaw” mekanizmasına gerek duyarlar (Walker, J. F., Jenkins, 1997).

3.2.1.1.2. Rüzgârı Arkadan Alan Makineler

Bu makinelerin rotorları kule arkasına konur. Bunların önemli üstünlüğü rüzgâra dönmek için “Yaw” mekanizmasına gerek duymayışlarıdır. Eğer nacelle ve rotor uygun tasarlanırsa, nacelle rüzgârı pasif olarak izler. Daha önemli bir üstünlük kanatların esnek özelliğe sahip olmasıdır. Bu, hem ağırlık hem de makinenin güç dinamiği açısından önemli bir üstünlüktür. Böylece bu makinelerin avantajları; önden rüzgârlı makinelere göre daha hafif yapılması sonucu kule yükünün azalmasıdır. Ancak, kanat kuleden geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgârlı makinelerden daha çok zarar verir.

3.2.1.2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydir. Bu türbinlerin rüzgârı her yönden kabul edebilme üstünlüğü vardır. Kanatların güç üretebilmeleri için rüzgârdan daha hızlı dönmeleri gerektiğinden, ilk harekete geçimleri güvenli değildir. Düşey eksenli türbinlerin bir diğer üstünlüğü ise makine aksamı, hız yükselticisi ve jeneratörün toprak üzerine konulabilmesidir.

Yukarıdaki fotoğrafta görüldüğü gibi, düşey eksenli rüzgâr türbinleri mutfakta kullanılan yumurta çırpacağına benziyor. Kanatlar bir düşey safta bağlanmıştır (Şekil 3.3). Bu türbinler G.J.M. Darrieus isimli bir Fransız mühendisi tarafından 1931'de icat edildiğinden Darrieus türbini olarak da isimlendirilir.



Şekil 3.3. Dikey eksenli rüzgar türbini

3.2.1.2.1. Savonius Rüzgâr Türbinleri

Savonius rüzgâr türbini, 1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından keşfedilmiştir. İki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış, “kanat” adı verilen iki yarım silindirden oluşmaktadır. Belirli bir hızla gelen rüzgârın etkisiyle, çarkı oluşturan silindirin iç kısmında pozitif ve dış kısmında negatif bir momentin olmaktadır. Pozitif moment, negatif momentten daha büyük olduğundan, dönme hareketi pozitif moment yönünde sağlanır (Fujisava, N., Shirai, 1987). Diğer düşey eksenli rüzgâr türbinlerine göre; düşük rüzgâr hızlarında iyi başlangıç karakteristiklerine sahip olması, yapımının kolay ve ucuz olması, rüzgârın yönünden bağımsız olması ve kendi kendine ilk harekete başlaması gibi birçok üstünlüklere sahip olan Savonius rüzgâr türbinlerinin, aerodinamik performansı düşük

olduğu için ilk uygulama alanları; havalandırma, su pompalama gibi kısıtlı alanlar olmuştur. Savonius rüzgâr türbini'nin birçok üstünlüğü bulunmasına rağmen, aerodinamik performanslarının düşüklüğü nedeniyle kullanılmamaktadır. Son yıllarda yapılan Savonius rüzgâr türbini çalışmaları, aerodinamik performansın geliştirilmesi yönünde olmuştur.

Aldoss ve Najjar, bu çarkın performansı üzerine; “sallanan kanatlı çark” kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında Savonius rüzgar türbininin performansını, hem rüzgarın gerisinde hem de rüzgara doğru, çark kanatlarının bir optimum açı ile geriye doğru salınmasına müsaade ederek geliştirmişlerdir. Reupke ve Probert, Savonius rüzgâr türbininin çalışma etkinliğini arttırmak için, türbin kanatlarının kavisli kısımlarının yerine bir sıra menteşelenmiş kanatçıklar yerleştirmiştir. Kanatçıklar rüzgâra doğru ilerlerken, rüzgâr basıncının etkisinde otomatik olarak açılmış ve daha az akış direnci elde edilmiştir. Kanatçıkların ilk konuma gelirken, tekrar otomatik olarak kapandığını tespit edip, çok düşük uç hız oranlarında, düzeltilmiş parçalı kanatlı çarklardan, klasik Savonius rüzgâr türbinlerine oranla daha yüksek momentler elde edildiğini belirlemişlerdir.



Şekil 3.4. Savonius tipi rüzgar türbini

3.2.1.2.2. Darrieus Rüzgâr Türbinleri

1931 yılında Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından icat edilmiştir. 1970 ve 1980'lerde Amerika ve Kanada da Darrieus türbinlerinin kanat dizaynları üzerine geniş çalışmalar yapılmıştır. Kanatları geometrik formlu aerodinamik profile sahip olduğundan yüksek performanslıdır. Kanatlardaki hafif eğim sayesinde kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma iner. Yüksek hızlarda çalışabilir ve türbin; 2 veya 3 kanatlı olur. İlk hareket için Savonius rüzgâr türbinleri veya bir tahrik motoru gerekmektedir.



Şekil 3.5. Darrieus rüzgâr türbini

3.2.1.2.3. H-Darrieus Rüzgâr Türbinleri

Dikey eksenli en önemli rüzgâr türbinlerinden biridir. Darrieus rüzgâr türbinleri'nin geliştirilmesiyle meydana gelen daha karmaşık tipte bir türbinidir. Darrieus rüzgâr türbinlerinden iki önemli farkla ayrılır. Bunlar:

- Aerodinamik profili düzdür.
- Kanatlara pitch kontrol uygulanır.

Yatay eksenli türbinlere göre üstünlükleri şunlardır:

- Rüzgâr doğrultusundan etkilenmez. Dolayısıyla yönlendiriciye ihtiyaç yoktur

(Patel, et al., 1999).

- Bütün elektromekanik aksam yerde olduğu için yatırım ve bakım masrafları daha azdır.
- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez, böylece kule masrafı olmaz.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha kolaydır.



Şekil 3.6. H-Darrieus rüzgâr türbini

Sakıncaları ise şöyledir

- Türbin kanatları dizaynı dolayısıyla verimleri düşüktür.
- Kanatların yere yakınlığı sonucu düşük rüzgâr hızına maruz kalırlar, bu ise enerji üretimini azaltır (Cotrell, 2002).
- Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir, bu yüzden ilk hareket motoruna ihtiyacı vardır.

- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir, bu da pek pratik değildir
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir.

Verim düşüklüğü dolayısıyla düşey eksenli rüzgâr türbinleri fazla uygulama alanı bulamamıştır. Uygulama Kanada ve California'daki birkaç ünite ile sınırlı kalmıştır. "H" türbini denen ve bir kulenin tepesinde düşey şaft üzerine yerleştirilen türbin araştırma konusu oluyorsa da henüz ekonomik açıdan fizibil olamamıştır.

3.2.1.3. Eğik Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Dönme eksenleri düşeyle rüzgâr yönünde bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır.

3.3. Kanat Sayısına Göre Rüzgâr Türbinleri

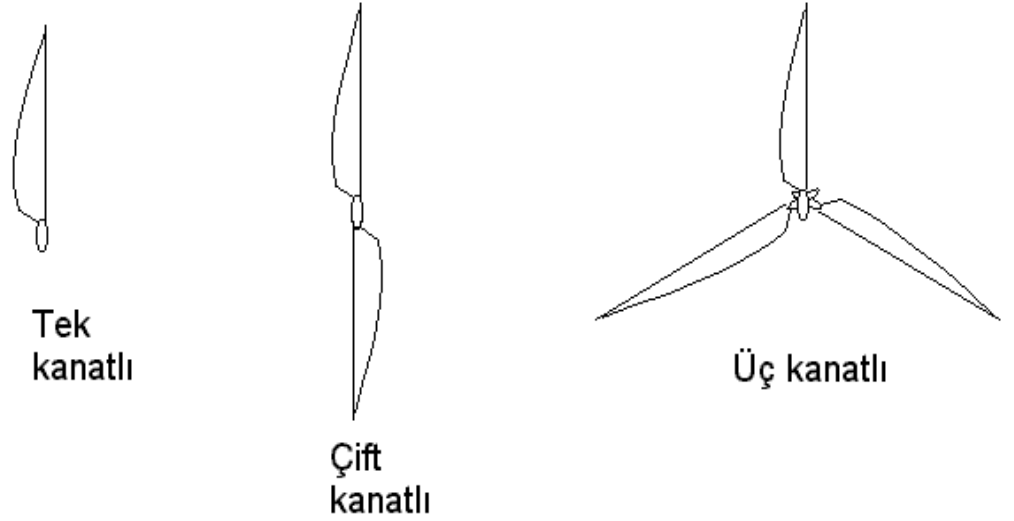
Rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı arttıkça, dönüş hızı azalır. Bu nedenle enerji üretiminde üçten fazla kanatlı sistemler kullanılmamaktadır. Kanat sayısının fazla olduğu sistemler çoğunlukla su pompalama amaçlı kullanılmaktadır.

3.3.1 Tek Kanatlı Rüzgâr Türbinleri

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin yapılmasının sebebi, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede makine kütlelerini ve rotorun döndürme momentini azaltmaktır. Ek olarak rotor kanadı, kanat üzerindeki yapısal yükleri azaltacak mekanizma ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olabilmesi için, tek menteşe ile

sabitleştirilip, 2 karşı ağırlıkla dengelenmelidir. Diğer taraftan tek kanatlı rotorlarda, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssızlık ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için hub çok iyi yapılmalıdır. MBB firması tarafından tasarlanan, her birinin tesis gücü 630 kW olan ve rotor çapı 56m üç tip rüzgâr türbinleri Almanya'nın Wilhelmshaven yakınında çalışmaktadır. En önemli ticari dezavantajı, 120m/sn civarındaki kanat uç hızının sebep olduğu rotorun aerodinamik gürültü seviyesidir. Bir kanatlı rüzgâr türbinlerinin kanat uç hızı, üç kanatlı rüzgâr türbinleri ile karşılaştırıldığında, iki kat daha yüksektir ve daha fazla gürültü içermektedirler (Durak, 2000). Almanya halkı, gürültü ve görsel rahatsızlık nedeniyle bu rüzgâr türbinlerin piyasada kullanılmasına şans tanınmamıştır.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri



Şekil 3.7. Tek-çift ve üç kanatlı rüzgâr türbinleri

3.3.2. Çift Kanatlı Rüzgâr Türbinleri

Üç kanatlı türbinlere göre rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbin fikrini doğurmuştur. Birçok ülkede 10 ile 100 m rotor çaplı ölçülerde rüzgâr türbinleri tasarlanıp, Avrupa ve ABD'de çalışmaya başlamıştır. Bu ticari rüzgar türbinlerden

sadece birkaç tanesi prototip durumundan, seri üretime geçebilmiştir. İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür. Fakat maalesef iki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik hareketleri önlemek için ilave teknik güç, maliyetin daha fazla artışına sebep olmaktadır. (Walker, J. F., Jenkins, 1997). Hub'ın titreşimi azaltmak için rotora kadran sistemi ilave edilmiştir. Bu kadran, rotor şaftına dikey ve iki rotor kanadına dik yerleştirilir. Üç kanatlı rotorla karşılaştırıldığında en büyük avantajı; kanat uç hızlarının yüksek olmasıdır. Bu rüzgâr türbinlerinin gürültü seviyesinin yüksek olması ve düşük rüzgâr hızlarında (3m/sn) çalıştırılması dezavantajdır. Günümüzde iki kanatlı rotor, şimdi birkaç ünitelidir ve en az bir an için artan piyasaya dikkat edecek olursak iki kanatlı rotora hiçbir eğilim bulunmamaktadır.

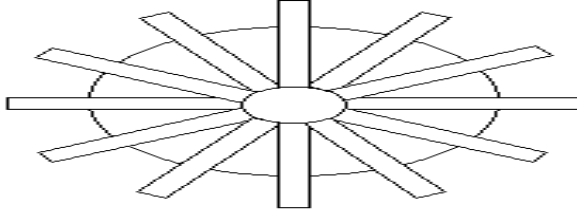
3.3.3. Üç Kanatlı Rüzgâr Türbinleri

Üç kanatlı modern türbinler, dünyanın her tarafında kullanılmaktadır. Üç kanat kullanımının asıl sebebi, dönme momentinin daha düzgün olmasıdır. Bu türbinde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momentini olmadığından, hub içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı 70m/sn altında olduğundan gürültünün düşüklüğü, sarsıntısız döndükleri için göz estetiğini bozmamaları önemli bir avantaj olup, halk tarafından kabulünü sağlamıştır. Küçük güçlü rüzgâr türbinlerde, üç kanatlı rotor kullanıldığında güç problemleri ortaya çıkar. Bu problemin çözümü için düşük devirde dönen rotorun devir sayısını $1/n$ oranında arttıran dişliler kullanılır ve "Cut in" olarak adlandırılan hız değerine ulaşıncaya kadar, jeneratör boşa çalıştırılır.

3.3.4. Çok Kanatlı Rüzgâr Türbinleri

Çok Kanatlı rüzgâr türbinler (rüzgâr gülleri), rüzgâr türbinlerin gelişmemiş ilk örnekleridir. Yıllarca sadece su pompalamasında kullanılan bu türbinler, bu işlemdeki

moment gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla, çok kanatlı olarak üretilmiştir. Çok kanatlı rüzgâr türbinler düşük hızda çalışırlar. Türbin kanatlarının genişlikleri, pervane göbeğinden uçlara gidildikçe artım gösterir. Pervane mili, dişli kutusuna bağlanarak, jeneratör mili devir sayısı artırılır ve otomobillerde uygulama alanı bulan jeneratörler kullanılır. (Walker, J. F., Jenkins, 1997). Rüzgâr gülleri, rüzgâr gülü pervane düzleminin rüzgâr hız vektörünü her zaman dik olarak alabilmesi için de, rüzgârgülü yönlendiricisi taşımaktadırlar.



Şekil 3.8. Çok kanatlı rüzgar türbini

3.4. Kanat Yapımında Kullanılan Malzemeler

Rotor kanatlarını yapımında cam lifli güçlendirilmiş plastik (GRP), karbon lifli güçlendirilmiş plastik (CFRP), ahşap alüminyum veya çelikten yapılabilmektedir. Küçük rüzgâr türbinler için, çapı 5 metreden az, kullanılacak malzeme seçiminde, ağırlık, sertlik veya kant karakteristiklerinin yerine daha çok üretim verimliliği ön plana çıkmaktadır. Fakat büyük ölçekli türbinler söz konusu olunca kanat profiline uygun malzeme seçimi oldukça önemlidir. Büyük rüzgâr türbinlerinin çoğunda cam lifli güçlendirilmiş plastik kullanılmaktadır. Bu malzeme hafifliği, yüksek dayanıklılık sağlamasının yanında, diğer malzemelere göre ucuzdur. Karbon lifli güçlendirilmiş plastik yapımı kanatlar prototiplerde başarı sağlamış ve sınırlı bir üretimi vardır. Bu malzeme cam lifli güçlendirilmiş plastikten daha yüksek dayanıma ve hafifliğe sağlaması bir avantaj olmasına rağmen, çok pahalı olması ekonomik açıdan kullanımını sınırlamıştır. Ahşap çok uzun zamandan buyana kullanılan bir malzemedir. Ucu ve hafif olmasına karşın, neme karşı hassas olması ve işlem maliyetleri dezavantajıdır. “Soğuk kalıp” olarak adlandırılan bir teknikle bu problemin üstesinden gelinmiştir. Ahşap kaplama tahtaları bir vakum torbasında epoksi reçine ile haddelenerek, kanat kalıbı

şeklinde preslenir. Bu biçimde elde edilen kanatlar, özellikle, büyük rüzgâr türbinlerinde dayanıklılık ve hafiflik bakımından diğerlerine göre oldukça büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Bunlar üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Çelik ve alüminyum bileşimleri ağırlık ve metal yorgunluğu gibi problemler nedeniyle sadece küçük güçlü türbinlerde kullanılmaktadır.

3.5. Rüzgâr Türbinlerinin Birbirleri ile Karşılaştırılması

Rüzgâr çiftlikleri kurulumunda; rüzgâr şartları, kurulacak alan ve ciddi kayıplardan kaçınmak için rüzgâr türbinlerin özellikleri bilinmelidir. Rüzgâr türbinlerinin incelendiği üzere kanat çeşitleri, rüzgârı alış şekilleri ve kullanım alanlarına göre birkaç çeşitte imal edilebilmektedir. Aşağıdaki çizelge 3.1, çizelge 3.2 ve çizelge 3.3 de rüzgâr türbinlerin birbirleri ile çeşitli özellikleri ve tipleri dikkate alınarak kıyaslanması verilmiştir. Bu tablolarda; türbinin kullanım amacı, bölgedeki rüzgâr ve maddi imkânlarla göre nasıl bir türbin seçimi gerektiği veya kurulmak istenen türbinin özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.1. Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması (Samsun, 2004)

	Kullanım alanı	Bir tek türbin gücü	Üretilen enerjinin verildiği yer	Akü İhtiyacı	Bakım Masrafı	Kurulum Masrafı
Büyük rüzgâr türbinleri	Endüstriyel	1000 kW'den büyük	Şebeke	Yok	Var	Yüksek
Küçük rüzgâr türbinleri	Kişisel	50W-50 kW	Çiftlik evleri, telekomünikasyon alıcısı, radyo kulesi, seralar vb.	Var	Yok	Düşük

3.5.1. Büyük Türbinlerin Seçimi için Sebepler

1. Rüzgâr türbinlerinin ölçek ekonomileri vardır, yani, daha büyük makineler ekseriya küçük makinelerden daha ucuz bir fiyatta elektrik dağıtılmasını sağlarlar. Sebep, altyapı ve yol yapımı tutarı, elektrik grid bağlantısı ve türbin bileşenlerinin sayısının (elektrik kontrol sistemi, gibi) makinenin ölçeğinden biraz bağımsız olmasıdır.
2. Daha büyük rüzgâr türbinleri özellikle off-shore rüzgâr gücü için daha uygundur. Alt yapı maliyeti türbinin ölçeğiyle orantılı olarak artmaz ve bakım maliyetleri de türbin büyüklüğünden oldukça bağımsızdır.
3. Tek bir türbinden fazlasına yer bulmanın güç olduğu alanlarda, yüksek bir kuledeki bir rüzgâr türbini mevcut rüzgâr şartlarını daha verimli kullanır.

3.5.2. Küçük Türbinlerin Seçilme Sebepleri

1. Lokal elektrik gridi, büyük bir makineden üretilecek elektrik gücünü tutmakta oldukça zayıf olabilir. Böyle bir elektrik gridinin uzak bağlantılarında, düşük nüfus yoğunluklu ve elektrik tüketimi az olan bir alan var olabilir.
2. Küçük makinelerden oluşan bir rüzgâr parkında üretilen elektrikte dalgalanmalar daha küçüktür, çünkü rüzgâr dalgalanmaları rasgele oluşurlar ve bu sebeple birbirlerini yok etmeye meyillidirler. Tekrarlarsak, daha küçük makineler, zayıf bir elektrik gridi için bir avantaj olabilir.
3. Büyük vinçlerin kullanımı ve türbin parçalarını taşımak için yeterince dayanıklı bir yol inşaatının maliyetleri, bazı alanlarda daha küçük makineleri daha avantajlı yapabilir.
4. Daha küçük makineler, geçici bir makine kusuru durumunda, riski yayarlar, (yıldırım çarpması, gibi).

Arazinin estetik kullanımı düşünceleri bazen daha küçük makineleri zorunlu kılar.

Ancak, büyük makineler daha az sayıda dönü hızına sahiptir, böylece büyük makineler az dönen motorları ile küçükler kadar çok dikkat çekmeyecek demektir.

Çizelge 3.2. Rüzgârı alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması (Karadeli, 2001)

	Yaw Mekanizma İhtiyacı	Kanat Malzeme Yapısı	Kuleye Binen Yük	Rüzgârın Türbine Verdiği Zarar
Rüzgârı Önden Alan RT	Var	Sert	Ağır	Az
Rüzgârı Arkadan Alan RT	Yok	Esnek	Hafif	Çok

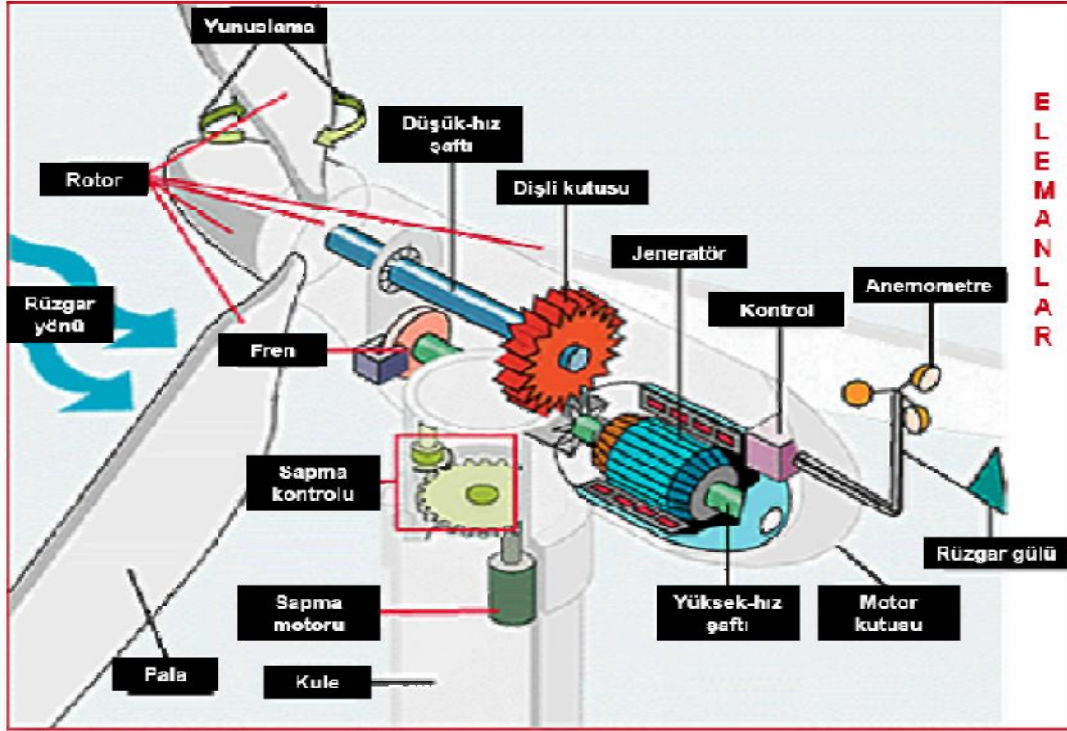
Çizelge 3.3. Kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırılması (Karadeli, 2001)

	YERT				DERT	
	Tek Kanath	2 Kanath	3 Kanath	Çok Kanath	Savonius	Darrierus
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Estetik görünüm	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az	Az	Az
Çalışma hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Kule ihtiyacı	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Kullanım amacı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Az elektrik ve su pompalama	Az elektrik ve su pompalama	Az elektrik ve su pompalama
Günümüzde kullanımı	Yok	Yok	Var	Var	Az	Az
Rotorun Dönmesi İçin Rüzgârı	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler

Yerel yüzey yapısı, bitki örtüsü ve yüksek bina gibi engeller rüzgâr hızını etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Türbinler düz tepelerde, en yüksek noktaya; vadi, kanyon ve geçitlerde ise hâkim rüzgârı alabilecek ve tüketiciden uzak olmayacak şekilde yerleştirilmelidir. Kanat yerleşiminde, asgari kanatın yerden 3m yüksekte olması ve kullanım yerinden 40m uzakta olması avantajdır. Rüzgâr çiftliklerinde yapılan düzenlemelerde her bir türbin, rüzgârı en iyi alacak şekilde ve birbirlerinin arkasına, gölgeleme etkisi en az olacak şekilde yerleştirilmesine dikkat edilmelidir.

3.6. Rüzgâr Türbin Yapısı

Türbin bileşenleri, türbin tasarım tipine veya imalatçısına göre değişmektedir (Yerebakan,2001). Rüzgâr türbinleri, bir rotor, bir güç shaftı ve rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirecek bir alternatörden oluşur. Rüzgâr rotordan geçerken, aerodinamik bir taşıma kuvveti oluşur ve rotoru döndürür. Bu dönel hareket jeneratörü hareket ettirir ve elektrik üretir. Türbinlerde ayrıca, dönme oranını ayarlayacak ve kanatların hareketini durduracak bir rotor kontrolü bulunur. Rüzgâr şiddeti yükseklikle arttığı için rüzgâr türbinleri kule tepelerine yerleştirilir. Bir rüzgâr türbininin görünüşü ve nacelle'in iç yapısını şekil 3.9. dan görebilirsiniz.



Şekil 3.9. Rüzgar türbini elemanları

Rüzgâr türbinleri 5 ana bölümden oluşur.

- Rotor Kanatları
- İletim Sistemi
- Fren Sistemi
- Kule
- Jeneratör

3.6.1 Rotor Kanatları

3.6.1.1. Aerodinamik Kuvvetler

Rüzgâr türbinlerin çalışma prensiplerini anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvetin iyi bilinmesi gerekir. Bunlar sürüklenme ve kaldırma kuvvetleridir.

Sürüklenme kuvveti cismin akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin, düz bir

plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cismin üzerine 90o dik geldiği durumda iken; minimum sürüklenme kuvveti de hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir. Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen kuvvettir. Uçakların yerden havalanmasında bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır.

Düz bir plaka üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı plaka yüzeyine 0o açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir (Walker, J. F., Jenkins, 1997). Bu bölgelere akış cam lifli güçlendirilmiş plastik altı da denir. Dolayısı ile hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelmiş olur. Yani hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça basınç artar. Bu olaya Bernoulli etkisi denir. Kaldırma kuvveti de cisim üzerinde emme veya çekme meydana getirir.

3.6.1.2. Kanat Profili

Cismin referans hattı ile hava akışı arasında yaptığı açı hücum açısı olarak adlandırılır. Kanat profilinin referans hattına veter hattı da denir. Hafif bombeli yüzeyler, verilen bir hücum açısı için daha yüksek bir kaldırma kuvveti meydana getirirler. Dolayısı ile aerofoil (kanat profili) denen bu tip şekiller bu durum için uygundur. Kanat profili üst düzeyde daha hızlı bir akış oluşturur. Yüksek hava akışı hızı, kanat profilinin üst kısmında basıncı düşürerek alçak basınç bölgesi meydana getirecektir. Bu nedenle emme etkisi oluşarak kanat havalanacaktır. İki temel kanat profili vardır: simetrik ve asimetric (Walker, J. F., Jenkins, 1997).

Asimetric kanat profillerinde, profilin alt yüzeyi hava akış yönüne en yakın noktadan maksimum kaldırmayı yaparken, simetric kanat profillerinde her iki yüzeyde de yaklaşık eşit bir kaldırma görülür. Aşağıdaki şekilde kanat profili üzerindeki kuvvetler gösterilmiştir.

Kanat profillerinde sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin özellikleri, rüzgâr tünellerinde yapılan testlerle belirlenmektedir. Bu testlerde farklı hücum açılarında sürüklenme katsayısı (CD) ve kaldırma katsayısı (CL) hesaplanır. Bu katsayılar birimsiz

büyükliklerdir. Bu katsayılar yardımıyla türbin için uygu kanat yapısı belirlenir (Walker, J. F., Jenkins, 1997).

CD sürüklenme katsayısı;

$$CD=D/0.5\rho V^2A$$

D: sürüklenme kuvveti (N)

p: hava yoğunluğu (kg/m³)

V: hava hızı (m/s)

A: kanat alanı (m²) şeklinde ifade edilir.

CL kaldırma katsayısı ise;

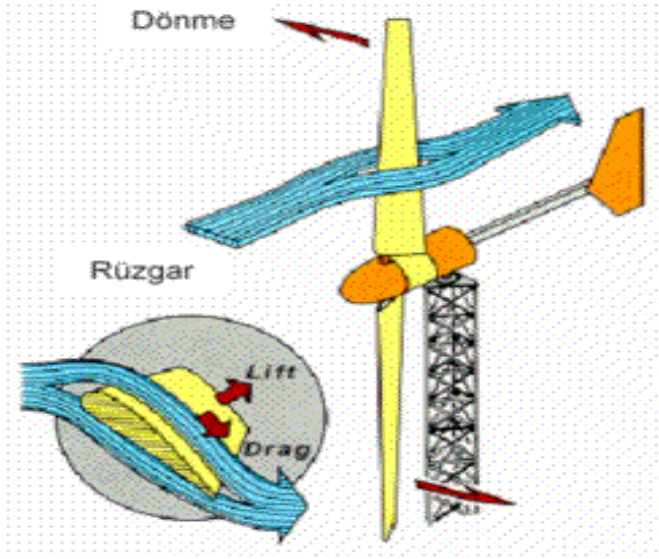
$$CL=L/0.5\rho V^2A$$

olarak gösterilir. Denklemdaki L indisi kaldırma kuvvetini ifade eder

Her iki katsayı da rüzgâr tünellerinde farklı hücum açıları ve rüzgâr hızlarında hesaplanmaktadır. Her bir hücum açısı için hesaplanan CD ve CL katsayılarının oranları (CD/ CL) alınır. Bu oranların en büyük olduğu değerdeki hücum açısı değeri, rüzgâr türbinlerinden en iyi verim alınabilecek değerdir.

Aşağıdaki şekilde kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin kanatlara etkisi görülebilir.

Rüzgâr akışı, pervane kanadına çarptığında, kanat profiline üst kısmından daha hızlı, alt kısmından daha yavaş geçecektir.



Sekil -Sürükme ve Kaldırma kuvvetlerinin kanat üzerindeki etkisi

3.6.2. İletim Sistemi

Rotor kanatları tarafından üretilen mekaniksel güç nasele (nacelle) içerisinde bulunan bir iletim sistemi vasıtasıyla jeneratöre aktarılır. Bu sistem vites kutusu, debriyaj, şaft bölümlerini içerir. Vites kutusu rotor hızını 20 rpm 'den 50 rpm'e ve birçok jeneratör tipinde kalkış için gerekli olan 1000–1500 rpm'e çıkartmada kullanılmaktadır. İletim sistemi rotor çıkış gücündeki dalgalanmalar nedeniyle oluşan yüksek seviyedeki dinamik yükler için tasarlanmalıdır.



Şe

Şekil 3.11. Rüzgâr türbini dişli kutusu

3.6.3. Fren Sistemi

Denklemden de görüleceği gibi

$$W = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A_1 V^3$$

Rüzgârdan elde edilecek güç rüzgâr hızını küpü ile orantılı olup, özellikle yüksek hızlarda çok büyük güç elde edilir. Buradan da anlaşılacağı üzere rüzgâr türbinlerinin güvenli bir şekilde çalışması için etkili bir fren sistemi gereklidir. Rüzgâr türbinlerinde bağımsız iki sistem vardır; pitch-stall kontrol ve mekanik fren sistemidir. Her biri de hız limitinin aşıldığı durumlarda, şebeke bağlantısının kopması ve diğer acil durumlarda türbinleri güvenli konuma getirme özelliğine sahiptir. Pitch ve stall kontrolüne ilerleyen konularda ayrıntılı bir şekilde işlenecektir. Mekanik frenler ise rotoru tamamen durdurmak için ana iletim şaftına yerleştirilmiştir.

3.6.4. Kule

Kule, rüzgâr türbinlerinde nacelle ve rotoru taşır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Halat destekli direk tipi kuleler genellikle küçük türbin uygulamalarında kullanılır.

Tüp şeklindeki kule şekli en çok tercih edilen kule şeklidir. Genellikle 20 – 30 metre yükseklikte üretilir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur. En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır. Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır. Dezavantajları ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir (Yerebakan, 2001). Aşağıdaki şekillerde kule tiplerinin örneklerini görebilirsiniz.



Boru Tipli Kule

Kafes Yapılı Kule

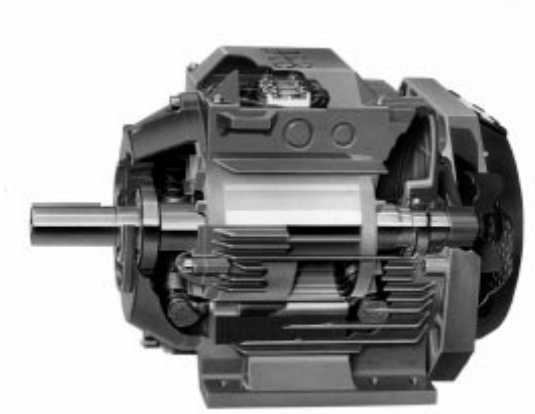
Halat Destekli Kule

Şekil 3.12. Çeşitli kule tipleri

3.6.5. Jeneratörler

Rüzgâr türbini jeneratörleri mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler. Rüzgâr türbini jeneratörleri diğer tip jeneratörlere göre biraz daha farklıdır. Bunun sebeplerinden biri, jeneratörün salınımlı güç üreten rüzgâr türbini rotoruyla birlikte çalışmasıdır (Yerebakan, 2001). 100 kW veya 150 kW üstündeki büyük rüzgâr türbinlerinde üretilen gerilim üç fazlı alternatif olup, genellikle 690 V değerindedir. Daha sonra rüzgâr türbinin yanına veya kulenin içine monte edilmiş transformatöre yollanır. Şebekeye bağlı olan bu transformatör yardımıyla gerilim 10kW veya 30kW arasında bir değere yükseltilir. Bu üreticiler 50 Hz ve 60 Hz olarak üretilebilmektedir. Rüzgâr türbinlerinde üç tip jeneratör kullanılmaktadır:

1. Doğru Akım Jeneratörleri
2. Senkron Jeneratörler
3. Asenkron Jeneratörler



Şekil 3.13. Jeneratör

Küçük güçlü sistemlerde eskiden daha fazla kullanılan doğru akım jeneratörleri yerine senkron ve asenkron jeneratörler kullanılmaktadır

3.6.5.1. Senkron Jeneratörler

Dünya da üretilen elektrik enerjisinin büyük çoğunluğu senkron jeneratörler yardımıyla üretilirler. Bu tip makineler sabit frekansa bağlı olarak sabit hızda çalışırlar. Bu sebepten dolayı rüzgâr türbinlerinde değişken hızlı sistemler için uygun değildir. Buna yanında, senkron makineler rotor alanını uyarabilmek için doğru akıma gereksinim duyarlar. Bu da karbon fırçalarına ihtiyacı olması anlamına gelmektedir.

Doğru akım ve fırça gereksinimi relüktans motorunun kullanımı ile ortadan kaldırılabılır. Böylelikle bir yandan güvenilirlik artırılırken, maliyette azaltılmış olur.

Senkron jeneratörün doğru akım jeneratörüne göre avantajı veriminin yüksek olması ve bir doğru akım jeneratörüne oranla daha düşük dönme hızı da elektrik verebilme özelliğine sahip olmasıdır. Bunun yanında senkron jeneratörler daha yüksek hızlarda elektrik üretirler. Alternatif akım jeneratörlerinde maksimum dönme hızı ile elektrik üretimi için gerekli minimum hız arasındaki oran yüksektir. Böylece bir senkron jeneratörü süren bir rüzgar türbini daha geniş rüzgar hızı aralığında çalışabilirler.

Asenkron jeneratörlere oranla senkron jeneratörlerin kendi mıknatıslanma avantajı olmasına rağmen kontrol sistem bağlantıları daha karmaşıktır. Bir kontrol sisteminde takometre, voltmetre, fazmetre, şebeke ile bağlantıyı sağlayan otomatik cihaz ve rüzgâr kesildiğinde veya şebeke gerilimi sıfıra düştüğünde bağlantının kesilmesini sağlayan ters güç rölesi bulunur. Senkron jeneratörün şebekeye bağlantısı hassas bir düzenleme gerektirir. Bu işlemin sık sık yapılması gerektiği için sorunlar ortaya çıkar. Jeneratör şebekeye tam senkron hızda, senkron jeneratörün ve şebekenin eşit gerilim değerinde, faz açısında, güç faktöründe ve aynı fazda olduğu anda bağlanır. Bu tür sorunları gidermek için büyük damperler kullanılır. Damperler senkron jeneratöre asenkron motorlardaki gibi yol verilmesini sağlayan sincap kafes şeklinde bobinlerdir ve şebekeye bağlantı yapıldığında oluşabilecek salınımların azaltılmasını sağlarlar. Diğer bir çözüm ise rüzgar türbini ve senkron jeneratör arasına jeneratörü şebekeye sürekli bağlanmasını sağlayan serbest bir kuplaj yapılmasıdır. Fakat bu çözüm ekonomik değildir. Bu nedenle en iyi tercih asenkron jeneratörlerdir.

3.6.5.2. Asenkron Jeneratörler

Rüzgâr türbinlerinin çoğunluğunda alternatif akım üretebilmek için üç fazlı asenkron jeneratörler kullanılır. Asenkron jeneratörlerin yapısı senkron jeneratörlerinden farklıdır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan asenkron jeneratörler sincap kafesli asenkron jeneratörlerdir. Rotor her iki taraftan kısa devre bilezikleri ile kısa devre edilen, alüminyum veya bakır barlardan oluşur. Rotor devresi yapımsal olarak kapalıdır ve dışarıdan herhangi bir elektriksel müdahale yapılamaz. Asenkron jeneratör şebekeye senkron hızdan çok az farklı bir hız ile uyum gerektirmeksizin bağlanabilir. (Walker, J. F., Jenkins, 1997).

Bağlantı sonucunda oluşan aşırı yüklenme çok kısa sürelidir. Bağlantı kontrol sistemi, şebekeye bağlantıyı kontrol eden takometre kontağından ve rüzgâr hızı düştüğü zaman bağlantının kesilmesini sağlayan bir ters akım rölesinden oluşur.

Rüzgâr hızının cut-in (türbinin çalışmaya başlama hızı) hızından daha yüksek olduğu durumlarda, asenkron jeneratör kendi nominal dönme hızına ulaştığında elektrik jeneratörü olarak davranır. Tam tersi durumda ise, bir otomatik ayırma cihazı jeneratörü şebekeden ayırır.

Asenkron jeneratörün bazı avantajları şunlardır (Siegfried, 1998).

- Tesisi ucuzdur
- Dönen kontaklar olmamasından dolayı başlatma kolaydır
- Şebekeye bağlanması kolaydır
- Şebekeye bağlandığı zaman salınımlar oluşturmaz.

Aşağıda şekil 3.14. görüldüğü gibi yüksek üretim yapan rüzgâr türbinlerinde yukarıdaki elemanların yanı sıra;

- Hidrolik sistemler (rüzgâr türbininin hareketleri için)
- Elektronik kontrol sistemleri (Sistemin çalışmasını kontrol için)
- Soğutma Ünitesi (İç ortamda sıcaklığın dengeli kalması için)
- Hız, yön ve sıcaklık sensörleri bulunmaktadır.



Şekil 3.14. Modern bir rüzgâr türbini

3.7. Rüzgâr Türbinleri Kontrol Sistemleri

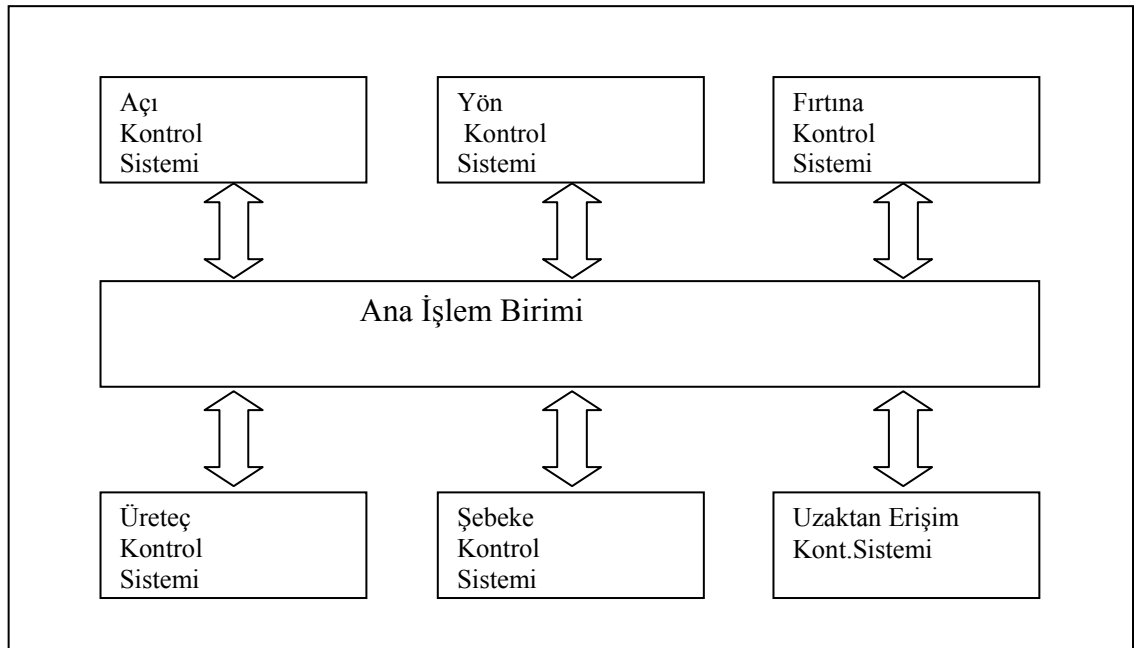
Rüzgâr türbinlerindeki kontrol sistemlerinin amacı parametreleri kontrol ederek, türbin faaliyetlerini her mevsim ve rüzgâr koşullarında, en verimli enerji üretecek şekilde optimize etmeyi sağlamaktır.

Rüzgar türbinlerinde üretilen elektrik enerjisinin sağlıklı bir biçimde kullanılabilmesi için sabit bir voltajda ve frekansta olması son derece önemlidir. Aksi takdirde hem türbine hem de enerji sağlanan cihazlara zarar verilebilir. Bunun için üretilen enerjinin kontrol edilmesi şarttır. Sağlıklı bir kontrol aşamasından sonra üretilen enerji güvenle kullanılabilir.

Kontrol sürecinde rüzgarın hızı, kanatların dönme hızı, şanzımanın dönüş hızı, üretilen voltajın büyüklüğü ve frekansı, devredeki yüklerin çektiği akımlar, şanzımanın

ve jeneratörün sıcaklıkları doğru bir biçimde ölçülmeli ve kontrol algoritması buna göre oluşturulmalıdır. Sistem kendi kendini kontrol edebilmeli ve hata durumunda alarm verebilmelidir.

Rüzgâr türbinlerindeki kontrol sistemleri ana işlem birimine bağlı olarak çalışan; kabin üzerinde bulunan meteorolojik verileri algılayan sensörlerden gelen bilgiye göre kanat açısını ayarlayan açı kontrol sistemi, rüzgâr türbini kabinini rüzgâr yönüne göre döndüren yön kontrol sistemi, çok yüksek hızlardaki rüzgârlarda, fırtınada, türbini güvenli bir şekilde devre dışı bırakmaya yarayan fırtına kontrol sistemi, elektrik şebekesinin durumunu algılayıp şebekeye giriş - çıkışı kontrol eden şebeke kontrol sistemi, üreticinin ürettiği elektriğin voltaj, akım ve frekansını denetleyen üreticinin kontrol sistemi, dünyanın herhangi bir noktasından denetim yapmaya imkân sağlayan ve türbinlerin kendi kendine arıza bildiriminde kullanılan uzaktan erişim kontrol sistemi birimlerinden oluşmaktadır (Anonymous, 2009).

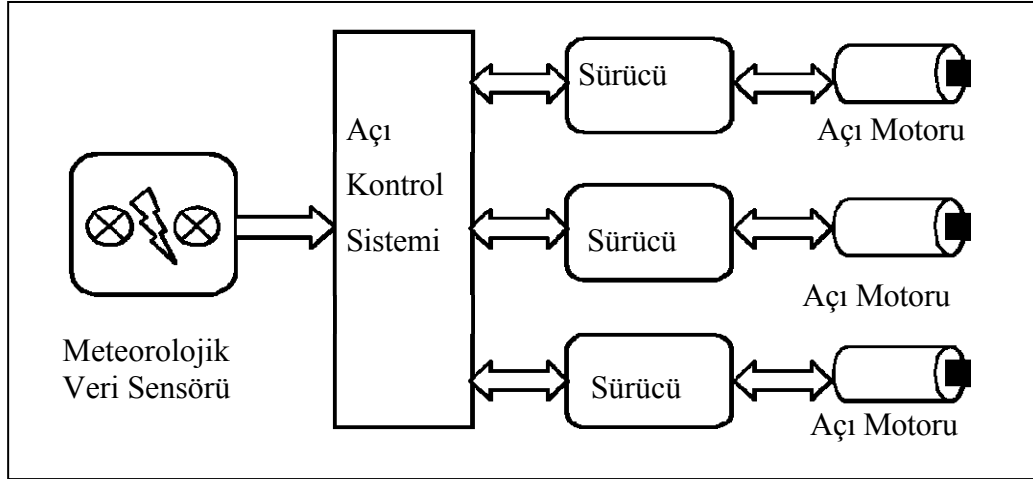


Şekil 3.15 Rüzgâr türbini kontrol sistemleri

3.7.1. Açık Kontrol Sistemi

Açık kontrol sistemi, kanatların pozisyonunu ayarlayarak verimli rüzgâr ile en uygun pozisyonunu sağlar. Böylece, kanatların aerodinamik yapısı ve kanat açılarının ayarlanması ile hem yapısal yüklenmeler en aza indirilmiş, hem de verimli rüzgârdan en üst düzeyde elektrik enerjisi üretimi sağlanmış olur.

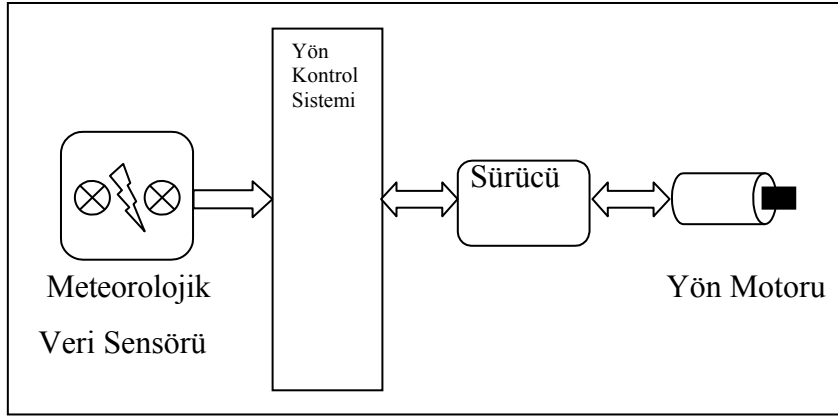
Rüzgâr türbininin kabini üzerinde bulunan meteorolojik verileri algılayan sensörden gelen bilgiler, kanat açısını ayarlayan servomotor sürücülerine iletilir. Servomotor sürücüsüne iletilen bilgi servomotoru harekete geçirir ve rotor kanat açısı ayarlanır (Anonymous, 2008)



Şekil 3.16. Açık kontrol sistemi çalışma prensibi

3.7.2. Yön Kontrol Sistemi

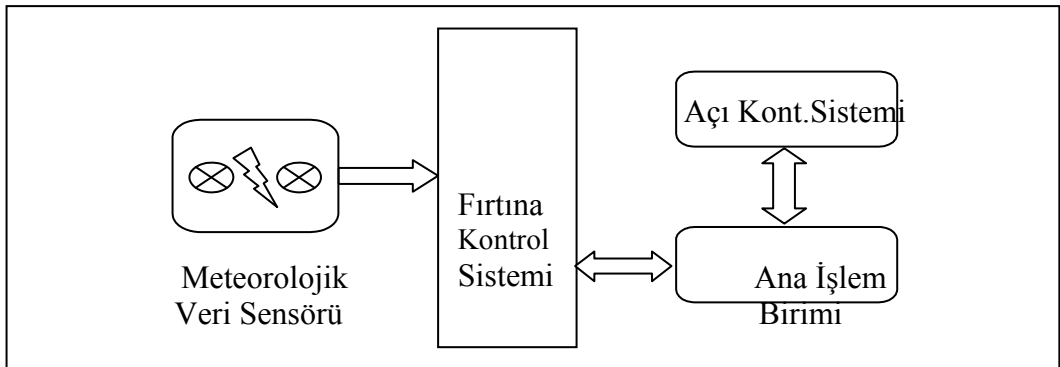
Rüzgâr türbininin yönünü her koşulda rüzgâra doğru dik açı yapacak şekilde tutar. Kabin üzerinde bulunan meteorolojik veri sensöründen gelen bilgiyi yön servomotor sürücüsüne iletir, yön servomotoru hareketi ile kabin rüzgâra dik açı yapacak şekilde pozisyon alır (Anonymous, 2009).



Şekil 3.17. Yön kontrol sistemi çalışma prensibi

3.7.3. Fırtına Kontrol Sistemi

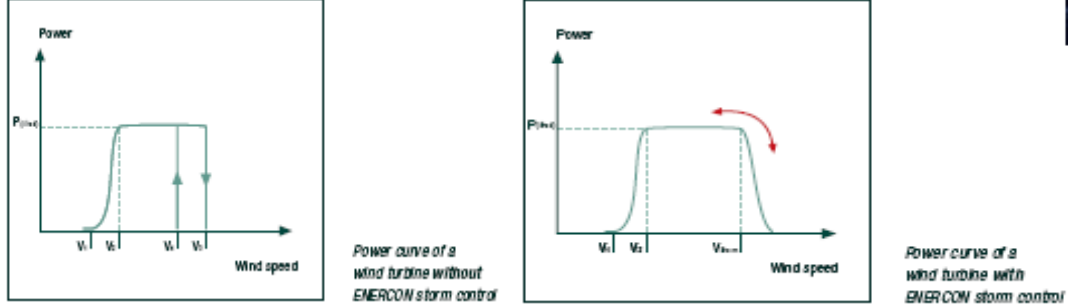
Rüzgâr türbinlerini çok iyi bilmeyen birisi yüksek hızlı rüzgârları enerji üretimi için bir nimet olarak algılayabilir. Fakat deneyimli bir rüzgâr türbini kullanıcısı veya tasarımcısı için son sürat dönmekte olan bir türbin için daha kuvvetli rüzgârlar endişelenme sebebi olabilir. Rüzgâr hızının iki katına çıkması elde edilen gücün sekiz katına ve türbin üzerindeki gerilim kuvvetlerinin de dört katına çıkması demektir. Bir rüzgâr türbini aşırı kuvvetleri önlemek zorundadır. Aşırı rüzgâr hızlarından korunmak için kapatma mekanizmalarına başvurulur



Şekil 3.18. Fırtına kontrol sistemi çalışma prensibi

Fırtına kontrol sistemi uygulanmadığında devre dışı kalan bir rüzgâr türbininin tekrar devreye alınması zaman almakta bunun sonucunda da verimsiz çalışmasına

neden olmaktadır. Fırtına kontrol sistemi ile rüzgâr türbinin tekrar devreye alınması için geçen süre minimize edilerek verimli çalışması sağlanmaktadır. (Anonymous, 2008).

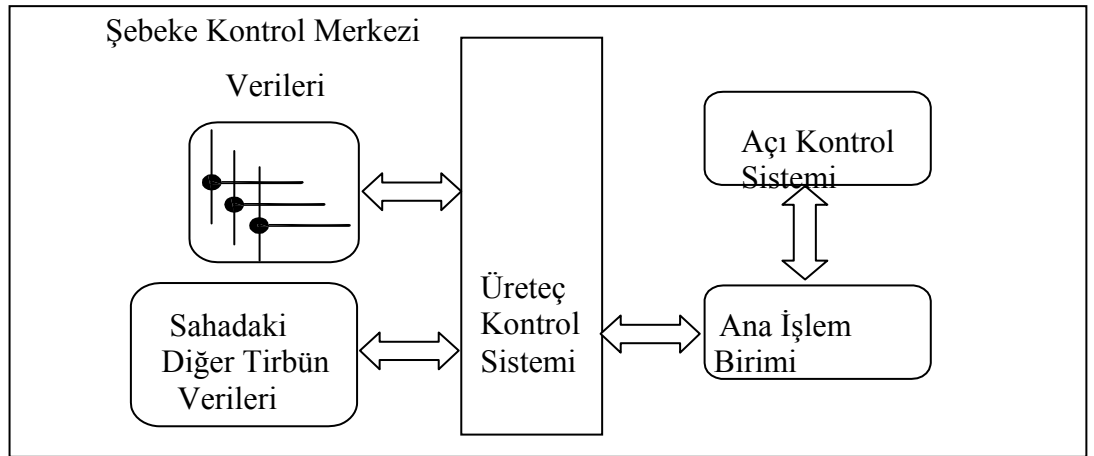


Şekil 3.19. Fırtına kontrol sistemi olmayan rüzgâr türbini güç eğrisi

Şekil 3.20. Fırtına kontrol sistemi olan rüzgâr türbini güç eğrisi

3.7.4. Şebeke Kontrol Sistemi

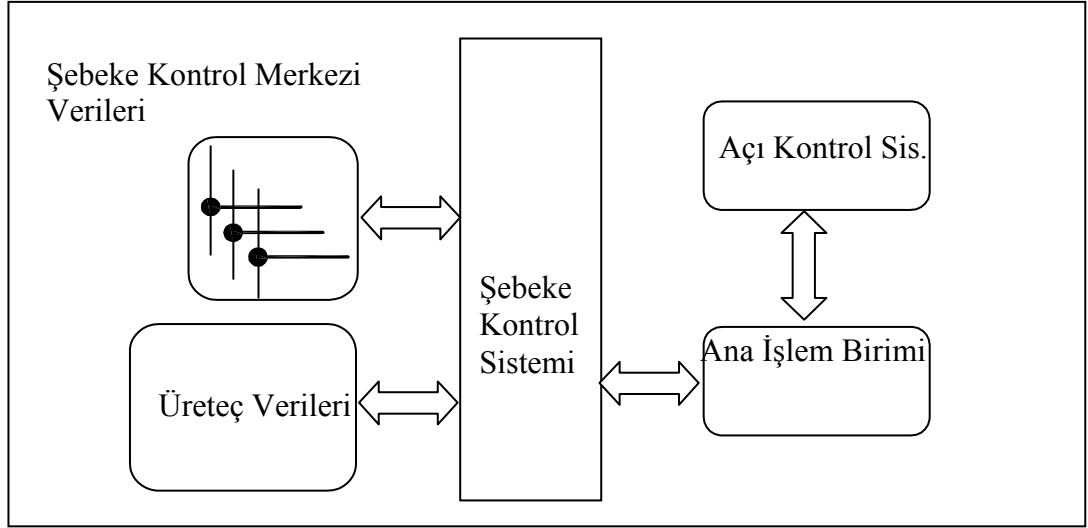
Rüzgâr türbinlerinde şebeke kontrol sistemi, şebeke kontrol merkezinden gelen verilere göre rüzgâr türbininin devreye alınması veya devre dışı bırakılmasındaki şalt sahası şebeke bağlantı işlevlerini otomatik olarak yerine getiren birimdir. Aynı zamanda rüzgâr türbinlerinin ani devreye alma ve devre dışı kalma işlemlerinden kaynaklanan şebekeye yük getirme etkisini de ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca bu denetleme birimi ile aynı sahada bulunan rüzgâr türbinlerinin birbirleri ile olan ilişkisi de şebeke bakımından denetlenebilmektedir (Ataseven, 2006).



Şekil 3.21. Şebeke kontrol sistemi çalışma prensibi

3.7.5. Üreteç Kontrol Sistemi

Rüzgâr türbininden üretilen elektrik enerjisinin şebekeyi doğru beslemesi sürekli denetimi gerektirir. Üreteç kontrol sistemi, rüzgâr türbinlerinde kanatlardan alınan hareket enerjisini, elektrik enerjisine çeviren üreticinin çıkış voltaj, akım ve frekansının şebeke değerlerine uyumlu olmasını denetleyen birimdir. Herhangi bir uyumsuzluk algılandığında rüzgâr türbini devre dışı bırakılarak uzaktan erişim kontrol sistemi aracılığı ile bakım onarım yapılması sağlanır (Ataseven, 2006).

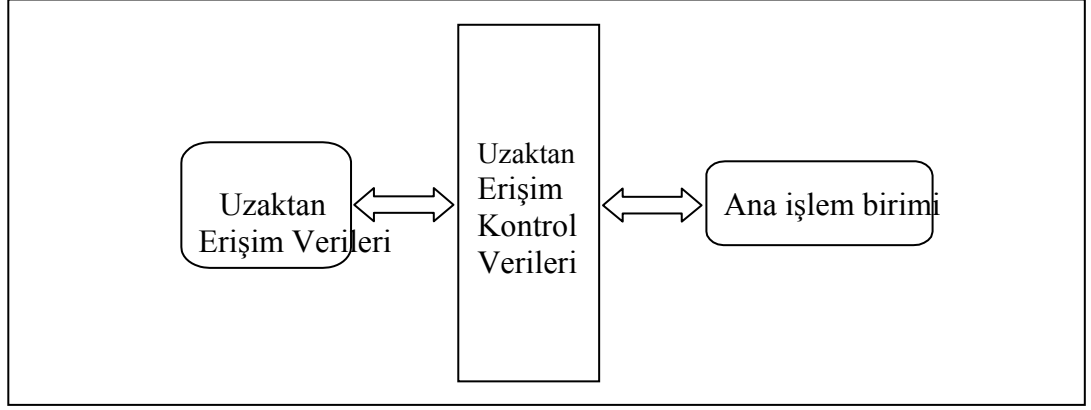


Şekil 3.22. Üreteç kontrol sistemi çalışma prensibi

3.7.6. Uzaktan Erişim Kontrol Sistemi

Rüzgâr türbinlerindeki uzaktan erişim kontrol sistemi birimi ile bütün kontrol işlevleri internet bağlantısı olan bir bilgisayar yardımı ile dünyanın herhangi bir yerinden kumanda, izleme, raporlama, bakım onarım ihtiyacı gibi işlevleri kolaylıkla yerine getirilmesine imkân sağlamaktadır. Bu sayede rüzgar türbininin her zaman optimum koşullarda çalıştırılması mümkün olmaktadır. Sistem bileşenleri ve parametreleri sürekli izlenmektedir. Uzaktan erişim kontrol sistemi ile veriler çok

hızlı şekilde değerlendirilerek, herhangi bir problemde hemen müdahale imkânı da sağlanmaktadır (Anonymous, 2009).



Şekil 3.23. Uzaktan kontrol sistemi çalışma prensibi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Rüzgâr Türbinlerinin Geleceği

Önceki konularda genişçe rüzgâr türbinlerinin nasıl çalıştığına değindim. Esasen rüzgâr türbinleri gelişen teknoloji sayesinde işleyen bir sistemdir ve bu teknoloji, gelişimini hiçbir zaman kesmeyecektir. Bu teknoloji bize elektrik üretmekte, su pompalamakta ve bunu bir yada binlerce rüzgar türbini yardımıyla yapmaktadır. Bu teknolojiyi şu elemanlar oluşturur: malzeme biçimi, sensör tekniği, mikro bilgisayarların geniş kullanımı, yeni simülasyon ve üretim tekniklerinin entegrasyonu. Rüzgâr türbini üreticilerine göre şu karakteristik özelliklere ulaşılmıştır: Basitlik, uygulanabilirlik, verimlilik, dönüştürülebilirlik, sessizlik, güvenlik, dayanıklılık, elastikiyet.

Rüzgâr enerjisi gelişmesini sürdürdükçe yeni uygulamalar da kullanıma geçecek, hayatımıza kendi rüzgâr türbinlerinden elektrik üreten toplumlar ve rüzgâr enerjisiyle çalışan taşıtlar gibi kavramlar girecektir.



Şekil 4.1. Rüzgar türbinünün kara taşıta uygulanması

4.2. Rüzgâr Türbinleri Kuruluş Yerinin Seçimi

Teknolojik gelişmenin hızla sürdüğü rüzgâr enerjisi endüstrisinde, üretilen elektriğin oldukça ucuz oluşu da bu enerjiye olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu enerjiden en ekonomik, en verimli düzeyde yararlanılabilmesi için, ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği de göz önüne alınarak kapsamlı bir fizibilite çalışması yapılması gereklidir. Rüzgar enerjisinden en iyi şekilde yararlanabilmek için, rüzgar çiftliklerinin kurulacağı alanı belirlemek çok önemlidir (Şen, Z, and Şahin, A.D., 1997).

4.2.1. Kuruluş Yeri Seçim Faktörleri

Rüzgâr tarlaları kurulmadan önce, beklenen verimin elde edilebilmesi için kuruluş yeri seçimine çok büyük önem vermek gereklidir.

4.2.1.1. Ortalama Rüzgâr Hızı

Bir rüzgâr çiftliğinin uygulanabilirliği incelenirken, dikkate alınacak en önemli parametre uzun dönem ortalama rüzgâr hızıdır. Bir arazinin potansiyel rüzgâr çiftliği kuruluş yeri olarak seçilebilmesi için yıllık ortalama rüzgâr hızının 6m/s düzeyinde olması beklenir. Bu hızın altında bir ortalama, rüzgâr enerjisi potansiyeli olarak kabul edilmemektedir.

4.2.1.2. Kuruluş Yerinin Topoğrafyası

Bir alana rüzgâr çiftliği kurulabilmesi için etkin rüzgâr yönünde mümkün olduğu kadar geniş ve açık bir görünüm istenir. Ayrıca rüzgârı hızlandıran topoğrafik etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Rüzgâr hızı zemin pürüzlülüğünden, mevcut engellerden son derece etkilenmekte ve ani değişimler göstermektedir. Birçok durumda mevcut meteorolojik veriler bölgenin gerçek enerji potansiyelinin tespitinde yetersiz kalmaktadır.

Seçilen arazide rüzgâr enerji santrali kurmak fiziksel, çevresel, teknik ve yasal açılardan mümkün olmayabilir. Bu nedenle şu kriterler dikkate alınmalıdır:

- Sahaya ulaşım kolaylığı
- Enerji nakil hatlarının ve trafo merkezlerinin güç kapasitesi
- Üretilecek enerjinin nakli için trafo merkezlerine olan uzaklık
- Sahanın yol ve diğer çalışmalar için işlenme kolaylığı
- Arazinin eğimi
- Sahanın alansal olarak yeterliliği
- Sahada arazi kullanım şekli ve mülkiyeti
- Sahanın bitki örtüsü
- Sahanın hakim rüzgar yönüne göre durumu
- Sahanın yerleşim birimlerine olan uzaklığı
- Sahanın imar durumu
- Sahanın askeri ve sivil radar ve benzer tesislere olan yakınlığı
- Sahanın sit, milli park, orman arazisi veya diğer kapsamda olup olmadığı
- Sahanın doğal yaşam etkinlikleri ve ekolojik açısından önemi
- Sahanın jeolojik yapısı
- Yeraltı su kaynaklarının analizi
- Yakın civarda yaşayanların rüzgâr santrallerine bakış açısı
- Sahanın buzlanma, yağmur, yıldırım ve atmosferik kararlılık durumları
- GSM kapsama alanının tespiti
- Yasal yükümlülükler

4.2.1.3. Altyapı

Rüzgâr çiftliği kurulması düşünülen alanın ulusal enerji iletim ve dağıtım ağına olan yakınlığı bir diğer önemli faktördür. Elektriksel altyapı durumunun, rüzgâr çiftliğinin yatırım maliyeti, enerji üretimi ve dolayısıyla karlılığı üzerinde önemli etkileri olabilmektedir. Rüzgâr çiftliği kurulumunda inşaat istemleri, geçici veya daimi erişme yollarının yapılması önemli giderlerdendir. Bu nedenle rüzgâr çiftliği kurulması düşünülen alana ulaşım kolaylığı da çok önemlidir.

4.2.1.4. Arazinin Kullanımı

Kuruluş yeri seçiminde etkili olan bir başka faktörde, rüzgâr çiftliği kurulması düşünülen alanın kullanımıdır. Zengin tarım topraklarına kurulacak rüzgâr çiftlikleri için arazi sahiplerine belirli oranlarda tazminat ödenmesi gerekir. 20 türbinden oluşan bir rüzgâr çiftliği yaklaşık olarak 1 km² bir alana kurulabilir. Ancak bu alanın yaklaşık %1-1.5'lik bir kısmına türbinler oturur. Geri kalan alanda tarım, hayvancılık ve diğer etkinliklerin yapılmasında herhangi bir engel yoktur.

4.2.1.5. Yüzey Şekillerinin Etkisi

Rüzgâr 1 km'lik yüksekliğe kadar yeryüzü engebeliğinden etkilenir. Engebelik ne kadar fazla ise rüzgâr hızında da azalmalar o kadar fazla olur. Çizelge 5.1. de farklı yüzeylerin verilen pürüzlülük değerlerine göre, su yüzeyi, rüzgarı daha az etkileyen en pürüzsüz yüzeydir. Rüzgâr türbinünün enerji verimliliği de uygun rüzgâr koşullarını değerlendirmek için arazilerin pürüzlülük bağlı katsayıları büyük önem taşır.

Pürüzlülük Sınıfı	Pürüzlülük Uzunluğu	Enerji İndeksi (%)	Arazi tanımı
0	0.0002	10	Su Yüzeyi
0.5	0.0024	73	Tamamıyla açık alan, düzgün bir yüzey, hava alanlarındaki beton yollar, çayır ekili alanlar, vbg.
1	0.03	52	Açık tarım alanı, dağınık binalar. Sadece yumuşak düzgün tepeler.
1.5	0.055	45	Bir kaç binanın bulunduğu tarım alanı, yaklaşık 1.250 m aralıklarla 8 m uzunluktaki çitlerin bulunduğu alan.
2	0.1	39	Bir kaç binanın bulunduğu tarım alanı. 8 m uzunluktaki çitlerin yaklaşık 500 m aralıklarla bulunduğu alan.
2.5	0.2	31	Çok sayıda ev, çalılık ve örtünün ve 8 m uzunluklu çitlerin 250 m aralıklarla bulunduğu alan.
3	0.4	24	Köyler, küçük kasabalar çok sayıda uzun çitlerin bulunduğu tarım alanı, orman, çok pürüzlü ve düz olmayan alan.
3.5	0.8	18	Büyük şehirler, yüksek binalar
4	1.6	13	Çok büyük şehirler, çok yüksek bina ve gökdelenler.

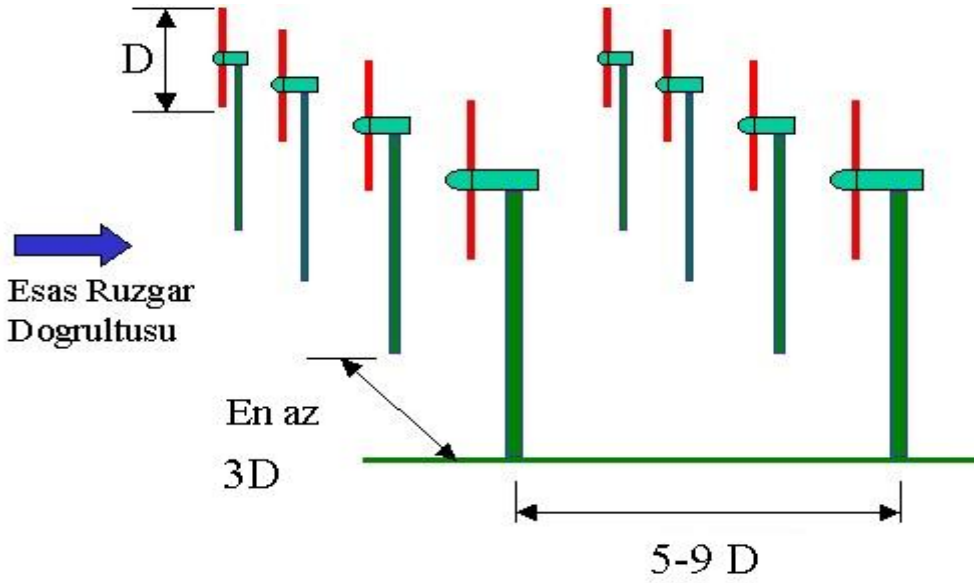
Çizelge 4.1. Arazilerin pürüzlüğe bağlı katsayıları (Cotrell, 2002)

4.2.1.6. Çevresel Etkileşim

Kuruluş yerinde yaşamları tehdit altına girebilecek hayvan türlerinin bulunması, gürültü etkileşim durumları, santralin hava trafiğine etkisi olumsuz etkiler dönüşebilir. Rüzgâr çiftliklerinin kurulabilmesi için büyük alanlara ihtiyaç vardır. Örneğin, bir rüzgâr çiftliğinin, bir doğalgaz santralıyla aynı enerjiyi üretebilmesi için 85 kat daha büyük bir alana kurulması gerekmektedir. Rüzgâr çiftliklerinin yakınlarında yaşayan insanlar gürültülerden rahatsız olabilirler. Ayrıca türbinler çevresindeki insanları görsel açıdan da rahatsız edebilmektedir. Estetik olarak büyük türbinlerin kullanılması daha avantajlıdır. Büyük türbinler, küçük türbinlere göre genellikle daha düşük dönme hızına sahiptirler ve hızlı dönen cisimlerin gözde neden olduğu olumsuz etkiyi yapmazlar.

4.3. Rüzgâr Türbinlerinin Yerleşimi

Rüzgâr tarlalarındaki her bir türbin rüzgârın hızını azaltır. Bu sebeple türbinler hâkim rüzgâr yönüne göre yerleştirilmeliler. Genel olarak rüzgar tarlalarında türbinler arası uzaklık hakim rüzgar yönünde ise 5-9 rotor çapı, bu yöne dikse 3-5 rotor çapı kadar bir uzaklığa yerleştirilmeliler. Var olan park etki sebebiyle rüzgâr tarlalarında %5 lik bir enerji kaybı olur. Türbine gelen rüzgar, türbinden çıktıktan sonra arka kısımda uzun bir aralıktaki türbülans oluşturur. Bu da ikinci sırada yerleştirilen türbinlerde kuyruk yeli etkisi yapar. Bunu önlemek ikinci sıradaki türbinler birinci sıradakilerden daha uzağa, yaklaşık 3 rotor, kurulmalıdır (Yerebakan, 2001). Genellikle, aşağıdaki şekildeki gibi yerleştirilirler



Şekil 4.2. Rüzgar türbinlerinin yerleşimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir oranını sağlayan fosil yakıtların yakın ve orta gelecekte tükenecek olması ve maliyetinin sürekli yükseliyor olması gerçeği, ülkeleri enerji kaynaklarını çeşitlendirmeye ve mevcut kaynaklarını da daha verimli kullanmaya zorlamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, kendisini dünya var oldukça yenileyen, yani tükenmeyen enerji kaynaklarıdır. Gelişen sanayi, nüfus artışı, sınırlı olan doğal kaynakların zıyan edilmeden ve zarar verilmeden kullanımı; insanoğlundun gündeminde artık en üst sıraları işgal eder duruma gelmiştir. Özellikle medeniyetlerin oluşmasını sağlayan su, yiyecek, enerji gibi doğal ve sınırlı kaynakların etkin ve temiz bir şekilde kullanılması çok önemli bir yer tutmaya başlamıştır.

Bugünkü enerji kullanım biçiminin devam etmesi durumunda, atmosferdeki karbondioksit gazı miktarı, 2030 yılında ikiye katlanarak; atmosfer sıcaklığının 2,5 0 C, deniz seviyesinin ise yaklaşık 18 cm artmasına neden olacaktır. Bu da, yiyecek sıkıntısının doğması ve kıyılarda yaşayan binlerce insanın göç etmesi anlamına gelmektedir. İşte bütün bu sorunlar, çevre dostu yenilenebilir enerjinin özellikle rüzgâr enerjisinin önünü açmıştır.

Ülke insanların bilinçlendirilmesi amacıyla, üretilecek rüzgâr enerjisinin insanlığın yaşamına nasıl direkt ve yararlı katkısı olduğu topluma anlatılmalı, bu anlamdaki toplumsal bilinç yükseltilerek, toplumun bir baskı unsuru olabilme yeteneği harekete geçirilmelidir. Devletin rüzgâr enerjisi santrallerini desteklemesi durumunda oluşacak bu yeni sektörde, yeni iş imkânları doğacak, işçilik ve nakliye avantajları sebebiyle Türkiye ekonomisine yeni bir ihraç ürünü katılacaktır. Bu durumda ekonomideki dinamik engellerin ne kadar büyük bir katma değer oluşturacağını da göz ardı etmemek gerekir. Ayrıca milli kaynaklara dayanan bu enerji türüyle sektörün dışa bağımlılığı da tümüyle ortadan kaldırılabilir.

Kısa vadede Türkiye genelinde elektrik enerjisinin götürülemediği veya götürülmesinin ekonomik olmadığı küçük yerleşim birimlerindeki enerji taleplerinin karşılanmasında rüzgâr enerjisinden yararlanılması, ülkemiz için önemlidir. Bunun için

rüzgâr enerjisi ile elektrik üreten sistemlerin, mevcut üretim teknolojilerinin ülkemize transfer edilerek, teşvik edilmesi ve gelişmelerin izlenmesi yararlı olacaktır.

Orta ve uzun vadede ise, ulusal elektrik şebekesini besleyebilecek güçlü sistemlerin ülke genelinde, tesis edilebileceği yerlerin etüdü ve teknolojilerin ülkemize transferi açısından gerekli hazırlıkların ve yapısal düzenlemelerin şimdiden yapılması uygun olacaktır. Tarıma dayalı bölgelerde rüzgâr enerjisinin elektrik üretmek dışında kalan uygulamalarından (su pompalama v.b.) yararlanma yoluna gidilmelidir. Rüzgâr enerjisi konusunda çalışmak ve bu sistemleri kullanmak isteyen kurum ve kuruluşlar özendirilmeli ve teşvik edilmelidir. Ayrıca yerli türbin üretimi üzerinde de durulmalı, bu amaçla yerli sanayinin Avrupa'daki türbin üreticileri ile işbirliği olanakları araştırılmalıdır

Unutulmamalıdır ki, kendi ulusal kaynaklarını teknolojik olarak daha fazla kullanabilen ülkeler gelecekte daha etkin konumlarda olacaklardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından, özellikle rüzgâr enerjisinden faydalanma konusu da, bu etkin konuma gelmek için gereken parametrelerin başında gelecektir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2009. Rüzgâr Enerjisinin çevreye etkisi. [http://www. ruzgarenerjisibirligi.org.tr/yayinlar/brosur/Neden-Ruzgar-Enerjisi-Tureb.pdf](http://www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr/yayinlar/brosur/Neden-Ruzgar-Enerjisi-Tureb.pdf)
- Anonim, 2008. Rüzgar Enerjisi Sektör Raporu <http://www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr/guncel/Rapor-01-09-2008.pdf>
- Anonim, 2009. Türk Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası.Genel Müdürlüğü, Elektrik İşleri Etüt ve Kalkınma İdaresi <http://repa.eie.gov.tr/>
- Anonim, 2008. “**Ekonomik Forum Dergisi**” TOBB Yayın Haziran 2008, 42 - 44 s, Ankara
- Anonim,2008.Rüzgâr Enerjisi Sektör Raporu <http://www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr/guncel/Rapor-01-09-2008.pdf>
- Anonim, 2008. Dünyada Rüzgâr Enerjisi Durumu. [http://www.eie.gov.tr/ turkce/ ruzgar/dunya_RES.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/dunya_RES.html)
- Anonymous, 2009. [http://www. wwindea.org /home /images /stories /world winden ergyreport 2008 _s.pdf](http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwinden_ergyreport2008_s.pdf)
- Anonymous, 2009. [http://www.enercon.de/ www/en / broschueren.nsf/ vwwebAnzeige/ ef467f8ae23f96d4c12571940023e1bf/\\$file/enercon_technology+service_eng.pdf](http://www.enercon.de/www/en/broschueren.nsf/vwwebAnzeige/ef467f8ae23f96d4c12571940023e1bf/$file/enercon_technology+service_eng.pdf)
- Anonymous,2009.http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/wind_energy/offshore_mr_final_public_report.pdf
- Altuntasoglu, Z. T.,1997. "Wind Energy Potential of Some Sites in Turkey", Wind
- Ataseven M.S, 2006. “**Senkron Rüzgâr Türbinleri Ve Kontrol Sistemleri**”
- Bergey. B., 1997. “**Wind Energy History**”. Windpower.com, USA Energy Investment in Turkey, Ankara, 1997.
- Golding, E. W.,1955. "The Generation of Electricity by Wind Power", Pitman Press, London,
- Karadeli, S., 2001. “**Rüzgar Enerjisi**”, Temiz Enerji Vakfı.
- Samsun B., 2004. "Türkiye'deki Rüzgar Gücü Potansiyeline Göre Türbin Güçlerinin Saptanması ve Tasarımı", İTÜ Yüksek Lisans Tezi, 1-67, İstanbul
- Yerebakan, M., 2001. “**Ruzgar Enerjisi**”, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.

Walker, J. F., Jenkins, N., 1997. “**Wind Energy Tecnology**”, John Willey & Sons,England,

Fujisava, N., Shirai, H.,1987. “**Experimental Investigation on the Unsteady Flow Field Around a Savonius Rotor at the Maximum Power Performance**”, Vol.11, Tokyo

Gipe P., 2003. “**Wind Energy Basics**” Chelsea Gren Publishing Company, 125-146

Patel R.M., 1999. “**Wind and Solar Power Systems**” CRC Pres, 35-79

Cotrell, J., 2002. “**The Mechanical Design, Analysis, and Testing of A Two-Bladed Wind Turbine Hub**”, National Renewable Energy Laboratory.

Kızıltuğ, M., **Wind Energy**, The Graduation Thesis at the technical University of İstanbul, Turkey, 2002, pp. 1-70, İstanbul, Turkey

TEŞEKKÜR

Fosil yakıtların doğada rezervinin sınırlı oluşu, her geçen gün daha da artan maliyeti ve çevreye zararları tüm dünyada alternatif enerji kaynaklarını özellikle rüzgâr enerjisini geleceğin en önemli enerji kaynaklarından biri yapmıştır. Bu enerji kaynağının kullanımıyla ilgili yapılacak bütün çalışmalar son derece önemlidir. Bu nedenle tarafımdan "Rüzgâr Türbinleri ve Kontrol Sistemleri" başlıklı bu çalışma yapılmıştır.

Yüksek Lisans tez konumun belirlenmesinde ve çalışmalarımın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, değerli fikir ve katkıları ile bu çalışmaya ışık tutan ve yönlendiren danışman hocam Yrd.Doç.Dr.Yıldız KOÇ'a, maddi manevi her konuda desteğini esirgemeyen aileme, çalışmalarımda yine desteğini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Tunceli' de doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Mersinde tamamladım. 1997 yılında girdiğim Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi' nden 2004 yılında, Makine Mühendisi ünvanıyla mezun oldum. 2001 Yılında, bir kamu kuruluşunda memur olarak göreve başladım. 2006 yılında, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başladım. Halen bir kamu kuruluşunda görev yapmaktayım.