

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KONTROL
SİSTEMLERİNİN ETÜDÜ**

Mak. Müh. Oktay SÖYLEMEZ

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programına
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTIMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ÖNSÖZ.....	xv
ÖZET.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1 GİRİŞ.....	1
2 RÜZGAR ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE RÜZGAR TANIMLARI.....	3
2.1 Rüzgarın Kaynağı.....	3
2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	3
2.2.1 Eski Zamanlar.....	3
2.2.2 Yel Değişimini Teknolojisinin Gelişimi.....	9
2.2.3 Yakın Geçmişe Ait Kilometre Taşları.....	10
2.3 Rüzgar Türleri.....	15
2.3.1 Küresel Rüzgarlar.....	15
2.3.2 Yerel Rüzgarlar.....	15
2.4 Rüzgara Özgü Bazı Tanımlar.....	16
3 RÜZGAR ENERJİSİNİN KULLANIMI.....	18
3.1 Rüzgar Enerjisinin Kullanıldığı Alanlar.....	18
3.1.1 Elektrik Üretimi Uygulamaları.....	18
3.1.2 Su Pompası Uygulamaları.....	19
3.1.3 Isıl Enerji Uygulamaları.....	20
3.2 Rüzgar Enerjisinin Avantajları, Diğer Enerji Türleriyle Kıyaslanması.....	21
3.2.1 Rüzgar Enerjisinin Avantajları.....	21
3.2.2 Rüzgar Enerjinin Dezavantajları.....	22
3.2.3 Rüzgar Enerjisiyle Diğer Enerji Türlerinin Karşılaştırılması.....	23
3.3 Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinin Durumu.....	25
4 RÜZGAR POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ VE RÜZGARDAN İŞ ELDE ETMEK.....	32

4.1	Rüzgar Verilerinin İstatistiksel Analizi.....	32
4.2	Rüzgar Potansiyelinin Yüksek Olduğu Bölgelerin Saptanması.....	34
4.3	Rüzgar Üzerinde Etkili Mekanizmalar.....	40
4.3.1	Rüzgarın Temel Oluşum Mekanizması.....	40
4.4	Rüzgar Enerjisi Formülü.....	41
4.5	Türkiyede Yapılmış Potansiyel Belirleme Uygulaması.....	43
5	RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN BİLEŞENLERİ VE SANTRALİN ŞEBEKEYE BAĞLANMASI	46
5.1	Rüzgar Türbinleri ve Bileşenleri.....	46
5.1.1	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	46
5.1.2	Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	54
5.1.3	Bazı Rüzgar Türbini Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	58
5.2	Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Bağlanması.....	59
5.2.1	Şebeke Bağlantısı.....	60
5.2.2	Frekans Çevirici Sistemler.....	60
5.3	Enerjinin Depolanması.....	62
6.	RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ	63
6.1	Rüzgar Türbinlerindeki Kontrol Sistem Tipleri.....	64
6.2	Rüzgar Türbinlerinin Genel Kontrol Sistemleri.....	65
6.2.1	Temel Türbin Modeli.....	65
6.2.2	Kontrol Sistemi Bileşenleri.....	67
6.2.2.1	Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Edilebilir Prosesler.....	67
6.2.2.2	Rüzgar Türbini Sensörleri.....	67
6.2.2.3	Rüzgar Türbini Kontrolörleri.....	70
6.2.2.4	Rüzgar Türbinlerinde Güç Yükselticileri.....	70
6.2.2.5	Rüzgar Türbini Aktivatörleri.....	70
6.2.3	Türbin Proseslerinin Kontrolü.....	71
6.2.3.1	Aerodinamik Tork Kontrolü.....	71
6.2.3.2	Jeneratör Tork Kontrolü.....	72
6.2.3.3	Fren Tork Kontrolü.....	74
6.2.3.4	Türbin Çalışma Hızları Kontrolü ve Sabit Hız Kontrolleri.....	74
6.2.3.4.1	Durdurma Regülatiyonlu Türbinler.....	75
6.2.3.4.2	İki Hızlı Durdurma Regülatiyonlu Türbinler.....	75
6.2.3.4.3	Aktif Kanat açısı değişimi Regülatiyonlu Türbinler.....	76
6.2.3.5	Türbin Çalışma Hızları Kontrolü ve Değişken Hız Kontrolleri.....	77
6.2.3.5.1	Durdurma Regülatiyonlu Türbinler.....	77
6.2.3.5.2	Aktif Kanat açısı değişimi Regülatiyonlu Türbinler.....	78
6.2.3.5.3	Düşük Aralıklı Değişken Hızlı Türbinler.....	79
6.2.3.5.4	Pasif Kanat açısı değişimi Regülatiyonlu Türbinler.....	79
6.2.3.5.5	Aktif Durdurma.....	79
6.2.3.5.6	Combistall Yöntemi.....	80
6.2.3.5.7	Soft Durdurma Kontrolü.....	81
6.2.3.6	Sapma Kontrolü.....	83

6.2.4	Rotor Kontrolleri.....	84
6.3	Yönetmel Kontrolle Bakış.....	90
6.3.1	Yönetmel Kontrol.....	90
6.3.2	Operasyon Durumları.....	91
6.3.2.1	Sistem Kontrolü ve Başlama.....	91
6.3.2.2	Çalışmaya Hazır(stasyonel).....	92
6.3.2.3	İlk Hareket ve Frenin Serbest Bırakılması.....	92
6.3.2.4	Şebekeye Bağlanma.....	92
6.3.2.5	Güç Üretimi(stasyonel).....	93
6.3.2.6	Şebekeden Ayrılma.....	93
6.3.2.7	Boşta Çalışma(stasyonel).....	93
6.3.2.8	Kapanma.....	93
6.3.2.9	Acil Durumda Kapanma.....	94
6.3.3	Hatanın Teşhisi.....	94
6.3.4	Yönetmel Kontrol Sisteminin Uygulanması.....	94
6.3.4.1	Donanım Mantık Kontrol Sistemi.....	95
6.3.4.2	Elektiriksel Mantık Kontrol Devreleri.....	97
6.3.4.3	Bilgisayarlı Kontrol Sistemleri.....	98
6.3.5	Güvenli Hata Backup Sistemleri.....	101
6.4	Dinamik Kontrol Teorisi ve Uygulanması.....	102
6.4.1	Dinamik Kontrolün Amacı.....	102
6.4.2	Dinamik Kontrol Sistemi Tasarımı.....	103
6.4.2.1	Klasik Kontrol Sistemi Tasarımı Uygulanması.....	103
6.4.2.2	Diğer Kontrol Tasarımı Yaklaşımları.....	107
6.4.2.2.1	Uyarlanabilir Kontrol.....	107
6.4.2.2.2	Optimal Kontrol.....	110
6.4.2.2.3	Arama Algoritmaları.....	112
6.4.3	Rüzgar Türbini Tasarımında Kontrol Açısından Oluşan Problemler.....	112
6.4.3.1	Optimum Uç Hız Oranı Kontrolü İle İlgili Durumlar.....	113
6.4.3.2	Değişken Çalışma Hız Modları Arasındaki Geçişler.....	116
6.4.3.3	Rüzgar Türbini Yükleri ve Dış Etkiler.....	118
6.4.4	Lineer ve Non-Linear Rüzgar Türbin Modellerinin Kullanımıyla Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Sistematik Kontrolör Dizayını.....	119
6.4.5	Dinamik Kontrol Sisteminin Uygulanması.....	121
6.4.5.1	Mekanik Kontrol Sistemleri.....	121
6.4.5.2	Analog Elektiriksel Devreli Kontrol Sistemleri.....	121
6.4.5.3	Dijital Kontrol Sistemleri.....	124
6.5	Rüzgar Türbini Kontrol Sistemlerine Ait Gerçek Örnekler Ve Farklı Uygulamalar.....	125
6.5.1	10k W Bergey Excel.....	125
6.5.2	Lagerwey L W 18/80.....	127
6.5.3	ESL-80.....	127
6.5.4	Vestas V47-660/200 kW.....	128
6.5.5	Enron Wind 750.....	129
6.5.6	TAPP1 Rüzgar Parkında Uygulanan İleri Besleme Kontrolü.....	130

7	RÜZGAR TÜRBİNİYLE OLUŞTURULAN HİBRİT SİSTEMLER.....	132
7.1	Rüzgar Türbini-Diesel Motoru Hibrit Sistemleri.....	132
7.2	Rüzgar Türbini Fotovoltaik Hibrit Sistemler.....	137
7.3	Yakıt Hücreleri Kullanımı.....	139
8	RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GELECEĞİ.....	143
8.1	Rüzgarın Geleceği.....	143
8.1.1	Kategori A.....	145
8.1.2	Kategori B.....	145
8.1.3	Kategori C.....	146
8.1.4	Kategori D.....	146
8.2	Gelişen Pazarlar.....	147
8.3	2020 Yılı Rüzgar Durumu Hakkında Bir Öngörü.....	148
9	SONUÇLAR.....	149
	KAYNAKLAR.....	151
	ÖZGEÇMİŞ.....	154

SİMGE LİSTESİ

$P_{w,R}$	Weibull veya Rayleigh dağılımı ile hesaplanan ortalama güç yoğunluğu
P_0	Referans ortalama enerji yoğunluğudur
k	Weibull yöntemi şekil katsayısı
c	Weibull yöntemi büyüklük katsayısı
z_0	Pürüzlülük tanımı yüksekliği
K_e	Kinetik enerji
ρ	Hava yoğunluğu
A	Rüzgar esme yönüne dik alan
W / m^2	Weibull sayısının birim alana dağılımı
V_H	Rüzgar hızı
f	Coriolis parametresi
m	Kinetik enerji formülünde cismin kütlesi
V	Kinetik enerji formülünde cismin hızı
H	Cisim kütlesi ifadesinde hacim
t	Rüzgar esme süresi
E	Rüzgarın enerjisi
E_B	Rüzgarın bir noktadaki enerjisi
h_1	Rüzgar şiddetinin ölçüldüğü yükseklik
h_2	Rüzgar şiddetinin bulunmak istendiği yükseklik
V_1	h_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı
V_2	h_2 yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı
a	Pürüzlülük katsayısıdır
N	Ölçüm adedi
C_D	Kaldırma katsayısı
C_L	Sürtükleme katsayısı
D	Sürtükleme Kuvveti
ρ	Hava Yoğunluğu[kg/m^3]
V	Hava Hızı[m/s];
A_b	Kanat Alanı[m^2];
L	Kaldırma Kuvveti
x	Kanat eksenî uzunluğu
θ_c	Koniklik açısı
R	Rotor yarıçapı
A_r	Rotorun taradığı yüzey
f_2	Makine frekansı
f_1	Şebeke frekansı
C_p	Güç sabiti
C_{pmax}	Maksimum güç sabiti
P_{Aero}	Rüzgar türbini gücü
P_{gen}	Jeneratör gücü
rpm_A	Rotor ve jeneratör için hız

rpm_c	Rotor ve jeneratör için hız
$Q(0)$	Bulanık mantık başlangıç parametreleri
$Q(k)$	Parametre kontrol seti
$e_y(k)$	Kontrol hatası
$y(k)$	Türbinden gelen sinyal
$r(k)$	Türbin sinyalini ifade eden referans sinyal
$\hat{e}_y(k)$	Tahmin temelli kontrol hatası
k	Tahmin edilen çıktı
\hat{a}_k	Tahmin temel yöntemi sabiti
\hat{b}_k	Tahmin temel yöntemi sabiti
k	Tahmin temeli zamanı
$k+1$	Tahmin temeli zamanı
$\hat{y}(k+1)$	Tahmin sinyali
β	Kanat açısı
Ω_r	Türbin rotasyonel hızı
T_r	Aerodinamik tork
λ	Rotor uç hız oranı
Ω_g	Jeneratör rotasyonel hızı
c_1, c_2	Jeneratör tork ifadesi sabitleri
μ	Jeneratör torku kontrol girdisi
P_r	Aerodinamik güç
J_r	Rotor ataleti
Ω	Rotor hızı değişimleri
Q_{ref}	İstenilen rotor torku
λ_{opt}	Optimum uç hız oranı
P_{el}	Elektriksel güç
η	Sürtücü ünitesi verimi
p	Jeneratör kutup sayısı
n	Dişli kutusu diş oranı
P	Rotor çıkış gücündeki değişim
ω_T	Açısal mil hızı
J_T	Türbin ataleti
Q_A	Hava dinamiği torku
Q_B	Jeneratör milini döndürmek için gerekli mekanik tork
C_q	Tork katsayısı
ϕ	Non-linear hız oranı
$\Delta\omega_T$	Türbin hızı referans hız farkı
K_p	Oransal kazanç
K_I/s	İntegral kazanç
sK_D	Türevsel kazanç
$g(t)$	PID kontrolör kontrol çıkışı

R_p	Elektriksel direnç
C	Kapasitans
$e(t)$	Kontrolöre gelen hata sinyali
J	Tüm dönen kütlelerin atalet momenti
T_{gen}	Jeneratör torku
T_{load}	Yükler tarafından absorbe edilen tork
P_{load}	Yükler tarafından absorbe edilen güç
ω_{gen}	Jeneratör rotasyonel hızı
n_f	Yakıt hücresi hücre sayısı
V_{ed}	Bir yakıt hücresi için deşarj-sonu voltajı
V_{oc}	Bir tam yüklü yakıt hücresi için açık devre voltajı
V_{bat}	Batarya voltajı
CO_2	Karbondiyoksit

KISALTIMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
kW	Kilo Watt
kWh	Kilo Watt saat
MW	Mega Watt
GW	Giga Watt
TW	Tera Watt
\$	Dolar
RGI	Rüzgar gözlem istasyonu
N/A	Mevcut değil
m	metre
km	Kilometre
s	saniye
ms	milisaniye
EU	Euro
NACA	National Advisory Comitee for Aeronautics
Hz.	Hertz
YERT	Yatay eksenli rüzgar türbinleri
DET	Dikey eksenli rüzgar türbinleri
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
DCIM	Rüzgar türbini tarafından sürülen çift kafes asenkron makine
DSP	Sayısal işaret işlemci
IGBT	Anahtarlama elemanı
PWM	Pulse Width Modulation
rpm	Revolution Per Minute
ST	Start
COMP	Compressor
GEN	Generator
I/O	Input/Output
CPU	Central Process Unit
IC	Industrial Computer
WPMS	Wind Power Management System
LSA	Least Square Algorithm
PID	Proportional-Integral-Derivational
A/D	Analog/Digital
PC	Personal Computer
V	Volt
A	Amper
PV	Fotovoltaik
WT	Wind Turbine
GB	Gearbox
IG	Induction Generator
SSC	Stator Side Convertor
SS	Stator Side
CCU	Central Control Unit
BPM	Battery Power Management

MPP
PEM

Maximum Power Point Trace
Proton Exchange Membrane

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Neh'te bulunan Pers tipi yeldegirmeni.....	4
Şekil 2.2	Neh'teki kazılarda bulunanlar.....	5
Şekil 2.3	Dikey eksenli Çin yeldegirmeni.....	6
Şekil 2.4	Vitruvius dişli mekanizması.....	6
Şekil 2.5	Yeldegirmeni bileşenleri.....	7
Şekil 2.6	Yeldegirmenindeki ana elemanlar.....	7
Şekil 2.7	Tipik degirmenin aktarma elemanları.....	8
Şekil 2.8	Fren sistemi diyagramı.....	8
Şekil 2.9	Gelişmiş bir İngiliz degirmen örneği.....	9
Şekil 2.10	Dünyanın İlk Rüzgar Santrali Kabul Edilen Tarhi Brush Türbini.....	11
Şekil 2.11	Hütter Türbini.....	12
Şekil 2.12	Allgaier Türbini.....	12
Şekil 2.13	Amerika'daki 2.5 ve 4 MW'lık Türbinler.....	13
Şekil 2.14	Almanya'daki 1.2 ve3 MW'lık Türbinler.....	13
Şekil 2.15	Kaliforniya Rüzgar Çiftliğindeki 100 kW'lık Türbinler.....	14
Şekil 2.16	Kaliforniya Rüzgar Çiftliğindeki 250 kW'lık Türbinler.....	14
Şekil 3.1	Danimarka'daki denizüstü rüzgar çiftlikleri.....	19
Şekil 3.2	Rüzgar pompasının anatomisi.....	21
Şekil 3.3	Rüzgar türbinin ses etkisi.....	23
Şekil 3.4	Rüzgar türbinlerinin elektromanyetik dalga kırma etkisi.....	23
Şekil 3.5	Kümülatif rüzgar enerjisi kurulu güçleri.....	25
Şekil 3.6	Avrupa ve ABD ile diğer ülkelerdeki kurulu güç paylaşımı.....	25
Şekil 3.7	Kıtalarda kurulu gücün paylaşımı.....	29
Şekil 4.1	Weibull ve Rayleigh modellerindeki hata yüzdeleri.....	32
Şekil 4.2	Pürtüzlülük sınıfı 0 olan arazi.....	33
Şekil 4.3	Pürtüzlülük sınıfı 1 olan arazi.....	33
Şekil 4.4	Pürtüzlülük sınıfı 2 olan arazi.....	34
Şekil 4.5	Pürtüzlülük sınıfı 3 olan arazi.....	34
Şekil 4.6	Türkiye rüzgar atlası.....	36
Şekil 4.7	Rüzgar hızı ölçüm sistemi.....	37
Şekil 4.8	Türkiye rüzgar gözlem istasyonları.....	37
Şekil 4.9	Avrupa,Amerika,Kanada ve Avustralya Rüzgar Atlası.....	39
Şekil 4.10	Dünya Rüzgar Atlası.....	39
Şekil 4.11	Tank mekanizması.....	40
Şekil 4.12	Basınç gradyeni kuvveti oluşumu.....	41
Şekil 5.1	YERT prensipleri.....	46
Şekil 5.2	NACA 63 profil örnekleri.....	47
Şekil 5.3	Kanat adelerine göre türbinler.....	48
Şekil 5.4	Kanat Ağırlığı-Rotor Çapı İlişkisi.....	48
Şekil 5.5	Farklı koniklik açılarında kütle ve sertlik.....	49
Şekil 5.6	Rotor çapı-taranan alan ilişkisi.....	50
Şekil 5.7	Küçük(a) ve orta ölçekli(b) türbinler.....	51
Şekil 5.8	Büyük türbinler için biçimlenme.....	52
Şekil 5.9	Dişli Kutusu.....	52
Şekil 5.10	Rüzgar türbini jeneratörü.....	53
Şekil 5.11	Kule ve kablolar.....	54
Şekil 5.12	Darrieus türbini.....	55
Şekil 5.13	Modern DET parçaları.....	57

Şekil 5.14	Güç konvertörlerinde elektrik enerjisi dönüşümü.....	61
Şekil 5.15	Doğrudan frekans çevirici.....	61
Şekil 5.16	Faz üzerinde gerilimin durumu.....	62
Şekil 6.1	Kapasitör ünitesi.....	63
Şekil 6.2	Kontrol sistem bileşenleri.....	64
Şekil 6.3	Basit türbin modeli.....	66
Şekil 6.4	Kontrol sistem bileşenleri.....	67
Şekil 6.5	Rüzgar yönü ve hızı ölçüm sensör sistemi.....	68
Şekil 6.6	Sıcaklık sensörleri.....	69
Şekil 6.7	Anemometre.....	69
Şekil 6.8	Rüzgar sensörü.....	69
Şekil 6.9	Hücum açısı.....	71
Şekil 6.10	Aerodinamik etki mekanizmaları.....	72
Şekil 6.11	Sistemin prensip şeması.....	73
Şekil 6.12	Rüzgar türbini kontrol stratejileri.....	75
Şekil 6.13	Rüzgar türbini kontrol stratejileri.....	76
Şekil 6.14	Aktif durdurma ve aktif kanat açısı kontrolü için kanat dönüş yönleri.....	76
Şekil 6.15	Kanat açısı kontrolü mekanizması ve rotor göbeği.....	77
Şekil 6.16	Çalışma modları.....	78
Şekil 6.17	Aktif durdurma ve aktif kanat açısı kontrolü kontrollü türbinlerde güç kontrolü için gerekli kanat döndürme açıları.....	80
Şekil 6.18	Combistall ve pasif durdurma.....	81
Şekil 6.19	Sistemin şeması.....	82
Şekil 6.20	Kontrol Stratejisi.....	83
Şekil 6.21	Sapma mekanizması.....	84
Şekil 6.22	Ön yüzey alanının azaltılması.....	85
Şekil 6.23	Halladay türbini.....	85
Şekil 6.24	Yatay Yelkenleme.....	86
Şekil 6.25	Yelkenleme uygulaması.....	86
Şekil 6.26	Dikey Yelkenleme.....	87
Şekil 6.27	Değişken rotor alanı.....	87
Şekil 6.28	Rüzgaraltı koniklik.....	88
Şekil 6.29	Değişken geometri H-rotor.....	89
Şekil 6.30	Kanat aktivasyonlu governor.....	89
Şekil 6.31	Türbin çalışma durumları.....	91
Şekil 6.32	Basamak mantık örneği.....	96
Şekil 6.33	Proglamlanabilir mantık kontrolör.....	96
Şekil 6.34	Dinamik fren kapasitörleri ve rezistörleri.....	97
Şekil 6.35	Kontrolör ve switchler.....	97
Şekil 6.36	Bulanık mantık kontrol sistemi şeması.....	98
Şekil 6.37	IC 1000 ve IC 500 kontrolör.....	99
Şekil 6.38	WP 3000 ve WP 3100 kontrolör.....	99
Şekil 6.39	IC 1000-W İklim Şartları Ölçüm Ünitesi.....	100
Şekil 6.40	WPMS sistemi.....	101
Şekil 6.41	Kontrol sistemi tasarım metodolojisi.....	103
Şekil 6.42	Örnek kanat modeli.....	104
Şekil 6.43	Örnek mekanik kısımlar modeli.....	104
Şekil 6.44	Örnek elektrikselsel kısımlar modeli.....	104
Şekil 6.45	Örnek sonuç sistem modeli.....	105
Şekil 6.46	ADAMS programı uygulaması.....	105

Şekil 6.47	Örnek kontrol sistemi modeli.....	106
Şekil 6.48	Örnek simülasyon geliştirilmesi.....	106
Şekil 6.49	Örnek sistem MATLAB-SIMULINK modeli.....	106
Şekil 6.50	Örnek sistem simülasyon sonuçları.....	107
Şekil 6.51	Uyarlanabilir kontrol sistemi blok diyagramı.....	108
Şekil 6.52	Bulanık mantık kontrol sisteminin temeli.....	109
Şekil 6.53	Tahmin temelli uyarlanabilir bulanık mantık kontrol sistemi.....	110
Şekil 6.54	Kanat açısı kontrolü açısı ve rotasyonel hızı değişebilir sistem.....	111
Şekil 6.55	C_p 'nin değişimi.....	112
Şekil 6.56	Değişken hızlı kapalı çevrim kontrol sistemi.....	117
Şekil 6.57	Jeneratör hızı-güç ilişkisi.....	118
Şekil 6.58	Non-Linear rüzgar türbini simülasyon blok diyagramı.....	120
Şekil 6.59	PID kontrolör blok diyagramı.....	121
Şekil 6.60	PID kontrolör örneği.....	122
Şekil 6.61	Data toplama sistem örneği.....	123
Şekil 6.62	LABVIEW yazılımı.....	123
Şekil 6.63	Bir A/D kartı.....	124
Şekil 6.64	Kullanılan sensörler.....	124
Şekil 6.65	Bilgisayar kontrollü sistem örneği.....	125
Şekil 6.66	Bergey Excel.....	126
Şekil 6.67	Lagerwey 18/80.....	127
Şekil 6.68	ES1-80.....	128
Şekil 6.69	Vestas V47.....	129
Şekil 6.70	Enron Wind 750i.....	130
Şekil 6.71	Jeneratördeki güç çalkantıları.....	131
Şekil 6.72	Kontrol sistemi.....	131
Şekil 6.73	Rüzgar hızı ölçüm sistemi.....	131
Şekil 7.1	Diesel motorunda yakıt tüketimi-güç ilişkisi.....	133
Şekil 7.2	Basit rüzgar-Diesel hibrit sistemi.....	134
Şekil 7.3	Şematik gösterimde Diesel-rüzgar türbini hibriti.....	136
Şekil 7.4	Dümp yük kontrolör blok diyagramı.....	136
Şekil 7.5	Rüzgar türbini/fotovoltatik hibrit sistem örneği.....	138
Şekil 7.6	Rüzgar/yakıt hücreli hibrit sistemi.....	140
Şekil 7.7	Tanımlan sistem.....	140
Şekil 7.8	Yakıt hücresi.....	141
Şekil 7.9	Hibrit sistemin değişken ve yüksek rüzgar hızlarına cevabı.....	142
Şekil 8.1	Enercon E-112 4.5 MW.....	145
Şekil 8.2	Nysted rüzgar çiftliği (Danimarka).....	146
Şekil 8.3	Enercon E48 800 kW.....	146
Şekil 8.4	Whisper H80 rüzgar türbini.....	147

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Hakim rüzgar yönleri.....	15
Çizelge 3.1	Enerji türlerinin kıyaslanması.....	24
Çizelge 3.2	Enerji türlerinin mali kıyaslanması.....	24
Çizelge 3.3	Enerji türlerinin çevresel etki kıyaslanması.....	25
Çizelge 3.4	En büyük 5 Pazar.....	26
Çizelge 3.5	Avrupa ülkelerinin rüzgar için teknik potansiyelleri.....	27
Çizelge 3.6	Dünya'daki durum(2003 Sonu)	28
Çizelge 3.7	2004 yılı sonunda Dünya'da durum.....	29
Çizelge 3.8	2004 yılında durum.....	30
Çizelge 3.9	Türkiye'de devrede olan rüzgar çiftlikleri.....	31
Çizelge 3.10	Rüzgar santrali kurulumayı bekleyen projelerden bazıları.....	31
Çizelge 4.1	Aylık rüzgar hızları raporu.....	38
Çizelge 4.2	İzmir'de 12 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızlarının saatlik esme sayıları.....	43
Çizelge 4.3	Karşılaşılacak rüzgar türbini özellikleri.....	43
Çizelge 4.4	İzmir'de 70 m yükseklikte rüzgar hızlarının saatlik esme sayıları.....	44
Çizelge 4.5	12 m yükseklikte aylık ortalama rüzgar hızlarının değişimi.....	44
Çizelge 4.6	70 m'lik kuleden elde edilen yıllık enerji miktarları.....	45
Çizelge 5.1	Kategori 1-küçük rüzgar türbinler.....	58
Çizelge 5.2	Kategori 2-orta büyüklükteki rüzgar türbinleri.....	58
Çizelge 5.3	Kategori 3-büyük rüzgar türbinleri.....	59
Çizelge 8.1	Rüzgar gücü teknolojisi, geçmişi, günümüz ve gelecek.....	143

ÖNSÖZ

Rüzgar enerjisi geleceğin en önemli enerji kaynaklarından birisidir. Bu enerji kaynağının kullanımıyla ilgili yapılacak bütün çalışmalar son derece önemlidir. Bu sebepten taraftımdan “Rüzgar Türbinlerinin Kontrol Sistemlerinin Etüdü” başlıklı bu çalışma icra edilmiştir.

Bu çalışmada bu güne kadar rüzgar türbini için kontrol amaçlı yapılmış birçok sistem incelenmiş ve tanıtlımaya çalışılmıştır. Rüzgar türbinlerinin en önemli sistemi olan kontrol sistemi gerçekten karmaşık ve bir o kadar da önemlidir. Bu sebepten bu tezi yapmama yardımcı olan ve rüzgar türbinlerini bana tanıtan çok saygıdeğer hocam sayın Doç. Dr. Şükri Bekdemir’e teşekkürlerimi sunarım.

Umarım bu tez rüzgar türbinleri teknolojisi için yapılacak diğer birçok çalışma içinde yardımcı bir kaynak olma niteliğini kazanır.

ÖZET

Kontrol; rüzgar türbinlerinde enerji eldesini arttıran ve dinamik yükleri azaltan bir etkindir. 1970 ve 1980'lerde rüzgar türbinlerinde güç ve hız regülasyonu yapan klasik kontrol sistemleri bulunmaktaydı. Kullanılan metodlar da başarılı olmaktan uzaktaydılar. Bu sistemlerde büyük ihtimalle var olan stabilize düşük-sönümlü modlar, yüksek dinamik yüklerle ve yorulma hatalarına sebep olmaktaydı. Modern türbinler artık daha büyük ebatlı, daha yüksek kuleler üzerine inşa edilmiş ve önceki tiplere oranla daha dinamik yüklerle 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.

Bu tez çalışmasında kontrol sistemlerinde uygulanan tüm yaklaşımları tanıtmak, birbirlerine göre farklılıklarını ön plana çıkartmak amaçlanmıştır. Bunun dışında rüzgar türbinin diğer bileşenlerini de tanıtmak gerektiği unutulmamış ve bunlara da yer verilmiştir. Ayrıca rüzgar türbinin farklı kullanılanlarına ve değişik uygulamalara da yer verilmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kontrol, rüzgar türbinleri ve kontrol, rüzgar türbinlerinden enerji eldesi

ABSTRACT

Control is the most important aspect in wind turbines which increases energy output and reduces dynamic loads. In 70's and 80's classic control methods used in wind turbines. These methods applied power and speed regulation in the name of control and they had not been successful. These systems often had bandwidths large enough to destabilize low-damped flexible modes leading to high dynamic load fatigue failures. Modern wind turbines are larger, mounted on taller towers and more dynamically active. According to this, design of the control system is so important for wind turbine's future work. New advanced control approaches must account in order to reduce structural dynamic loading and achieve the 20-25 year operational life.

In this study it is aimed to introduce control system theory and methods. It is also objected wind turbine components and different wind turbine applications.

Keywords: Control, wind turbines and control theory, energy production by wind turbines

1. GİRİŞ

Rüzgar türbinleri henüz içten yanmalı motorların ve modern güç santrallerinin bilinmediği binlerce yıl öncesinden bu yana kullanılmaktadır. Çok önceleri insanlar rüzgarı yeldegimmedi olarak, su pompası olarak ve yelkenlerine itici güç olarak kullanmışlardır. Son 20-30 yılda rüzgar; enerji kaynağı olarak popüler bir konuma erişmiş ve günümüzün en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olmuştur.

Elektrik piyasasında rekabet edebilmek için rüzgar türbinleri, fosil kaynaklı üretim yöntemleriyle mücadele edebilecek bir maliyetle elektrik üretmelidirler. Rüzgar, doğada bedelsiz bir enerji olduğuna göre bu enerji türünde maliyet unsuru mekanik ve elektronik parçalardır. Teknolojik gelişmelere paralel olarak türbinin ilk maliyeti azalmış ve elde edilen enerji miktarı artmıştır. Bu sayede fosil yakıtlarla rekabet edebilir bir enerji türü haline gelmiştir.

Rüzgar türbini tasarımını, konstrüksiyonunun ve çalışmasını etkileyen tüm faktörler, maliyet unsuru ile denge halindedirler. Rüzgar türbinleri ilk kullanılmaya başlandıkları yıllardan bu yana büyük değişim ve evrim geçirmişlerdir. Bu evrim sonucu artık mükemmel bir şekilde elektronikleşmişlerdir. Bu sayede tam otomatik biçimde kontrol edilebilir mekanizmalar haline gelirler.

Rüzgar türbinlerinde kontrol konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde daha ziyade rüzgar türbinlerinden sıkça faydalanan ABD, Danimarka, Almanya gibi ülkelerde çalışmaların yoğunlaştığı görülür. Kontrol konusuna önem veren ülkelerin başında ABD gelir. ABD'de rüzgar türbinlerinin kontrolü konusunda yapılmış onlarca yüksek lisans tezi ve birçok doktora tezi mevcuttur. Fakat bu tezlerin hemen hemen tamamı model ve simülasyon temellidir. Yani tanıtıcı bilgileri verdikten sonra bir türbin seçilip o türbine uygun bir kontrol sistem modeli tasarlanmaya çalışılır. Bu sistem tasarlandıktan sonra gerekli denemeler bilgisayar ortamında gerçekleştirilir.

Kontrol sistemleri rüzgar türbinlerindeki en önemli kısımlardandır. Bu sebepten model-simülasyon ilişkisine dayanan ve sadece bilgisayar programlarının belli matematiksel modellerinden ibaret olan çalışmalar yetersiz kalabilmektedir.

Bu çalışmada rüzgar türbinleri kontrol sistemleri açısından ayrıntılı biçimde irdelenmiştir. Ayrıca rüzgar türbinleriyle ilgili daha birçok konuya da yer verilmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinde kontrol yöntemlerine ve bu yöntemlerin uygulanmasına ayrıntılı olarak değinilecektir.

2. RÜZGAR ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE RÜZGAR TANIMLARI

2.1 Rüzgarın Kaynağı

Yeryüzünde ihtiyaç duyulan tüm enerjinin ve doğa olaylarının temelinde güneş enerjisi yatar. Bu doğa olaylarından birisi de rüzgardır ve kaynağı güneştir. Güneşten gelen enerjinin %1-2'si kinetik enerjiye(hız enerjisi) yani rüzgar enerjisine dönüşür. Güneş toplam olarak yeryüzüne 10^{17} Watt enerji yayar.

Yeryüzünde karalar ve denizler güneşten aldıkları enerjinin sonucunda özgül ısıları arasındaki farklılık nedeniyle farklı miktarda ısımlar ve farklı ısımlara sahip olurlar. Sıcaklık dağılımı coğrafi ve çevresel koşullarla ilintilidir. Sıcaklık değişimi beraberinde basınç farklılaşmasını da getirir. Yeryüzünde oluşan sıcaklık değişiminin sebep olduğu basınç farklılıkları nedeniyle rüzgar oluşmaktadır. Yüksek basınca sahip olan bölgeden alçak basınca sahip bölgeye doğru olan hava hareketi **rüzgar** olarak adlandırılır. Yeryüzündeki hava hareketleri, yerkürenin güneş etrafındaki hareketinden ve yerküre-hava kütleleri arası hareketten etkilenir. (Karadeli, 2001)

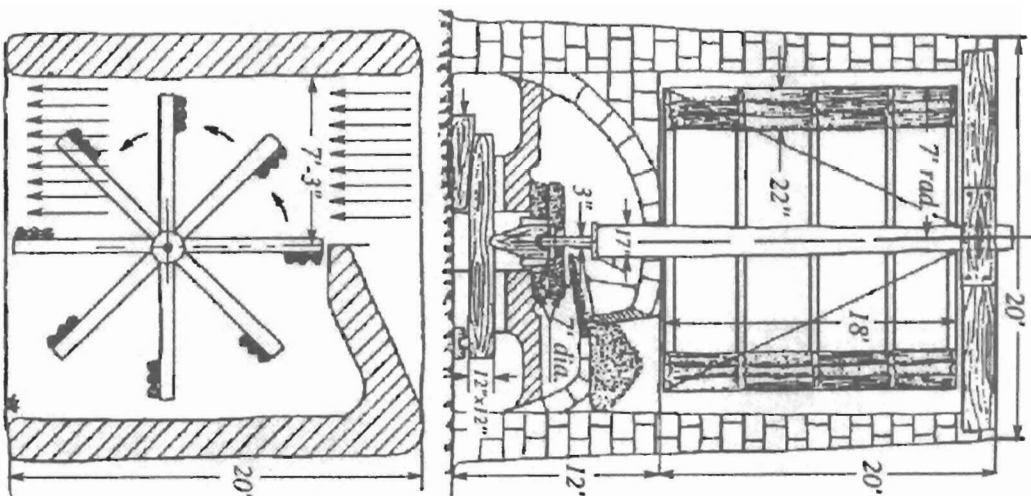
2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

2.2.1 Eski Zamanlar

Tarihte rüzgarın gücünden faydalanılmasına ait ilk kayıtlar doğu ülkelerinden gelmektedir. Hindistan, Tibet, Afganistan ve İran'da rüzgardan çok eskiden beridir faydalanıldığına ait kayıtlar bulunmuştur. Rüzgar enerjisinin ilk kullanıldığı alanlardan biri yeldeğirmenleridir. Yeldeğirmeni kullanımına ait ilk örneklerle Persler'de 10.yy boyunca raslanmaktadır. Bu yeldeğirmenleri dikey ekseni Pers yeldeğirmeni olarak kayıtlara geçmiştir. Neh kasabasında yapılan kazılarda bu tipe ait bir örnek bulunmuştur. (Şekil-2.1 ve Şekil-2.2a ve Şekil-2.2b) Bu yeldeğirmenin rotoru(dönen parçası) 5.5 m uzunluğunda ve 4.3 m çapındadır. 6.5 m'lik bir yapı boşluğu içinde yer almaktadır. Burada kalan 2.2 m'lik aralıktan kuzey yönünden esen rüzgarın geçtiği anlaşılmaktadır. Kazı yapılan bölgedeki rüzgar hızlarına bakıldığında ortalama 30 m/s'lik hızlara raslanmıştır. (Spera, 1998)

Perslerden başka rüzgardan önemli ölçüde faydalanan diğer bir millet de Çinilerdir. Bir söylentiye göre Çiniler yeldeğirmenini çok daha önce keşfetmişler ve 2000 yıldan beri

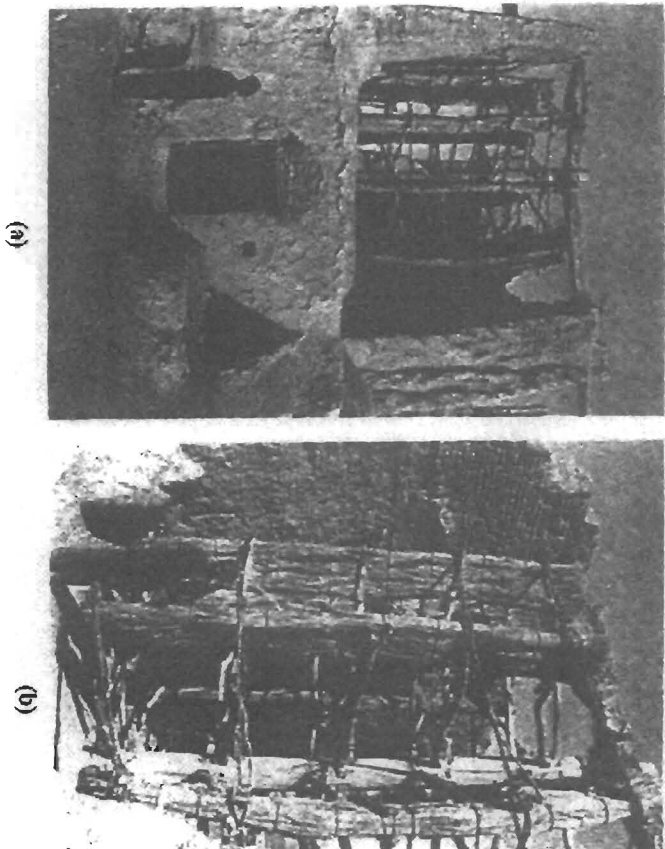
kullanmışlardır. Bu söyleni kanıtlanamamıştır. Araştırmacı Joseph Needham'a göre ilk bulgular 1219 yıllarına dayanmaktadır. (Şekil-2.3)



Şekil-2.1 Neh'te bulunan Pers tipi yeldegirmini (Spera, 1998)

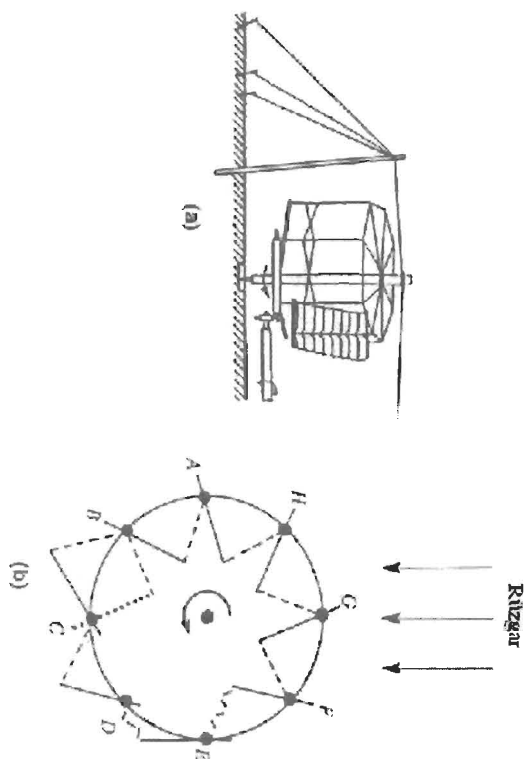
Yeldegirmini Perslerin döneminden çok sonraları Avrupa'da kullanılmaya başlanmıştır. İlk örneklere Almanya, Fransa, İngiltere ve İber Yarımadası'nda rastlanır. Bulgulara göre Avrupa'da bu aletler 1180-1190 yıllarından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Perslerin yeldegirmininden farklı olarak burada yatay eksensli yeldegirmini kullanılmıştır. Eksenin farklı olması üç adet sorunu beraberinde getirmiştir. Bunlardan ilki gücün yatay eksenden dikey eksene taşınmasıdır. Bu durum Şekil-2.4'te görülen sistemler kullanılarak çözülmüştür.

İkinci sorun değirmenin rüzgar yönünde dönebilmesidir ve bunu çözebilmek için tüm sistemin merkezdeki ağır giriş etrafında dönmesi sağlanmaktadır. Son sorun ise rotoru gereken durumlarda durdurmaktadır. Bu da Şekil-2.4'te görülen büyük dişlinin dış kenarına frenleme uygulanması ile çözülmüştür. Yatay eksenli değirmen, Perslerin kullandığı yeldeğirmenine göre daha karmaşık fakat daha verimlidir.

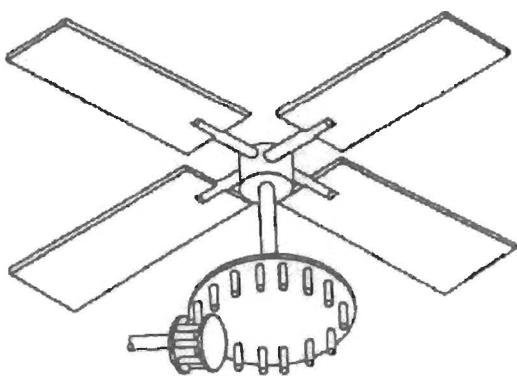


Şekil-2.2(a ve b) Neh'teki kazılarda bulunanlar (Spera, 1998)

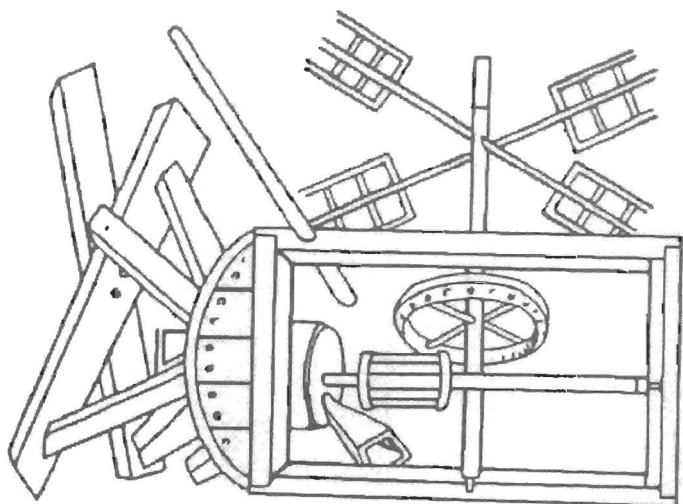
Daha sonraları yeldeğirmeni tasarımı değişime uğramıştır. Direkli yeldeğirmeni sistemi 1430 yıllarında görülmeye başlanmıştır. Direk kısmı güvenlik açısından arkada bulunup dengelemeye yardımcı olur. (Şekil-2.5) Taban kısmı Şekil-2.6'daki gibi olup 70-80 cm'lik bir kareyi kapsar. Hareket mekanizması ve fren Şekil-2.7 ve Şekil-2.8'de görülmür.



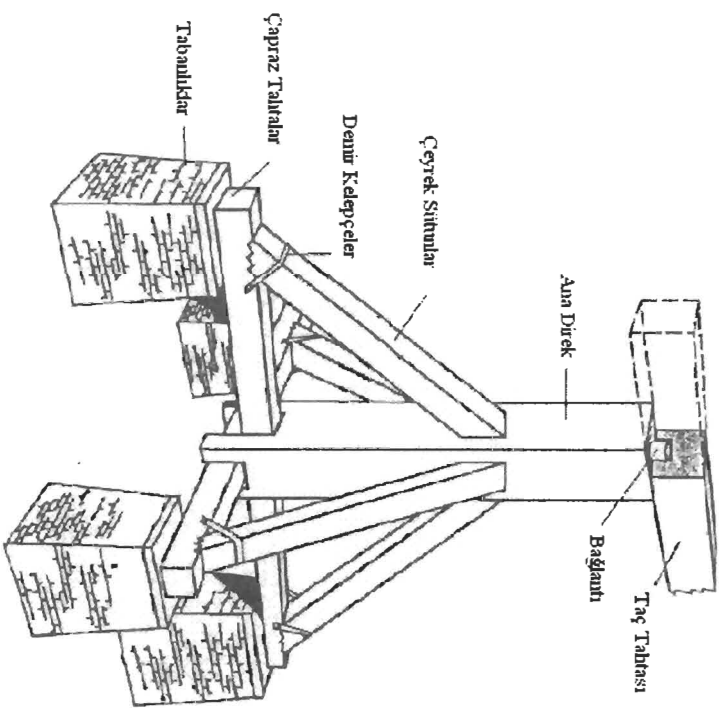
Şekil-2.3 Dikey eksenli Çin yeldegirmeni (Spera, 1998)



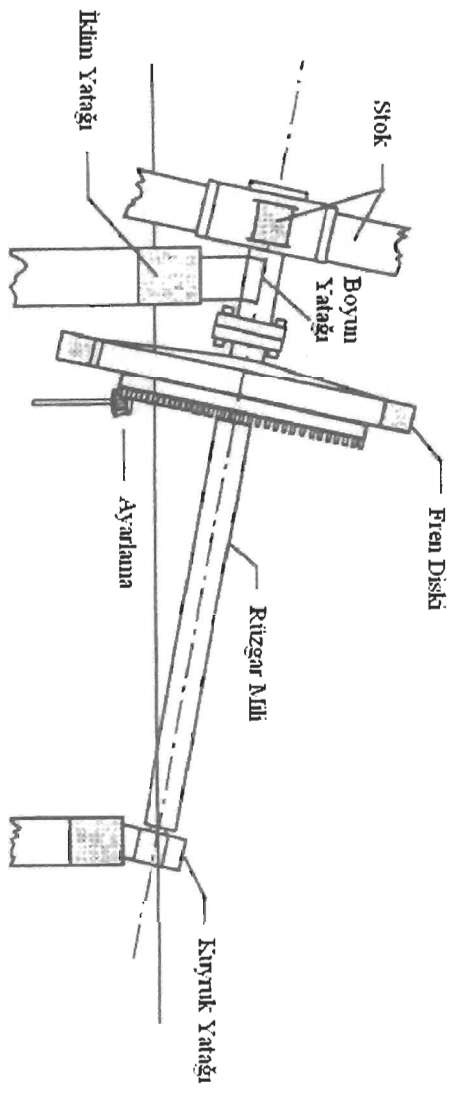
Şekil-2.4 Vitruvius dişli mekanizması (Spera, 1998)



Şekil-2.5 Yeldeğirmeni bileşenleri (Spera, 1998)

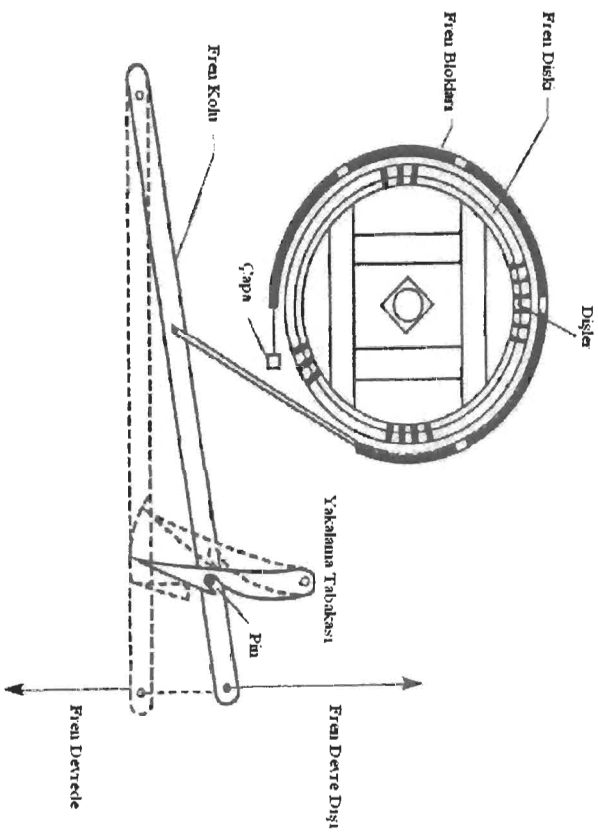


Şekil-2.6 Yeldeğirmenindeki ana elemanlar (Spera, 1998)

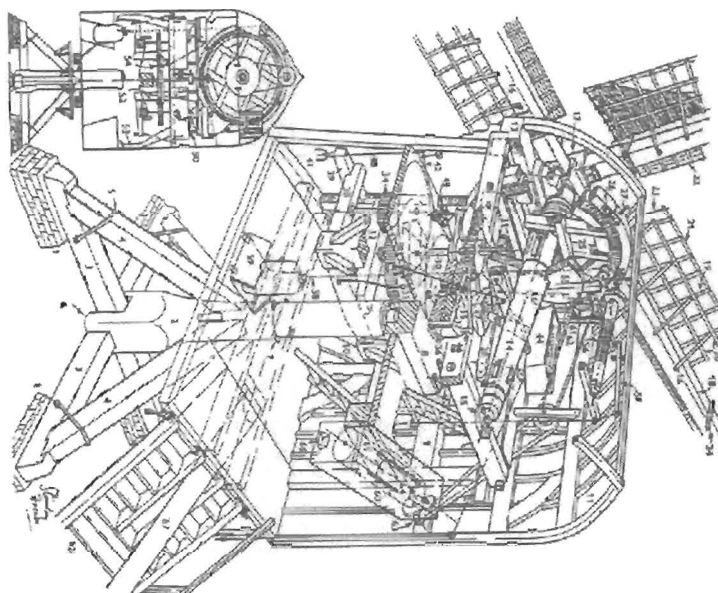


Şekil-2.7 Tipik değirmenin aktarma elemanları (Spera, 1998)

Endüstri devrimiyle büyük bir gelişme gösteren yeldeğirmenleri 19.yy'a kadar kullanımını sürdürmüştür. Şekil-2.9'da oldukça gelişmiş bir tip görülmektedir. Görüldüğü gibi 60'tan fazla farklı kısımdan oluşmuştur.



Şekil-2.8 Fren sistemi diyagramı (Spera, 1998)



Şekil-2.9 Gelişmiş bir İngiliz değirmen örneği (Spera, 1998)

2.2.2 Yeldeğirmeni Teknolojisinin Gelişimi

Tarih boyunca gelişen mekanik aletler içinde en çok gelişme gösteren araçlardan biri de yeldeğirmenidir. En önemli gelişmeleri tasarım iyileştirilmesi ve çalışma düzenlerinde olmuştur.

Yeldeğirmeninde en çok gelişim gözlenen konulardan biri de kontrol sistemlerinin gelişimidir. 12.yy'dan 17.yy'a kadar çok büyük gelişme göstermese de endüstri devrimiyle beraber üç farklı açıdan gelişim gözlenmektedir: dönme hareketinin mekanik gelişimi, frenlemenin iyileştirilmesi ve yeldeğirmenin otomatizasyonunun sağlanmasıdır. Kontrol sisteminde görülen ilk gelişme 1772'de Andrew Meikle tarafından uygulanan yaylı mekanizmadır. Tam güç ve aşırı rüzgar durumlarına hassas olan sistem yeldeğirmenine kontrol sağlar. Hareket, yayla kontrol edilmekte ve ilk ayarlar, durma pozisyonunda uygulanmaktadır. Ayarlama yapıldıktan sonra yeldeğirmeninin hızı neredeyse sabit kalır. (Spera, 1998)

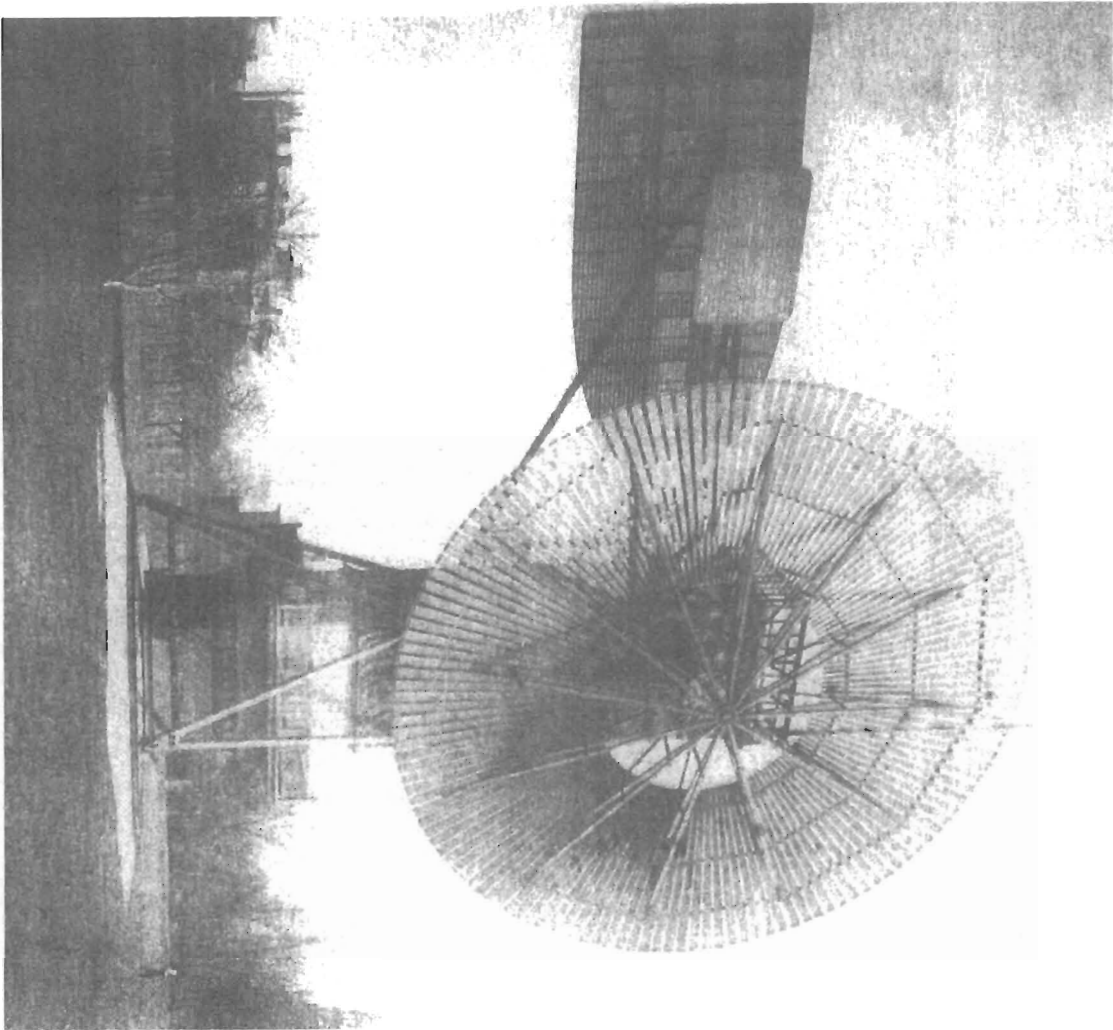
İkinci mekanizmayı Stephen Hooper 1798'de uygulamıştır. Katı yaylar yerine daha esnek bir sistem kurmuştur. Rotordeki kontrol; bir delikten geçen uzun darbeli rot ile aktif hale gelir. Bu sistem 1804 yılından daha da gelişmiş ve rüzgarın hızı arttıkça aktif hale geçen bir kontrol sistemi oluşmuştur.

2.2.3 Yakın Geçmişte Air Kilometre Taşları

Amerikan Elektrik Endüstri'sinin kurucularından biri olan Charles F. Brush(1849-1929) çok verimli bir DC(Direct Current-Doğru Akım) dinamo icat ederek bunun; elektrik hatlarında, kurşun-asit pillerin üretiminde ve ilk ticari elektriksiz ark ışığında kullanılmasını sağlamıştır. Şirketi, daha sonraları satılarak Edison General Electric Company ile birleşerek General Electric Company adını almıştır. 1887-1888 yıllarında Brush ilk otomatik hareketli elektrik üreten rüzgar türbini inşa etmiştir. (Şekil-2.10) O zamanlar için dev bir rotor çapına sahip olup (17 m) 144 adet kanatçıktan oluşur. Bu türbin 20 yıl boyunca elektrik üretmeye devam etmiştir.

Türbinin jeneratörü 12 kW elektrik üretmektedir. Bunun nedeni türbinin yavaş dönmesiyle düşük bir verime sahip oluşudur. Daha sonraları hızlı dönen rüzgar türbinlerinin daha verimli olduğu Paul la Cour adlı bilimci tarafından anlaşılmıştır. Paul la Cour 1891-1918 yılları arasında 100'den fazla 20-35 kW güç aralığında türbin tasarlamaştır. Tasarımları en son jenerasyon Danimarka yeldegirimenlerini esas alır. Bilime yaptığı en önemli katkı elektrikle hidrojen üretim bunu aydınlatmada kullanmayı başarmaktır. (Heier, 1998)

Rüzgar türbinlerini aerodinamik açıdan tasarlamayı düşünenler bu düşünceyi günümüzden 50 yıl önce hayata geçirmişlerdir. İlk büyük projeler Alman bilimadamları Kleinheinz ve Honnef tarafından 1940 yılında meydana getirilmiştir. Bunu takiben 1941 yılında Amerika'da Smith-Putnam 1250 kW'lık 53 m rotor çapına sahip bir türbini, 1957 yılında da Danimarka'da 200 kW'lık ve 24 m rotor çaplı Gedser türbini yapılmıştır.

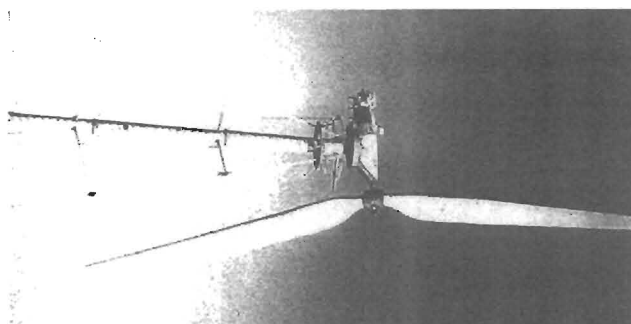


Şekil-2.10 Dünyanın ilk rüzgar santrali kabul edilen tarihi Brush türbini (Spera, 1998)

Teknik olarak bir devrim niteliğindeki Hütter türbini 1958'de yapılmıştır. Bu türbinin rotor çapı 34 m ve güç eldesi 100 kW'tır. (Şekil-2.11)

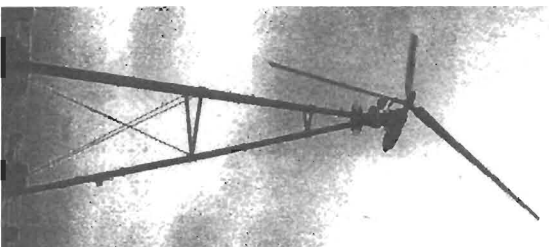
Kütle üretimi amaçlayan ilk rüzgar santrali 1950'lerin başında Alman tasarımcı Allgauer tarafından yapılmıştır. (Şekil-2.12) Aerodinamik açıdan tasarlanmış 10 m'lik kanatları, uzunlamasına eksen doğrultusunda yükselip rüzgardan alınan gücü ayarlarlar.

1950'lerden itibaren fosil yakıtların daha ekonomik hale gelmesiyle rüzgar türbinleri daha az kullanılır hale gelmiştir. Fakat 1970'lerde başlayan yakıt kriziyle birlikte rüzgar enerjisi tekrar gündeme gelmiştir. (Heier, 1998)

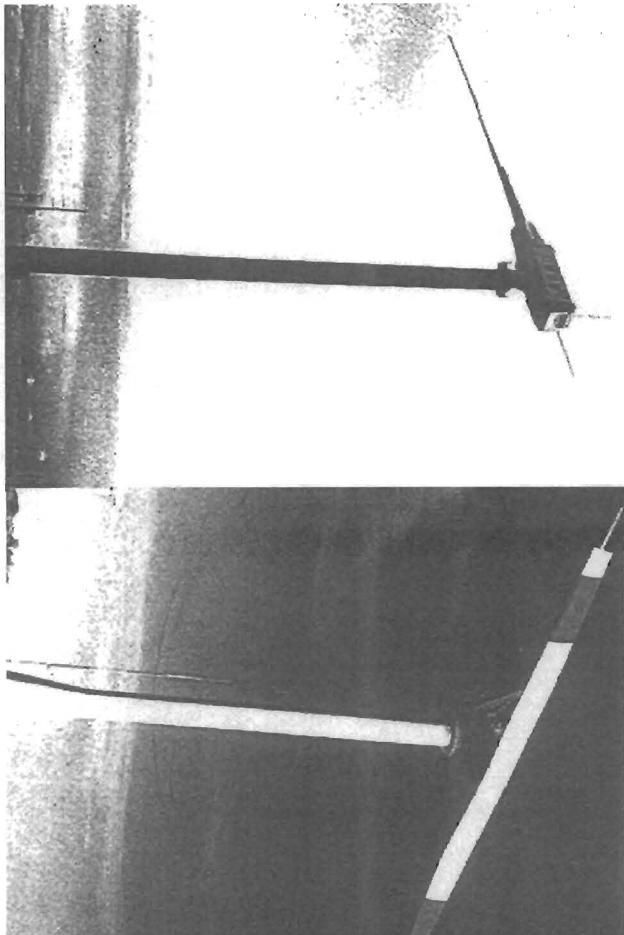


Şekil-2.11 Hütter Türbini (Heier, 1998)

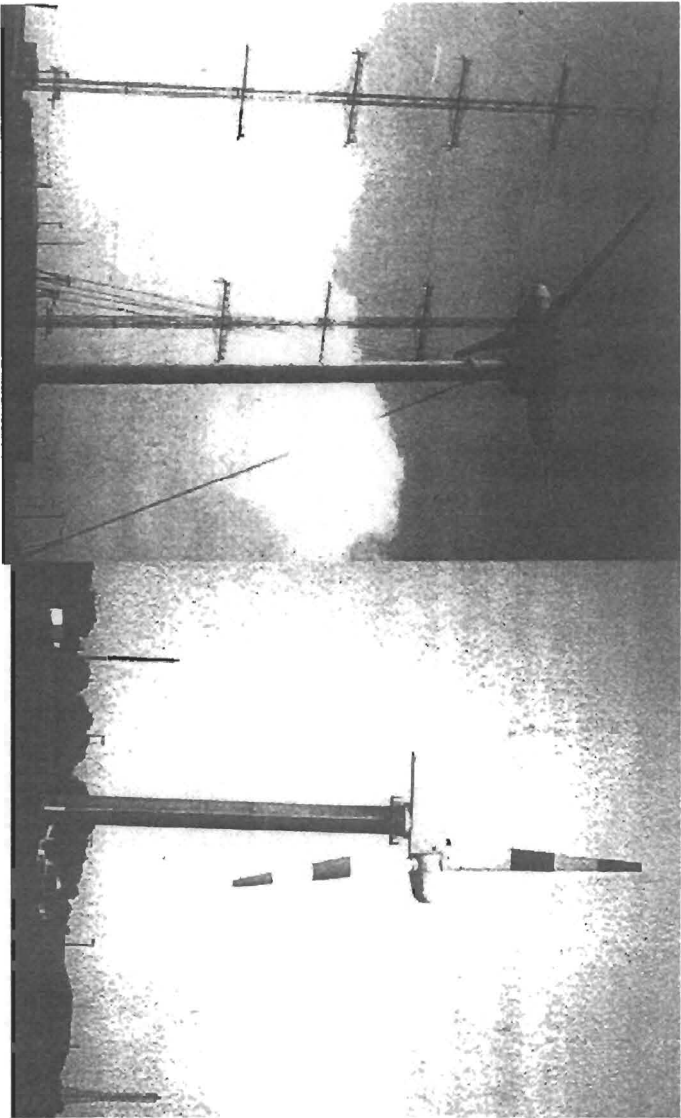
MW güç çıkışlı türbinlerin tasarımı Amerika, İsveç ve Almanya'da tercih edilmiştir. (Şekil-2.13 ve Şekil-2.14) Daha sonraları da büyük güçlü türbin teknolojisi başta ABD olmak üzere Almanya, Hollanda ve Danimarka'da gelişim göstermiştir.



Şekil-2.12 Allgaier Türbini (Heier, 1998)

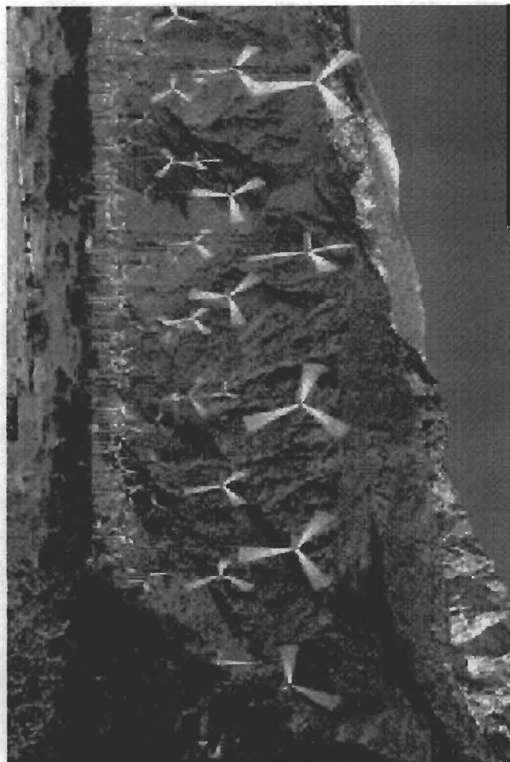


Şekil-2.13 Amerika'daki 2.5 ve 4 MW'lık Türbinler (Heier, 1998)



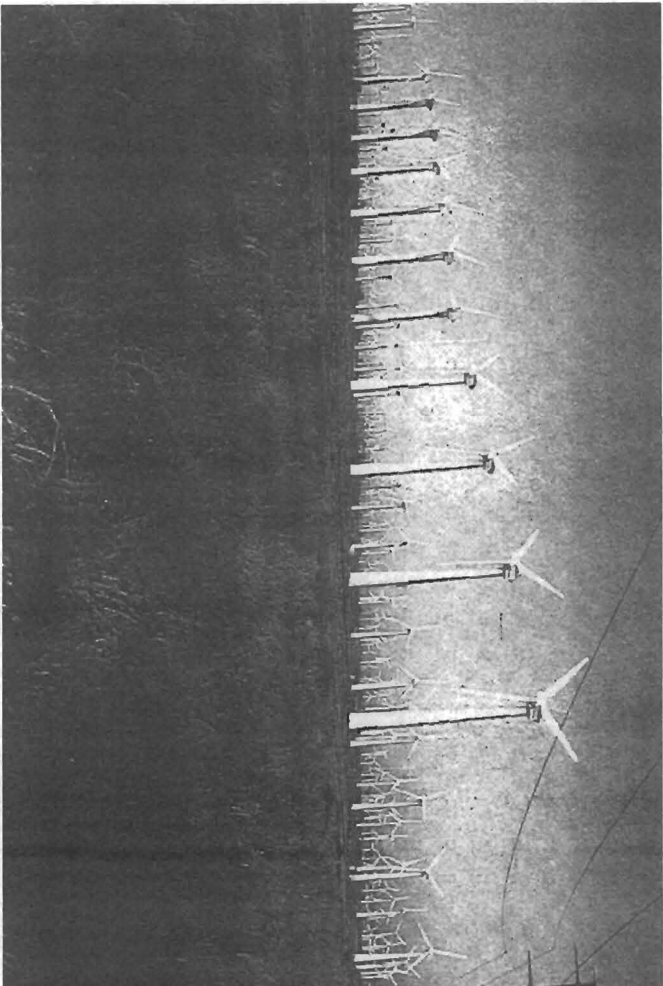
Şekil-2.14 Almanya'daki 1.2 ve3 MW'lık Türbinler (Heier, 1998)

Kaliforniya'da 1980'de 1500 MW'lık tesis inşa edilerek bir kısımda 50 ve 100 kW'lık, diğer kısımda da 250 kW'lık türbinler kullanılmıştır. (Şekil-2.15 ve Şekil-2.16)



Şekil-2.15 Kaliforniya Rüzgar Çiftliğindeki 100 kW'lık Türbinler [16]

Rüzgar türbinleri ile ilgili gelişmeler teknoloji ile birlikte her geçen gün artmaktadır. Günümüzde rüzgar türbinlerinde en çok gelişen sahalardan biri türbinin elektronik sistemlere adaptasyonudur. Gelecekte rüzgar türbinlerinden beklenen gelişmelere son konularda değinilecektir.



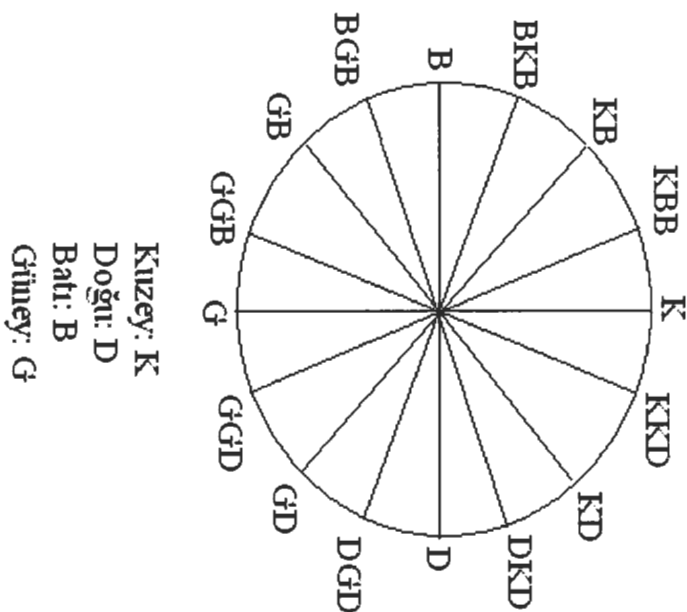
Şekil-2.16 Kaliforniya Rüzgar Çiftliğindeki 250 kW'lık Türbinler (Heier, 1998)

2.3 Rüzgar Türleri

2.3.1 Küresel Rüzgarlar

0 derece enlemi civarı; güneş ışınlarının yeryüzüne gelme açısı nedeniyle daha fazla ısındığından bu bölgede sıcaklıklar diğer bölgelere göre daha yüksek olur. Sıcak hava soğuk havadan daha hafif olduğu için ısınan hava yeryüzünden daha yüksekte yer alabilir. Hava yeryüzünden yükseldikten sonra kuzey veya güney yarımküre yönlerine doğru bir yönelme gösterir. Hareket halindeki hava kütesi dünyanın dönme hareketinin neden olduğu Coriolis kuvveti nedeniyle güney yarımkürede sola, kuzey yarımkürede de sağa sapar. Bu şekilde oluşan rüzgarlara Geostropik rüzgarlar adı verilir. Hakim rüzgar yönleri de alta tablo halinde verilmiştir. (Durak, 2000)

Çizelge-2.1 Hakim rüzgar yönleri



2.3.2 Yerel Rüzgarlar

Yerel iklim koşullarının rüzgar yönünü ve biçimini değiştirmesiyle oluşan yerel çaptaki rüzgar türlerine yerel rüzgarlar adı verilir. Bunlar; deniz meltemi, kara meltemi, dağ meltemi, vadi meltemi ve musondur.

Deniz Meltemi: Gün boyu kara ve deniz arasında belli bir sıcaklık farkı oluşur. Gündüz kara, denize göre daha hızlı ısınır. Bu sayede kara üzerinde daha sıcak olan hava yükselerek denizden karaya doğru bir rüzgarın esmesine neden olur.

Kara Meltemi: Deniz melteminin tersi yönde ve gece esen rüzgar ise kara meltemi olarak adlandırılır. Kara meltemi karanın soğuması ve denizin daha geç soğuması nedeniyle oluşan sıcaklık farkından etkilenir ve karadan denize doğru eser.

Dağ Meltemi: Dağ ve vadi arasında da deniz-kara arasındaki ilişkiye benzer bir ilişki mevcuttur. Dağ meltemi gece boyunca tepelerden vadi yönüne doğru eser.

Vadi Meltemi: Gün boyu daha sıcak olan vadi yönünden, soğuk olan dağ yönüne doğru esen rüzgarlara vadi meltemi adı verilir.

Muson Rüzgarı: Tropikal bölgelerde ve özellikle Güney Asya'da görülen bir rüzgar tipidir. Yazın denizden karaya(yaz musonu), kışında karadan denize doğru esen(kış musonu) mevsimlik rüzgarlardır.

2.4 Rüzgarlara Özgü Bazı Tanımlar

Rüzgarın Anlık Değişkenliği: Rüzgar hızı anlık olarak sürekli değişken bir karakter göstermektedir. Bu nedenle rüzgar enerjisi de devamlı değişkenlik gösterir. Değişim; hava, yüzey koşulları ve engellere bağlıdır. Rüzgarın anlık değişiminden başka ayrıca günlük, mevsimsel ve yıllık değişimleri de mevcuttur.

Rüzgarın Günlük Değişimi: Deniz ve kara arasındaki sıcaklık farkının, gündüzleri gecelerden fazla olması nedeniyle gündüz boyunca daha çok rüzgar oluşumu görülmektedir. Bu nedenle rüzgardan enerji elde etmek için gündüz zamanından faydalanmak daha uygun olur.

Rüzgarın Mevsimsel ve Yıllık Değişimi: Rüzgarın karakterinde mevsimden mevsime ve yıldan yıla değişimler gözlenmesi oldukça normaldir.

Tepe Etkisi ve Rüzgarın Hızlanması: Rüzgar hızı karada, düz bölgelere göre tepelerde daha yüksektir. Bu sebepten tepe bölgelere yerleştilen rüzgar türbinleri uygun miktarda rüzgar toplayabilir. Tepede türbülansın olumsuz bir etki yaratmamasına dikkat edilmelidir.

Tünel Etkisi: Rüzgarın karşısına çıkan engeller arasından geçerken maruz kaldığı bir etkidir. Hava; bu etki nedeniyle sıkıştığından rüzgar hızında artma görülür. Bu artma yaklaşık %40 civarına kadar ulaşabilir. Çok yoğun değişimlerin yaşandığı engebeli bölgelerde ise türbülans olayına dikkat edilmelidir.

Türbülans: Engebeli ve pürüzlü yüzeylerde rüzgarın düzenli akışını bozan durumlar dönme ve vorteks etkileriyle türbülans olayına sebebiyet verirler. Türbülans, rüzgardan alınan verimi direkt etkileyen bir faktördür. Ayrıca türbinde hasarlara da neden olabilmektedir. Karaya göre denizlerde türbülans yoğunluğu daha azdır, bu nedenle rüzgar türbinleri denizde kurulduklarında bu durumdan daha olumlu biçimde etkilenirler. Türbülans olayı bu sebepten dikkat edilmesi gereken bi etkidir. Ayrıca görülebileceği üzere rüzgar tanımları olan tünel etkisi ve tepe etkisiyle de direkt ilgili bir faktördür.

3. RÜZGAR ENERJİSİNİN KULLANIMI

3.1 Rüzgar Enerjisinin Kullanıldığı Alanlar

Rüzgar enerjisinin sağladığı yararlarıdan faydalanmak isteği birçok sektörde ve alanda kullanım yeri bulur. Bunlar;

1-Elektrik Üretimi Uygulamaları

2-Su Pompası Uygulamaları

3-Isıl Enerji Uygulamaları

olarak sıralanırlar.

3.1.1 Elektrik Üretimi Uygulamaları

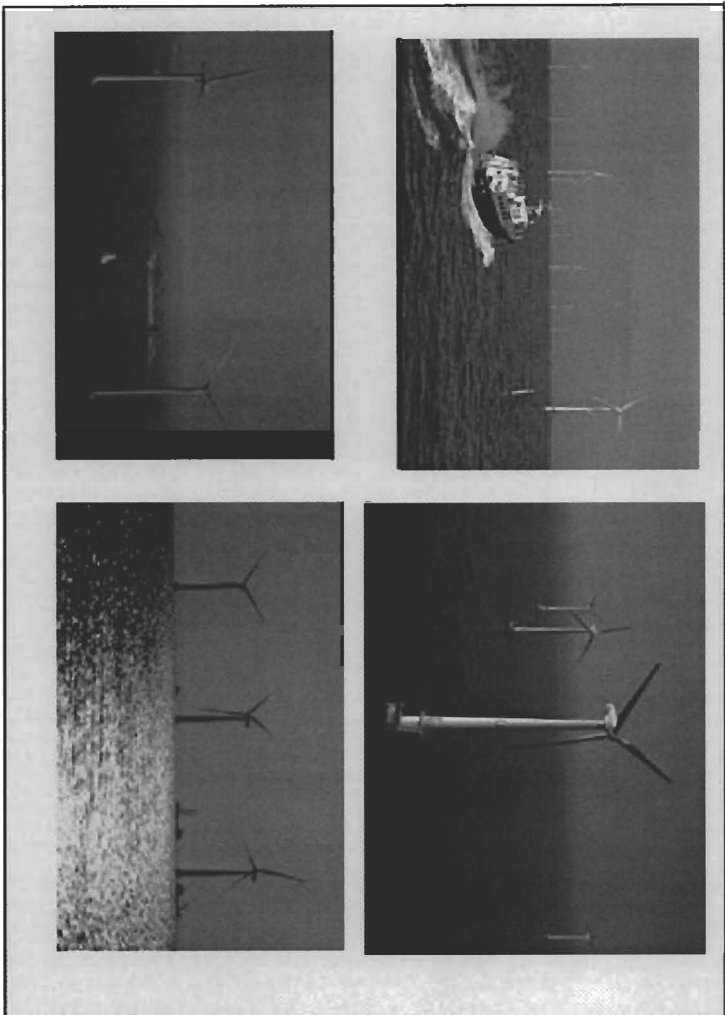
Rüzgar enerjisinin kinetik enerjisinden jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisi üretilir. Bu uygulamada farklı metodlar mevcuttur.

a) Rüzgar Çiftlikleri: Küçük ve orta büyüklükteki rüzgar türbinlerinin gruplar halinde, şehir şebekesine bağlı olarak elektrik üretiminde kullanıldığı sistemlerdir. Bunlar büyük türbinlerden oluşurlar. Rüzgar çiftliğinin toplam gücü 1-150 MW arasında olabilir. Bir türbin ise 50 kW'tan başlayıp 5 MW'a kadar gidebilir. Fakat ekonomik açıdan bakıldığında genelde 500 kW'lık türbinlerden itibaren bir kullanım söz konusudur.

b) Bağımsız Akü Şarj Eden Üniteler: Bu sistemler genellikle sürekli şebekeye bağlı olmayan ve şebekeden uzakta olan sistemlerdir. Bunlar şehir dışındaki diğer tüm elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilecek birimlerdir. Kullanılacak akü ünitesi, o yerin şartlarına bağlıdır. Şarj akımı, akü kapasitesinin %10'unu aşmayacak biçimde seçilerek akünün ömrünü uzatmak amaçlanır. Bu amaçla kullanılacak yerdeki günlük elektrikli ihtiyacı iyi saptanmalı ve buna göre türbin ve akü seçimi yapılmalıdır. (Yılmaz, 2000)

c) Rüzgar Türbinleri ve Hibrit Sistemler: Rüzgar türbininin başka alternatif veya fosil kaynaklı enerji üretim yöntemleriyle ortak çalıştırılmasına hibrit denir. En popüler hibrit; rüzgar türbini-diesel motoru arasında yapılır. Burada temel amaç şebekeden uzak bölgelerde ekonomik bir biçimde elektrik üretimi sağlamaktır. Ayrıntılı olarak 7. konuda anlatılacaktır. (Yılmaz, 2000)

d) Denizüstü Rüzgar Santralleri: Rüzgarın elde edilebilirliği açısından denizüstü santraller iyi birer kaynaktır. Potansiyel belirlene çalışmaları sonucu uygun rüzgar durumu ve deniz derinliği gözönüne alınarak denizüstü rüzgar santralleriyle elektrik üretimi gerçekleştirilebilir. Özellikle Danimarka gibi ülkelerde kurulmuş denizüstü rüzgar çiftlikleri mevcuttur. (Şekil-3.1) Santralde üretilen elektriğin aktarılması denizin altına döşenen kablolar ile mümkün olmaktadır. Gelecekte özellikle denizüstü rüzgar-dalga santrallerinin hibrit çalıştırılması ile ilgili gelişmeler beklenmektedir. (Yılmaz, 2000)



Şekil-3.1 Danimarka'daki denizüstü rüzgar çiftlikleri (windpower)

3.1.2 Su Pompası Uygulamaları

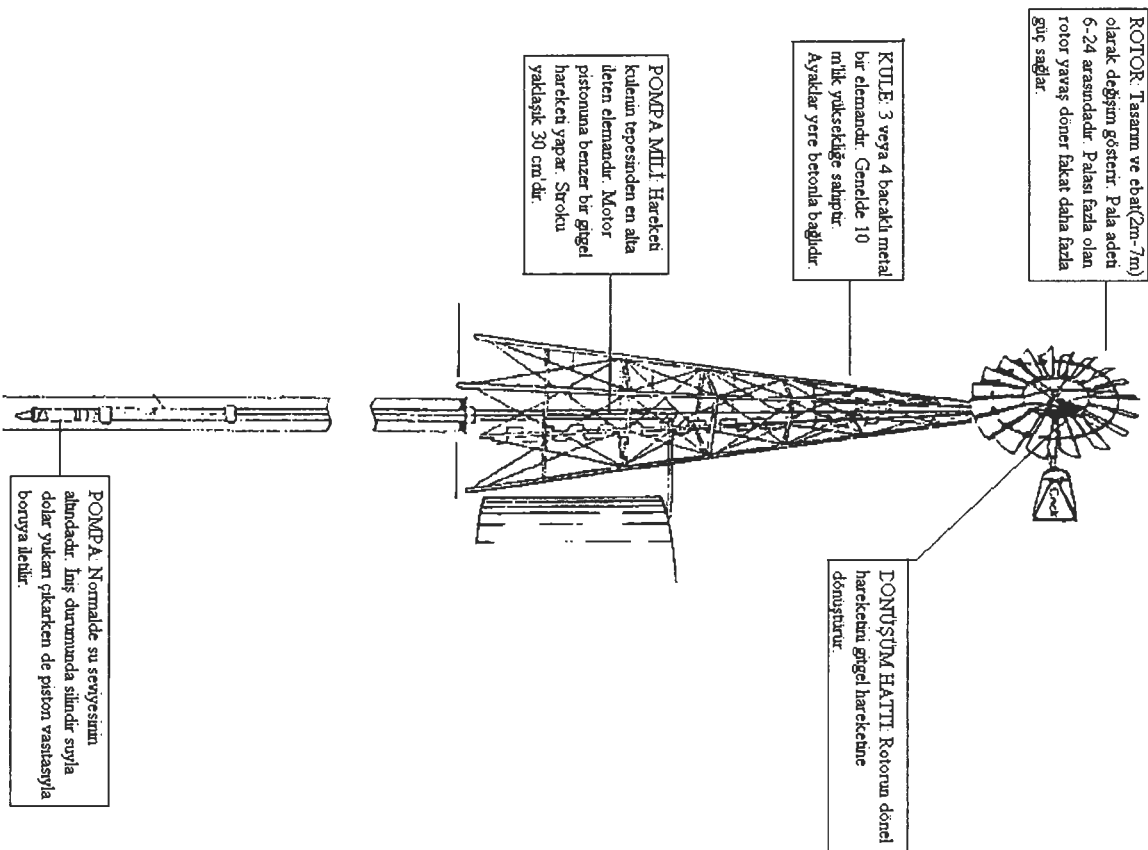
Rüzgar türbinlerinin en eski uygulama alanlarından birisi de su pompası olarak kullanılmasıdır. 1920'den 1970 yılına kadar bu işlem için daha ziyade içten yanmalı motorlar veya elektrikli motorlar tercih edilmiştir. 1970'den sonra tekrar yenilenebilir enerjilerle yapılan uygulamalar artmıştır. En çok kullanılan ülkelerden biri olan Hindistan'da 2000'den fazla uygulama mevcuttur. En temel gereklilikler olarak köy-kasaba su ihtiyacının karşılanması ve denizsuyundan tuz üretimi görülmektedir. Tüm dünyada 1 milyar adetten fazla rüzgar pompası çalışır halde bulunmaktadır. Bu alanda rüzgar enerjisinin rakipleri olarak diesel pompalar ve güneş enerjisi pompaları görülmektedir. Diesel pompası daha ekonomik

ilk maliyetiyle ön plana çıkar fakat çalışma ve bakım maliyetleri yüksektir. Güneş enerjisiyle çalışan sistemlerde ise pompayı çalıştıracak enerji, güneşin radyasyonunun elektriksel enerjiye çevrilmesiyle elde edilir. Güneş enerjili pompalar ise ilk maliyet açısından pahalı, bakım-onarım ve çalışma maliyetleri açısından ucuzdurlar. (Walker ve Jenkins, 1997)

Su pompalamada kullanılan rüzgar türbinlerinde rotor milinin mekanik gücü, pompayı çalıştıracak elektriksel güce dönüştürmektedir. Pompalama için türbinin başlangıç torkunun yüksek olması uygundur. Çoğunluğu 2-5 m çaplı yatay eksenli türbinlerdir ve 12-24 kanattan meydana gelirler. (Şekil-3.2)

3.1.3 Isıl Enerji Uygulamaları

Bu tip uygulamalarda rüzgar enerjisinden elde edilen mekanik enerji ısı enerjisiye çevrilip yerel ısıtma, kurutma ve sıcak su hazırlama gibi işlemler için kullanılır. Kullanım yerine yakınlık en temel verim şartıdır.



Şekil-3.2 Rüzgar pompasının anatomisi (Walker ve Jenkins, 1997)

3.2 Rüzgar Enerjisinin Avantajları, Dezavantajları Ve Diğer Enerji Türleriyle Kıyaslanması

3.2.1 Rüzgar Enerjisinin Avantajları

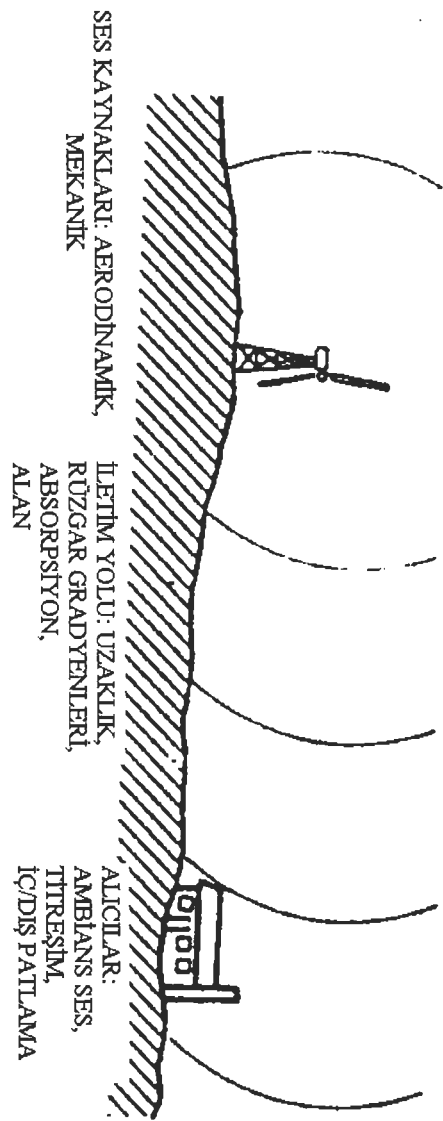
-Fosil kaynaklı yada başka bir organik veya inorganik yakıtı olmayan temiz ve emisyonuz bir enerji kaynağıdır.

-Emisyonu olmadığı için sera gazları oluşturmaz ve küresel ısınmaya katkı yapmaz.

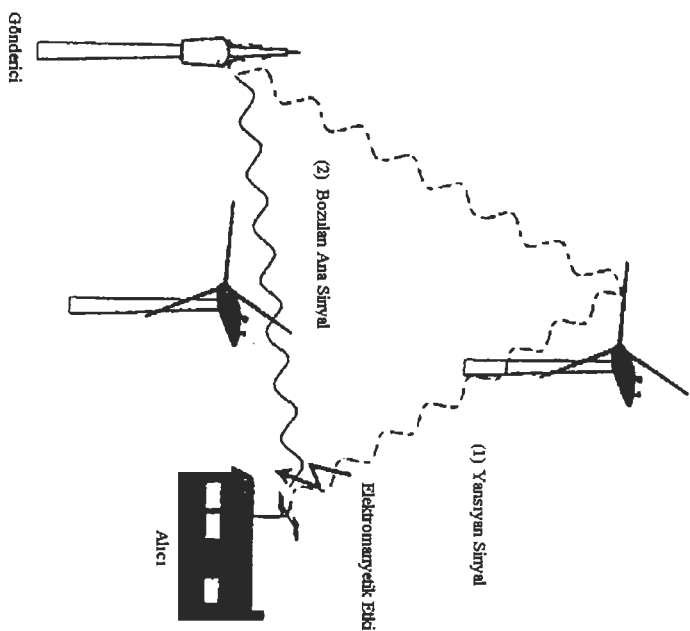
- Yakıt parası yoktur ve işletme masrafları çok azdır. Bu nedenle ekonomik bir enerjidir.
- Dışa bağımlı olmayan ve çevresel koşullar uygun olduğunda sürekli enerji oluşturan bir kaynaktır.
- Karmaşık olmayan ve otomatik makinelerdir. Periyodik bakımlar sonucu 20-30 yıllık ömürleri boyunca sorunsuz çalışırlar.
- Yer kaplamazlar ve buldukları alanlar başka amaçlarla da kullanılabilir.
- Radyoaktif ısınım veya radyasyon tehlikesi yoktur.
- İşletmeye almak ve kullanmak üç ay gibi kısa bir sürede mümkün olabilmektedir.
- Rüzgar türbinleri sadece tek değil gruplar halinde de kullanılabilirler ve üretilen enerji miktarlarını arttırabilirler.
- Tüklenmeyen sonsuz bir enerji kaynağıdır.

3.2.2 Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları

- Enerji üretimi rüzgara bağımlı olduğundan rüzgar kesilmesi veya azalması ile enerji kaybı oluşur.
- Rüzgar miktarına bağımlı bir enerji olduğu için sadece yeterli rüzgarın bulunduğu alanlarda kurulabilir.
- Türbin maliyetleri yüksek olabilmektedir ancak gittikçe azalan bir maliyet durumu söz konusudur.
- Büyük dönel bir makine olduğundan ötürü çevrede kuş ölümlerine neden olabilmektedir.
- Rüzgar türbinlerinin kurulacağı alanların durumu önemlidir. Örneğin arazinin engebeli olduğu yada sit alanlarına yakınlığı mahzur olabilir.
- Rüzgar türbinlerinin meydana getirdiği ses şiddeti çevreye gürültü olarak yansyabilir. Bu gürültü, türbinden uzaklaşıkça azalma eğilimi gösterir. (Şekil-3.3)
- Türbin kanatlarından dönerken parçaların kopması çevreye tehlike arz edebilir.
- Türbinler; elektromanyetik dalgaları dağıtabilir veya yön değiştirebilir.(Şekil-3.4) Bir türbin radyo,televizyon veya mikrodalga iletcisi ile alıcısı arasına kurulduysa elektromanyetik dalgayı etkileyebilir.



Şekil-3.3 Rüzgar türbinin ses etkisi (Wanwell, 2002)



Şekil-3.4 Rüzgar türbinlerinin elektromanyetik dalga kırma etkisi (Wanwell, 2002)

3.2.3 Rüzgar Enerjisiyle Diğer Enerji Türlerinin Kıyaslanması

Enerji üretim metodları ve kullanılacak enerji türü kıyaslanırken 4 farklı parametre bu kıyaslamada rol oynar:

- Kaynağın elde edilebilmesi
- Enerjinin Kalan Ömrü
- Maliyetler
- Çevreye etkisi

Enerji kaynağının elde edilebilirliğine ve kalan ömrüne bakacak olursak;

Çizelge-3.1 Enerji türlerinin kıyaslanması

	Dışa Bağımlılık/Yerellik	Kalan Ömrü(YIL)
Petrol	Dış	40-45
Kömür	Yerel/Dış	200-250
Doğalgaz	Dış	60-65
Nükleer	Dış	-
Hidrolik	Yerel	-
Güneş	Yerel	-
Jeotermal	Yerel	-
Rüzgar	Yerel	-

Görüldüğü üzere rüzgar enerjisi diğer yenilenebilir enerji türleriyle birlikte yerel bağımlı bir enerji kaynağıdır. Ömrü ise fosil kaynaklı enerjiler gibi değil sonsuzdur.

Maliyet açısından inceleyecek olursak;

Çizelge-3.2 Enerji türlerinin mali kıyaslaması

	Yatırım Maliyeti (\$/kWh)	Üretim Maliyeti (cent/kWh)
Petrol	1500-2000	6
Kömür	1400-1600	2.5-3
Doğalgaz	600-700	3
Nükleer	3000-4000	7.5
Hidrolik	750-1200	0.5-2
Güneş	Yüksek	10-20
Jeotermal	1500-2000	3-4
Rüzgar	1000-1200	3.5-4.5

Maliyet açısından tablomuz incelendiğinde rüzgar enerjisinin yatırım maliyeti olarak hidrolik ve doğalgazdan sonra 3. sırada olduğu ve üretim maliyeti açısından da hidrolik kömür ve doğalgazdan sonra jeotermal ile birlikte 4. sırada oldukları görülmektedir. Anlaşılacağı üzere rüzgar enerjisi maliyet açısından da avantajlı bir enerjidir.

İncelemeyi biraz daha genişleterek kaynağın çevreye olan etkisi gözönüne alınırrsa;

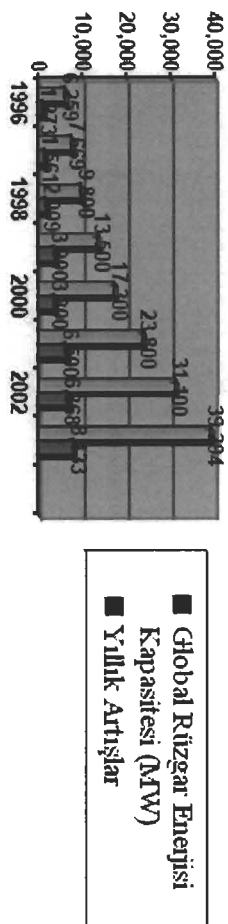
Çizelge-3.3 Enerji türlerinin çevresel etki kıyaslaması (Samsun, 2004)

	İklim Değişikliği	Asit Yağmuru	Su Kirliliği	Toprak Kirliliği	Gürültü	Radasyyon
Petrol	+	+	+	+	+	-
Kömür	+	+	+	+	+	+
Doğalgaz	+	+	+	-	+	-
Nükleer	-	-	+	+	-	+
Hidrolik	+	-	-	-	-	-
Güneş	-	-	-	-	-	-
Jeotermal	-	-	+	+	-	-
Rüzgar	-	-	-	-	+	-

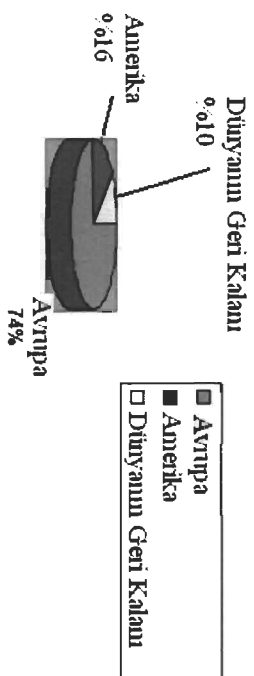
Görüldüğü gibi rüzgar enerjisi çevreye karşı etkileri en olumlu enerjilerden biridir. Karşılaştırılabilecek tek kayda değer olumsuzluk olarak gürültü gösterilebilmiştir.

3.3 Dünya'da Ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinin Durumu

Dünya'da rüzgar enerjisi kurulu gücü her geçen yıl artmaktadır. 2003 yılından 2004 yılına girilirken kurulu güçte %26'lık bir artış gözlenmiş ve 39000 MW barajını geçerek 39.294 MW değerine ulaşmıştır. Bu süre zarfında rüzgar enerjisi için 9 milyar \$'lık bir enerji yatırımı yapılmıştır. [19]



Şekil-3.5 Kümülatif rüzgar enerjisi kurulu güçleri [19]



Şekil-3.6 Avrupa ve ABD ile diğer ülkelerdeki kurulu güç paylaşımı [19]

Dünya rüzgar enerjisi pazarını Amerika ve Avrupa sürüklemektedir. Amerika'da birçok hanede kişisel kullanım görülmekte; Avrupa'da da bu tip kullanım gitgide yaygınlaşmaktadır. Yeni kurulan rüzgar santrallerinin %90'ı Amerika ve Avrupa'da kurulmaktadır. Bu arada Hindistan'da 2110 MW'a ulaşan güç iyi bir pazarın habercisi olup Amerika ve Avrupa dışında bulunan en büyük kurulu güçtür.

Çizelge-3.4 En büyük 5 pazar

En Büyük 5 Pazar	2002 Eklmeleri (MW)	2002 Sonu (MW)	2003 Eklmeleri (MW)	2003 Sonu (MW)
Almanya	3247	12001	2645	14609
ABD	410	4685	1687	6374
İspanya	1493	4830	1377	6202
Danimarka	407	2880	243	3110
Hindistan	195	1702	408	2110

Dünya'daki en büyük rüzgar türbini üreticisi Vestas (% 20.6) olmuştur. Onu NEG-MICON takip etmektedir (% 17.3). Global bağlamda kurulan yeni santrallerin toplam güçleri 2003 yılı sonu itibarıyla Çizelge-3.6'da verilmiştir.

Dünya genelindeki artış oranı ise her yıl gitgide azalmaktadır (%21). Bunun nedeni ise özellikle lider pazarların (Amerika, Almanya, Danimarka) yeni santral kurma hızlarının düşmüş olmasıdır. 2010 yılının hedefi 75000 MW olarak tahmin edilmektedir.

Çizelge-3.5 Avrupa ülkelerinin rüzgar için teknik potansiyelleri

Ülke	Teknik Potansiyel (GW)	Teknik Potansiyel (TWh/yıl)
Avusturya	2	3
Belçika	2	5
Danimarka	14	29
Finlandiya	4	7
Fransa	42	85
Almanya	12	24
İngiltere	57	114
Yunanistan	22	44
İzlanda	17	34
İrlanda	22	44
İtalya	35	69
Lüksemburg	0	0
Hollanda	3	7
Norveç	38	76
Portekiz	7	15
İspanya	43	86
İsveç	20	41
İsviçre	1	1
Türkiye (Bilgi edinme hakkı ile En. Bak. Soruldu)	88	176

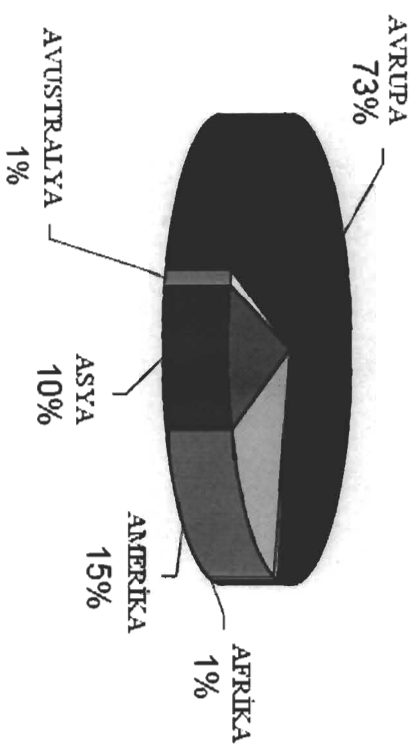
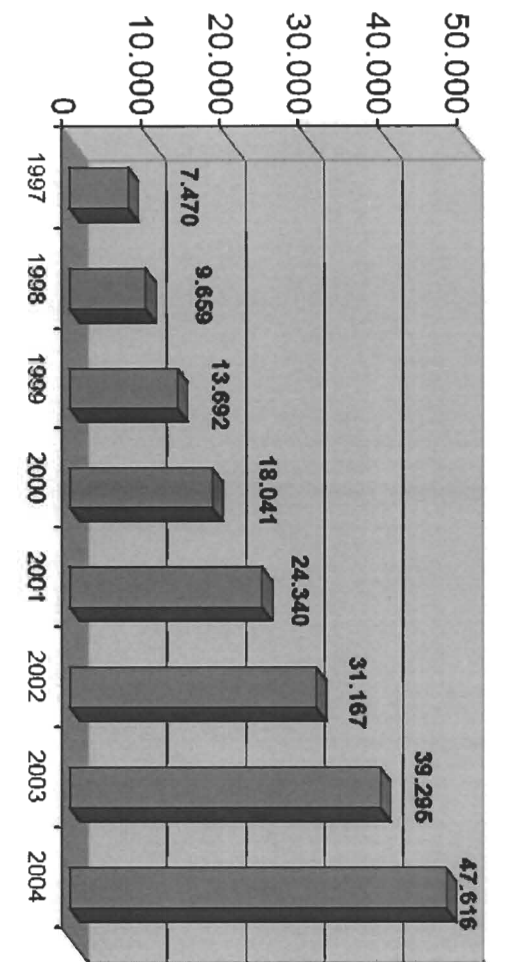
Çizelge-3.6 Dünya'daki durum(2003 Sonu) (MW) [19]

Ülke	2002 sonu	2003 içinde	2003 sonu
Kanada	236	81	317
ABD	4685	1687	6374
Kuzey Amerika Toplam	4921	1768	6691
Almanya	11994	2645	14609
İspanya	4825	1377	6202
Danimarka	2889	243	3110
Hollanda	693	226	912
İtalya	788	116	904
İngiltere	552	103	649
İsviç	345	54	399
Yunanistan	297	78	375
Fransa	148	91	239
Avusturya	140	276	415
Portekiz	195	107	299
İrlanda	137	49	186
Belçika	35	33	68
Finlandiya	43	8	51
Lüksemburg	17	5	22
Avrupa Birliği (Eski) Toplam	23308	5467	28706
Polonya	27	30	57
Letonya	24	0	24
Çek Cumhuriyeti	3	7	10
Macaristan	3	0	3
Estonya	2	1	3
Kıbrıs	2	0	2
Litvanya	0	0	0
Malta	0	0	0
Slovakya	0	3	3
Slovenya	0	0	0
Avrupa Birliği (Yeni) Toplam	61	41	102
Norveç	97	4	101
Ukrayna	46	11	57
İsviçre	5	0	5
Romanya	1	0	1
Avrupa Diğer Toplam	149	15	167
Hindistan	1702	408	2110
Çin	468	100	568
Japonya	414	272	686
Avustralya	105	93	198
Geri Kalan Ülkeler	310	25	335
Dünya Geri Kalanı Toplam	2999	898	3897
GENEL TOPLAM	31228	8133	34294

2004 yılı bittiğinde ise dünya genelinde 8321 MW artış sağlanarak 47616 MW değerine varılmıştır. En fazla artışın gözlemlendiği ülkeler 2061 MW ile İspanya, 2020 MW ile Almanya

ve 875 MW ile Hindistan'dır. Pazar lideri ülkelerden Danimarka ise 7 MW artış ile doyuma ulaştığının sinyallerini vermektedir. Oransal büyüme baz alındığında ise Avustralya kıtasında %135 artış gözlenmiş ve kurulu güç 547 MW'a çıkmıştır. (Çizelge-3.7 ve Çizelge-3.8)

Çizelge-3.7 2004 yılı sonunda Dünya'da durum [19]



Şekil-3.7 Kıtalarda kurulu gücün paylaşımı [19]

Çizelge-3.8 2004 yılında durum [19]

Ülke	2004 Yılında Kurulan Güç	Artış Miktarı	2004 Yılı Sonu
Almanya	2019,7	13,8	16628,8
İspanya	2061	33,2	8263
Amerika	370	5,8	6740
Danimarka	7	0,2	3117
Hindistan	875	41,5	2985
İtalya	221	24,4	1125
Hollanda	170	18,7	1078
Japonya	390,2	77,1	896,2
İngiltere	240	3,7	888
Çin	197	34,7	764
Avusturya	191	46	606
Portekiz	223	74,6	522
Yunanistan	124	34	489
Kanada	122	37,9	444
İsveç	43	10,8	442
Fransa	138	55,6	386
Avustralya	181,8	92,2	379
İrlanda	152,9	82,2	338,9
Mısır	120	66,7	300
Norveç	176	176	276
Yeni Zelanda	131,6	362,5	167,9
Belçika	27	39,7	95
Finlandiya	29,5	57,8	80,5
Kosta Rika	0	0	79
Ukrayna	12,2	21,6	68,6
G.Kore	48,3	209,3	68,4
Polonya	6	10,5	63
Fas	0	0	53,9
Lüksemburg	13	59,1	35
Arjantin	0,9	3,5	26,6
Letonya	2	8,3	26
Brezilya	0	0	23,8
Türkiye	0	0	20,6
Kolombiya	0	0	19,5
Tunus	0	0	19
Çek Cumhuriyeti	7	70	17
Güney Afrika	0,2	1,2	16,6
İran	0	0	11
Rusya	0	0	10,8
İsviçre	3,7	69,8	9
Litvanya	5	250	7
Hırvatistan	6	-	6
Estonya	3	100	6
Slovakya	3	150	5
Macaristan	1,2	60,5	3,3
Nijerya	0	0	2,2
Kıbrıs	0	0	2
Sili	0	0	2
Suriye	0	0	1,45
Romanya	0	0	1
Bulgaristan	1	-	1
Küba	0	0	0,45
Uruguay	0	0	0,15
Genel Toplam	8321	21,2	47616,4

Türkiye mevcut kurulu gücüne bakıldığında çağın oldukça gerisinde kalmıştır. Teknik kapasite olarak Avrupa'da en yüksek değere ulaşabilecek konumda olmasına rağmen 88 GW'lık teknik kapasitesinin çok az bir kısmını kullanmaktadır. 2002 yılı sonu itibariyle kurulu güç 18.9 MW olmuştur. Daha sonra 2003 yılı itibariyle Hadımlıköy Çiftliğiyle 1.2 MW eklenme yapılarak kurulu güç 20.1 MW'a çıkarılmıştır.(Bkz. Çizelge-3.9) 2004 yılında ise bir artış gözlemlenmemiştir. Bu güne kadar Enerji Piyasası Düzenleme Kurulunca izin verilen lisans hakları toplamı 1408 MW'tır(Bkz. Çizelge-3.10). Türkiye'nin bu sayede rüzgar enerjisi pazarının dev ülkelerinden biri haline geleceği aşikardır. Hedeflere daha yakından bakmak gerekirse Tübitak enerji raporuna göre 2020 yılında kurulu güç beklentisi 10 GW'tır.

Çizelge-3.9 Türkiye'de devrede olan rüzgar çiftlikleri

Yeri	Türbin Kapasitesi (kW)	Türbin Sayısı	Kurulu Kapasite (MW)
Çeşme-Germiyan	500	3	1.5
Çeşme-Alaçatı	600	12	7.2
Çanakkale-Bozcaada	600	17	10.2
İst.-Hadımlıköy	600	2	1.2
TOPLAM		34	20.1

Çizelge-3.10 Rüzgar santrali kurulmayı bekleyen projelerden bazıları [3]

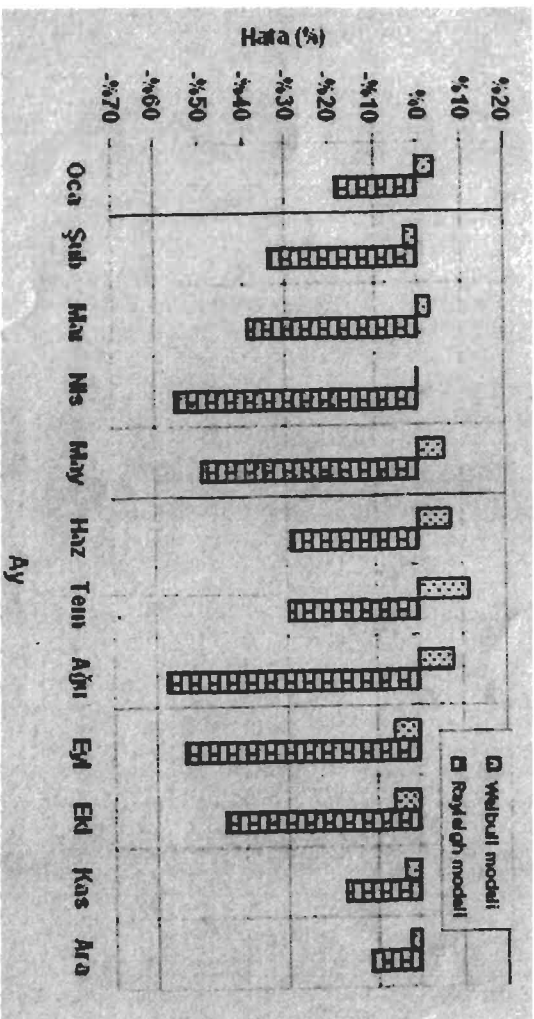
Ticaret Unvanı	Tesisin Yeri	Kurulu Güç	Öngörülen İşletmeye Geçiş Tarihi
Sagap Elektrik Üretim Anonim Şirketi	Bilecik İli, Kapaklıköy-Esemen Köyü-Dokuzküküz Tepe-Akcaalan-Küçükkale Tepe Mevkii Kapaklı	67 MW	20/07/2004'ten sonra 28 ay
Sagap Elektrik Üretim Anonim Şirketi	Adıyaman İli, Kahta İlçesi, Büyüklübağ Köyü-Parıtaçak-Güzelek-Birima-Aşurge-Serifhan Tepe-Berveadol mevkii Kahta	43 MW	20/07/2004 ten sonra 18 ay
Akres Akhisar Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimi Santrali Limited Şirketi	Manisa İli, Akhisar İlçesi, Gerentepe-Bekirler-Hamidiye-Tasaltitepe-Kıraçkuyusu-Hahtitepe Mevkii	43,75 MW	22/06/2004 ten sonra 18 ay
As Makinasan Temiz Enerji Elektrik Üretim Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi	Çanakkale İli, Karacabören Köyü - Özdek Köyü Testici Tepe - Küçükler Tepe - Saral Tepe mevkii	29,7 MW	14/06/2004 ten sonra 16 ay
Deniz Elektrik Üretim Limited Şirketi	Hatay İli, Samandağ İlçesi, Sebernoba-Gözene-Yayladağı Mevkii	30 MW	04/06/2004 ten sonra 11 ay

4. RÜZGAR POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ VE RÜZGARDAN İŞ ELDE ETMEK

4.1 Rüzgar Verilerinin İstatistiksel Analizi

Rüzgar potansiyeli belirlemek için istatistiksel veriler kullanılır. En yaygın kullanılan istatistiksel veri yöntemleri Weibull Dağılımı ve Rayleigh Dağılımı'dır.

Rayleigh Dağılımı çözüm için sadece ortalama hıza ihtiyaç duyduğu için Weibull Dağılımı'na göre daha basit bir yöntemdir. Fakat bu basitlik, hata oranında bir yükseklik getirmektedir. Örneğin yapılan çalışmalar incelendiğinde Weibull Dağılımı hata oranının %1-10 arasında kaldığı durumda Rayleigh Dağılımı yüzde %25-50 hata yapabilir. (Şekil-4.1) Altaki şekilde yapılmış bir çalışma verilmiştir. Bu çalışmada 4.1 denklemini kullanarak Weibull modeli hatası %4.9, Rayleigh modeli hatası %36.5 olmuştur. (Samsun, 2004)



Şekil-4.1 Weibull ve Rayleigh modellerindeki hata yüzdeleri (Samsun, 2004)

$$Hata = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \left| \frac{R_{y,R} - P_0}{P_0} \right|$$

4.1

Burada $R_{y,R}$; Weibull veya Rayleigh dağılımı ile hesaplanan ortalama güç yoğunluğu, P_0 ; referans ortalama enerji yoğunluğudur.

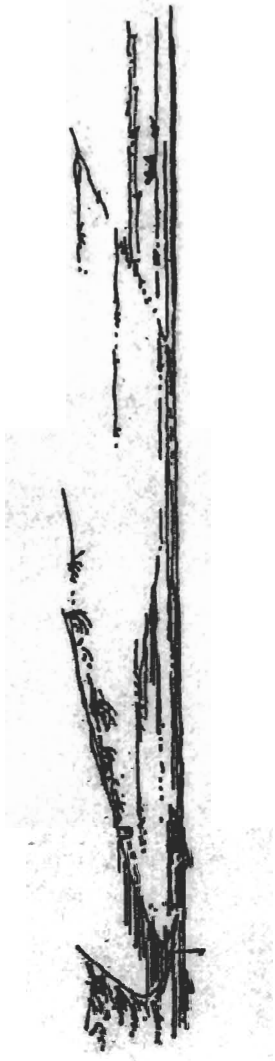
Weibull yöntemi daha hassas bir yöntem olarak şu fonksiyon ile tanımlanabilir:

$$p(u) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k \right] \quad 4.2$$

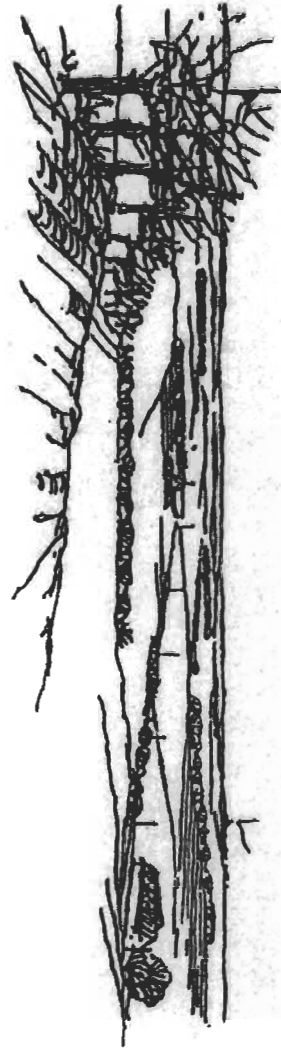
Burada k; şekil katsayısı, c ise büyüklük katsayısıdır. Bu iki katsayayı bulabilmek için ortalama hız ile standart sapma bilinmelidir. Weibull parametrelerinin hesaplanması tez konumuzun dışındadır. Ancak pürüzlülükten biraz bahsetmek yerinde olur. Alan pürüzlülüğü rüzgar hız profilini oldukça etkileyen bir faktördür. Temelde 4 adet pürüzlülük sınıfı mevcuttur. (Şekil-4.2, Şekil-4.3, Şekil-4.4, Şekil-4.5) Ve en az pürüzlüden en engebeliye doğru pürüzlülük sınıfı 0,1,2,3 olarak gitmektedir.



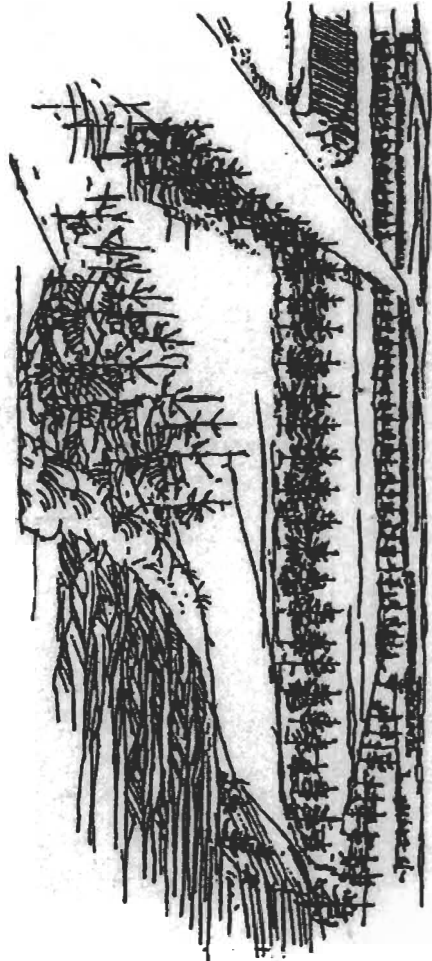
Şekil-4.2 Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi ($z_0 = 0.0002$ m) (Samsun, 2004)



Şekil-4.3 Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi ($z_0 = 0.03$ m) (Samsun, 2004)



Şekil-4.4 Pürtüzlülük sınıfı 2 olan arazi ($z_0=0.1$ m) (Samsun, 2004)



Şekil-4.5 Pürtüzlülük sınıfı 3 olan arazi ($z_0=0.4$ m) (Samsun, 2004)

Pürtüzlülük sınıfı 0 olan arazi su alanlarını, deniz ve gölleri gösterir. Pürtüzlülük sınıfı 1 olan arazi açık alandaki birkaç engelden oluşmaktadır. Engebelere azdır. Pürtüzlülük sınıfı 2 olan arazi rüzgar kırıcılardan oluşmaktadır. Arazi üzerinde ağaç veya binalar bulunabilir. Pürtüzlülük sınıfı 3 olan arazi ise çok sayıda rüzgar kırıcının olduğu şehir alanları veya ormanlık alan gibi bölgelerdir.

4.2 Türkiye’de Rüzgar Potansiyelinin Yüksek Olduğu Bölgelerin Saptanması

Türkiye’de rüzgar yoğunluğunun yüksek olduğu, dolayısıyla türbin koymaya veya rüzgar çiftliği kurmaya yatkın bölgelerin nereler olduğunun anlaşılması ve bu bölgelere konacak türbinlerin nasıl boyutlandırılacağına belirlenmesi için bir Rüzgar Atlası oluşturulmuştur.(Şekil-4.6) Atlas’a bakılırsa özellikle kırmızı ve sarı renkli bölgelerin potansiyelinin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu görülür. Bu bölgeler genellikle Çanakkale Boğazı ve Marmara, Ege, Akdeniz Bölgesinin batı ve orta kısımlarıdır. Bu atlas oluşturulurken kullanılan veriler bölgelere kurulan anemometre(hız ölçüm aygıtı) (Şekil-4.7)

ile yapılan ölçümlerin W/ASP programıyla derlenmesine dayanmaktadır. (Çizelge-4.1) Bu ölçümler için bölgelere Rüzgar Gözlem İstasyonları kurulmuştur. (Şekil-4.8) Rüzgar atlası çalışması 0,1,2,3 olarak tüm pürüzlülük sınıflarında, 10,25,50,100 ve 250 m yüksekliklerde; ortalama hız, ortalama enerji yoğunluğu ve Weibull parametrelerini sunmaktadır. Ortalama rüzgar gücü yoğunluğu;

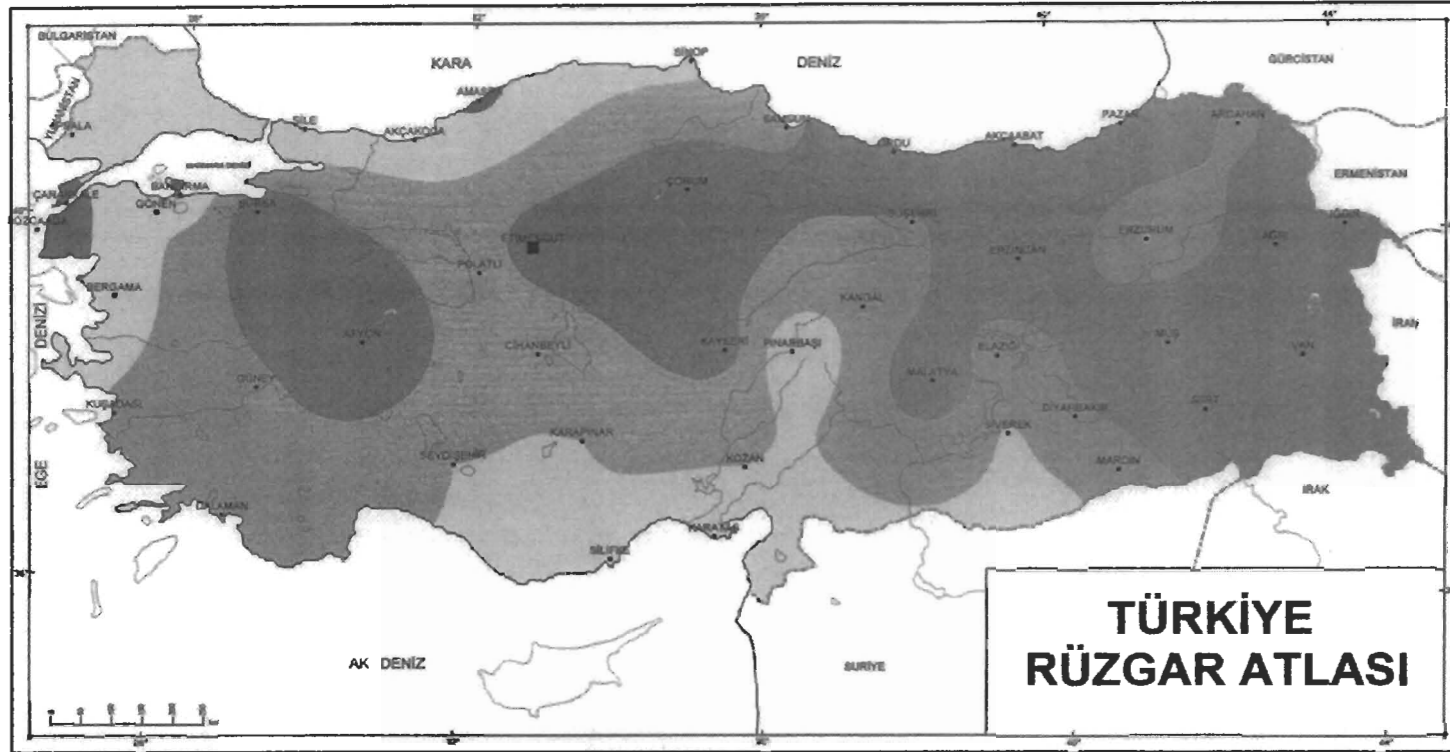
$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho U^3 K_e \quad 4.3$$

$$K_e = \frac{1}{NU^3} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad 4.4$$

$$\bar{P} / A < 100W / m^2 - \text{düşük} \quad 4.5$$

$$\bar{P} / A \approx 400W / m^2 - \text{iyi} \quad 4.6$$

$$\bar{P} / A > 700W / m^2 - \text{çok iyi} \quad 4.7$$

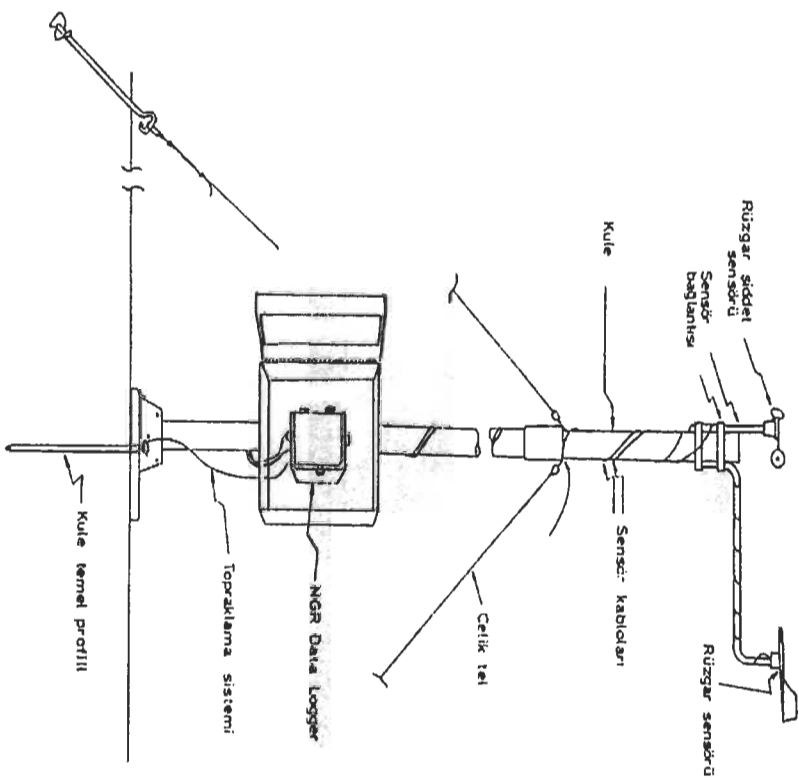


Beş farklı topografik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri¹

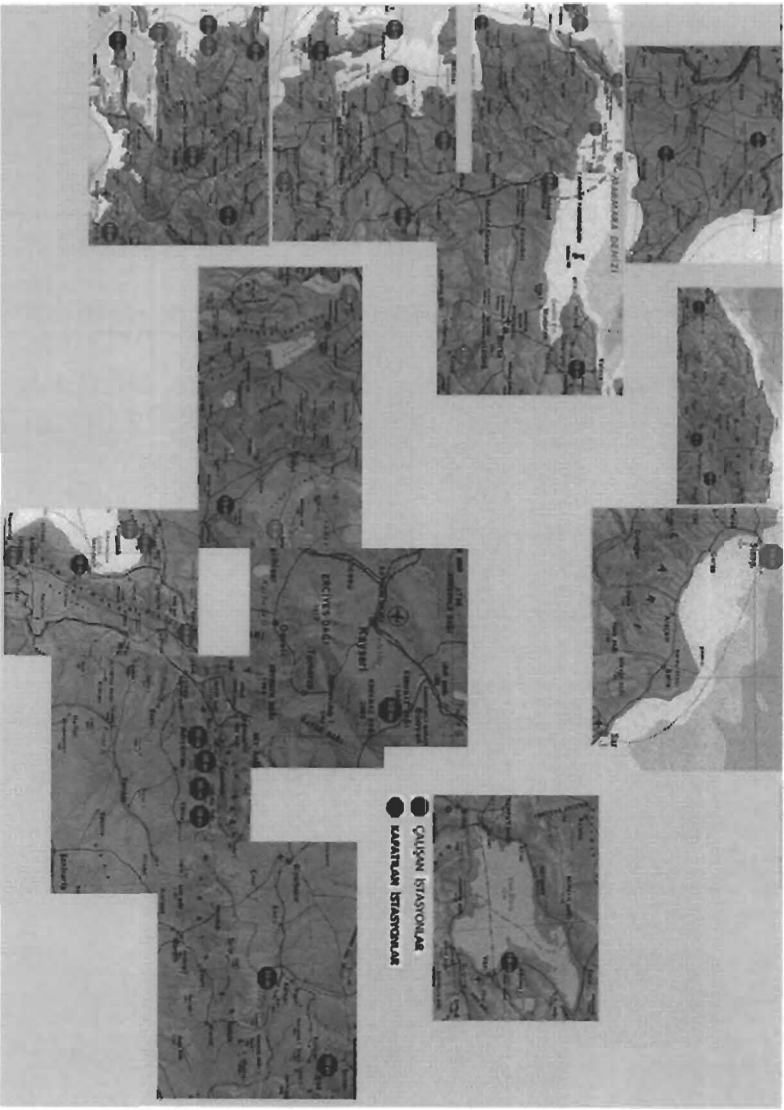
	Kapalı Araçlar ² ms ⁻¹ Wm ²	Açık Araçlar ² ms ⁻¹ Wm ²	Kıyılar ² ms ⁻¹ Wm ²	Açık Deniz ² ms ⁻¹ Wm ²	Tepe ve Bayırda ² ms ⁻¹ Wm ²				
>6.0	>250	>7.5	>100	>8.5	>700	>8.0	>800	>11.5	>1000
6.0-6.9	150-250	6.5-7.5	300-800	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.9	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1100
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	300-400	7.0-8.5	400-700
<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<300	<7.0	<400

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

Şekil-4.6 Türkiye rüzgar atlası [2]



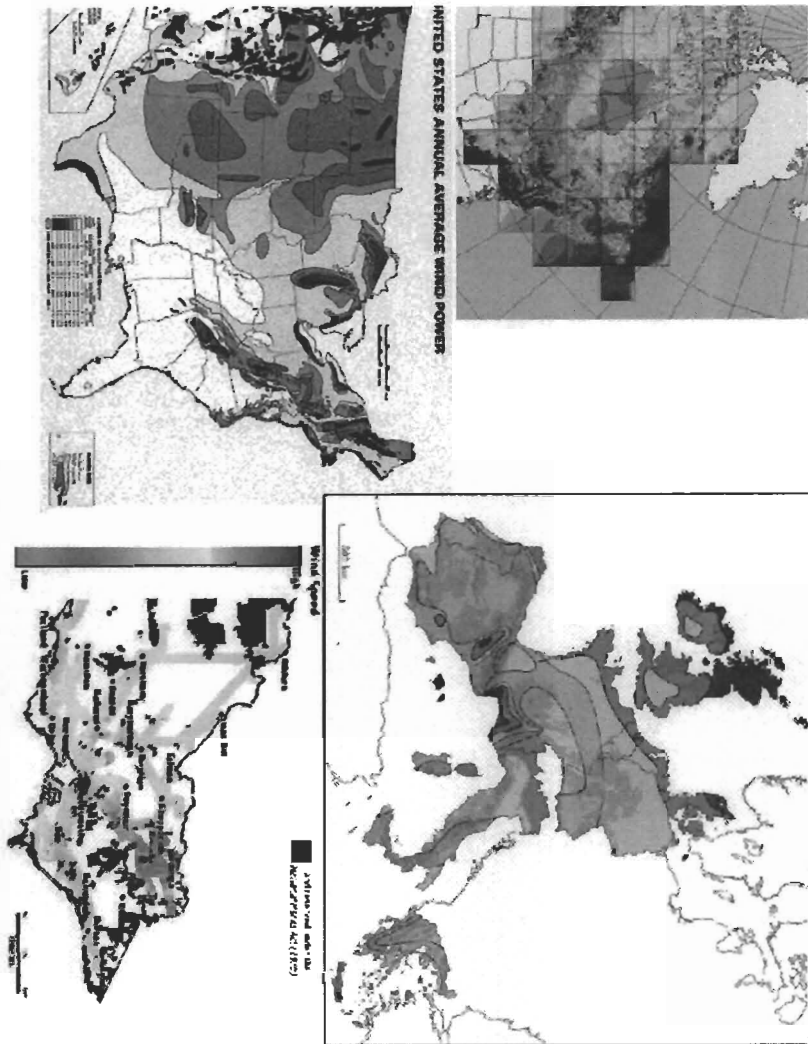
Şekil-4.7 Rüzgar hızı ölçüm sistemi



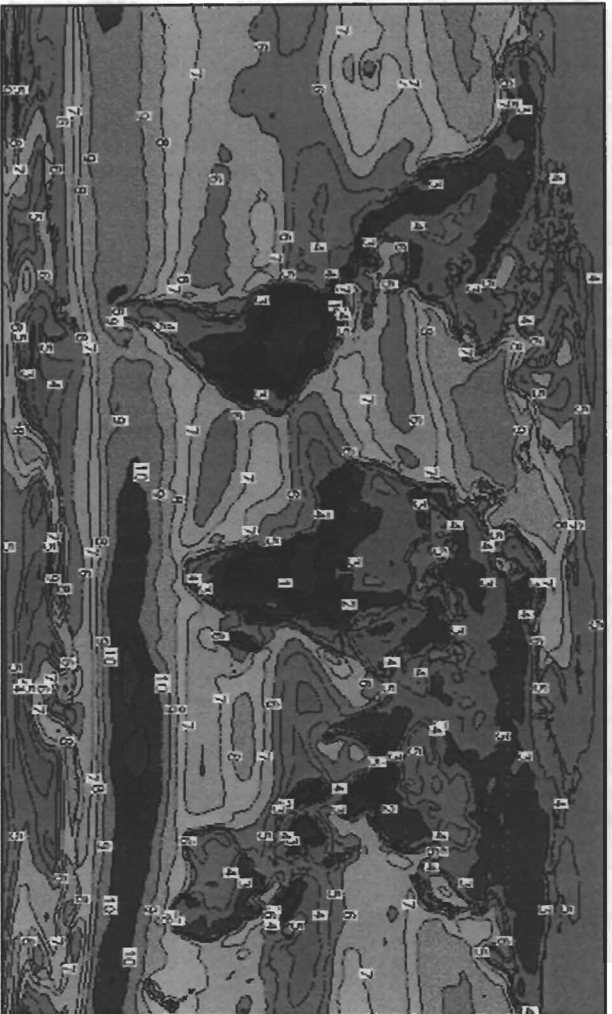
Şekil-4.8 Türkiye rüzgar gözlem istasyonları [2]

Türkiye’de yapılmış bir potansiyel belirleme çalışması Bölüm 4.5’te verilmiştir.

Türkiye dışında dünyanın rüzgar enerjisi kullanan diğer birçok ülkesinde de Türkiye’dekine benzer Rüzgar Atlas’ı oluşturma çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucu oluşturulmuş atlaslara ait örnekler alta verilmiştir.



Şekil-4.9 Avrupa, Amerika, Kanada ve Avustralya Rüzgar Atlası [6]



Şekil-4.10 Dünya Rüzgar Atlası [6]

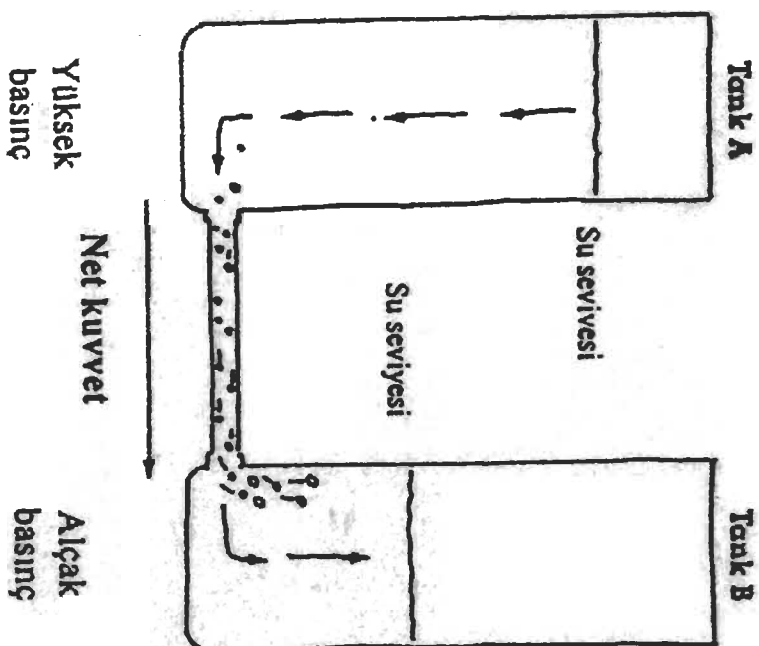
4.3 Rüzgar Üzerinde Etkili Mekanizmalar

4.3.1 Rüzgarın Temel Oluşum Mekanizması

Dünyadaki birçok enerji kaynağı gibi rüzgarın da kaynağı güneş enerjisi ve yeryüzünün eşit olmayan biçimde ısınıp soğumasıdır. Rüzgar enerjisi; rüzgar hızı, havanın özgül kütlesi, rüzgarın tutulacağı rotor alanının ve rotorun yüksekliğinin fonksiyonudur. Rüzgar şiddeti; bu sayılan parametrelerden en fazla etkili olandır. Çünkü rüzgardan elde edilen enerji, rüzgar şiddetinin küpü ile orantılıdır. Rüzgarın hızı knot, km/h veya m/s birimleriyle ölçülebilir. (1 knot=1.15 mph; 1m/s=2.24 mph; 1 km/h=0.621 mph; 1knot=0.51 m/s)

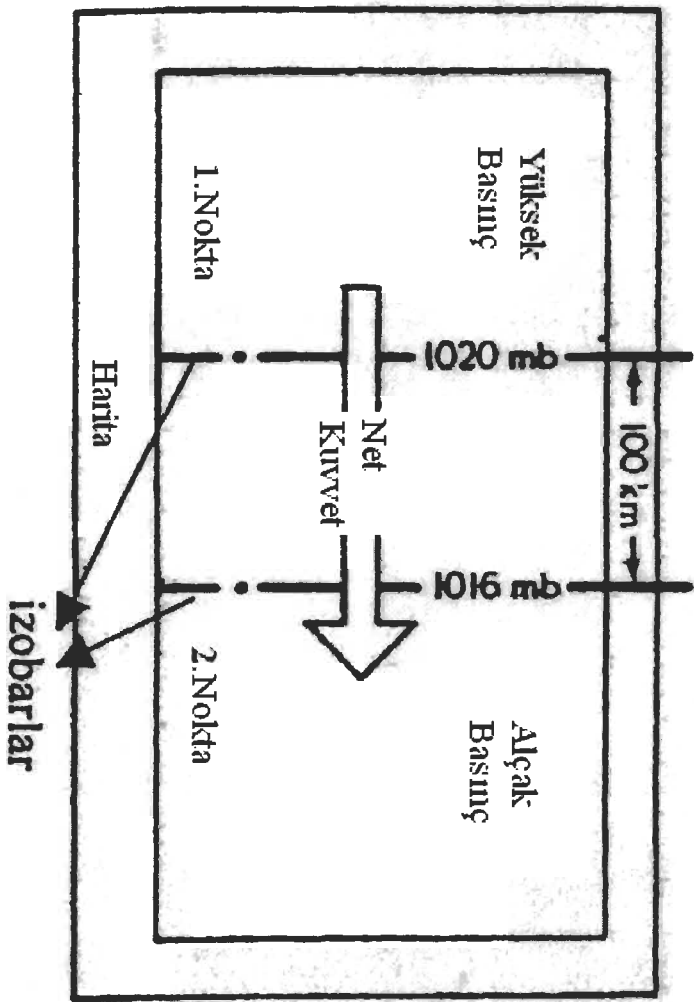
Rüzgar meteorolojik açıdan; basınç gradyanının yüksek olduğu bölgelerde, yüksek engebesiz tepe ve vadilerde, güçlü geostrofik rüzgarların etkili olduğu bölgelerde, kıyı şeritlerinde, kanal etkisi bulunan yerlerde görülebilir.

Rüzgar en basit olarak bir hava hareketidir. Bunu açıklayabilmek için Şekil-4.11'e bakmak gerekir. Burada A tankının 2/3'ü, B tankının da 1/3'ü su ile doludur. Su basıncı, su ağırlığına eşit olduğu için A tankındaki basıncın büyük olduğu görülür. Böylece A tankından B tankına bir akış başlar. Bu mantığın benzeri hava olaylarında da geçerlidir. Basınç farkları havanın hareketine neden olur. (Durak, 2000)



Şekil-4.11 Tank mekanizması (Durak, 2000)

Anlaşılması gereken diğer bir konu da basınç gradyeni kuvvetidir. Bu kavram, basıncın belli bir mesafede değişimini anlatmaktadır. Şekil-4.12'ye bakılırsa sol tarafa yüksek basınç, sağ tarafa da alçak basınç alanı vardır. Bu farklılık sonucu hava akımına bir kuvvet etkiler ki bu etkileyen kuvvete basınç gradyeni kuvveti denir. Basınç gradyeni kuvveti ne kadar büyükse rüzgar şiddeti de o oranda artar.



Şekil-4.12 Basınç gradyeni kuvveti oluşumu (Durak, 2000)

Hava akımı üzerine etkileyen diğer bir kuvvet de Coriolis kuvvetidir. Bu kuvvet dünyanın dönüşü nedeniyle ortaya çıkan bir kuvvettir. Kuzey yarımkürede cisim daima sağa doğru saptıran bir kuvvettir.

$$C = f\bar{V}_H x\bar{k}$$

4.8

Burada V_H ; rüzgar hızı, f ; Coriolis parametresidir.

4.4 Rüzgar Enerji Formülü

Rüzgar enerjisi formülü çıkarılırken rüzgarın kinetik enerjisi olduğu düşünülerek bir formülasyon oluşturulur. Kinetik enerji formülü;

$$E = \frac{1}{2} mV^2$$

4.9

Burada m ; cismin kütlesi, V 'de hızıdır. m kütlesi başka biçimde yazılırsa;

$$m = \rho H \quad 4.10$$

H burada hacimdir. Rüzgarın düşey bileşeni yatay bileşen yanında ihmal edilerek ve rüzgarın esme yönüne dik alan A ve rüzgar yönünde uzunluk U ise hacim;

$$H = AU \quad 4.11$$

V hızında t süresinde katedilen mesafe;

$$U = Vt \quad 4.12$$

Böylece kinetik enerji;

$$E = \frac{1}{2} \rho AUV^3 \quad 4.13$$

Burada birim zamanda birim alanda ($t=1, A=1$) kinetik enerjiyi yani bir noktada rüzgarın enerjisini şu şekilde yazabiliriz;

$$E_B = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad 4.14$$

Birim analizi yapılacak olursa;

$$\rho = 1.223[\text{kg} / \text{m}^3]$$

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

$$E : [\text{kg} / \text{m}^3][\text{m}^3 / \text{s}^3] : [\text{Watt} / \text{m}^2]$$

Belirli bir yükseklikte ölçülen rüzgar hızından herhangi bir yükseklikteki rüzgar hızına ulaşmak da mümkündür.

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^a \quad 4.15$$

Burada h_1 ; rüzgar şiddetinin ölçüldüğü yükseklik (m), h_2 ; rüzgar şiddetinin bulunmak istendiği yükseklik (m), V_1 ; h_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı (m/s), V_2 ; h_2 yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı (m/s), a ; pürüzlülük katsayısıdır. (Durak, 2000)

4.5 Türkiye'de Yapılmış Potansiyel Belirleme Çalışması

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü 1995-1998 yılları arasında 12 m'de yaptığı ölçümler sonucu rüzgar esme hızlarına ulaşmıştır.(Çizelge-4.2) Görüldüğü gibi rüzgar hızları 3-4 m/s civarındadır.

Çizelge-4.2 İzmir'de 12 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızlarının saatlik esme sayıları (Özdamar, 2000)

V_r (m/s)	1995	1996	1997	1998	V_r (m/s)	1995	1996	1997	1998
0-1	1453	1586	1526	1969	6-7	359	264	210	149
1-2	1541	1615	1658	1454	7-8	114	72	63	33
2-3	1412	1535	1674	1637	8-9	42	20	18	12
3-4	1487	1688	1707	1667	9-10	12	8	6	5
4-5	1463	1340	1259	1291	10-11	2	1	3	5
5-6	875	655	636	538	11-12	0	0	0	0

Çizelge-4.3'te verilen türbinler 46-92 m kule yüksekliklerine sahip olduklarından rüzgar hızlarının bu yükseklik aralığına göre hesaplanması gerekir. Bu çalışmada tüm rüzgar türbinlerinin 70 m kule yüksekliği olduğu varsayılmıştır. (Özdamar, 2000)

Çizelge-4.3 Karşılaştırılacak rüzgar türbini özellikleri (Özdamar, 2000)

Türbin	Çap (m)	Güç (kW)	Kule (m)	Jen. Tipi	Devir	Güç Kont.	Fiyat (DM)
DeWind 41	41	500	55	Asenkron	Değişken	Kanat açısı değişimi	885
Enercon 40	44	500	63	Senkron	Değişken	Kanat açısı değişimi	915
Tacke TW 600a	46	600	46	Asenkron	Sabit	A.Durdurma	1195
Nordex N- 43	43	600	78	Asenkron	Sabit	Durdurma	1120
DeWind 48	48	600	70	Asenkron	Değişken	Kanat açısı değişimi	1140
DeWind 46	46	600	70	Asenkron	Değişken	Kanat açısı değişimi	1120
DeWind 62	62	1000	92	Asenkron	Değişken	Kanat açısı değişimi	2390

Çizelge-4.4'te İzmir'de 70 m yükseklikte rüzgar hızlarının saatlik esme sayıları ile Çizelge-4.5'te 10 ve 70 m için ortalama rüzgar hızları verilmiştir. Bu yıllarda rüzgar hızlarının 70 m'de 17 m/s'yi geçmediği anlaşılmaktadır. (Özdamar, 2000)

Çizelge-4.4 İzmir'de 70 m yükseklikte rüzgar hızlarının saatlik esme sayıları (Özdamar, 2000)

V_H (m/s)	1995	1996	1997	1998	V_H (m/s)	1995	1996	1997	1998
0-1	547	636	664	1179	10-11	275	230	181	136
1-2	1220	1303	1161	1096	11-12	163	93	82	58
2-3	889	909	971	857	12-13	74	47	46	20
3-4	819	888	975	882	13-14	34	27	22	10
4-5	862	911	981	952	14-15	26	10	8	7
5-6	800	1007	1029	998	15-16	11	5	3	5
6-7	949	984	964	968	16-17	5	4	4	2
7-8	889	826	789	798	17-18	1	1	2	3
8-9	711	561	549	508	18-19	1	0	1	2
9-10	484	342	328	279	19-20	0	0	0	0

Rüzgar hız ölçümü yapılan zaman diliminde herbir rüzgar türbininden elde edilebilecek yıllık enerji miktarı:

$$E = \sum_{i=1}^N P \Delta t_i$$

4.16

Bağıntısıyla Çizelge-4.6 oluşturulmuştur. Çizelge-4.5 incelendiğinde görülür ki tüm türbinlerde elde edilen rüzgar enerjisi miktarı azalma göstermektedir. Örneğin Enercon-40 türbininden 1995 yılında 100 birim enerji elde edilebiliyorsa 1996 yılında 81, 1997 yılında 76, 1998 yılında 67 birim elektrik elde edilmektedir.

Çizelge-4.5 12 m yükseklikte aylık ortalama rüzgar hızlarının değişimi (parantez içinde 70 m'deki durum verilmiştir) (3b2)

Aylar	Yıllar			
	1995	1996	1997	1998
Ocak	3.24(5.49)	3.63(6.15)	3.19(5.42)	2.64(4.48)
Şubat	2.94(4.99)	2.86(4.85)	2.91(4.94)	2.86(4.85)
Mart	3.14(5.33)	3.35(5.68)	3.44(5.83)	3.02(5.12)
Nisan	2.4(4.07)	2.34(3.98)	2.24(3.81)	2.01(3.42)
Mayıs	2.84(4.81)	2.26(3.84)	2.44(4.15)	2.07(3.51)
Haziran	2.45(4.17)	3.41(5.8)	2.36(4.01)	2.69(4.56)
Temmuz	4.04(6.86)	3.28(5.57)	2.87(4.87)	2.94(4.99)
Ağustos	3.17(5.38)	3.07(5.2)	2.92(4.96)	3.22(5.46)
Eylül	2.43(4.12)	2.32(3.93)	3.22(5.47)	2.68(4.55)
Ekim	3.44(5.84)	2.73(4.63)	3.27(5.54)	2.20(3.74)
Kasım	2.84(4.82)	2.30(3.91)	2.33(3.96)	2.41(4.09)
Aralık	3.9(6.62)	2.77(4.7)	2.63(4.46)	3.01(5.11)
YıllıkOrt.	3.08(5.22)	2.86(4.86)	2.82(4.79)	2.65(4.49)

Elde edilen sonuçlara bakacak olursak:

-Çizelge-4.6 incelenirse rüzgar eldesinin her yıl azalma gösterdiği anlaşılmaktadır.

-Çizelge-4.4 incelenirse en çok esmenin İzmir'de 70 m'de 1-2 m/s (1995-1997) ve 0-1 m/s (1998) olduğu görülmüştür.

-Maliyet açısından yaklaşıldığında en ekonomik ve en ucuz kullanım 600 kW'lık türbinlerin kullanımıdır. Ayrıca kurulacak bir tesisin geri ödeme süresinin uzun oluşu (8.7-13 yıl) yatırımı cazip hale getirmemektedir. (Özdamar, 2000)

Çizelge-4.6 70 m'lik kuleden elde edilen yıllık enerji miktarları (Özdamar, 2000)

Türbin	Güç (kW)	Fiyat (EU)	Süpürme Alanı (m ²)	Enerji (kWh) (1995)	Enerji (kWh) (1996)	Enerji (kWh) (1997)	Enerji (kWh) (1998)
DeWind 41	500	400	1320.25	665760	532888	498804	436914
Enercon 40	500	450	1520.53	660870	536673	504304	443817
Tacke TW 600a	600	550	1661.90	870443	713476	672656	596104
Nordex N-43	600	520	1452.2	763231	618736	581389	511792
DeWind 48	600	530	1809.56	961681	782334	734786	647964
DeWind 46	600	520	1661.9	897396	727360	682970	600511
DeWind 62	1000	1150	3019.07	1601549	1301163	1222438	1078363
DeWind 60	1250	1100	2827.43	1549881	1245827	1168380	1021613
Nordex N-60	1300	1120	2827.43	1505539	1211672	1134706	995399
Tacke TW 1.5a	1500	1500	3903.63	2011673	1611378	1506171	1316122

5. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN BİLEŞENLERİ VE SANTRALİN ŞEBEKEYE BAĞLANMASI

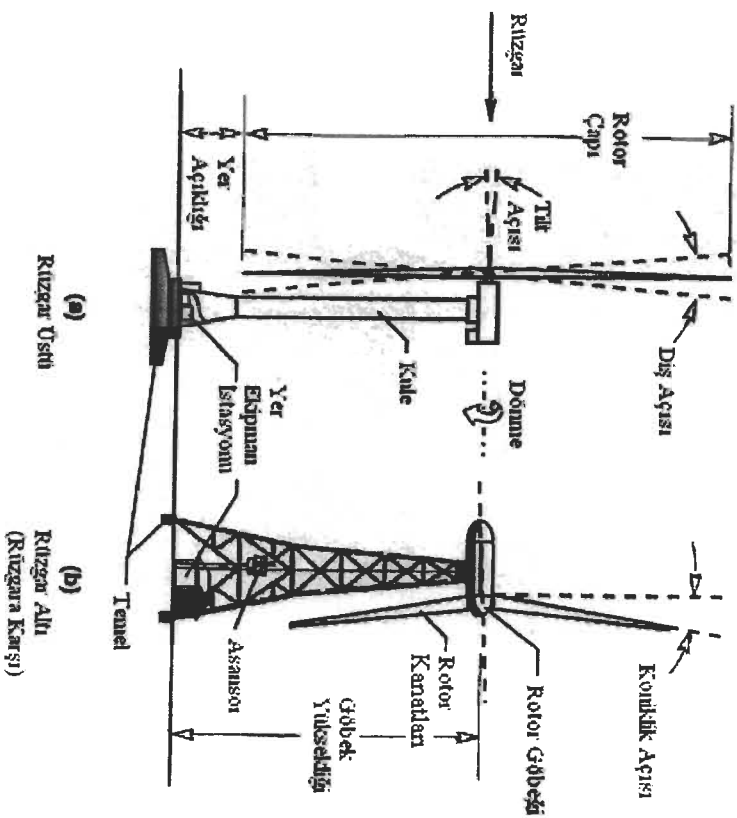
5.1 Rüzgar Türbinleri Ve Bileşenleri

Bu kısımda rüzgar türbinlerini oluşturan bileşenleri ve türbin dışı santral elemanlarını ve işlevlerini tanıyacağız. Özellikle türbinlerden bahsedilecek ve yatay-dikely eksenli olmalarına göre ayrılarak tanıtılacaklardır. Tezin 6. konusunda kontrol sistemlerinden çok geniş olarak bahsedileceği için aslında türbin bileşeni olmalarına rağmen 5. konu dahilinde bir anlatım yapılmayacaktır.

5.1.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)

Modern Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri iki ayrı konfigürasyonda olabilir. (Şekil-5.1) Bunlarda temel olarak bulunan kısımlara bakacak olursak;

1)Rotor 2)Güç Ünitesi 3)Nasel Alt Birimi 4)Kule 5)Temel 6)Yer Ekipman İstasyonu



Şekil-5.1 YERT prensipleri (Spera, 1998)

Türbin Rotor Sistemi:

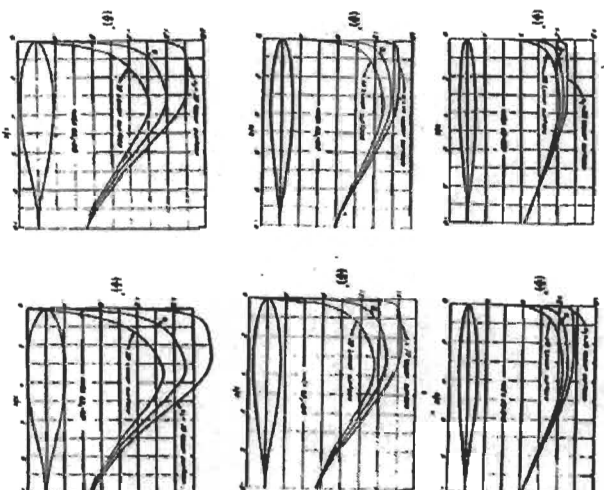
YERT'lerde rotorlar genellikle "pervane tipi" diye adlandırılmaktadır. Bunun sebebi uçaklarda aerodinamik ve yapısal özelliklerinin aynen uygulanabilmesidir. Bazı farklar olduğu (havayı yavaşlatması, uç hızlarının düşük olması) hiçbir zaman gözardı edilmemelidir. Şekilde görüldüğü üzere ana elemanlar; kanatlar ve bağlı oldukları göbekten ibarettir. Kanatlar açısından en önemli unsur kanat profilleridir. Birçok farklı kanat profili mevcuttur. (Şekil-5.2) Kanat profilleri için iki önemli parametre vardır. Bunlar kaldırma ve sürütikleme katsayılarıdır. Herhangi bir kanat için kaldırma ve sürütikleme katsayıları şu şekillerde ifade edilir:

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

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

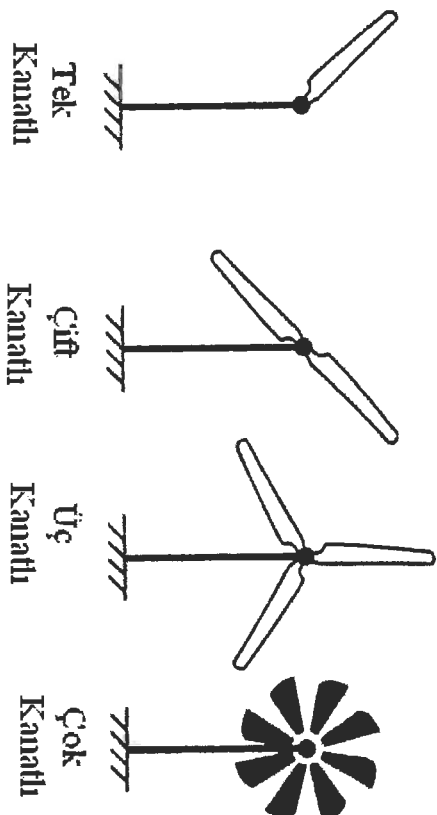
Burada;

D:Sürütikleme Kuvveti[N]; ρ :Hava Yoğunluğu[kg/m³] ; V:Hava Hızı[m/s]; A_b :Kanat Alanı[m²]; L:Kaldırma Kuvveti[N]



Şekil-5.2 NACA 63 profil örnekleri

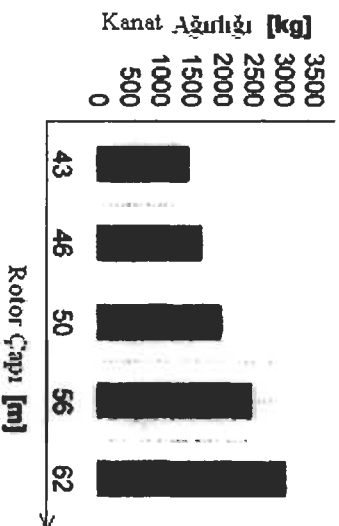
Genelde rüzgar türbinleri iki veya üç kanatdan oluşurlar.(Şekil-5.3) Tek kanatlı tipler de teknik açıdan mümkündür fakat az görülür. Kanat sayısının konstrüksiyona etkisine bakacak olursak iki ve üç kanatlı rotorlara eşit miktarda aksenal kuvvet gelir. Fakat iki kanatlı rotorda bu kuvvet ikiye, üç kanatlıda da üçe bölünür. Bu sebepten iki kanatlı rotora gelen kuvvet diğerine göre 1.5 kat fazladır. Kullanılan malzemeler kanat ağırlığı değiştirirken rotor çapını da etkilerler.(Şekil-5.4)



Şekil-5.3 Kanat adetlerine göre türbinler (Gipe, 2003)

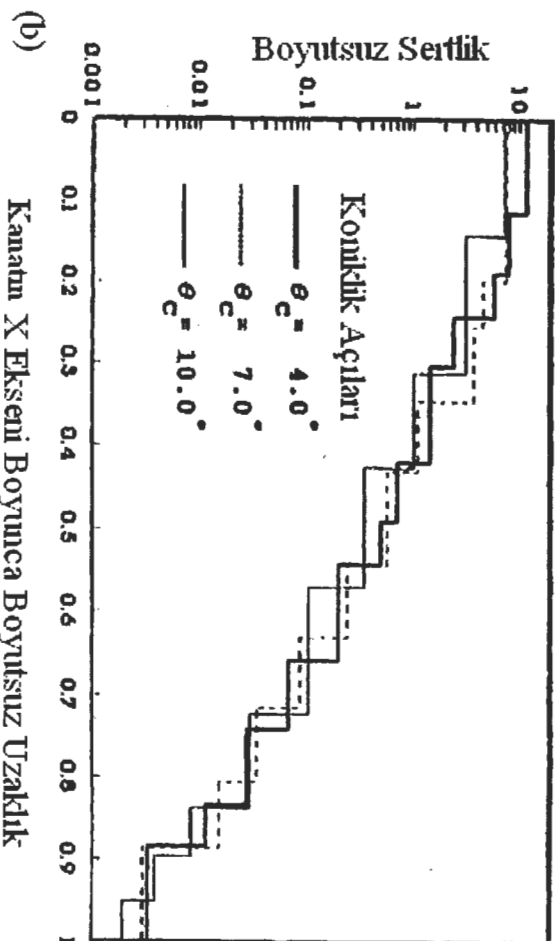
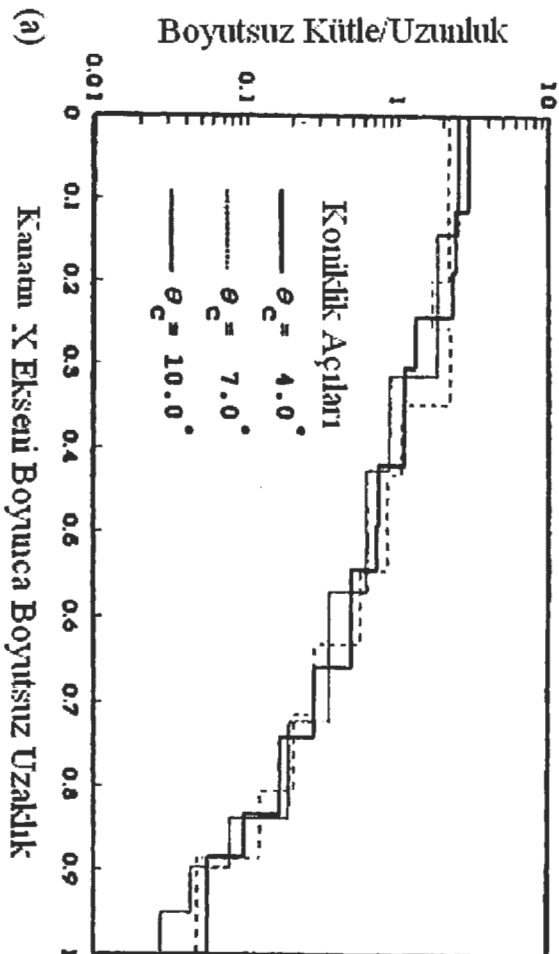
Kullanılan malzemelere bakacak olursak;

- Epoksi reçine/cam fiber
- Polyester reçine/cam fiber
- Epoksi reçine/tahta
- Epoksi reçine/karbon-cam fiber



Şekil-5.4 Kanat Ağırlığı-Rotor Çapı İlişkisi

Konik olmayan rotor denildiğinde aklı tüm kanatların dönüş eksenlerinin aynı düzlemde olduğu rotor gelmektedir. Konik rotordaki kanat eksenleri; bir koniklik açısıyla rüzgar altı (Downwind) tilt hareketine maruz kalırlar. Bu durum, rüzgar altı sonucu; aerodinamik yüklerin kanatı eğmesine veya rüzgar karşı (Upwind) sonucu radyal merkezkaç yüklerin kanatı eğmesine karşı bir dengeleme unsurudur. (Şekil-5.5) Kule açıklığı; kanat konikliğinden, kanatların yük altındaki elastik deformasyonundan etkilenir.



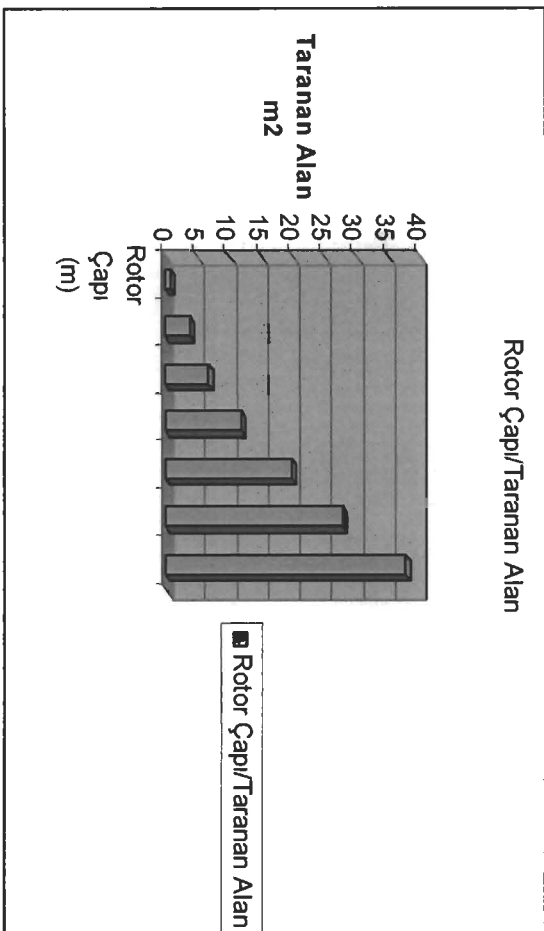
Şekil-5.5 Farklı koniklik açılarında kütle ve sertlik (Maalavi, 2002)

Rotorun taradığı yüzeyin hesabına bakarsak;

$$A_r = \pi R^2$$

5.3

Burada R: rotor yarıçapıdır. Rotor çapıyla taranan alan arasında alttaki şekle benzer bir ilişki vardır.



Şekil-5.6 Rotor çapı-taranan alan ilişkisi

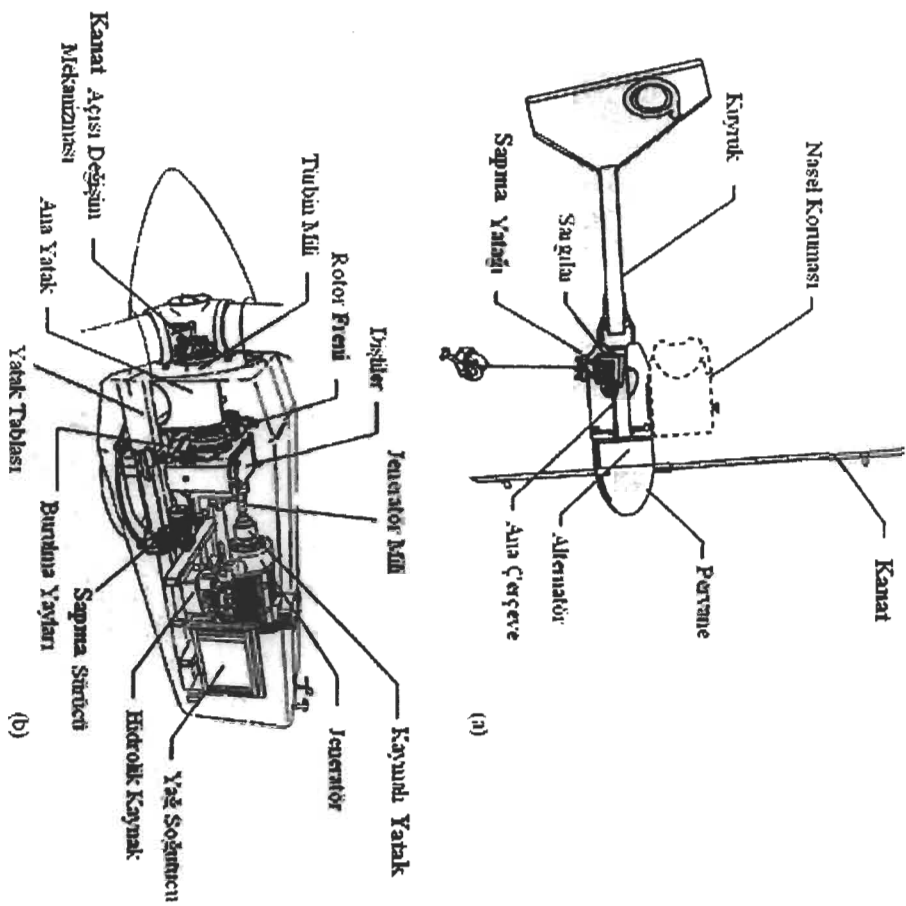
Güç Birimleri:

Bu birim birçok elektriksel ve mekanik donanımdan oluşmaktadır. Bu elemanlar rotor göbeğinden aldıkları mekanik gücü elektriksel güce çevirirler. Küçük, orta ve büyük ölçekli türbinlerin güç birimleri şekilde görülmektedir. (Şekil-5.7 ve Şekil-5.8)

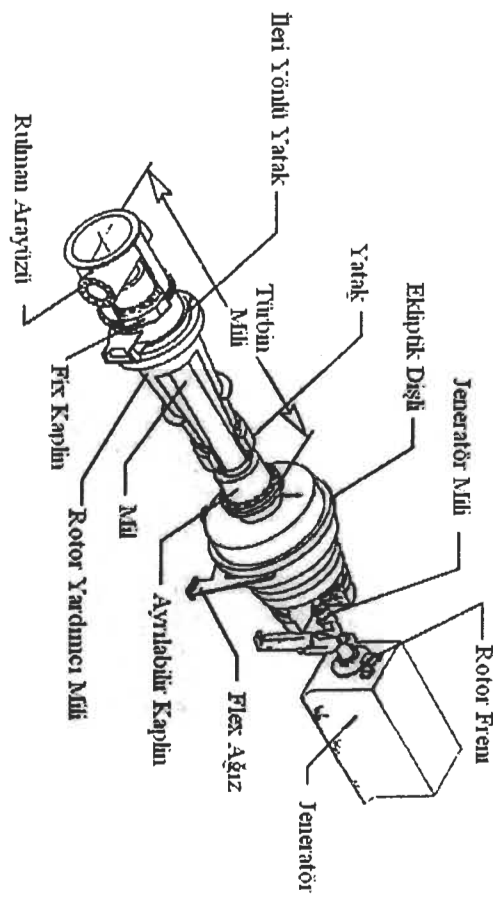
Temel olarak YERT bünyesinde şu elemanları bulundurrur; türbin mili, hız artırıcı dişli, jeneratör mili, rotor freni ve elektriksel jeneratör, kontrol birimi, yağlama birimi ve soğutma birimi. Bazı küçük ölçekli türbinler ile birkaç orta ölçekli türbinde direkt güç iletimi(vites kutusu ve diğer ara elemanlar yok) mevcuttur. (Spera, 1998)

Türbin mili kısmı YERT için en önemli kısımdır. Rotor ağırlığı, itme kuvveti, tork ve yanıl kuvvetler bu kısımda elemanların ömrünü etkiler. Bu sebepten buradaki malzeme ve tasarım en üst kalitede olmalıdır.

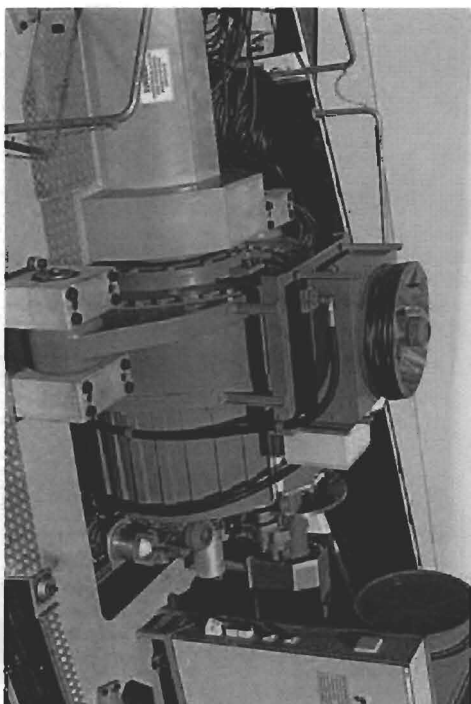
YERT'lerdeki hız arttırıcı dişlide bir "yukarı-adım oranı" mevcuttur(yukarı adım oranı=jeneratör mili hızı/türbin mili hızı). Kanat uç hızı, rotor çapı ve jeneratör tasarımı bu değerin 1-100 arasında hangi değeri alacağını belirler. Paralel eksenli, dış çember biçimli ve hibrit tipli vites kutuları mevcuttur. Bunlardan daha ziyade paralel eksenli olanlar tercih edilirler. (Şekil-5.9)



Şekil-5.7 Küçük(a) ve orta ölçekli(b) türbinler (Spera, 1998)



Şekil-5.8 Büyük türbinler için biçimlenme (Spera, 1998)



Şekil 5.9 Dişli Kutusu

Jeneratörlerdeki ana görev; rotor tarafından üretilen mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürmektir. Senkron veya Asenkron olarak iki tipte olabilmeler.

Senkron jeneratörler bağılandıkları şebeke ile aynı frekansta çalışırlar ve kendilerini mıknatıslama avantajları vardır. Bunun yanında şebekeye bağlanma işlemleri çok hassas biçimde yapılmalıdır ve maliyetleri de yüksektir.

Asenkron jeneratörleri ise düşük maliyetleri nedeniyle rüzgar türbinlerinde tercih edilirler. Aşırı yüklenme gibi avantajlara sahiptir. Asenkron jeneratörlerde jeneratör kayması olayı gerçekleşir. Bu olay boşta çalışma ve maksimum güç dönme hızları arasındaki farktır ve

asenكرون jeneratörlerde bu fark çok küçüktür. Dezavantajları ise şebekeden mknratıslandıktan sonra çalışmaya başlayabilmeleridir. Yani çalışmadan önce şebekeden güç çekerler. Bu sorunu aşabilmek için de kapasitör kullanılarak bu akımı kompanze etmek gerekir.



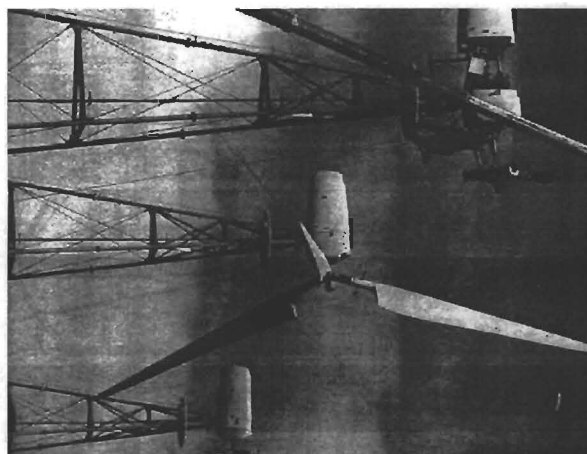
Şekil-5.10 Rüzgar türbini jeneratörü

Kule Ünitesi:

YERT kulesi rotoru ve güç ünitesini istenilen göbek yüksekliğine çıkaracak kısımlardır. Minimum kule yüksekliği; istenilen yer açıklığı ile (süpürülen alanın en alt noktası ile yer arası) tarif edilir. Yüksek kuleler, daha yüksek ortalama hızlar getirmenin yanısıra ekstra maliyet unsurdur. Kulenin temel elemanları; kule(çelik veya kuvvetlendirilmiş beton) ve gerilim halatlarıdır. (Şeki-5.11) (Spera, 1998)

Yer Ekipman İstasyonu:

Bu kısımda YERT için önemli olan güç ayar ve kontrol ekipmanları, yer kontrol ünitesi ve data kayıt cihazları bulunur.



Şekil-5.11 Kule ve kablolar (Spera, 1998)

5.1.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DET)

Bu türbinlerde birkaç farklı tip mevcuttur. En bilinenlerinden biri Darrieus tipidir. (Şekil-

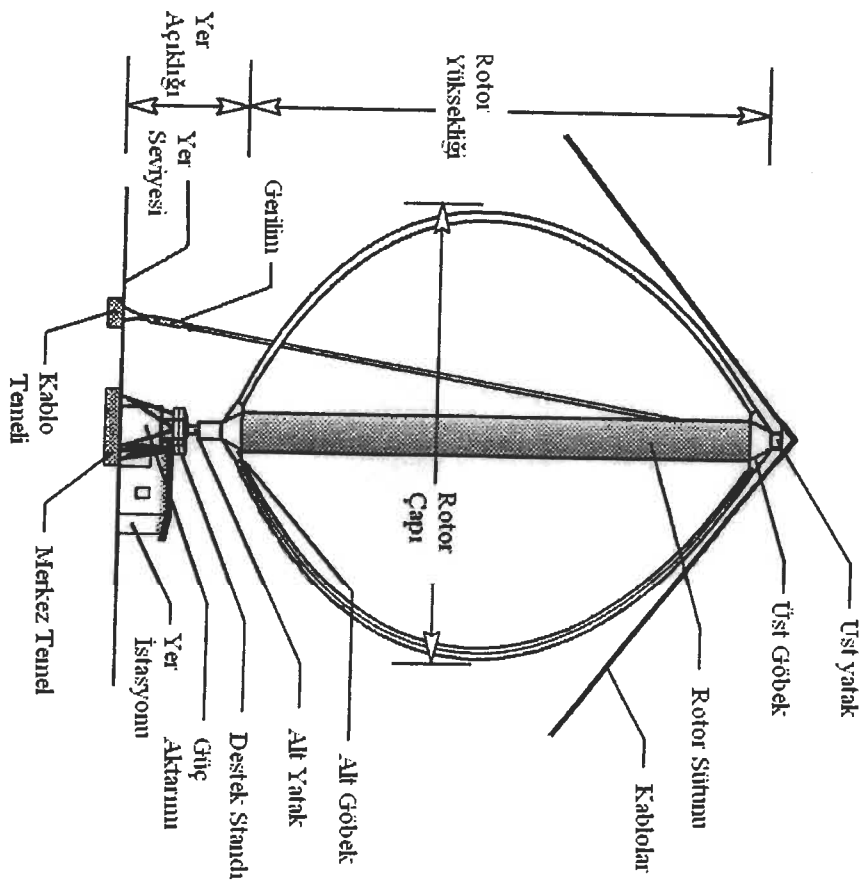
5.12) Şu birimlerden oluşur.

1)Rotor, 2)Güç Ünitesi, 3)Destek Ünitesi, 4)Temel, 5)Yer Ekipman İstasyonu

Darrieus türbini 1920 yılında Fransız Georges Darrieus tarafından bulunan milli bir türbindir.

Eski İran türbinlerine benzerlikler gösterir. Herhangi bir dönme sağlanabilir ve bu sayede yağlama ihtiyacı duymaz. Deavantajı ise tahrik gerektirmesidir. (Spera, 1998)

YERT ile aynı isimli alt sistemlere sahip olsa da bu sistemler YERT'tekinden farklı çalışmaktadır.



Şekil-5.12 Darrieus türbini (Spera, 1998)

Rotor Sistemi:

Üstteki şekilde görüldüğü gibi rotorun ana elemanları eğik kanatlarıdır. Bunlar alt ve üstte göbekte bağlanmış halde bulunurlar. Gerilmeleri azaltmak için kanatlar bir "troposkien" (Yunanca'da dönen ip) biçiminde dururlar. Rotor, iki veya üç kanatlı olur. Rotorun çapı; ekvatordaki süpürme alanının genişliğidir. Rotor yüksekliği ise göbeğe alttan ve üstten bağlantılar arası mesafedir ve rotor çapından %15-30 daha büyüktür.

Rotor malzemesi olarak alüminyum alaşımları tercih edilir. Kanatlar alt ve üstte civatalanmıştır ve herbiri rotor sütununa rijit bağlıdır. Bu sebepten rotor sütunu iki göbekten tork alıp, bunu güç ünitesine iletir.

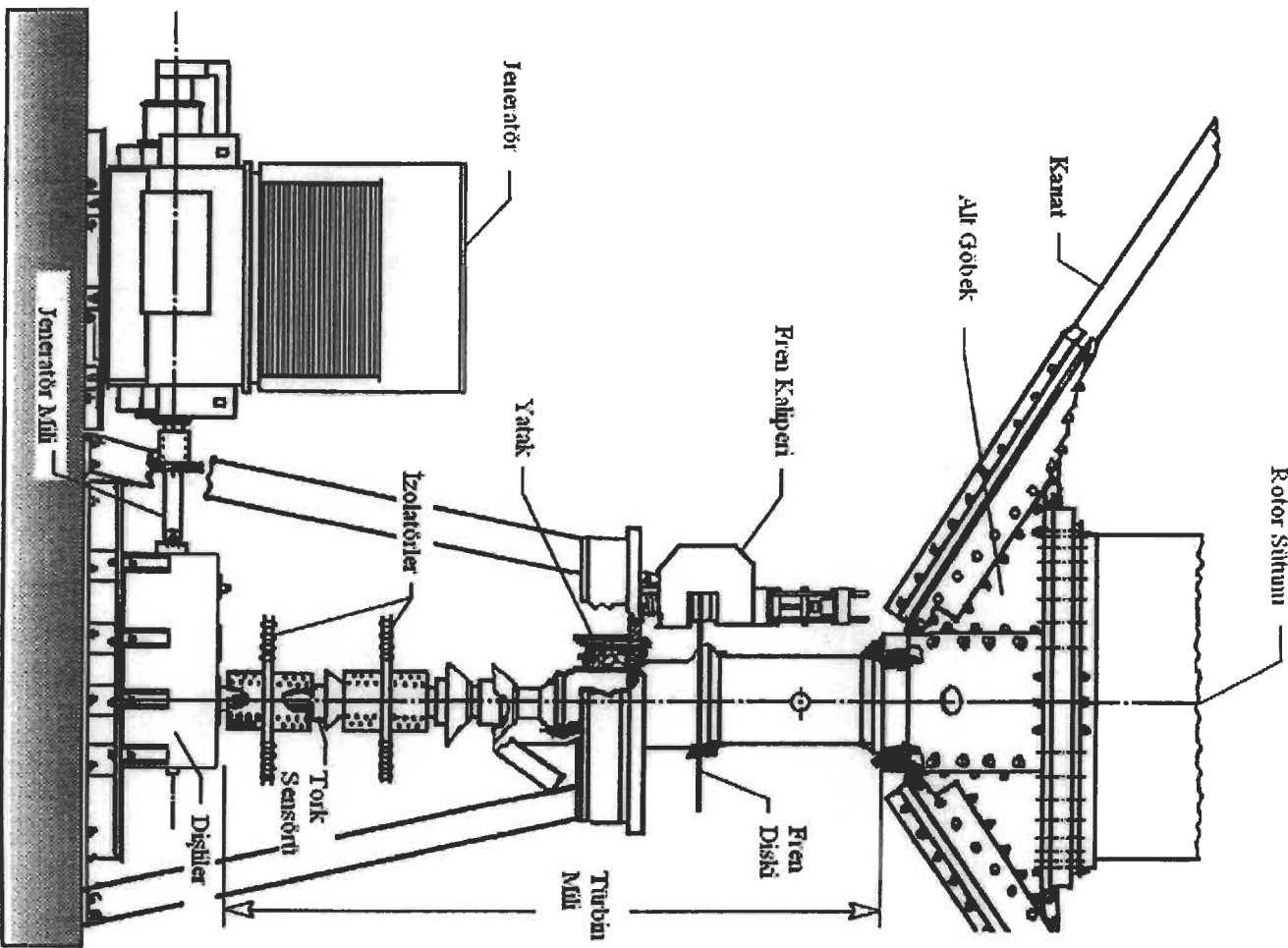
Güç Birimleri:

Şekil-5.13 ile Şekil-5.7-5.8'e bakılınca YERT ile DET arasındaki üç temel güç birimi farkı görülür. Birincisi DET'teki güç birimleri parçaları ya yerde yada yere en yakın konumdadır.

Bu da daha kolay bakım imkanı sağlar. İkinci olarak DET mili eksenel yük ve tork taşır. Eğilme yükü yoktur. Üçüncü olarak ise DET rotor frenleri YERT'inkilere göre daha büyük olmalıdır. Çünkü maksimum hızda iken Darrieus motorunun durdurmak daha zordur. Buna daha fazla katkı sağlaması için, fren; türbin mili üzerinde bile konumlandırılabilir.

Destek Ünitesi:

Bu ünite, üst ve alt rotor yataklarını, gerilim kablolarını ve destek standını içerir. Darrieus rotoru, 3 veya 4 kabloyla dikey düzlemde ve rotorun üst ucundan destek gerektirir. Bu kablolar 30-40°'lik açılar yaparak gergin biçimde dururlar. DET sistem frekansı bu kablolarda oluşan gerilim ve bunların ebatların ile belirlenir. Kablolar genellikle yumuşak şartlar için boyutlandırılıp, gerilirler. Bu sayede oluşturdıkları temel sistem frekansları rotor hızından büyük, kanat geçiş frekansından küçük olur. Destek standının uzunluğu; yer açıklığına eşittir. Güvenlik açısından minimum yer açıklığı gerekir. Ama YERT'teki kadar önemli bir durum teşkil etmez. Çünkü kanadın yere yakın konumundaki hız düşüktür.



Şekil-5.13 Modern DET parçaları (Spera, 1998)

Bu faktörler sonucunda aynı süpürme alanına sahip bir DET ile YERT'ten DET daha kısadır. Çünkü ortalama rüzgar hızı, yükseklikle orantılıdır. Ortalama rüzgar gücü yoğunluğu DET rotorunda, YERT'ten genelde düşüktür. (Spera, 1998)

5.1.3 Bazı Türbinlerin Kıyaslanması

Bu bölümde piyasa bulunan bazı türbinler, özelliklerine göre bir kıyaslamaya tabi tutularak daha iyi biçimde tanıtılmalarına çalışılacaktır.

Çizelge-5.1 Kategori 1-küçük rüzgar türbinler (0.4-50 kW)

Üretici Firma	Windsar-400	Windsar-1500	Windsar-10000	Southwest Wind Power-Air 403	Southwest Wind Power-Air 4032	Atlantic Orient Wind Power-AOC 15/50
Güç (kW)	0.4	1.5	10	0.4	3.2	50
Kanat Sayısı	3	3	3	3	2	3
Rotor Çapı (m)	1.22	3.12	7	1.14	5	15
Üretim Rüzgar Hızı (m/s)	3.1-16	2.5-16	3.4-13	3-12.5	3.1-12	
Dayanma Rüzgar Hızı (m/s)	42	42	42			
Hız Kontrolü	Manyetik	Aerodinamik	Aero.			
Volaj (V)	12,24	12,24,48,96,120	48,120	12,24,48	24,32,48,240	
Kule Yüksekliği (m)		6,12,18	18,24,30			
Fren	Manyetik	Manyetik				
Ağırlık (kg)				6	55	

Çizelge-5.2 Kategori 2-orta büyüklükteki rüzgar türbinleri (300-800 kW)

Üretici Firma	Enercon-E33	Turbowinds-T400-34	Turbowinds-T600-48	Nordex-N43	Bonus Energy	DeWind-D4	Enercon-E48	Nordex-N50
Güç (kW)	330	400	600	600	600	600	800	800
Kanat Sayısı	3	3	3	3	3	3	3	3
Rotor Çapı (m)	33.4	34	48	43	44	46,48	48	50
Güç Kontrolü	Kanat açısı değişimi	Aktif Durdurma	Aktif Durdurma	Durdurma	Durdurma	Kanat açısı değişimi	Kanat açısı değişimi	Durdurma
Jen. Voltajı		690	690	690	690	690		690
Kule Yüksekliği (m)	50			40,50	35-60	40,55,60,70	76	46,50,70
Çalışma Rüzgar Hızı (m/s)	2.5-12	3-14	3-12.5	2.5-15		2.5-11.5	3-13	2.5-15
Dayanma(Stop) Rüzgar Hızı (m/s)	28-34	25-60	25-60	25		22-55	28-34	25
Fren	Rotor+ Kanat	Hidrolik	Hidrolik	Mek.+ Aero.	Mek.+ Havalı Disk	Disk Fren	Rotor+ Kanat	Mek.+ Aero.
Taradığı Alan (m ²)	876			1452	1520	1662	1810	1964
Maksimum Uç Hız (m/s)	79			61.2			80	62.18

Çizelge-5.3 Kategori 3-büyük rüzgar türbinleri (1000-5000 kW)

Üretici Firma	Bonus Energy	DeWind-D6	Vestas-V82	Repower-MM70	Bonus Energy	Vestas-V90	Enercon-E112	Repower-5M
Güç (kW)	1000	1000	1650	2000	2000	3000	4500	5000
Kanat Sayısı	3	3	3	3	3	3	3	3
Rotor Çapı (m)	54.2	60	82	70	76	90	114	126
Güç Kontrolü	Combistall	Kanat açısı değişimi	Aktif Durdurma	Kanat açısı değişimi	Combistall	Kanat açısı değişimi	Kanat açısı değişimi	Kanat açısı değişimi
Jen. Voltajı	690	690	690	690	690	690	690	690
Kule Yüksekliği (m)	70	60-91.5	78	80		105	124	
Çalışma Rüzgar Hızı (m/s)		2.5-11.5	3.5-13	3.5-13.5		4-15	2.5-13.5	3.5-13
Dayanma(Stop) Rüzgar Hızı (m/s)		23-50	20-32	25		25	28-34	25-30
Fren	Çift-Disk	Disk Fren	Hidrolik	Disk Fren	Hidrolik Disk	Hidrolik	Mekanik	Mekanik
Ağırlık (kg)			222000			383000		450000
Taradığı Alan (m ²)	2300	3019	5281		4500	6362	10207	12469
Maksimum Uç Hız (m/s)							78	

5.2 Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Bağlanması

Rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin şebeke bağlantısı, sonsuz güçlü şebekeye bağlantı ve zayıf şebekeye bağlantı olarak ayrılmalıdır. Rüzgar türbinleri genellikle, sonsuz güçlü şebekeden uzak yerlerde dirler. Bu nedenle zayıf şebekeye bağlantı yapılmalıdır. Büyük rüzgar enerjisi çeviricilerinde ve rüzgar enerjisi tarlalarında güç, şebekenin ilettiği güç ile aynı seviyeye ulaşabilir. Bunun anlamı, şebekenin ve rüzgar tarlasının karşılıklı etkin olmasıdır. Rüzgar enerjisi çeviricilerinin şebeke bağlantısı için gereken cihazlar ve şartlar şunlardır:

-Anahat donanımında devre kesici, minimum güç devresini açacak kapasitede olmalı ve maksimum kısa devre akımına göre tasarımı yapılmalıdır. (Heier, 1998)

-Senkron ve asenkron jeneratörler için düşük gerilim, yüksek gerilim, düşük frekans(48-50 Hz) ve yüksek frekans(50-52 Hz) koruma cihazları gerekmektedir. Evireç için jeneratörlerdeki gibi gerilim koruması gerekmez fakat frekans koruması gerekir.

- Reaktif güç faktörü 0.9 kapasitif ve 0.8 endüktif arasında kompanze edilmelidir.
- Bağlantı, bütün harici hatlarda gerilim olması halinde gerçekleşir.
- Çalışma koşullarının bozulmaması için harmonik akımları, gerilim dalgalanmaları ile ilgili geri besleme alınması gerekir.

5.2.1 Şebeke Bağlantısı

1980'lerde rüzgar enerjisi çeviricileri için kullanılan jeneratörün şebekeye bağlantısı, geleneksel enerji kaynaklarının montajına dayanmaktaydı. 1980'lerin sonunda elektronik çeviricilerin 50 kW'lık rüzgar enerjisi çeviricilerinde kullanılmaya başlanmasıyla yeni bir kapı açılmış oldu. Böylece değişken hızlı rüzgar türbinlerinin kullanılması sağlanmış oldu. (Heier, 1998)

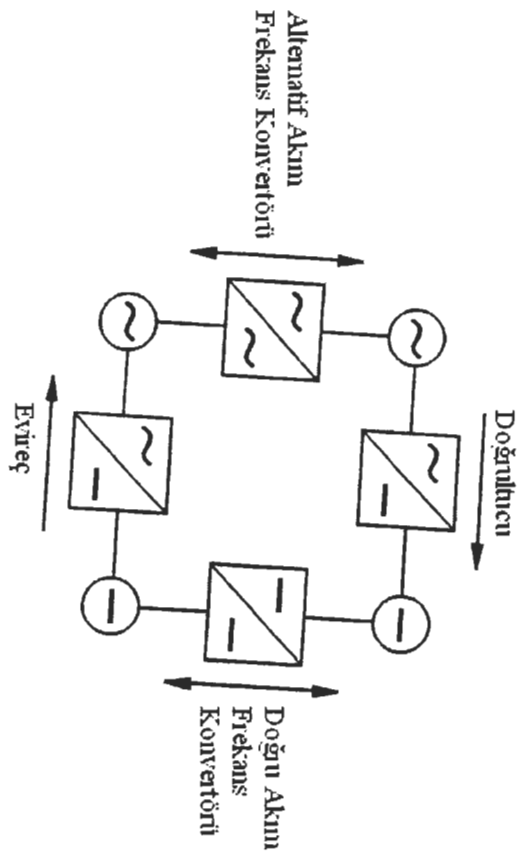
Asenkron jeneratörlü türbin ile karakterize edilen ve şebekeye doğrudan bağlı sistemlerin kullanımında son yıllarda artış olmuştur. Bununla beraber dişli çarkı olmayan, bilezikli tip, kontrollü veya kontrolsüz doğrultucu ile şebeke veya kendinden komütasyonlu eviricilerin kullanıldığı senkron makineler de yaygındır. Bu tür sistemlerdeki maliyet artışlarına; türbin hızının, hakim rüzgar hızına göre ayarlanması, rüzgar enerjisi çeviricilerinin çevre ile uyumlu olması ve yüksek enerji çıkışı sağlanması nedeniyle katlanılabılır.

Bu tür sistemler, rüzgar türbinine bağlı jeneratördeki değişken frekanslı elektrik enerjisini, sabit frekans ve gerilimdeki şebekeye iletecek frekans çevirici sistemlere ihtiyaç duyarlar. (Heier, 1998)

5.2.2 Frekans Çevirici Sistemler

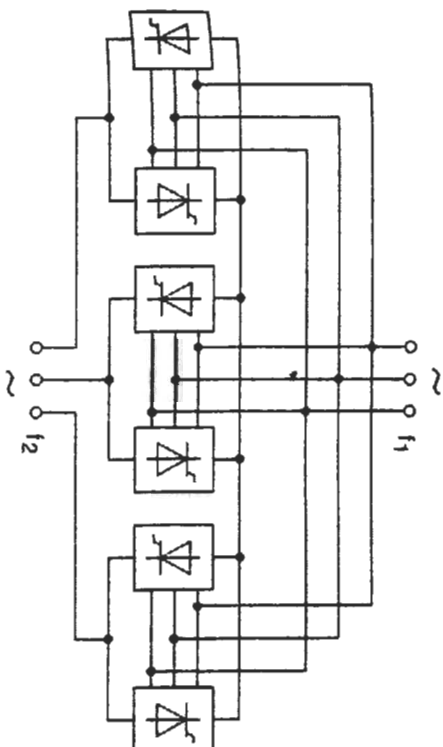
Elektronik frekans çeviricileri, elektrik enerjisinin çevrimi ve kontrolü için yaygın çözümlerden biridir. Rüzgar enerjisi çeviricilerinde de, özellikle değişken hızlı sistemlerde, jeneratörün frekans ve gerilimini şebeke frekans ve gerilimine ayarlamak için kullanılmaktadırlar. Döner alanlı transformatorlere göre az kayıplı dönüştürüm, az hacim ve ağırlık, az bakım gereksinimi, aşınmasız çalışma gibi avantajları vardır.

Frekans çevirici kullanılarak yapılan enerji çevrimi Şekil-5.14'de verilmiştir. Bu çevirici sistemlerin başlıca parçaları; yarıiletken anahtarlar, elemanları, elektronik sinyal işleme ünitesi, koruma ve düzenleme yapan elemanlardır. (Heier, 1998)

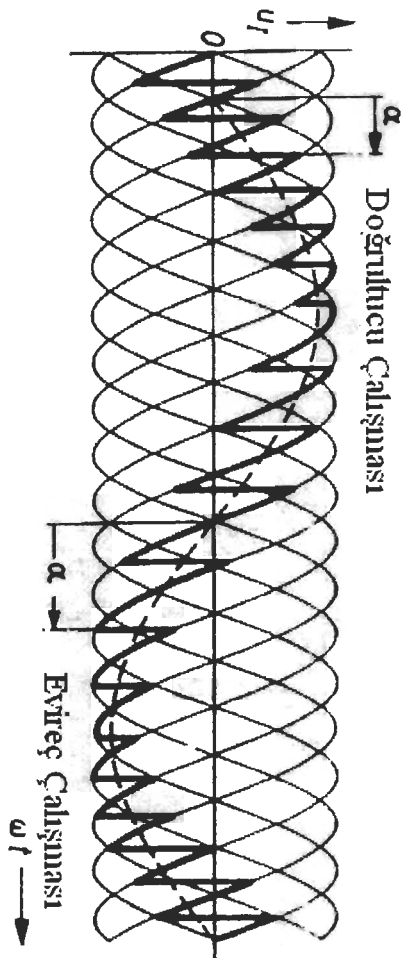


Şekil-5.14 Güç konvertörlerinde elektrik enerjisi dönüşümü (Heier, 1998)

Frekansın azalmasının istendiği durumlarda doğrudan frekans çeviricileri kullanılır. Şekil-5.15'te doğrudan frekans çeviricisinin şematik bağlantı diyagramı verilmiştir. Bu tip çeviricilerde sistemi kaynak veya tüketici olarak çalıştırmak için iki adet paralel olmayan köprü çevirici vardır. Makine frekansı(f_2)'den şebeke frekansına(f_1) çevrim; şebeke için gerekli frekans, faz sırası ve gerilimin genliğine göre anahtarların ateşlenmesi ile elde edilir. Şekil-5.16'da faz üzerinde gerilim şekli verilmiştir.



Şekil-5.15 Doğrudan frekans çevirici (Heier, 1998)



Şekil-5.16 Faz üzerinde gerilimin durumu (Heier, 1998)

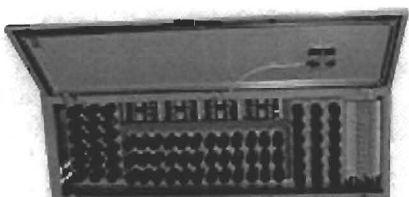
5.4 Enerjinin Depolanması

Rüzgar enerjisi sürekli değişken bir yapıda olduğundan, her zaman aynı gücün elde edilmesi mümkün değildir. Bu sebepten rüzgarın yetersiz kaldığı durumlarda elektrik ihtiyacına cevap vermek için, rüzgarın yeterli olduğu zamanlarda enerjinin depolanması bir gerekliliktir. Küçük ölçekli sistemlerde enerji depolanmasının en genel yöntemi batarya kullanımıdır. Bataryalarda; sınırlı şarj oranı, kısıtlı ömür ve aşırı şarj duruma direnç gösterememe gibi belirgin bazı problemler mevcuttur. Düzgün şarj etme işlemi mutlaka bir kontrol gerektirir. Bu kontrolde giriş voltajı; batarya şarj voltajına dönüşecek ve aşırı şarj engellenecektir. Bataryalar tekrar şarj edilecekse, değişmeyen bir şarj akımından faydalanmak yerinde olur. Tüm bu sebeplerden rüzgar enerjisinin depolanması oldukça önemli bir unsurdur.

6. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ

Önceki bölümde rüzgar türbinlerini oluşturan parçalardan ve işlevlerinden bahsedilmişti. Bu kısımda ise rüzgar türbinlerinde başarılı bir şekilde güç elde edilmesi için en önemli unsur olan; ve bahsedilen tüm parçalar arasındaki iletişimi sağlayan kontrol işlevinden bahsedilecektir. Örneğin bir kontrol sistemi; rüzgar hızını ölçer, sistem elemanlarının çalışmasını denetler, kanat açısı ayarlarını uygular ve kontaktörlerin kapanarak rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlanmasını sağlar. Kontrol sistemleri dinamik olarak; kanat açılarının ayarını yapar, yüksek rüzgar hızlarında jeneratör torkunu ayarlayarak gücü kontrol eder. Kontrol sistemi olmaksızın güvenli ve başarılı güç üretmek mümkün olmaz.

Kontrol sistemi bunlardan başka üretilen gücün kalitesinden sorumludur. Güç kalitesini koruyabilmek için çok sayıda elektrik kapasitörünü (Şekil-6.1) açıp kapayarak reaktif gücü ayarlar.



Şekil-6.1 Kapasitör ünitesi [16]

Güç kalitesi ifadesi; şebekedeki volaj stabilitesini, frekans stabilitesini ve farklı elektriksel gürültülerin varlığını anlatır. Rüzgarın yeterli hıza eriştiği doğru zamanda jeneratörün şebekeye bağlanması önemlidir.

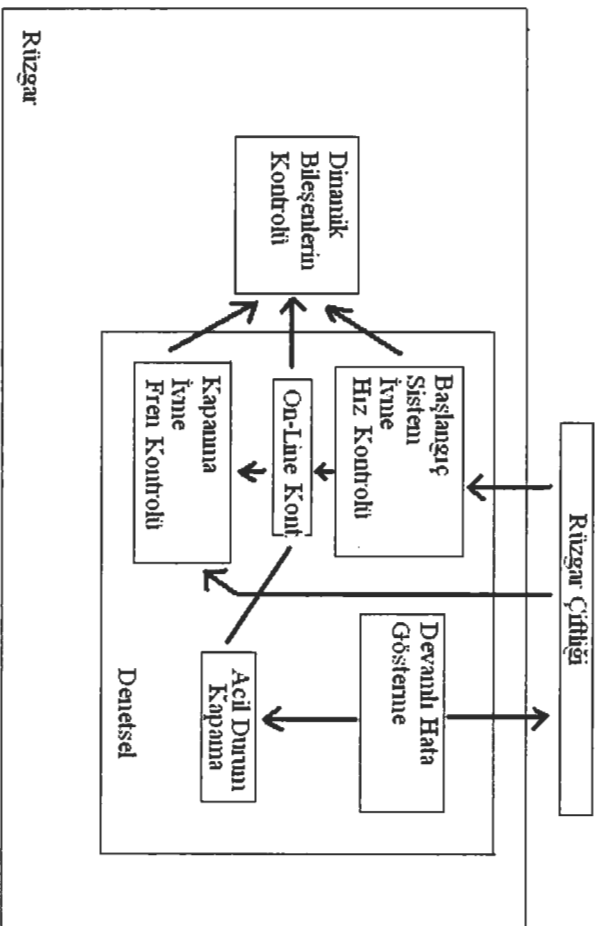
Rüzgar türbinlerinde 2 seviyede kontrol mevcuttur: yönetsel ve dinamik kontrol. Yönetsel kontrol, türbin operasyonunu yönetir ve gürültüler, kontrol sistemlerini sıralar (frenleme veya kontaktör kapanması gibi). Dinamik kontrol ise kontrol işlevlerinin mekanik etkilerinin gözlemlendiği olayları yönetir (kanat açısı değiştirmek gibi).

Bu iki sistem türbinin genel kontrol aşamalarında beraberce yada ayrı işlev görürler. İlerleyen bölümlerde tüm bu işlevler ve mekanizmalar tanıtılıp örnekler verilerek anlatılacaktır.

6.1 Rüzgar Türbinlerindeki Kontrol Sistemlerinin Tipleri

Kontrol sisteminin rüzgar türbinindeki amacı, türbinin güvenli ve otomatik çalışmasını sağlamaktır. Bu sayede çalışma maliyetleri azalır, istikrarlı bir dinamik cevap sağlanır, üretim kalitesi artar ve türbin güvenliği korunur. Bu operasyon genelde türbinden alınacak enerjinin en büyük olması ve türbin yüklerinin minimum olması isteğiyle tasarlanır.

Kontrol sistemleri genelde üç ana bölümden oluşur; (1) rüzgar çiftliğindeki çok sayıda birimi kontrol eden ana kontrol birimi (2) her bir türbin için yönetsel kontrolör (3) gerekirse her türbin için ayrı dinamik kontrolörler. Bu durumun hiyerarşik gösterimi Şekil-6.2'de verilmiştir.



Şekil-6.2 Kontrol sistem bileşenleri (Manwell, 2002)

Rüzgar çiftliği kontrolü; yönetsel ve veri toplama sistemi (SCADA-Supervisory Control and Data Acquisition) ile türbin operasyonunu başlatır ve durdurur, çok sayıda türbinin operasyonunu idare eder.

Bu SCADA sistemleri her bir türbindeki yönetsel kontrolör ile iletişim halindedir. Bu sistemi uygulayan birçok firma vardır. Nordex firması da bunlardan biridir. Nordex'te uygulanan SCADA programı tüm türbinlerin ve parkın kontrol ve regülasyonunu sağlarken tüm verilerin kaydını tutar ve istenilen yere gerçek zamanlı şekilde gönderir. Veri kategorileri şunlar olabilir: türbin durumu ve çalışması, günlük, aylık ve yıllık enerji üretimi, türbinin spesifik rüzgar durumu, iklimsel kayıtlar vs. Bunların dışında hata mesajları ve alarmlar uygulanır.

Genel olarak türbinlerde kontrole geri dönecek olursak yönetsel kontrolde türbinler, orta ve büyük ölçekli değişimlere göre kategorize edilmektedir. Öyle ki iki kontrol işlemi arasında uzun süreler geçebilir. Geleneksel anlamda yönetsel kontrolde çalışma koşulları arası geçişler yapılır. Rüzgar durumları görüntülenerek yüksek yük koşulları ve limit koşulları ile kıyaslama sağlanır. Bu sayede türbin açılır, kapanır veya istenilen koşullara getirilir. (Manwell, 2002)

Bu duruma ters olarak dinamik kontrolörler düzenli olarak değişimleri yönetirler. Dinamik sistemler daha büyük sistem dinamiklerinin, kontrol olayının sonucunu etkilediği durumlarda kullanılırlar. Bir dinamik kontrol, türbinin sadece bir altistemini yönetir, ve diğer altistemlerin kontrolünü diğer dinamik kontrolörlere, tüm dinamik kontrolörlerin koordineli çalışma işini de yönetsel kontrole bırakır. Dinamik kontrol sistemleri kanat açısını ayarlayarak torku azaltır, elektronik dönüştürücüden güç akışını kontrol eder veya aktivatörün pozisyonunu kontrol eder. Tüm bu kontrolleri bir aktivatör veya switch yardımıyla sağlar.

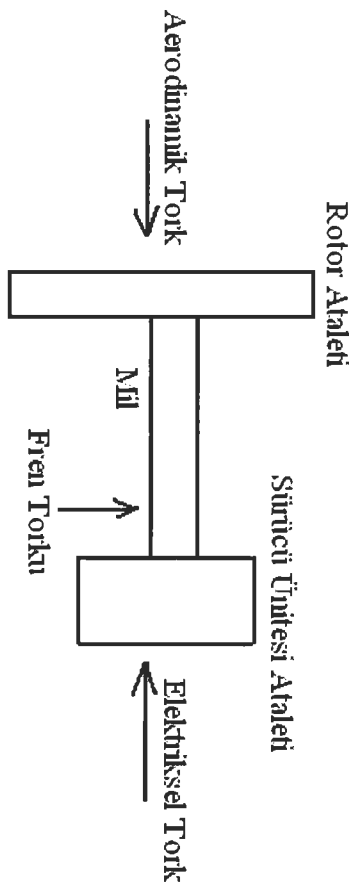
6.2 Rüzgar Türbinlerinin Genel Kontrol Sistemleri

Türbinlerdeki yönetsel ve dinamik kontrol sistemleri birbirlerinden farklıdır fakat bir ortak amaç etrafında birleşirler: rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine çevrilmesi. Bu temel amaç, temel bileşenleri belirler. (Manwell, 2002)

6.2.1 Temel Türbin Modeli

Basitleştirilmiş bir yatay eksenli rüzgar türbin modeli, kontrol sistemlerinin modern rüzgar türbinlerindeki entegrasyonunu anlamamıza yardımcı olur. Tipik bir rüzgar türbininde, bir ucunda yüksek rotor ataletli diğer ucunda sürücü ünitesi ataletli bir sürücü mili bulunur.

Rotora bir aerodinamik tork, jeneratöre de bir elektriksel tork etkir. (Şekil-6.3)



Şekil-6.3 Basit türbin modeli (Manwell, 2002)

Aerodinamik tork, tüm türbin çalışma şartlarına etkir. Aerodinamik tork, rüzgardan elde edilen net tork olup, rotor uç hız oranı, kanat geometrisi, rüzgar hızından etkilenir. Değişken hızlı türbinler, farklı hızlarda çalışabilir; kanat açısı ayarlı türbinlerde kanat veya rotor geometrisi değişebilir; yardımcı sürüclü mekanizmalı türbinler, rotor sürüklemesini geliştirebilir. (Manwell, 2002)

Düşük hızlı rüzgar durumunda kontrol sistemi, aerodinamik torku maksimum yapmaya çalışırken; yüksek hızlı rüzgarlarda aerodinamik torku sınırlandırma eğilimi gösterebilir.

Sabit hıza yakın çalışacak türbinlerde, jeneratör torku; aerodinamik tork ve sürücü ünitesi ile jeneratör dinamiğinin fonksiyonudur.

Sabit Hız Jeneratör Torku= $f(\text{Aerodinamik Tork, Sistem Dinamiği})$

6.1

Sürtücü ünitesi ve jeneratör dinamikleri birçok bileşenin tasarımına bağlıdır ve kontrol edilemez. Bu sebepten jeneratörün torkunu kontrol edecek tek yöntem, aerodinamik torku etkileyen bir sabit hızlı rüzgar türbidir. (Manwell, 2002)

Değişken hızlı türbinlerde jeneratör torku, aerodinamik tork ile diğer sistem bileşenlerinden bağımsız olarak çeşitlendirilir.

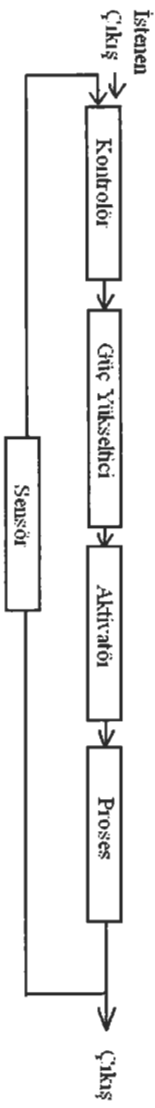
Değişken Hız Jeneratör Torku= $f(\text{Jeneratör Torku Kontrol Sistemi})$

6.2

Böyle bir sistemde aerodinamik ve jeneratör torkları bağımsız kontrol edilebilir. Hız değişimi, aerodinamik veya jeneratör torku değiştirilerek yani motorun ivmelenme ve negatif ivmelenme durumları ile sağlanır.

6.2.2 Kontrol Sistemi Bileşenleri

Mekanik ve elektriksel proseslerin kontrolünde 5 temel bileşenden faydalanılır. (Şekil-6.4)



Şekil-6.4 Kontrol sistem bileşenleri (Manwell, 2002)

- İşlemin değişmesini veya etkilenmesini sağlayacak nokta veya noktalara sahip bir sistem
- Kontrol sisteminin işlem merkeziyle iletişim kuracak sensör ve göstergeler
- Donanım veya yazılım olarak hangi kontrol aksiyonunun gerçekleştirileceğini belirleyen bir kontrolör (bilgisayar, elektrik devresi veya mekanik sistemler olabilir)
- Kontrol aksiyonu için güç eldesi amaçlayan güç yükselticileri
- Aktivatör veya bileşenler ile sistem çalışmasının değiştirilmesi

6.2.2.1 Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Edilebilir Prosesler

Bu prosesler şunlardır:

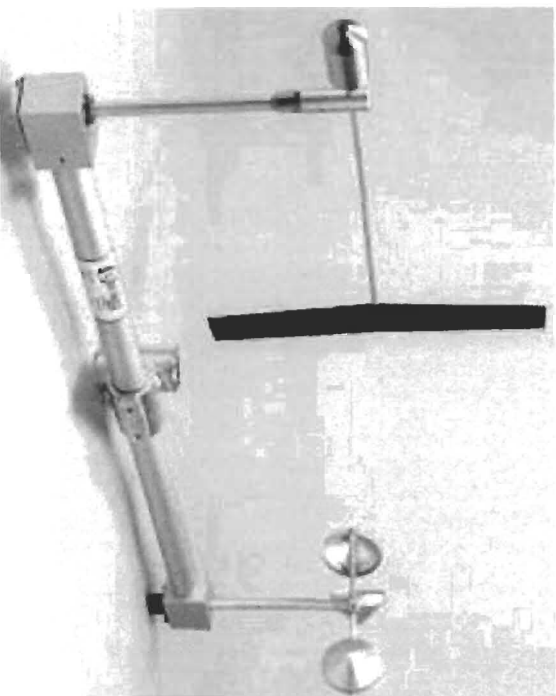
- Aerodinamik torkun oluşumu
- Jeneratör torkunun oluşumu
- Elektrik akımı ve akışkan akışının harekete dönüşümü
- Rüzgar enerjisinin elektrik gücüne dönüşümü

6.2.2.2 Rüzgar Türbini Sensörleri

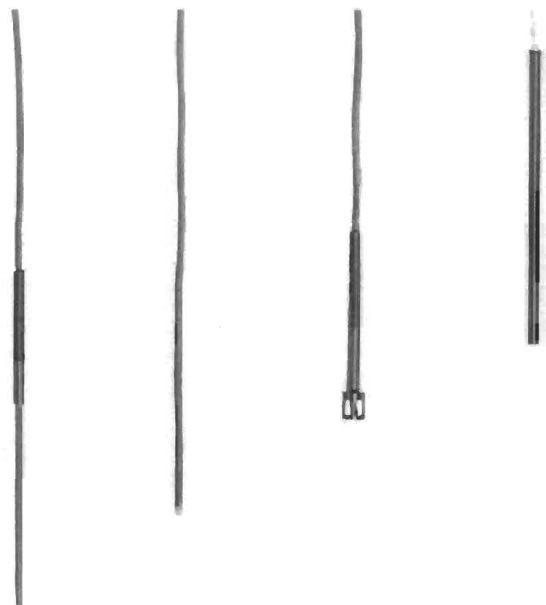
Modern bir rüzgar türbininde birçok sensör ile türbin çalışmasının önemli ölçütleri, kontrol işlemine katkıda bulunur. Ölçülen değişkenler;

- Hız (jeneratör hızı, rotor hızı, rüzgar hızı, dönme yönü)
- Sıcaklık (dişli yağı, hidrolik yağı, dişli yatak, jeneratör yatak, jeneratör sarğı, hava, elektronik aletler)
- Pozisyon (kanat açısı, kanat pozisyonu, rüzgar yönü, tilt açısı, kanat azimut)

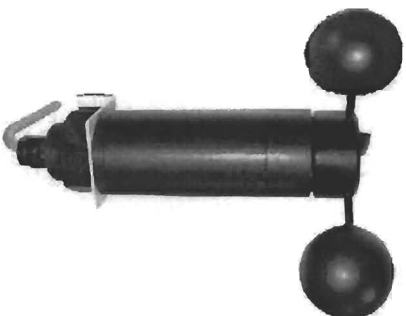
- Elektrik karakteristikleri (şebeke gücü, akım, güç faktörü, voltaj, şebeke frekansı, toprak arızaları, çevirici operasyonu)
 - Akışkan akış parametreleri (hidrolik veya pnömatik basınç, hidrolik yağ seviyesi, hidrolik yağ akışı)
 - Hareket, gerilme ve stres (kule uç ivmesi, kule gerilimi, mil torku, dişli titreşimi, kanat kök eğilme momenti)
 - Çevresel şartlar (türbin veya sensör buzlanması, nem, yıldırım)
- Bazı sensör tipleri aşağıda verilmiştir.



Şekil-6.5 Rüzgar yönü ve hızı ölçüm sensör sistemi [17]



Şekil-6.6 Sıcaklık sensörleri [17]



Şekil-6.7 Anemometre [17]



Şekil-6.8 Rüzgar sensörü [17]

6.2.2.3 Rüzgar Türbini Kontrolörleri

Kontrolörler, türbin operasyonunun bir bileşeninin ölçümü ile türbin operasyonunu etkileyen aksiyon arasında iletişim sağlarlar. Bunlar;

-Mekanik mekanizmalar (kuyruk rotorları, bağlantılar, yaylar, governörler vs.) olup kanat açısı, rotor hızı gibi kontrolleri sağlarlar

-Elektrik devreleri ile devre sensör çıkışı-kontrol aksiyonu arasında direkt bağlantı sağlarlar. Ayrıca tüm sistem dinamik operasyonunu şekillendirmek için input sinyallerine dinamik cevaplar verirler.

-Bilgisayarlar ile dijital veya analog giriş-çıkışları yönetirler ve karmaşık mantık işlemleri uygularlar. Daha ayrıntılı açıklamalar ilerleyen bölümlerde verilecektir.

6.2.2.4 Rüzgar Türbinlerinde Güç Yükselticileri

Kontrolörden gelen sinyal eğer aktivatörü harekete geçirecek güce sahip değilse kontrolör ve aktivatör arasında bir yükseltici kullanmak gerekir. Geleneksel biçimleri;

-Switchler (küçük çaplı akım veya kuvvetlerin kontrolü) (röleler, kontaktörler, transistör ve silikon kontrollü doğrultucular)

-Elektriksel yükselticiler (kontrol voltajını veya akımı belli bir çevreye direkt yükseltirler)

-Hidrolik pompanatır (yüksek basınçlı ve valf kontrollü akışkan sağlarlar)

Güç yükselticilerine her zaman ihtiyaç duyulmayabilir. (Manwell, 2002)

6.2.2.5 Rüzgar Türbini Aktivatörleri

Kullanılan aktivatörler şunlardır;

-Elektromekanik elemanlar (DC motorları, step motorları, katı hal kontrollü AC motorları, lineer aktivatörler, mknatıslar)

-Hidrolik pistonlar

-Rezistans ısıtıcı ve fanlar (sıcaklık kontrolü)

Ayrıca aktivatör sistemleri; dişli, bağlama elemanı veya aktivasyon güç yada yönünü değiştirecek elemanları içerebilirler.

6.2.3 Türbin Proseslerinin Kontrolü

Aerodinamik ve jeneratör torklarının oluşması işlemi kontrolör aksiyonundan etkilenir.

6.2.3.1 Aerodinamik Tork Kontrolü

Üstte açıklandığı üzere, aerodinamik tork; rotor uç hız oranı ve C_p , rotor geometrisi, rüzgar hızı, kanat açısı ve ayarları gibi parametrelerden oluşur. Bu sayılardan rüzgar hızı dışındakiler aerodinamik torku kontrol amacıyla kullanılabilirler.

Uç hız oranının değişimleri, rotor verimini değiştirmek için kullanılır. Durdurma (kanat hareketi ile türbini yavaşlatma ve durdurma) ayarlı sabit hızlı türbinlerde; düşük hız oranları ve dolayısıyla düşük C_p ; aerodinamik torku yüksek rüzgar hızlarında dengelemek amacıyla kullanılır. (Manwell, 2002)

Rotor geometrisinin değiştirilmesi, kanatta kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin değiştirilmesine yol açar ve aerodinamik torka etkir. Rotor geometrisiyle aerodinamik torkun kontrolü, tam kanat açısı kontrolüyle veya kanatın sadece bir kısmının geometrisinin değiştirilmesiyle sağlanabilir.

Tam kanat açısı kontrolü, kanatın uzun ekseninin dönmesini gerektirir. Tam kanat açısı kontrol, aerodinamik tork ayarı için, ya kanatın açısının değiştirilmesi (hücum açısının küçültülmesi), yada iki yönlü durdurma ile yüklerin azaltılmasını (hücum açısının arttırılması) gerektirir. (Şekil-6.9) (Manwell, 2002)

Kanat açısı ayarlı rüzgar türbin kanatları optimum güç üretimi amaçlı tasarlanır. Bu kanatlar genelde yüksek hücum açılarında en etkili noktada çalışırlar.



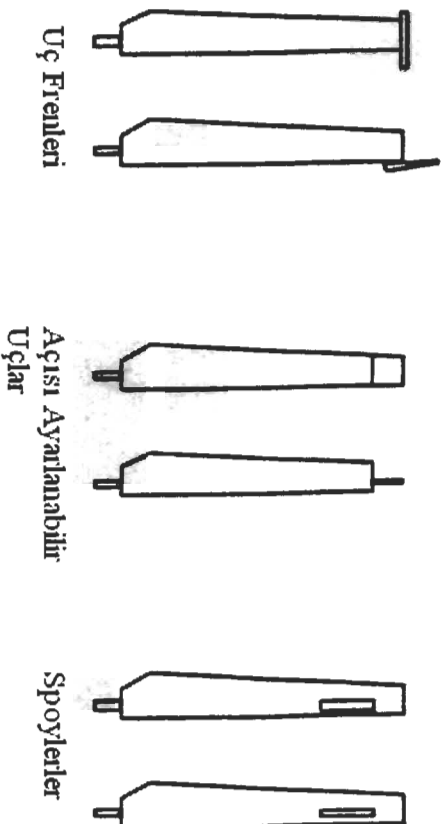
Şekil-6.9 Hücum açısı [16]

Burada, kanatı hücum açısı yönünde döndürmek, uzunlamasına eksen yönünde döndürmekten daha hızlı gerçekleşir. Uzunlamasına eksende dönüşler daha sessiz gerçekleşir

ve herbir hücum açısının bir çalışma şartına karşılık gelmesiyle daha sağlam bir kontrol mevcuttur. Buna ters olarak durdurma etkisiyle türbinde daha büyük kuvvetler oluşarak kontrolü zorlaştırabilir.

Kanatçıklar, rotor geometrisini, kanat üst kısmının geometrisini etkileyerek kaldırma sabitini azaltabilir veya sürüklenme katsayısını artırabilirler. Tam kanat açısı kontrolü gibi gü.lü aktivatör gerektirmezler. Fakat en azından bazı aktivatör mekanizmalarının kanat üzerinde olması gerekebilir. (Manwell, 2002)

Ek rotor elemanları (uç freni vs.) rotor torkunun düzeltilmesinde etkili olabilirler. (Şekil-6.10) Uç kanatları ve açısı değiştirilebilir uçlar, rotora negatif bir tork eklerler ve spoylerler kanat çevresindeki akışı kesintiye uğratarlar ve kaldırmaı azaltarak sürüklenmeyi artırırlar.



Şekil-6.10 Aerodinamik etki mekanizmaları (Manwell, 2002)

6.2.3.2 Jeneratör Tork Kontrolü

Şebeke bağlantılı jeneratör tasarım karakteristikleriyle jeneratör torku ayarlanabilir veya güç elektronik çeviricilerinin kullanımı bağımsız kontrol sağlayabilir.

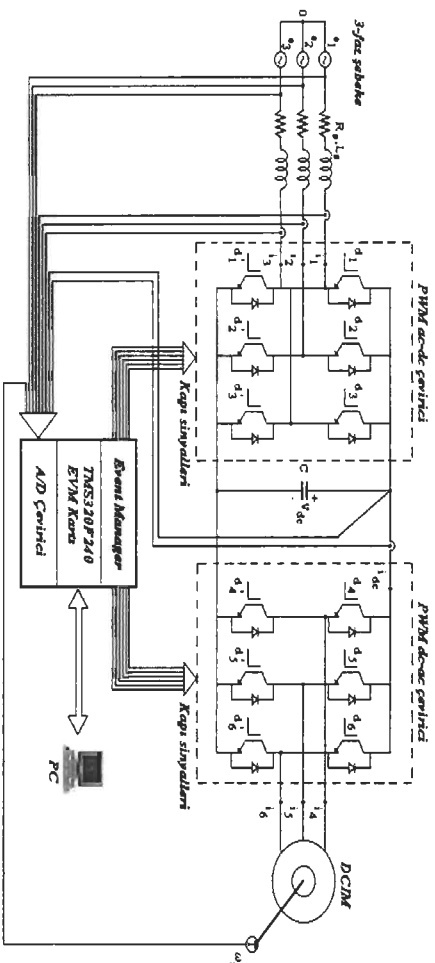
Şebeke bağlantılı jeneratörler çok düşük hız oranlarının üzerinde çalışırlar ve senkron hızda yada yakın hızlarda çalışma koşullarını sürdürmek için gerekli torku üretirler. Şebeke bağlantılı senkron jeneratörlerde hız varyasyonları yoktur ve bu sebepten maruz bırakılan herhangi bir tork neticesinde neredeyse anında kompanze tork oluşur. Bu durum bazı koşullarda, yüksek tork ve güç olarak yansır. Şebeke bağlantılı endüksiyon jeneratörleri,

senkron hızlarının %1-2'si kadar hız değişimi yaparlar. Bu durum daha yumuşak cevaplara ve senkron jeneratörlere göre daha düşük tork değişimlerine imkan tanır. (Manwell, 2002)

Buna alternatif olarak, jeneratör şebekeye, güç elektronik çevirici vasıtasıyla bağlanabilir. Bu durum jeneratör torkunun istenilen seviyeye çabuk gelmesini sağlar. Çevirici; frekans, fazı ve jeneratörden geçen akımın voltajını belirler ve jeneratör torkunu kontrol eder.

Şöyle bir örnekle konuya açıklık getirmek mümkündür: Rüzgar türbini tarafından sürülen çift kafes asenkron makina (DCIM) ile bu makinanın hız kontrolünde kullanılan çevirici devrelerinden oluşan sistemin genel blok şeması Şekil 6.11'de verilmektedir. Bu şemadan da görülebileceği gibi, güç elektroniği devrelerinin kontrolü TMS320F240 sayısal işaret işlevci (DSP) üzerinde geliştirilen yazılımla sağlanmaktadır. Geliştirilen yazılım, bu sistem için belirlenen kontrol yönteminin uygulanması sonucu IGBT anahtarlar elemanlarının, uygun kontrol işaretleri ile denetlenmesini kapsamaktadır. Sistem üzerinde yer alan diğer yardımcı devreler (gerilim ve akım sinyallerinin algılanmasında kullanılan devreler, kapı sürücü devreleri gibi) bu şema üzerinde gösterilmemektedir

Sistem, şebeke ve makine tarafında bulunan 2 çevirici ile kontrol edilmektedir. Çeviriciler köprü tipi, 3 faz olup, IGBT ve diyot elemanlarından oluşmaktadır. İki çevirici arasında bulunan DC kondansatör, DC link geriliminin filtrelenmesi ve enerji depolama amaçlı olarak kullanılmaktadır. AC şebeke tarafında bulunan endüktans ise şebeke akımlarının filtrelenmesi işlevini yerine getirir.



Şekil-6.11 Sistemin prensip şeması

Şebekeye bağlı olan PWM AC-DC çevirici devresi güç akışını iki yönlü denetleyebilmektedir; hem doğrultucu hem de inverter olarak çalışabilmektedir. Bu devrenin temel işlevi AC şebeke gerilimlerini belirli bir DC gerilime çevirmek ve şebeke akımlarını sinus dalga formunda tutmaktır. Bu devrede giriş güç faktörü ayarlanabilmektedir ve sistemin çalışmasında güç faktörü 1' de tutulmaktadır.

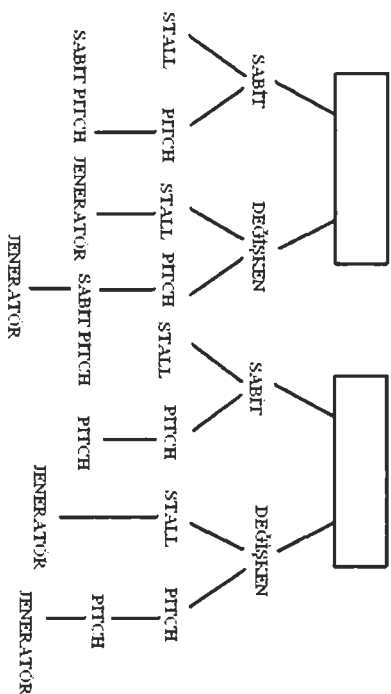
6.2.3.3 Fren Tork Kontrolü

Bir rüzgar türbini durdurmak ve dönmelerini engellemek, yüksek hızlı yada düşük hızlı mil üzerinde bulunan fren sisteminin görevidir. Fren tipik olarak pnömatik, hidrolik veya yaylıdır. Bu yüzden fren kontrolü genelde solenoid valf veya kontrol valfinin aktivasyonu ile gerçekleşir. Ek frenleme metodları olarak (1) güç çeviricilerce kontrol edilen makinalardaki jeneratör torkuyla rotorun frenlenmesi (2) ek elektriksel parçalar olarak dinamik frenler kullanılarak jeneratöre elektriksel frenleme uygulanması (Manwell, 2002)

6.2.3.4 Türbin Çalışma Hızları Kontrolü ve Sabit Hız Kontrolleri

Rüzgar türbini kontrolüne ve kontrol stratejilerinin başarılması amaçlarına tam bir yaklaşım, türbinin çalışma rejimine bağlıdır. Düşük hızlı rüzgar durumunda temel amaç, enerji üretimini maksimize etmek; yüksek hızlarda ise güç sınırlamasına gitmektir. Tipik rüzgar türbini kontrol stratejileri Şekil-6.12'de verilmiştir. Kontrol girdisi olarak hız verilmektedir. Sabit hızlı durdurma-ayarlı rüzgar türbinlerinde kontrol girdisi olarak herhangi bir seçenек belirtilmemiştir. Sabit hızlı ve kanat açısı değişimi ayarlı(kanat açısı ayarlı) rüzgar türbinleri temelde kanat açısı değişimi ayarını, başlangıçta ve başlangıç sonrasında yüksek hız kontrolü amaçlı kullanırlar. Değişken hızlı rüzgar türbinleri temelde kanat açısı değişimi kontrolünü kullanırlar ancak mevcutsa yüksek hızda jeneratör tork kontrolünü de ekleyebilirler.

Şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinde sabit hızda çalışma, büyük oranda jeneratör tasarımı ve dişli oranı ile belirlenir. Sabit hızlı rüzgar türbinleri içinde temel birkaç tasarım mevcuttur ve alta açıklanmıştır. Görüleceği üzere sabit hızlı rüzgar türbinlerinin çalışma şartlarından bir hız seçilir ve o hızda çalıştırılır. Fakat bu durum onu değişken hızlı türbin sınıfına sokmaz. (Manwell, 2002)



Şekil-6.12 Rüzgar türbini kontrol stratejileri (Manwell, 2002)

6.2.3.4.1 Durdurma Regülasyonlu Türbinler

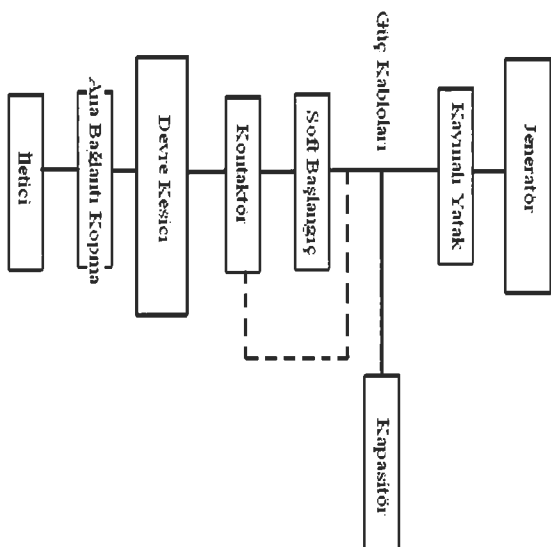
Sabit hızlı durdurma regülasyonlu rüzgar türbinlerinde türbinde üretilen gücü etkileyen en önemli faktör kanat tasarımıdır. Göbeğe sabileme açısı belirli kanatlarla (fixed-kanat açısı değişimi) düşük rüzgar hızlarında optimum uç hız oranında çalışma mümkündür. Rüzgar hızı arttıkça hücum açısı, kanatın gittikçe daha fazla yerinde artar ve kanat kökünden durdurma bölgesine girdiği görüldür. Bu durum rotor verimini azaltarak çıkış gücünü sınırlar. En genel durdurma regülasyonlu tasarımı; rijit gövdeli, üç kanatlı ve endüksiyon jeneratörlü türbindir. Bu tip türbinde rotor ağır kaynatılmış veya döküm olup yük taşımak için dayanıklıdır. (Manwell, 2002)

Genelde bu türbinlerde kontrol; rüzgar ve güç kriterlerine bağlı olarak çalışma ve durdurma esaslıdır. Fren ayrıldığında, türbin sahip olduğu hızda, jeneratör şebekeye bağlanana kadar boşa döner. Bu sebepten bu tasarımda kontrol, jeneratörde veya yumuşak ilk hareket kontaktörü ve frende uygulanır. (Şekil-6.13)

6.2.3.4.2 İki Hızlı Durdurma Regülayonlu Türbinler

Bu tip türbinler durdurma regülasyonlu olup, iki farklı hızda sabit hızlı çalışma sağlarlar. Düşük rüzgar hızlarında düşük rotor hızı seçilip rotor verimi artırılır ve gürtütlü azaltılır. Yüksek rotor hızı seçeneğinde yüksek hızlar hedef alınır. Değişken kutuplu ve dolayısıyla değişken senkron jeneratör kullanmak ilk yoldur. Diğer yaklaşımda ise farklı boyutlu iki jeneratör seçilir. Çalışma hızları, jeneratörün kutup sayısına ve/veya rotora bağlandığı dişli oranına göre belirlenir. Küçük boyutlu jeneratör küçük rüzgar hızlarında, büyük ebatlı olanı da büyük rüzgar hızlarında kullanılır. Her iki jeneratör de maksimum verime göre çalışır. Bu

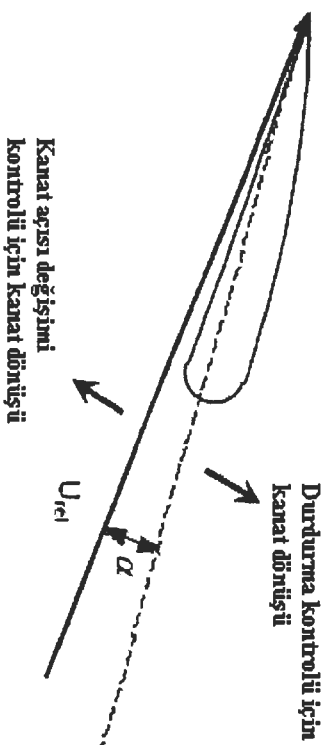
tip türbinlerde enerjiyi jeneratörler arasında aktarmak için karmaşık sayılabilecek elemanlar gerekir.



Şekil-6.13 Rüzgar türbininde yüksek voltaj ekipmanı (Manwell, 2002)

6.2.3.4.3 Aktif Kanat açısı değişimi Regülasyonlu Türbinler

Durdurma kontrollü türbinlerin aksine göbeğe sabit bir açı ile tutturulmuş kanatlara sahip olmayan sistemlerdir. Rüzgar hızının artmasıyla hücum açısı da artar ve kanat kanat açısı değişimi kontrol sayesinde kendi eksenini etrafında döner. Kanat geometrisi nedeniyle rüzgar değişimine, durdurma'dakinden daha hassastır. Her hızda yada sadece nominal hızdan yüksek hızlarda kullanılabilirler. (Şekil-6.14) (Samsun, 2004)

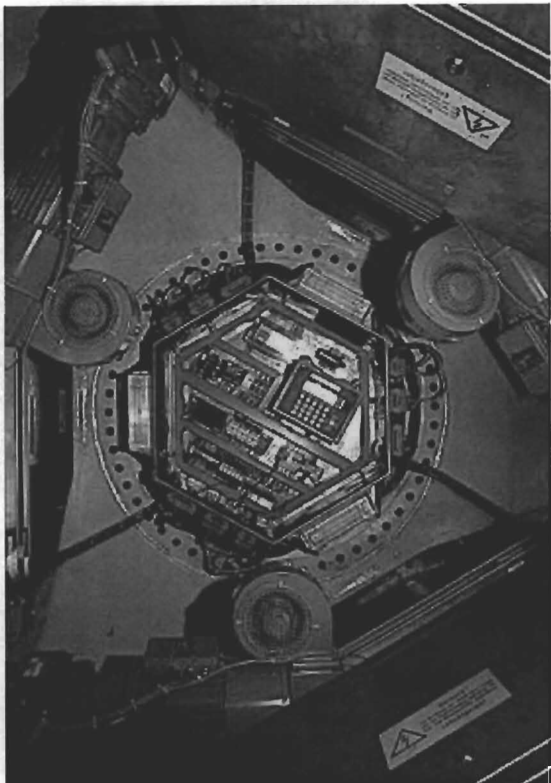


Şekil-6.14 Aktif durdurma ve aktif kanat açısı değişimi için kanat dönüş yönleri (Samsun, 2004)

Ayarlanabilir açılı bulunan rotorlar genelde sabit hızlı türbinlerde daha iyi bir kontrol için tercih edilirler. Yüksek hızlarda kanat açısı değişerek gücün düzleştirilmesi sağlanır. Açılı kanatlar optimum güç üretimi için tasarlanır. Aerodinamik tork, rüzgar sağanağına duyarlıdır. İlk çözüm hızlı kanat açısı değişimi mekanizmalarıdır. (Şekil-6.15) Rüzgar sağanağına daha hızlı cevap veren kanat açısı değişimi mekanizması, yüksek hızlarda daha düzgün bir güç oluşturur. Yine de kanat dönme hızları, kanat ataleti ve kanat açısı değişimi mekanizmasının sertliğinden ötürü sınırlıdır. Pratikte güç sadece bir ortalama kontrol edilebilir ve güç çalkalanmaları mevcuttur. (Samsun, 2004)

6.2.3.5 Türbin Çalışma Hızları Kontrolü ve Değişken Hız Kontrolleri

Güç elektroniğinde gözlenen gelişmeler sonucunda değişken hızlarda çalışan türbinler kullanılmaya başlanmıştır. Alttı açıklanan tipler şebeke bağlantılı olanlar ile sınırlanmıştır.



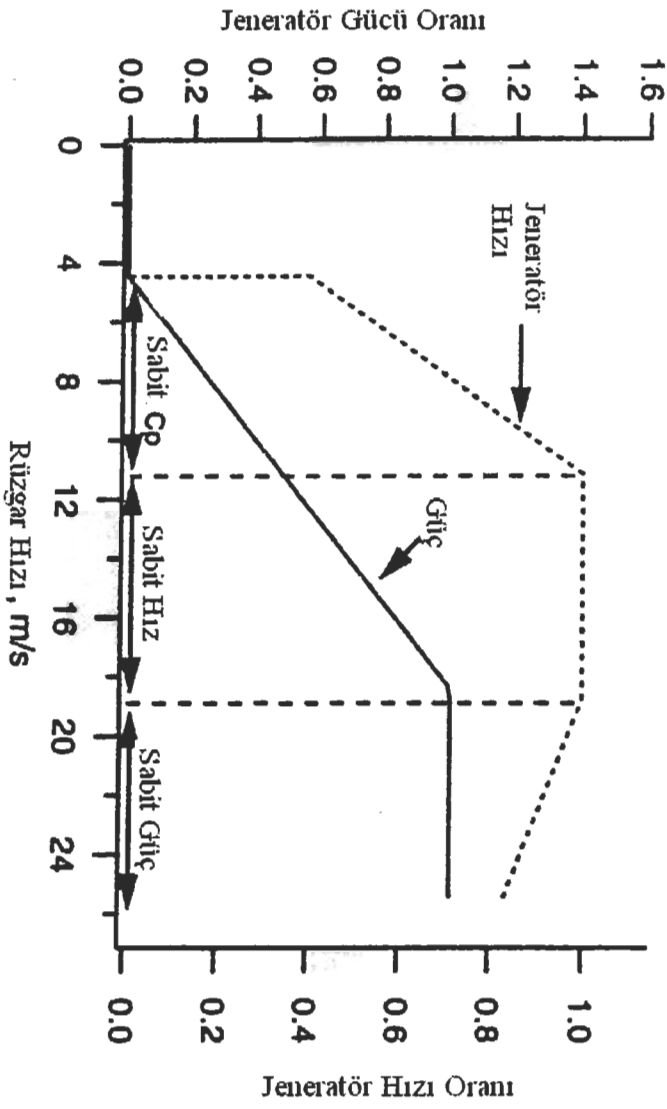
Şekil-6.15 Kanat açısı değişimi mekanizması ve rotor göbeği [18]

6.2.3.5.1 Durdurma Regülasyonlu Türbinler

Değişken hızlı durdurma regülasyonlu türbinler, elektronik sistemlerle kontrol edilirler. Rotor hızını ayarlamak için jeneratör torku kullanılır. Böylece türbin, jeneratör ve rotorun izin verdiği herhangi bir uç hız oranında çalışabilirler. Jeneratör torku, aerodinamik torkun altına inerse, rotor ivmelenme serbestisi kazanır. Jeneratör torku aerodinamik torku aşarsa rotor negatif ivmelenir.

Değişken hızlı türbinler üç modda çalışırlar(Bkz. Şekil-6.16). Düşük hızlarda türbin optimum güç oranında çalışır. Tasarlanmış maksimum rotor hızına çıktığında ise türbin sabit hıza geçer. Rüzgar hızı arttığında güç artar ve kanatlar durma eğilimine girerler. Önceden kararlaştırılmış bir hız aşıldığında türbin sabit güç modunda çalışmaya başlayarak rotor gücünü sınırlandırır. Bu durum, yüksek rüzgar hızlarında rotor hızını azaltıp durdurma etkisini arttırmayı ve rotor verimini azaltmayı kapsar.

Bu türbinlerin kontrolü aynı sabit hızlı durdurma regülasyonlu çalışmadaki gibidir. Güç ayarı, rotor aerodinamiklerine ve jeneratör tasarımına bağlıdır. Değişken hızlı türbinde şebekeye bağlanmış gücün kontrolü, jeneratör torkunu ayarlayan dinamik kontrolör ile yapılır. (Manwell, 2002)



Şekil-6.16 Çalışma modları (Manwell, 2002)

6.2.3.5.2 Aktif Kanat açısı değişimi Regülasyonlu Türbinler

Değişken hızlı türbinlerde, türbin çalışma koşullarını değiştiren iki yöntem vardır: hız değişimi ve kanat açısı değişimi. Kısmi yük koşullarında bu türbinler sabit açıda ve değişken rotor hızında çalışarak uygun bir hız oranını sürdürürler. Belli bir güce ulaşıldığında; jeneratör torku, elektriksiz güç çıkışını kontrol için kullanılır. Bu arada açı kontrolüyle rotor hızı belli limitler arasında kalır. Rüzgar sağanığında jeneratör gücü sabit bir seviyede

tutulabilirken rotor hızı artar. Rüzgarda artan enerji, rotorun kinetik enerjisinde saklanır. Rüzgar hızı düştükçe, düşen aerodinamik tork; rotorun negatif ivmelenmesine, jeneratör gücünün ise sabit kalmasına neden olur. Rüzgar hızı yüksek kalırsa, kanat açısı aerodinamik torku ve verimi azaltmak için değiştirilir(yine rotor hızını azaltarak). Buna göre güç kontrol edilir. Kanat açısı değişimi mekanizması sabit hızlı türbinin kanat açısı değişimi mekanizmasından çok daha yavaş çalışmaktadır. (Manwell, 2002)

6.2.3.5.3 Düşük Aralıklı Değişken Hızlı Türbinler

Tam bir değişken hızlı türbinin tüm avantajlarından yararlanırken ekonomiklik sağlamak istenirse, değişken kaymalı bir endüksiyon jeneratörü kullanılmalıdır. Kontrol sisteminde jeneratörün kayması, rotor direnci değiştirilerek kontrol edilir. Kısmi yüklerde jeneratör, bir endüksiyon jeneratörü gibi çalışır ve %2 kaymaya sahiptir. Tam yükte erişildiğinde rotor direnci, kaymayı artıracak şekilde değişerek rotorun rüzgardaki enerjiyi yutmasına izin verir. Kanat açısı değişimi mekanizması güç çalkantılarını dengelemede kullanılır. (Manwell, 2002)

6.2.3.5.4 Pasif Kanat açısı değişimi Regülasyonlu Türbinler

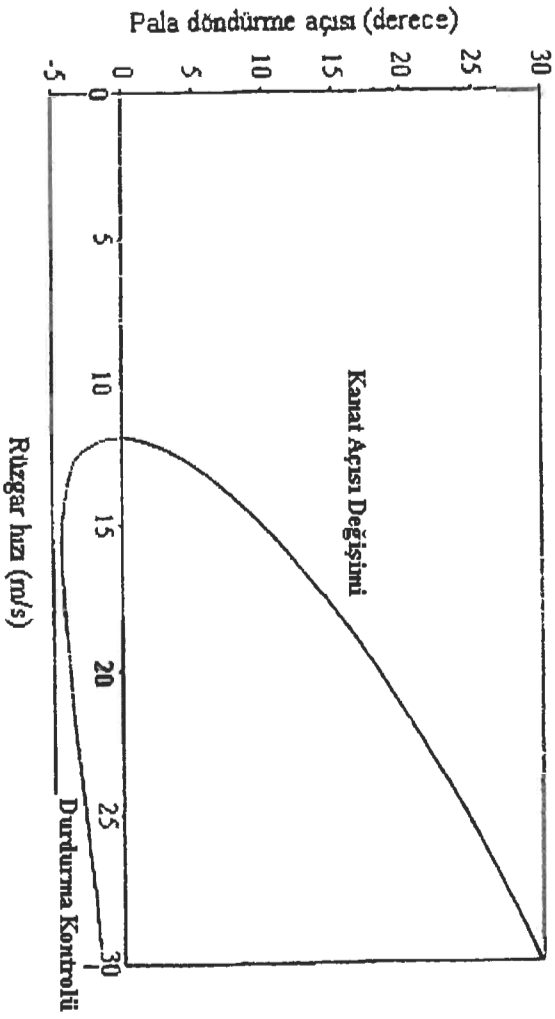
Bu tasarımlarda rotor hızı veya rüzgar hızı değişimleri kanat açısı değişimi mekanizmasına iletilir. Bu yüzden rüzgar hızı, kanat açısını değiştirerek türbin güç eğrisini şekillendirir.

Pasif kanat açısı değişimi kontrolde temel düşünce, kanatı yüksek hızlarda burularak istenen kanat açısı değişimi açısına ulaşacak şekilde tasarlamak, bu şekilde güç kontrolü sağlamaktır. Prensip mantıklı ve basit gözüktüğü de uygulamada bunu başarmak zordur. Çünkü güç kontrolü için gerekli burulma ile kanat üzerine gelen yüklerin oluşturduğu burulma birbiriyle uyumlu olmadığından sorun teşkil edebilir. (Manwell, 2002)

6.2.3.5.5 Aktif Durdurma

Bu yöntem diğer yöntemlere kıyasla daha yeni bir yöntemdir. Kanat açısı değişimi kontrollü türbinlerdekine benzer şekilde güç kontrolü için kanat, ekseri etrafında döndürülmektedir. Böylece nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sağlanır. Fakat dönüş yönü açısından pitch mekanizmasına göre farklılık taşır. Dönüş yönü kanat açısı değişimi kontrolü dönüşünün tam tersi yöndedir. (Şekil-6.14) Kanat açısı değişimi kontrollü türbinde nominal hız aşıldığında, kanat hücum açısını azaltacak şekilde döndürülmektedir. Bu yöntemde ise kanat ters yönde

çevrilerek durdurma etkisine sokulur. Güç kontrolü için gerekli kanat döndürme açıları, aktif kanat açısı değişimi kontrolüne göre oldukça küçüktür. (Şekil-6.17) Bu sayede türbin, rüzgar hızındaki değişimlere daha hızlı reaksiyon gösterebilir. Ayrıca ani rüzgarlara da daha az hassastır. (Samsun, 2004)



Şekil-6.17 Aktif durdurma ve aktif kanat açısı değişimi kontrollü türbinlerde güç kontrolü için gerekli kanat döndürme açıları (Samsun, 2004)

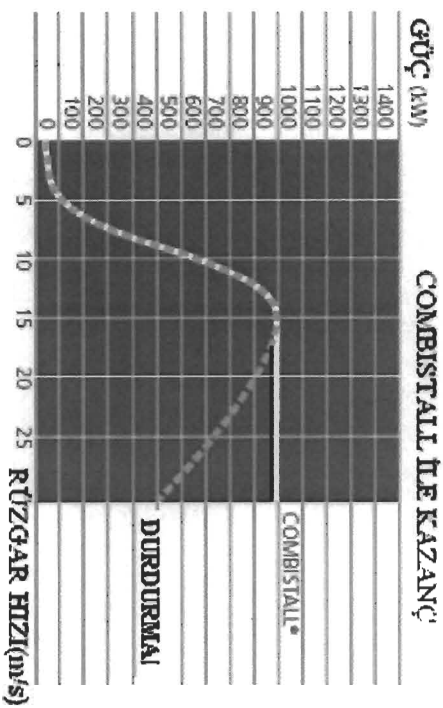
6.2.3.5.6 Combistall Yöntemi

Normal durdurma regülasyonlu türbinlerde kanatlar türbin göbeğine katı bağlıdır ve uzunlamasına eksenleri etrafında dönmezler. Durdurma regülasyonlu kanatlar tasarlanırken havanın kanat üzerinden akışıyla yüksek hızlar daha yüksek bir sürükleme sağlar ve otomatik olarak güç sınırlandırılır. Kanatın bu şekildeki aerodinamik karakteristiklerinin pasif kullanımıyla güç regülasyonu her koşulda uygulanabilir durumdadır. Öte yandan durdurma regülasyonunda maksimum güç çıkışının, hava yoğunluğuna ve kanatın yüzey durumuna bağlı oluşu dezavantajlı bir durumdur. Kirli kanat, güç eldesini belirgin oranda değiştirebilir. [13]

Kanat açısı değişimi regülasyonlu türbinlerde ise kanatlar rotor göbeğine dönebilir rulmanlar ile bağlıdır. Çalışma esnasında uzunlamasına eksenleri etrafında dönebilirler. Yüksek hızlarda kanatın kanat açısı değişimi ayarları, durdurma noktasından uzakta tutulur ve kanat kaldırmasını azaltır. Bu durum komplike aktif regülasyon sistemi gerektirir. Bu sistem aynı

zamanda yüksek hızlardaki türbülans için de duyarlı olmalıdır. Bu sebepten kanat açısı değişimi regülasyonu pratikte değişken hızlı bir jeneratör gerektirir. Bu jeneratör rüzgar sağanağı durumunda rotor hızındaki hafif bir ivmelenmeye müsaade edecektir. Öte yandan aktif regülasyon, rüzgardaki değişimleri izleyemez ve pik yükler oluşur.

Combistall ise bu iki yöntemin kombinasyonu biçimindedir. Kanat açısı değişimi regülasyonundaki gibi kanat ve rotor gövdesi arasında rulmanlar bulunur ve bunlar açısız ayarlamalara, çalışma esnasında imkan tanır. Ancak yüksek hız durumunda durdurma regülasyonu devreye girer. Düşük ve orta hızlarda açısı ayarları maksimum gücü verecek şekilde değişir. Yüksek hız ulaşıldığında ise kanatlar normal açıda negatif doğrultuda bir açı kazanırlar. Bu sayede türbin kontrolöründe programlanan yerde durdurma oluşur. Yüksek hızlarda kanat açısı sürekli ayarlanır ve maksimum güç eldesi sürdürülür. [13] (Şekil-6.18)

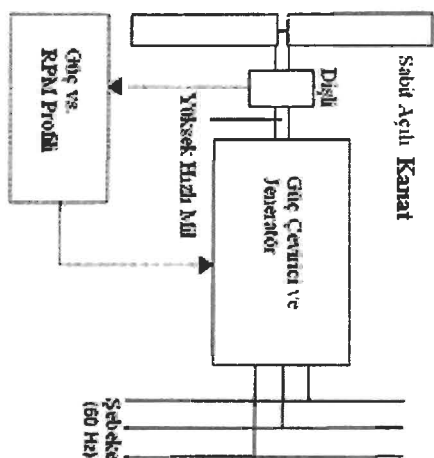


Şekil-6.18 Combistall ve pasif durdurma [13]

6.2.3.5.7 Soft Durdurma Kontrolü

Bu kısımda E. Muljadi, K.Pierce ve T.Migliore isimli mühendislerin buldukları soft-durdurma yönteminden bahsedilecektir.

Bulunan kontrol stratejisinde türbin, düşük ve orta hızlarda maksimum verim noktası civarında çalışır. Yüksek hızlarda ise rotasyonel hızını ve güç çıkışı sınırlandırmak için kontrol edilir. Bu durum rotoru, aerodinamik açıdan durdurma noktasına getirmeye zorlamakla olur. Buna soft-durdurma yaklaşımı denir. Şekil-6.19'da sistem görülmektedir. Kesikli çizgiler ana kontrol döngüsünü ifade eder. (Muljadi, Pierce ve Migliore, 2000)



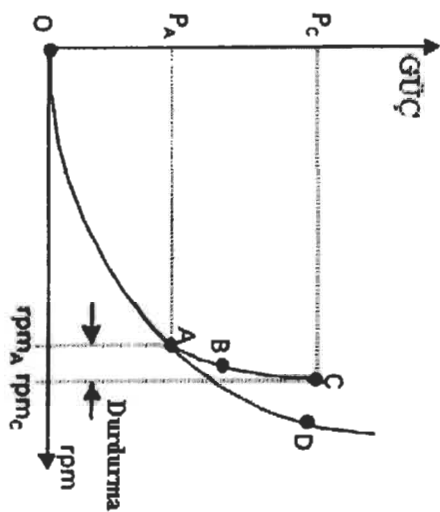
Şekil-6.19 Sistemin şeması (Muljadi, Pierce ve Migliore, 2000)

Türbin rotoru jeneratöre, hız arttırıcı bir dişliyle bağlıdır. Jeneratör çıkışı istenen rpm-güç eğrisini takip etmesi için güç çeviriciyle kontrol edilir.

Şekil-6.20 kontrol stratejisini tanımlar. OA arasındaki hızlarda jeneratör rpm'i kontrol edilerek maksimum gücün C_{pmax} civarında oluşması sağlanır. Yüksek hızlarda türbinin C_{pmax} 'a erişmesi engellenir ve daha düşük bir uç hız oranında çalışmaya zorlanır. rpm_A 'da uygulanan jeneratör torku türbini C_{pmax} 'tan ayırır. $P_{Aero} - P_{gen}$ arasındaki fark pozitif ise rotor hızı artmaya devam eder. Fakat türbin kanatları kısmen durdurma moduna geçer. rpm_A rotor hızı için bir üst limit olacaktır. $rpm_A - rpm_C$ arası soft-durdurma bölgesidir. (Muljadi, Pierce ve Migliore, 2000)

Bu stratejiyi başarılı olarak uygulamak için güç çevirici ve jeneratör, güvenlik sınırları dahilinde boyutlandırılmalıdır. Bu sayede P_C gücü rotor hızını rpm_C 'de tutar. Rotor hızı rpm_C 'ye ulaştığında aerodinamik güç ve elektriksel güç dengelenir ve rotor ivmesi sıfır olur.

(Şekil-6.20)

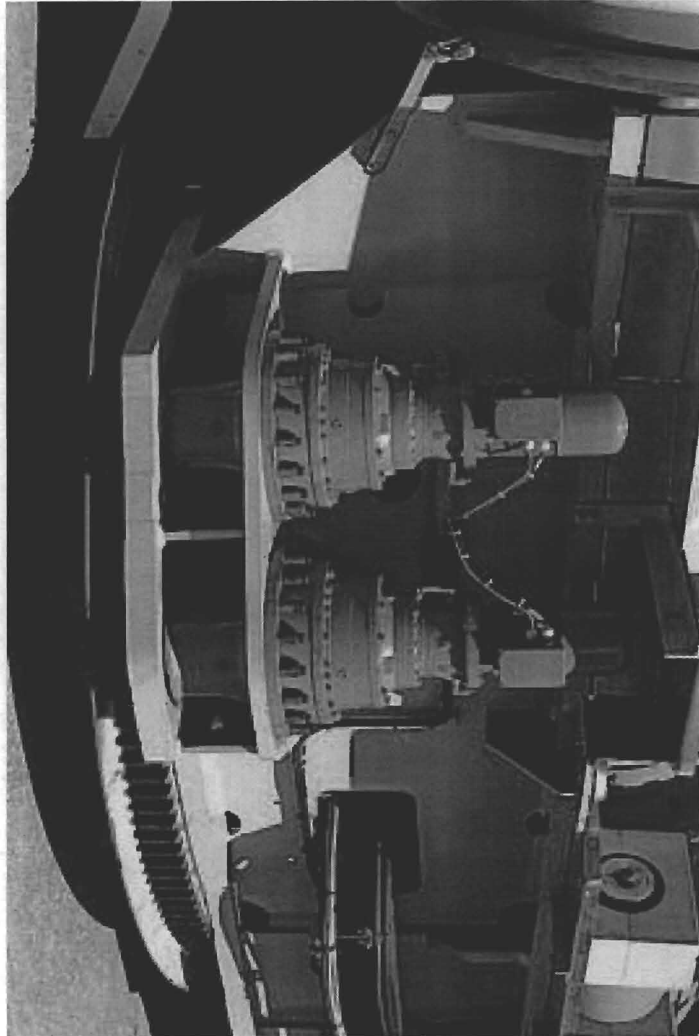


Şekil-6.20 Kontrol Stratejisi (Mujjadi, Pierce ve Migliore, 2000)

A noktası geçiş noktasıdır. Geçiş noktası ile ABC yolunun yerleşimi durdurma'ın soft'luğunu(yumuşaklığını) belirler. Yani eğer rpm_A 'yı rpm_C 'den çok uzağa koyarsak daha yumuşak bir modda çalışılıyor demektir. (Mujjadi, Pierce ve Migliore, 2000)

6.2.3.6 Sapma Kontrolü

Sapma mekanizması rüzgar türbini rotorunu rüzgarın karşısına çevirmek için kullanılır. Eğer rotor rüzgara dik değilse, rüzgar türbini için sapma hatasına sahip olduğu söylenir. Sapma hatasının anlamı şudur: rüzgar enerjisinin küçük bir kısmı rotor boyunca kullanılmaktadır. Sapma kontrolünde rüzgarın kaynağına en yakın olan rotor kısmı rotorun diğer kısımlarına göre daha yüksek bir kuvvete maruz kalacaktır. Bu sebepten rotor, türbine bağlı olmaksızın sağa sola sapma eğilimine girer. Bunun anlamı; kanatların, rotorun her dönüşü için ileri ve geri eğilmesidir. Bu nedenden sapma hatasıyla çalışan rotorlar rüzgara dik konumda çalışan rotorlara göre daha fazla yorulma yüklerine maruz kalırlar. (Şekil-6.21) (Kırım, 2002)



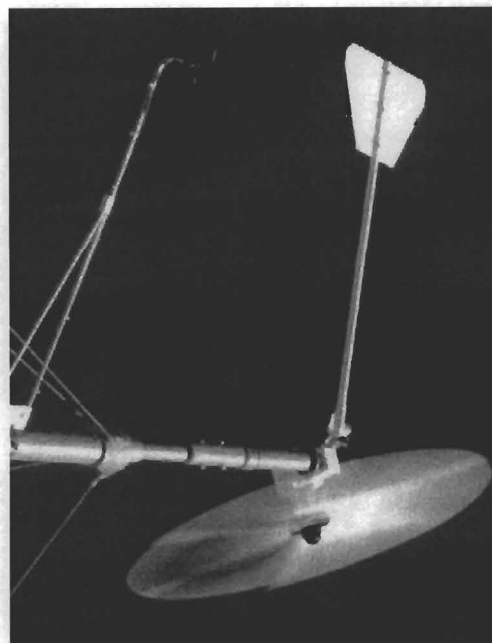
Şekil-6.21 Sapma mekanizması [18]

6.2.4 Rotor Kontrolleri

Rüzgar türbinlerinde özellikle yüksek hızlı rüzgarlarda rotora gelen kuvvetlerin kontrol edilebilmesi oldukça önemli bir konudur. Özellikle küçük türbinlerde tercih edilen ve fren torku kontrolü konusunda bahsedilen dinamik frenleme uygun bir yöntemdir. Ayrıca bir başka yöntemde kanat sallantısı yöntemi olup aerodinamik performansı sınırlayarak türbin kontrolü sağlar.

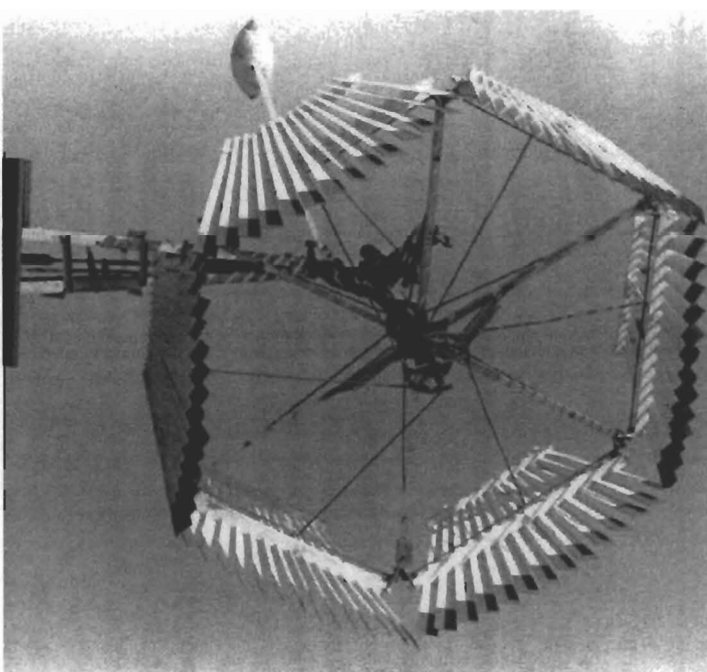
Yeni modellerde kullanılan elektronik kontroller ile rotor hızının kontrolü çok daha kolay hale gelmiştir.

Yelkenleme yöntemi küçük türbinlerde başarıyla uygulanan bir kontrol yöntemidir. Türbinin alın yüzeyini azaltarak türbini yüksek rüzgar hızlarında korumaktadır. Alın yüzeyi azaldıkça kanatya daha az rüzgar etkir. Bu da rotor torkunu, gücünü ve hızını azaltır. Kanat ve kuledeki basınç etkisi de azalma eğilimi gösterir. (Gipe, 2003) (Şekil-6.22)



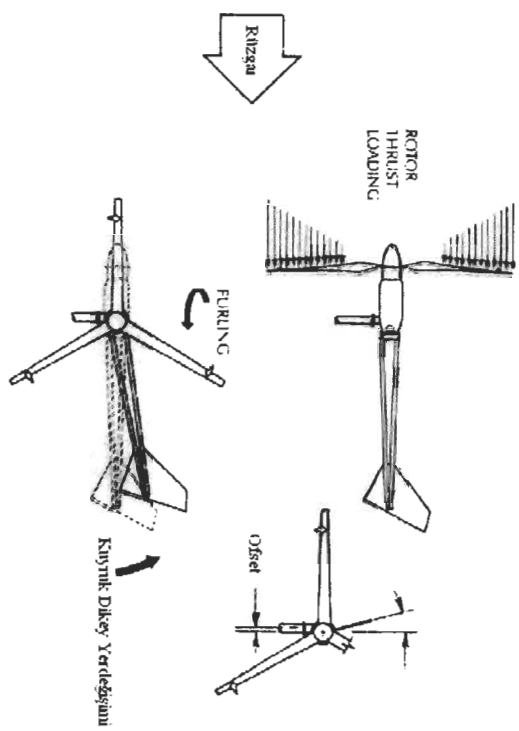
Şekil-6.22 Ön yüzey alanının azaltılması (Gipe, 2003)

Halladay'ın, su pompasında uygulanan yönteminde ise yüksek hızlarda rotoru silindirik hale getirip rüzgarın içinden geçmesini sağlamaktadır. (Şekil-6.23)

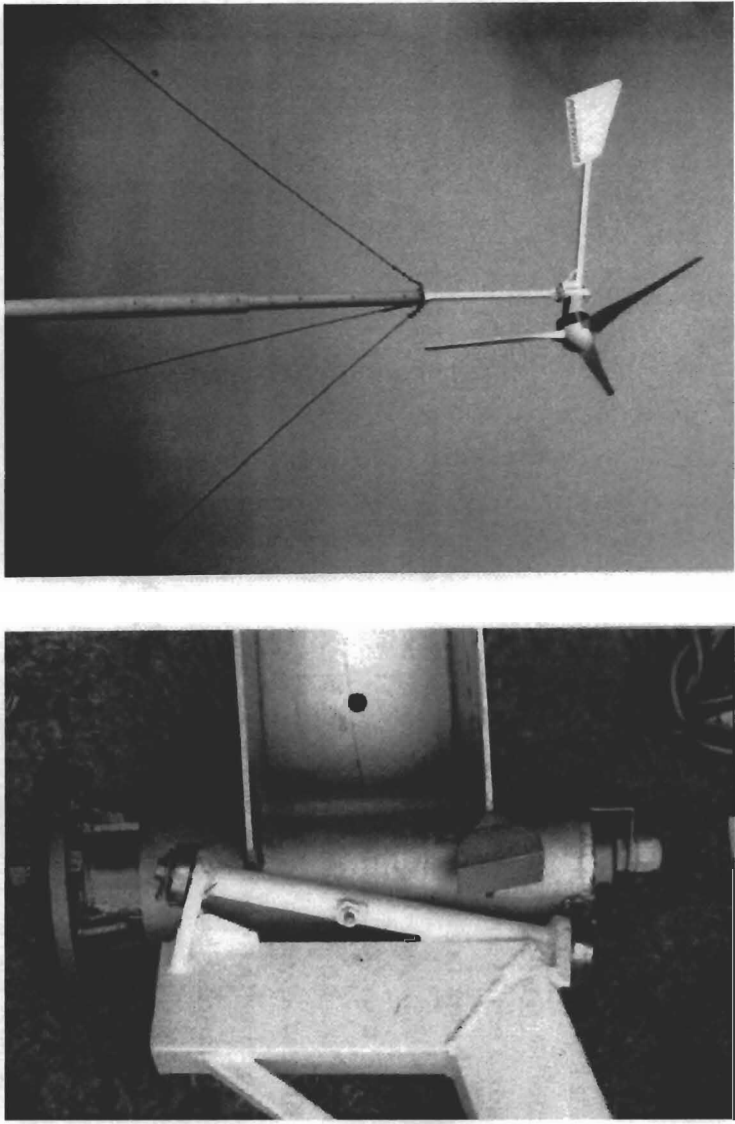


Şekil-6.23 Halladay türbini (Gipe, 2003)

Daha sonraları Bergey yatay Yelkenleme yönteminden faydalanmıştır. Rotor, yüksek hızlarda kuyruğa doğru sallanarak, rotor eksenini ofsetlenmektedir.



Şekil-6.24 Yatay Yelkenleme (Gipe, 2003)



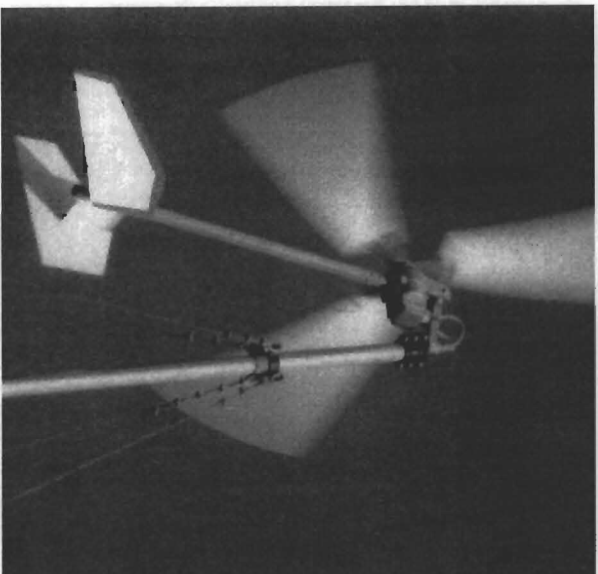
Şekil-6.25 Yelkenleme uygulaması (Gipe, 2003)

Dikey Yelkenleme'de rotor gökyüzüne doğru yalpa yaptırılır. Bir şok emici de rotoru eski haline getirir.



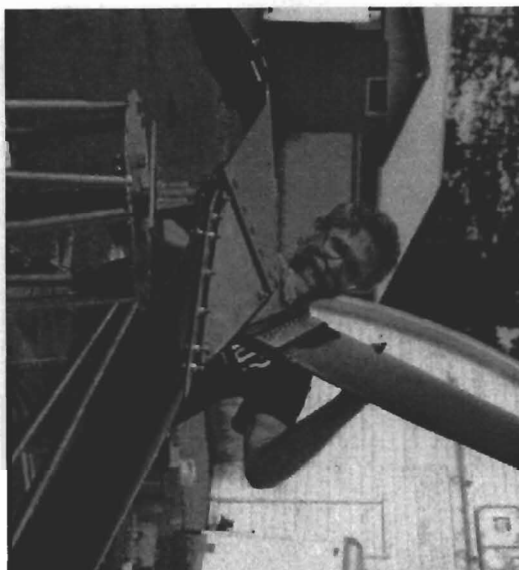
Şekil-6.26 Dikey Yelkenleme (Gipe, 2003)

Bir başka ilginç ön yüz kontrolü Çinli Synergy şirketi tarafından uygulanmıştır. Şirket, direkti sürücülü, rüzgaraltı rotorlu ve büyük kuyruklu bir tasarımı uygulamıştır. Kuyruk sadece rotoru yönlendirmekle kalmayıp, dikey olarak Yelkenleme hareketine de maruz bırakır. (Şekil-6.27)



Şekil-6.27 Değişken rotor alanı (Gipe, 2003)

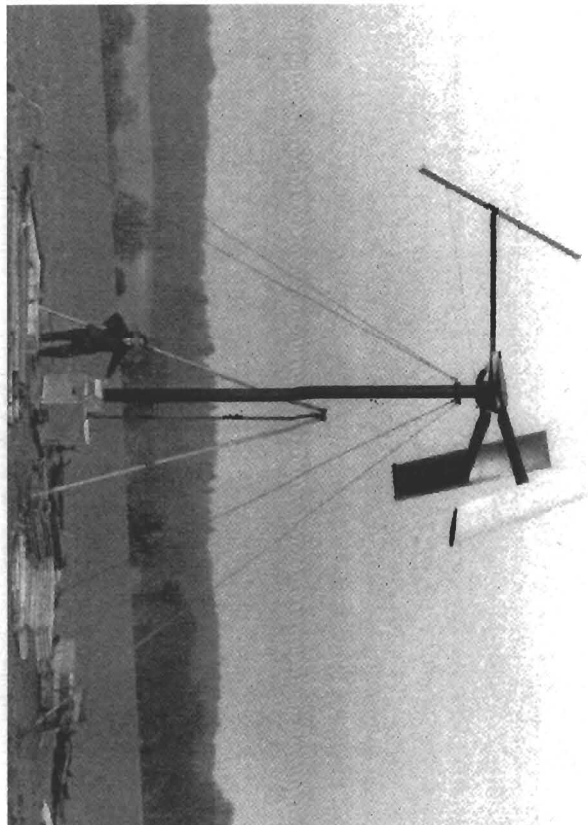
Gordon Proven adlı mühendis uyguladığı yöntemle yüksek hızlı rüzgarda kanatların rüzgaraltı konikliğini arttırmasına izin verir. Fiber-glass güçlendirilmiş polipropilen kanatlar göbekteki oynak menteşeye montelidir. Menteşe kanatı sadece rüzgaraltı yönde bükmeyle kalmayıp, bükerken kanat açısını da değiştirmektedir. (Şekil-6.28) (Gipe, 2003)



Şekil-6.28 Rüzgaraltı koniklik (Gipe, 2003)

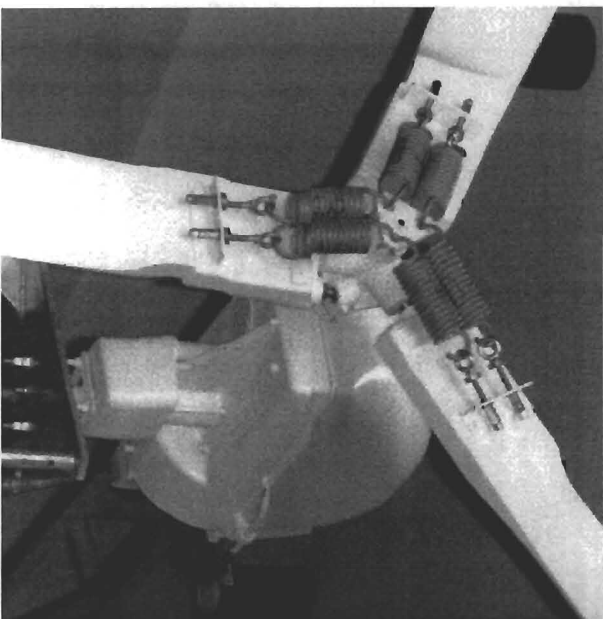
Peter Musgrove ise dikey eksenli türbininde rüzgarla temas yüzeyini azaltma yoluna gitmiştir. H-rotor Darrius türbinine avantajlar getirmiştir. Zayıf yönü ise kanatları eğmeye çalışan kuvvetlerdir. Bu kuvvetler azaltılabilir ve rotor hızı kontrol altına alınabilir. Bu amaçla kanatları menteşelemek gerekir. (Şekil-6.29)

Kanat açısını değiştirmek rotordaki güç üzerinde etkilidir. Kanat açısını arttırmak veya azaltmak ile kanatın kaldırma miktarı kontrol edilebilir. Kanat açısı iki yönde değişir: Durdurma yönünde veya uzunlamasına eksen yönünde. Hareket yönüne paralel yönde döndürülen kanat, durma eğilimi gösterir (rüzgara dik). Uzunlamasına eksen yönünde ise doğru açığı sağlamak önemlidir. Kanatı uzunlamasına eksenine, durdurma etkisinin yapığundan daha hızlı biçimde döndürmek gerekir. (Gipe, 2003)



Şekil-6.29 Değişken geometrili H-rotor (Gipe, 2003)

Şekil-6.30'da görülen tasarıma göre kanat aktivasyonlu governör ile kanatın ağırlığı, kanat açısını değiştirmektedir. Kanat, göbekteki mil etrafında sadece dönmekle kalmayıp akma hareketi de yapar. Rotor döndükçe kanatlar göbekten uzaklaşıp mil üzerinde kayarlar. Yaylar ise rotor hızını düzenler.



Şekil-6.30 Kanat aktivasyonlu governör (Gipe, 2003)

6.3 Yönetmel Kontrolle Bakış

Bu bölümde rüzgar türbinlerindeki yönetmel kontrol sistemlerine değinilecektir. Yönetmel kontrol türbinin farklı çalışma koşullarını (çalışmaya hazırlık, güç üretimi, kapanma vs.) ve bunlar arasındaki geçişleri ifade eder.

6.3.1 Yönetmel Kontrol

Yönetmel kontrol sistemleri türbinlerde; güvenli ve otomatik çalışmanın sağlanması, problemlerin tespiti ve güvenlik sistemlerinin aktivasyonu işlemlerinden sorumludur. Türbinin otomatik çalışması, rölelerin açılıp kapanarak bir türbin çalışma şartından diğerine geçişin sağlanmasıdır. Bu durumda örnek olarak şebeke bağlantılı güç üretiminden düşük hızlarda şebeke bağlantısız boşa çalışmaya geçiş verilebilir. Aynı zamanda çalışma koşulları belli zamanlarda devamlı kontrole tabi tutulur. Eğer bir datanın keni için belirlenmiş güvenli sınırı aştığı tespit edilirse gereken işlem uygulanır. Bu işlemler donanın röle mantıkları, elektriksel devreler veya çoğunlukla bilgisayarla sağlanır. Yönetmel kontrolün ayrı bir kısmı ise güvenlik hatası-backup sistemidir. Bu sistem, yönetmel kontrol bir şekilde devre dışı kalırsa türbini kapatır. (Manwell, 2002)

Yönetmel kontrol sisteminin işlemleri şunlardır:

-Güvenli çalışmanın görüntülenmesi amacıyla (1) sensörlerden gelen, türbinlerin hiçbir kısmında sorun olmadığına dair sinyaller (2) çalışma koşullarının belirlenmiş sınırlar içinde olduğunun görüntülenmesi (3) şebeke bağlantı durumunun görüntülenmesi (4) çevresel durumun uygunluğunun görüntülenmesini kapsar.

-Bilgilerin toplanması ve raporlanması amacıyla (1) çalışma bilgilerinin toplanması (2) tamir e bakım gerekliliklerinin uyarısı (3) telefon, radyo ve uydu aracılığıyla operatörle iletişim kurulmasını kapsar.

-Çalışmanın görüntülenmesi amacıyla (1) rüzgar hız ve yönü ile şebeke bağlantısının görüntülenmesi (2) uygunluğun kontrolünü kapsar.

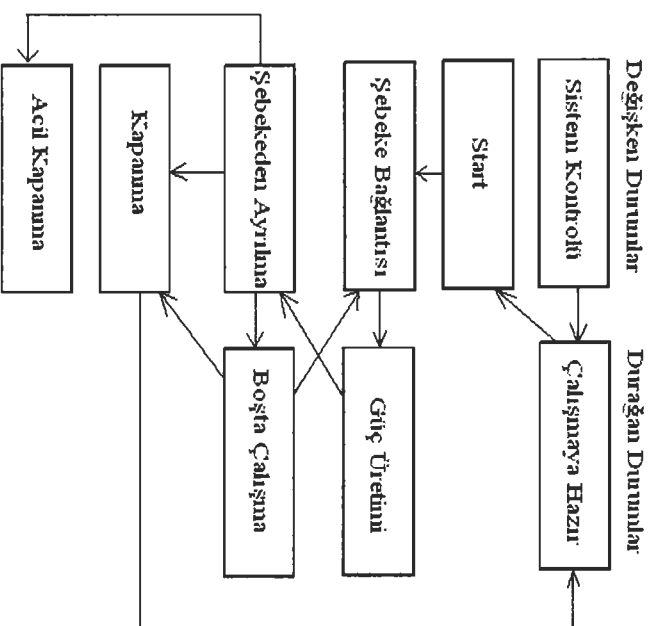
-Türbin çalışmasının yönetilmesi amacıyla (1) operasyon seçimi ve operasyonlar arası geçişlerin sağlanması (2) operasyon zamanlarını ve dinamik kontrol alt sistemi için ayar noktalarının seçimini kapsar.

-Sistem güvenliğinin sağlanması amacıyla (1) şebekeden ayrılmayı ve güvenli durumun sağlanması için aerodinamik ve normal frenlemenin yapılmasını kapsar.

6.3.2 Operasyon Durumları

Genel olarak birçok türbinde Şekil-6.3.1'deki çalışma düzeni gözlenir.

Türbin tasarımına bağlı olarak bazı çalışma şartlarının gözlenmediği durumlar olabilir. Yada bazı safhalar, altsafhalara ayrılmış biçimde olabilir. (Manwell, 2002)



Şekil-6.3.1 Türbin çalışma durumları (Manwell, 2002)

6.3.2.1 Sistem Kontrolü Ve Başlama

Kontrol sistemi çalışmaya başlama durumuna geçtiğinde sistemin genel kontrolü yapılır. Bu kontrol; sistemde çalışma başlangıcında yapılması gereken ilk hazırlıkların yapılarak çalışmaya hazırlığın kontrolüdür. Sistem ilk olarak harekete geçirildiğinde hataların temizlenmesi, motor ve sapma pozisyonlarının belirlenmesi, değişkenlerin ayarlanması gerekebilir. Ayrıca sensör verileri incelenerek sistemin operasyonunda bir sorun olup

olmadığına bakılabilir. Bu durum dahilinde aktivatörler denenmiş ve sonuçlar ölçülerek çalışmaya hazırlığın kontrolü yapılmıştır. (Manwell, 2002)

6.3.2.2 Çalışmaya Hazır (stasyoner)

Çalışmaya hazır durumu; stasyonier bir rotor ve bağlanmış fren ile karakterize edilir. Yönetisel kontrol şunları yapmalıdır: (1) türbinin çalışmaya hazırlığının sürdürüğünün kontrolü, herhangi bir problem olmadan şebeke bağlantısının yapılacağıının kontrolü, hidrolik ve pnömatik rezervuar basınçlarının sağlanması, sapma hatasının düzeltilmesi (2) rüzgar hız ve yönüne bakılarak uygun çalışma şartlarının tanımlanması, bu rüzgarın türbini çalıştırmak için yeterliliğinin kontrolüdür. Geleneksel olarak yönetisel kontrol, türbinin çalışmaya hazır oluşuna; rüzgar hızı ve limiti değerlerin kontrolü ile karar verebilir. Bu karar verildikten sonra türbin çalışsana dek stasyonier konumda kalınır. (Manwell, 2002)

6.3.2.3 İlk Hareket Ve Frenin Serbest Bırakılması

Şartlar uygun hale geldiğinde ilk hareket konumuna geçilir ve fren serbest bırakılır. Birçok türbinde (özellikle kanat açısı değişimi regülatyonlu) çalışma hızına kadar kesintisiz bir ivmelenme görülür. Fakat kanat açısı değişimi mekanizması ayarlarının güncellenerek kanat pozisyonuna yansması ve rotorun bunu gözönüne alarak ivmelenmesi söz konusudur. Değişken hızlı türbinlerde başlangıç prosedürü, dinamik kontrolörlerin çalışmasının başlatılmasını ve ayar noktalarının sağlanmasını gerektirir. Bu sırada sistem çalışması ve şebeke bağlantısının görüntülenmesi ile kapatma gerektirecek sorunlar tanımlanmaya çalışılır. (Manwell, 2002)

6.3.2.4 Şebekeye Bağlanma

Bazı türbinlerde (genellikle durdurma regülatyonlu) çalışma hızına gelene kadar jeneratöre bağlı kalarak şebeke kontrol durumu önemini korur. Bu türbinlerde rotor hızı, çalışma hızına eriştiğinde, jeneratör veya çevirici kontaktör kapatıldığında görüntüleme gerekmez. Güç üretimi, şebeke bağlantısı yapıldığında ve uygun çalışma hızına gelindiğinde yapılır. Şebekeye bağlı kalınan sürede sistem ve şebeke hataları kontrolü sürer ve türbin rüzgara uymaya devam eder. (Manwell, 2002)

6.3.2.5 Güç Üretimi (stasyoner)

Güç üretimi evresi boyunca akım, şebekeye akar. Güç üretimi safhasında kontrolörün işlevi, türbin tasarımına ve çalışma şartına (kısmi/tam yük) bağlıdır. Sabit hızlı durdurma regülasyonlu türbinlerde güç üretimi sadece bileşenlerin durumunu ve çalışma şartlarının görüntülenmesini gerektirir. Kanat açısı değişimi regülasyonlu türbinlerde, kanat açısı kısmi yükte veya sadece tam yükte sürekli değişir. Değişken hızlı türbinlerde ise yük ve rüzgar hızına göre çok farklı kontrol amaçları oluşabilir. Yönetmel kontrol, güç üretim safhasında birçok farklı işlev yapar: sistem hata denetimi, türbin sapma organizasyonu, sürekli güç ve rotor hızının görüntülenmesi vs. Yüksek hızlı rüzgarlarda güç üretiminin kısa süreler için türbin güç üretim beklentisini aştığı durumlara müsaade edilerek kanat açısı değişimi aktivatörünün görev çevriminin sınırlandırılması sağlanır. (Manwell, 2002)

6.3.2.6 Şebekeden Ayrılma

Bu işlemden jeneratör-şebeke bağlantısının koparılması, çeşitli kontrol sistemlerinden ayrılma, yeni kontrol ayarları ve amaçlarının saptanması yapılır. Bu safhadan sonra ya kapanma yada boşta çalışma safhalarına geçilebilir. (Manwell, 2002)

6.3.2.7 Boşta Çalışma (stasyoner)

Düşük hızlı rüzgarlarda rotorun boşta çalışmasına izin verilerek güç üretiminin durması sağlanabilir. Boşta çalışmada, jeneratör şebekeye bağlı değildir ve kontrolör türbini kapatmayı veya şebekeye bağlamayı sağlayacak şartları görüntüler ve sistem kontrollerini yapar. Sapma kontrollü bir türbinde rotor, rüzgara boşta çalışma evresi dahilinde ayak uydurur. Bir serbest-sapma türbininde sapma hatası, boşta çalışmada görüntülenir. Rotor hızını ayarlamak için kanat açısı değiştirilir. (Manwell, 2002)

6.3.2.8 Kapanma

Rüzgar hızı, çok yüksek veya çok düşük değerlere ulaştığında ve sistem görüntüsüne göre türbinin çalışması sakıncalıysa kapanma evresine geçilir. Türbini durdurmak için, rotoru aerodinamik etkiyle yavaşlatmak veya kanatların açısını değiştirmek ve hatta freni devreye almak gerekebilir. Ayrıca sapma frenini devreye almak da gerekli olabilir. Kapanma durumundan sonra türbin herhangi bir safhaya geçebilir.

6.3.2.9 Acil Durum Kapanma

Kritik çalışma şartlarına gelindiğinde yada limitler aşıldığında; normal kapanma, türbini korumak için türbini kapamada çok yavaş kalıyorsa veya herhangi bir elemanda oluşan sorun nedeniyle normal kapatma devreye alınmıyorsa acil kapanma işlemi yapılır. Tüm frenler devrededir ve birçok sistem devredışı bırakılır. Operatör devreye girmeden başka bir safhaya geçilemez. (Manwell, 2002)

6.3.3 Hatanın Teşhisi

Hatanın sürekli tespiti için yönetsel kontrolör hata bileşenlerini (sensör hataları, güvenli çalışma limitlerini aşan durumlar, şebeke hataları vs.) görüntülemelidir.

Bileşenlerdeki hatalar direkt veya endirekt olarak tespit edilebilir. Örneğin jeneratör ve dişi kutusu arasındaki bir kaplinde oluşan hata; jeneratör ve rotor hızları biliniyorsa ve birbirinden farklıysa direkt olarak tespit edilebilir. Böyle bir hata aynı zamanda rotor hızı ivmeliyse veya çok yükseğe belirlenebilir. Genelde, güvenli çalışma limitlerinin görüntülenmesi birçok bileşendeki hatayı teşhiste etkilidir. Fakat bazı durumların özel olarak görüntülenmesi ve çalışmayı etkilemeden önce tespit edilmesi gerekebilir. Bu sebepten başarılı bir hata modu, hata tespitinde komple bir analiz gerektirir.

Sistemde en çok karşılaşılan sorunlardan biri sensör hatasıdır. Bundan etkilenmemek için sistem farklı dizayn edilebilir. Örneğin iki ayrı sensörü ayrı ayrı tetikleyerek problem teşhis edilebilir. Sensörler soğuk havaya, neme, kuru havaya, titreşime, yüksek elektriksel veya manyetik alanlara, buza, yağa ve kirlendiği durumlara, yüksek hızlı rüzgarlara dayanıklı olmalıdır. (Manwell, 2002)

6.3.4 Yönetsel Kontrol Sisteminin Uygulanması

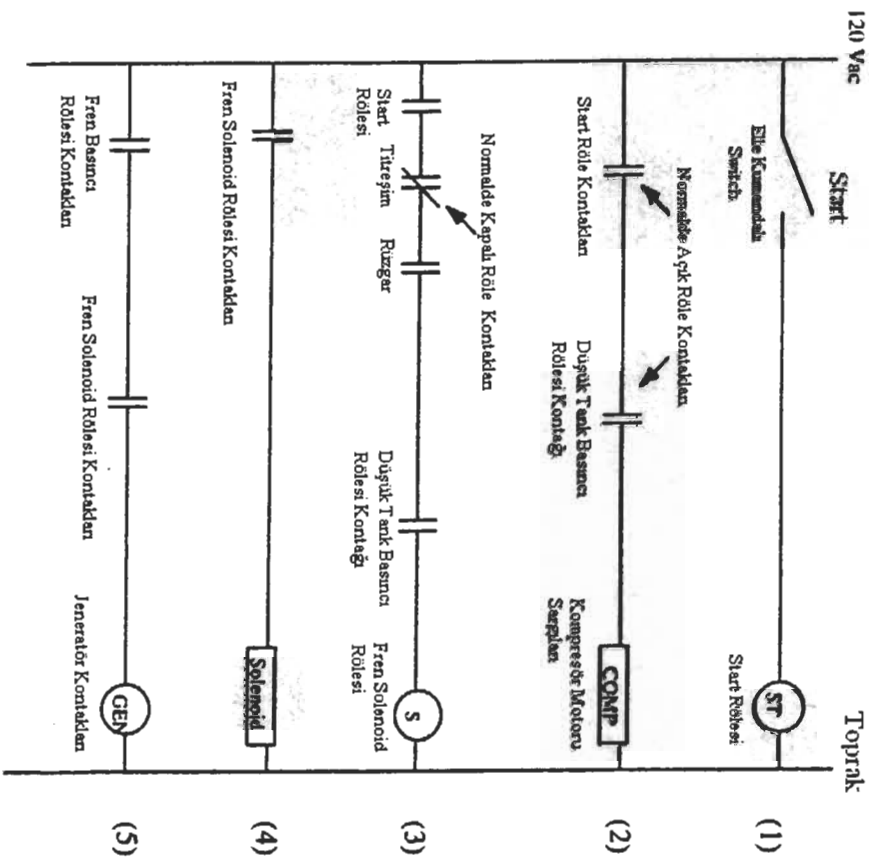
Yönetsel kontrol, donanım mantık, elektronik devre veya bilgisayar kullanımı ile uygulanabilir. Hangi yaklaşımın kullanılacağı türbinin biçimine ve kompleksliğine bağlıdır. Küçük türbinler donanım veya elektronik kontrolörlerden faydalanırken büyük türbinlerde ise bilgisayar kontrolü tercih edilir.

6.3.4.1 Donanım Mantık Kontrol Sistemleri

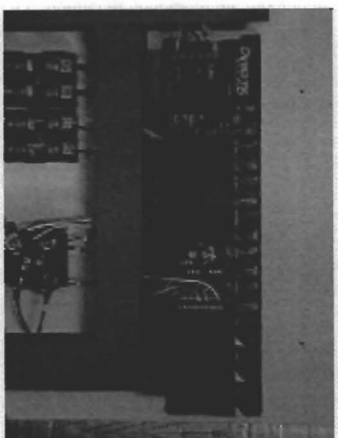
Donanımsal mantık kontrol sistemleri uygulanması en basit kontrol yaklaşımlarından biridir. Bunlar genelde “basamak mantık” yapısını kullanırlar. Basamak mantık yapısında;

- Çok röle çıkışlı endüstriyel röleler
 - Kullanıcının seçtiği ayar noktalarıyla tetiklenen sensörlü röleler
 - Süreyle duyarlı kapanan röle temaslı endüstriyel zamanlayıcılar
 - Tüm aktivatör ve röleler için ortak güç üniteli sistemler kullanılabilir.
- Basamak mantık sistemi, türbinin çalışmasını kontrol etmek için bir kaskat röle serisi kullanır. Basit bir tip Şekil-6.32’de görülmektedir. Bu örnekte küçük durdurma regülasyonlu ve şu özellikleri bulunduran bir rüzgar türbini düşünülmüştür:
- Bir kontaktör ile şebekeye bağlanan bir endüksiyon jeneratörü
 - Tank içindeki basınçlı havanın bir solenoid vasıtasıyla salınarak nüfus etmesi prensibine dayanan bir fren ve frendeki basıncın ayarlı seviyeyi aştığını gösteren bir fren basınç switch’i
 - Frenin operasyonu için tanka hava toplayan bir kompresör ve bunun çalışması için tankta hava olduğunda devreye giren bir basınç switch’i
 - Türbin titreştiğinde açılan ve gerekirse açık kalan bir titreşim switch’i
 - Rüzgar hızı belli bir seviyeye geldiğinde röle kontaktörünü kapatan bir rüzgar hız sensörü
- Şekil-6.32’de gösterildiği gibi, start butonuna basan operatör, start rölesinin sargısına enerji verir. Start rölesi birçok kontak barındırır (Bölüm 1). Start rölesine enerji geldiğinde fren kompresörü güç alır (Bölüm 2). Tankta basınç varsa kompresör kapalı kalır. Basınç herhangi bir zamanda düşerse kompresör devreye girer. Start rölesine enerji geldiğinde, titreşim sensöründe herhangi bir aşırı titreşim görülüyorsa, rüzgar hızı uygun aralıkta ise ve tank basıncı yeterli yükseklikte ise fren solenoid rölesine enerji gider (Bölüm 3). Bu röledeki kontaklar solenoidi açıp frene hava dolmasını sağlarlar (Bölüm 4). Bu röledeki diğer kontaklar, fren fren pistonunda yeterli hava varsa jeneratör kontaktörüne enerji gitmesine müsaade ederler (Bölüm 5). Bu noktada, türbin çalışma hızına kadar ivmelenir ve güç üretir. Rüzgar azalırsa fren solenoidi kapanır ve frenden hava serbest kalır (Bölüm 3 ve 4). Solenoidin kapanmasıyla eş zamanlı olarak, jeneratör kontaktörü şebekeden ayrılır (Bölüm

5). Fren, türbini durduracak ve türbin tekrar rüzgarın artmasını ve başkaca bir problem çıkmamasını bekeleyecektir. (Şekil-6.34)



Şekil-6.32 Basamak mantık örneği (Manwell, 2002)



Şekil-6.33 Programlanabilir mantık kontrolör [7]

Bazı donanımsal mantık kontrolleri, ana bilgisayarın arızalı olduğu durumlarda acil kapama yapmak üzere ek bir ünite olarak görev alabilirler. (Şekil-6.33)



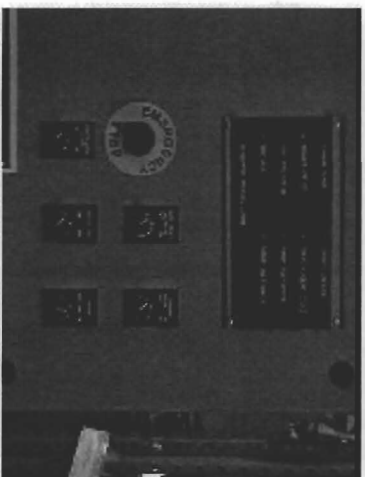
Şekil-6.34 Dinamik fren kapasitörleri ve rezistörleri [7]



6.3.4.2 Elektriksel Mantık Kontrol Devreleri

Yönetmel kontrolörler kısmen veya tamamen elektriksel devrelerden oluşabilirler. Bunlar şu elemanları içerebilirler:

-Transistörler ve silikon kontrollü redresörler gibi switch'ler ile yüksek akım ve güç geçen devreler kontrol edilir. (Şekil-6.35)

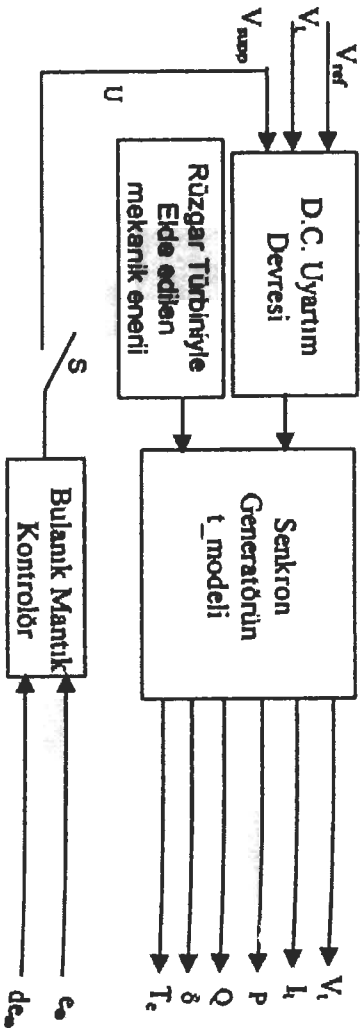


Şekil-6.35 Kontrolör ve switchler [7]

-AND ve OR geçitli mantık çipler, kontrol mantığını uygularlar.

-Akımı sınırlayan devreler ve AC dalgalarını tespit eden devrelerle kontaktörler kontrol edilir. Bu sayede senkron jeneratör, güç kaynağına senkron hale getirilir. Ayrıca senkron

jeneratör çıkış büyüklüklerini bulanık mantık ile de kontrol etmek mümkündür. Burada değişen rüzgar hızına göre senkron jeneratörün çıkış büyüklüklerinin (gerilim, akım, güç, moment ve yük açısı) müsaade edilen sınırlar içerisinde istenilen değere getirilmesi bulanık mantık tasarlanır. Şekil-6.36'da görülen sistemde bulanık mantık kontrolöre, sistemin dinamik performansını ifade eden değişkenler giriş sinyali olarak alınır. Alınan giriş sinyalleri ve oluşan çıkış sinyalleri arasında minimum ve maksimumlar hesaplanır. Nielenendirilen giriş ve çıkış sinyallerine uygun bulanık kümeler ölçeklendirilir. Senkron jeneratörde değişen rüzgar hızına göre çıkış büyüklüklerinde meydana gelen aşırı salınımları azaltmak gerekir. Bu durumu gözönüne alarak arzu edilen çıkış sinyalini yakalamak için bulanık kontrolörün giriş ve çıkış değişkenlerine göre bulanık mantık kural tablosu hazırlanır. Tüm bu işlemlerle senkron jeneratörün çıkış büyüklükleri salınımsız kontrol edilirken ayrıca dinamik performansı da kararlı hale gelir.



Şekil-6.36 Bulanık mantık kontrol sistemi şeması (Güney ve Oğuz, 2000)

6.3.4.3 Bilgisayarlı Kontrol Sistemleri

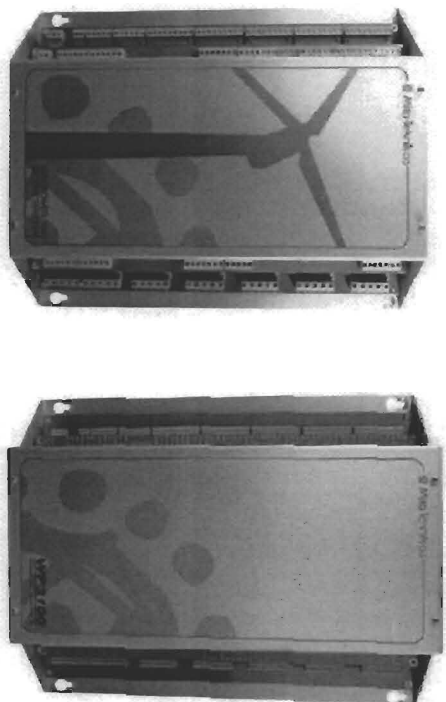
Çoğu rüzgar türbinleri yönetsel kontrol olarak bilgisayar kontrolünü tercih eder. Bu kontrolörlerde kötü şartlara çalışmaya yatkın endüstriyel bilgisayarlar kullanılır. Bu bilgisayarlar, diğer cihazlarla; dijital giriş-çıkış portları (I/O), analog-dijital çeviriciler, dijital-analog çeviriciler ve iletişim portları vasıtasıyla haberleşirler. Bu bilgisayarlarda portlar ve mantık kontrol arayüzleri bulunabilir. Bilgisayarlı kontrol sistemleri ana işlemci ile (CPU) mantık ve kontrol fonksiyonlarını yerine getirir. Ayrıca türbinin muhtelif bölgelerinde bulunabilecek CPU'lar ile yapılacak işlemler ana CPU kontrolünde gerçekleştirilebilir. Bu işlemler ve sistemler için birçok firmanın ürünleri mevcuttur. Türbin sektöründe bulunan ve

bilgisayar kontrollü alanında ileri teknoloji sahibi Mita Teknik firmasının bazı ürünleri altta görülmektedir.



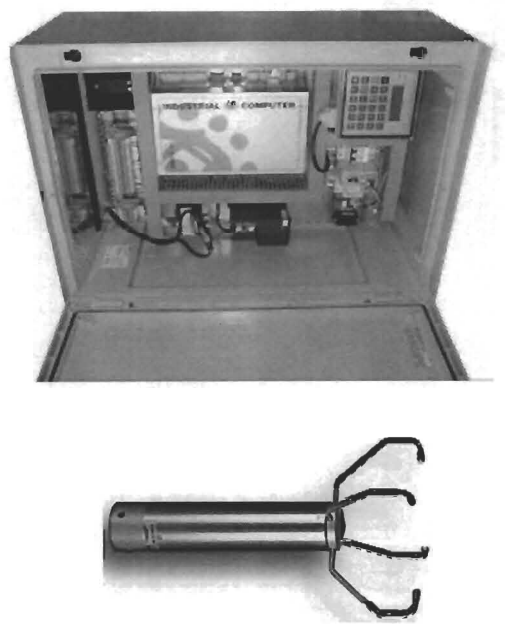
Şekil-6.37 IC 1000 ve IC 500 kontrolör [17]

Şekil-6.37 görülen özel işlemciler ile türbinlerde çeşitli kontroller sağlanmaktadır. Örneğin IC 1000 ile küçük-orta bir türbinin (300-500 kW) kontrolü sağlanabilir. IC 500 ile ise bir türbinin alt ünitelerinde kontrol sağlanabilir.



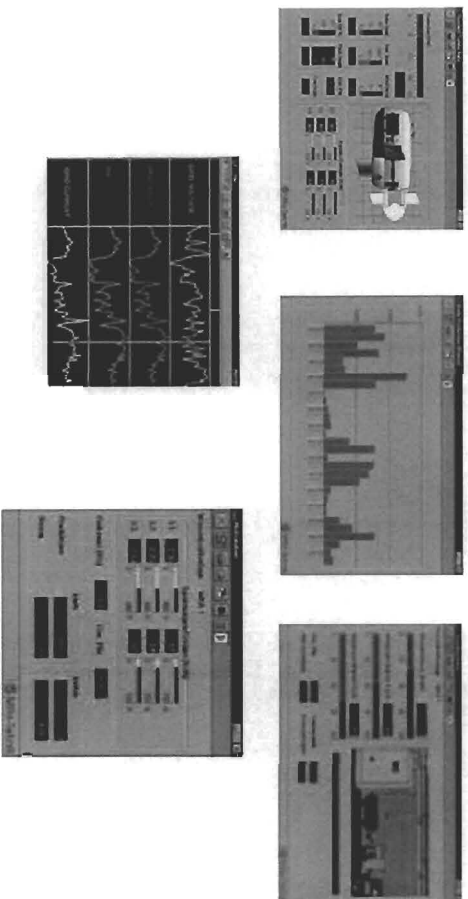
Şekil-6.38 WP 3000 ve WP 3100 kontrolör [17]

Üstte görülen WP 3000 ve WP 3100 kontrolörleri tüm türbinlere adapte edilebilen yapıdadırlar. Altta görülen IC 1000-W ise iklim şartlarını ölçerek rüzgar hızı, rüzgar yönü, sıcaklık ve hava basıncı datalarını sisteme kazandırır.



Şekil-6.39 IC 1000-W İklim Şartları Ölçüm Ünitesi [17]

Bilgisayarlı kontrol sistemlerinde kullanılan yazılımı ise her firma kendine uygun olacak biçimde geliştirir. Örneğin, Mita Teknik firmasında kullanılan yazılım WPPMS (Wind Power Management System) adını taşır. Sistemin; görüntülenme, acil durum ayarlamaları, uzaktan kontrol, operasyon özeti gibi fonksiyonları mevcuttur. (Şekil-6.40) Üretim, iklim durumu, rüzgar durumu, voltaj-akım durumu gibi bilgileri kullanıcıya çeşitli şekillerde sunar. Aylık, yıllık ve günlük bilgilere ve grafiklere 24 saat uzaktan ulaşım imkanı bulunur. Birçok ayrı modül yardımıyla gelişmiş kullanıma olanak tanır. Kontrol paneline kumanda edilerek, türbinde; başlangıç, durdurma, sapma gibi hareketlere direkt ulaşım sağlar. Tüm rüzgar çiftliğine kumanda sağlanabilir. [17]



Şekil-6.40 WPPMS sistemi [17]

6.3.5 Güvenli Hata Yedekleme Sistemi

Rüzgar türbinlerinde kontrol sisteminin dayanak noktaları önceki konularda anlatılmıştı. Kontrol sistemi bu birimlerin olası hatasına karşı güvenli hata yedekleme sistemleri bulundurulmalıdır. Bu sistemler; şebeke kaybı, rotor aşırı hızlanması, aşırı titreşim ve diğer acil durum şartlarında türbini güvenli biçimde kapatmalıdır. Güvenli hata yedekleme sistemi şu fonksiyon ve bileşenleri içermelidir:

-*Şebeke kaybı durumunda düzensiz kapanma.* Eğer güç şebekesi türbin aktivatörlerine güç sağlarsa, şebeke güç kaybı nedeniyle kontrolörler, bu aktivatörlerin yardımıyla türbini kapatmayı başaramazlar. Eğer kontaktörler ile hata durumunda açılma ve frenler ile hata durumunda kapanma yapılabiliyorsa güvenli türbin işlevinden söz edilebilir. Kapanma gücü; yaylardan, hidrolik akümülatörden ve yedekleme güç birimlerinden gelebilir.

-*Yedekleme kontrol gücü.* Eğer şebeke hatası oluşursa, kontrolör için yedekleme gücü, yönetsel kontrolörün röleleri güvenli konumda tutmasına izin vererek türbinin, güç geri geldiğinde tekrar çalışmasını garantiler.

-*Bağımsız acil durum kapanma.* Sensörlerde hata oluşursa, yönetsel kontrolörün bu hatadan haberi olmayabilir. Basit güvenli yedekleme sistemi; türbini, rotor aşırı hızlanması ve aşırı titreşim durumlarında devre dışı bırakabilir.

-*Yönetsel kontrolör hatasında bağımsız donanın devre dışı bırakma.* Bir yazılım boşluğu veya hatası türbinin hatalı çalışmasına yol açabilir. Yönetsel kontrolörün yazılımı veya donanımı hata durumuna gelirse sistem, türbini kapatabilecek şekilde tasarlanmalıdır.

6.4 Dinamik Kontrol Teorisi Ve Uygulanması

Bu bölümde rüzgar türbinlerinde uygulanan dinamik kontrol sistemleri tasarım prosesine ve prosesin bazı özelliklerine değinilecektir.

6.4.1 Dinamik Kontrolün Amacı

Dinamik kontrol sistemleri; makina dinamiğinin, kontrol işlemi sonucuna etkisinin olduğu durumlarda kullanılır. Genelde kontrol sistemleri, makina cevabının dinamiğini ve doğruluğunu iyileştirmek için tasarlanırlar. Makina cevabının dış etkenlerden etkilennesini minimum düzeyde tutmak ve makina parçaları ile farklı koşullar altında çalışmada makina duyarlılığını azaltmak temel amaçtır. Bunu sağlamak için kontrol sistemleri geri beslemeye

ihtiyaç duyarlar. Yani kontrol aksiyonunun sonucu, bir sonraki kontrol için bir girdi haline gelir. Kontrol sistemi bu ölçüden faydalanarak bir sonraki kontrol aksiyonunu şekillendirir. Bu etkiler basit bir kanat açısı değişimi kontrol mekanizmasıyla açıklanabilir. Bu mekanizma; kanatı, kanat açısı değişimi eksen etrafında çevirmek için bir elektrik motoru kullanır. Kanatı çevirmek için motora uygulanacak akımın belli bir süresi vardır. Kanatın açısının değişimini etkileyecek birçok fonksiyon mevcut olacaktır:

-Zaman çerçevesinde makina çalışmasında oluşacak değişimler. Örneğin: Sıcaklık nedeniyle olacak değişimler, kanat açısı değişimi eksenı yatak sürtünmesi veya bileşenlerin aşınması.

-Farklı türbinlerde kurulu olan parçaların varyasyonları (farklı diren., yatak sürtünmesi, kanat kütlesi ve dağılımı).

-Aerodinamik veya dinamik kuvvetler nedeniyle ortaya çıkabilecek kanat açısı değişimi momenti gibi dış düzensizlikler, yada buzlanma nedeniyle kanat ataleti değişmesi.

Anlaşılabacağı üzere kontrol sistemi her zaman arzulanıldığı biçimde çalışmaz. Bir alternatif olarak “kapalı döngü” kontrol sistemi, kanat kökü ölçüsünü (Kanatın gövde tarafında kalan kısmı) kontrol sistemi girdisi olarak kullanabilir. Kapalı döngü kontrol ayrıca sistem dinamiklerini geliştirmek için kullanılabilir. Üstteki örnekte kanat her zaman aynı sürede aynı mesafeyi kateder. Düzgünce tasarlanmış bir kontrol sistemi, motora giden akımı hızla artırarak kanatı ivmelendirebilir ve ardından negatif ivme vererek sistem cevab süresini kısaltabilir. (Manwell, 2002)

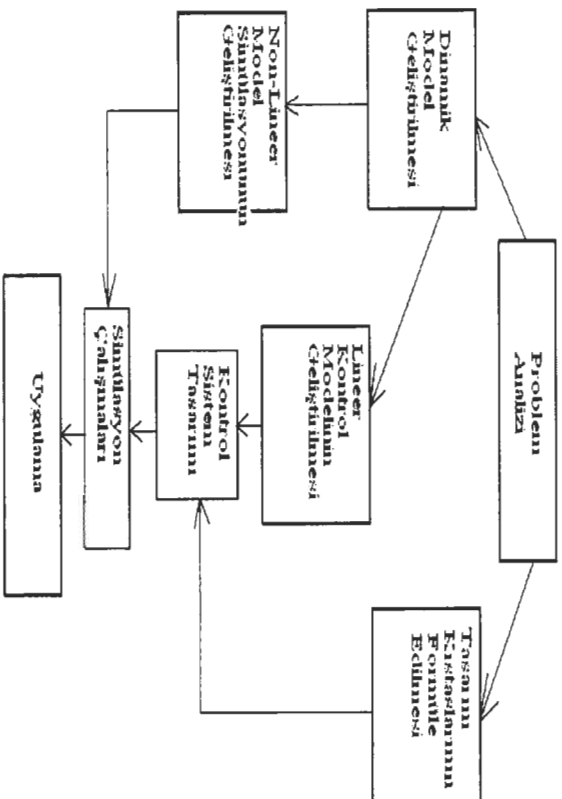
Bundan başka rüzgar türbinleri operasyonu, kontrol sistemi üzerinde daha farklı etkilere de sahip olabilir. Mesela bazıları türbin dinamikleri ile ilişkili olarak; titreşen uzun kanatlar veya yüksek kuleler gibi, kontrol sistemine etki yapabilir. Yada değişken hızlı bir rüzgar türbini belli rüzgar aralıklarında sabit bir uç hız oranı (sabit C_{pmax}) devamlılığı isteyebilir. Kontrol sistemi burada rüzgar hızı aralıklarını yakalamaya çalışacak ve jeneratör torkunu değiştirerek rotor hızına hakim olmaya gayret sarfedecektir. Bu durumda kontrol sisteminin amacını, rüzgarın hızı belirlemiş olur. Yüksek hızlı rüzgarlarda kontrol sistem amacı daha farklıdır. Kanat açısı değişimi kontrollü değişken hızlı türbinlerde yüksek rüzgar hızlarında jeneratör torku ve kanat açısı ayarlanarak yüklerin azaltılmasına ve sabit güç-tork üretimi

devamlılığına çalışılır. Burada ise kontrol sistemi amacı sabit C_p operasyonunun tam tersi olarak sabit güçlü, değişken rüzgarlarda yakalayabilmek olacaktır.

6.4.2 Dinamik Kontrol Sistemi Tasarımı

6.4.2.1 Klasik Kontrol Sistemi Tasarımı Uygulaması

Şu aşamalardan oluşur:



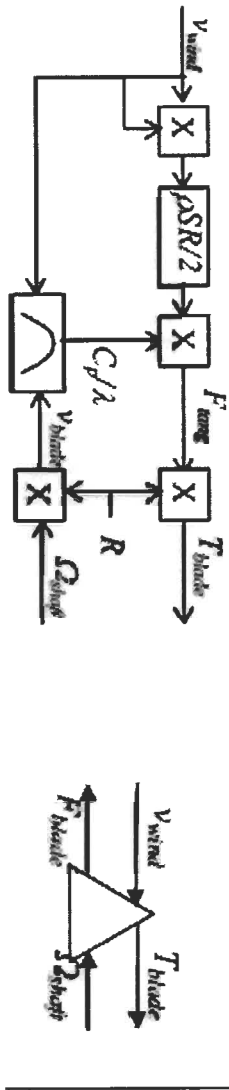
Şekil-6.41 Kontrol sistemi tasarım metodolojisi (Manwell, 2002)

-Problem Analizi: İstenilen makina, operasyon, mevcut kontrol, sensör ve aktivatörler ile diğer tasarım ölçütlerinin düşünülmesinden oluşur. Bu analiz ayrıca kontrol karakteristiklerini iyileştirmek için yapılacak yeni tasarımların gösterilmesini de kapsar.

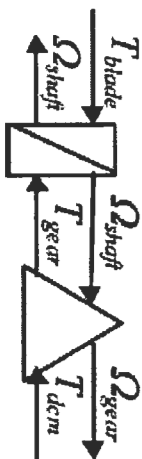
-Değişkenlerin Formülasyonu: Değişkenlerin ön tasarımında bazı ölçütler kullanılır; sistem cevap süresi, kontrol sistem stabilitesi gibi. Hızlı sistem cevabı, daha büyük aktivatör gücü gerektirir; bileşen yüklerini de artırarak ömürlerini kısaltır.

-Model Geliştirme: Kontrol sistemi tasarımı; sistem dinamiklerinin anlaşılması için matematik modeller kullanmayı gerektirir. Sisteme bağlı olarak bunlar lineer veya non-linear

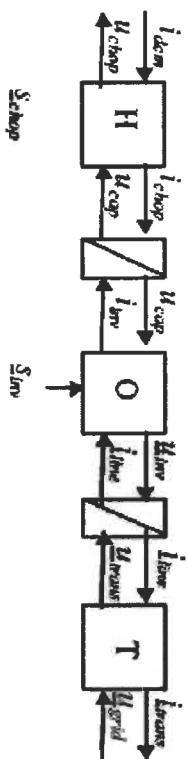
modeller olabilir. (Bkz. Bölüm 6.5.4) Herbir alt sistem modeli, sistem dinamiklerinde iyi bir şekilde tanımlanmalıdır. Örnek altsistem modelleri;



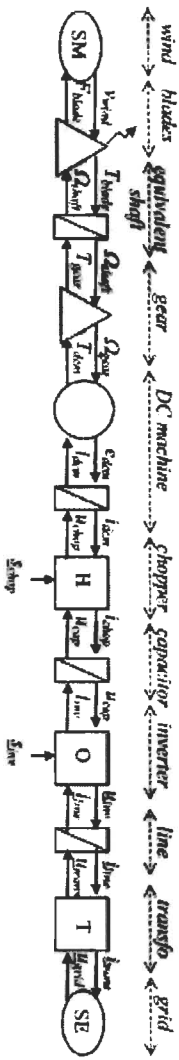
Şekil-6.42 Örnek kanat modeli (Bouscayrol, Tounzi, Guillaud, Lancigu ve Delarue Ph., 2003)



Şekil-6.43 Örnek mekanik kısımlar modeli (Bouscayrol, Tounzi, Guillaud, Lancigu ve Delarue Ph., 2003)

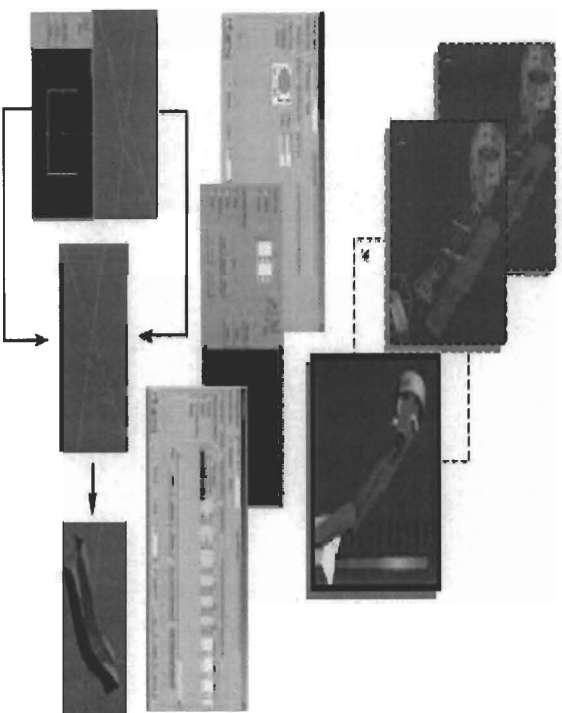


Şekil-6.44 Örnek elektriksel kısımlar modeli (Bouscayrol, Tounzi, Guillaud, Lancigu ve Delarue Ph., 2003)



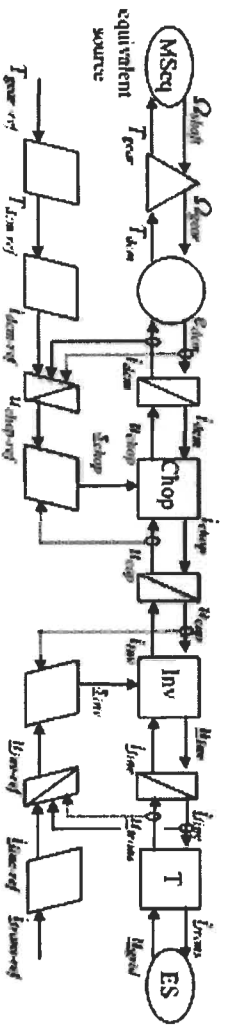
Şekil-6.45 Örnek sonuç sistem modeli (Bouscayrol, Tounzi, Guillaud, Lancigu ve Delarue Ph., 2003)

Bu modeller çıkarıldıktan sonra ADAMS, MATLAB-SIMULINK veya ANSYS programları yardımıyla modeller denenebilir. (Şekil-6.46)



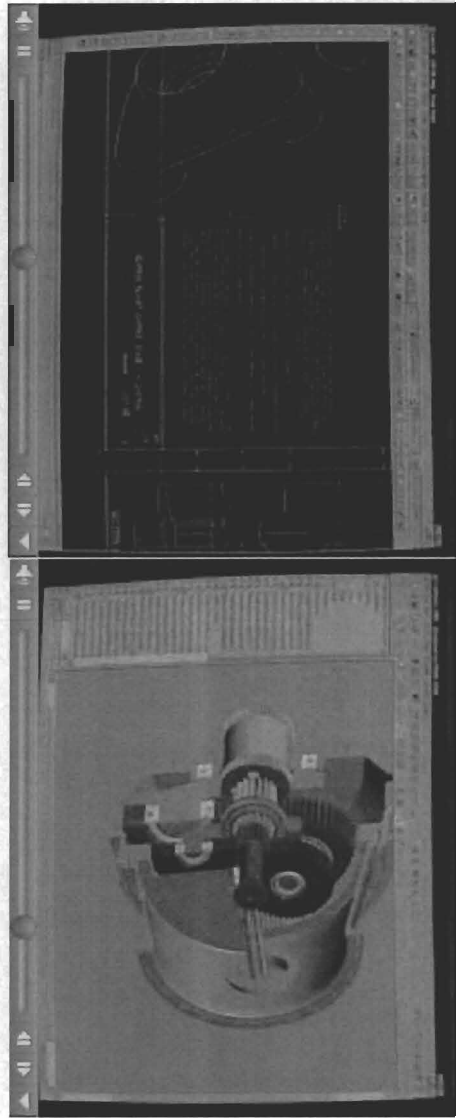
Şekil-6.46 ADAMS programı uygulaması

- Model Lineerleştirme:** İlk kontrol sistemi tasarımında, modeller genellikle lineerleştirilir.
- Kontrol Tasarımı:** Tasarım prosesinde; mühendis, kontrolörün dinamiklerini tasarlamaya girer. Klasik tasarım yaklaşımında, kontrol edilen sistemin dinamik cevabı, belli kriterleri sağlayacak şekilde tasarlanarak istenilen üç farklı frekans aralığına denk getirilmeye çalışılır. Düşük-frekanslı sistemlerin davranışı, istenilen kontrol emirlerine uyuma eğilimindedir. Orta-frekanslı aralıkta sistem cevabı, stabiliteyi ve uygun sistem cevab süresini sağlayacak şekilde tasarlanır. Daha yüksek frekans dinamikleri, modellenmiş dinamiklerin ve sensör ölçümlerinin, sistem davranışını etkilemesi için tasarlanır.

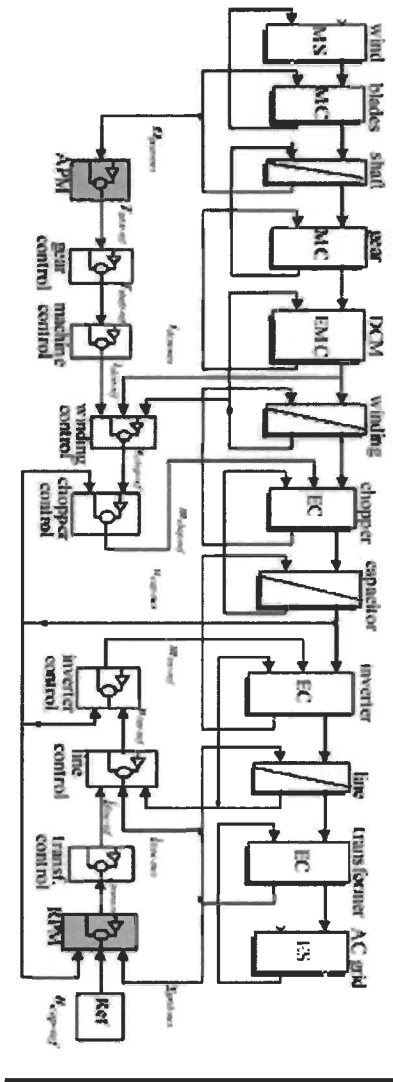


Şekil-6.47 Örnek kontrol sistemi modeli (Bouscayrol, Tounzi, Guillaud, Lancigu ve Delarue Ph., 2003)

- Simülasyon Geliştirilmesi:** Kontrol tasarımının çalışmasını test etmek için bilgisayar programları ve kodları geliştirilir. Bunlar non-linear sistem modellerine dayanır.



Şekil-6.48 Örnek simülasyon geliştirilmesi



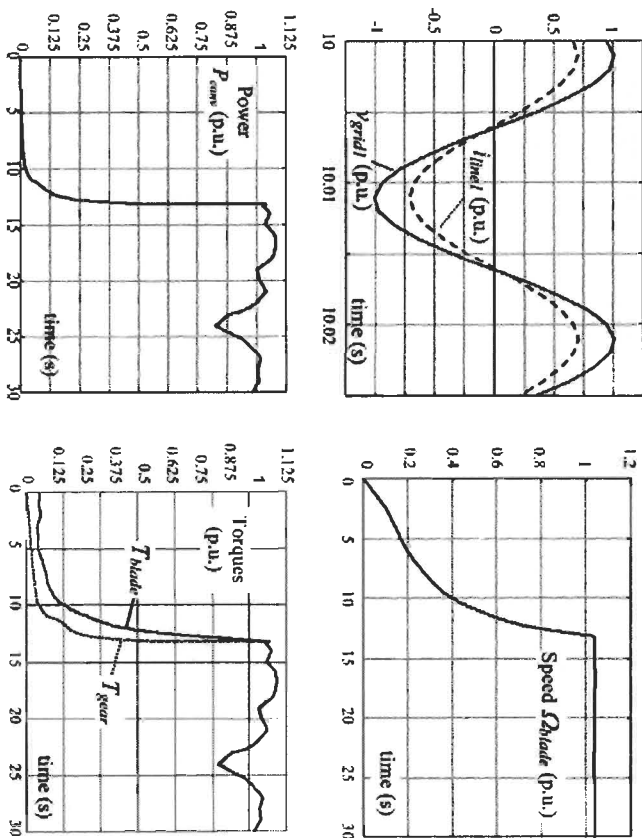
Şekil-6.49 Örnek sistem MATLAB-SIMULINK modeli (Bouscayrol, Tounzi, Guillaud, Lancigu ve Delarue Ph., 2003)

-Simülasyon Çalışmaları: Simülasyon sonuçları alındıktan sonra tasarlanmış sistem üzerindeki son değişiklikler yapılır. (Şekil-6.50)

-Uygulama: Bir tasarım sonuçlandırıldığında; kontrolör, türbin üzerinde denenir.

6.4.2.2 Diğer Kontrol Tasarımı Yaklaşımları

Klasik dinamik kontrol sistemlerinden başka kontrol tasarımı tipleri de mevcuttur: Uyarlanabilir Kontrol, Optimal Kontrol ve Arama Algoritmaları. Sayılan her yöntemin lineer kontrol tasarım metodlarına göre avantajları vardır. Bu avantajlar özellikle non-lineer sistem kontrolünde ortaya çıkar.

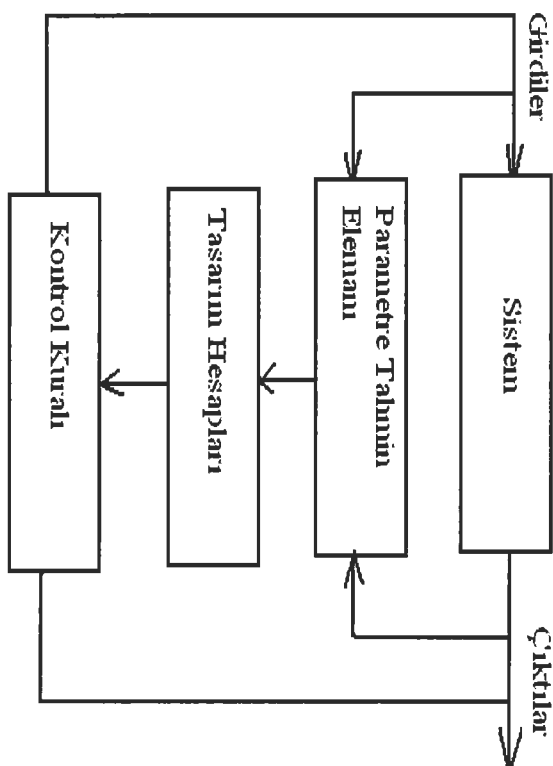


Şekil-6.50 Örnek sistem simülasyon sonuçları (Bouscayrol, Tounzi, Guillaud, Lancigu ve Delarue Ph., 2003)

6.4.2.2.1 Uyarlanabilir Kontrol

Rüzgar türbinlerinin dinamik davranışı; rüzgar hızı, türbin torku ve kanat açısı değişimi açısı arasındaki non-linear ilişki nedeniyle, rüzgar hızına yüksek oranda bağlıdır. Sistem parametrelerindeki değişiklikler; bu parametre değişikliklerine minimum duyarlı bir kontrolör tasarımı ile yerli yerine oturabilir. Bu uyarlanabilir kontroler özellikle sistem parametrelerinin aniden veya geniş bir aralıkta değiştiği sistemlerde kullanışlı olur. Uyarlanabilir kontrol, sistem parametre değerlerini sürekli ölçer ve kontrol sistem dinamiklerini her zaman istenilen performans kriterlerine göre ayarlar.

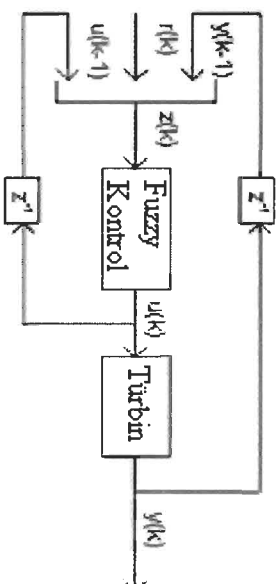
Örneğin üç kanatlı, yatay eksenli bir rüzgar türbini ile üç fazlı bir endüksiyon jeneratör, dişli kutusu vasıtasıyla bağlanmış olsun. Sistemin, izole bir elektrik üretim sistemi olduğu düşünülecek olursa Şekil-6.51'deki kontrol sistemi olacaktır.



Şekil-6.51 Uyarlanabilir kontrol sistemi blok diyagramı (Dadone, Dambrasio ve Fortunato, 1997)

Parametre tahmin elemanı, uyarlanabilir kontrolün hayati organıdır. Girdi ve çıktıların işlendiği parametre tahmin elemanı, sistemin uygun lineer modelini oluşturur. Tasarım hesapları bloğunda ise, istenilen kontrol hedeflerinin kaydı tutulur. Kontrol kuralı bloğu, uygun sistem girdilerine hedef çıktıları (tasarım hesapları bloğunda kaydedilen) ve parametre tahminiyle tahmin edilen datalarla karar verir. Kontrol sisteminin hedefi, endüksiyon jeneratörüne oluşturulan frekans ve voltaj ile temsil edilen sistem çıktılarının regülasyonunu yapmaktır.

Yöntemi geliştirmek için tahmin temelli bulanık mantık da kullanılabilir. (Şekil-6.52)



Şekil-6.52 Bulanık mantık kontrol sisteminin temeli (Dadone ve Dambrasio, 2003)

Genelde uyarlanabilir bulanık mantık kontrolü başlangıçta kabul edilen parametreler setiyle ($Q(0)$) başlar. Bu set sadece üniteyi stabil hale getirmektedir. Bundan sonraki bir zaman adımında uyarlanabilir bulanık mantık, parametre kontrol setini ($Q(k)$) şu fonksiyonu minimize edecek şekilde ayarlar:

$$J(k) = \frac{1}{2} e_y^2(k) \quad 6.3$$

Burada $e_y(k)$, kontrol hatası olup şu şekilde tanımlanır:

$$e_y(k) = r(k) - y(k) \quad 6.4$$

Burada $y(k)$ türbinden(ünite) gelen çıkış sinyali ve $r(k)$ 'da bu sinyali ifade eden referans sinyaldir.

Tahmin temelli kontrolde hata şu şekildedir:

$$\hat{e}_y(k) = r(k) - \hat{y}(k) \quad 6.5$$

Ve fonksiyon da;

$$\hat{J}(k) = \frac{1}{2} \hat{e}_y^2(k) \quad 6.6$$

Denklem 6.5'te $\hat{y}(k)$; k zamanında tahmin edilen çıktı değerini temsil eder. Sistem, ortalama azaltma metoduyla ifade edilecek olursa;

$$y(k) = a_k y(k-1) + b_k u(k-1) \quad 6.7$$

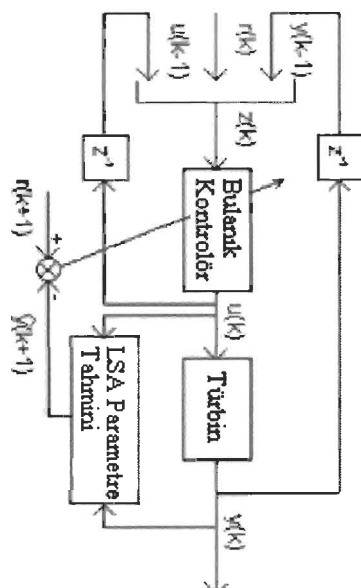
Bunun yanısıra bulanık mantık sistemi Şekil-6.53'deki gibidir. Burada en küçük kareler algoritması (LSA) ile \hat{a}_k, \hat{b}_k sabitleri tahmin edilir. Bu sabitlerin; k ve k+1 zamanları arasında değişmediği kabulü ile kontrol edilen sistem modeli şu şekilde ifade edilir;

$$\hat{y}(k+1) = \hat{a}_k y(k) + \hat{b}_k u(k) \quad 6.8$$

Bu ifade LSA ile tahmin edilen çıktıdır. $\hat{y}(k+1)$ sinyali $r(k+1)$ referans sinyali ile kıyaslanır ve farkı, bulanık mantık kontrol parametrelerinin ($Q(k)$ 'nın) düzeltilmesinde kullanılır.

$$J(k+1) = \frac{1}{2} \left\{ r(k+1) - \left[\hat{a}_k y(k) + \hat{b}_k u(k) \right] \right\}^2$$

6.9

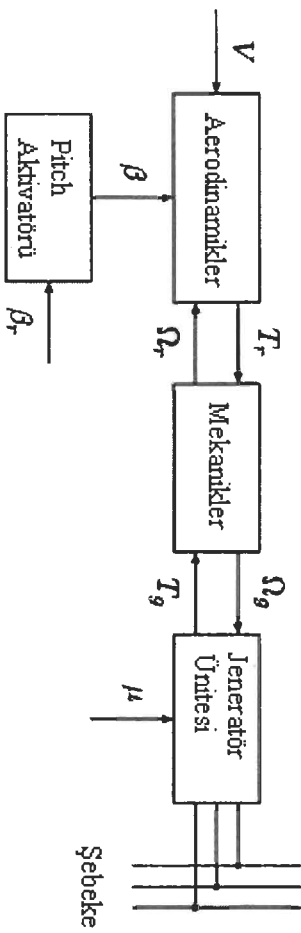


Şekil-6.53 Tahmin temelli uyarlanabilir bulanık mantık kontrol sistemi (Dadone ve Dambrosio, 2003)

6.4.2.2.2 Optimal Kontrol

Optimal tasarım, zaman domeni bir yaklaşım olup, sistem çıktılarında (Örneğin:Yük) farklılaşarak girdi sinyaliyle birlikte (Örneğin:kanat açısı değişimi hareketi) dengelemeye gider. Optimal tasarım yaklaşımları çok değişkenli olup, bu değişkenleri; rüzgar türbini kontrol tasarımı için uygun hale getirmektedir. Optimal kontrol teorisi, kontrol problemini; performans indeksi biçiminde formüle eder. Performans indeksi çoğunlukla kumanda edilen ve gerçek sistem cevapları arasındaki hatanın bir fonksiyonudur. İleri matematik teknikleri ile, performans indeksinin minimum veya maksimum hale getirilmesi; tasarım parametrelerine karar vermesiyle gerçekleştirilir. Optimal kontrol algoritması genelde farklı sistem değişkenlerinin veya durum tahmini temelli modelin ölçümlerini gerektirir.

Yönteme örnek olarak, değişken hızlı türbin modeli düşünelim. (Şekil-6.54)



Şekil-6.54 Kanat açısı değişimi açısı ve rotasyonel hızı değişebilir sistem (Bianchi, Mantz ve Christiansen, 2004)

Aerodinamik alt sistemiyle, rüzgarın kinetik enerjisi mekanik enerjiye çevriliyor olsun. Girdiler V (rüzgar hızı), β (kanat açısı), Ω_r (türbin rotasyonel hızıdır). Aerodinamik tork çıkışı;

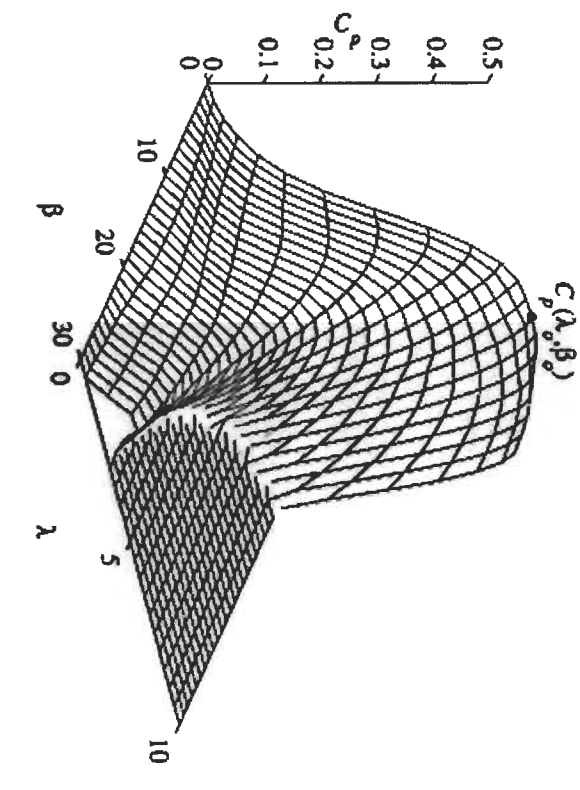
$$T_r(V, \beta, \Omega_r) = \frac{\pi \rho R^2 C_p(\lambda, \beta)}{2\lambda} V^2 \quad 6.10$$

Burada ρ ; havanın yoğunluğu, R ; rotor çapı, λ ; uç hız oranı ($\lambda = \Omega_r R / V$) ve C_p ; türbinde rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirmedeki verimliliği gösterir güç sabitidir. (Şekil-6.55) Kanat açısı değişimi aktivatör bloğu, kanatı uzunlamasına eksen çevresinde döndüren mekanik ve hidrolik sistemlerdir.

Jeneratör ünitesi de, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Jeneratör torku şöyle ifade edilir;

$$T_g = c_1 \Omega_g + c_2 \mu \quad 6.11$$

Burada Ω_g ;jeneratör rotasyonel hızı, c_1, c_2 sabitler olup μ ; kontrol girdisini tanımlar (senkron frekans).



Şekil-6.55 C_p 'nin değişimi (Bianchi, Mantz ve Christiansen ,2004)

Mekanikler altisisteminde de; rotor, dişli kutusu gibi mekanik üniteler bulunur. Aerodinamik güç şu şekilde ifade edilebilir;

$$P_r = \frac{\pi \rho R^2}{2} C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad 6.12$$

6.4.2.2.3 Arama Algoritmaları

Rüzgar türbinlerini kontrol etmek için arama algoritmaları da kullanılabilir. Bu algoritmalar rotor hızını değiştirerek, ölçülen rotor gücünü maksimum hale getirebilirler. Eğer bir güç azalması, hız düşüşüyle birlikte gerçekleşirse; kontrolör hızı hafifçe artırır. Bu davranış rotor hızını; rüzgar hızı değişimde, maksimum güç sabiti civarında tutar (C_{pmax}). Kontrolör, bir mekanik model kullanmadığından çevresel etkilerden etkilenmez. (Manwell, 2002)

6.4.3 Rüzgar Türbini Tasarımında Kontrol İşlemi Açısından Oluşan Problemler

Rüzgar türbinleri tasarlanırken karşılaşılan konular şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek yükler karşısında türbin yapısı ve elemanlarından (miller, dişli kutusu vs.) beklenen dayanıklılık az olursa, daha ağır parçalar, daha ağır bir yapı ve yüksek maliyet oluşacaktır.
- Rüzgar türbini sisteminde birçok hafif sönmülenen yapı bulunur. Bunlar sistemdeki enerji yayılımından kaçınma amaçındadırlar. Bu yapılar, rotor dönme frekansı ve harmoniğindeki

fonksiyonlarca tahrik edilirler. Buna ek olarak, bileşen dinamikleri (rüzgar türbülans çalkalanmaları dahil), aerodinamikler, rotor, sürtücü ünitesi, kule ve kontrol sistemleri; rotor rotasyonunun frekans aralığına belirgin cevap verirler. Bu potansiyel rezonanslar, sistemin çalışmasına ağır sınırlamalar getirirler. Hız ve tork kontrol sisteminin arasında doğal frekans nedeniyle oluşan rezonanslardan kurtulmak gerekir.

-Aerodinamikler büyük oranda non-lineerdirler. Bu durum türbinin farklı çalışma koşulları için farklı dinamik tanımlamalar getirir. Bu farklılıklar, non-linear kontrolörlerin kullanımını veya farklı kontrol kurallarının farklı rüzgar rejimlerine hakim olmasını gerektirebilir.

-Dinamik operasyonlar altında bir kuralından veya algoritmasından diğerine geçişler, dikkatli tasarım kısıtları getirir.

-Kontrol amacı sadece geçiş yüklerini azaltmak değil, aynı zamanda yük çalkalanmalarının meydana getirdiği yorulma yüklerini de azaltmaktır.

-Kontrol ölçümü ve aktivatör donanımında ağırlık ve maliyet minimum olmalıdır.

-Geri besleme amaçlı torkun ölçümü zor olabilmektedir.

-Kullanışlı sistem modelleri yaratmak zor olmaktadır. Sistem modellerinin gerçek koşullarıyla oluşan parametrelerde kıyaslanması gerekir. Kompleks sistem mevcutsa, dizayn süresi ve parametreler artmaktadır. Bu sebepten tasarımcı karmaşık modellerden kaçınmaya çalışarak yarattığı basit model yetersiz kalabilir. (Manwell, 2002)

6.4.3.1 Optimum Uç Hız Oranı Kontrolü İle İlgili Durumlar

Önceden tartışıldığı üzere rüzgar türbinleri düşük hızlarda daha fazla güç elde etmek ve yükleri azaltmak için değişken hız rejimlerinde çalışırlar. Düşük hızlarda enerji kazanımının maksimum hale getirilmesi; rotoru, uygun olan uç hız oranında çalıştırmak ile mümkündür. Bunu yapmak için; rotor hızı, rüzgar hızıyla birlikte değişmelidir. Böylesi bir optimum uç hız oranında çalışma sonucu birçok durum ortaya çıkar:

-**Tasarım Değişiklikleri.** Türbinin verimliliği; rotorun rüzgarla birlikte değişme başarısına bağlıdır. Maksimum verim için, rotorun değişimi hızlı olmalıdır fakat bu da bir dezavantaj olarak sürücü ünitesindeki tork çalkalanmalarını artırır. Daha düz $C_p - \lambda$ eğrisi, rüzgarı daha yakından takip gerektirir.

-Rotor Uç Hız Oranına Karar Vermek. Uç hız oranı; rotor uç hızının, rüzgar hızına oranıdır. Karar verilmesi biraz güç olabilecek bir büyüklüktür. Türbülanslı rüzgarlar zamanla rotor alanı üzerindeki yerlerini değiştirirler. Göbekteki rüzgar hız ölçümleri sadece rotorun bir noktasından yapılır. Uç hız aynı zamanda; rotor hızı, tork ve güç ölçümüyle de bulunabilir. Ancak tork sensörlerine gürültü etkisi nedeniyle bu yöntem bazı durumlarda uygun olmayabilir.

-Rotor Enerjisi. Rotorda depolanan enerji; rotor negatif ivme kazanırken güç kesikliklerine neden olarak, rotor güç veya tork ölçümünde karışıklıklara sebep olur. P_r ; rotor mil gücü, J_r ; rotor ataleti ve Ω ; rotor hızındaki değişimler olmak üzere;

$$P_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_r \Omega^2 \right) = J_r \dot{\Omega} \quad 6.13$$

denklemini yazılır.

-Non-linear Aerodinamikler. Rotor aerodinamik torku veya gücündeki değişim non-lineerdir. Genellikle düşük veya yüksek hızlarda bir non-linear kontrolör gerektirir.

Optimum uç hız oranını takip etmek için bir rotor modeli uygulanabilir. Yada bir arama algoritması ile her an maksimum gücü sağlayacak rotor hızı bulunabilir. Böyle bir yaklaşım başarılı olursa rotor enerjisini maksimum yapmak mümkün olur.

Bir genel yaklaşım da uç hızın belirlemek için kullanılan rotor modeliyle istenilen rotor torku

Q_{ref} , rotor hızının fonksiyonu olarak oluşturulur;

$$Q_{ref} = \frac{\rho \pi R^5 C_{p,max}}{2(\lambda_{opt})^3} \Omega^2 \quad 6.14$$

Q_{ref} ; istenilen rotor torku, ρ ; hava yoğunluğu, R; rotor çapı ve $C_{p,max}$; rotor güç sabiti rotorun optimum uç hızında oluşur (λ_{opt}).

Rotor hızı ölçülür ve jeneratör torku eş zamanlı olarak rotor torkuna ayarlanır. Eğer rotor hızı düşürülürse, tork düşük bir değere ayarlanır ve rotor hızının artmasına müsaade edilir. Eğer rotor hızı rüzgar hızı için yüksekse, rotor torku yüksek bir değere ayarlanır ve rotoru daha verimli

çalışacağı bölgeye doğru yavaşlatır. Tork komutu filtrelenerek yüksek hızlı rotor değişimlerine engel olunur. (Manwell, 2002)

Bu yaklaşım iyi çalışır fakat filtreleme işleminde farklı rüzgar rejimleri için güç ve torkun ani çalkalanmalarının değişmesi gerekebilir. Rotor hızıyla beraber rotor gücündeki değişim, türbin çalışma aralıklarında varyasyonlara neden olur ve güç-tork çalışmalarının kontrolü gerekebilir. Bu durumda uç hız oranı bilinmelidir.

Linders ve Thiringer adlı bilimadamları bir metot önererek rotor uç hız oranına karar vermek için türbin modeli ve türbin gücü ölçümünden faydalanmayı önermişlerdir. Bir kez uç hız oranına karar verildiğinde, güçteki ve dolayısıyla rotor hızındaki değişimler, rotor modelinden kararlaştırılır. Güç ve tork ölçümünden faydalanılarak uç hız oranını tayin etmedeki zorluk, bir C_p için iki uç hız oranı uygun olabilmesindedir. Linders ve Thiringer bir fonksiyon tanımlayarak uç hız oranını belirlerler;

$$C_p(\lambda) = \frac{P_r}{\lambda^3} = \frac{P_{el}}{\frac{1}{2} \rho A \Omega^3 R^3} \quad 6.15$$

Burada P_{el} ; elektriksel güç, η ; sürtücü ünitesi verimi, ρ ; hava yoğunluğu, A ; rotor alanı, ve C_p ; rotor güç sabitidir (λ uç hız oranı için).

Gücün, jeneratör hızına göre türevi alınrsa;

$$\frac{dP_{el}}{d\Omega_g} = \left(\frac{dC_p(\lambda)}{d\lambda} \right) \frac{\eta \frac{1}{2} \rho A V^2 R}{\eta p} \quad 6.16$$

Burada Ω_g ; jeneratör hızı, p ; jeneratör kutup sayısı ve n ; dişli kutusundaki diş oranıdır.

Makina kontrolü, rotora giren ve rotordan çıkan güç akısının rotor hızı değişimiyle modellenmesi ile gelişir.

6.4.3.2 Değişken Çalışma Hız Modları Arasındaki Geçişler

Genelde değişken hızlı rüzgar türbinlerinde rüzgar hızına bağlı olarak 3 farklı kontrol amacı olabilir. Düşükten orta hızlara kadarki hızlarda kontrol amacı, optimum sabit uç hız sağlayarak aerodinamik verimi maksimum yapmaktır. Bu ise; rotor hızına adapte etmekle olur. Orta rüzgar hızlarında; eğer rotor yüksek hızlara, yüksek güç eldesi olmadan ulaşırsa; rotor hızı, güç çalkalanırken sınırlandırılmalıdır. Burada ise kontrol amacı rotor hızını sabitlemektir. Orta-yüksek hız aralığında kontrol amacı, sabit yüksek güç çıkışını sağlamaktır. Bu durum; rüzgardaki mevcut gücün, rüzgar türbininde yüksek oranda güce çevrilmesiyle gerçekleşir. Bu çalışma stratejileri arasındaki geçişler, başarılı kontrol sistemi uygulamalarıyla sağlanmalıdır. (Manwell, 2002)

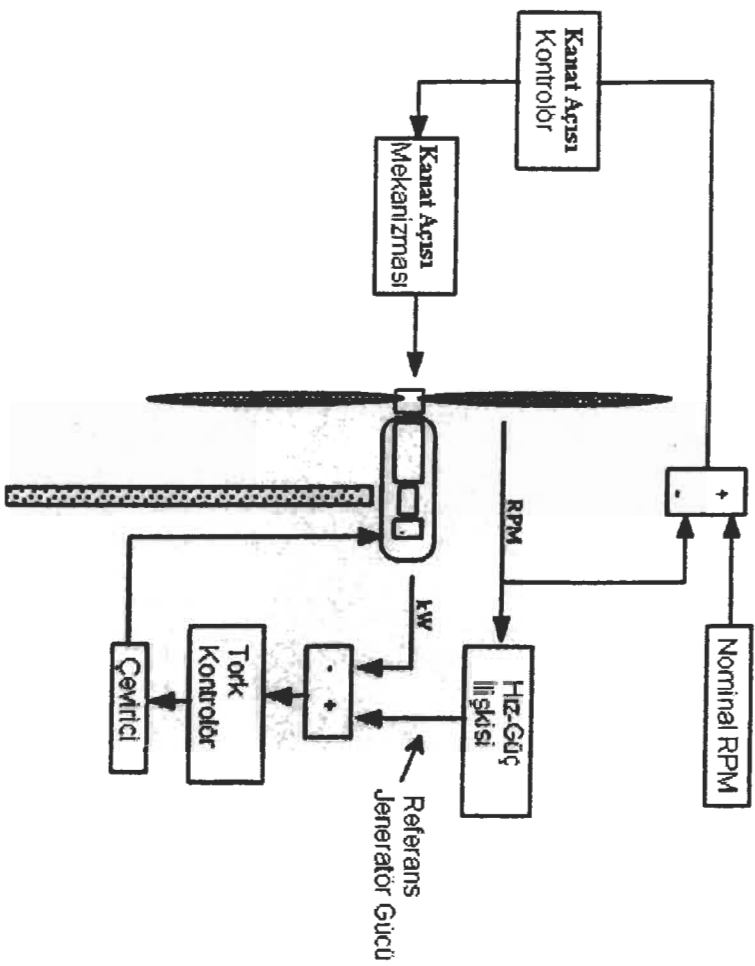
Aynı kontrol amaçları hem durdurma regülasyonlu hem de kanat açısı değişimi regülasyonlu değişken hızlı rüzgar türbinlerine uygulanır. Kanat açısı değişimi regülasyonlu türbinlerdeki avantaj; kontrol amaçlı iki girdiye izin vardır. Bunlar; kanat açısı ve jeneratör torkudur. Kanat açısı; sabit uç hız oranı ve sabit hız rejimlerinde sabit tutulur. Fakat sabit güç operasyonunda; kanat açısı, jeneratör torku çıkış gücünü kontrol ederken rotor hızını kontrol edebilir. Sabit hız operasyonunda rüzgar hızı ve rotor torku değişimiyle jeneratör torkunda ve dolayısıyla çıkış gücünde çalkalanmalar meydana gelebilir. Sabit güç operasyonu boyunca, jeneratör gücü ve tork çalkalanmaları minimumdur. Çünkü kontrol amacı, yüksek güç sağlamaktır. Kanat açısı kontrolörü; yüksek rotor hızını sağlamada en önemli görevi yapar.

Rüzgardaki türbülans durumu, çalışma stratejileri arasında geçiş sağlayacak kontrolörün işini zorlaştırır. Düşük rüzgar hızlarında sabit uç hız operasyonunda, çıkış gücündeki değişim P , rotor hızı değişiminin fonksiyonu olarak Ω ise $dP/d\Omega$ oldukça küçük kalır. Orta rüzgar hızlarında ve sabit hız çalışma koşulunda $dP/d\Omega$ oldukça büyük olabilir. Yüksek hızlı rüzgarlarda $dP/d\Omega$ oranı sıfıra yakın olmalıdır. Orta ve yüksek rüzgar hızlarında iki kontrol girdisiyle ve farklı rüzgar hızlarında belirgin biçimde farklı olan kontrolör davranışıyla, rüzgar hızındaki çalkalanmalar ani aktivatör hareketlerine ve kötü tasarlanmış bir kontrol sistemiyle güç kayıplarına sebebiyet verir.

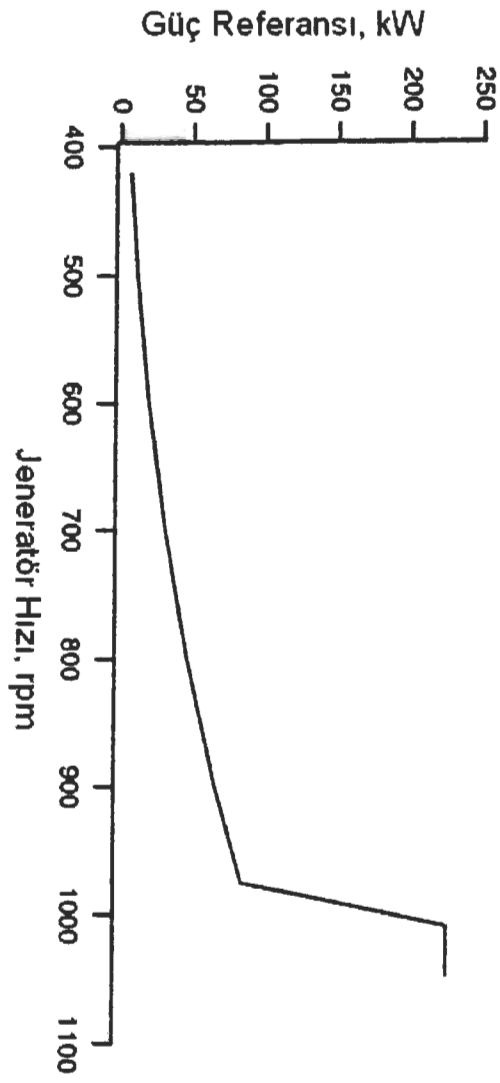
Şekil-6.56'da bu bahsedilen sorunlara bir örnek verilmiştir. Örnekte bir türbin ve genel kontrol konfigürasyonu şeması yer almaktadır. Bu tasarımda, istenen veya referans jeneratör

güçü, rotor hızının fonksiyonu olarak atanır ve istenilen güç-jeneratör hızı eğrisini temel alır. Bu ilişkiye örnek diğer şekilde verilmiştir.

Eğrinin alt kısmındaki değişken hızlı operasyon, rotorun aerodinamik performansına ve sabit hız oranına bağlıdır. Jeneratör birkez hızlı nominal alana ulaştığında (1000 rpm) eğrinin eğimi keskinleşir. Sonuçta, türbin gücü 225 kW 'a ulaştığında, kontrol amacı; sabit güç ve küçük varyasyonlu rotor hızlarını sağlamaktır. Sadece sabit hız koşulunda, kanat açısı kontrol döngüsü; rotor hızını, yüksek hız mertebesinde tutmaya çalışır.



Şekil-6.56 Değişken hızlı kapalı çevrim kontrol sistemi (Manwell, 2002)



Şekil-6.57 Jeneratör hızı-güç ilişkisi (Manwell, 2002)

Çalkalanan rüzgarlarda bu kontrol sisteminde bazı zorluklar oluşmaktadır. Bunun temel nedeni de jeneratör hızının, nominal yüksek jeneratör hızından aşağı düşmesidir. $dP/d\Omega$ eğimindeki hızlı değişimin sonucu olarak, jeneratör hızındaki küçük değişimler dahi jeneratör gücünde büyük değişimlere neden olur. Bu da 150 kW'a ulaşabilen güç düşüşlerini beraberinde getirir. Kontrol sistemi gelişmeleriyle istenen güçten düşmeler sınırlandırılmaktadır.

6.4.3.3 Rüzgar Türbini Yükleri Ve Dış Etkiler

Rüzgar türbini kontrolörlerinin tasarımı, dış etkilerin büyüklük ve frekanslarına dikkat etmeyi ve bu etkilerin egemen olduğu parçalarda dikkatli tasarım yapmayı gerektirir. Örneğin kanat açısı değişimi mekanizmasının ve kontrolünün tasarımı, mekanizmanın maruz kalacağı yük ve etki türlerini ve büyüklüklerini tanımayı gerektirir.

Kanat açısı değişimi sisteminin maruz kalacağı yük ve etkiler şunlardır:

-*Yerçekimi yükleri.* Kanatı etkileyen yerçekimi kuvveti nedeniyle kanat ekseninde momentler oluşur.

-*Merkezkaç yükleri.* Kanat üzerindeki, ataletsel yükleri de kapsayan merkezkaç yükleri, kanat ekseninde momentler oluşturur.

-*Kanat açısı değişimi yatak sürtünmesi.* Bu sürtünmeler eksenel yüklerin bir fonksiyonudur.

Yatak tasarımına momentler etkir.

-*Aktivatör torku.* Bu torklar, bağlantı ve dişlilerle hidrolik ve elektriksel sistemlerden transfer edilmelidirler.

-*Aerodinamik kanat açısı değişimi momenti.* Aerodinamiğin kanat uzunluğuna etkisi, aerodinamik kanat açısı değişimi momentlerini teşkil eder. Kanat tasarımı, titreşimi ve eğilmesi ile türbülans gibi etkilerde rol oynar.

-*Diğer türbin hareketlerine bağlı yükler.* Rotor hızı değişimleri, sapma hareketi ve kule titreşimi kanatlara taşınabilir ve kanat açısı değişimi ekseninde ek moment yükleri oluşturabilir.

Anlatılan etkiler normal çalışmadan ziyade ani kanat açısı değişimleri ile alışılmadık çalışma koşullarında etkili olurlar. Kanat açısı değişimi sisteminin bu yüklerle cevabı, kanat açısı değişimi aktivatör sistemine, kanatların sertliğine, kanat açısı değişimi yataklarının durumuna ve kanatların atalet momentine bağlıdır. (Manwell, 2002)

6.4.4 Lineer Ve Non-Linear Rüzgar Türbin Modellerinin Kullanımıyla Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Sistematik Kontrolör Dizayını

Rüzgar türbininde kanat açısı değişimi açısı regülasyonu düşük rüzgar hızlarında güç elde etmek için değişken hızın ayarlanması, maksimum seviyede güç üretiminin korunması ve ilk başlangıç anına dönüş için gerekli olan düzenlemeleri sağlar. Kontrolör bu ifade edilen amaçları kontrol edecek şekilde dizayn edilmiştir. (Kakili ve Oğuz, 2002)

Hedeflenen kontrolör dizayını; basit, lineer ve PID kontrolörlerden oluşur. Bu kontrolörler için kazanç seçimi (gain) genellikle deneyimlere bağlı olarak yapılır. Kazanç seçiminde sistematik yaklaşım; kontrol nedeniyle potansiyel performans yeteneklerinin gözönünde bulundurulmasını sağlar.

Rüzgar türbinin sürücü kısmı; bir düşük hızlı mil, kazanç kutusu, yüksek hızlı mil ve jeneratörden meydana gelir. Değişken hızlı rüzgar türbinin basit dinamik modeli şu denklemle ifade edilir;

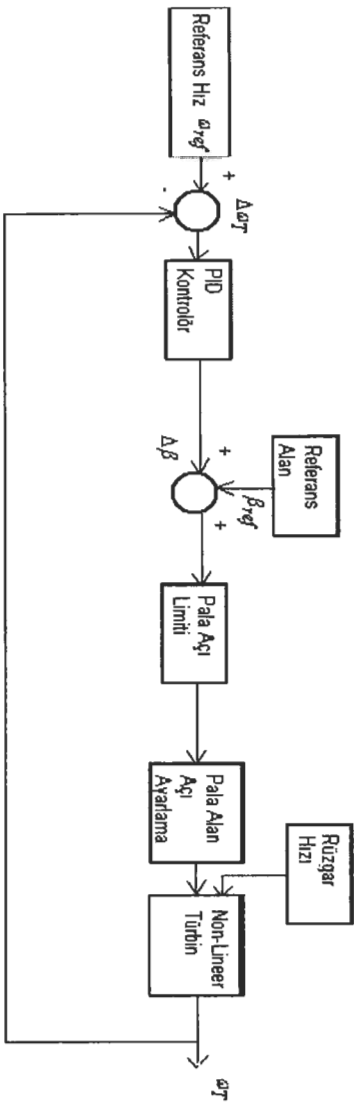
$$J_T \omega_T = Q_A - Q_B$$

Burada ω_T ; açısal mil hızı, J_T ; türbinin ataleti, Q_A ; hava dinamiği torku ve Q_B ; jeneratör milini döndürmek için gerekli mekanik torktur. Hava dinamiği torku ise şu şekilde ifade edilebilir;

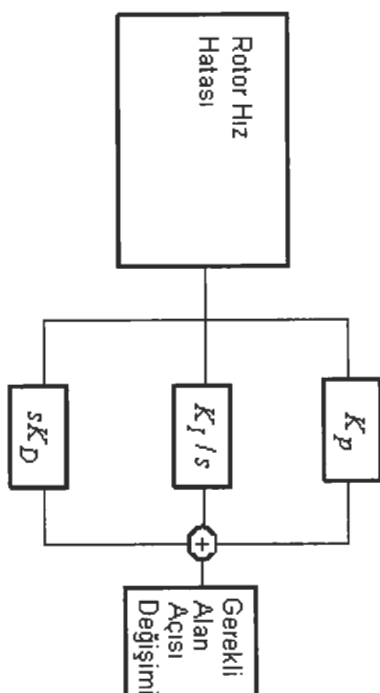
$$Q_A = \frac{1}{2} \rho A R C_q(\phi, \beta) \omega^2 \quad 6.18$$

Bu denkleme ρ ; havanın yoğunluğu, A ; rotor süpürme alanı, R ; rotor yarıçapı, ω ; rüzgar hızı, C_q ; tork katsayısı, ϕ ; non-lineer hız oranı, β ; pervane alan açısıdır. Burada söylenen hız oranı, rüzgar hızına baskın kanat hız oranı olarak tanımlanır. (Kakilli ve Oğuz, 2002)

Kurulan simülasyon sisteminin blok diyagramı alta görülmektedir. (Şekil-6.58) Sistemin giriş sinyalleri; türbin hızı ile referans hızdır. Türbin hızı referans hız farkı $\Delta\omega_T$ 'dir. Bu fark aynı zamanda rotor hatası kontrol girişidir. Kanat alan açısı ayarlayıcı 3-60 derece arası bir açıyı ayarlar. Alan açısı oranı; kumanda edilen kanat açısıyla ölçülen kanat açısı arasında saptanır. Diğer şekilde de PID kontrolör diyagramı görülmüştür. (Şekil-6.59) Kontrol girişindeki rotor hız hatası; istenen rotor hızı ile ölçülen hız arası fark olarak tanımlanır. Hatası önlemek için kanat alan açısı değişikliğinde oransal kazanç (K_p), integral kazanç (K_I / s) ve türevsel kazanç (sK_D) değerleri kullanılır.



Şekil-6.58 Non-Linear rüzgar türbini simülasyon blok diyagramı (Kakilli ve Oğuz, 2002)



Şekil-6.59 PID kontrolör blok diyagramı (Kakilli ve Oğuz, 2002)

Oransal kazanç; hata sinyalinin, belirlenen kazanç ile çarpıp hata sinyali üretir. İntegral kazanç; hata sinyali zamanına göre, integral kazanç ile çarpılır. Türevsel kazanç ise hata sinyalinin türevini alır. Bu üç işlem toplamında arzu edilen alan açısındaki değişime gidilir.

6.4.5 Dinamik Kontrol Sistemlerinin Uygulanması

Dinamik kontrol farklı şekillerde uygulanabilir; mekanik sistemler yardımıyla, analog elektriksel devreler yardımıyla, dijital elektronik birimler yardımıyla veya bunların kombinasyonu biçiminde olabilir. Küçük türbinlerde mekanik kontrol sistemleri tercih edilir. Çoğu rüzgar türbininde ise ya dijital devreler yada analog-dijital devre kombinasyonları kullanılır. (Manwell, 2002)

6.4.5.1 Mekanik Kontrol Sistemleri

Donanımsal dinamik kontrol sistemleri; bağlantılar, yaylar ve kütleler vasıtasıyla bazı çıktılara cevap olarak sistem girdileri aktive ederler. Örneğin: kuyruk rüzgar fırıldığı, rüzgar türbini rüzgara adapte eder; kanat açısı değişimi mekanizması, kanat açısını ayarlar.

6.4.5.2 Analog Elektriksel Devreli Kontrol Sistemleri

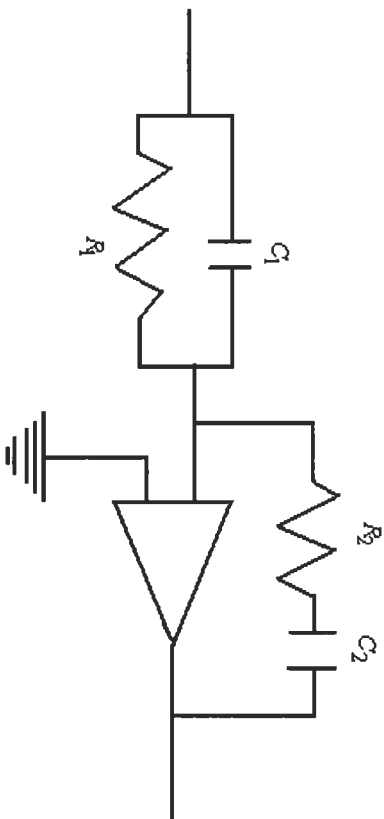
Analog elektriksel devreler de kontrol sistemi uygulamalarında kullanım alanı bulurlar. Genelde daha büyük kontrol ağlarında birim elemanlar olarak görev yaparlar. Bir kez bir kontrol algoritması oluşturulup test edildiğinde hemen devre halinde kartlara basılıp kullanılabilir. Kontrolörler, yönetsel kontrolörden bağımsız çalışabilir ve yönetsel kontrol şemasını basitleştirebilirler. Bu sistemlerdeki en büyük dezavantaj ise kontrol algoritmasının

değişiminin, donanımın değişimi anlamına gelmesidir. Yani esnek bir sistem değildir. (Manwell, 2002)

Rüzgar türbinin her kısmında uygun güç yükselticileri ve aktivatörleri bulunduran elektrik devreleri, kontrol amaçlı kullanılabilir. Lineer dinamik kontrolörler kolayca elektronik bileşenlerle uygulanabilirler. Örneğin Şekil-6.60'deki operasyon yükseltici devresinde uygulanan teknik, şu diferansiyel denkleme sahip bir PID kontrolörün donanımsal gerçekleştirilmesidir;

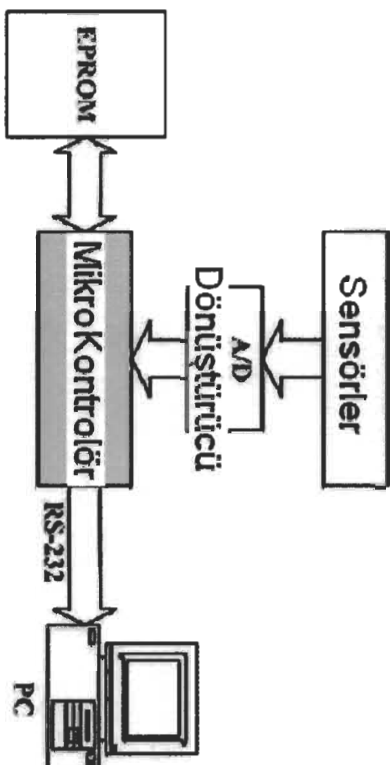
$$g(t) = - \left[K_p e(t) + K_D \dot{e}(t) + K_I \int e(t) dt \right] = - \left[\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \right) e(t) + (R_2 C_1) \dot{e}(t) + \frac{1}{R_1 C_2} \int e(t) dt \right] \quad 6.19$$

Burada $g(t)$; kontrolör çıkışı ve R_2 ile C de direnç ve kapasitansdır. $e(t)$ ise kontrolöre gelen hata sinyalidir.

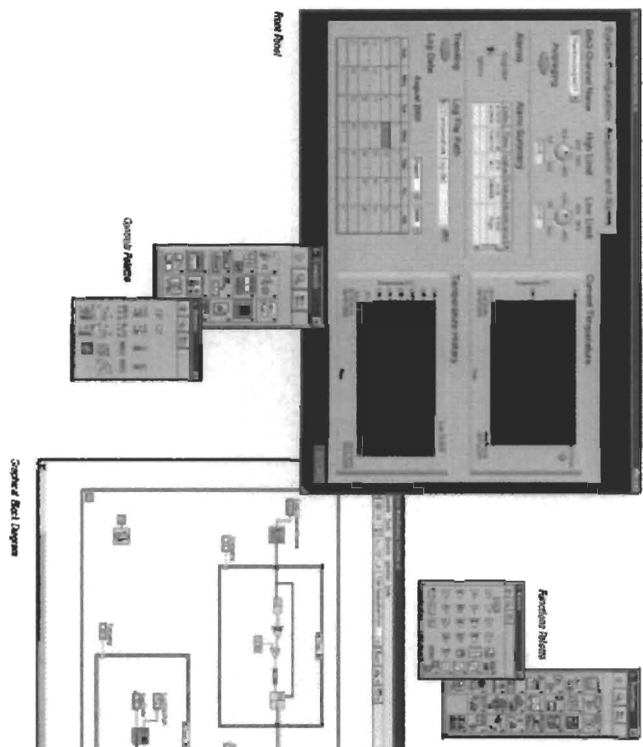


Şekil-6.60 PID kontrolör örneği (Manwell, 2002)

Daha gelişmiş sistemler de mevcuttur. Örneğin Data Toplama ve İşleme Sistemleri ile tüm mekanik veya elektriksiz ölçümler ile sensör dataları ve analog olarak gelen tüm sinyaller bir A/D (Analog-Digital) kart sayesinde toplanarak bilgisayara gönderilir. Bilgisayara giderken onun anlayabileceği formdaki sinyaller haline getirilip tasarlanmış programlar sayesinde yorumlanabilir ve daha sonra da geri besleme mümkün olur. Bu tarz bir sisteme örnek Şekil-6.62'de verilmiştir. Bu sistemde bir A/D kartı, sensörler ve değerlendirme içinde LABVIEW yazılımı kullanılmıştır.

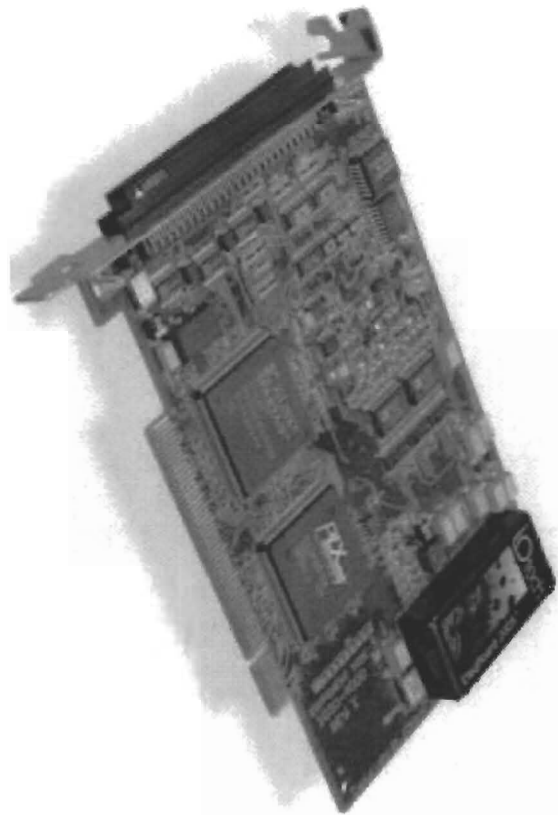


Şekil-6.61 Data toplama sistem örneği (Koutroulis ve Kalaitzakis, 2003)

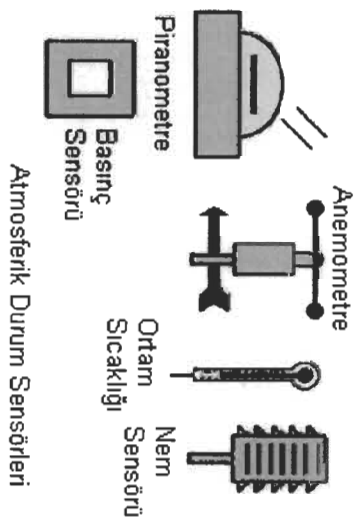


Şekil-6.62 LABVIEW yazılımı

A/D kartına (Şekil-6.63) gelen sensör verileri lokal EPROM'da toplanır. RS-232 seri bağlantısıyla PC'ye aktarılan bu veriler ileriki prosesler için saklanır. Kullanılan sensörler ise Şekil-6.64'de verilmiştir.



Şekil-6.63 Bir A/D kartı



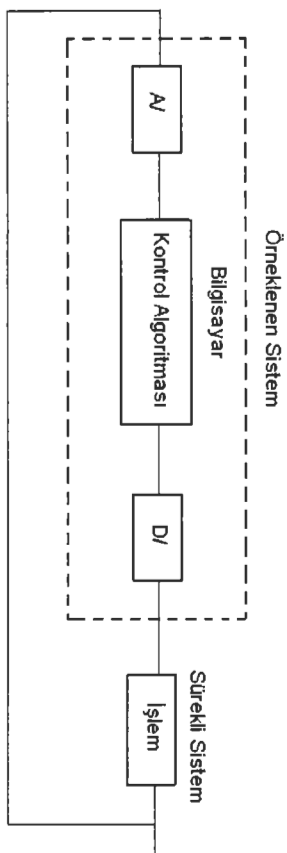
Şekil-6.64 Kullanılan sensörler (Koutroulis ve Kalaitzakis, 2003)

6.4.5.3 Dijital Kontrol Sistemleri

Az evvel bahsedilen analog kontrol sistemleri, kuvvet veya voltaj gibi sürekli girdilere sürekli cevap verirler. Birçok modern dinamik kontrol sisteminde ise dijital kontrolörler kullanılır. Dijital kontrol sistemlerinde, tüm türbinde uygulanan kontrolörler ve bu kontrolörlerin yönetsel kontrolörlerle haberleşmesi ve emir-komuta zinciri kurması durumları yada bir tek merkezi kontrol sisteminde yönetsel ve dinamik kontrolörün toplanması durumu görülebilir. Dijital kontrol algoritmaları, gelişmeye uyum sağlayabilen ve analog sistemlerden daha ucuz sistemlerdir. Ayrıca non-lineer kontrol yaklaşımlarına daha

uygundurular. Böylece lineer kontrollü bir sisteme göre daha gelişmiş bir durumda bulunurlar. (Manwell, 2002)

Dijital kontrol sistemleri Şekil-6.65'te gösterildiği gibi analog sensörler, aktivatörler ve diğer dijital sistemlerle iletişim halinde olmalırlar. Bu sebepten merkezi işlem ünitesi (CPU) vasıtasıyla dijital sinyaller bilgisayarda işlenirlerken yardımcı ünite sinyaller de bunlara iştirak ederler.



Şekil-6.65 Bilgisayar kontrollü sistem örneği (Manwell, 2002)

Dijital kontrol sistemlerinin en önemli özelliği ve gerekliliği, örnekleme oranı ve örnekleme hızıdır. Örnekleme oranı (sistemde toplanan dataların toplanma hızı), kontrol sistem tasarımını ve çalışmasını etkiler. Bu sebepten örnekleme oranı değişimleri stabil bir sistemi instabil hale getirebilir.

Dijital kontrol, küçük tek tabanlı bilgisayarlarda yada büyük endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Tek tabanlı bilgisayar bir CPU ve analog-dijital giriş çıkışlar içerir. Büyük endüstriyel bilgisayarlarda ise güç üniteleri, çok sayıda iletişim ve işlem üniteleri, filtreler ve fanlar kullanılarak temiz çevre ve düzgün data saklama sağlanır.

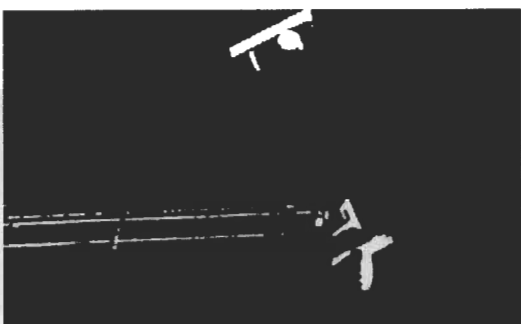
6.5 Rüzgar Türbini Kontrol Sistemlerine Ait Gerçek Örnekler Ve Farklı Uygulamalar

6.5.1 10 kW Bergey Excel

Bergey Windpower firmasının 10 kW Excel rüzgar türbini 7 m çapında, değişken hızlı rotora sahip, direkt sürücülü sürekli manyetik altematörlü bir değişken frekanslı üç fazlı güç üretim türbinidir (Şekil-6.66). Uygulamaya bağlı olarak bu güç su pomkanatmada yada DC gücün bataryada saklanmasıyla veya 240 V AC gücün şebekeye verimesiyle elektrik eldesi amaçlı

kullanılır. Türbin donanımında üç kontrol sistemi ve buna ek olarak bir elektronik kontrol ünitesi (gücün, istenilen uygulama için kontrolü) bulunur.

Üç donanımsal kontrol sistemi, yüksek rüzgar hızlarında gücü sınırlayarak, türbinin rüzgara adapte olmasını sağlar ve rotorun ekstrem rüzgardan ötürü aşırı dönmesini önler. Aerodinamik tork kontrolü sağlayan ilk donanım, kanat tasarımından ayrı bir sistemdir. Rotorun rijit göbeğinde 3 kanat vardır. Aerodinamik ve merkezkaç kuvvetleri, rüzgar hızının değişmesiyle hücum etkisinin de etkisiyle kanat döndürmesini değiştirirler. İkinci kontrol sistemi, türbini rüzgara adapte eder. Rüzgaraltı pervanesi, rotoru; rüzgarı karşılamak zorunda bırakır. Bunu da pervane yüzeyindeki aerodinamik kuvvetler yardımıyla yapar. Sonuçta rotor yüksek hızlardan, başka bir donanım temelli kontrol sistemi sayesinde korunmuş olur. (Manwell, 2002)

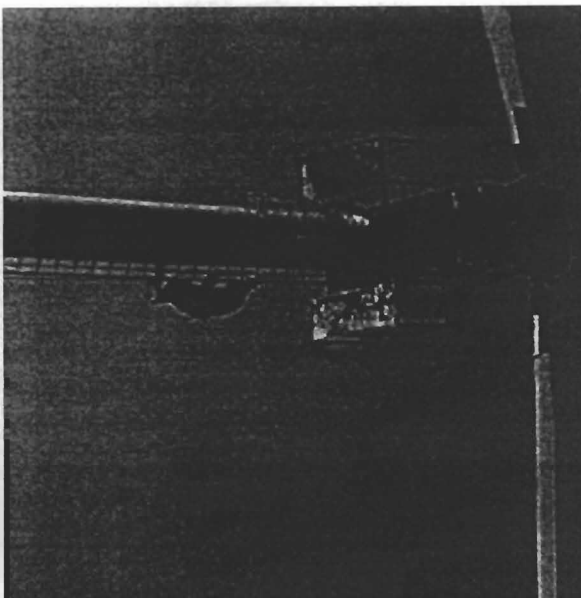


Şekil-6.66 Bergey Excel (Manwell, 2002)

Bunlara ek elektronik kontrolör; jeneratör ve istenilen uygulama arasındaki arayüzü sağlar. Batarya şarjı için, batarya voltajı görüntülenir ve akım kontrolü ile bataryanın aşırı dolması önlenir. Su pompası motorları genellikle alternatör çıkışıyla direkt sürülürler. Pompanın kontrolörü, pompayı yetersiz voltaj oluştuğunda açarak yeterli frekanstaki gücün üretilmesini sağlar. Şebeke bağlantısı için, evirecteki kontrolör şebekeye güç akışını yöneir ve evirectin güvenli şekilde çalışmasını sağlar. (Manwell, 2002)

6.5.2 LAGERWEY LW 18/80

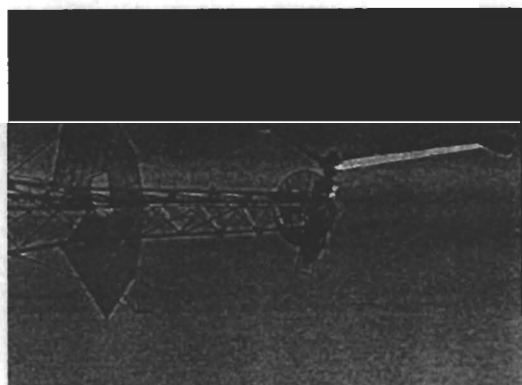
80 kW Lagerwey LW 18/80 18 m çapında iki kanatlı değişken hızlı bir rüzgar türbini'dir. Güç üretimi şebekeye bağlanma öncesi evireç ile beslenen bir endüksiyon jeneratörü ile sağlanır. Türbinde kanat açısı kontrolünü sağlayan farklı bir sistem mevcuttur. Kanatlar, göbek bağlantısına menteseli olup yüksek hızlarda kanatın aerodinamik basınç artışıyla rüzgaraltı olmaları sağlanır. Göbekteki bağlantı sistemi bu hareketi kanat kanat açısı değişimi hareketine çevirerek yüksek hızlarda rotor gücünü kontrol eder. Bu duruma göre 80 kW güç 15-25 m/s hızlar arasına sınırlanmıştır. Çeviricideki ek kontroller, jeneratör hızını ve şebekeye giden akımı kontrol eder. Çevirici kontrolü 50-120 rpm arasındaki hızlara müsaade eder. Bu durum, rotorun düşük hızlı rüzgardaki verimliliğini artırır. Sonuçta 3 m/s'de devreye giren bir sistem ortaya çıkar. (Manwell, 2002)



Şekil-6.67 Lagerwey 18/80 (Manwell, 2002)

6.5.3 ESI-80

ESI-80, iki kanatlı, durdurma regülasyonlu bir rüzgar türbini'dir. Türbinde dört kutuplu endüksiyon jeneratörü, 30:1 planet dişli kutusu bulunur. Türbin, bir rüzgaraltı rotoruyla serbest sapma tasarımı eseridir. Orijinal olarak üretildiğinde türbinde donanın röle mantıksal kontrol sistemi mevcuttur. Bu kontrolde parametreler; rüzgar hızı, titreşim, fren basıncı ve şebeke bağlantısıdır. (Manwell, 2002)



Şekil-6.68 ESI-80 (Manwell, 2002)

Güç düzenlemesi, kanat tasarımının bir fonksiyonudur. Rüzgarın hızı arttıkça, kanatya gelen hücum açısı da artar. Böylece kanatdan hava akışı giderek azalır ve rotor güç sabiti C_p azalır. Sonuçta rüzgar hızının artmasıyla güç 275 kW'a çıkar. Aşırı hızlanma durumlarında pnömatik disk frenler ve aerodinamik uç frenler devreye girer. Uç frenleri buldukları konuma elektromıknatıslarla tutturulmuşlardır. Mıknatıslara gelen güç kesildiğinde veya frenlerdeki merkezkaç kuvvetleri mıknatısın tutma gücünü aştığında, yüksek rotasyonel hızın sonucu olarak uç frenleri mevzilenir. (Manwell, 2002)

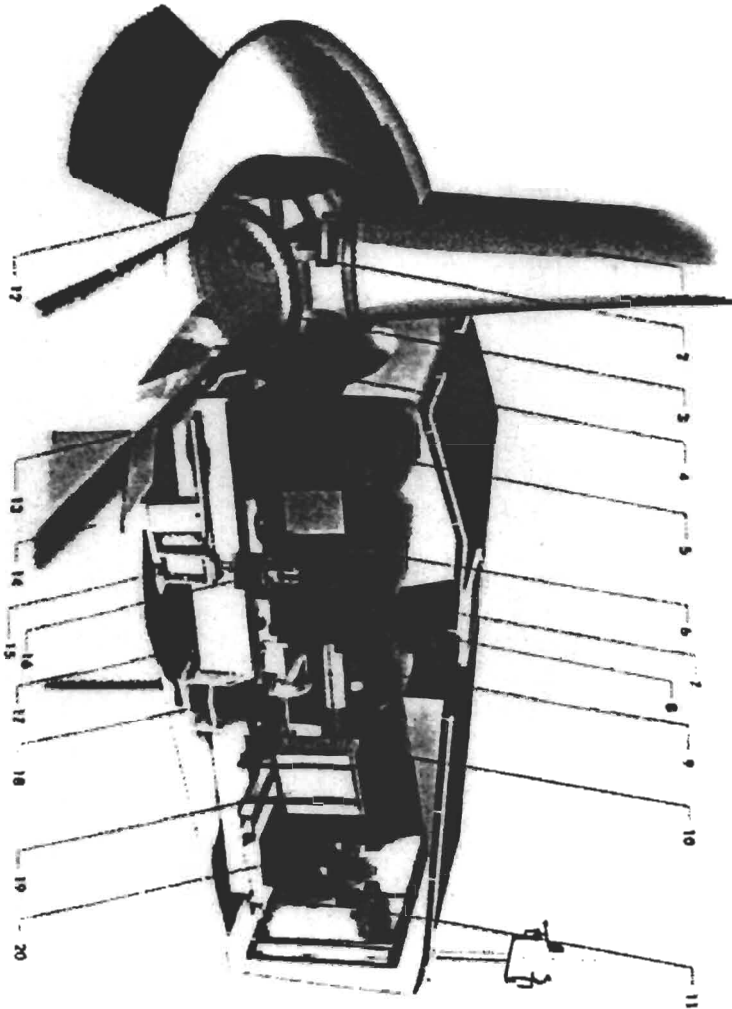
6.5.4 VESTAS V47-660/200 kW

Bu türbin aktif kanat açısı değişimi kontrollü, farklı çalışma hızlarına sahip ve dinamik fonksiyonları kontrol edilen bir türbindir. İki jeneratörü vardır. (Şekil-6.69)

ESI-80'e zıt olarak kanat açısı değişikliği ile yüksek hızlarda türbinden oluşan ortalama güç çıkışı kontrol edilir. Ortalama güçten sapmalar, rotor hızının çok az değişmesine imkan verilerek azaltılır. Yüksek rüzgar hızlarında nominal jeneratör kaymasının elektronik olarak değişmesiyle rotor direnci de değişir. Bu durumda rotor hızı %10'a kadar değişerek rüzgar sağanağı içindeki enerjiyi absorbe eder. İki jeneratör versiyonu, hangi jeneratörün kullanıldığına bağlı olarak iki ayrı rotor hızında çalışır. (Manwell, 2002)

Bu türbinde bilgisayar kontrolü iki ayrı işlemciye ayrılır. Bunlardan biri kulenin tepesinde, diğeri ise alt kısmındadır. Kule üst kontrolörü, sapma hareketinin tüm bileşenleri ile jeneratör

ve kanat açısı değişimi sistemini kontrol eder. Ayrıca türbin operasyonunu görüntüler. Kule alt kısmındaki kontrolör ise şebekeye bağlantı ile güç faktörü doğrulama kapasitörlerini kontrol eder. Çalışma verilerini sırayla kaydeder ve kumanda operatörleri ile iletişim kurar. (Manwell, 2002)



- 1-Pala 2-Göbek 3-Pala Yatağı 4-Ana Mil 5-İkincil Jeneratör 6-Dişli Kutusu 7-Disk Fren 8-Yağ Soęutucu
- 9-Kardan Mil 10-Birincil Jeneratör 12-Pitch Silindiri 13-Makina Teme 14-Kule 15-Yaw Kontrol
- 16-Dişli Kutupları 17-Yaw Rulmanı 18-Yaw Dişli 19-Kontrol Ünitesi 20-Hidrolik Ünitesi

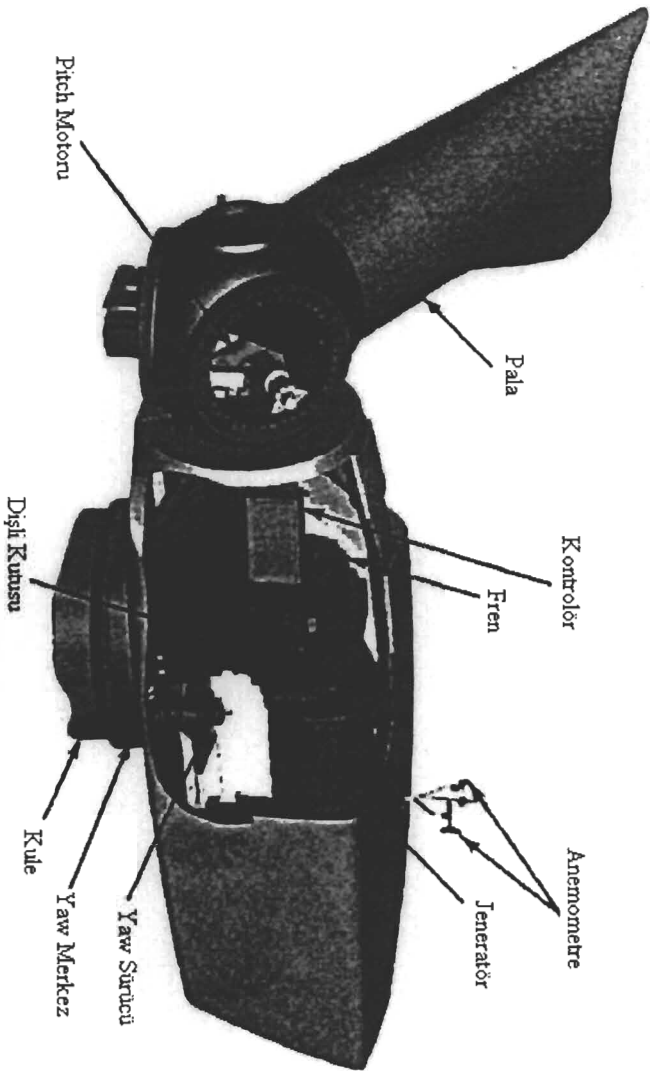
Şekil-6.69 Vestas V47 (Manwell, 2002)

6.5.5 ENRON WIND 750i

750 kW Enron Wind 750i türbini tamamen değişken hızlı, değişken kanat açılı ve çift beslemeli endüksiyon jeneratörlü bir türbindir. Sabit hızlı ESI-80'den farklı olarak farklı hız aralıkları mevcuttur ve bu aralıklar pik çalışma hızlarına göre şekillenir. Lagerwey LW 18/80'e zıt olarak ise kanat açısı tam olarak kontrol edilebilir. Kanat açısı nominal rüzgar hızları altında sabit tutulur ve rotor hızı maksimum aerodinamik verimi sağlamak için

değişir. Nominal rüzgar hızı aşıldığında, rotora gelen ortalama güç kontrolü için kanat açısı yavaşça değişir. (Manwell, 2002)

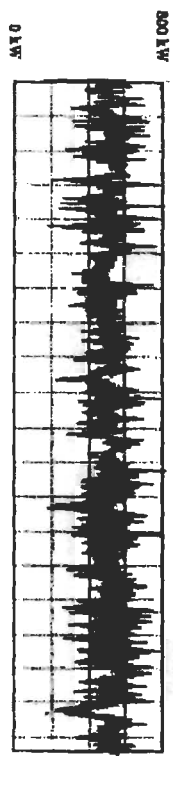
Bu türbinde birçok mikrokontrolör ile kanat açısı değişimi ve hız düzenlemesi kontrol edilir. Yüksek hızlı mil ve sapma frenleri, sapma motoru ve hidrolik pompa motorları kontrol edilir. Jeneratör torku, jeneratör rotoruna bağlı olan çevirici kontrolörü ile kontrol edilir. Bu kontrolör voltaj ve jeneratör akım frekansını ayarlar. Bu sayede tork ve jeneratör verimini kontrol eder. Gücü ve güç faktörünü de belirler.



Şekil-6.70 Enron Wind 750i (Manwell, 2002)

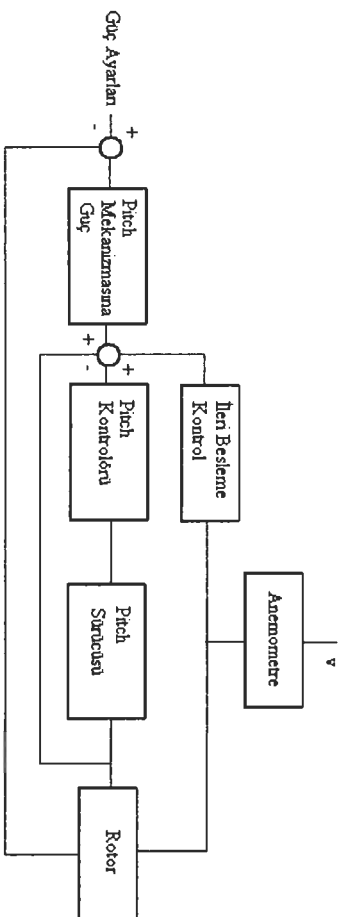
6.5.6 Tappi Rüzgar Parkında Uygulanan İleri Besleme Kontrolü

Japonya'daki TAPPi rüzgar parkı büyük bir alanda kuruludur. Ortalama rüzgar hızı, yerden 20 m yüksekte 10 m/s'dir. Parkta 11 rüzgar jeneratörü 3.375 kW güç oluştururlar. Rüzgar hızı coğrafi nedenlerle sıkça değişir ve bu sebepten üretilen güç te çalkalanmalar olur. (Şekil-6.71) Gücü sabit tutmak için kanat açısı kontrolü, geri besleme kontrolü üzerine oturtulmuş halde kullanılır. Fakat rüzgar hızının devamlı değişmesiyle birlikte sistemde yüksek rotor ataleti mevcuttur. Bu sebepten geri besleme sinyalleri gecikir ve kontrol stratejisi çalışamaz hale gelir. Altaki şekilde jeneratörün maruz kaldığı güç çalkalanmaları görülmektedir. Genelde 500 kW aralığında bir güç gözlemlenmiştir. (Kodama, Matsuzaka ve Arinaga, 1999)

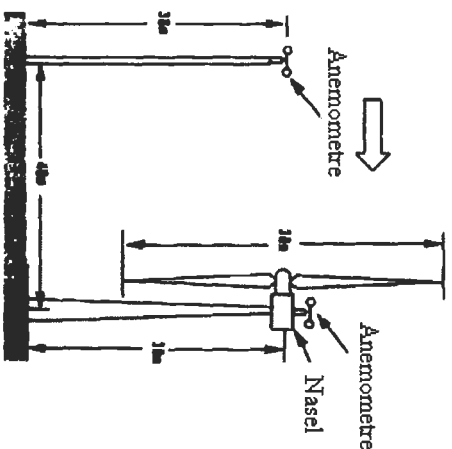


Şekil-6.71 Jeneratördeki güç çalkantıları (Kodama, Matsuzaka ve Arinaga, 1999)

Şekil-6.72'de ise kontrol diyagramı görülmüştür. İleri besleme elemanı blok diyagramına eklenmiştir. Bu sayede sinyale gecikmelerinin önüne geçilir. İleri besleme kontrolünü tamamlayan ögelerin en başında da Şekil-6.73'teki rüzgar hızı ölçüm cihazı gelir.



Şekil-6.72 Kontrol sistemi (Kodama, Matsuzaka ve Arinaga, 1999)



Şekil-6.73 Rüzgar hızı ölçüm sistemi (Kodama, Matsuzaka ve Arinaga, 1999)

7. RÜZGAR TÜRBİNİYLE OLUŞTURULAN HİBRİT SİSTEMLER

Bu konu dahilinde; hibrit sistem diye adlandırılan sistemlerin ne oldukları, ne amaçla kullanıldıkları ve ne çeşit kontrol sistemleri yardımıyla kullanıldıkları konularına değinilecektir.

7.1 Rüzgar Türbini-Diesel Motoru Hibrit Sistemleri

Birçok uzaktan kontrollü sistemde ve düşük popülasyonlu bölgelerde, birkaç kullanıcı için şebekeye ulaşım mevcut değildir. Bu sebepten günümüze kadar buralarda diesel jeneratörleriyle elektrik üretmek tek yöntem olmuştur. Fakat diesel jeneratörleri bazı sorunları da beraberinde getirdiğinden dezavantajlıdır. Bu sorunlara örnek olarak yakıt bulamamak, bakım vs. verilebilir. (Walker ve Jenkins, 1997)

Rüzgar türbinleri ile diesel motorları kombine bir biçimde kullanılarak şebeke bağlantısının çok zor ve pahalı olduğu yerlerde elektrik ihtiyacına çözüm sağlanabilir. Diesel jeneratörü veya jeneratörleri, gerekli her anda motorından güç sağlayabilirken, rüzgar türbini de diesel motorunun çalışma süresini azaltarak yakıt harcamında ekonomiklik sağlayabilir.

Prensipde bu sistemlerin kullanılacağı uzak veya küçük yerlerde de; şehirlerde karşılaşılan sorunlar mevcuttur. Bu da temel olarak kontrol edilebilir bir voltajda veya frekansta elektrik elde etmektir. Fakat küçük sistemlerde kontrol; küçük ebatlı elemanlar nedeniyle frekans daha hızlı değiştiğinden daha zor olur. (Walker ve Jenkins, 1997)

Güç sisteminde frekans; jeneratöre giriş gücü ile alınan güç arası dengeyle ifade edilir. Eğer jeneratör çıkışı, yükü aşarsa; jeneratör rotasyonel hızı ve sistem frekansı artma eğilimine girer. Tam tersi durumda eğer yük, jeneratörden alınan güçü aşarsa frekans düşer. Bir rüzgar-diesel sisteminde, jeneratör ataleti düşüktür ve bu sebepten güç fazlası, jeneratör rotasyonel hızında bir artmaya neden olur. Bu sayede de sistem frekansı yükselir. Bu durum şu eşitliklerle ifade edilebilir:

$$J \frac{\partial \omega_{gen}}{\partial t} = T_{gen} - T_{load} \quad 7.1$$

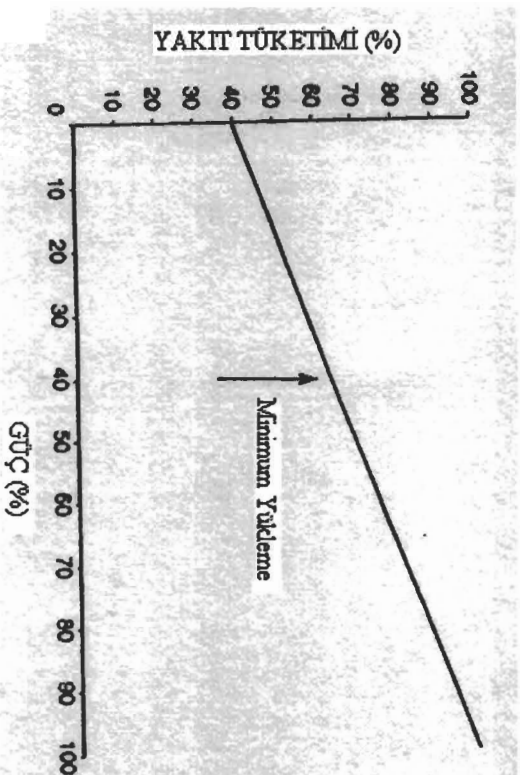
$$\omega_{gen} J \frac{\partial \omega_{gen}}{\partial t} = P_{gen} - P_{load} \quad 7.2$$

$$\frac{\partial \omega_{gen}}{\partial t} = \frac{1}{\omega_{gen} J} (P_{gen} - P_{load}) \quad 7.3$$

Bu eşitliklerde J ; sistemdeki tüm dönen kütlelerin toplam atalet momenti, T_{gen} ; jeneratör tarafından uygulanan tork, T_{load} ; yükler tarafından absorbe edilen tork, P_{gen} ; jeneratörde üretilen güç, P_{load} ; yükler tarafından absorbe edilen güç ve ω_{gen} ; jeneratör rotasyonel hızıdır. (Walker ve Jenkins, 1997)

Bu eşitliklerden görülebileceği üzere frekans kontrolü volajaıdan bağımsız olup gerçek güç akısıyla ilgilidir. Bu sebepten eğer yük; kullanıcı ihtiyaçlarına göre şekilleniyorsa, jeneratörler yükü takip etmeli yada bir depo enerji kullanılmalıdır. Bir rüzgar-diesel hibrit sisteminde bu durum, eş çalışma ile sağlanabilir.

Şekil-7.1'e bakacak olursak bir diesel jeneratöründeki yakıt sarfiyatını görebiliriz. Yüksüz durumda yakıt sarfiyatı belirgindir ve diesel motorlarını düşük yüklerde uzun süre çalıştırmak, piston ve silindir yıpranmaları açısından tercih edilmez. İzin verilen düşük yük, maksimum yükün %40'ına tekabül eder. Eğer rüzgar türbini gerekli yükü ve fazlasını sağlıyorsa, diesel jeneratörü kapatılıp ekonomiklik sağlanabilir.

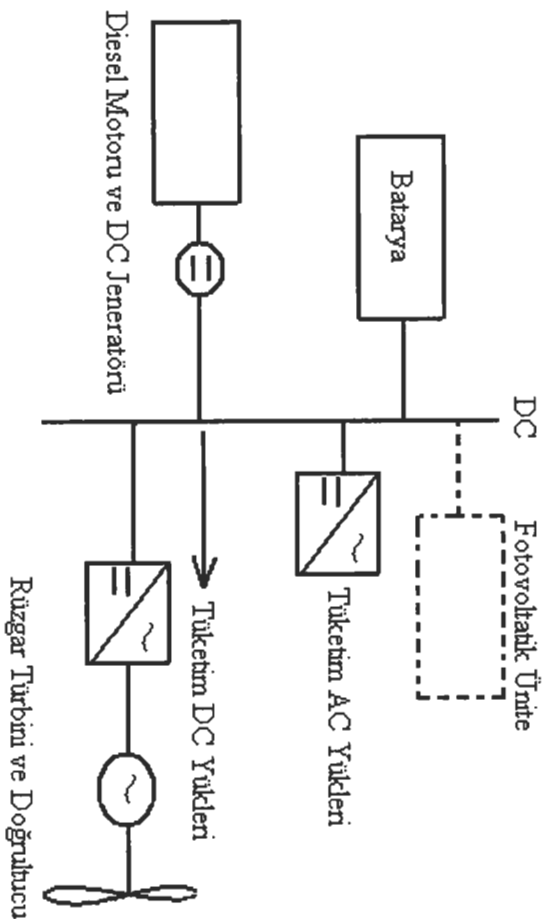


Şekil-7.1 Diesel motorunda yakıt tüketimi-güç ilişkisi (Walker ve Jenkins, 1997)

Elektrik enerjisinin depolanması zor fakat bataryalarla ve volanlarla mümkündür. Bunun yanısıra rüzgar-diesel sisteminde frekansın kontrolü zor ve pahalıdır. Önemli bir nokta olarak diesel motorunun ne zaman açık ne zaman kapalı olacağını bilmek gerekir. Motor sadece rüzgar türbinin yük isteği karşısında tek başına yetersiz kaldığı durumlarda devreye girmelidir. Fakat rüzgarın ve yükün değişken oluşu bu durumu zorlaştırır.

Rüzgar-diesel sistemindeki diğer bir önemli unsurda voltajın kontrolüdür. Birçok büyük rüzgar türbininde bulunan indüksiyon jeneratörü, çıkış voltajını kontrol etme zorluğu yaşar. Genelde indüksiyon jeneratörleri stabil çalışmaz ve bir senkron makineden reaktif güç ihtiyacı duyarlar. Normal bir diesel-rüzgar türbini sisteminde voltaj kontrolü, senkron jeneratör uyarılarıyla olur. Senkron jeneratörün uyarım sistemi, rotorun manyetik alanını değiştirir ve bu değişim de çıkış voltajını etkiler. 100 kW'tan büyük rüzgar-diesel hibrit sistemlerinde bir veya daha fazla rüzgar türbini, indüksiyon jeneratörüyle; bir veya daha fazla diesel motoru, senkron makinalarla birlikte kullanılır. En az bir senkron jeneratör sistemine bağlı kalarak voltaj kontrolünü sağlar. (Walker ve Jenkins, 1997)

Bazı daha küçük direkt akımlı rüzgar-diesel sistemleri batarya ile enerji depolarlar. (Şekil-7.2) Sistemde aynı zamanda bir PV (Fotovoltaik) dizisi entegre edilmiştir.



Şekil-7.2 Basit rüzgar-Diesel hibrit sistemi (Walker ve Jenkins, 1997)

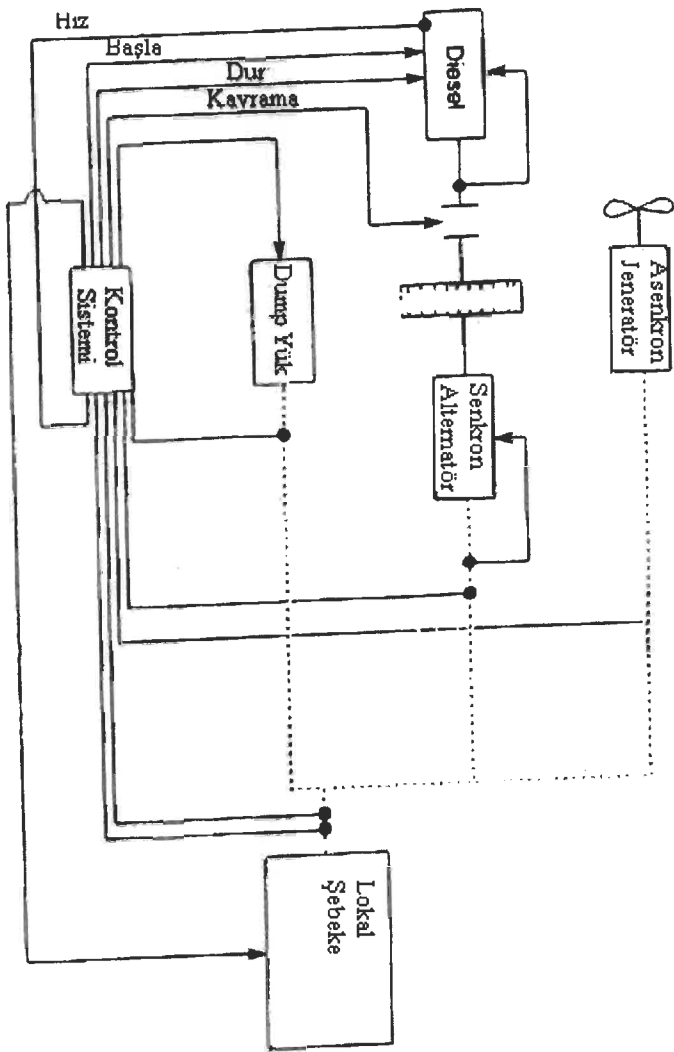
Bir rüzgar-diesel sisteminde tasarım parametreleri şu şekilde sıralanabilir:

- Rüzgar şartları
- Elektrik tüketimi
- Rüzgar ve elektrik tüketimi arasındaki korelasyon
- Güç kalitesi gereksinimleri
- Yük yönetimi
- Harcanmış ısı kullanımı
- Mevcut elektriksel kurulum
- Bakım kolaylığı
- Site ulaşımı

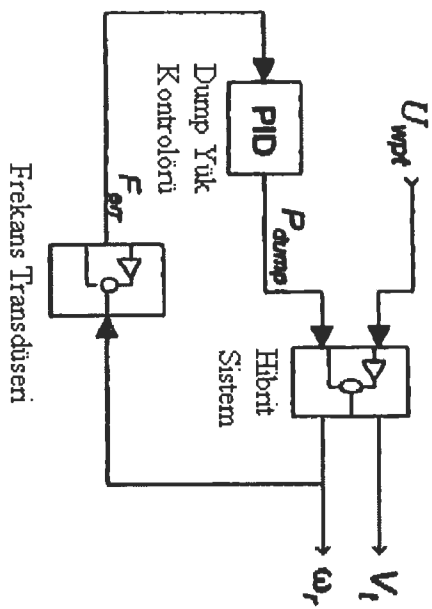
Genel sonuçlara bakacak olursak;

- 1)Yeterli rüzgar koşulunda, rüzgar türbininden tek başına uygun gücü üretmek mümkündür.
- 2)Enerji depolama sistemi kurulu değilse, sistem performansı fakir kalır.
- 3)Maksimum performans elde etmek için, bileşenlerin boyutlarını optimize ederek kontrol ve operasyon için uygun hale getirmek önemlidir.

AC (Alternatif akımlı) rüzgar-diesel hibrit sistemi Şekil-7.3'te şematik olarak gösterilmiştir. Rüzgar türbini konvansiyonel durdurma regülasyonlu ve indüksiyon jeneratörlüdür. Diesel motoru; bir senkron jeneratörü, kontrollü bir kavrama boyunca sürer. Sistem frekansı kontrolünde ise bir dump yük kullanılır. Dump yükün kontrolü için PID kontrolör kullanılır.Güç ünitesine yapılan girdi, dump yük güç ayarlarında ve güç çıkışı da frekans transdüserinde belirlenir. (Şekil-7.4) PID kontrolörler, kritik kazançta göre ayarlanır. Kritik kazanç ve periyot için karar vermek ancak döngü cevabının hesaplanması ile mümkün olur. Dump yük kontrolü mutlaka üç sistem konfigürasyonuna uygun çalışmalıdır. Bunlar; sadece rüzgar türbini çalışması, rüzgar-diesel ortak çalışması ve sadece diesel motoru çalışmasıdır.



Şekil-7.3 Şematik gösterimde Diesel-rüzgar türbini hibriti (Walker ve Jenkins, 1997)



Şekil-7.4 Dump yük kontrolör blok diyagramı

Eğer diesel motorunun veya rüzgar türbinin çıkış gücü, lokal şebekenin ihtiyacını aşarsa, dump yük frekans artışı sınırlanır. Voltaj kontrolü ise, senkron jeneratör uyarıcısı ile kontrol edilir.

Yüksek hızlı rüzgarlarda ve düşük yük gereksiniminde, diesel motoru kapatılır ve senkron jeneratör, motordan kavrama vasıtasıyla ayrılır. Senkron jeneratör, elektriksel sisteme bağlı kalarak reaktif güç sağlar ve voltaj kontrolünü gerçekleştirir. Burada tüm gerçek güçü, rüzgar türbini gerçekleştirir. Yük isteği arttıkça veya rüzgar azaldıkça diesel motoru da devreye girer.

Bazı yerlerde farklı bir uygulama olarak diesel yakıtı motorin yerine biokütle kullanılmaktadır. Bu yöntem diesel motorunun verimini artırabilir. Bunun için bir biokütle gazlaştırıcı ile zeytin ağacı parçaları (İspanya'da) bir yamma odasında yakılarak temel kimyasal bileşenlerine indirgenir. Katılar gazlardan ayrıştırılır ve ortaya diesel motoru için uygun olacak gaz yakıt kalır. Biokütle yakıtı, düşük sülfür seviyesiyle diesel motoru için uygun bir yakıttır. Zeytin ağacından elde edilen yakıtta atmosferik-basınç ve indirekt ısıtmalı gazlaştırma yöntemiyle 4600 kcal/kg'lık yüksek bir ısı değere ulaşılabilir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki biokütle kullanımını ile hibrit sistemde çalışma sağlanabilir. Özellikle uyarlanabilir kontrol kullanımıyla uygun sonuçlara varılabilir.

7.2 Rüzgar Türbini/Fotovoltaik Hibrit Sistemler

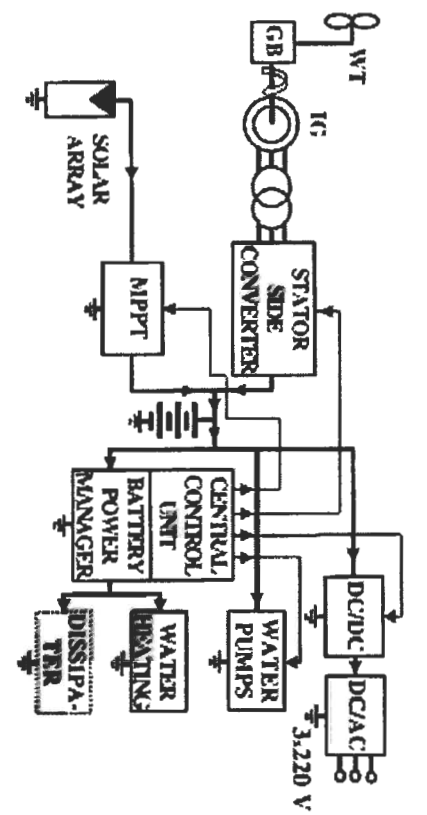
Rüzgar enerjisi aslında güneş enerjisinin bir biçimidir ve yeryüzündeki ısı farklılıkları nedeniyle oluşur. Rüzgar sıfır emisyonlu bir sistemdir. Fotovoltaik sistemler ise az miktarda bakıma ihtiyaç duyan sistemlerdir. Fakat ilk maliyetleri nedeniyle dikkatli tasarlanmaları gerekir.

Bu iki enerji üretim yönteminin eş kullanımını sonucu oluşturulabilecek hibrit sistemlerde şu elemanlar yer alır: rüzgar türbini (WT), dişliler (GB), indüksiyon jeneratörü (IG), stator tarafı dönüştürücü (SSC), merkezi kontrol ünitesi (CCU), batarya, DC/DC dönüştürücü, DC/AC dönüştürücü, su pompası, su ısıtıcı, güneş ışıını dizisi, maksimum güç noktası takip sistemi (MPPT) ve batarya gücü yönetim sistemi (BPM). Elde edilen elektriksel güç, lokal AC yüküne ve DC yüküne yada AC su pompası ve su ısıtıcısına gönderilir. (Valchev, Bossche, Ghijsselen ve Melkebeek, 2000)

Şu noktalara dikkat etmek gerekir:

-Farklı yükler, farklı kontrol gerektirir.

- Yüksüz durumdaki kayıpları minimize etmek için yüksek verimli DC/DC ve DC/AC dönüştürücüler kullanılmalıdır.
- Tüm röleler sürekli uyarım gücüne ihtiyaç duyarlar. Bu sebepten ekonomiklik isteğiyle röle kullanımından kaçınmak uygundur.
- Dönüştürücülerin iç güç üniteleri kapatılabilir biçimde olmalıdır.
- Sistemdeki bakım-onarım masrafları, elektrik üretimiyle orantılı olmalıdır.



Şekil-7.5 Rüzgar türbini/fotovoltaik hibrit sistem örneği (Valtchev, Bossche, Ghijselen ve Melkebeek, 2000)

Sistem tek başına çalışabilir halde olması için tasarlanmıştır ve bir batarya eklenmiştir. Bunun nedeni de istenilenden fazla güç oluşurması durumunda; ihtiyaç olduğunda tekrar kullanabilmek için, gücün saklanmasıdır. İki tip batarya düşünülebilir (NiCd ve kurşun-asit). Kurşun-asit bataryalar daha düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilebilirler. Birçok solar hücreyi seri bağlamak uygun olmadığından nominal batarya voltajı 110 V seçilmiştir. Batarya şarjı işlemleri CCU ve BPM ile kontrol edilir. Batarya voltajının durumuna göre şu modlar mevcuttur:

1)Nominal Mod: Bu modda tüm bileşenler güç harcamakta veya güç almaktadırlar.

n_f ; hücre sayısı, V_{ed} ; bir hücre için deşarj-sonu voltajı, V_{oc} ; bir tam yüklü hücre için açık devre voltajı, V_{bat} ; batarya voltajı olmak üzere;

$$nV_{ed} < V_{bat} < V_{oc}$$

2)Deşari Sınırlandırma Modu: Batarya voltajı düşüktür ve hücre voltajı deşari-sonu voltajına yakındır.

$$V_{bat} \leq nV_{ed}$$

7.5

Su pompası, su ısıtıcı gibi opsiyonel yüklerin devre dışı bırakılması yeterli olmazsa diğer harcayıcılar da kapatılmalıdır.

3)Şari Sınırlandırma Modu: Batarya voltajı yüksek, hücre voltajı da açık devre voltajına yakındır.

$$nV_{oc} \leq V_{bat}$$

7.6

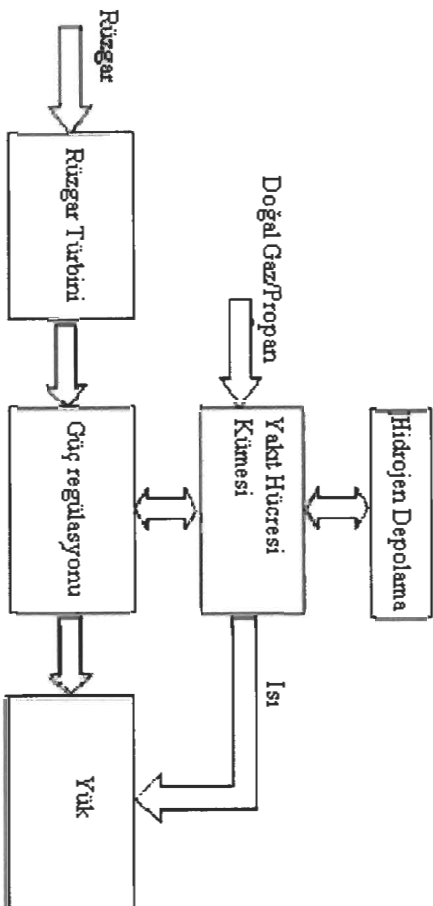
Opsiyonel yükler devreye alınmalıdır. Hala fazla enerji varsa şari enerjisi azaltılmalıdır. Önce, solar enerji transferi MPPT ile durdurulur. Ardından ek deşari akımı eklenmelidir. Son adımda rüzgar türbininden gelen enerji akışı kesilir. Bunun için mekanik frenler devreye girer veya türbinin boşta çalışma durumuna geçmesi gerekir. (Valchev, Bossche, Ghijselen ve Melkebeek, 2000)

7.3 Yakıt Hücresi Kullanımı

Rüzgar türbinleri, diesel jeneratörleri ile birlikte kullanıldıkları zaman yakıt masrafları azalmakta ve greenhouse gaz emisyonları çok düşük olmaktadır. Fakat diesel jeneratöründe kısmi yüklerde verim çok düşüktür. Yakıt hücreleri; kısmi yük ve diğer yük koşullarında yüksek verimliliğine sahip elektrokimyasal güç jeneratörleridir. Ayrıca minimum emisyonda çalışırlar. Yakıt hücresinde artan ısı da farklı amaçlar için kullanılabilir. Eğer bir yakıt hücresi, rüzgar türbin sisteminde kullanılırsa emisyonlar neredeyse sıfıra iner. (Iqbal, 2003)

Bu yöntemi anlamak için incelenen sistem Şekil-7.6'da verilmiştir. Yük; rüzgar türbini ve/veya yakıt hücresinde sağlanır. Eğer rüzgar türbini yeterli gücü üreiyorsa tek başına üretimini sürdürür. Düşük hızlı rüzgarlarda ise yakıt hücresi devreye girer. Eğer çıkış gücü istenilen güçten fazla olursa, fazla güç daha sonra yakıt hücresinde hidrojen üretiminde kullanılabilir. Sistemde açıklanan yakıt hücresi kümesi, proton değişimli membran (PEM) tipidir. Sistemde ayrıca dump yük, iki bağımsız kontrolör ve data toplama sistemi bulunur.

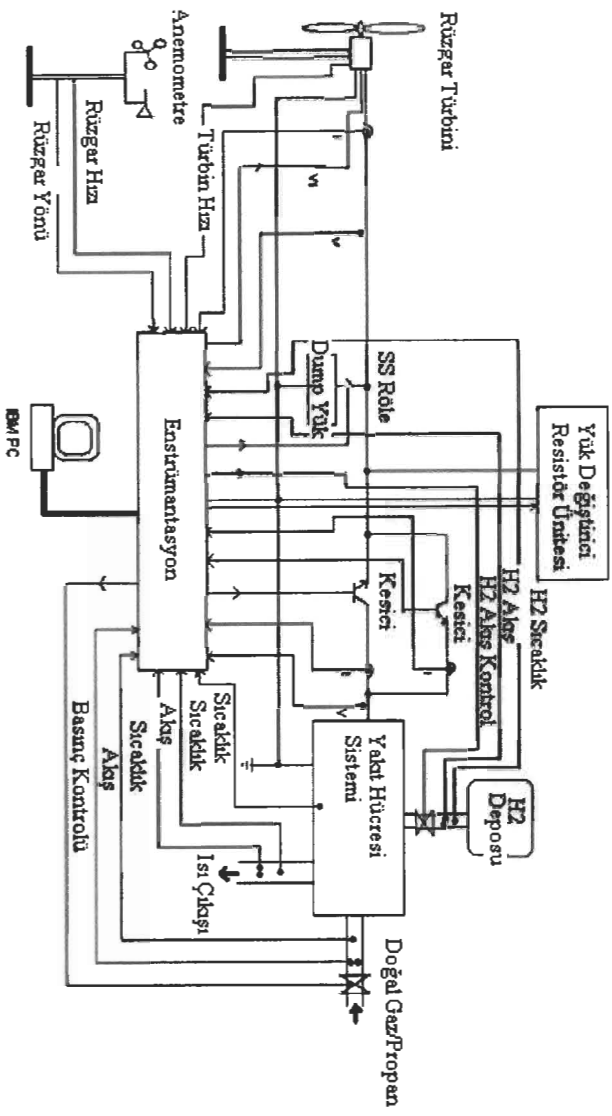
(Şekil-7.7)



Şekil-7.6 Rüzgar/yakıt hücresi hibrit sistemi (Iqbal, 2003)

Hibrit sistemde şu parametreler kaydedilir:

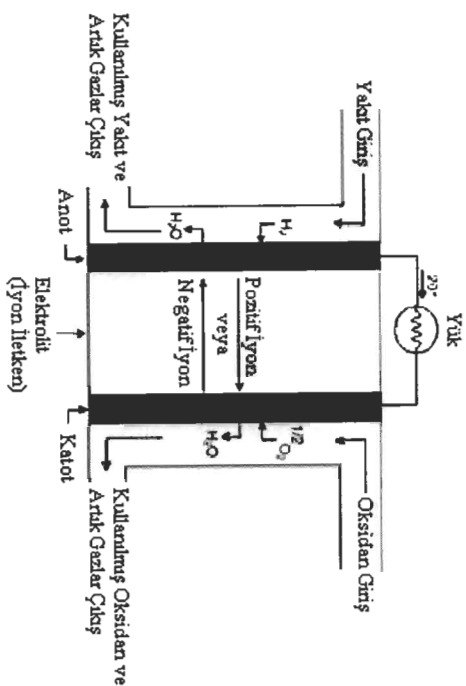
- a) Rüzgar türbin hızı b) Rüzgar türbin voltajı c) Yakıt hücresi voltajı d) Yakıt hücresi akımı
- e) Rüzgar türbini akımı f) Yakıt hücresi sıcaklığı g) Yakıt hücresi basıncı h) Yakıt akış oranı
- i) Rüzgar hızı j) Rüzgar yönü k) Yük akımı



Şekil-7.7 Tanıtılan sistem (Iqbal, 2003)

PIID tipi türbin kontrolörleri türbin; değişken hızlarda çalıştırılarak aynı zamanda jeneratör alan voltajını da ayarlarlar. İki ayrı kontrol sistemi kullanılır;

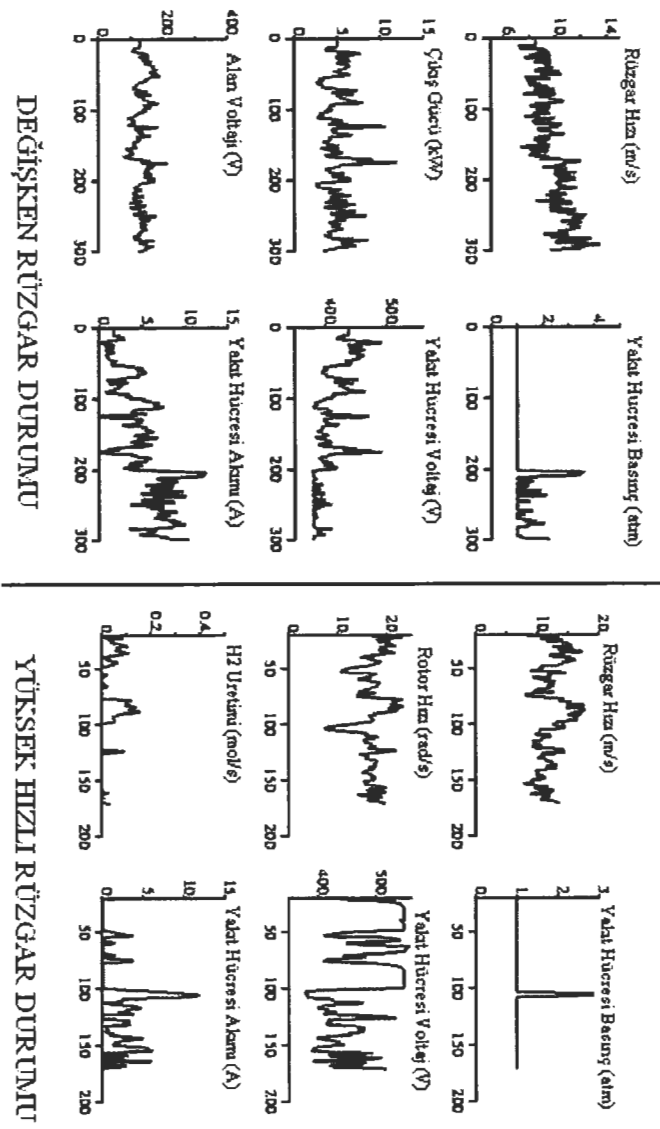
- 1) Düşük hızlarda (8 m/s) rüzgar türbini; maksimum güç alınacak şekilde, değişken hızda çalıştırılır. Yüksek hızlarda ise sabit bir çıkış gücü teşkil edilmeye çalışılır.
 - 2) Düşük hızlarda rüzgar türbini değişken hız modunda çalıştırılırken yüksek hızda sabit hızda çalıştırılır. Rüzgar türbini kontrolörü örnekleme zamanı 1 s'dir.
- Yakıt hücresi sistemi; bir yakıt hücresi kümesi ve elektrolitten oluşur.



Şekil-7.8 Yakıt hücresi (Iqbal, 2003)

Yakıt hücresi kümesinde 475 proton değişim membranlı elektrolit yakıt hücresi seri bağlıdır. Çıkış akımı 0-50 A arası değişir. Yakıt hücresi; yük akımı ve rüzgar türbin akımı arasındaki akımı teşkil eder. Eğer yakıt hücresi kümesinin çıkış akımı 380 V'tan aşağı düşerse kontrolör devreye girer. PIID yakıt hücresi kontrolörü, yakıt girişi ve oksijen basıncını ayarlayarak sabit bir küme çıkış voltajı oluşturur. Yük akımı varyasyonlarının oluşturduğu yakıt hücresi kümesi, akım düşüşlerini kompanse eder. Bu kontrolörün örnekleme süresi 10 ms'dir. Eğer rüzgar türbini gerekenden fazla akım üretiyorsa fazla olan kısım elektrolite yönlendirilip hidrojen üretiminde kullanılır.

Bu şekilde çalışan bir sistemde yapılan denemeler sonucu alttaki eğriler ortaya çıkar.



Şekil-7.9 Hibrit sistemin değişken ve yüksek rüzgar hızlarına cevabı (Iqbal, 2003)

Değişken rüzgar durumu eğrilerinde görüldüğü üzere, sistem yük direncindeki büyük değişimlere rağmen kontrol edilebilir yapıdadır. Kontrolörün 380 V'tan aşağıda devrede olduğunu unutmamak gerekir (Yakıt hücresi voltajı aralığı 380-450 V'tur).

Yüksek hızlı rüzgar durumu eğrilerinde de rüzgar türbininin sabit bir hızda tutulmaya çalışıldığı durum söz konusudur. Bunun nedeni yüksek rüzgar hızlarıdır. Rüzgar türbininde tam güç üretildiğinde yakıt hücresi akımı sıfır mertebelerindedir. Fazla güç ise hidrojen üretiminde (maksimum 0.2 mol/s) kullanılır.

8. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GELECEĞİ

Önceki konularda genişçe rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığına değinilmişti. Esasen rüzgar 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, mikrobilgisayarların geniş kullanımı, yeni simülasyon ve üretim tekniklerinin entegrasyonu. Rüzar türbini üreticilerine göre şu karakteristik özelliklere ulaşmıştır: basitlik, uygulanabilirlik, verimlilik, dönüştürülebilirlik, sessizlik, güvenlik, dayanıklılık, elastikiyet.

Rüzgar enerjisi gelişmesini sürdürdüğüce yeni uygulamalar da kullanıma geçecek, hayatımıza kendi rüzgar türbinlerinden elektrik üreten toplumlar ve rüzgar enerjisiyle çalışan taşıtlar gibi kavramlar girecektir.

8.1 Rüzgarın Geleceği

Amerikan Enerji Departmanı verilerinde rüzgar enerjisinin en çok gelişme kaydedecek yenilenebilir enerji türü olduğu bildirilmektedir. Ekonomik açıdan her geçen gün daha da kullanışlı hale gelmekte ve 2010 yılına kadar kWh başına maliyet oldukça düşecektir.

Çizelge-8.1 Rüzgar gücü teknolojisi, geçmişi, günümüz ve gelecek

Teknoloji Durumu	1980	1990	2000 sonrası
kWh Başına Maliyet	0.35 \$-0.4 \$	0.05 \$-0.07 \$	<0.04 \$
kW Başına Anapara Maliyeti	2000 \$-3000 \$	500 \$-800 \$	<500 \$
Çalışma Ömrü	5-7 yıl	20 yıl	30 yıl
Kapasite Faktörü	50 %-65 %	95 %	>95 %
Boyut Aralığı	50-150 kW	300-1000 kW	500-2000 kW

Günümüzde yapılan araştırma çalışmalarının en temel amacı rüzgar enerjisi maliyetini 2010 yılına kadar 3 cent civarına getirmektir. Bu sayede konvansiyonel enerji türlerine göre çok daha rekabetçi hale gelecektir. (Patel, 1999)

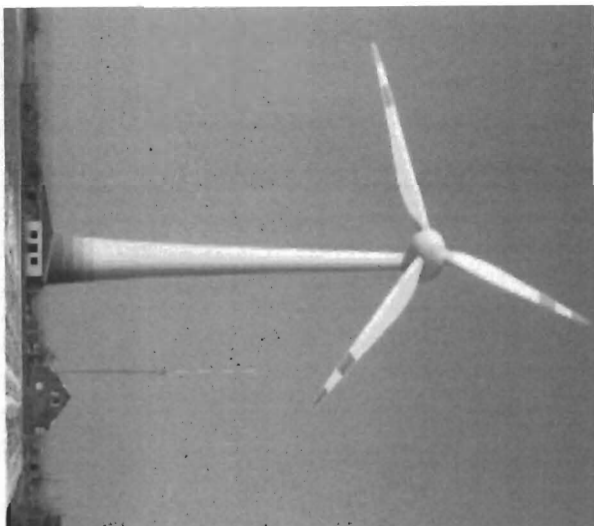
Endüstrideki uzmanlar özellikle şu alanlarda gelişmeler öngörmektedirler:

- Daha verimli tasarım ve üretim (aerodinamik tasarım, gelişmiş yük ve dayanım güvenliği, yüksek dayanımlı ve sönümlü malzemelerin kullanımı, gelişmiş üretim teknolojileri, yeni konseptlerin oluşturulması, gelişmiş kanat tasarımı ve bakım-onarım masraflarının azaltılması)
 - Türbülans altında yüklerin durumunu ve yapısını daha iyi, türbin ömrüne etkisini kavrayabilmek
 - Sistem model ve simülasyonlarını geliştirmek
 - Entegre jeneratör ve güç elektroniği sayesinde mekanik dişli kutularından kurtulmak
 - Verimli ve düşük maliyetli enerji depolamak
 - Daha iyi rüzgar hızı karakter analizi yapmak
- Yapılacak araştırmalar sonucunda daha iyi tasarım, geliştirme ve üretim yaparak rüzgar enerjisinin aktiflik yüzdesini arttırmak temel amaçtır.
- Denizüstü rüzgar potansiyeli daha yüksektir. Bu potansiyelden daha iyi faydalanmak önemli bir adım olacaktır. Balıkçılık, gemi rotaları, askeri testler gibi kısıtlamalar dışında doğal kısıtlamalar da mevcuttur. Bunlara örnek olarak; fırtına, deniz derinliği, rüzgar hızının yüksekliği verilebilir. Bu kısıtlamalar aşıldığı ölçüde düşük maliyetli üretim yapılabilecektir. (Patel, 1999)
- Denizüstü santralleri dışında gelişme beklenmesi gereken diğer uygulamalar ise Asya'daki potansiyelin değerlendirilmesi ve MW'lık türbinlerin uygulamaya alınmasıdır.
- İlerleyen zamanlarda rüzgar türbinlerinin karşılaşılabilecek sorunlardan biri de çevresel sorunlar ve rüzgar türbinlerinin çevreye etkisidir. Çalışma konularından biri olarak da rüzgar türbinlerinden kaynaklanan kuş ölümlerinin azaltılması olacaktır.

Rüzgar türbinlerini 4 kategoriye ayırıp bunlar hakkında gelecekte ne gibi çalışmalar yapılacağı anlatılabilir.

8.1.1 Kategori A

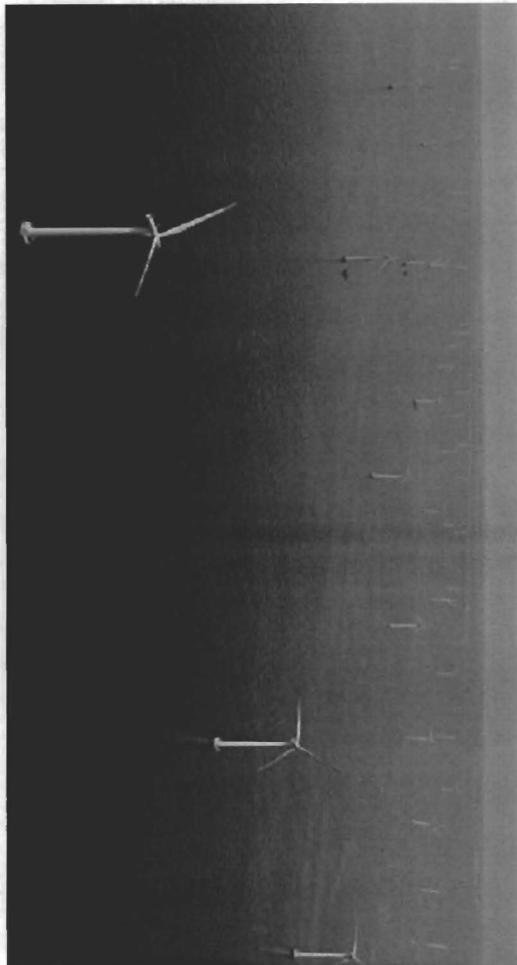
1.5 MW'dan büyük olan türbinler bu kategoriye dahildirler. Bunlar genelde üç kanatlı, durdurma veya kanat açısı değişimi regülasyonlu, değişken veya sabit hızda çalışan türbinlerdir (Şekil-8.1). Araştırma-geliştirme konuları şunlar olacaktır: ekonomikliğin artırılması, kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, güç kalitesinin iyileştirilmesi, sistem ve şebeke stabilitesinin sağlanması ve güç iletiminin iyileştirilmesidir.



Şekil-8.1 Enercon E-112 4.5 MW [19]

8.1.2 Kategori B

1.5 MW'tan büyük denizüstü rüzgar türbinleri bu gruba girer. En yaygın kullanımları üç kanatlı, aktif durdurma veya kanat açısı değişimi regülasyonlu, yatay eksenli ve sabit hızlı tipleridir. (Şekil-8.2) Gelişme göstereceği konular: dalga ve buz dayanımı ile güç iletiminin geliştirilmesidir.



Şekil-8.2 Nysted rüzgar çiftliği (Danimarka) [13]

8.1.3 Kategori C

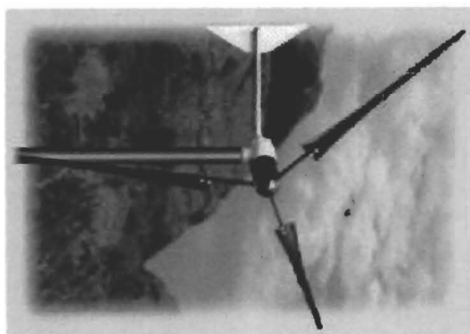
0.5-1.5 MW arası türbinler bu gruba girerler. Bu kategorideki türbinlerin çoğu yer üzerine kurulu ve temel olarak rüzgar kapasitesi ile üretim masrafları alınmış türbinlerdir. Gelişme alanları: tasarımsal maliyetler, güç kalitesi artışı, kontrol sistemlerinde gelişme ve hibrite uyarlabilirliktir.



Şekil-8.3 Enercon E48 800 kW [11]

8.1.4 Kategori D

0.1-500 kW'lık arasındaki küçük türbinler bu sınıfa girerler. Büyük türbinlerde gelişmeye odaklı endüstri sayesinde küçük türbinler gelişmelerini sağlayamamışlardır. Bazı firmaların bu sektöre yönelmesiyle beraber gidide büyüyen bir sektör olma eğilimindedir.



Şekil-8.4 Whisper H80 rüzgar türbini [9]

8.2 Gelişen Pazarlar

Dünya çapında birçok bölgede gelişen rüzgar enerjisi pazarını görmek mümkündür. En gelişmiş pazarlara göz atacak olursak;

Birleşik Devletler: 30 eyalette bulunan türbinlerle 2003 sonunda 6374 MW üretim mevcuttur. Bu elektrik 1.6 milyon hanenin elektrik ihtiyacını karşılayacak düzeydedir. Federal Üretim Vergi Kredisi ve Eyalet Yenilenebilir Portfolyo Standartları gibi uygulamalarla gelişim sağlanmasi amaçlanarak 2020 yılında 100000 MW kurulu güce ulaşmak hedeflenmektedir.

Avrupa: 10.3 milyon Avrupa'nın evindeki elektrik ihtiyacı rüzgar enerjisiyle karşılanabilmektedir. Avrupa elektrik ihtiyacının %2'si rüzgar enerjisinden sağlanabilmektedir. Global rüzgar pazarının %90'ına Avrupalı üreticiler sahiptir. Dünya kurulu gücünün %75'i Avrupa'dadır. Büyüme hızı %35 civarındadır.

Avustralya ve Yeni Zelanda: Avustralya 2003 yılında kapasitesini iki katına çıkarmıştır. Tasarım ve üretim halindeki projeler ile 2010 yılında elektrik üretiminin %2'sinin yenilenebilir olmasına çalışılmaktadır.

Orta ve Güney Amerika: Arjantin, Brezilya gibi bölge enerji lideri ülkeler dışında Meksika, Kosta Rika, Kolombiya, Şili ve Karayiplerde de çalışmalar sürmektedir.

Asya: 1990'lara kadar bölgede lider ülke Hindistan olmuştur. Çin'in enerji sektöründe gösterdiği gelişme ve Japonya'nın da devreye girmesiyle bölgede dev pazarlar oluşmaktadır.

Afrika: Fas, Mısır ve Tunus dışında yeterli rüzgara sahip bölgeler yoktur. Bu üç ülkede de ufak çaplı çalışmalar yürütülmektedir.

Orta Doğu: Türkiye, rüzgar potansiyeli yüksek olan bir ülkedir ve gelecekte bu potansiyeliyle büyük pazarlardan biri olacaktır. Bölgede diğer aktif ülkeler Suriye, Ürdün ve İran'dır.

8.3 2020 Yılı Rüzgar Durumu Hakkında Bir Öngörü

Wind Force 12 fizibilite çalışmaları sonucu şu öngörüler yapılmaktadır;

-Global elektrik ihtiyacının %12'si (3000 TWh) rüzgar enerjisiyle sağlanacaktır.

-Kuruğu güç 1245030 MW olacaktır.

-2.3 milyon kişiye iş imkanı sağlanacaktır.

-Kümülatif CO₂ kazancı 10771 milyon ton olacaktır.

-Üretim maliyeti 2.45 ¢cent/kWh, kurulum maliyeti de 512 ¢/kW olacaktır. [1]

9. SONUÇLAR

Rüzgar türbinleri çağımızın en gelişmeye ve kullanıma müsait yenilenebilir kaynaklarından biridir. Özellikle petrol kaynaklı enerjilere oranla sağladığı faydalar ve çevreye olan yararlı etkiler, diğer enerji kaynakları arasından sıyrılmasını sağlamıştır. Bu gelişim yüzyıllardan beri sürmektedir. Rüzgar ve rüzgardan elde edilen enerji bu bağlamda en eski enerji kaynaklarından birisidir.

Son yıllarda özellikle Amerika ve Avrupa'da gelişim gösteren rüzgar enerjisi, kullanım oranları bakımından her geçen gün önemi daha iyi anlaşılan ve yaygınlaşan bir enerjidir. Teknolojisi sürekli yenilediği ve geliştiği için de maliyet unsuru bakımından avantajlı konuma gelmesiyle daha da yaygınlaşacaktır.

Rüzgar türbinleri ülkemizde de gelişmeye açık bir enerji kaynağıdır. Özellikle ülkemizin bu alandaki potansiyeli sonucu önümüzdeki 10 yıl içinde büyük gelişme göstereceği açıktır. Bu sebepten rüzgar enerjisinin ve rüzgar türbini teknolojisinin daha iyi anlaşılması mutlak gerekliliktir.

Rüzgar türbinlerindeki en önemli ve hayati organ kontrol organıdır. Kontrol organı denince akla hem mekanik hem de elektronik sistemler gelir. Kontrol sistemleri mekanik ve elektriksel mekanizmaların ortak çalışmasıyla şekillenen sistemlerdir. Bu sebepten temel olarak yönetsel ve dinamik kontrol sistemleri olarak ikiye ayrılmış ve iki ayrı kısımda tanımlanmıştır.

Yönetsel kontrol sistemleri, rüzgar türbinlerinin beynidir. Tüm kontrol işlevlerini yerine getirmek için karar organıdır. Ayrıca operatörle iletişim halinde olan sistemdir. Yönetsel kontrol, sensörlerden aldığı bilgiler doğrultusunda kontrol komutunu dinamik kontrol sistemine aktarır. Dinamik kontrol sistemi ise, rüzgar türbinin elidir. Yönetsel kontrolden aldığı tüm emirleri yerine getirerek temel enerji eldesini sağlamanın yanısıra türbini ve rotoru koruyacak tüm manevralardan sorumludur.

Her türbinde ayrı ayrı veya birleşik halde bulunan dinamik ve yönetsel kontroller sayesinde rüzgar enerjisinden istenilen oranda kaliteli elektrik enerjisi elde edilir.

Tezin ana konusu olan 6. konuda bu sistemlerden ve işleyişlerinden ayrıntılı olarak bahsedilmiştir.

Tezin diğer kısımlarında da rüzgar enerjisiyle ilgili diğer temel bilgilerin yanı sıra türbinlerin diğer elemanlarından bahsedilmiştir. Ayrıca rüzgar türbinlerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlere değinilmiş ve bu sistemlerinin öneminin daha iyi anlaşılmasına çalışılmıştır.

Rüzgar türbinlerinin gelecekte en önemli enerji kaynaklarından biri olacağı açıktır. Bu sebepten tüm kurumlarımızca Türkiye'miz için çok önemli olan rüzgar türbinlerine gereken önem gösterilmeli ve okullarımızda da bu konularda yapılan çalışmalar sıklaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Altun O. (2004), "Türkiye Koşulları için Rüzgar Türbini Seçimi", YTÜ Yüksek Lisans Tezi, 20-22, İstanbul
- Alvanak E. (2000), "Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Palasında Tasarım Parametrelerinin Gerilme Dağılımına Etkisi", III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul
- Bianchi F.D., Mantz R.J., Christiansen C.F., (2004), "Power Regulations in Pitch-Controlled Variable-Speed WECS Above Rated Wind Speed", Renewable Energy, Pergamon Press, 29:1911-1922
- Bouscayrol A., Tounzi A., Guillaud X., Lancigu G., Delarue Ph., (2003), "Modelling, Control and Simulation of an Overall Wind Energy Conversion System", Renewable Energy, Pergamon Press, 28:1169-1185
- Dadone A., Dambrosio L., Fortunato B., (1997), "One Step Ahead Adaptive Control Technique for Wind Systems", Energy Conversion&Management, Pergamon Press, 39:399-413
- Dadone A., Dambrosio L., (2003), "Estimator Based Adaptive Fuzzy Logic Control Technique for a Wind Turbine-Generator System", Energy Conversion&Management, Pergamon Press, 44:135-153
- Dombaycı A., Bolattürk A., (2002), "Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri ile Yapılan Elektriksel Güç Üretimi Üzerinde Hava Akımı Etkisinin İncelenmesi", IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 359-362, İstanbul
- Durak M., (2000), "Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması:Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali", İTÜ Yüksek Lisans Tezi, 7-120, İstanbul
- Gipe P., (2003), "Wind Energy Basics", Chelsea Green Publishing Company, 125-146
- Güney İ., Oğuz Y., (2000), "Rüzgar Türbinleriyle Sürülen Generatörün Çıkış Büyüklüklerinin Bulanık Mantıkla Kontrolü ve Simülasyonu", III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul
- Harrison R.,Hau E., (2000), "Large Wind Turbines:Design and Economics", John Wiley&Sons Press, 27-93
- Heier S., (1998), "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", John Wiley&Sons Press
- Hunter R., Elliot G., (1994), "Wind Diesel Systems", Cambridge University Press, 5-39

- Iqbal M.T., (2003), "Modelling and Control of a Wind Fuel Cell Hybrid Energy System", Renewable Energy, Pergamon Press, 28:223-237
- Kakilli A., Oğuz Y., (2002), "Lineer ve Non-Lineer Rüzgar Türbin Modellerinin Kullanımıyla Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Sistematik Kontrolör Dizaynı", IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul
- Karadeli S., (2001), "Rüzgar Enerjisi", Tübitak Yayınları, 8:1-45, Ankara
- Kırım S., (2002), "Rüzgar Enerjisi ve Uygulamaları", İTÜ Yüksek Lisans Tezi, 32-45, İstanbul
- Kodama N., Matsuzaka T., Arinaga S., (1999) "Power Variation Control of a Wind Generator by Using Feed Forward Control", Renewable Energy, Pergamon Press, 16:847-850
- Koutoulis E., Kalaitzakis K., (2003), "Development of an Integrated Data-Acquisition System for Renewable Energy Sources System Monitoring", Renewable Energy, Pergamon Press, 28:139-152
- Maalavi Karam Y. (2002), "Optimal Frequency Design of Wind Turbine Blades", Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamics, Elsevier Press, 90:961-986
- Manwell J. F., (2002) "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", John Wiley&Sons Press, 2-19, 162-195, 252-275, 282-367
- Mujiadi E., Pierce K., Migliore P., (2000), "Soft-Stall Control for Variable-Speed Stall-Regulated Wind Turbines", Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamics, Elsevier Press, 85:277-291
- Özdamar A., (2000) "İzmir'de Yapılan Dört Yıllık Rüzgar Ölçümlerine Dayanan bir Enerji Değerlendirmesi", III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul
- Patel R. M., (1999), "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, 35-79
- Redlinger R., Andersen P.D, Marthorst P.E., (2002), "Wind Energy in 21.st Century", United Nations Environmental Programm Press, 68-73
- Samsun B., (2004), "Türkiye'deki Rüzgar Gücü Potansiyeline Göre Türbin Güçlerinin Saptanması ve Tasarımı", İTÜ Yüksek Lisans Tezi, 1-67, İstanbul
- Scherer R., (1999), "Blade Design Aspects", Renewable Energy, Pergamon Press, 16:1272-1277
- Spera A. D., (1998), "Wind Turbine Technology", ASME Press, 1-31

Valchev V., Bossche A. V., Ghijselen J., Melkebeek J., (2000), "Autonomous Renewable Energy Conversion System", Renewable Energy, Pergamon Press, 19:259-275

Yılmaz M., (2000), "Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Maliyet Analizi", YTTÜ Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

Walker J. F., Jenkins N., (1997), "Wind Energy Technology", Unesco Energy Engineering Series, 19-57,84-85,106-131

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] www.ewe.com/index
- [2] www.eie.gov.tr/istasyonlar.htm
- [3] www.epdk.gov.tr/proje.htm
- [4] www.tubitak.gov.tr/faaliyet.pdf
- [5] www.risoe.dk
- [6] www.windatlas.dk/eu.jpg
- [7] www.aocwind.net/aochome2.htm
- [8] www.demirer.com.tr/turbinteknik.htm
- [9] www.windenergy.com/turbines/a4032.pdf
- [10] www.turbowinds.com/astall.htm
- [11] www.enercon.de/e70.pdf
- [12] www.nordex-online.com/onlinekey.htm
- [13] www.bonus.dk/combistall.pdf
- [14] www.dewind.de/d6-1000eng.pdf
- [15] www.vestas.com/turb/data/v82.pdf
- [16] www.windpower.com/index.htm
- [17] www.mita-teknik.com/wp3000.pdf
- [18] www.repower.com/5m_uk.pdf
- [19] www.ewe.com/2004facts.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	13.04.1981	
Doğum yeri	Tekirdağ	
Lise	1992-1999	Tekirdağ Anadolu Lisesi
Lisans	1999-2003	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı