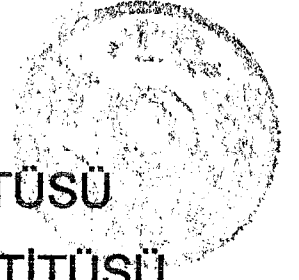


T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



140057

RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM
SİSTEMLERİ VE ROTOR TASARIMI

140057

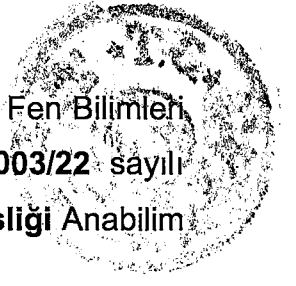
Fatih YILMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr.İlyas KANDEMİR

GEBZE

2003

Fatih YILMAZ' in tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **16 Temmuz 2003** tarih ve **2003/22** sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **Enerji Sistemleri Mühendisliği** Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.



JÜRİ

Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR
(Tez Danışmanı)

Yrd. Doç. Dr. Hasan SADIKOĞLU

Yrd. Doç. Dr. F. Erdoğan SEVİLGİN

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..30.10.2003..... tarih ve ..2003/22... sayılı kararı.



ÖZET

Rüzgar türbini rotorunun kanatları havadan aldığı hareket enerjisini, mekanik ünite (şaft, kavrama ve dişliler) vasıtasıyla jeneratör rotoru ve statoruna iletir. Böylece mekanik enerjiden, elektrik enerjisi elde edilir. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi şalter ve koruma sistemleri üzerinden ana transformatörlere, en nihayetinde son kullanıcıya veya bazı depolama birimlerine ulaşır. Uygun sistem elemanlarını kullanabilmek için döndürme momenti ve performans özelliklerine özel bir ehemmiyet vermek gerekir. Yapı bunlar üzerine inşa edilir ve türbin hızını sınırlandırmak için gerekenler yapılır.

Bu çalışmada, rüzgar karakteristiklerinin rüzgar türbini tasarımına etkileri incelenmiştir. Rüzgar hızının sürekli olamayışı ve değişim aralığının büyük olması, rüzgar enerjisi sistemlerinin tasarımını güçleştirmektedir. Bu sistemlerin tasarımı için, çalışma hızı aralığını sınırlandırmak gerekir.

Genelde, rüzgar türbinleri iki ana gruba ayrılır. Bunlar yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinleri olarak adlandırılır. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde en önemli eleman rüzgar türbinidir. En yaygın kullanılan çeşidi yatay eksenli, pervaneli türbinlerdir, bunun yanında Darrieus tip rotorlu türbinler, Cyclogyro tip rotorlu türbinler, ufak boyutlu Savonius tip rotorlu türbinler sıkça uygulama alanı olan çeşitlerdir. Rüzgar türbinlerinin performans analizi yapıldığında ilk sırayı pervaneli tip rotora sahip türbinler almaktadır.

Rotor veriminde en önemli faktör kanat tasarımıdır. Rüzgar türbinlerinin rotor tasarımlarıyla, hava taşıtlarının airfoil (kanat profili) ve pervane ile helikopterlerin rotor tasarımları arasında çok yakın bir benzerlik vardır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler ışığında, rüzgar türbini rotoru tasarımı yapılmaya çalışılmıştır.

SUMMARY

The blades of a wind turbine rotor extract some of the flow energy from air in motion, convert it into rotational energy, then deliver it via a mechanical drive unit (shafts, clutches and gears) to the rotor of a generator and thence to the stator of the same by mechanical-electrical conversion. The electrical energy from the generator is fed via a system of switching and protection devices, leads and any necessary transformers to the mains, to the end user or to some means of storage. In further handling the relevant system components, special attention must be given to the drive torque or performance properties. The structures based thereon and the actions necessary to limit turbine speed.

In this study, the impacts of the characteristic of the wind on wind turbine design have been searched. It is very difficult to design the system of wind energy because of the characteristics of the wind. For high speed of the wind, the system can destroy itself, therefore designer must built some precaution.

Generally, there are two main groups of the wind turbines. These are called 'Horizontal and vertical axis wind turbines'. The predominant configurations are horizontal axis propeller turbines and Darrieus and Cyclogyro turbines; in small sizes some Savonius rotors and other cup anemometer devices are also occasionally seen. In the performance analysis of wind turbines, the propeller devices were studied first.

Blade design is more important factor of windmill efficiency. Blade design is highly technical field, but it is closely related to aircraft airfoil, propeller and helicopter rotor design.

At the end of all above mentioned discoveries, a tried design of a wind turbine rotor is given.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında sürekli ilgi ve alakasını eksik etmeden ve mesai kavramı gözetmeden elinden gelen yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım sayın Yrd.Doç.Dr.İlyas KANDEMİR başta olmak üzere, gerek tez öncesi, gerekse tez çalışmalarım sırasında bilgi ve birikimlerinden faydalandığım tüm Enerji Sistemleri Anabilim Dalı Öğretim üyelerine teşekkür ederim. Tez çalışmam sırasında eserlerinden faydalandığım değerli bilim adamları ve kaynaklarından yararlandığım tüm firma yetkililerine de teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
 1. GİRİŞ	 1
1.1. Tarihi Gelişimi	2
1.1.1. Mekanik Güç Üretimi	2
1.1.2. Elektrik Güç Üretimi	3
1.2. Günümüz Durumu	5
1.2.1. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	6
1.2.2. Rüzgar Enerjisi Potansiyel Belirleme Çalışmaları	7
1.2.3. Türkiye’de Genel Durum	8
1.3. Otoprodüktörlere Genel Bakış	10
2. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ	12
2.1. Temel Bilgiler	12
2.1.1. Rüzgar	12
2.1.2. Olayın Fiziksel Yönü	13
2.1.3. Rüzgar Türbini Çeşitleri	14
2.2. Rüzgar Türbini Teknolojisi	16
2.2.1. Tasarım Yaklaşımları	17
2.2.2. İki veya Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri	18
2.2.3. Güç Kontrolü	18
2.2.4. Aktarma Organları ve Jeneratör	22
2.2.5. Teknoloji Standartları	25
2.2.6. Rüzgar Türbinine Genel Bakış	25
2.2.7. Şebeke Entegrasyonu	28
2.2.8. Elde Edilebilirlik	28

2.2.9. Güç Kalitesi	30
2.2.10. Ekonomi	32
2.3. Rüzgar Enerjisi Projesi Hazırlanışı	32
2.3.1. Rüzgar Ölçümleri	33
2.3.2. Çevresel Etkiler	33
2.3.3. Soğuk Hava Uygulamaları	34
2.3.4. Offshore Uygulamaları	36
2.3.5. Deniz Suyu Arıtması Uygulamaları	36
2.3.6. Küçük Rüzgar Türbini Sistemleri	37
2.3.7. Rüzgar – Dizel Sistemler	38
3. ROTOR HAKKINDA BİLGİLER	39
3.1. Rotor Hareket Miktarı Teorisi	39
3.2. Hareket Miktarları Teorisi	41
3.3. Teorik Verim	44
3.4. Rotor	47
3.5. Trast (İtke) oluşumu	49
3.6. Basınç ve Hızlar	50
3.7. Hızların Birbirleri ile Olan İlişkileri	52
3.8. Sonsuz Sayıda Kanat Kullanımı	54
3.9. Hava Tüneli İçinde Çalışan Rotor	55
3.10. Froude Kanunu	57
3.11. Girişim Faktörleri	57
3.12. Rotor Tasarımı	58
3.13. Rotor ile Kule Arasındaki İlişki	59
3.14. Rotorun Yeri	60
4. GÜÇ HAKKINDA BİLGİLER	61
4.1. Faydalı Güç	61
4.2. Rotorun Faydalı Gücü	61
4.3. Rüzgar Gücü	64
4.3.1. API Rüzgar Kuvveti	65
4.3.2. ABS Rüzgar Kuvveti	66
5. ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ	69
5.1. Enerji Dönüşüm Sistemleri	69
5.2. Rüzgar Enerjisi	69

5.3. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Kullanılması	73
5.4. Rüzgar Gücü – Elektrik Gücü Dönüşümü	75
5.5. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Seçimi	77
5.5.1. Faydalı Rüzgar Gücünün Hesaplanması	77
5.5.2. Uygun Rüzgar Türbininin Seçimi	77
5.5.3. Rüzgar Gücünden Elde Edilecek Maksimum Elektriksel Çıkış Gücünün Hesaplanması	78
5.5.4. Türbin Fiyatının Hesaplanması	79
6. RÜZGAR TÜRBİNİ ELEMANLARI	81
6.1. Kılavuz Kuyruk	81
6.2. Platform ve Kule	81
6.3. Yataklar ve Jeneratör	81
6.4. Kule Tasarımı	82
6.5. Mekanizma Odası	82
7. MALİYET	83
7.1. Sistem Maliyeti	83
7.2. Birim Enerji Maliyeti	85
7.3. Çevreye Uyum	85
7.4. Ekonomiklik	86
7.5. Değişken Hızlarda Çalışmanın Enerji Maliyetine Etkisi	87
7.5.1. Değişken Hızlı Rüzgar Türbininin Maliyeti	88
7.5.2. Bir VSWT’de Enerji Verimliliğinin Artırılması	89
7.5.3. Ekonomiklik	89
7.5.4. Enerji Maliyetinin VSWT ve CSWT Arasında Karşılaştırılması	90
8. KONTROL SİSTEMLERİ	92
8.1. Kontrol Sistemleri	92
8.2. Esneme Kontrolü	92
8.3. Rüzgar Türbini Çiftliklerinde	93
8.4. Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemleri ve Bunların Uygulamaları	97
8.4.1. Kontrol Sistemleri ve Rüzgar Türbinleri	97
8.4.2. Rüzgar Türbini Çiftliği Kontrol Sistemleri	98
8.4.3. Rüzgar Türbini Kontrol Sistemleri	98
8.4.4. Komponent Kontrol Sistemleri	99
8.4.5. Feedback (Geri Bildirim) Kontrolü	99

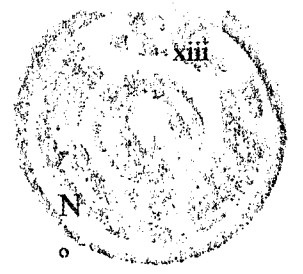
8.4.6. İyi Bir Kontrol ve Rüzgar Türbinleri	102
8.4.7. Rüzgar Türbininde Feedback ile İlgili Problemler	104
8.4.8. Kontrol Sistemi Tasarımı	105
9. RÜZGAR TÜRBİNİ KONSTRÜKSİYONU	108
9.1. Kabuller	108
9.2. Konstriktif Hesaplar	108
9.3. Palaların Çizimi	118
9.4. Pitch Açısının Hesabı	123
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	126
KAYNAKLAR	127
ÖZGEÇMİŞ	128



SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>	<u>Birimi</u>
C_p	Güç Katsayısı	-
ρ	Yoğunluk	kg/m^3
λ	Uç Hız Oranı	-
N	Kanat Sayısı	-
R	Yarıçap	m
Ω	Rotorun Açısal Hızı	1/s
V	Ortalama Rüzgar Hızı	m/s
D	Rotor Çapı	m
P	Türbin Gücü	W
J	İlerleme Hız Oranı	-
Q	Moment	Nm
T	Trast	N
η	Verim	%
L	Kaldırma Kuvveti	N
D	Sürükleme Kuvveti	N
R	Bileşke Kuvvet	N
c	Kord Uzunluğu	m
α	Hücum Açısı	°
C_L	Kaldırma Katsayısı	-
C_D	Sürükleme Katsayısı	-
b	Kanat Uzunluğu	m
S	Kanat Yüzey Alanı	m^2
P_R	Rüzgardan Elde Edilen Güç	W
σ	Katılık Oranı	-
A	Rotor Alanı	m^2
ϕ	İyilik Derecesi	-
N_e	Türbin Rotor Gücü	W
q	Dinamik Basınç	N/m^2
m	Kütle	kg
C_M	Moment Katsayısı	-

C_A	Yükseklik Düzeltme Faktörü	
C_T	Sıcaklık Düzeltme Faktörü	
ϕ	Yüzey Pürüzlülüğü	-
C_s	Şekil Katsayısı	-
V_{10}	Deniz Seviyesinden 10(m) Yükseklikteki Hız	m/s
y	Rakım	m
x	Üs	-
C_h	Yükseklik Katsayısı	-
A	Projeksiyon Alanı	m ²
β	Yükseklik Faktörü Üssü	-
α	Bora, Fırtına Faktörü	-
Γ	Sirkülasyon	-
$\hat{W}_i$	Güç	W
C	Havanın Akış Hızı	m/s
a	Girişim Faktörü	-
P	Basınç	N/m ²
F_x	Eksenel Trast	N
W_{th}	Teorik Güç	W
E_k	Kinetik Enerji	W
K_C	Küp Faktörü	-
P_{av}	Ortalama Güç Yoğunluğu	W/m ²
K_{ep}	Enerji Faktörü	-
η_p	Güç İkmal Verimi	%
η_g	Jeneratör Verimi	%
η_m	Mekanik Verim	%
k	Yıllık Ort. Enerji Üretim Faktörü	-
P_R	Tesis Gücü	W
dT	Trast	N
dQ	Moment	Nm
q	Hava Hızı	m/s
ω	Açısal Hız	1/s
I	Atalet	m ⁴
B	Viskoz Sönümleme Faktörü	-



K	Katılık Oranı	
T_A	Zorlayıcı Kuvvet	
φ	Şaftın Rotasyonel Konumu	
V_t	Ortalama Rüzgar Hızı	m/s
n_a	Jeneratör Devri	d/d
k_T	Trast Katsayısı	-
k_Q	Moment Katsayısı	-
P_0	Statik Basınç	N/m ²
H	Entalpi	kJ/kg
E	Kinetik Enerji	J
P_e	Elektriksel Güç	W
N	Rüzgar Türbini Sayısı	-
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri	
EİE	Elektrik Etüt İşleri İdaresi	
CSWT	Sabit Hızlı Rüzgar Türbini	
VSWT	Değişken Hızlı Rüzgar Türbini	
CoE	Rüzgar Türbininin Enerji Maliyeti	

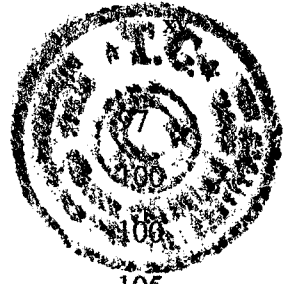
ŞEKİLLER DİZİNİ



Sekil

Sayfa

1.1. Türkiye’de rüzgar hızının 3 m/s’ den fazla olduğu bölgeler ve rüzgar yoğunlukları	9
2.1. Güç ve moment katsayıları değişimleri	16
2.2. Endüksiyon jeneratörlü türbin	19
2.3. Durma kontrollü türbin güç çıktısı grafiği	20
2.4. ac-dc-ac dönüştürücülü rüzgar türbini	20
2.5. Eğim kontrollü rüzgar türbini çıktı karakteristikleri	21
2.6. Bounus rüzgar türbini	24
2.7. Enercon rüzgar türbini	24
2.8. Seçilen zaman dilimleri için güç eğrileri	31
3.1. α açısı ve profil eğriliği	39
3.2. Hareket miktarları teorisi	42
3.3. Güç sayısı ile teorik verim arasındaki ilişki	46
3.4. J katsayısının teorik verim ile değişimi	47
3.5. Rotor	48
3.6. Kanat elemanı	49
3.7. Rotorda hava akımı	51
3.8. Disk düzlemi içindeki içinde ki girişim hızları	53
3.9. Hava tüneli içinde çalışan rotor	56
4.1. API yükseklik faktörü	67
5.1. Rüzgar türbini rotorundan hava akışı	70
5.2. Yüksekliğe bağlı olarak ortalama rüzgar hızındaki değişim	75
5.3. Rotor alanı ile güç arasındaki ilişki	78
5.4. Rüzgar türbini maliyeti - çıkış gücü ilişkisi	79
5.5. Birim enerji maliyeti	80
6.1. Kuyruk yüzeyleri	81
7.1. Maliyet Karşılaştırması	91
8.1. Her zaman var olan gürültü seviyeleri	93
8.2. Rüzgar türbininde gürültü	95
8.3. Rüzgar türbini çıkış gürültüleri	96
8.4. İzole edilmiş veya edilmemiş rüzgar türbini gürültüleri	96



8.5. Kontrol devresinin akış şeması	
8.6. Açık devre kontrol sistemi	
8.7. Kapalı devre kontrol sistemi	
8.8. Rüzgar türbini dinamiği	105
8.9. Kontrol sistemi tasarım problemi	106
9.1. Kanat elemanı	113
9.2. Kanat yüzeyi	114
9.3. Kanat yüzey hesabı	115
9.4. Pitch açısının kanat profili üzerinde gösterimi	124
9.5. Rüzgar hızı pitch açısı değişimi	125



ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Tarihi rüzgar türbinleri	4
1.2. İlk büyük ölçekli rüzgar türbinlerinin performansı	5
1.3. Dünya genelinde kullanıma hazır rüzgar gücü kapasiteleri	6
1.4. EİE rüzgar enerjisi gözlem istasyonları aylık ortalama hızları	8
1.5. Türkiye’de bölgelere göre rüzgar potansiyeli	9
1.6. Türkiye’de yapılan rüzgar santrali projeleri	10
2.1. Temel tasarım yaklaşımları	17
2.2. Başlıca türbinlerin boyut ve ağırlığı	26
2.3. Geliştirilmekte olan geniş ölçekli türbinler	29
2.4. Farklı enerji teknolojilerinin karşılaştırılması	35
3.1. Güç katsayısı ve teorik verim değerleri	46
7.1. Relatif VSWT komponent maliyetleri	88
7.2. Mali analizlerde ekonomiklik kabulleri	90
9.1. Kanat açıklığı boyunca burulma açısı, veter değişimi	113
9.2. r/R değerine karşılık gelen hesap sonuçları	118
9.3. Kord uzunluğuna göre X ve Y koordinatları	119
9.4. Farklı r/R ve kord (C) değerleri için X – Y değerleri	120
9.5. Rüzgar hızı ile pitch açısı değişimi	125

1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi geçtiğimiz 3000 yılda kullanılmıştır. 20. yüzyılın başlarına kadar rüzgar enerjisi su pompalamak için kullanılmıştır. Modern endüstrinin başlangıcıyla devamlı enerji sağlayan fosil türevi yakıtlı makineler veya elektrik üniteleri rüzgar enerjisine tercih edilmiştir.

1970'lerin başında ilk petrol kriziyle beraber rüzgar enerjisine olan ilgi tekrar artmıştır. Rüzgar enerjisinden elektrik sağlama, mekanik enerji sağlamadan daha önemli hale gelmiştir.

Rüzgar enerjisinden ilk elektrik üretimi 20. yüzyılın başlarında gerçekleşmiştir. Teknoloji 1970'lerin başlarına kadar adım adım getirilmiş, 1990'ların sonunda rüzgar enerjisi en çok talep edilen enerji kaynaklarının başında gelmiştir. Son on yılda dünya genelinde kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi her üç yılda bir ikiye katlanmaktadır. Rüzgar gücünden elektrik üretme maliyeti 1980'lerin başına nazaran 1/6 oranında düşmüştür ve bu gelişmenin devam edeceği düşünülmektedir.

Rüzgar enerjisi teknolojisi çok hızlı ilerlemektedir. 1989 sonlarında 300 kW kapasiteli ve 30 m rotor çaplı rüzgar türbinleri kullanılmaktaydı. Sadece on yıl sonra 1500 kW kapasiteli ve 70 m rotor çaplı rüzgar türbinleri birçok üretici tarafından imal edilmektedir. Yeni yüzyılın başında 2MW kapasiteli 74 m rotor çaplı projeler gerçekleştirilmiştir. 2001 ve 2003 yılları arasında da 5 MW lık rüzgar türbinlerinin kullanılması için çalışmalar sürdürülmüştür.

Bu hızlı teknoloji ve pazar artışı, rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde araştırmaları ve profesyonel çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Dünya genelinde kurulu rüzgar enerjisi kapasitesinin % 80'ni Almanya, A.B.D., Danimarka, Hindistan ve İspanya'dır. Rüzgar enerjisi teknolojisi diğer alanlara göre buralarda çok hızlı ilerlemektedir. Bu ilerlemenin ana sebebi bilgi birikimidir. Bu kompleks teknolojinin 3000 yıllık geçmişinin olduğunun unutulmaması gerekir. Rüzgar enerjisi teknolojisini aerodinamik, yapısal dinamik, mekanik ve en önemlisi elektrik mühendisliği şeklinde disiplinlere ayırabiliriz. [Anckerman, 2000]

1.1. Tarihi Gelişimi

1.1.1. Mekanik Güç Üretimi

İlk yel değirmenleri düşey eksenli değirmenlerdir. Bu yel değirmenleri basit sürüklenme etkili makineler olarak tarif edilebilir. Afganistan'ın yüksek bölgelerinde M.Ö. 7. yüzyıldan itibaren tahıl öğütme amaçlı kullanılmıştır.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri ile ilgili ilk detaylar M.S. 1000 yıllarında İran, Çin ve Tibet'te bulunmuştur. Bu yel değirmeni çeşidinin yatay bir şaftı ve bir düzlemde dönen kanatları vardı. Yatay eksenli yel değirmenleri İran ve Ortadoğu'dan Akdeniz ülkeleri üzerinden Avrupa'ya geçmiştir. İlk yatay eksenli yel değirmeni İngiltere'de 1150, Fransa'da 1180, Finlandiya'da 1190, Almanya'da 1222, Danimarka'da 1259 da kullanılmıştır. Bu hızlı gelişim Haçlıların yel değirmeni bilgilerini İran'dan alarak Avrupa'nın birçok bölgesine yayması ile gerçekleştirilmiştir.

Avrupa'da yel değirmeni performansları 12. ve 19. yüzyıllar arasında adım-adım gelişmiştir. 19. yüzyıl sonlarında tipik Avrupa yel değirmenlerinin gövde yüksekliği 30 m rotor çapı 25 m dir. Yel değirmenleri sadece tahıl öğütmek için değil göl ve bataklıklardan su pompalamak için de kullanılmıştır. 1800'lerde sadece Fransa'da 20.000 modern Avrupa yel değirmeni kullanılmaktaydı. Hollanda da endüstride kullanılan gücün % 90'ını yel değirmenlerinden elde edilmekteydi. 1904'te Alman endüstrisinin ihtiyacı olan enerjinin % 11'i 18.000 kurulu ünite ile yel değirmenlerinden elde edilmiştir. Endüstrileşme yel değirmenlerinde kademeli bir azalmaya sebep olmuştur.

Zamanla Avrupa yel değirmenleri yavaş yavaş azalmış, Kuzey Amerika'da göçmenler tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Su pompalama amaçlı kullanılmaya başlanan yal değirmenleri popüler hale gelmiştir. Bunlar Amerikan yel değirmenleri olarak da bilinir. Amerika'da yel değirmenlerinin popüleritesi 1920 ve 1930 yılları arasında 600.000 üniteyle en yüksek noktaya ulaşmıştır. Amerikan yel değirmenlerinin farklı türleri hala tarım alanlarında kullanılmaktadır [Ackermann, 2000].

1.1.2. Elektrik Gücü Üretimi

1891 de Danel Poul LaCour elektrik üreten ilk rüzgar türbinini imal etmiştir. I. ve II. dünya savaşı sırasında enerji sıkıntısını gidermek için Danimarkalı mühendisler teknolojiyi geliştirmiştir. Danimarka firması F. L. Smith 1941-1942 yıllarında modern rüzgar türbini sayılabilecek ilk rüzgar türbinini üretmiştir. Smith türbinleri aerodinamik bilgilere dayanan ilk airfoillerin (kanat profillerinin) kullanıldığı türbinlerdir. Aynı dönemde Amerikan Palmer Putnam Amerikan firması Morgan Smith için 53 m rotor çapına sahip bir rüzgar türbini üretmiştir. Bunun sadece boyutları değil tasarım psikolojisi ve mekanizmasında da farklıdır. Danimarka tasarımı ön rüzgar rotoru ve durma kontrolü ile düşük rüzgar hızında çalışmaktadır. Putnam tasarımı arka rüzgar rotorlu ve değişken açı kontrolü üzerine kuruludur. Putnam tasarımı fazla başarılı olamamıştır ve 1945'te sökülüştür. Önemli rüzgar türbinleri Çizelge.1.2'de görülmektedir.

II. Dünya Savaşı'ndan sonra Johannes Juul Danimarka tasarım ekolünü geliştirdi. Onun türbini Danimarka Gedser'de kuruldu ve 1956-1967 yılları arasında 2.200 milyon Wh üretim gerçekleştirdi. Türbin gövde üzerinde iki yana dönebilen rotor göbeğine bağlı iki ince fiberglas kanat içermekteydi.

Rüzgar türbinlerinden geniş çaplı enerji üretimi II. Dünya Savaşı'ndan sonra gerçekleştirilmiştir. Düşük kapasiteli rüzgar türbinleri bu dönemde küçük bölgelerin enerji ihtiyacı veya batarya şarjı amacıyla kullanılmıştır.

1970'lerin başında çıkan petrol krizi rüzgar enerjisi üretimine olan ilgiyi tekrar doğurmuştur. Sonuç olarak araştırma geliştirme çalışmalarına finanssal destek verilmiştir. Almanya, Amerika ve İsviçre gibi ülkeler MW mertebesinde yüksek kapasiteli üretim yapan prototipleri desteklemiştir. Bununla ilgili ilk önemli tasarı 1978 yılı Kasımında Amerikan kongresinden geçmiştir. Bu tasarıyla başkan Carter ve Amerikan kongresi yabancı petrol kaynaklarına bağımlılığın azaltılmasını amaçlamıştır. Bu tasarı (PURPA) tarihte yenilenebilir enerjiyi teşvik amaçlı ilk tasarıdır.

Tasarıyla birlikte San Francisco'nun doğusundaki dağlar boyunca ve Los Angeles'in kuzeyinde geniş rüzgar tarlaları kuruldu. Bu rüzgar tarlalarının ilki 50 kW'lık

rüzgar türbinlerinden oluşmaktadır. Bunu takip eden yıllarda, 1980'lerin sonunda rüzgar türbinlerinin tipi 200 kW'a kadar çıkarılmıştır. Türbinlerin bir çoğu Danimarka'dan ihraç edilmiş olup bunlar LoCour ve Johannes Juul'un tasarımlarındaki gibi üst rüzgar türbini ve durma kontrollüdür. 1980'lerin sonunda California'da 1500 MW kapasiteli 15.000 rüzgar türbini bulunmaktaydı.

Çizelge 1.1. Tarihi rüzgar türbinleri [Ackermann, 2000].

Türbin, ülke	Çap (m)	Süpürülen alan (m ²)	Güç (kW)	Spesifik güç (kW/ m ²)	Kanat sayısı	Kule yüksekliği (m)	Üretim tarihi
Poul LaCour, DK	23	408	18	0,04	4	-	1891
Smith- Putnam, US	53	2231	1250	0,56	2	34	1941
F. L. Smidth, DK	17	237	50	0,21	3	24	1941
F. L. Smidth, DK	24	456	70	0,15	3	24	1942
Gedser, DK	24	452	200	0,44	3	25	1957
Hütter, Almanya	34	908	100	0,11	2	22	1958

Bu dönemlerde rüzgar enerjisinin Amerika'da finanssal desteği azalmış, Avrupa ve daha sonra da Hindistan'da artmıştır. 1990'larda Avrupa'da yenilenebilir enerji üretimi karma bir destek tarifesıyla desteklenirken Hindistan'da rüzgar enerjisi yatırımlarına vergi muafiyeti getirilmiştir. Bu destekler sayesinde rüzgar türbini kurulumu bazı Avrupa ülkelerinde özellikle Almanya'da ve buna benzer olarak Hindistan'da artmıştır.

Pazar payının artışına paralel olarak teknolojiye hızla gelişmiştir. 20. yüzyıl boyunca 20 yıl süreyle megawatt mertebesinde rüzgar türbinleri için yapılan başarısız çalışmalar sonunda 1,5 MW'lık rüzgar türbinleri teknik olarak mümkün hale gelmiştir [Ackermann, 2000].

Çizelge 1.2. İlk büyük ölçekli rüzgar türbinlerinin performansı [Anckermann, 2000].

Türbin, ülke	Çap (m)	Süpürme alanı (m ²)	Kapasite (MW)	İşletme saati	Üretim (GWh)	Periyot
Mod-1, Amerika	60	2827	2	-	-	79-83
Growian, Danimarka	100	7854	3	420	-	81-87
Smith-Putnam, Amerika	53	2236	1,25	695	0,2	41-45
WTS-4, Danimarka	78	4778	4	7200	16	82-94
Nibe A, Danimarka	40	1257	0,63	8414	2	79-93
WEG LS-1, Almanya	60	2827	3	8441	6	87-92
Mod-2, Amerika	91	6504	2,5	8658	15	82-88
Nasudden, İsveç	75	4418	2	11.400	13	83-88
Mod-OA, Amerika	38	1141	0,2	13.045	1	77-82
Tjæcreborg, Danimarka	61	2922	2	14.175	10	88-93
Ecole, Kanada	64	4000	3,6	19.000	12	87-93
Mod-5B, Amerika	98	7466	3,2	20.561	27	87-92
Maglarp WTS-3, İsveç	78	4778	3	26.159	34	82-92
Nibe B, Danimarka	40	1257	0,63	29.400	8	80-93
Tivind, Danimarka	54	2290	2	50.000	14	78-93

1.2. Günümüz Durumu

Bu bölümde rüzgar enerjisinin, 20. yüzyıl sonlarında dünya genelindeki durumu değerlendirilecektir. İnceleme şebeke bağlantılı rüzgar dönüşüm sistemleri ve otoproduktörler şeklinde yapılacaktır. Sonuçta rüzgar enerjisi genel potansiyeli tartışılacaktır.

Yıllık kurulum kapasitesi kendi içerisinde oranlanarak yüzde olarak mukayese edildiğinde, 1990'larda rüzgar enerjisi en hızlı büyüyen enerji teknolojisiydi. Fakat bu büyüme Dünya geneline yayılmamıştı. 1999'un sonlarında dünya genelindeki rüzgar

enerjisi kapasitesinin % 69'u Avrupa'da, %19'u Kuzey Amerika'da ve %10'u Asya ve Pasifik'teydi [Anckerman, 2000].

1.2.1. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Ülkemizde rüzgar enerjisi sistemlerinden yararlanmaya yönelik ilgi giderek artmaktadır. Konu ile ilgili bir çok kurum, kuruluş ve üniversiteler çalışmalar yapmaktadır. Rüzgar enerjisinden yararlanmak için, var olan potansiyelin belirlenmesi ve bu potansiyel baz alınarak gerçekçi hedeflerin saptanması gerekmektedir.

Çizelge 1.3. Dünya genelinde kullanıma hazır rüzgar gücü kapasitesi [Ackermann, 2000].

Bölge	Kurulu kapasite (MW)				
	1995 sonu	1996 sonu	1997 sonu	1998 sonu	1999 sonu
Avrupa	2518	3216	4766	6469	9307
Kuzey Amerika	1676	1681	1611	2010	2619
Güney ve orta Amerika	11	32	38	52	87
Asya ve Pasifik	626	897	1149	1257	1403
Orta Doğu ve Afrika	13	13	24	26	39
Dünya geneli	4844	5839	7588	9814	13455

Ülkemizde rüzgar hızı ve yönü ile ilgili ölçümleri Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Genel Müdürlüğü yapmaktadır. Rüzgar enerjisinden yararlanmaya ilişkin olarak yapılan çalışmalarda kullanılan dataların son derece sağlıklı olması gerekmektedir. Gerçekte DMİ istasyonlarından alınan data çeşitli sahalarda, çeşitli yaklaşım yöntemleriyle kullanılabilir. Ancak rüzgar enerjisinden yararlanılacak sahalarda doğrudan rüzgar datası elde etmek en sağlıklı olanıdır. Bu nedenle EİE İdaresi Genel Müdürlüğü ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi kurulabilecek sahaları saptamak için çeşitli bölgelerde rüzgar ölçümleri yapmaktadır.

1.2.2. Rüzgar Enerjisi Potansiyel Belirleme Çalışmaları



Rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla sürdürülen çalışmaların ilkinin potansiyel belirleme çalışmaları oluşturmaktadır. Bu amaçla, DMI'ne ait istasyonların 1970-1980 yılları arasındaki kayıtları değerlendirilmiş ve ülke genelindeki doğal rüzgar enerjisi dağılımı genel olarak belirlenmiştir. Ancak, rüzgardan elektrik enerjisi üretimine yönelik çalışmalarda ayrıntılı rüzgar potansiyel değerlendirme çalışmaları gerekli olmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, ilk aşamada belirlenmiş olan ve rüzgar enerjisi yönünden umut verici yerlerde yapılan etütler ile rüzgardan enerji üretimine elverişli olabilecek mevkilerde "Rüzgar Enerjisi Gözlem İstasyonları" kurulup veri toplanmaya başlanmıştır. Bu istasyonlarda düşük güçlü mikro işlemci kontrollü veri toplama sistemleri kullanılmaktadır. Ölçümler 10 m. standart yükseklikte alınmaktadır. Veriler birer saatlik periyotlarla toplanmakta ve yazılım kullanılarak işlenmektedir. Elde edilen aylık rüzgar istatistik raporları; özet hız istatistikleri, ortalama rüzgar hızları grafikleri, frekans dağılım çizelgesi, rüzgar yönleri ortalama türbülans yoğunluğu ve rüzgar gücünü içeren bu veriler ve değerlendirmeler diskette veya kağıt çıktı olarak kurum ve kuruluşlara ücreti karşılığında verilebilmektedir. Data satın almak isteyen özel ve tüzel kişiler, kurumda data talep dilekçesini doldurup, ücreti yatırdıktan sonra datayı kurumun belirleyeceği bir tarihte alabileceklerdir. Bu durum maddi destekten yoksun bir çok araştırma için dezavantajdır.

EİE'nin ölçüm istasyonlarından elde edilen ortalama hızlar, bu bölgelerin bir çoğunun rüzgar enerjisi uygulamaları için elverişli olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar bazı firmaları rüzgar tarlaları kurmak için cesaretlendirmiş ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına Yap-İşlet-Devret ve Otoprodüktör statüsünde fizibilite başvuruları yapmasına sevk etmiştir. (Türkiye Elektrik Kurumu dışındaki kuruluşların elektrik üretimi, iletimi, dağıtımı ve ticareti ile görevlendirilmesi hakkındaki 3096 sayılı kanunun 4. maddesi ve bu kanunun uygulamasına yönelik ilgili yönetmelikler gereği) Kasım 1997 sonu itibarıyla Bakanlığa yapılan başvuruların 20 adedi YİD modeli, 2 adedi de otoprodüktör statüsündedir. Başvuruların toplam kurulum gücü kapasitesi 700 MW civarındadır. Bu başvuruların çoğunluğu fizibilite hazırlama veya değerlendirme aşamasında olup, ilk uygulamaların başarısına göre kapasite 1380 MW civarına çıkabilecektir. [Durak, 2000].

Çizelge 1.4.EİE rüzgar enerjisi gözlem istasyonları aylık ortalama hızları [EİE,

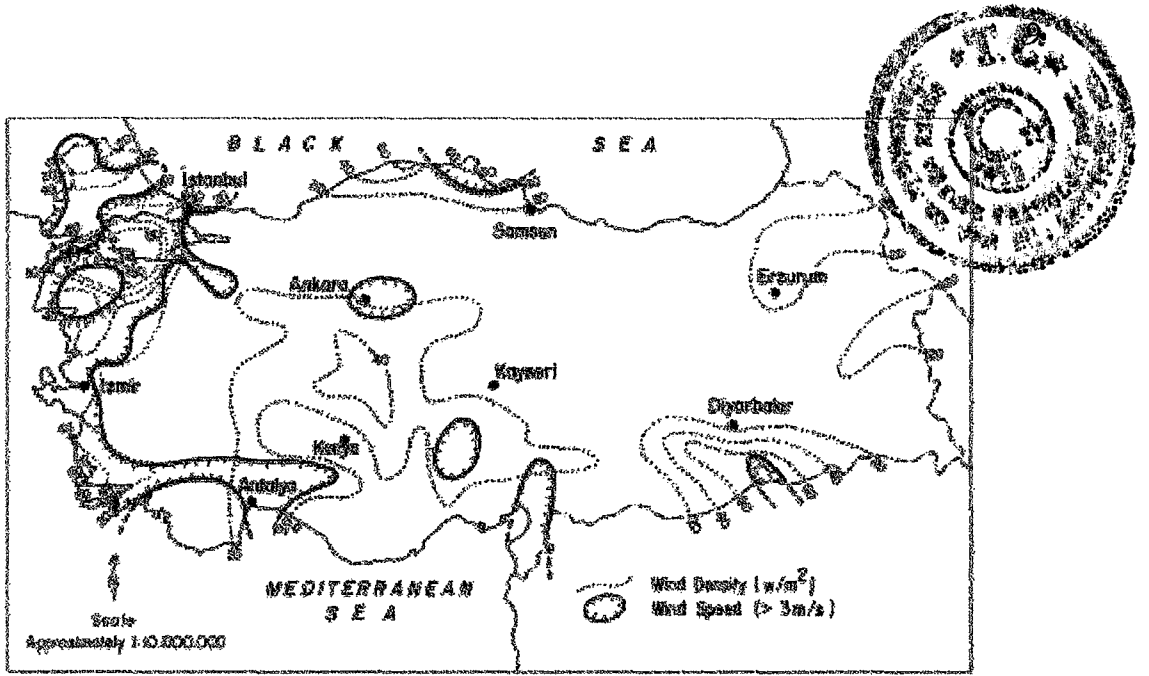
2002]

İstasyon	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Foça	5,1	4,8	5,3	4,4	4,7	5,7	4,8	5,5	4,1	4,6	4,0	6,1
Belen	5,0	5,8	5,3	5,4	5,4	7,8	8,8	9,1	6,0	-	-	-
Akhisar	5,2	4,3	5,3	5,3	6,1	7,2	6,0	6,2	3,8	4,3		5,4
Didim	5,0	3,3	3,9	4,1	3,5	4,3	3,8	4,3	3,3	3,4	2,9	4,7
Kocadağ	8,0	7,7	8,0	7,0	7,0	8,6	8,6	6,5	7,2	5,3	7,1	-
Datça	5,4	4,0	5,0	5,5	5,4	5,4	6,2	7,0	4,9	4,6	3,5	5,1
Bandırma	6,1	6,2	7,4	6,4	7,0	6,2	5,2	6,1	-	-	-	7,0
Gelendost	4,2	4,3	5,0	4,9	4,7	4,6	4,7	4,5	3,7	4,0	4,1	4,3
Bababurnu	5,1	4,9	6,0	5,0	4,8	6,3	5,0	5,6	4,2	5,0	4,3	6,4
Yumurtalık	-	-	-	-	3,2	4,1	3,7	3,8	3,5	3,5	3,5	5,3
Sinop	3,6	4,1	-	-	3,4	4,4	3,5	3,5	3,3	4,1	3,5	4,8
Yalıkavak	-	-	-	-	-	-	5,1	5,7	4,9	4,6	4,5	6,4

1.2.3. Türkiye’de Genel Durum

2000 yılı itibariyle ülkemizde elektrik enerjisi üretimi amaçlı 2 adet rüzgar çiftliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki 3 adet rüzgar türbini bulunan Çeşme Alaçatı Germiyan Köyü’nde 1,7 MW kurulu güçlü; diğeri de yine İzmir Çeşme Alaçatı’ da 12 adet rüzgar türbinine sahip 7,2 MW kurulu güçlü santraldir. Bununla beraber, yakın gelecekte ülkemizde rüzgar santrallerinin önemli bir artış göstereceği resmi kayıtlar tarafından doğrulanmaktadır [Durak, 2000].

Ülkemizde rüzgar enerjisi uygulamaları için en uygun bölgeler Marmara, Güneydoğu Anadolu ve Ege bölgeleridir. Rüzgar hızının 3 m/s civarında olduğu bu bölgeler rüzgar enerjisi için çok uygundur. Marmara ve Ege bölgesinde eski yel değirmeni kalıntılarının bulunması bu bölge potansiyelinin uzun süredir değerini koruduğunu göstermektedir.



Şekil 1.1. Türkiye’de rüzgar hızının 3 m/s’ den fazla olduğu bölgeler ve rüzgar yoğunlukları. [Şen, 1999].

Türkiye toplam rüzgar enerjisi potansiyelinin 400 milyar kWh olduğu tahmin edilmektedir. Bunun 124 milyar kWh’ i teknik olarak fizibil potansiyeldir. Sadece bazı özel bölgelerin ise ekonomik potansiyeli 14 milyar kWh’dir. Yapılan bazı ölçümlere göre en yüksek rüzgar yoğunluğu 152,6 watt/m² ile Bandırma’ya ve 108,9 watt/m² ile Antakya’ya aittir.

Çizelge 1.5. Türkiye’de bölgelere göre rüzgar potansiyeli [Ediger and Kentel, 1997]

	Yıllık rüzgar yoğunluğu ortalaması (watt/m ²)	Yıllık rüzgar hızı ortalaması (m/s)
Marmara	51,9	3,3
Güneydoğu Anadolu	29,3	2,7
Ege	23,5	2,6
Karadeniz	21,4	2,5
Akdeniz	21,3	2,4
İç Anadolu	20,1	2,5
Doğu Anadolu	13,2	2,1
Türkiye ortalaması	24,0	2,5

1.3. Otoprodüktörlere Genel Bakış

Otoprodüktörler genelde uzak yerleşimlerde veya uzak teknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu tarz uygulamalarda 50 kW'a kadar olan türbinler kullanılmaktadır. Otoprodüktörler köylerde ve kırsal elektrifikasyon sistemlerinde 300 kW'a kadar olan türbinler dizel jeneratörler veya batarya sistemleri ile birlikte kullanılabilir. Otoprodüktörler aynı zamanda, içme ve sulama suyu pompalama veya petrol pompalama üniteleri için mekanik güç üretmek amacıyla da kullanılırlar.

Cizelge 1.6. Türkiye'de yapılan rüzgar santrali projeleri [DPT, 2000].

İşletmede olan RS		
Proje adı	Kurulu gücü (MW)	Yeri
Çeşme Alaçatı RS	7,2	İzmir Çeşme Alaçatı
Çeşme Alaçatı RS	1,7	İzmir Çeşme Alaçatı
Sözleşme taslağı üzerinde mütabakat sağlanıp DPT görüşü beklenen projeler		
Proje adı	Kurulu gücü (MW)	Yeri
Kocadağ RS	50,4	İzmir Çeşme Kocadağ
Çanakkale RS	30	Çanakkale
Bozcaada RS	10,2	Çanakkale
Sözleşme görüşmesi aşamasında olan rüzgar projeleri		
Proje adı	Kurulu gücü (MW)	Yeri
Mazıdağı RS	39	İzmir Çeşme Alaçatı
Fizibilite raporları değerlendirilen rüzgar projeleri		
Proje adı	Kurulu gücü	Yeri
Datça RS	28,8	Muğla Datça
Datça RS	12,5	Muğla Datça
Yalıkavak RS	7,92	Muğla Datça
İntepe RS	30	Çanakkale İntepe
İntepe RS	13,2	Çanakkale İntepe
Akhisar RS	12	Manisa Akhisar
Akhisar RS	30	Manisa Akhisar
Bandırma RS	15	Balıkesir Bandırma
Beyoba RS	7,92	Manisa Akhisar

Çeşme RS	12	İzmir Çeşme
Karaburun RS	22,5	İzmir Karaburun
Revize fizibilite raporu beklenen rüzgar projeleri		
Proje adı	Kurulu gücü (MW)	Yeri
Gökçeada RS	7	Çanakkale Gökçeada
Fizibilite raporu beklenen rüzgar projeleri		
Proje adı	Kurulu gücü (MW)	Yeri
Kocadağ RS	43,5	İzmir Çeşme Kocadağ
Yaylaköy RS	15	İzmir Karaburun
Lapseki RS	15	Çanakkale Lapseki
Şenköy RS	12	Hatay Şenköy
Hacıömerli RS	45	İzmir Hacıömerli
Belen RS	20-30	Hatay Belen
Kapıdağ RS	20-35	Balıkesir Erdek
Kumkale RS	12,6	Çanakkale Kumkale
Karabiga RS	15-50	Çanakkale Karabiga
Mazıdağ-2 RS	90	İzmir Çeşme
Mazıdağ-3 RS	39,6	İzmir Çeşme
Yellice Belen RS	70-100	Karaburun Yellice

Dünya genelinde küçük ölçekli veya otoprodüktör olarak kullanılan türbinlere ait bir istatistik yoktur. Bölgesel veriler ise kısıtlıdır. Örneğin Çin’de 110.000’den fazla küçük ölçekli (20-200 W) türbin kurulduğu tahmin edilmektedir. Bu türbinler göçebe çobanlara veya çiftçilere güç sağlamak amacıyla kullanılmaktadır [Durak, 2000].

Otoriteler otoprodüktörlerin sayılarının yakın gelecekte artacağını tahmin etmektedir. Bu gelişmedeki önemli etkeni kırsal elektrifikasyon programlarının artmasının teşkil edeceği düşünülmektedir. Brezilya’da, Endonezya’da, Meksika’da, Filipinler’de ve Güney Afrika’da yerel kuruluşlar böylesi programı desteklemektedir. Endonezya’da, Çin’de Rusya’da, Meksika’da, Moritanya’da, Arjantin’de benzeri programlar uluslararası yardım kuruluşlarınca desteklenmektedir. Dünya Bankası böylesi bir projeye Brezilya’da finanssal destek vermiştir[Ackermann, 2000].

2. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ

Genellikle rüzgar enerjisinin elde edilen teorik potansiyeli tartışılmaktadır. Rüzgar enerjisi potansiyeli Dünya genelinde bol miktarda rüzgar kaynağının olduğunu göstermiştir. Örnek olarak Matthies ve Garrad'ın çalışmaları Avrupa sularındaki kullanılabilir offshore potansiyelinin yalnız başına yaklaşık 2500 TWh/yıl olduğunu göstermiştir [Ackermann, 2000].

Rüzgar enerjisi kaynağı çalışmalarında hazırdaki rüzgar enerjisi verilerinin kalitesi, teknoloji hakkındaki tahminler ve mevcut boşluk üzerinde durulmaktadır. Böylesi çalışmalar sadece rüzgar enerjisi potansiyeline bir yaklaşım sağlayabilir. Farklı bölgelerde rüzgar enerjisi potansiyelinin değişken olduğunu tespit etmek oldukça önemlidir.

2.1. Temel Bilgiler

Rüzgar enerjisinin kaynağı ve daha da önemlisi fiziksel kısıtlamaları, burada ikinci elde tartışılacak unsurlardır. Burada farklı rüzgar türbini tasarım prensipleri verilmiştir.

2.1.1. Rüzgar

Rüzgar enerjisinin kaynağı Güneş'tir. Rüzgar, yeryüzünün eşit olmayan ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan hava hareketidir. Kütlelerin farklı termal şartlarından dolayı hava kütleleri hareket etmektedir. Hava kütlelerinin bu hareketi küresel tabiat olayları, jet akımları...vs olabileceği gibi bölgesel tabiat olayları da olabilir. Bölgesel olaylar, orografik şartlar, alanın yüzeysel yapısı ve küresel olaylara bağlı olarak hesaplanır. Rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini yer yüzeyi yakınlarında kullanır. Sınır tabaka olarak bilinen bu bölgedeki rüzgar şartları, hem bölgesel koşulların, hem de jeosferik rüzgarın alt tabakalarındaki sıkıştırılmaz yüksek enerji akımının etkisi altındadır. Yer yüzeyinin engebeli olması nedeniyle, yüzeye yakın rüzgar türbülanslıdır.

Rüzgar hızı yüksekliğe ve yerel şartlara göre değişir. Rüzgar türbinlerinde rotor seviyesindeki rüzgar hızı ve rüzgar yönü farklı yüklemelere sebep olur.

Bir çok rüzgar enerjisi kaynağı, rüzgar hızını ve rüzgar yönünü, burada detaylarına girmeyeceğimiz atmosferik sınır tabakayla açıklamaktadırlar. Bir çok kaynak evler üzerindeki rüzgar davranışını uniform kabul etmektedir.

Diğer bir önemli konu ise rüzgar kaynaklarının uzun dönemdeki değişimidir. Farklı çalışmalar bu konuyu aydınlatmaktadır. Bu çalışmalar ışığında Petersen, 20 yıllık periyotta güç çıktısındaki standart değişimin % 10 veya daha az olacağını söylemektedir. Bir rüzgar kaynağının ömrünün bir rüzgar türbini kadar olmayışı, rüzgar türbini hesaplamalarında önemli bir faktördür. Dünyanın bir çok bölgesinde suyun belirsizliği rüzgar gücünden daha fazladır.

2.1.2. Olayın Fiziksel Yönü

V hızıyla A alanına doğru hareket eden rüzgarın gücü $\frac{1}{2} \rho A V^3$ 'tir.

Buradan;

$$\text{Rüzgar gücü} = \frac{1}{2} \rho V^3 A \text{ (W)} \quad (2.1)$$

ρ : hava yoğunluğu (kg/m^3)

V: rüzgar hızı (m/s)

Rüzgar gücü hava yoğunluğu ρ , süpürme alanı A ve hız V'ye bağlıdır. Hava yoğunluğu basıncın ve sıcaklığın, bunlar da deniz seviyesinden yüksekliğin fonksiyonudur.

$$\rho(z) = P_0 / (R \cdot T) \exp(-g \cdot z / (R \cdot T)) \quad (2.2)$$

$\rho(z)$: yüksekliğin (rakımın) fonksiyonu olan hava yoğunluğu (kg/m^3).

P_0 : standart deniz seviyesi atmosferik basıncı (kg/m^2).

R: hava için gaz sabiti (J/kg K).

T: sıcaklık (K).

g: yerçekimi ivmesi (m/s).

z: deniz seviyesinden yükseklik (m)

Güç rüzgardan birim zamanda elde edilen toplam enerjidir. Hava kütlelerinin sonucu olan rüzgardaki güç, türbin rotoru vasıtasıyla mekanik-rotasyonel enerjiye dönüştürülür. Hava kütlelerinin tamamı rotor alanında durdurulamadığı gibi, rüzgar gücünün tamamında türbin tarafından dönüştürülemez. Aksi durum hava kütlelerinin geçiş

alanında tıkanıklığa sebep olurdu. Hızımı azaltarak rüzgardan optimum güç çekme teorik olarak ilk defa Betz tarafından 1926'da keşfedilmiştir. Betz'e göre teorik olarak rüzgardan maksimum güç çekme:

$$P_{\text{Betz}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot c_{p\text{Betz}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0,59 \quad (2.3)$$

Eğer herhangi bir kayıp olmadan rüzgardan güç çekilebilse, rüzgar gücünün sadece % 59'u çekilebilir. Daha detaylı bilgi için rüzgar enerjisi kitaplarına bakıla bilinir. Bir çok kitapta Betz'in kaçınılmaz girdap kayıplarını hesaba katmadığından bahsedilmez. Yüksek uç hız oranı $\lambda > 3$ ve optimum kanat geometrisine sahip türbinlerde bu kayıplar çok düşüktür. Rotorun uç hız oranı (tip speed ratio) şu şekilde ifade edilir:

$$\lambda = \frac{V_{\text{uç(üç)}}}{V_{\text{rüzgar}}} = \frac{\omega \cdot R}{V_0} \quad (2.4)$$

Düşük uç hız oranlı türbinlerde, örneğin Amerikan çiftlik değirmenlerinde ($\lambda \approx 1$), girdap kayıpları maksimum güç katsayısı c_p 'yi yaklaşık 0,42'ye düşürür [Ackermann, 2000].

2.1.3. Rüzgar Türbini Çeşitleri

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri aerodinamik itmeye dayanan ve aerodinamik kaldırmaya dayanan tipler olarak ayrılabilir. Eski Pers (veya Çin) düşey eksenli yel değirmenleri itme prensibine göre çalışmaktaydı. İtme mekanizmalarını güç katsayıları çok düşük, yaklaşık $c_{p\text{max}} = 0,16$ civarındadır [Ackermann, 2000].

Modern rüzgar türbinlerinden çoğu aerodinamik kaldırma prensibiyle çalışmaktadır. Airofoil gövdesine etkiyen akışın sonucu oluşan kuvvet, sadece akış yönündeki itmeye değil, aynı zamanda buna dik olan kaldırma kuvvetinin etkisiyle de meydana gelir. Kaldırma kuvveti itme kuvvetinin çeşididir ve rotora etkiyen gücün kaynağıdır. Tanıma göre rotor kanatlarına etkiyen akışın yönüne diktir ve gerekli döndürme momentini rotoru döndürme yolu ile sağlar.

Aerodinamik kaldırma prensibiyle çalışan rüzgar türbinleri dönme ekseninin oryantasyonuna göre yatay eksenli veya dikey eksenli rüzgar türbinleri olmak üzere

ayrılır. Dikey eksenli türbinler 1920'lerde, dikey eksenli ve simetrik bükülmüş airofoilleri ilk kullanan Fransız mühendis Darrieus'un adıyla anılır. Darrieus türbinlerinin her rüzgar yönünde çalışabilme ve dişli kutusunun ve üretim sistemlerinin yer yüzeyinde olması gibi avantajları vardır. Her dönüşteki rüzgar moment dalgalanmaları, kendi çalışma özelliğinin olmayışı ve yüksek rüzgar hızlarında hız ayarlaması şansının düşük olması ise ana dezavantajlarıdır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin üretimi ve geliştirilmesi 1970'lerden 1980'lere kadar yapılmıştır. 4200 kW'lık en büyük rüzgar türbini ECOLE Kanada'da kuruldu. Fakat 1980'lerden sonra hemen hemen tüm dünyada düşey eksenli rüzgar türbinlerinin üretimi ve geliştirilmesi durdu [Ackermann, 2000].

Yatay eksenli veya pala tipi en çok kullanılan ve kabul gören rüzgar türbini çeşididir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri bir kule ve bu kule üzerine yerleştirilen muhafazadan meydana gelmektedir. Muhafaza içerisinde jeneratörü, dişli kutusunu ve rotoru bulundurur. Muhafazayı rüzgar yönüne sabitlemek veya yüksek rüzgar hızlarında rüzgardan ayırmak için farklı mekanizmalar kullanılır. Küçük türbinlerde rotor ve muhafaza rüzgarda bir kuyruk kanadı yardımıyla yönlendirilirler. Büyük türbinlerde ise rotorun ve muhafazanın rüzgar içerisindeki hareketi bir rüzgar gülünün verileriyle, elektrik yönerge ile olur.

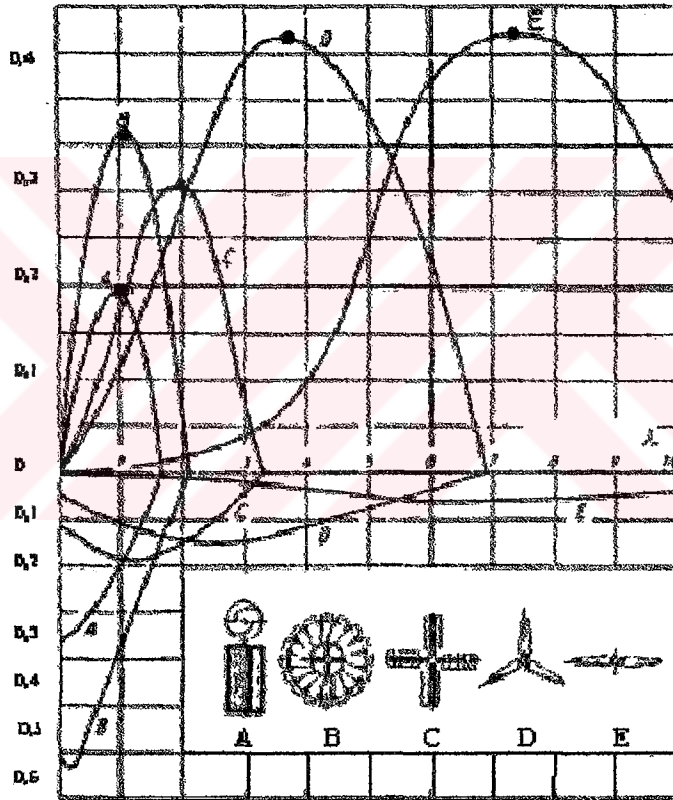
Rüzgar türbinlerinde amaca bağlı olarak farklı sayıda kanat kullanılır. İki veya üç kanatlı türbinler genellikle elektrik üretiminde kullanılır. 20 veya daha fazla kanatlı rüzgar türbinleri mekanik su pompalama maksadıyla kullanılır. Rotor kanat sayısı, uç hız oranıyla indirekt olarak ilişkilidir (Şekil 1.1). Çok kanat sayılı rüzgar türbinleri düşük uç hız oranına fakat yüksek başlama momentine sahiptir. Yüksek başlama momenti, rüzgar hızı arttığında tam otomatik olarak su pompalamaya başlamayı sağlamaktadır. Buna en güzel örnek Amerikan çiftlik yel değirmenleridir.

İki veya üç kanatlı rüzgar türbinleri yüksek uç hız oranına fakat düşük başlama momentine sahiptir. Rüzgarın çalışma mertebesine çıkması bu türbinler için yeterlidir. Yüksek uç hız oranları, güç üreticinin şaftında yüksek hız elde edebilmek için, küçük ve hafif dişli kutusu kullanımına olanak sağlamaktadır.

Bundan sonraki bölümde rüzgar türbini tasarım yaklaşımları incelenecektir. Bir çok araştırmacı farklı güç argümanlarını kullanarak yeni tasarımlar gerçekleştirmektedir. Fakat şimdiye kadar geniş ölçekli bir performansa yaklaşmış bir araştırmacı yoktur.

2.2. Rüzgar Türbini Teknolojisi

Bu bölümde orta ve büyük ölçekli (≥ 100 kW), şebeke bağlantılı, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin teknolojisi incelenecektir. Bu tip rüzgar türbinlerinin yakın gelecekte gelişeceği düşünülüp, günümüzde de pazar payı oldukça yüksektir.



Şekil 2.1. Çeşitli pervanelerin uçları, güç katsayısı (C_p) ve moment katsayısı (C_m)'nın değişimi. A, B, C = tipik düşük uç hız oranlı pervaneler; D, E = tipik yüksek uç hız oranlı pervaneler [Ackermann, 2000].

Çizelge 2.1. Temel tasarım yaklaşımları [Ackermann, 2000].

A. Yüksek rüzgar yükleri için türbin tasarımı

- Emniyet için optimizasyon
- Yüksek sağlamlık fakat non-optimum kanat açısı
- Üç veya daha fazla kanat
- Düşük rotor uç hız oranı

Öncüsü: Gedser yel değirmeni

B. Yumuşak veya dağınık yükler için türbin tasarımı

- Performans için optimizasyon
- Düşük sağlamlık optimum kanat açısı
- Bir veya iki kanat
- Yüksek rotor uç hız oranı

Örnek: Hütter türbini

C. Elektrik veya mekanik güç elde etmek için türbin tasarımı

- Kontrol için optimizasyon
- Mekanik veya elektriksel yenilikler (hareketli veya rezeli kanatlar, değişken hızlı jeneratörler,...vs)
- İki veya üç kanat
- Orta (normal) uç hız oranı

2.2.1. Tasarım Yaklaşımları

Yatay eksenli rüzgar türbinleri farklı şekillerde tasarım edilebilirler. Bunlar üç farklı tasarım ekolü etrafında toplanabilir (Çizelge 2.1). Şebeke bağlantılı modern rüzgar türbinleri 'c' yaklaşımında olup aşağıdaki sonuçları verir:

- Daha kaliteli güç
- B'ye nazaran düşük uç hız oranı ve düşük görsel arıza
- 'A'ya nazaran daha az materyal kullanımı ve yüksek rüzgar yükleri için düşünülmendiğinden daha düşük fiyat

Bir çok firma bu yaklaşımların kombinasyonundan oluşan ürünlerde elde etmiştir. Fakat piyasada Pazar payı en yüksek olan 'c' yaklaşımıdır.

Bütün tasarım yaklaşımları farklı detaylarda özgürce hareket edebilirler. Örneğin rüzgar koşullarına bağlı olarak çalışırken, farklı çaplarda aerodinamik rotorlar kullanılabilir. Yüksek rüzgar hızı sitelerinde genellikle, 14-16 m/s hız aralığında maksimum verime ulaşacak aerodinamik profile sahip, geniş rotorlar kullanılır. Her iki durumda da amaç yıllık enerji çıktısını maksimize etmektir. Rüzgar türbin üreticileri, türbin ömrü boyunca çalışma maliyetini de içeren, toplam maliyetini belirtmek zorundadırlar.

En önemli tasarım elemanları olan kanat sayıları, güç kontrol sistemleri ve üretim/iletim sistemleri,...vs. bundan sonra ele alınacaktır.

2.2.2. İki Veya Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Yatay eksenli, şebeke bağlantılı ve üç kanatlı rüzgar türbinleri piyasada tercih edilmektedir. İki kanatlı rüzgar türbinlerinde kule üstü ağırlığı ve karşılık ağırlığı daha düşük imal edildiğinden fiyatı da o oranda düşmektedir.

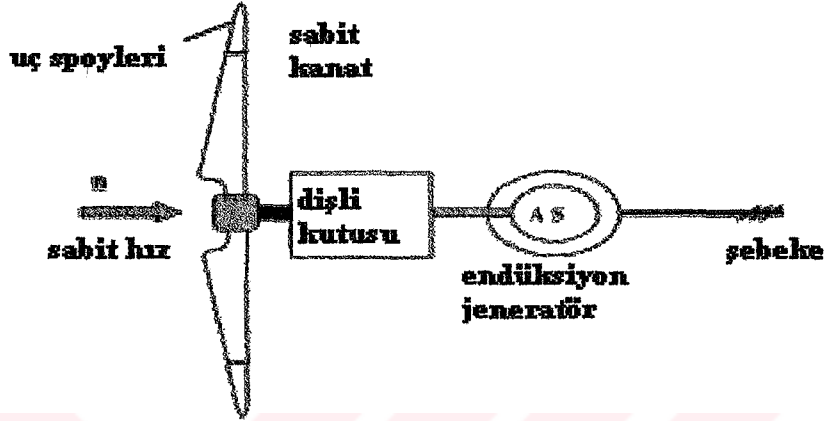
Üç kanatlı rüzgar türbinlerinin avantajı ise rotor atalet momentinin anlaşılması daha kolaydır ve atalet momenti iki kanatlı türbinden daha iyi idare edilir. Üç kanatlı rüzgar türbinleri görsel etkileri ve düşük gürültü seviyeleriyle de iki kanatlı rüzgar türbinlerine göre daha iyi olarak nitelendirilir. Bunların tamamı rüzgar türbin kurulumunun popüler olduğu yerlerde, özellikle Avrupa sahillerinde önemli etkilerdir.

2.2.3. Güç Kontrolü

Rüzgar türbinleri en yüksek verime tasarım rüzgar hızlarında, genellikle 12-16 m/s hızlarında ulaşırlar. Bu rüzgar hızlarında güç çıktısı nominal kapasiteye ulaşır. Bu rüzgar hızının üstünde, rotor güç çıktısı nominal kapasite ile limitlendirilmeli ve rüzgar türbini yapısındaki yükler, rotor kanatları üzerindeki kuvvetler azaltılmalıdır.

Güç kontrolü için tercihler:

Durdurma düzenlemesi: Bu prensip rüzgar hızına bağlı olarak sabit bir dönme hızı gerektirir. Sabit dönme hızı şebeke bağlantılı bir indüksiyon jeneratörde sona erer. Airofoil profili sayesinde, rotor kanadı üzerindeki hava akımı şartları, rotor kanadının rüzgarla yüzleşme yüzeyinde hava akımının türbülans yarattığı yönde değişir. Bu etki durdurma etkisi olarak bilinir (Şekil 2.2).

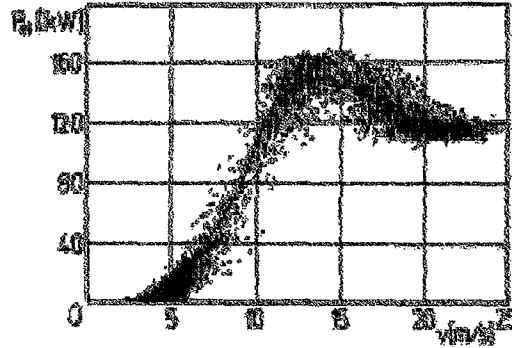


Şekil 2.2. Endüksiyon jeneratörlü Danimarka tipi rüzgar türbini (sabit dönme hızı) [Ackermann, 2000].

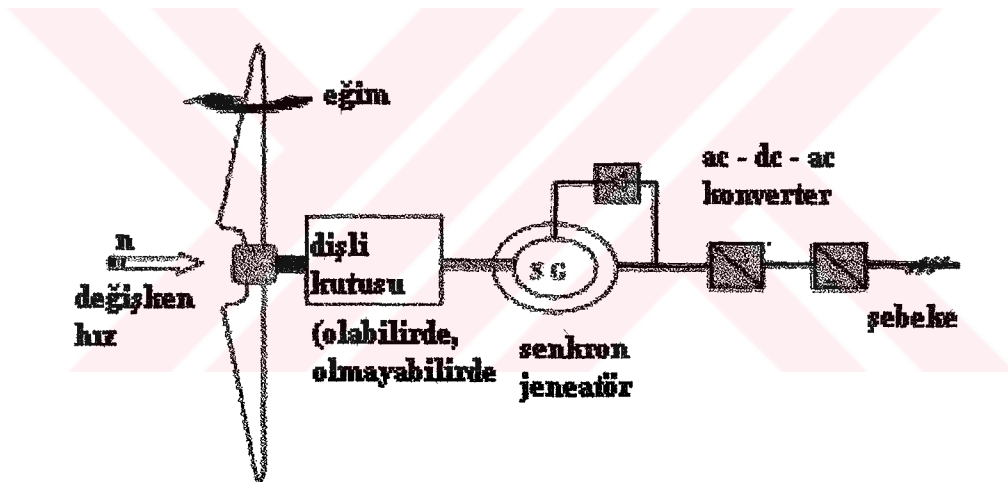
Etkiler, aerodinamik kuvvetlerde ve daha sonra rotor güç çıktısında azalma ile sonuçlanır. Durma etkileri dinamik bir proses olarak gerçekleşir. Kararsız rüzgar şartlarında durma etkilerini tam olarak hesaplamak güçtür. Büyük rüzgar türbinlerinde durma etkisini kullanmak uzun vadede güçtür. Deneyler orta ve küçük çaplı rüzgar türbinlerinde durdurma düzenlemesinin kullanılmasının güvenilir bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bazı üreticiler megawatt mertebesindeki türbinlerde bu düzenlemeyi kullanmaktadır. Ama ilk prototipler bu düzenlemenin hala güvenilir olmadığını göstermiştir. Şekil 2.3 durma kontrolü kullanan tipik bir rüzgar türbininin güç çıktı grafiğini göstermektedir [Ackermann, 2000].

Eğim (adım) düzenlemesi: Nominal güce ulaştırılncaya kadar rotor kanatları kendi eksenleri etrafında döndürülerek, relatif rüzgar şartları ve aerodinamik kuvvetler, dolayısıyla rotor güç çıktısı ayarlanır. Orta ve büyük ölçekli, şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinde eğim düzenlemesi bilgisayar ile kontrol edilen hidrolik bir sistem tarafından gerçekleştirilir. Bazı üreticiler kanatları düzenlemede, elektronik olarak

kontrol edilen elektrik motorlarını da kullanmaktadır. Bu kontrol sistemi sabit bir güç çıktısı elde edilinceye kadar, rüzgar hızındaki değişimle, kanat açılarını uyarlar (Şekil 2.4) [Ackermann, 2000].



Şekil 2.3. Durma kontrolü kullanan türbinin tipik güç çıktısı grafiği (BONUS 150 kW, D = 23 m) [Ackermann, 2000].

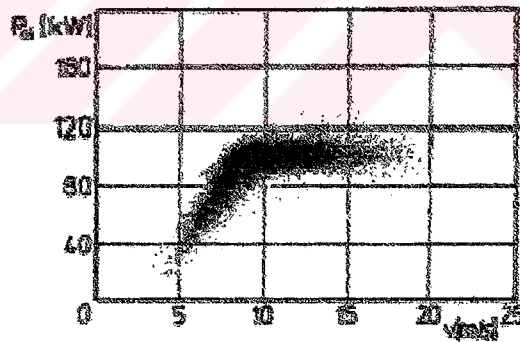


Şekil 2.4. ac-dc-ac güç dönüştürücülü, senkron jeneratörlü, eğim kontrollü, değişken hızlı rüzgar türbini [Ackermann, 2000].

Eğim kontrollü türbinlerde, rotordaki itme ve kule üzerindeki kurulum (ağırlık) durma kontrollü türbinlere nazaran daha fazladır. Prensip bu durum, temel yapıda ağırlık ve materyalden tasarruf sağlar. Eğim kontrollü türbinler, düşük rüzgar hızlarında rotor kanatları optimum açıda tutulmak yoluyla, düşük rüzgar sitelerinde durma kontrollü türbinlere göre daha yüksek verim sağlar.

Durma kontrolü ile türbinler yüksek rüzgar hızlarında aniden durdurulur. Eğim kontrolü ile, maksimum eğim açısına ulaşan rotorun eğim açısı, boşa veya yüksüz çalışıyormuş gibi yavaş yavaş değiştirilir. Yüksek rüzgar hızlarında rüzgardaki değişim güçte de anı değişime yol açar. Durma kontrollü rüzgar türbinlerinin bir avantajı da bu güç değişiminin eğim kontrollü rüzgar türbinlerine göre daha yavaş olmasıdır. Sabit hızlı, endüksiyon jeneratörlü, şebeke bağlantılı, eğim kontrollü türbinler, fırtınalı havalarda daha çabuk reaksiyon verirler. Şekil 2.5'te eğim kontrolü kullanan rüzgar türbini tipinin çıktı karakteristikleri görülmektedir.

Aktif durdurma düzenlemesi: Bu düzenleme eğim ve durdurma düzenlemesinin bileşiminden oluşur. Düşük rüzgar hızlarında, mümkün olan en yüksek momenti garantilemek için döndürme kuvvetleri sağlamak ve en yüksek verimi elde etmek amacıyla kanatlar eğim kontrollü rüzgar türbinlerinde olduğu gibi düzenlenir. Rüzgar türbini nominal kapasiteye ulaştığında, aktif durumda düzenlemesi yapılan türbin kanatlarını, eğim kontrolü yapan makinelerin yaptığı gibi aksi yönde hareket ettirir. Bu moment rotor kanatlarının hücum açısını artırarak, kanatların durdurma pozisyonu almasını sağlar.



Şekil 2.5. Eğim kontrolü kullanan tipik bir rüzgar türbininin çıktı karakteristikleri (DEBRA 100 kW, D = 25 m) [Ackermann, 2000].

Diğer bir kontrol metodu ise, rotoru kısmen rüzgar dışına yönlendirerek gücün düşmesini sağlayan kanatçıklardır. Bu kanatçıklar uçak kanatlarındaki kanatçıklara benzerler. Yönlendirme, tüm yapıdaki gerilmeler nedeniyle, sadece küçük (≤ 5 kW) rüzgar türbinlerinde kullanılır. Eğer rüzgar hızı devreden çıkış (cut out) rüzgar hızına ulaşırsa

(20 ve 30 m/s arasında) tüm türbin yapısını korumak amacıyla türbin kendisini kilitler ve rotor dönmez. Bu prosedür yüzünden elde edilmesi mümkün enerji kaybedilir.

Mukavemetin sınırlandırılması, kırılma veya arızaları engellemek amacıyla, acil ve yüksek bir hız kontrolü gerektirir. Tipik yüksek hız kontrolü, rotor kanat uçlarındaki spoylerler veya eğim yapabilme kabiliyetiyle gerçekleştirilir.

Yüksek rüzgar hızlı sitelerde, türbinin devreden çıkış (cut-out) rüzgar hızının, ve durduktan sonraki tekrar devreye giriş rüzgar hızının, elde edilecek enerji üzerine belirleyici etkisi vardır. Tipik rüzgar türbinleri, devreden çıkış rüzgar hızının üzerindeki rüzgar hızlarında (yaklaşık 25 m/s) kendisini kapatır. Rüzgar türbini endüstrisinde türbinin şebekeye giriş noktası farklı farklıdır. Türbinler genellikle rüzgar hızları 20 m/s'nin altına indiğinde tekrar üretime geçerler. Genelde rüzgar türbinlerinin ayar noktaları 14 m/s ile 24 m/s arasında, türbinin tipine göre, değişir. Düşük ayar noktalarının (set points) rüzgar türbini güç üretimi üzerine olumsuz etkileri vardır. Yukarıdaki konu farklı yayınlarda histerezis etki (hysteresis effect) veya histerezis çevrimi (hysteresis loop) olarak açıklanır.

Büyük ölçekli modern rüzgar türbini kanatları, kuvvetlendirilmiş fiberglas plastiklerden (glass fibere reinforced plastics –GRP-), veya kuvvetlendirilmiş fiberglas polyester veya epoksiden yapılıp, paratoner sistemleri eklenmiştir [Ackerman, 2000].

2.2.4. Aktarma Organları ve Jeneratör

Rotor kanatları tarafından üretilen güç, aktarma organları ile jeneratöre iletilir. Aktarma organları, rotor şaftını, yatakları, dişli kutusunu, jeneratörü ve kavramaları ihtiva eder. Pratikte bu yapılar çok değişik şekillerde birleştirilebilir. Farklı yapılar şekil 2.6 ve 2.7'de görülebilir.

Birçok rüzgar türbini üreticisi altı kutup endüksiyon (asenkron) jeneratör kullanmaktadır. Diğer üreticiler ise direkt çalışan senkron jeneratörler kullanmaktadır. Güç endüstrisinde, endüksiyon jeneratörler güç üretiminde pek tercih edilmez. Fakat endüksiyon (asenkron) motorlar dünya genelinde kullanılmaktadır. Güç üretimi

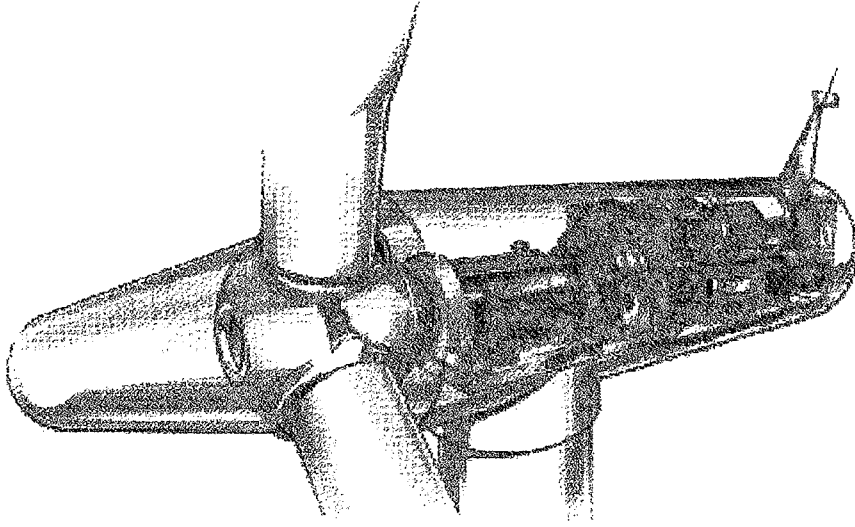


endüstrisinde, değişken reaktif güç üretimi ve voltaj kontrolü,...vs. nedeniyle genelde senkron jeneratörler kullanılır.

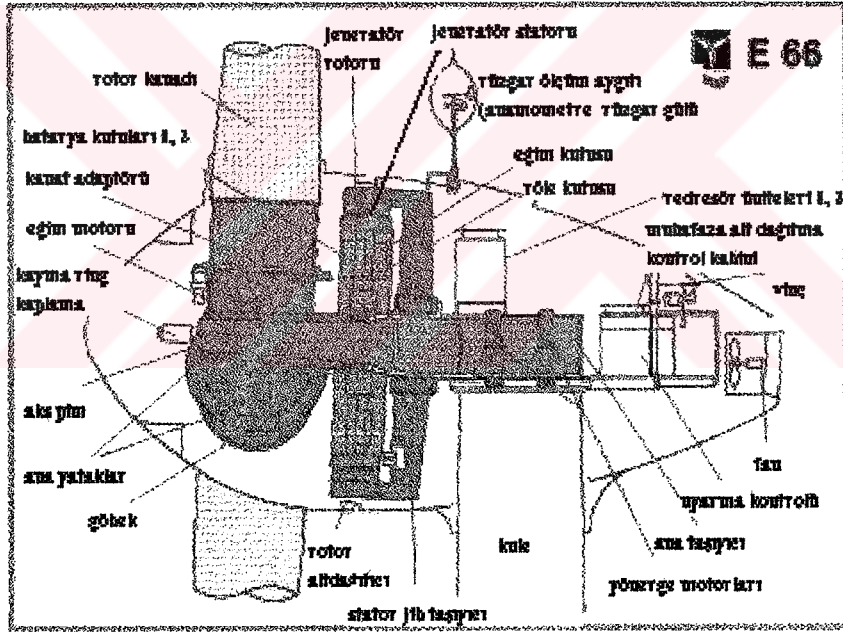
500 kW'tan 2 MW'a kadar olan senkron jeneratörler, aynı yükteki endüksiyon jeneratörlere göre çok daha pahalıdır. Bununla birlikte direkt şebeke bağlantılı senkron jeneratörlerin, kutup çifti sayısı ve dönme hızının şebeke frekansı ile sabitlenmesi gibi dezavantajları vardır. Fırtınalı havalar rotor güç çıkışında dalgalanmalara sebep olur. Fırtınaların mekanizma üzerine etkisini azaltmak için esnek kuleler kullanılır. Bu nedenle direkt şebeke bağlantılı senkron jeneratörler, genellikle şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinde kullanılmaz. Senkron jeneratörler bazen izole şebekelerde, reaktif güç kontrolü için uygun olabilirler.

Rüzgar türbinlerinde senkron jeneratörlerden yararlanmak için yapılan tercihlerden birisi de jeneratör ile ara devre arasındaki elektrik bağlantısının dekuplajıdır. Bu ara devre, kendisine verilen voltaj ve frekansla şebekeyi besleyen üç fazlı invertere (three-phase inverter) bağlıdır. Günümüzde genellikle darbe genişlik modülasyonu (pulse-width modulation) (PWM) tercih edilmektedir. Şebekeyle rotor-jeneratör dekuplajı, rotor-jeneratör sisteminin değişken hızda çalışmasına olanak sağlar. Rotor güç çıkışlarındaki dalgalanma jeneratörün hızlanmasına veya yavaşlamasına sebep olur. Bu tahrik mekanizmasında (drive train) düşük momente yol açtığı gibi güç çıkışı dalgalanmalarının azalmasına da sebep olur. Ayrıca maksimum güç katsayısının sadece tek bir uç hız oranında meydana geleceğini hatırlamak önemlidir. Sabit hızlı çalışma ile maksimum güç katsayısı sadece bir rüzgar hızında yakalanır. Değişken hızlı çalışmalarda rotor hızı rüzgar hızına bağlı olarak artar yada azalır ve maksimum güç katsayısını sağlayacak uç hız oranını sürdürür.

Dişli kutusu, rotor tarafında örneğin dönme hızının yaklaşık 20 dev/dak'dan 50 dev/dak'ya çıkmasını, jeneratör tarafında ise 1200 rpm (50 Hz) olmasını sağlar.



Şekil 2.6. Bonus muhafaza 1 MW (Bonus Enerji / Danimarka) [Ackermann, 2000].



Şekil 2.7. Enercon muhafaza 1,5 MW (Enercon, Almanya) [Ackermann, 2000].

Jenaratör tarafındaki dönme hızı, mevcut şebeke frekansı olan 50 Hz veya 60 Hz'de güç üretmek için gereklidir. Jenaratör için gerekli rpm kutup çifti sayısına bağlıdır.

Reaktif güç ihtiyaçları endüksiyon jeneratörlerin dezavantajlarıdır. Şebeke kullanıcıları genellikle şebekede dolaşan reaktif gücü istemez. Endüksiyon jeneratörlü türbinlerde genellikle kapasitörler kullanılır. Bu kapasitörler endüksiyon jeneratörlerin ihtiyacı olan reaktif gücü karşılarlar. Endüksiyon jeneratörlerin diğer bir aksiliği ise göbeğin mıknatıslanmasından kaynaklanan, üretim başlangıcındaki yüksek akımdır. Başlangıçta statora uygulanan voltajı kontrol etmekle ve akımı sınırlamakla problem çözülebilir.

Birçok kitapta senkron ve endüksiyon jeneratörler ile ilgili bilgi bulunabilir. Heier halen rüzgar türbin endüstrisinde kullanılmakta olan ve gelecekte olabilecek tasarım yaklaşımlarıyla ilgili karşılaştırmalı olarak güzel bir inceleme sunmuştur. Bu jeneratörler deneme projelerinde test edilmiş fakat halen orta ve geniş ölçekli rüzgar türbinlerinde kullanılmamıştır. Kullanılan türbinler küçük ölçekli (≤ 10 kW) rüzgar türbinleridir.

2.2.5. Teknoloji Standartları

Rüzgar türbinlerinde uygun bir tasarım kalitesi sağlamak, performans denemelerini gerçekleştirmek, potansiyel rüzgar türbini sitesinde akustik ve meteorolojik ölçümler için rüzgar enerjisi standartları çok önemli hale gelmiştir.

Almanya , Danimarka, Amerika ve Hindistan gibi birçok ülke kendi rüzgar enerjisi standartlarını koymuştur. Fakat dünya genelinde bir uluslar arası rüzgar enerjisi standardı oluşturma eğilimi vardır. Uluslar arası aktivitelerle ilgili daha fazla bilgi, Avrupa Rüzgar Türbini Standartları (EWTS) Projesi, Amerika Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) tarafından tanınan Amerikan Rüzgar Enerjisi Kurumundan elde edebilir. Cenova'daki Elektroteknik Komisyonu (IEC), rüzgar enerjisi teknolojisi hakkında uluslar arası standartları tanımlamış ve yayımlamıştır [Habali and Saleh, 1999].

2.2.6. Rüzgar Türbinine Genel Bakış

Halen kullanılmakta ve geliştirilmekte olan geniş ölçekli rüzgar türbinlerini Çizelge 2.2 ve 2.3'de görebiliriz.

Çizelge 2.2. Başlıca türbinlerin boyut ve ağırlığı. ÇBAJ = çift beslemeli asenkron jeneratör. DT = direk tahrik, değişken hız, senkron jeneratör. DAS = değişken kaymalı asenkron jeneratör, AS = asenkron [Anckerman, 2000].

Tip	Kontrol sistemi (E) eğim, (D) durma, (AD) aktif durma	Rotor çapı (m)	Kanat sayısı	Kapasitesi (kW)	Muhafaza ve rotor ağırlığı (kg)	Süpürülen alana düşen ağırlık (kg/m ²)	Jeneratör
Bonus 300 kW	D	31	3	300	14.500	19,2	AS
Bonus 1 MW	AD	54	3	1000	63.000	27,5	AS
Bonus 2 MW	AD	76	3	2000	125.000	27,7	AS
Carter	AD	24	2(T)	300	4431	10	AS
DeWind D4	E	45,8	3	600	34.000	20,6	ÇBAJ
DeWind D6	E	62	3	1000	65.000	21,5	ÇBAJ
Enercon E-40	E	40	3	500	29.500	23,1	DT
Enercon E-66	E	66	3	1500	99.590	29,1	DT
Lagerwe y 18/80	E	18	2	80	3000	11,8	AS
Lagerwe y 27/250	E	27	2	250	10.000	17,5	AS
Lagerwe y 50/750	E	50,5	3	750	-	-	DT
Neg Micon	D	43	3	600	35.000	24.1	AS

600/43							
Neg Micon 750/48	D	48	3	750	34.000	18,6	AS
Neg Micon 1000/60	D	60	3	1000	57.000	20,1	AS
Neg Micon 1500/64	D	64	3	1500	74000	23,0	AS
Nordic 1000	D	54	2	1000	45.000	19,6	DAS
Nordex N-29	D	29,7	3	250	16800	24,2	AS
Nordex N-43	D	43	3	600	35.500	24,5	AS
Nordex N-54	D	54	3	1000	69.800	30,5	AS
Nordex N-63	D	63	3	1300	69.400	24,5	AS
Nordex N-80	E	80	3	2500	119.300	23,7	ÇBAJ
Riva Calzaoni M30-52	E	33	1	-	13.500	15,8	AS
Südwind S33	D	33,4	3	350	-	-	AS
Südwind S46/750	E	46	3	750	-	-	ÇBAJ
Trace TW 600	D	43	3	600	33.000	22,7	AS
Trace TW 1,5	E	65	3	1500	74.000	22,3	ÇBAJ

Trace TW 2,0	E	70,5	3	2000	80.000	20,5	ÇBAJ
Vestas V29	E	29	3	225	13.000	19,7	DAS
Vestas V44	E	44	3	600	25700	16,9	DAS
Vestas V63	E	63,6	3	1500	74.000	23,7	DAS
Vestas V66	E	66	3	1650	78.000	22,8	DAS
Vestas V80	E	80	3	2000	95.000	18,9	DAS
Zond	E	50	3	750	-	-	ÇBAJ

2.2.7. Şebeke Entegrasyonu

Dünyanın birçok yerinin aksine Kuzey Almanya, İsveç ve Danimarka'da rüzgar enerjisi toplam enerjinin büyük bir bölümünü teşkil etmektedir. 1998'de Almanya'nın eyaleti Schleswig-Holstein enerji ihtiyacı olan 12.406 GWh/yıl'ın 1.750 GWh/yıl'ını (% 14,1), İsveç'in 900 GWh/yıl olan enerji ihtiyacının 112 GWh/yıl'ını (%12,5), Danimarka'nın 32.500 GWh/yıl olan enerji ihtiyacının 1830 GWh/yıl'ını (% 5,6) rüzgar enerjisinden sağlamaktadır. Rüzgar gücündeki artışla birlikte, rüzgar gücü üretimi sağlanması olduğu gibi şebeke üzerindeki etkisi de ilgi alanı olmuştur [Ackerman, 2000].

2.2.8. Elde Edilebilirlik

Rüzgar güç üretim çıktısı, rüzgar hızının değişkenliğine bağlı olarak dalgalı seyreder.

Çizelge 2.3. Geliştirilmekte olan geniş ölçekli türbinler [Anckerman, 2000]

Tip	Ülke	Kontrol sis. (E) eğim, (D) durma, (AD) aktif durma,	Rotor çapı (m)	Kanat sayısı	Kapasite (kW)	(DH): değişken hız (SH): sabit hız
Enercon E-70	Almanya	E	70	3	1800	DH
Zond Z1800	Amerika	E	80	3	1800	DH
Neg Micon 2000/72	Danimarka	AD	72	3	2000	SH
Neg Micon 2000/78	Danimarka	AD	78	3	2000	SH
Wincon 2000	Danimarka	AD	70	3	2000	SH
DeWind 90	Almanya	E	90	3	2500	DH
Kvarner 3MW	İsveç	E	86	3	3000	DH
Kvarner 3MW	İsveç	E	86	3	3500	DH
Enercon E-112	Almanya	E	112	3	4000	DH
Multibrid	Almanya	D	100	3	5000	DH

Rüzgar türbinlerinde enerji üretiminin dalgalanmasının sebebi, rüzgar türbinlerini etkileyen fırtınaların sebep olduğu güç çıktısı dalgalanmasıdır. Bu güç dalgalanmaları şebeke güç kalitesini etkileyebilir. Dalgalanmaları kısa vadede azaltmak için, dönen mekanizmanın enerji depoladığı, değişken hızla çalışan rüzgar türbinleri kullanılır. Bu sayede daha düzgün güç çıktı, güçlü şebeke bağlantılı türbinler elde edilir.

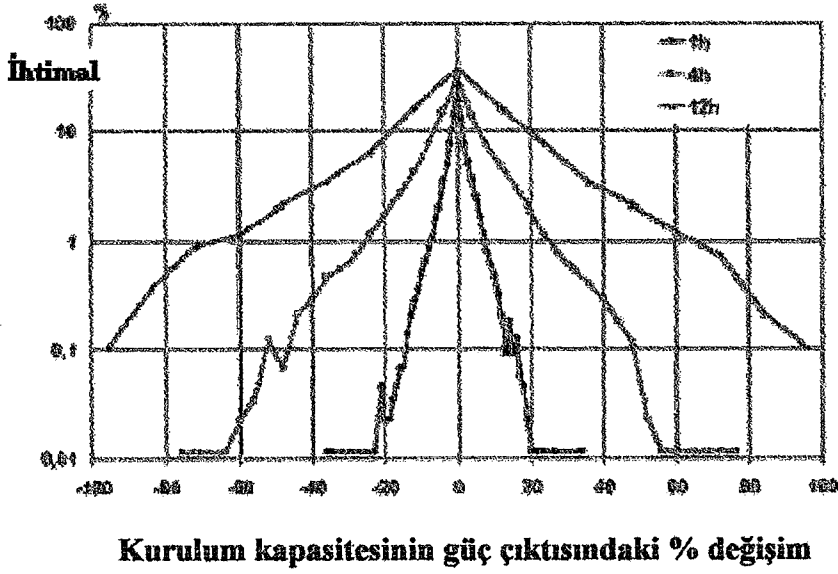
Şekil 2.8. Schleswig-Holstein’de kurulu 63 rüzgar türbininin (toplam 11,4 MW) istatistik analizinden elde edilmiştir. Şekil, toplam kurulu rüzgar kapasitesi güç çıktısının 1 saatlik (veya 4 veya 12) olasılığını göstermektedir.

Bir saatlik rüzgar enerjisi güç çıktısının, % 30 ihtimalle, toplam kurulu kapasitenin ± 1 ’i kadar olduğu görülebilir (4 saatlik ± 4 , 12 saatlik ± 12). Güç çıktısındaki en büyük değişme saatlik olarak (% 0,01 ihtimalle) kurulu kapasitenin yaklaşık % 40’ı kadardır (4 saatte yaklaşık % 80’i, 12 saatte %100’ü kadar). Bir yıl veya daha uzun vadede rüzgar hızındaki değişimler daha düşüktür

2.2.9. Güç Kalitesi

Rüzgar türbinleri gibi şebekeye bağlanan diğer ekipmanlarda güç kalitesini etkiler. Bu etkiler güç dalgalanmalarından kaynaklanan voltaj dalgalanmalarını, voltaj asimetrisini ve uyumunu içerir. Rüzgar türbinlerinin güç şebekeleri üzerine etkilerine çalışmak için, detaylı rüzgar türbini bilgisayar modelleri kullanılabilir.

Her dağıtım şebekesinin kendi başına tasarımı ve farklı tipte rüzgar türbinleri olması nedeniyle, rüzgar türbinlerinin güç kalitesi üzerine olan etkilerini hesaplamak oldukça güçtür. Örneğin sabit hızlı rüzgar türbinleri, kule iz etkisi ve çok kesikli rüzgar nedeniyle darbeli (pulslu) güç üretimi gerçekleştirir. Bu darbeli güç üretimi şebekede titremeye sebep olarak dalgalı voltaj meydana getirir. Endüksiyon jeneratörlü, değişken veya sınırlı değişken hızlı türbinlerde, kule iz etkisi ve rüzgar rejiminden kaynaklanan güç dalgalanmaları daha düşüktür.



Şekil 2.8. Seçilen zaman dilimleri için güç eğrileri (Schleswig-Holstein) [Heirer, 2000].

Rüzgar türbinlerinin çalışma başlangıcı da önemli bir sorundur. İhtiyaç duyulan jeneratör momentini karşılaması gereken rotor momenti tam olarak kontrol edilemediğinden, durma kontrollü-sabit hızlı rüzgar türbinleri, çalışma başlangıcında şebeke bağlantısında ani elektrik boşalmasına sebep olur. Açık (eğim) kontrollü sabit veya değişken hızlı rüzgar türbinleri ise çalışma başlangıcında düzgün bir şebeke bağlantısı sağlar.

Şebeke voltajı yükteki dalgalanmalara bağlı olarak dalgalanır. Bu durum ile uzun, düşük yüklü, düşük voltaj iletim hatlı,...vb. zayıf şebeke sistemlerde karşılaşılır. Rüzgar tarlalarının bir biri ile bağlantısı, kısa ve uzun vadede, güç çıktısı dalgalanmalarının sebep olduğu, voltaj dalgalanmalarını artırır. Rüzgar türbinlerindeki kontrol edilebilir güç faktörü sistemdeki yükün sebep olduğu bu voltaj dalgalanmalarını azaltır. Sonuç olarak rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin artması şebekede ciddi voltaj problemlerine sebep olmaktadır. 2030 yılına kadar rüzgar enerjisi üretimini % 50 artırmak isteyen Danimarka'da şebeke operatörleri bu konu üzerinde çalışmaktadır [Heier, 1998].



2.2.10. Ekonomi

1990'larda rüzgar türbinin fiyatları % 20 azalırken, türbin imalat sayısı ikiye katlanmıştır. Genellikle şebeke bağlantılı, büyük kapasiteli rüzgar türbini üretimi her 3 yılda bir katlanmaktadır. Benzeri fiyat azalması PV solar, biomass gibi teknolojiler için geçerli iken, imalatın katlanma süreleri farklıdır. 100 yıl kadar önce benzeri fiyat düşmesi petrol işletiminin ilk yıllarında da gerçekleşmişti. Elektrik üretimindeki en geniş ölçekli fiyat düşüşü Amerika'da 1926 ile 1970 yılları arasında gerçekleşmiştir. Bu zaman diliminde üretimin her katlanması, fiyatlarda % 25 düşüş yaşatmıştır [Koç, 1995].

Danimarka Enerji Kurumu 2020 yılına kadar fiyatın % 50 civarında düşeceğini, Avrupa Komisyonu (EU Commission) ise beyaz kitabında rüzgar enerjisi maliyetinin 1998-2010 yılları arasında % 30 azalacağını tahmin etmektedir. Başka otoriteler ise fiyatlardaki (maliyetlerdeki) düşüşün sınırsız olmadığını ve tahmin etmenin çok güç olduğunu belirtmektedirler [Ackermann, 2000].

Elektrik üretim fiyatlarının karşılaştırılması, farklı ülkelerdeki üretim fiyatlarının çok değişken olması, kaynağın elde edilebilirliği, vergi yapıları ve diğer sebeplerden dolayı çok zordur. Bununla birlikte Pazar ayarlamaları da farklı ülkelerdeki elektrik fiyatlarını etkilemektedir. İngiltere'deki yenilenebilir enerji için karşılaştırmalı fiyat prosesi iyi bir güç üretim maliyet analizi sunmaktadır. Bu fiyat artırma prosesi ile potansiyel ar-ge kuruluşları, yeni projelerin kurulumu için davet ediliyorlar. Bu geliştirme kuruluşları farklı teknoloji alanlarında şebekeye verdikleri her kWh için teşvikler ve vergi indirimleri alıyorlar. En verimli projeler değişik periyotlarda yeniden hayata geçiriliyor [Heier, 1998].

2.3. Rüzgar Enerjisi Projesi Hazırlanışı

Rüzgar gücünün gelecekte Dünya genelindeki gelişimi ekonomikliğine ve kamuoyu tarafından benimsenmesine bağlıdır. Rüzgar gücünün ekonomikliği yeterli rüzgar hızına bağlıdır. Fakat rüzgar ölçümlerinin güvenilir olmaması ve rüzgar akışı modellenmesinin belirsiz olması yatırımcıların başarısızlığına yol açar. Toplum tarafından



rüzgar enerjisi projelerinin kabul görmesi ise görüntü ve ses etkilerine, flora ve fauna üzerindeki etkisine yani çevresel etkilere bağlıdır.

2.3.1. Rüzgar Ölçümleri

Rüzgar gücü rüzgar hızının üçüncü kuvvetiyle orantılıdır. Bu nedenle rüzgar hızında beklenenden % 10 sapma, rüzgar gücünde beklenenden % 30 sapmaya neden olur. Site için gerekli olan rüzgar hızı ölçümleri ve site hesaplamaları için gerekli rüzgar dataları mümkün mertebe doğru olmalıdır.

Rüzgar ölçümlerinin bir sitede sınırlandırılmış olması dezavantajdır ve genellikle türbin göbek seviyesindeki rüzgar hızının ve yönünün belirlenmesi mümkün olmaz. Göbek seviyesindeki rüzgarın hızının ve yönünün tespiti için, rüzgar ölçümlerinden elde edilen belirli bir noktayı referans alarak lokal etki ve manileri de göz önünde bulundurarak hesaplayan, bilgisayar simülasyon programları geliştirilmiştir.

Bu alanda en çok kullanılan bilgisayar programı Danimarka Risø Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen WASP (The Wind Atlas Analysis and Application Program) programıdır. Bu program Danimarka ve Almanya'da güzel sonuçlar vermiştir. Çok engebeli ve kompleks arazilerde WASP kabul edilebilir ölçülerin dışında sonuç vermektedir.

Uluslar arası rüzgar enerjisi araştırmacıları, kompleks ve engebeli arazilerde WASP'ın hata miktarını azaltmak ve metodolojiyi geliştirmek için çalışmaktadırlar. Bununla birlikte yeni bilgisayar simülasyon modellerine dayanan metodolojiler gelişmektedir [Durak, 2000].

2.3.2. Çevresel Etkiler

Rüzgar enerjisi çevre dostu bir yöntem olmasına rağmen zehirli atıklardan tamamen arındırılmış değildir. Kanatların, gövdenin, muhafazanın,...vb üretiminde, gerekli materyallerin elde edilmesinde, taşıma ve kurulum işlemlerinde kullanılan araçlarda fosil türevi yakıtlar kullanılmaktadır. Bu emisyonlar indirekt emisyonlar olarak bilinir. Çizelge 2.4'te, farklı elektrik üretim yöntemlerinde ortaya çıkan emisyonlar

özetlenmektedir. Veriler direkt ve indirekt emisyonları içermektedir. Hesaplamalara Alman enerji ve teknolojisi temel oluşturmaktadır.

2.3.3. Soğuk Hava Uygulamaları

Kuzey İskandinavya, Kanada veya Kuzey Çin’de kurulmuş olan rüzgar türbinleri soğuk havalar için tasarım edilmiştir. Düşük sıcaklıkta çalışmada karşılaşılabilecek problemler:

- madde yapısındaki gevrek kırılma
- ana yatakların ve jeneratör yataklarının yağlanmasıyla ilgili yetersizlikler
- dişli kutusundaki aşırı sürtünme
- hidrolik ve elektronik sistemlerdeki aksaklıklar
- kanatlardaki ve meteorolojik sensörlerdeki buzlanma

Bu problemler enerji üretiminin uzun süre aksamasına sebep olur. Kanatlarda olan buzlanma kanat aerodinamiğine ve kanattaki yüke etki ederek, türbin performansını önemli ölçüde etkiler. Simülasyonlara ve deneylere göre, buzlanma rotor kanatlarındaki eğilme momenti standart sapmasını azaltır, kule eğilme momentindeki dalgalanmaları ise artırır.

Soğuk havalarda çalışacak türbinlerdeki önemli bir unsur ise ısıtılan anemometreler, kanatlar ve güvenlik sisteminde, dişli kutusunda ve diğer bölümlerdeki ısıtma sistemleridir.

Çizelge 2.4. Farklı enerji teknolojilerinin enerji amortisman zamanı ve emisyonlarının karşılaştırılması. Rakamlara konu olan direkt ve indirekt emisyonlar, verim ve ömür Alman teknolojisi için geçerlidir. Son kolon metan emisyonlarının karbondioksit eşleniğini içermektedir. NA = bu çalışmada dikkate alınmamıştır [Ackermann, 2000].

Teknoloji	Aylık enerji geri ödemesi	kg/GWh ^a başına SO ₂	kg/GWh ^a başına NO ₂	t/GWh ^a başına CO ₂	T/GWh ^b başına CO ₂ ve metanın CO ₂ eşleniği
Yanmış kömür	1,0-1,1	630-1370	630-1560	830-920	1240
Nükleer	NA	NA	NA	NA	28-54
Benzin	0,4	45-140	650-810	370-420	450
Büyük hidrolik	5-6	18-21	34-40	7-8	5
Mikro hidrolik	9-11	38-46	71-86	16-20	NA
Küçük hidrolik	8-9	24-29	46-56	10-12	2
Rüzgar Türbini					
4,5 m/s	6-20	18-32	26-43	19-34	NA
5,5 m/s	4-13	13-20	18-27	13-22	NA
6,5 m/s	2-8	10-16	14-22	10-17	11
Fotovoltaik					
Tek kristalli	72-93	230-295	270-340	200-260	NA
Multi kristalli	58-74	260-330	250-310	190-250	228
Amorf	51-66	135-175	160-200	170-220	NA
Jeotermal	NA	NA	NA	NA	50-70
Gelgit	NA	NA	NA	NA	2

Avrupa Komisyonu ve Nükleer Enerji Programı tarafından desteklenen 'soğuk iklimlerde Rüzgar Enerjisi Üretimi' projesinde bu konular detaylı olarak incelenmiştir. Projede simülasyonlardan ve Finlandiya'da soğuk havada kurulmuş olan projelerin verilerinden faydalanılmıştır.

2.3.4. Offshore Uygulamaları

Rüzgar enerjisinin gelişimi için uygun alanlar, Orta Avrupa'da özellikle Almanya, Danimarka, Hollanda, ve İngiltere'de yüksek popülasyon yoğunluğu nedeniyle offshore (deniz kıyısı) bölgeleridir. Ulusal ve Avrupa kökenli kaynaklar offshore rüzgar enerji kaynaklarının offshore rüzgar enerjisi kaynaklarının karadakinden (onshore) daha fazla olduğunu söylemektedir. Özellikle birçok Orta Avrupa sularında denizin derinliğinin, mesafenin artışına göre az artması bu projeler için önemli bir avantajdır. Böylece bir çok offshore projesi gerçekleştirilmiş ve offshore kaynaklarının belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu araştırma ve projeler offshore rüzgar tarlalarının fiyat analizini yapmak, bu projelere uygun türbin tasarımı gerçekleştirmek, bu tarlaların kurulum ve çalıştırılmasını geliştirmek amacıyla yapılmıştır. Offshore projelerini sürdürülebilmenin zor ve pahalı olması nedeniyle bu projeler finanssal olarak desteklenmektedir.

Offshore rüzgar enerjisi dönüştürücüler, rüzgarın yönünün ve hızının sıkça değişmesi nedeniyle kompleks bir yükleme ile karşı karşıyadır. Bu kompleks yükleme rüzgar türbinlerinin yapısal tasarımı sırasında göz önünde bulundurulur. Araştırma projeleri türbin yapısı (kule,...vs.) ve temeller üzerine odaklanmıştır. Offshore rüzgar türbinleri yüksek rüzgar hızları için tasarlanmaktadır. Dikkate alınması gereken diğer bir kriterde, bu türbinlerin bakım gerektirmeden uzun süreler çalışabilmesidir. Bu türbinler yüksek kapasiteli ($\geq 1,5$ MW) türbinler olduğundan onshore türbinlerine nazaran pahalıdırlar [Ackermann, 2000].

2.3.5. Deniz Suyu Arıtması Uygulamaları

Rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan, örneğin ada gibi yerlerde, deniz suyu arıtma işlemlerinde, güç kaynağı olarak rüzgar enerjisi sistemleri kullanılır. Bu sistemlerin sağladığı avantajların başında, işlem yapılacak olan suyun taşıma masraflarının düşmesi ve güç kaynağı olarak konvansiyonel yakıtların kullanılmaması gelir.

Rüzgar arıtma sistemlerinde farklı yaklaşımlar mümkündür. Öncelikle rüzgar türbinleri de, arıtma sistemleri de şebekeye bağlanabilir. Bu durumda, rüzgar türbini sisteminin optimal boyutu ve arıtma sistemi, kaçınılan petrol fiyatlarıyla ilişkilidir. İkinci durumda ise rüzgar türbinleri ile arıtma sistemi birbirlerine , kısmen yada tamamen bağlıdır. Bu durumda ise arıtma sistemi güç değişimlerinden veya güç kaynağında (rüzgarda) olan değişikliklerden etkilenir. Bu güç dalgalanmaları arıtma sisteminin performansı ve komponentleri üzerinde kötü etki yapar. Bu durumda dönüşüm (back-up systems) sistemleri, bataryalar, dizel jeneratörler veya volanlar sisteme entegre edilebilir. Bu konudaki araştırmalar, rüzgar üretim sisteminin ve tüm sistemin performans analizi, rüzgar türbinleri ve tüm sistem için kontrol algoritmalarının geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır [Ackerman, 2000] .

2.3.6. Küçük Rüzgar Türbini Sistemleri

Küçük rüzgar türbini sistemleri (≤ 10 kW) yerleşim yerlerine uzak, şebekenin olmadığı evler, yelkenliler ve telekomünikasyon sistemlerinde kullanılır. Genellikle bataryalar ve küçük dizel sistemlerle entegre bir şekilde kullanılırlar. Küçük rüzgar türbinlerinin tasarımı, şebeke bağlantılı büyük türbinlerin tasarımından farklıdır. Farklı uç hız oranları nedeniyle küçük rüzgar türbinleri, büyük türbinlerden farklı aerodinamik profiller gerektirir. Rüzgar türbini endüstrisi küçük çaplı rüzgar türbini aerodinamik profillerinin geliştirilmesine büyük çaplı olanlardan daha az önem vermektedir. Küçük ölçekli türbinlerin performansları büyük ölçeklilerinkinden daha düşüktür. Newcastle Üniversitesi tarafından yapılan araştırmalar küçük türbinlerde daha karmaşık aerodinamik profiller yapmaya yöneliktir. Büyük türbinlerden diğer bir farkı da iletim/jeneratör sistemleridir. Küçük rüzgar türbinlerinde istenen sabit frekansı elde etmek üzere, direkt tahrikli, sürekli mıknatıslı değişken hızlı jeneratörler kullanılır. Bu türbinler dışı kutusu gerektirmeyecek şekilde tasarım edilir. Bu nedenle küçük türbinlerde büyüklere nazaran daha büyük rotor momentlerine ihtiyaç duyulur. Bu durum yüksek güvenlik ve düşük fiyat sağlar. Yüksek güvenlik uzak bölgelerde tamir ve bakım zorlukları nedeniyle küçük türbinlerde daha fazla önemsendir. Küçük türbinlerde güç ve hız ayarlama üniteleri de diğerlerinden farklıdır. Mekanik kontrollü eğim sistemleri veya elektronik kontrollü yönerge sistemleri bu farklardır. Kuvvetli rüzgarlarda dikey

pervaneli türbinler rotoru göğe kaldırarak türbine helikopter görüntüsü verir. Yatay pervaneli türbinler ise kuvvetli rüzgarlarda rotoru kuyruğa doğru sallarlar.

Bu yaklaşımlar büyük türbinlerde kullanılmaz. Küçük türbinlerin, rüzgar akışını bozacak engellerden kurtulmak için, rotor çaplarına göre büyük kuleleri vardır. Elde edilen kW başına maliyet açısından düşünüldüğünde, küçük türbinlerde maliyet büyük türbinlere nazaran yüksektir. Bu sistemler genellikle şebekeye entegre edilmez, dizel jeneratörlerle veya solar sistemlerle birlikte kullanılırlar [Ackermann, 2000].

2.3.7. Rüzgar – Dizel Sistemler

Orta ve küçük ölçekli güç ihtiyaçları için, örneğin küçük köyler gibi, şebeke bağlantısız dizel sistemlerle entegre edilmiş rüzgar türbinleri ekonomik ve iyi bir tercihtir. Rüzgar-dizel sistemlerin toplam kapasitesi 50 kW'tan birkaç megawatta kadar olabilir.

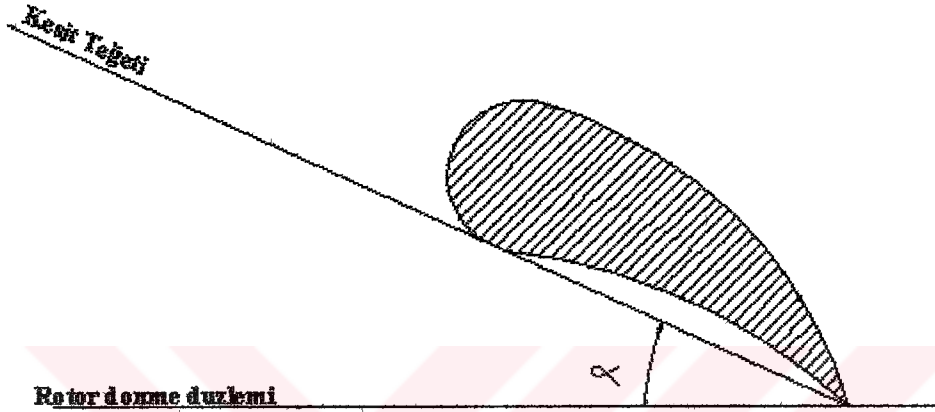
Örnek olarak Avustralya'nın Esperance kentindeki rüzgar dizel sistem, toplam kapasitesi 14 MW olan 8 dizel jeneratör ve toplam kapasitesi 2,4 MW olan iki rüzgar tarlası içermektedir. Sistemin, tüm güç dalgalanmalarını, rüzgar gücü dalgalanmalarını, yük dalgalanmalarını ve yıldırımlardan kaynaklanan geniş ölçekli dalgalanmaları karşılayacak yetenekte ve kapasitede olduğu, rapor edilmiştir. Güç ihtiyacının az, rüzgar gücünün fazla olduğu gece vakitlerinde sistemin ihtiyacı olan gücün %75'i rüzgardan ve hiçbir sorun yaşanmadan elde edilmektedir. Dünya genelinde birçok başka projede vardır. Bunların çoğu Kanada ve Avustralya'da düşük popülasyon yoğunluğu olan kentlerde bulunmaktadır.

Rüzgar-dizel sistemlerde farklı tasarım ve kontrol yaklaşımları kullanılmaktadır. Genelde rüzgarda meydana gelecek dalgalanmalarda dizel sistemin faaliyete geçmesini sağlayacak zamanı kazandıran (yaklaşık 5 dakika) bataryalar sisteme entegre edilmektedir. Eğer bataryalar yavaş çalışırsa jeneratörler devreye girmekte ve şebekeyi beslerken bataryaları da şarj etmektedir. Bu kontrol stratejisindeki amaç jeneratörleri yüksek yüklerde çalıştırarak sistemin verimini artırıp ekonomik verimlilik sağlamaktır. [Ackerman, 2000]

3. ROTOR HAKKINDA BİLGİLER

3.1. Rotor Hareket Miktarları Teorisi

Bir rotor, eşit aralıklı belirli sayıda kanattan meydana gelir. Kanatlardan herhangi birinin rotor dönme ekseninden bir r mesafesindeki kesitinin kirişi kanadın dönme düzlemi ile bir α açısı yapar. Aşağıdaki şekil 3.1’de bu açı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. α açısı ve profil eğriliği

α açısı ve profil eğriliği, rotor dönme ekseninden kanat boyunca uzaklaştıkça çaprazlığı (dönme düzlemine göre) bozulur. Bir rotor, hava içerisinde bir cıvatanın somunu içerisindeki hareketine benzer şekilde hareket eder.

Rotorun ilerlemesi tur başına $2\pi r t g \alpha$ değerindedir. Bu değer hatve (adım) diye tanımlanır. Gerçekte bu değer oluşturulmuş bütün kanat elemanları için aynı değerde değildir. Pervane eksenine, maksimum yarıçapının $2/3$ mesafesindeki bir noktada bulunan kanat elemanlarının $2\pi r t g \alpha$ değerine rotorun ‘geometrik hatvesi’ denir. Diğer yandan hava, kanadın etkisinde sıkışarak hacim değişikliğine maruz kalır ve tur başına ilerleme geometrik hatveye eşit olmaz herhangi bir değer olur. Bu durumda rotor için pervane çekiş gücü ortadan kalktığından tur başına ilerleme değerine ‘deneysel hatve’ şeklinde tanımlama yoluna gidilir. Bu çapa göre deneysel ortalama hatve değeri bir deney raporu yardımıyla rotorun karakteristikleri olarak tanımlanır. Görülebileceği üzere bu değer ancak deneysel metotla bulunabilir.

Rotor tarafından meydana getirilen T çekişi ve rotorun dönmesini sağlayan Q momenti, V eksenel hızının, devir sayısı’nın (yada açısal hızının) ve D , rotor çapının

fonksiyonu olarak izah edilir. Bir rotorun çalışma şartı, ilerlemenin gerçekleşen dönme sayısına oranı ile tanımlanır. Ancak bu parametreyi boyutsuz bir katsayı ile göstermek tercih edilir. Rotor çalışma şartı,

$$J = V/(n.D) \quad (3.1)$$

Aşağıda verilecek katsayılar bir rotorun çekişi ve momenti ile ilişkilidir [Milne, 1966].

$$k_T = T/(\rho.n^2.D^4) \quad ; \quad k_Q = Q/(\rho.n^2.D^5)$$

Bazen aşağıdaki katsayıları kullanmak daha pratiktir.

$$T_c = T/(\rho.V^2.D^2) \quad ; \quad Q_c = Q/(\rho.V^2.D^3)$$

Bu katsayılar değişik biçimde şöyle de kullanılabilir: n yerine Ω açısal hız, D^2 yerine $\pi.D^2/4$ daire yüzeyi, V^2 yerine $V^2/2$ dinamik basınç kullanılır.

Elde edilen katsayılar daha yüksek mertebeden tanımlananların basit üslüleri ve her şeklin durumuna göre kendine öz kullanırlığı vardır. Aşağıda kullanım alanlarına göre çok amaçlı rotorlar sıralanmıştır:

a) İleri İtici Rotor

Hava taşımacılığında kullanılır. Rotorun, $T.V$ gücünü karşılaması için $\Omega.Q$ gücü verilir.

b) Rüzgar türbini Rotoru

Rotor hava içerisinde izafi hareketinden itibaren, rotor mili üzerinde güç üretebilecek biçimde monte edilmiş bir rotordur. Eksenel hızı çok yüksek olan, kendine özgü belirli önem taşıyan çekiş gücü bulunan bir uçak pervanesi ile yere sabit, düşük hızlı bir hava akımıyla çalışan ve kendine özgü çekiş gücü önemsiz olan rüzgar türbini rotorunu birbirinden ayırt etmek gerekir.

sabit, düşük hızlı bir hava akımıyla çalışan ve kendine özgü çekiş gücü önemsiz olan rüzgar türbini rotorunu birbirinden ayırt etmek gerekir.

c) Vantilatör

Hava akımı üretmek için kullanılan bir pervanedir.

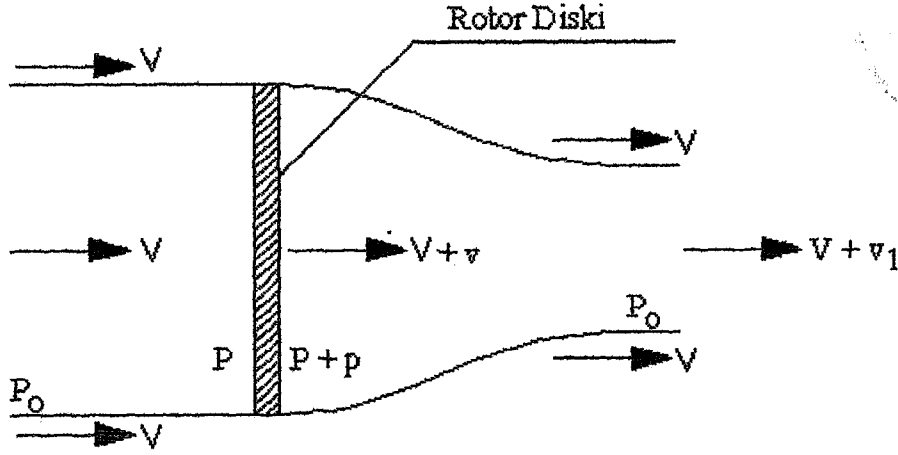
d) Anemometre

Dönme hızının ölçülmesi ile havanın izafi çizgisel hızının tanımlanmasına yarayan bir pervanedir. Pervane söz konusu olduğunda kullanım yeri neresi olursa olsun çalışma teorisi her zaman aynıdır. Pervane şekli ise kullanım yerine göre değişecektir. Aerodinamik incelemelerin yanı sıra aynı zamanda mukavemet şartları ve türbin boyutularınında olayda göz önüne alınması gerekmektedir. Diğer tertibatlarda pervanenin yerini tutabilir. Örneğin, sabit bir eksen etrafında serbestçe dönebilen çubukların uçlarına içi boş yarım küreler monte edilirse, bir rüzgar türbini rotoru gibi veya bir Anemometre gibi kullanıma hazır aletler elde edilir.

3.2. Hareket Miktarları Teorisi

Rankine ve froude'un çalışmaları, pervanenin çalışma teorisini basit hale getirmiştir. Bu teori hareket miktarının zaman birimi saniye ile kinetik enerjisinin dikkatli incelenmesi üzerine kurulmuştur.

Rotorun çok sayıda kanattan oluştuğu, adeta dairesel bir disk şekline dönüştüğü ve aynı zamanda bu plaka üzerinde her noktanın çekiş kuvvetinin aynı olduğu varsayılır. Hava akımının dönmesi ile ilgili moment ihmal edilecektir. Rotor diskinden geçen akışı sürekli tutabilmek açısından, akışın Eksenel hızının sabit ve üniform olacağı dikkate alınacaktır [Milne, 1966].



Şekil 3.2. Hareket miktarları teorisi

Diğer taraftan akışkanın basıncı, diskin yüzey elemanları başına düşen eksenel kuvvetine eşit p değeri kadar ani olarak artar ve pervanenin arkasında çizgisel hızı artan bir hava akımı oluşur. Rotorun karmaşık yapısını basitleştirmek düşüncesiyle dönel diske ileri itici (yürütücü) disk adı verilmiştir. Hareket miktarının ve akım çizgisi enerjisinin dikkate alınmasıyla önemli sayıda ilginç sonuçlar çıkarılmıştır. Şekil 3.2’de gösterilen akım hızı, V ile tanımlanan bir akışkan içerisinde ileri itici bir disk konulmuş olsun. Diskin hemen önünde eksenel hız $V+v$ değerine ulaştığı halde basınç değerinde P_0 ’dan P ’ye bir düşüş görülür.

Eksenel hız, diskin hemen arkasında $V+v_1$ değerine ulaşır. Halbuki başlangıç değeri P_0 olan basınç, diskin hemen arkasında $P+p$ değerine ulaşır (Diskin önündeki basınç, diskin oldukça gerisindeki P_0 basınç değerine eşittir). Bir basınç süreksizliğinin ve bir enerji dönüşümünün söz konusu olduğu akımın diski geçiş anı hariç diğer kesimlerde akımın türbülanssız olduğu göz önüne alınacaktır. Buradan da diskin ön kısmı ve arka kısmı için ayrı ayrı Bernoulli denkleminin uygulanacağı sonucu çıkar bu bölgelerin her birindeki toplam yük denklemleri yazılabilir.

$$H_0 = P_0 + \frac{1}{2} \rho V^2 = P + \frac{1}{2} \rho (V + v)^2 \quad (3.2)$$

$$H_1 = P_0 + \frac{1}{2} \rho (V + v_1)^2 = P + p + \frac{1}{2} \rho (V + v)^2 \quad (3.3)$$

Buradan şu sonuçlar çıkartılabilir:

$$p = H_1 - H_0$$

(3.4)

$$p = \rho.(V + \frac{1}{2} v_1).v_1$$

(3.5)

Teoremin bu uygulamasına hareket miktarları yansıtılırsa çekiş gücü elde edilecektir.

$$T = A.\rho.(V + v).v_1$$

(3.6)

Burada A itici diskin alanıdır ve mademki p bir yüzeye ait eksenel kuvvettir, o halde;

$$p = \rho.(V + v).v_1$$

(3.7)

p'nin bu iki denklemini mukayese edersek;

$v = \frac{1}{2} .v_1$, sonucu ortaya çıkar.

Şu halde akım çizgisinde pervane diskinin hemen önünde ve arkasında karşılıklı olarak eşit bir miktar için hız artışı gerçekleşir. Çekış kuvveti şu hale gelir:

$$T = 2.A.\rho.(V + v).v$$

(3.8)

Şimdi birim zamandaki akışkanın kinetik enerji değişimi göz önüne alınacak olursa,

$$E = \frac{1}{2} .A.\rho.(V + v).(V + v_1)^2 - v^2$$

(3.9)

$$E=2.A.\rho.(V+v)^2.v$$

(3.10)

$$E = T.(V + v)$$

(3.11)

Böylece akışkan içerisindeki rotorun çekiş kuvvetinin gücü elde edilir. Şayet Ω , açısal hız ve Q, rotora uygulanan moment ise ortaya çıkan güç yada toplam güç $\Omega.Q$ kadardır. Bunu takiben,

$$\Omega.Q = T.(V + v) \quad (3.12)$$

Akışkanın toplam kütlesinin hareketsiz kaldığı durum göz önüne alınacak olursa, bu durağan rotor havada V hızıyla ilerlerken hız ile çekiş arasındaki bir önceki ilişki değişmeden kalır. Fakat bu çekiş tarafından gelişen güç, rotorda $T.V$ ve akışkanda $T.v$ kadardır. Bu ikinci terim, akışkanın birim zamandaki kinetik enerjisinin izafi artışı tarafından sağlanmıştır (Hızlardaki izafi artış v_1 'dir) [Milne, 1966].

$$E = \frac{1}{2} . A . \rho . (V + v) . v^2 \quad (3.13)$$

$$E = 2 . A . \rho . (V + v) . v^2 \quad (3.14)$$

$$E = T . v \quad (3.15)$$

3.3. Teorik Verim

Bir rotorun teorik verimi kullanılan gücün, toplam güce oranı ile tanımlanır.

$$\eta = (T.V) / (\Omega.Q) = V / (V - v) \quad (3.16)$$

$v = a.V$ olduğu varsayılırsa bu denklem;

$\eta = 1 / (1 - a)$, haline gelir.

Bu ilişki bir rotorun pratikte asla ulaşamayan teorik verimidir.

Bu teorik verim, hipotezde; tek enerji kaybı olarak kabul edilen serbest akan akışkanda aksenal hıza uygun düşen kinetik enerji ile elde edilmiştir. Gerçekte daha başka ek kayıp enerji kaynakları da mevcuttur.

- a) Kanadın profil çekişi (çekiş formu ve sürtünmeyi içerir)
- b) Serbest akan akım çizgisinin dönme kinetik enerjisi
- c) Akışın periyodikliği ve kanadın uçlarındaki itme kayıpları ki bu sınırlı kayıplar, pervane diskinde üniform olmayan itici kuvvetin hissesini tanımlar [Milne, 1966].

Birbirine eklenen bu kayıpların en önemlisi sık sık tekrarlanan profil çekişidir. Normal faydalanma şartlarında bir rotorun efektif verimi, teorik veriminin % 85'i kadardır [Milne, 1966].

Bıçimlendirilmiş bu verimin ele alınışı, aynı zamanda gerçek verimin ön belirlemeleri için gerekli yol göstericidir.

$$T = 2.A.\rho.V^2.(1 - a).a \quad (3.17)$$

$$T_c = T / (\rho.V^2.D^2) = \pi / 2 .(1 - a).a \quad (3.18)$$

$$1 + 2.a = \sqrt{1 + \frac{8}{\pi} T_c} = \sqrt{1 + \frac{8}{\pi} + \frac{k_T}{J^2}} \quad (3.19)$$

V sıfır olduğunda a sonsuz olur. Fakat akışkanın hızı rotoru geçerken şu değeri alır.

$$\frac{v}{n.D} = \frac{aV}{n.D} = \sqrt{\frac{2}{\pi} k_T} ; (T = 2.A.\rho.V^2) \quad (3.20)$$

P gücünün, D çaplı rotor ile ilişkili olduğu varsayılırsa ve $\eta.P$ 'nin

$$T = 2.A.\rho.V^2.(1 - a).a \quad (3.21)$$

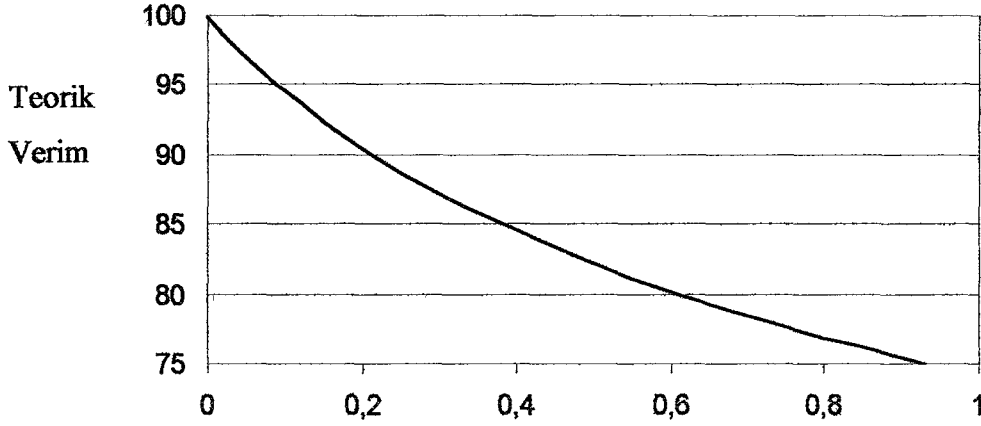
İtici kuvvetiyle gerçekleştirilen güce eşitliği yazılırsa;

$$\eta.P = T.v = \pi / 2 .D^2.\rho.V^3.(1 - a).a \quad (3.22)$$

$$\frac{1 - \eta}{\eta^3} = \frac{2}{\pi} \frac{P}{\rho.V^3 D^2} \quad (3.23)$$

Verim, artan güç katsayısı oranında hızla düşer ve bu düşme küçük çaplı bir pervane aracılığıyla elde edilen yükselen gücün ortaya çıktığı tahrik kaybını gösterir.

Bir motor tarafından sağlanan güç sadece dönme hızının fonksiyonudur. Verilen basınç ve sıcaklık şartlarında bir önceki formülü şu şekilde yazmak mümkündür.



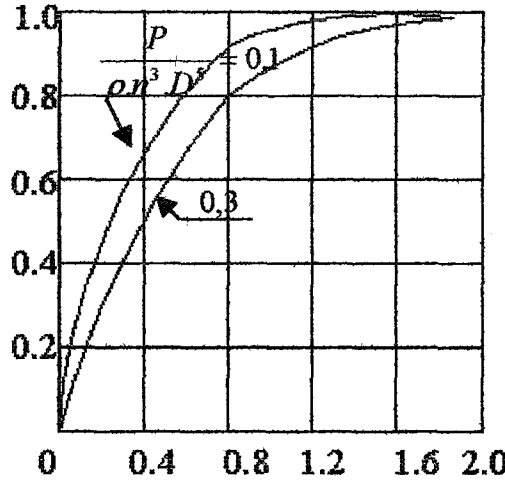
$$P / (\rho.V^3.D^2)$$

Şekil 3.3. Güç sayısı ile teorik verim arasındaki ilişki

Bu denklem teorik verimin; hız, çap, güç ile belirlenmesini sağlamaktadır.

Çizelge 3.1. Güç katsayısı ve teorik verim değerleri [Tolun v.d., 1994]

η	$P / (\rho.V^3.D^2)$
100,0	0,000
97,5	0,042
95,0	0,092
92,5	0,149
90,0	0,216
87,5	0,294
85,0	0,384
82,5	0,490
80,0	0,614
77,5	0,759
75,0	0,932
72,5	1,133



Şekil 3.4: J katsayısının teorik verim ile değişimi

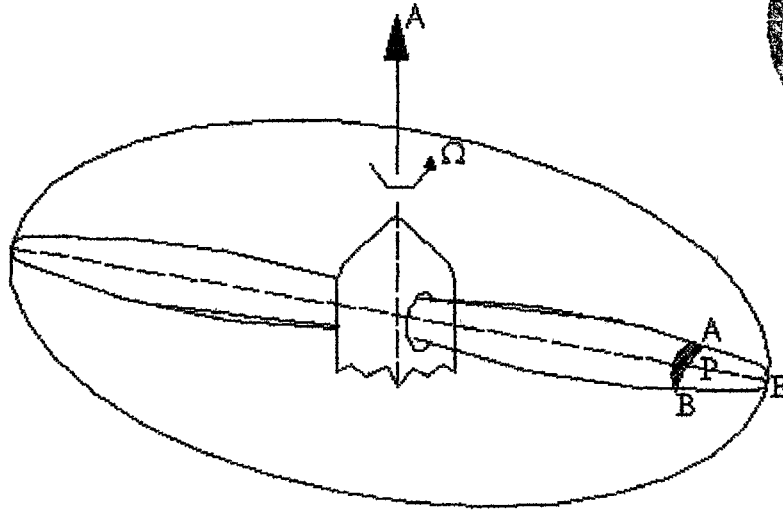
$$\frac{1-\eta}{\eta} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{J^3} \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad [\text{Milne, 1966}] \quad (3.24)$$

Bu formülde n , rotorun dönme sayısıdır. Bu sayı redüktörün çıkış milindekinden farklıdır. Öyleyse farklı $P / (\rho n^3 D^5)$ güç katsayıları için $J \cdot \eta$ fonksiyonunda eğriler çizmek mümkündür. Bu teorik verim eğrileri, sabit bir dönme hızında değişik kanat hatveleri uygulanan bir rotorunki gibidir. Grafik 3.2'deki iki eğri $P / (\rho n^3 D^5)$ 'in iki değeri için J katsayısının teorik verimi ile değişimini gösterir. η J ile önce hızlı sonra yavaş artar.

3.4. Rotor

Bir rotor bir eksen etrafında dönen belirli sayıda kanattan oluşur. Rotor hava taşıyıcı hareket ettirebilecek trastı sağlayacak şekilde tasarım edilir. Dönme eksenini yönündeki trast, T ; rotor şaftının açısal hızı, Ω ; motor tarafından sağlanan moment, Q ve dönme eksenini yönündeki ilerletici hız, V 'dir. Birim zamanda motordan elde edilen iş $Q \cdot \Omega$ ve rotordan elde edilen iş ise $T \cdot V$ 'dir. böylece rotor moment gücünü, trast gücüne dönüştürmüş olur. Rotor'un verim ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\eta = T \cdot V / Q \cdot \Omega$$



Şekil.3.5. Rotor

Birbirine göre kıvrılmış bir forma sahip pervane kanatları vasıtasıyla trast elde edilmektedir.

Eksenleri dönme eksenine ile aynı olan kanatların her bir noktası dairesel silindir üzerinde hareket eder, böylece her bir nokta bu silindir içinde helisel yada spiral eğri çizer. Bu silindirin yalnızca bir tane maksimum yarıçapı vardır. Şekil 3.5'te rotor kanadının E ile gösterilen uç noktası bu silindir içinde bulunmaktadır. E noktasından itibaren OE dönme eksenine dik bir eksen çizebiliriz. Bu eksen, kanat eksenine olarak adlandırılır. Dönme eksenine dik OE eksenine boyunca uzanan silindirik kısım, pervane diski yada kısaca disk olarak adlandırılmaktadır. OE üzerinde alacağımız bir P noktası ile $OP = r$ yarıçapı olacak şekilde bir silindir oluşturulsun. Bu silindir üzerinde bulunan kanat üzerindeki her bir nokta airfoil profiline benzeyen eğriler meydana getirilecektir, bu eğriler kanadın şekliyle değişkenlik gösterir. bu nedenledir ki düzlemsel planda kanadın şekli belirlenmiş olmalıdır. Kanat eksenine dik P düzlemi boyunca AB ile işaretlenmiş olan profil şekil 3.5'te gösterildiği gibi kanat profili olarak adlandırılır.

Kanat profili üzerinde dönme ekseninden r ile $r + dr$ mesafeleri arasında kalan kısma, kanat elemanı adı verilir.

3.5. Tras (İtki) Oluşumu

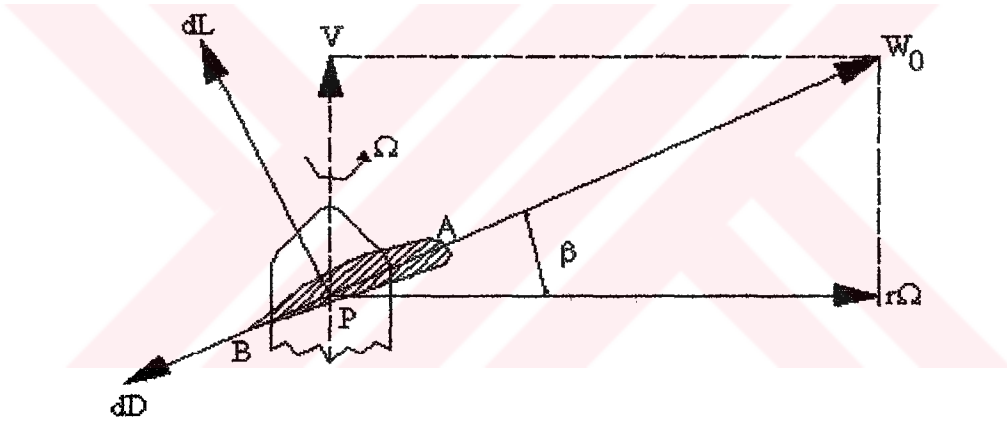
Her bir kanat elemanı bir airfoil gibi davranır ve hareketi esnasında kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin etkisine maruz kalır. Burada hızların oluşumu ve etkileri ihmal edilmiş yalnızca ana prensiplerden bahsedilmiştir. Şekil 3.6'de kanat elemanı gösterilmiştir.

Bu kısımda bazı kabullerimiz olacaktır:

Kabul : Hava taşıtı pervanesinin dönme eksenini doğrultusunda hareket etmektedir.

Ana kaldırma sistemiyle ilgili kısmi sonuçlar için yalnızca kesin doğruluğu vardır.

Kabul : Rotasyonel hareket yüzünden $r + dr$ mesafeleri arasında kalan kanat elemanının her bir noktası $r.\Omega$ hızına sahiptir [Milne, 1966].



Şekil .3.6. Kanat elemanı

r 'nin büyük değerleri için bu kabul önemli oranda doğrudur. Bileşke hız, W_0 ise $W_0^2 = V^2 + r^2.\Omega^2$ 'dir. W_0 hızına zıt yönde dD , sürüklenme kuvveti meydana gelir.

Kanat elemanında meydana gelen $r.\Omega$ değerli hız vektörü ile bileşke hız vektörü, W_0 arasında kalan açının β olması şartıyla V hız vektörü yönünde trast (itki) elde edilir.

$$dT = dL.\cos\beta - dD.\sin\beta \quad (3.25)$$

Toplam trast, kanat elemanında elde edilen diferansiyel trastın r ile çarpımına eşittir. Aynı anda oluşacak moment ifadesi de aşağıda verilmiştir.

$$dQ = r.(dL.\sin\beta + dD.\cos\beta) \quad (3.26)$$

Kanadın dönme ekseninin tersi yönde moment oluşur. Bu açıklamalardan anlaşılacağı üzere rotor diskinin yarı çapı R ise kanat profilinden elde edilecek maksimum hız $\sqrt{V^2 + R^2 \cdot \Omega^2}$ değerine eşittir. Basınç dalgaları ihmal edildiğinden, maksimum hız ses hızının altında bulunmalıdır. Rotor diskinin yarıçapı ile sınırlandırılmış bu bölgede V ve Ω değerleri maksimumdur. Ses hızına yakın hızlarda, Zararlı etkilerden korunmak için kanat uçları ince yapılmalıdır. Dinamiksel açıdan kanadın bağlantı (kök) kısmının çok kalın yapılması, kanat ucuna doğru gerektiği gibi yapılamayacak kütle dağılımı yüzünden oluşacak gerilmeler nedeniyle istenmeyen bir durumdur [Milne, 1966].

Eğer $\Omega = 0$ ise $W_0 = V$ ve $\beta = 90^\circ$ olmakta, sonuçta $dQ = r \cdot dL$ olmaktadır. V hızı yönünde sıfır kaldırma elde edilebilecek şekilde kanat profili ayarlanır; sonuçta da $dQ = 0$ olur ve rotor shaftından moment elde edilemez. Dengeyi sağlamak amacıyla rotorun her bir kanadı aynı şekilde ayarlanmalıdır. Rotorlara uygulanan pitch kontrolü ile aynı amaca ulaşılabilir.

Kanat elemanında kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin varlığını ispatlarken üstü kapalı bir şekilde ifade edilse de kanat elemanlarında sirkülasyon oluştuğu kabul edilmiştir. Böylece kanat yüzeylerinde güçlü rüzgar hareketleri oluşmuş olacaktır. Böylece akış artacak ve W_0 hızına ilave hızlar oluşacaktır.

3.6. Basınç ve Hızlar

Rotor, sabit V ve sabit Ω açısal hızı ile dönerken, sabit bir noktadaki havanın hareketi durgun olmaz, p basıncı ve q hızı zamana bağlı olmaktadır. Rotorda sabit bir referans ekseni kabul edersek bu ekseninde akış düzgün meydana gelmektedir. Eğer bu ekseninde ölçülen hava hızı $\bar{q}$ ise aşağıda verildiği gibi Bernoulli ifadesi yazılabilir.

$$P/\rho + \frac{1}{2} \cdot (\bar{q})^2 - \frac{1}{2} \cdot \Omega^2 \cdot r^2 = \text{Sabit} \quad (3.27)$$

Eşitliğin sol tarafındaki en son terim, rotasyonel hareket nedeniyle akışın meydana geldiği bölgedeki basınç enerjisidir. q_a , q_r ve q_t hava hızı $\bar{q}$ 'nün eksenel, radyal ve teğetsel bileşeni olarak kabul edersek, bu bileşenlerin rölatif hızları aşağıdaki gibi olacaktır.

$$(\bar{q})^2 = q_a^2 + q_r^2 + (q_t - r \cdot \Omega)^2 = q^2 + r^2 \cdot \Omega^2 - 2 \cdot q_t \cdot r \cdot \Omega \quad (3.28)$$

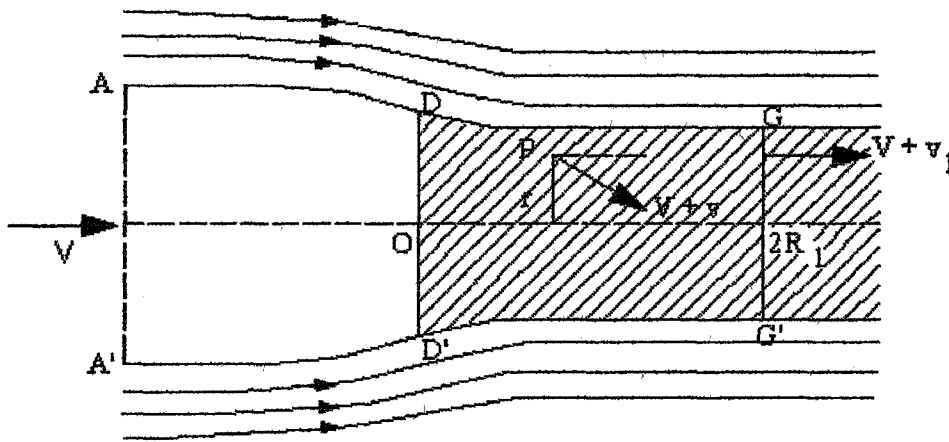
Böylece Bernoulli ifadesi aşağıdaki şekli alır.

$$P/p + \frac{1}{2}q^2 - q_t.r.\Omega = \text{Sabit } (q, \text{ hava hızıdır.}) \quad (3.29)$$

Şekil 3.7'de O merkezli rotor diskinin (DD') boyuna kesiti verilmiştir. Taralı kısım rotor arkasında oluşan hava akışını ifade etmektedir ve akışın referans eksenini boyunca gerçekleştiği kabul edilmektedir. Akışın meydana geldiği bölgenin dışındaki her yerde rotasyonel olmayan bir hareket vardır. Rotorun önündeki bölgede V hızına sahip düzenli bir hava akımı vardır.

Disk in en büyük çaplı DD' ile gösterilen bölgesinde akışın meydana geldiği alan kendi kendine daralmaktadır ve şekil 3.7'de gösterildiği gibi GG' çaplı dairesel silindir formunu almaktadır.

Şekil 3.7'de ADG ve A'D'G' ile gösterilen sınır yüzeylerindeki ve rotor önündeki hava hareketlerinin ihmal edilmesi sonucu pek etkilemez ama akışın meydana geldiği bölgenin içinde ve dışında hızlardaki ani değişiklikler, akışın meydana geldiği sınırdaki vorteks (girdap) oluşmasına neden olabilir. AD ile gösterilen kısımda hızlarda değişiklik olmayacağından vortekste oluşmaz.



Şekil 3.7. Rotorda hava akımı

Akışın meydana geldiği bölge içinde bir P noktası alalım. P noktasındaki hava partikülünün açısal hızı ω ise $q_t = r \cdot \omega$ 'dur. P noktası ile rotorun dönme eksenini arasındaki mesafede r 'dir. Akışın meydana geldiği bölgenin dışındaki açısal hız $\omega = 0$ 'dır, çünkü hareket rotasyonel olmadığından sirkülasyonda oluşmamaktadır. Böylece 3.29 nolu ifade aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir.

$$P/\rho + \frac{1}{2}q^2 - r^2 \cdot \omega \cdot \Omega = \Pi/\rho + \frac{1}{2}V^2 \quad (3.30)$$

Π , diskin önünde meydana gelen basınçtır ve böylece 3.30 nolu eşitliği tüm akış boyunca kullanabiliriz.

Şekil 3.5'teki düzlemsel bölgede q 'nın izdüşümünde $V+v$ hızını kullanırsak $q^2 = (V+v)^2 + r^2 \cdot \omega^2$ olur. Böylece 3.30 nolu ifade aşağıdaki gibi olur.

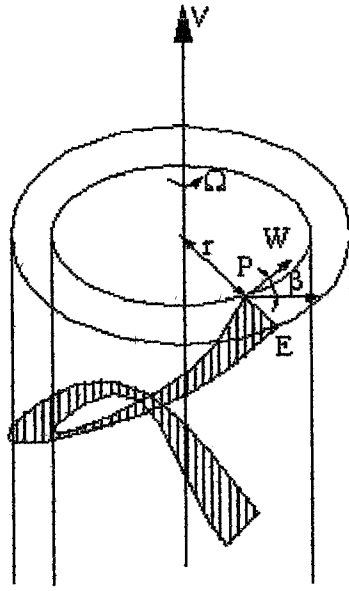
$$(P - \Pi) / \rho = r^2 \cdot \omega \cdot [\Omega - (\omega / 2)] - v \cdot [V + (v / 2)] \quad (3.31)$$

Bu ifade akış için kesin sonuç verebilecek bir eşitliktir. Eğer P'nin pozisyonu dairesel koordinatlarda (r, θ, z) ile tanımlarsak z , O merkezi ile akım yönü arasındaki mesafedir. P, basınçtır ve ω ise bu üç koordinatın fonksiyonu olan açısal hızdır [Milne, 1966].

3.7. Hızların Birbirleri İle Olan İlişkileri

Vorteks sisteminde bahsedilen hızlardaki artışlar, hızlarda girişim olarak bilinir. Bu hız üç adet bileşene sahiptir ki bunlar eksenel, radyal ve teğetsel bileşenlerdir. Teğetsel bileşen akım bölgesi içinde dikkate aldığımız noktadan geçen dairesel kesite teğet olan hızdır.

Kabul: Radyal bileşen ihmal edilmiştir [Milne, 1966].



Şekil 3.8. Disk düzlemi içindeki girişim hızları

Disk düzlemi içinde, akım yönü doğrultusunda Şekil 3.8’de gösterildiği gibi girişim hızı oluşur. Eksenel bileşeni rotor ilerleyiş yönünün tersi yöndedir, teğetsel bileşen ise dönme yönündedir. Böylece rotor rölatif olarak eksenel bileşenlerin toplamı $V.(1 + a)$ ’ya yükselir ve teğetsel bileşenlerin toplamı ise $r.\Omega.(1 - \bar{a})$ ’ne azalır. a ve $\bar{a}$ sayıları girişim faktörü olarak adlandırılır, rotor için her ikisi de pozitif değer alır [Milne, 1966].

Disk in arkasında, P_1 noktasından r kadar radyal uzaklıkta bulunan P_2 noktasını göz önüne alalım. Sınırlarda oluşan simetrik rüzgar hareketlerinden dolayı bu noktalarda eksenel hız oluşmaz böylece P_1 ve P_2 noktalarında indüklenen toplam eksenel hız eşit olur. Sonuçta aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$v = a.V = \frac{1}{2}.v_1 \quad (3.32)$$

Sınır yüzeydeki rüzgar hareketleri yüzünden P_1 noktasında $\dot{\omega}$, açısal hızı oluşursa simetriklikten dolayı P_2 noktasında da $-\dot{\omega}$ açısal hızı oluşur. Böylece P_1 noktasında indüklenen toplam açısal hız $\frac{1}{2}.\omega_1 + \dot{\omega}$ şeklinde ve P_2 noktasında indüklenen toplam açısal hız ise $\frac{1}{2}.\omega_1 - \dot{\omega}$ şeklinde yazılabilir ama P_2 noktasında meydana gelen akış rotasyonel olmadığından $\frac{1}{2}.\omega_1 - \dot{\omega} = 0$ yazılmalıdır. Böylece hem sınır hem de serbest akış

esnasında P_1 noktasında meydana gelen hızların toplamı $\omega_1 = 2 \cdot \dot{\omega} = 2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \Omega$ 'dır [Milne, 1966].

3.8. Sonsuz Sayıda Kanat Kullanımı

Eğer rotor sonsuz sayıda kanattan oluşuyorsa ve her bir kanat toplam trastın çok küçük bir kısmını taşıyorsa, sistemin durumu (hali) dikkate değer bir basitlik kazanır, yani momentum prensibi kolaylıkla uygulanabilir. Şekil 3.7'den faydalanarak AA' ve GG' ile sınırlanan hacimde meydana gelen hava akışı dikkate alınmalıdır. Akımın meydana geldiği bölgenin önünde V hızı dönme eksenine paraleldir ve basınçta Π 'dir. Akışın meydana geldiği bölgenin arkasındaki bir noktada hava akımı silindirik bir form alır. Akımın meydana geldiği bu bölgede p , ω , v değerleriyle p_1 , ω_1 , v_1 değerlerinin karışmaması için '1' indisi kullanılmıştır ve yalnızca r 'nin fonksiyonudurlar, θ açısının bir fonksiyonu yoktur. Akımın meydana geldiği bu bölgenin çapı $2.R_1$ alınabilir. Akışkana etki eden kuvvetler aşağıda sıralanmıştır.

- a) Trast, T
- b) AA' kesitinde, Π sabit basıncı yüzünden meydana gelen basınç trastı
- c) GG' kesitinde, p_1 basıncı yüzünden meydana gelen basınç trastı
- d) AG , $A'G'$ eğrisel sınır yüzeyde p basıncı nedeniyle meydana gelen basınç trastı

Π sabit basıncı bütün sınır yüzey boyunca uygulandığından herhangi bir kuvvet oluşmaz; b şıkkı ihmal edilebilir ama $(p_1 - \Pi)$ ve $(p - \Pi)$ basınç farklarından dolayı c ve d şıkları dikkate alınmalıdır. T yönünde d şıkkını yeni bir harfle (X) ifade edersek AA' GG' kontrol hacminin dışındaki bileşke kuvvet, momentumdaki net akıya eşit olur. Böylece aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$T + X - \int_0^{R_1} (p_1 - \Pi) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = \rho \cdot \int_0^{R_1} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr (V + v_1)^2 - \rho \cdot V \cdot \int_0^{R_1} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr (V + v_1) \quad (3.33)$$

Sağ taraftaki ikinci integral GG kesitinin dışındaki akı hacmini vermektedir ve süreklilik denklemiyle AA kesitindeki akıya ulaşır. $p_1 - \Pi$ değerinin yerine,

$$p - \Pi = \rho r^2 \cdot \omega \cdot (\Omega - \omega / 2) - v(V + v / 2)$$

ifadesini kullanarak aşağıdaki ifadeyi elde edebiliriz.

$$T + X = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \int_0^{R_1} [r^2 \cdot \omega_1 \cdot (\Omega - 1/2 \omega_1) + 1/2 v_1^2] \cdot dr \quad (3.34)$$

X'i sıfır alabiliriz (daha sonra ispatlanacak).

Akımın meydana geldiği silindirik biçimli bölgede p_1 basıncını değerlendirebilmek için dp_1 , dr 'e göre türevlendirilebilir.

$$dp_1 / dr = r \cdot \omega_1^2 \cdot \rho \quad (3.35)$$

Bunun anlamı dönme eksenine doğru p_1 basıncı azalma gösterir. $r = R_1$ olduğunda $p_1 = \Pi$ olduğundan aşağıdaki ifade elde edilir [Milne, 1966].

$$p_1 - \Pi = -\rho \cdot \int_r^{R_1} r \cdot \omega_1^2 \cdot dr \quad (3.36)$$

3.9. Hava Tüneli İçinde Çalışan Rotor

Çapı 2h olan sonsuz uzunluktaki izoleli silindir tüp içinde çalışan sonsuz sayıda kanada sahip bir rotor sistemi için 3.33 nolu eşitlik geçerlidir. Akımın meydana geldiği silindirik kısmın dışındaki hız sabit ve $V = v_2$ değerine eşit olacaktır. Bu değer süreklilik denklemindeki V hızından daha düşüktür.

$$X + \int_{R_1}^h (p_1 - \Pi) 2\pi r dr = 2\pi \rho \int_{R_1}^h (V - v_2) v_2 r dr \quad (3.37)$$

p_1 akımının meydana geldiği bölgenin dışındaki ortam basıncıdır. Bernoulli teoremi ($\omega = 0$, $v = -v_2$) vasıtasıyla, $p_1 - \Pi = \rho \cdot v_2 \cdot (V - \frac{1}{2} v_2)$, yazılabilir.

3.37 nolu denklemde v_2 , sabit bir hıza sahiptir.

$$X = 2\pi \rho \int_{R_1}^h -1/2 (\dot{v}_2)^2 r dr = -1/2 \pi \rho (h^2 - R_1^2) (\dot{v}_2)^2 \quad (3.38)$$

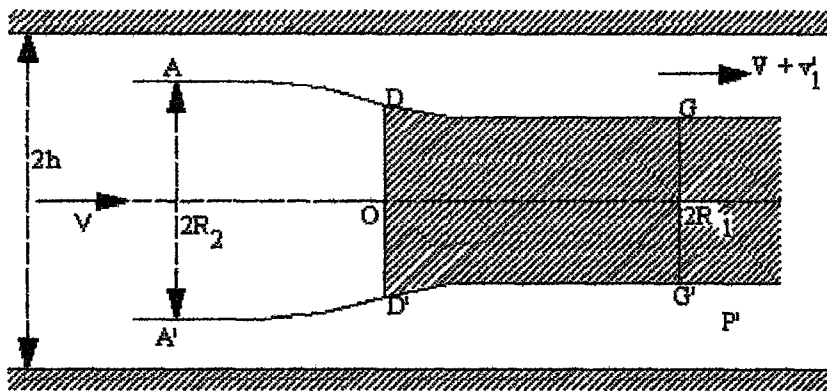
Yukarıda görüldüğü gibi X 'in değeri negatiftir yani trast'a zıt yöndedir Süreklilik denklemi vasıtasıyla şekil 3.9'da görüldüğü gibi akımın genişleme gösterdiği AA kesitinde çap $2R_2$ ise aşağıdaki ifadeleri yazabiliriz.

$$\Pi (h^2 - R_2^2) V = \Pi (h^2 - R_1^2) (V - \dot{v}_2) \quad (3.39)$$

$$\dot{v}_2 = (R_2^2 - R_1^2) v / (h^2 - R_1^2) \quad (3.40)$$

$$X = -1/2 \pi \rho V^2 (R_2^2 - R_1^2)^2 / (h^2 - R_1^2) \quad (3.41)$$

h mesafesi sonsuza giderse, X 'te sıfıra gider.



Şekil 3.9. Hava tüneli içinde çalışan rotor

3.10. Froude Kanunu

Rotor sonsuz sayıda kanada sahiptir.

Kabul : Akışta meydana gelen daralma ihmal edilmiştir.

Akışın meydana geldiği bölgedeki diyaframın yarıçapı R 'dir. AA' ile GG' arası genişlemenin meydana geldiği kısımdır ve akış, diskten sonsuz uzaklıkta meydana gelmektedir. GG' kesitinde dönme ekseninden r kadar radyal mesafede bulunan bir noktanın hızı $V + v_1$ olacaktır, v_1 akımının olduğu bölgede meydana gelen vorteks sistemi içindeki hızdır. Benzer bir şekilde vorteks sistemi içindeki aynı nokta için açısal hız, ω_1 'dir. Böylece GG' 'ne ait bir noktada hızlar $\frac{1}{2}.v_1$, $\frac{1}{2}.\omega_1$ değerine eşit olur. R yarıçaplı diskin herhangi bir noktasında da hızlar $\frac{1}{2}.v_1$, $\frac{1}{2}.\omega_1$ değerine eşit olur [Milne, 1966].

3.11. Girişim Faktörleri

Rotor sonsuz sayıda kanada sahiptir.

Kabul : Akışın meydana geldiği bölgenin karşısında açısal hız, basınç değişiklikleri yaratmaya yeterli değildir. $p_1 = p_2$ 'dir.

r ile $r + dr$ yarıçapları arasındaki dairesel diskten geçen havanın kütlesi akışı $2.\pi.r.dr.\rho.(V + aV)$ 'dir. dT_r ve dQ_r , dairesel diskteki trakt ve moment ise ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$dT_r = 2.\pi.r.dr.\rho.(V + aV).v_1 \quad (3.42)$$

$$dQ_r = r.2.\pi.r.dr.\rho.(V + aV).\omega_1.r^2 \quad (3.43)$$



$$\frac{dT_r}{dr} = 4\pi r \cdot \rho V^2 \cdot a \cdot (1+a)$$

$$\frac{dQ_r}{dr} = 4\pi r^3 \cdot \rho V \cdot \Omega (1+a) \cdot \dot{a} \quad (3.45)$$

$$v_1 = 2aV \quad ; \quad \omega_1 = 2a\Omega \quad (3.46)$$

Kabul : 3.27 nolu formül yalnızca belirli sayıda kanada sahip rotorlar için uygundur.

$$\frac{a}{a+1} = \frac{C_T \cdot \sigma}{2 \cdot (1 - \cos 2\phi)} \quad (3.47)$$

$$\frac{\dot{a}}{1-\dot{a}} = \frac{C_Q \cdot \sigma}{2 \cdot \sin 2\phi} \quad (3.48)$$

$$\tan \phi = \frac{(1+a) \cdot J}{(1-\dot{a}) \cdot \pi \cdot \xi} \quad (3.49)$$

[Milne, 1966].

3.12. Rotor Tasarımı

Büyük kapasiteli rüzgar türbinleri için iki kanatlı rotor kullanmak mali açıdan da optimum bir çözümdür. Ancak küçük kapasiteli türbinlerde üç kanatlı rotorlar tercih edilmektedir.

1941 yılında Vermont'ta Putnam makinesi olarak bilinen rüzgar türbini inşa edilmiştir. 53,34 (m) çapında iki kanatlı rotora sahip bulunmaktaydı. Hewson (Oregon, P.U.D. Yönetici) 1941 yılında Putnam'ın rotoru ile 1971 yılı fiyatlarını mukayese etmiştir. Onun mukayesesi göstermiştir ki iki kanatlı rotorun maliyeti , tüm tesis maliyetinin % 10'nuna tekabül etmektedir. Üç kanatlı rotorun maliyeti ise tesis maliyetinin % 14'üne denk düşmektedir. NASA Lewis laboratuvarlarında 100 (kW) gücünde bir rüzgar

türbini tasarım çalışmalarında rotorun maliyeti, toplam maliyetin % 60'sını, eğer rotor üç kanatlı ise toplam maliyetin % 56'sını içermektedir.



Kanat sayısı ne kadar çok olursa, ilk hareket için o kadar momente ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, redüksiyon miktarı düşük olsa bile çok kanatlı rotorlarda her bir kanadın verimi düşük olacaktır [Koç, 1995].

3.13. Rotor İle Kule Arasındaki İlişki

Birçok bölgede maksimum rüzgar hızı (tornada ve fırtınalar hariç) ortalama rüzgar hızını en az 6 kez aşar. Hem rotor hem de desteği, şiddetli olmayan fırtınalarda meydana gelen rüzgar kuvvetine dayanabilir. Kanat pitch açısına bağlı olarak serbestçe dönen rotorda, aerodinamik drag hareketsiz rotora göre on kez daha fazladır. Özellikle büyük rotorlarda, rotorun baskın bir yapıda olabilmesi için çeşitli drag (sürüklenme) kontrol sistemleri kullanılması zorunludur. Özellikle ufak boyutlu rüzgar türbinlerinde frenleme sistemi veya drag kontrol sistemi merkezkaç kuvvetle, rüzgar hızıyla yada çıkış gücünün seviyesinden faydalanılarak kumanda edilebilir. Rotorda meydana gelecek büyük drag kuvveti, kütlenin devrilmesine neden olacak çok büyük bir moment oluşmasını sağlar. Rüzgar nedeniyle kulede oluşacak yatay gerilmelere, rotorun zorlanmasıyla meydana gelen yatay gerilmelerde ilave edilmelidir. Kule, her yöndeki yatay kuvvete dayanabilmelidir; rüzgar yönündeki değişikliğe bağlı olarak rotor 360° dönebilme serbestliğine sahip olmalıdır.

Rüzgar hızındaki değişiklik kulede titreşimsel kuvvetlerin oluşmasına neden olur. Bu nedenle, kule malzemesinin seçimi malzeme yorulması yüzünden önemlidir. Rüzgar türbinlerinde en önemli potansiyel tehlikelerden biri ise rotorun aşırı hızlanmasıdır. Yüksek hızlara sahip rüzgarlar, serbestçe dönebilen rotorda tehlikeli bir şekilde drag'ın artmasına sebep olduğu gibi rotorun kendi kendisini tahrip etmesine de neden olur. Yapısal sağlamlık sadece kütlenin dayanımına değil aynı zamanda kontrol sistemine de bağımlı bulunmaktadır. Kütle gerekenin on katı sağlam yapılsa bile, kontrol sistemi güvenilir değilse tahrip olur.

3.14. Rotorun Yeri

Günümüzdeki tasarımlarda rotor, rüzgarı arkasına alacak şekilde yerleştirilmektedir. Eğer rotor rüzgarı önüne alırsa, rüzgar rotordan geçerken oluşan hava akımı kütle üzerindeki rüzgar kuvvetlerinin değişmesine (titreşime) neden olur.

Eğer rotor rüzgarı arkasına alırsa, kütledeki titreşimler azalır. bu nedenle titreşimler kanat üzerinde toplanır; çünkü onlar kütle nedeniyle oluşan hava akımı vasıtasıyla taşınır. Kulenin parçalanması yerine kanadın parçalanması daha az bir felakettir. Başka bir deyişle, kanattaki başarısızlığın getireceği felaket, kulede meydana gelecek bir felaket demektir.



4. GÜÇ HAKKINDA BİLGİLER

4.1. Faydalı Güç

Sistemden elde edilen güç, faydalı güç olarak tarif edilir.

$$P_f = \frac{1}{2} \rho A V^3 \eta_t \quad (4.1)$$

η_t : sistemin toplam verimi

Pratikte ise bir rüzgar enerji sisteminin faydalı gücü aşağıdaki şekilde kabaca tahmin edilebilir [Habali, 1999]

$$P_f = (0,1 - 0,3) \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.2)$$

4.2. Rotorun Faydalı Gücü

Rüzgar rotorunun gücü,

$$N_{\max} = \frac{8}{27} \rho F V^3 \quad (4.3)$$

A: Rotor kesit alanı,

V: Rüzgar hızı.

eşitliği ile gösterilen teorik maksimum güçten uygulamada tam olarak yararlanılamaz. Hava sürtünmesinden ve girdap oluşumundan dolayı, rotorda bazı kayıplar ortaya çıkar. Bu kayıplar rotorun ϕ ile gösterilen iyilik derecesi üzerinde etkili olmaktadır. Mekanizmanın η , tesirlik derecesi ve rotorun ϕ ile gösterilen iyilik derecesi göz önüne alınarak, rotorun yararlı gücü (efektif gücü), için,

$$N_e = \eta \phi \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (4.4)$$

eşitliği yazılabilir. 15 (°C)'de ve 760 (mmHg) basıncında yeryüzündeki ortalama hava yoğunluğunun MKS birim sistemindeki 1/8 (kgs²/m⁴) olan değeri yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa,

$$N_e = \eta \varphi \frac{16}{27} \frac{1}{16} V^3 A \quad (4.5)$$

bulunur. Buradaki φ . 16/27 terimi güç katsayısı olarak adlandırılır ve c_1 ile gösterilirse maksimum yararlı güç olarak,

$$(N_e)_{\max} = \eta c_1 \frac{1}{16} V^3 A \quad (4.6)$$

elde edilir. Maksimum yararlı güç ve maksimum teorik güç değerleri göz önüne alınarak, rotorun toplam tesirlik derecesi η_t bulunabilir.

$\varphi = 1$ olarak kabul edildiğinde, maksimum gücü ifade eden $(c_1)_{\max}$ için; $16/27 = 0,592592592 = 0,6$ bulunur.

Uygulamada bu maksimum güç değerine hiçbir zaman ulaşamaz. Rüzgar kanalındaki denemeler sırasında en fazla $c_1 = 0.45$ değeri elde edilmiştir. Hesapları emniyetli yapabilmek için c_1 'in 0.38 değeri, mekanik tesir derecesi olarak $\eta = 0.8$ değeri alınır ve aynı zamanda süpürme değeri için,

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = 0.78 D^2 \quad (4.7)$$

eşitliğine göre bulunan değer formülde yazılıp beygir gücü (BG) ve kilowatt (kW) birimlerine göre dönüşümlerde yapılırsa, sonuç olarak yararlı (efektif) güç için aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir.

$$N_e = 0,8.0,38.\frac{1}{16}.V^3.0,78.D^2 = 0,0147.V^3.D^2 \quad (\text{kgf.m/s}) \quad (4.8)$$

$$N_e = \frac{0,0147}{75} V^3 D^2 = 0,000196 V^3 D^2 \quad (\text{BG}) \quad (4.9)$$

$$N_e = \frac{0,0147}{102} V^3 D^2 = 0,000145 V^3 D^2 \quad (\text{kW}) \quad (4.10)$$

Bu eşitliklerde;

N_e : Türbin rotorunun gücü

V : Rüzgar hızı (m/s)

D : Süpürme alanı çapı (m)'dir.

Yukarıdaki eşitliklerin bulunuşu sırasında $c_1 = 0,38$ kabul edilmiştir. Çeşitli kanat profilleri ile rüzgar tüneline yapılacak denemelerden elde edilecek güç emsal değerlerini göz önünde tutarak, yararlı gücün hesaplanması en doğru yoldur. Böylece çeşitli kanat profilleri için farklı katsayıları olan efektif güç eşitlikleri elde edilmektedir. Betz ve Noetzelin adlı bilim adamlarının tavsiye ettiği emsal değerlerine göre güç eşitlikleri yazılırsa,

$$N_e = 0,000214.V^3.D^2 \quad (\text{kW}) , \text{Betz} \quad (4.11)$$

$$N_e = 0,000185.V^3.D^2 \quad (\text{kW}) , \text{Noetzelin} \quad (4.12)$$

bulunur. Bu eşitliklerde rüzgar hızının (m/s) ve süpürme alanı çapının (m) olarak alınması gerekmektedir.

Yapılan denemeler, kayıpları azaltıp verimi artırabilmek için rüzgarın geçtiği çark çapının 1/3'ü kadar bir çapa sahip olan ve merkezden geçen daire alanının boş bırakılması gerektiğini göstermiştir. Rotor çapının gerçek değerinin D_1 ile ve süpürme alanı çapını da D_2 ile gösterirsek sonuç olarak,

$$D_1^2 \cdot \frac{\pi}{4} - \left(\frac{D_1}{3}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} = D_2^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (4.13)$$

bulunur. Bu eşitlikten faydalanılarak D_1 çapı, D_2 'ye göre bulunabilir [Sayındı, 1994].

$$D_1 = \frac{3}{\sqrt{8}} D_2 \quad (4.14)$$

4.3. Rüzgar Gücü

Hava hareketleri rüzgar olarak tanımlanır. Yerçekimi, dünyanın dönmesinden oluşan saptırıcı kuvvetler yada rüzgarın izlediği yol yüzünden oluşan merkezkaç kuvvetler hava hareketlerine sebep olabilir. Rüzgar kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar durulsun veya hızı kesilsin diye yada yönü değiştirilsin diye hareket halinde olan havanın önüne bir cisim konulduğu zaman, kinetik enerjinin bir kısmı yada tümü potansiyel enerjiye dönüşür. Serbestçe akan rüzgarın önüne konulan herhangi bir engel, farklı basınç kuvvetlerinin oluşmasına sebep olur. Bu kuvvetler rüzgarın hızına, yönüne, estiği bölgeye ve cismin şekline bağlı olarak değişir.

Bir cisim üzerine etki eden dinamik kuvvetler tasarım amacıyla statik basınca eşdeğer olarak alınabilir. İdeal akışkanlar için Bernoulli teoremi aşağıda verilmiştir.

$$\rho \cdot \frac{V_0^2}{2} + P_0 = \rho \cdot \frac{V^2}{2} + P \quad (4.15)$$

$$q_0 + P_0 = q + P \quad (4.16)$$

ρ : Havanın yoğunluğu

P : Statik basınç

V_0 : Serbest akış hızı

P, V : Cismin herhangi bir noktasındaki statik basınç ve hız

Formüldeki $\rho V^2/2$ ifadesi q ile gösterilen dinamik basınçtır. Kısacası her bir noktaya etki eden dinamik ve statik basınçların toplamı sabittir. Genellikle kuvvetin şiddetini belirlemede boyutsuz katsayıları kullanmak, rüzgar kuvvetini radyal ve eksenel bileşenlere ayırarak hesap etmek daha kullanışlıdır.

$$F_D = C_D \cdot q \cdot A \quad (4.17)$$

$$F_L = C_L \cdot q \cdot A \quad (4.18)$$

F_D, F_L : Sürüklenme ve kaldırma kuvveti

C_D : Sürüklenme katsayısı

C_L : Kaldırma katsayısı

A : Projeksiyon alanı

C_D ve C_L katsayılarının değerleri rüzgarın tesiri altında bulunan cismin şekline bağlıdır.

4.3.1. API Rüzgar Kuvveti

Sahil kıyılarındaki binalara etki eden rüzgar kuvvetini hesaplayabilmek için Amerikan Petrol Enstitüsü'nün tavsiye ettiği formül aşağıda verilmiştir.

$$F = 0,00256 \cdot V^2 \cdot C_G \cdot A \quad (\text{İngiliz birim sisteminde}) \quad (4.19)$$

$$F = 0,0473 \cdot V^2 \cdot C_G \cdot A \quad (\text{Metrik birim sisteminde}) \quad (4.20)$$

F : Rüzgar kuvveti, lb veya Newton

V : Deniz seviyesinden 10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı, mph yada kh/h

C_G : Şekil katsayısı

A : Projeksiyon alanı ft^2 veya m^2

API'nin tavsiye ettiği şekil katsayıları aşağıda verilmiştir.

Kirişlerde : 1,5

Bina cephelerinde : 1,5
 Silindirik bölgelerde : 0,5
 Projeksiyon alanında : 1,0

API formülasyonundaki yükseklik faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$V = V_{10} \cdot \left(\frac{y}{10}\right)^x \quad (4.21)$$

V_{10} : Deniz seviyesinden 10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı

y : Deniz seviyesine göre yükseklik

x : Deniz haline, karadan olan mesafeye ve rüzgar tasarım hızının süresine bağlı olarak 1/13 ile 1/7 arasında alınabilir. API'ye göre x : 1/13 (bora için), x : 1/7 (sürekli rüzgar için) alınmalıdır.

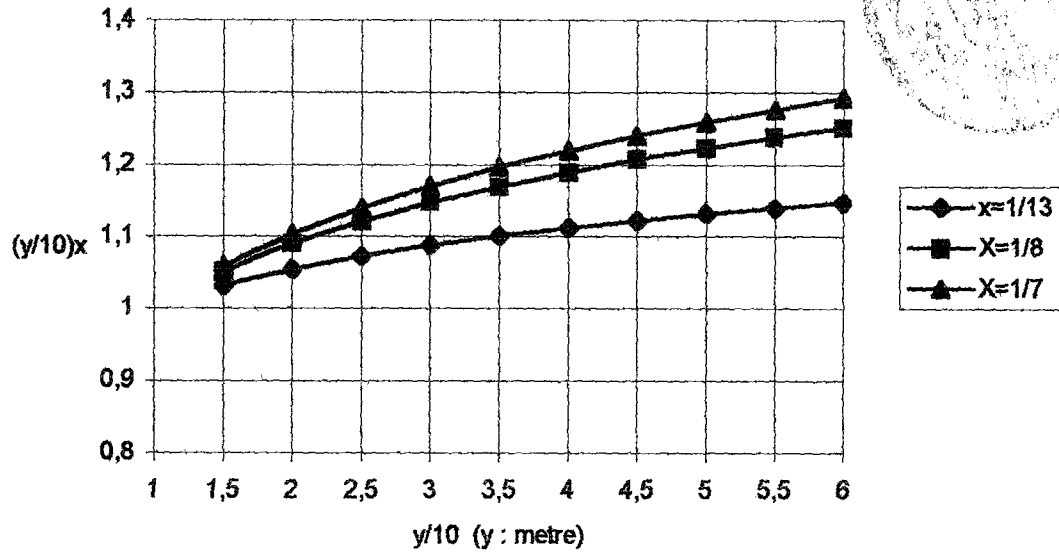
API'ya göre,

$x = 1/13$, bora için,

$x = 1/7$, sürekli rüzgar için alınmalıdır [Koç, 1995].

4.3.2. ABS Rüzgar Kuvveti

Amerikan Denizcilik Dairesi'nin, rüzgar kuvvetinin hesaplanmasında kullanıldığı formül aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1. API yükseklik faktörü

$$F = 0,0623 \cdot V_k^2 \cdot C_h \cdot C_s \cdot A \quad (\text{Metrik birimler ile}) \quad (4.22)$$

$$F = 0,00338 \cdot V_k^2 \cdot C_h \cdot C_s \cdot A \quad (\text{İngiliz birimler ile}) \quad (4.23)$$

F : Rüzgar kuvveti, kp yada lb

V_k : Rüzgar hızı, m/s yada knot

C_h : Yükseklik katsayısı

C_s : Şekil katsayısı

A : Projeksiyon alanı, m² veya ft²

Deniz seviyesinden itibaren yüksekliğe bağlı olarak ABS'nin tavsiye ettiği yükseklik katsayısı aşağıda verilmiştir.

0-15 (m) : 1,00

16-30 (m) : 1,10

31-46 (m) : 1,20

47-61 (m) : 1,30

62-76 (m) : 1,37

77-91 (m) : 1,43



ABS' nin tavsiye ettiği şekil katsayıları aşağıda verilmiştir.

Silindirik şekiller	: 0,5
Fındık kabuđu řeklindeki yůzeyler	: 1,0
Tek katlı ev	: 1,0
Ayrık nizamlı binalarda	: 1,5
Deniz seviyesinin altındaki bůlgelerde	: 1,0
Gemi vinci	: 1,25





5. ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

5.1. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemleri

Rüzgarın taşıdığı kinetik enerjiyi toplayan ve diğer enerji türlerine çeviren makinalara Rüzgar Makinaları yada Türbinleri adı verilir. Rüzgar enerjisi sisteminin tümünü, rüzgar türbini ve yük oluşturur. Tipik bir rüzgar türbini aşağıdaki kısımlardan oluşur. Bunlar,

- a) Rotor (kanatlar ve göbek)
- b) Hız yükseltici
- c) Enerji dönüşüm sistemi (Jeneratör)
- d) Kontrol sistemi
- e) Kule'dir

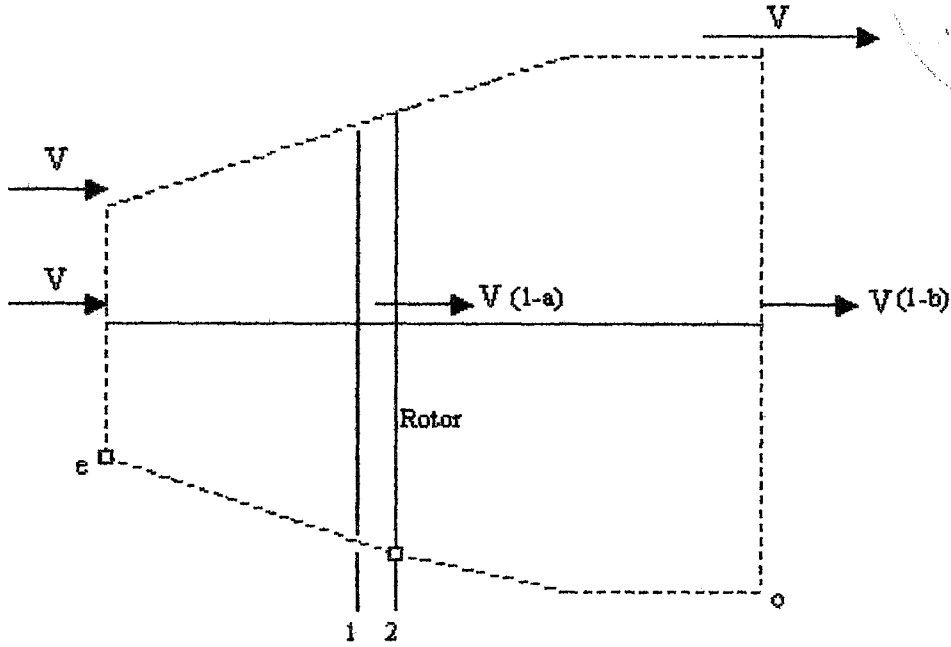
5.2. Rüzgar Enerjisi

Yatay eksenli rüzgar türbinine yaklaşan havanın r yarıçaplı silindir içinde aktığını farz edelim. r , disk yada rotorun yarıçapıdır. Akış halindeki havadan güç elde edilebilir.

$$\bar{P}_i = 1/2 \cdot \bar{m} \cdot V^2 = 1/2 \cdot (\rho \cdot A_r \cdot V) \cdot V^2 = 1/2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot V^3 \quad (5.1)$$

Fomülasyonda ρ , havanın yoğunluğu; C , havanın akış hızı ve $\bar{P}_i$ ise güç'tür.

Aerodinamik faktörler yüzünden teorik güç, $\bar{P}_i$ gücünden daha düşük olacaktır. Şekil 5.1'de rotor diski boyunca kontrol hacminde havanın akışı gösterilmektedir. e bölgesinde hava, kanatlara doğru akarken değişken V hızına sahiptir. Kanat bölgesindeki basınç, P_o : Atmosferik basınç, P_a : Akışın olduğu alan, A_o , bu alan $\pi \cdot r^2$ değerinden daha azdır; kanat yarıçapı, r' 'dir.



Şekil 5.1. Rüzgar türbini rotorundan hava akışı

Kanatların süpürdüğü alanda hava hızı $V \cdot (1-a)$ değerine düşer. a , girişim faktörüdür ve değeri 1'den küçüktür.

P_1 basınca, P_e basıncından daha yüksektir. Sıkıştırılmaz akışkanların akımı için enerji denklemini yazabiliriz.

$$(P_e - P_1) / \rho = (V_1^2 - V_e^2) / 2 = [V^2 \cdot (1-a)^2 - V^2] / 2 \quad (5.2)$$

Hava kanatlarından akarken basıncı düşer böylece $P_1 > P_2$ olur. Kanatlardaki akım esnasında hava basıncı düzenli olarak artana kadar hava hızı düşmeye devam eder taki atmosferik basınca eşit oluncaya kadar böylece $P_o = P_a$ olur. o bölgesinde $V_o = V \cdot (1-b)$ ve $b > a$ olmaktadır. Enerji eşitliğini yeniden yazarsak,

$$(P_2 - P_o) / \rho = (V_o^2 - V_2^2) / 2 = [V^2 \cdot (1-b)^2 - V^2 \cdot (1-a)^2] / 2 \quad (5.3)$$

olur. Yukarıdaki eşitlikler birbirleri ile birleştirilebilir ve $P_o = P_e = P_a$, alınabilir.

$$P_1 - P_2 = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot [1 - (1-b)^2] \quad (5.4)$$

Rotordan elde edilen aksenal trast (itme kuvveti) ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$F_x = (P_1 - P_2) \cdot A_r = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_r \cdot [1 - (1-b)^2] \quad (5.5)$$

Eksenel trast, momentum eşitliği ile ifade edilebilir.

$$F_x = \bar{m} \cdot (V_e - V_o) \quad (5.6)$$

$$\bar{m} = \rho \cdot A_r \cdot V \cdot (1-a) \quad (5.7)$$

$$V_e = V \quad ; \quad V_o = V \cdot (1-b) \quad (5.8)$$

Böylece aksenal trast aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F_x = \rho \cdot A_r \cdot V \cdot (1-a) \cdot [V - V \cdot (1-b)] \quad (5.9)$$

veya

$$F_x = \rho \cdot A_r \cdot V^2 \cdot (1-a) \cdot b \quad (5.10)$$

yazılabilir. Eksenel trast ifadelerinin eşitliklerinden $b=2a$ yazılabilir.

Rotordan akan hava ile akışın gerçekleştiği bölge arasında bir ilişki vardır. e bölgesinde hava hızı, V ; akışın gerçekleştiği bölgenin enine kesiti πr^2 'den daha azdır. $\pi \cdot r^2$ ise kanatların süpürdüğü alandır. Akım yönündeki o bölgesinde hava hızı $V \cdot (1-2a)$ değerine eşittir, akımın gerçekleştiği bölgenin enine kesiti $\pi \cdot r^2$ değerinden daha büyüktür. Böylece hava hızı V değerinden $V \cdot (1-a)$ ve daha sonrada $V \cdot (1-2a)$ değerine düşer.

$V \cdot (1-a)$ hız değerinden faydalanılarak kanatlardan akan kütle sel hava miktarı bulunabilir.

$$\bar{m} = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot V \cdot (1-a) \quad (5.11)$$

Kinetik enerji değişimi, hava hızının C' den $C.(1-2a)$ değerine düşen değişimle orantılıdır.

$$\bar{E}_k = 1/2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot V \cdot (1-a) \cdot [V^2 \cdot (1-2a)^2 - V^2] \quad (5.12)$$

Havanın kinetik enerjisindeki değişim miktarı ile teorik güç miktarı hesap edilebilir.

$$P_{th} = -\bar{E}_k = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot a \cdot (1-a)^2 \quad (5.13)$$

Yukarıda formülize edilen teorik rotor güç ifadesinde rotasyonel ve sürüklenme kayıp katsayıları ihmal edilmiştir.

P_{th} 'nin maksimum değeri önemlidir. $a \cdot (1-a)^2$ ifadesini a 'nın 1/3 değeri için formülasyondan uzaklaştırsak maksimum teorik verim aşağıdaki gibi olur.

$$\bar{P}_{max} = 8/27 \cdot \pi \cdot \rho \cdot r^2 \cdot V^3 \quad (5.14)$$

5.1 ve 5.14 nolu denklemler karşılaştırıldığında havadan elde edilen gücün % 59.3'ü rotordan alınabilecek maksimum teorik güçtür. Güç katsayısı 0.593 Betz limiti olarak bilinir.

Akışkan kayıpları yüzünden, rotor kanatlarından elde edilen gerçek güç $\bar{P}_{max}$ değerinden daha düşüktür. Dönüşüm verimi, rotorun konstrüksiyonuna ve hız oranına yani değişken rüzgar hızlarında kanattan elde edilen hıza bağlı bulunmaktadır. Üç kanatlı rotorda iyibir aerodinamik tasarım için hız oranı 5-7 civarlarında olmalıdır bu taktirde dönüşüm oranı 0.75 civarında olur. Böylece, $\bar{P}_a = 0.75 \cdot \bar{P}_{max}$ olur. Amerikan çok kanatlı tip rotorda ve Hollanda yapısı dört kollu rotorda dönüşüm verimi nispeten düşüktür. Bu

tip rotorlar düşük hız oranlarında ve yüksek moment ihtiyacının gerektiği yerlerde kullanılmaktadır.

Elde edilen çıkış gücü rotor çapının karesiyle doğru orantılı olduğu için rotor kanat boylarının uzatılmasının avantajı vardır [Patel, 1999].

5.3. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Kullanılması

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi geçmişte hububat öğütülmesi ve su pompalanması esnasında kullanılmıştı. Bu işler rüzgar gücüyle rahatlıkla yapılabilirdi, aralıklarla esen rüzgarlarda ise pek çalışmıyordu.

Gelişmiş ülkeler, rüzgar enerjisinden faydalanarak elektrik enerjisi üretebileceklerini düşünmüşlerdir. Gerekenler ise jeneratör ile DC-AC dönüştürücüdür. Enterkonnekte şebekeden elektrik enerjisi ulaştırılamayacak kadar uzak bölgelerde, DC jeneratör kullanılarak enerjinin depolanmasının gerektiği yerlerde büyük uygulama alanı bulunmaktadır.

Rüzgar Gücü: Rüzgar, hava hareketi olduğundan aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$P_w = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (5.15)$$

Formülasyonda P_w , güç (Watt); A, referans alanı (m^2); V, rüzgar hızı (m/s); ρ , hava yoğunluğu (kg/m^3)'tür. Güç ifadesinde V hızının küpü alındığından, rüzgar hızının ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Bir bölgedeki rüzgar hızı sürekli değişkendir bu yüzden Yoğunluk Fonksiyonu $f(v)$ veya Dağılım Fonksiyonu $F(v)$ 'ye göre modellenebilir. Rüzgar modellenmesinde, Weibull dağılımı çok fazla kullanılır.

$$F(v) = 1 - \exp[-(v/\alpha)^\beta] \quad (5.16)$$

$$f(v) = \beta \cdot (v^{\beta-1} / \alpha^\beta) \cdot \exp[-(v/\alpha)^\beta] \quad (5.17)$$

α ve β parametreleri, her çalışma periyodunda elde edilen bilgilere göre yeniden hesap edilir genellikle bu çalışma ayda bir gerçekleştirilir. α ve β parametreleri ortalama ifadesi, m_v ve fark ifadesi α_v^2 'den faydalanılarak hesaplanabilir.

$$m_v = \alpha \cdot \Gamma \cdot (1 + 1/\beta) \quad (5.18)$$

$$(\alpha_v / m_v)^2 = [\Gamma \cdot (1 + 2/\beta) / \Gamma^2 \cdot (1 + 1/\beta)] - 1 \quad (5.19)$$

Ortalama ifadesi, ilgili bölgenin potansiyeli hakkında bilgi verilebilir. Bazı durumlarda, rüzgar hızındaki değişikliklerin sıklığı bilinirse uygun bir β değeri ve α değeri seçilebilir. Rüzgar rejiminde çok fazla değişiklik yoksa β değerinin 4 civarında seçilmesi uygun olur.

α ve β 'ya ilave olarak, rüzgar rejiminin karakterize edilmesinde bazı parametreler kullanılır. Aşağıda bunlar ifade edilmiştir.

$$\text{Ortalama Rüzgar Hızının Küpü: } \langle v^3 \rangle = \int_0^\infty v^3 \cdot f(v) \cdot dv \quad (5.20)$$

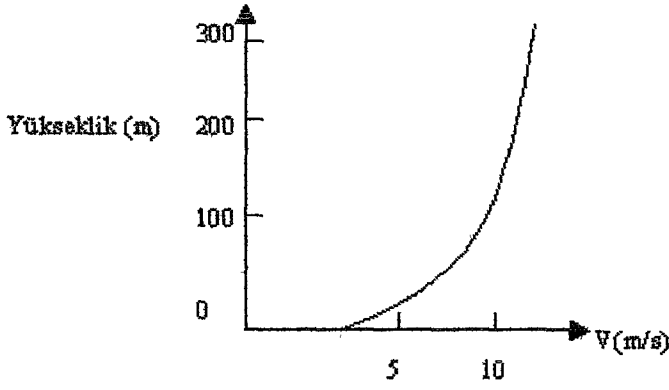
$$\text{Küp Faktörü: } K_c = [\langle v^3 \rangle]^{1/3} / m_v = \alpha^3 \cdot \Gamma \cdot (1 + 3/\beta) \quad (5.21)$$

(Weibull modeli için)

$$\text{Ortalama Güç Yoğunluğu: } P_{av} = 1/2 \cdot \rho \cdot (v^3) \quad (W/m^2) \quad (5.22)$$

$$\text{Enerji Faktörü: } K_{op} = (v^3) / m_v^3 = K_c^3 \quad (5.23)$$

Tipik rüzgar hızlarında, K_{op} 'in değeri 1.5 ile 3 arasında alınabilir.



Şekil 5.2. Yüksekliğe bağlı olarak ortalama rüzgar hızındaki değişim

Şekil 5.2.'de yüksekliğin fonksiyonu olarak rüzgar hız dağılım grafiği verilmiştir. Anemometreler genellikle deniz seviyesinden 10 (m) yükseklikteki irtifada kullanılır.

h metre yükseklikteki rüzgar hızı, 10 (m) yükseklikteki referans rüzgar hızı ile yüksekliğin $1/7$ 'inci kuvvetinin çarpımıyla hesaplanabilir.

$$(V / V_{10m}) = (h / 10)^{1/7} \quad (5.24)$$

Yukarıdaki güç ifadesinde, $h/10$ değerinin $1/7$ 'inci kuvvetinin alınması yüzey pürüzlülüğü ve diğer arazi şartları ile ilgili faktörlere bağlı bulunmakta ve değeri 0.1 ile 0.3 arasında değişebilmektedir. Arazi ile ilgili bazı bilgilerin eksikliği nedeniyle $1/7$ değerini almak yeterli olmaktadır. Enerji dönüşüm sistemlerinde güçlü destekleri olan kule kurmak her zaman avantajlıdır [Patel, 1999].

5.4 Rüzgar Gücü-Elektrik Gücü Dönüşümü

Rüzgar gücü kolaylıkla rotasyonel mekanik enerjiye çevrilebilir. Rüzgar-Elektrik enerjisi dönüşüm sisteminde güç çıktısı aşağıdaki ifadeyle tarif edilir.

$$P_o = 1/2 \cdot \rho \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot \eta_p \cdot A \cdot C_p \cdot V^3 \quad (5.23)$$

Formülasyonda P_o , elektriksel güç; η_g ve η_m , sırasıyla jeneratör ve mekanik verim; η_p ise güç ikmal verimidir. Bu verimler ile performans katsayısının çarpımı 0.20 ile 0.35 değerleri arasında olmaktadır.

Elektrikli aletler için gerekli olan enerjinin dönüşümünden çok, rüzgar türbininin sabit hız yada buna yakın bir hızdamı yoksa değişken bir hızdamı çalıştığı daha önemlidir. Sabit hız ya da sabit hıza yakın değerlerde türbin çalıştırıldığında, güç katsayısı C_p , yalnızca rüzgar hızının fonksiyonu olmaktadır. Eğer değişken rüzgar hızlarında türbinin çalışması gerekiyorsa türbin optimum bir C_p değerinde çalıştırılmalıdır böylece rüzgar enerjisinin büyük bir kısmından faydalanılmış olur.

Sabit yada sabite yakın hızlar için senkronize, indüksiyon jeneratörü kullanmak gerekir. Türbinin değişken hızlarda çalışması gerekiyorsa ve jeneratör çıkışından sabit frekanslı AC gerilim elde edilmek isteniyorsa ilave elektronik devrelere ihtiyaç duyulur. Prototip olarak üretilenlerin çoğu sabit hızda ve senkronize jeneratörle çalışmaktaydı. Değişken hızlarda çalışması gereken türbin-jeneratör grubunda hiç olmazsa hız aralığı sınırlı olmalıdır ki kuleler arası girişimlerden ve rüzgar kesme kuvvetlerinin etkileri yüzünden, çıkış gücünde oluşabilecek osilasyonlar elimine edilebilsin. Gelecekte 5 (MW)'tan daha güçlü türbin-jeneratör gruplarında, rüzgar enerjisi – elektrik enerjisi dönüşüm sistemleri değişken rüzgar hızlarında sabit frekanslı elektriksel güç elde edilebilecektir.

Değişken hızlarda çalışan rüzgar-elektrik enerjisi dönüşüm sistemlerinde sabit frekanslı AC gerilim elde edebilmek için çeşitli uygulamalar mevcuttur. Bunlardan bazıları alternatif akımı doğru akıma dönüştüren alternatörler, doğru akım jeneratörleriyle beslenen hat veya kuvvet komütatörlü invertörler, alternatif akım komütatörlü jeneratörler, alternatif akım-doğru akım-alternatif akım linkler, manyetik alan frekanslarını değiştirebilen jeneratör sistemleridir ve rotordan elde edilen gücü kullanarak bir jeneratör gibi çalışabilirler. Genelde basit jeneratör sistemi, sabit frekanslı alternatif akım üretir. Örneğin senkron invertörler oldukça küçük, ekonomik ve özellikle 50 (kW)'tan daha düşük güçlü olanları çok daha fazla tercih edilmektedir ama harmonik enjeksiyon ile verimli güç çıkışı elde edememe gibi problemlere

sahiptirler ve enerjinin büyük bir kısmı da boşa gider. Manyetik alan frekansını değiştirebilen jeneratör sistemleri, mükemmel kalitede çıkış gücüne sahiptirler ama bu cihazlarında fiyatları çok yüksektir [Heirer, 1998].

5.5. Rüzgar Enerjisi Dönüşümü Sistemlerinin Seçimi

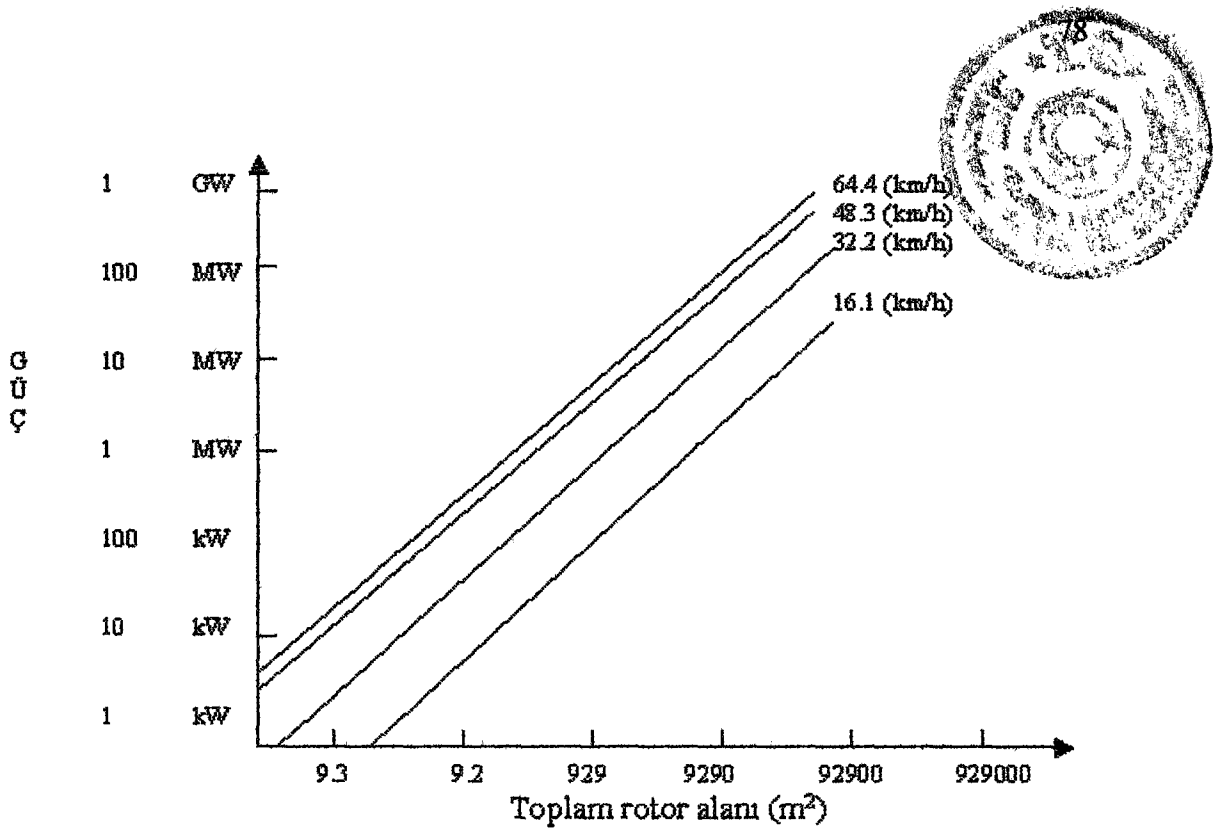
Deniz seviyesindeki bir bölgede sabit hızda ve sabit frekansta elektrik üretmek için seçilmiş rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi, ortalama 29 (km/h)'lik rüzgar hızında, 13 (km/h)'lik hız değerinin altında ve 100 (km/h)'lik hız değerinin üstünde kanatlar boşta dönebilecek şekilde tasarım edilecektir. 240 (km/h)'lik maksimum rüzgar hızına sistem dayanabilmelidir. Müsaade edilebilir maksimum rotor çapı 38 (m)'dir.

5.5.1. Faydalı Rüzgar Gücünün Hesaplanması

Şekil 5.3'de deniz seviyesindeki bir alanda, değişik rüzgar hızlarında, rüzgardan elde edilebilecek faydalı güç değerleri verilmiştir. Maksimum rotor çapının (38 (m)) kullanıldığını farz edersek, akışın meydana geldiği bölgenin alanı $A = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 38^2 / 4 = 1140.1 (m^2)$ yani rotorun süpürdüğü alandır. Şekil 5.3'den faydalanan yatay ekseninde 1140.1 (m²) değerini kullanırsak ve dikey ekseninde de 29 (km/h)'lik rüzgar hız değerini kullanarak elde edebileceğimiz gücün 200 (kW) civarında olacağını bulmuş oluruz.

5.5.2. Uygun Rüzgar Türbininin Seçimi

Her bir rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi üç adet alt sisteme sahiptir. Bunlar aerodinamik sistem, mekanik iletim sistemi (dişliler, şaftlar, yataklar vs.) ve elektrik üretim sistemidir. Şekil 5.3'te değişik tip rotorlar için maksimum güç katsayıları verilmiştir.



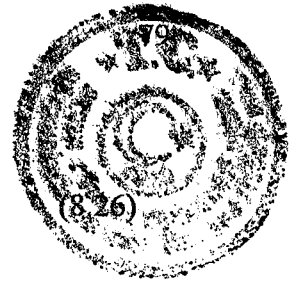
Şekil 5.3. Rotor alanı ile güç arasındaki ilişki

Yatay eksenli üç kanatlı rotora sahip rüzgar türbini – jeneratör grubunda güç katsayısı, C_p 'nin değeri 0.375'tir. Sabit hızlı ve sabit frekanslı tesis kurulurken aşağıdaki sebeplerden dolayı yatay eksenli rüzgar türbini-jeneratör grubu seçilmektedir.

- Güç katsayısı oldukça yüksektir (0.375)
- Müsaade edilebilir kanat çapı (38 (m)), üç kanatlı rotor tasarım etmek için uygundur.
- Üç kanatlı rotor, 29 (km/h)'lik ortalama rüzgar hızında verimli çalışabilmektedir.
- Sabit hız ve sabit frekans elde edilmesinde üç kanatlı rotorlar uygundur.

5.5.3. Rüzgar Türbininden Elde Edilebilecek Maksimum Elektriksel Çıkış Gücünün Hesaplanması

Rüzgar türbininde, rüzgar gücü P_w , mekanik güç, P_m 'e dönüştürülür. Herhangi bir rüzgar türbini için $P_m = C_p \cdot P_w$ 'dir. Jeneratör vasıtasıyla da mekaniksel güç, elektriksel gücü çevrilir. Her bir sistem için uygulanabilirlik verimi vardır yani aerodinamik sistem için C_p , mekanik sistem için η_m (genellikle de dişliler için) ve jeneratör için ise η_g 'dir. Elektriksel güç,



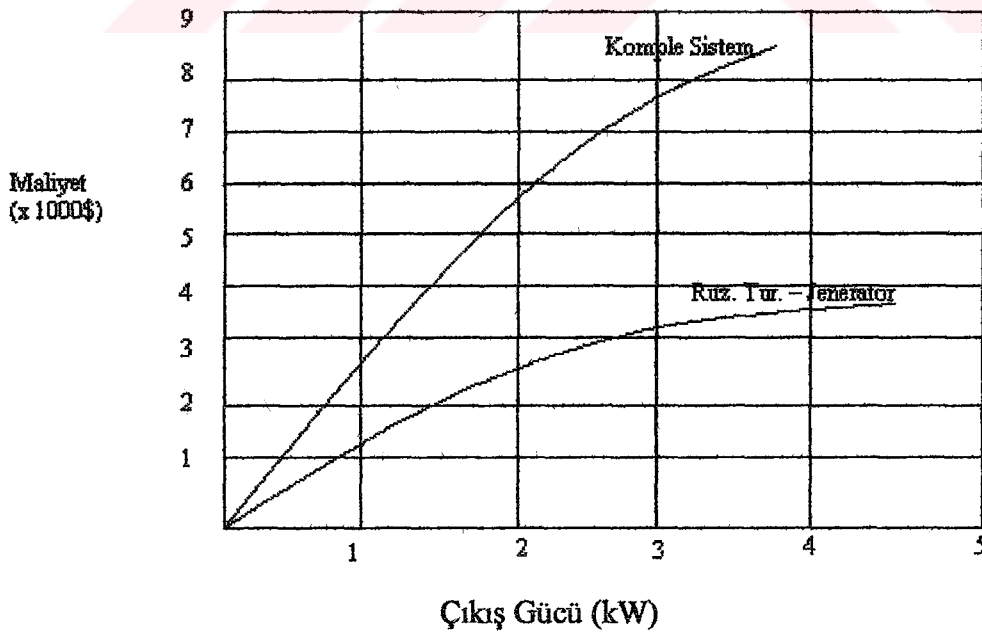
$$P_o = P_w \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

şeklinde ifade edilir. Burada yapılacak tasarımda $\eta_m = 0,93$, $\eta_g = 0,85$ alınabilir [Habali and Saleh, 1999].

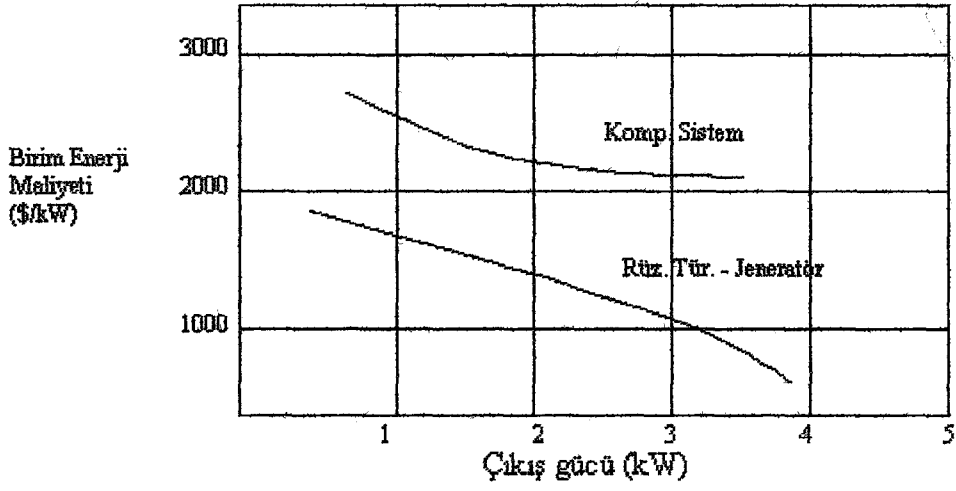
5.5.4. Türbin Fiyatının Hesaplanması

Şekil 5.4 ve 5.5’de ufak boyutlarda klasik bir rüzgar türbininin ürettiği elektriksel güce bağlı olarak maliyet eğrileri verilmiştir. 5 (kW) gücünde bir rüzgar türbininin 12.000 (\$)’a malolacağı tahmin edilmektedir başka bir deyişle her bir kW başına 2.400 (\$) harcanacağı tahmin edilmektedir. İlk yıl için bu fiyatlar rahatlıkla kullanılabilir gerekiyorsa enflasyon nedeniyle gerekli ayarlamalarda yapılmalıdır.

Hesaplamalarla ilgili açıklamalar: Seçilen rüzgar türbini ile pompalama, akü şarj etme ve enterkonnekte şebekeyi beslemede de kullanılabilir. Üreticiler hesaplarını deneylerle kontrol edebilir sonuçta da iyi bir karar verilebilir. Yüksek fiyatlı rüzgar türbini kulelerinden ve büyük rotor kullanımından sakınılmalıdır [Sayındı, 1994].



Şekil 5.4. Rüzgar türbini maliyeti-çıkış gücü ilişkisi (Ortalama rüzgar hızı 38.6 ile 40.2 (km/h) arasında [Sayındı, 1994].

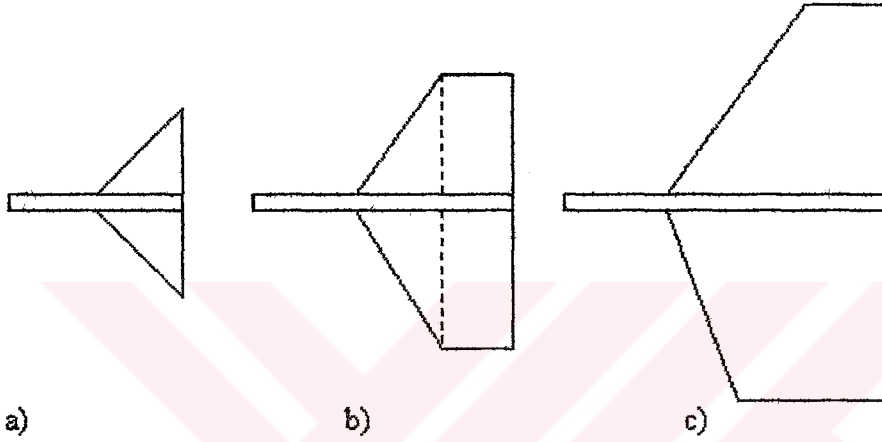


Şekil 5.5. Birim enerji maliyeti (Ortalama rüzgar hızı 38.6 ile 40.2 (km/h) arasında) [Sayındı, 1994].

6. RÜZGAR TÜRBİNİNİN ELEMANLARI

6.1. Kılavuz Kuyruk

Rotorun rüzgara yönelmesi kılavuz kuyruk vasıtasıyla sağlanır. Çeşitli tipte kuyruk yüzeyleri şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Kuyruk yüzeyleri (c şıkkı en kullanışlı olanıdır)

6.2. Platform ve Kule

Sistemin ve kılavuz kuyruğun bağlanacağı platform, kule eksenini etrafında dönebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Platform çelik konstrüksiyonla imal edilir. Bir mil vasıtasıyla konik ve bilyalı radyal rulmanlarla yataklanır.

Kule, sistem büyüklüğüne göre boru, çelik konstrüksiyon veya takviyeli betondan yapılır [Tolun, 1995].

6.3. Yataklar ve Jeneratör

Çevirici olarak doğru akım veya değişken frekanslı alternatör, senkron ve indüksiyon jeneratörleri kullanılır. Rotor devrini jeneratör devrine yükseltmek için hız değiştiricilere ihtiyaç vardır.

Güç iletim elemanlarının yataklanmasında radyal bilyalı rulmanlar kullanılmaktadır [Tolun, 1995].

6.4. Kule Tasarımı

Köşebent profilili çelik kuleler en çok kullanılan en yaygın kule tipidir. Bunun sebebi bu tip konstrüksiyonların kolaylıkla inşa edilebilmeleridir. Silindirik formlu kuleler de çok sık olmasa da kullanılmaktadır.

Kule maliyeti, kule yüksekliği ile lineer olmayan artış gösterir. Rotor ne kadar yükseğe monte edilirse o kadar fazla rüzgar hızından faydalanılmış olur. Kulenin maliyeti, rüzgar türbini tesisinin kuruluş maliyetini etkiler böylece kW başına maliyet artar. Kule maliyeti, toplam tesis maliyetinin genellikle % 10'una tekabül eder.

Kulenin yüksekliği rotor çapına bağlı bulunmakla birlikte yüksek kulelere büyük boyutlu rotorlardan ziyade ufak boyutlu olanları çok daha kolay montaj edilebilir. Ufak rüzgar türbinleri için en popüler kule, teleskopik tüp şeklinde olanıdır, dahili bir vinçle kulenin yükselmesi sağlanabilmektedir [Tolun, 1995].

6.5. Mekanizma Odası

Büyük rüzgar türbinlerinde değişken pitch'li kanatlar vardır. Mekanik dişli ve dişli kutuları, mafsallar, harekete geçiriciler ve bir çokları mekanizma odası içinde bulunur.

Sabit mekanizma odasının, düşük hıza sahip şaftlı sistemlerde rijitlik sağladığı ortaya çıkarılmıştır. Bu çeşit mekanizma odasında sadece kanat açısının serbestlik derecesi değişebilir. Rüzgar kesme kuvvetleri ile kule gölgesi etkileri nedeniyle kanatlarda oluşacak kuvvetler yüzünden, ihtiyaç duyulan mafsallara bu çeşit tasarım müsaade etmez.

Alternatif bir tasarım ise iki yana sallanan mekanizma odasıdır. Bu çeşit tasarım şaftta meydana gelen yüksek devirli momenti giderebilmek için mafsala müsaade eder.

Pitch kontrolü genellikle hidrolik sistemlerle sağlanmaktadır [Tolun, 1995].

7. MALİYET

7.1. Sistem Maliyeti

Rüzgar türbinleri tarafından üretilen enerjinin maliyetini belirlemede, göz önüne alınması gereken en önemli faktörler şunlardır:

- Tesisin ilk maliyeti
- Yıllık olarak üretilen enerjinin maliyeti

Ekonomiklik açısından incelendiğinde, diğer teknolojilerle üretilen enerjinin birim maliyeti ve satış fiyatı da önem kazanmaktadır. Rüzgar türbini satın almak isteyenlerin değerlendirmesi gereken konular şunlardır:

- a) İlk kuruluş maliyeti
 - 1) Alış fiyatı
 - 2) Nakliye
 - 3) Tesis maliyeti
 - 4) İthal vergisi miktarı
 - 5) Tesisin kapladığı alana ilişkin maliyet
- b) Elektrik enerjisi üretimi
 - 1) Rüzgar türbininin kullanım faktörü
 - 2) Rüzgar türbininin tipi ve büyüklüğü
 - 3) Rüzgar rejiminde görülen yıllık ve yıllar arası değişimler
- c) Sistem tarafından üretilen enerjinin satış fiyatı ile diğer kaynaklardan üretilen satış fiyatlarının karşılaştırılması
- d) İşletme ve bakım masrafları
- e) Paranın maliyeti
- f) Yasal mevzuat
- g) Enflasyon
- h) Amortisman

Enerji üretimi: Yıllık enerji üretimi, aşağıdaki yöntemlerle yaklaşık olarak hesaplanabilir.

- a) Jeneratör büyüklüğü
- b) Rotor alanı ve rüzgar haritası

c) İmalatçı eğrisi

a) Jeneratör büyüklüğü:

YKWH: VER. JB. 8760

(7.1)

YKWH: Yıllık üretilen enerji (kWh)

JB: Jeneratör büyüklüğü

VER: Verim faktörü

b) Rotor alanı ve rüzgar haritası:

Bir rüzgar haritasından yıllık ortalama güç, elde edilebilir.

RE: P.A. 8760

(7.2)

RE: Rüzgar enerjisi

P: Güç yoğunluğu (W/m^2)

A: Rotor alanı

Çeşitli rotorlar için alan hesabı:

Rotor Alanı

YERM $\pi \cdot R^2$

DERM

Savonius H.D

Darrieus H.D.0.65

YERM: Yatay eksenli rüzgar türbini

DERM: Dikey eksenli rüzgar türbini

Yıllık enerji üretimi sisteminin toplam verimine bağlıdır.

YKWH: RE. VER

(7.3)

c) İmalatçı eğrisi:

Rüzgar hız dağılımı ve rüzgar türbinlerinin güç eğrilerinden yararlanarak, enerji üretimi öngörülebilir. Eğer 1 (m/s)'lik hız dilimleri kullanılıyorsa, enerjiyi bulmak için o

hızdaki saat sayısı karşılık gelen güç ile çarpılır. Yıllık toplam enerji üretimini bulmak için de bu değerler toplanır [Sayındı, 1994].

7.2. Birim Enerji Maliyeti

Kapitali (harcanan meblağı) geri kazanma faktörü (CRF),

$$CRF = \frac{1 \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7.4)$$

Üretim maliyeti (ÜM),

$$UM = \frac{C_T \cdot (CRF + I)}{YKWH} (\$/kWh), (TL/kWh) \quad (7.5)$$

UM: Üretim maliyeti

I: Servis, bakım ve sigorta giderleri (%)

i: Faiz oranı (%)

n: Amortisman süresi (yıl)

C_T: Rüzgar türbininin toplam kuruluş maliyeti (\$), (TL).

Rüzgar türbininin toplam kuruluş maliyeti rüzgar türbini, taşıma ve dikme, kurma, trafo ve şebekeye bağlantı giderlerinden oluşmaktadır [Sayındı, 1994].

7.3. Çevreye Uyum

Rüzgar enerjisi, kirlilik yaratmayan bir enerji kaynağı olmasına rağmen çevrim sistemlerinin çok yaygın bir şekilde kullanılması halinde aşağıda sıralanan bozucu etkilere sebep olabilir [Sayındı, 1994].

a) Çevre görünümünü bozması

b) FM ve TV sinyallerini bozması (metal kanat kullanımı sonucu ortaya çıkar)

- c) İklim değişikliğine sebep olabilir
- d) Toprak işgali.

7.4. Ekonomiklik

Rüzgar türbini-jeneratör grubunun tasarımı ve çalışma tarzı nasıl olursa olsun, en önemli parametre rüzgar-elektrik enerjisi dönüşüm sisteminin ekonomikliğidir. k , yıllık ortalama enerji üretim faktörü, tesis faktörü, yük faktörü veya kapasite faktörü olarak tarif edilmektedir. k değeri bir yıl içinde üretilen enerjinin, tesisten elde edilebilecek maksimum enerjiye olan oranına eşittir.

$$k = \frac{\text{Yıllı Faydalı Enerji Üretimi (kWh)}}{8760 \cdot P_R} \quad (7.6)$$

P_R : Tesis gücü (kW)

Rüzgar hızındaki değişiklikler yüzünden k değeri 1 den küçüktür, genellikle 0.1 ile 0.5 arasındadır. k 'nın yüksek değerli olması üretilen enerjinin maliyetinin düşük olmasını sağlar.

Rüzgar ortalama hızının yüksek olduğu bölgelerin seçilmesi k 'nın yüksek değerli olmasını sağlar dahası düşük rüzgar hızlarında da rüzgar türbinlerinden istenilen güç elde edilebilir.

COE, enerjinin maliyeti; AFC, yıllık sabit fiyat; O&M ise çalışma ve bakım masraflarını ifade eder. Enerjinin maliyeti formülü aşağıda verilmiştir.

$$COE = \frac{AFC + O \& M}{\text{Yıllı Enerji Üretimi}} \quad (7.7)$$

Kilowattsaat (kWh) olarak yıllık enerji üretimi $8760 \cdot k$ değerine eşittir.

Yıllık sabit fiyat, tasarı ve tasarım harcamalarından, sermayenin amortismanından, vergilerden ve sigorta giderlerinden oluşmaktadır. Yatırım sermayesinin % 10 ile 20'si yıllık masraflar olarak alınır ama vergilerdeki yükselmeler ve alçalmalar maliyete çok etki eder. Titizlikle hazırlanmış finansal analizlere de ihtiyaç duyulur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının ulusal politikaya faydası ve bu enerji türünün vergilerden etkilenmemesi yüzünden rüzgar gücünün önemi gittikçe artmaktadır. Fosil yakıtların fiyatlarının gittikçe zamlanması ve rüzgar türbinlerinin çevre kirlenmesi yaratmaması da rüzgar enerjisine olan ilgiyi gittikçe artırmaktadır [Sayındı, 1994].

7.5. Değişken Hızlarda Çalışmanın Enerji Maliyetine Etkisi

Değişken hızlarda çalışabilen rotora sahip bir rüzgar türbinine bir elektronik güç konvertörü (PEC) ilave edilebilir. Bu esneklik sayesinde değişken hızlı rüzgar türbini, sabit hızlı rüzgar türbinine benzetilerek enerji artışı sağlanabilir. Değişken hızlarda çalışma, rüzgar türbininde kullanılan parçaların maliyetlerinin azalmasına neden olur.

Bir rüzgar türbininde enerji maliyeti (CoE), rüzgar türbininin kuruluş maliyetine bağlıdır. Rüzgar türbininin enerji üretkenliği ve diğer faktörler, yıldan yıla maliyetlerin değişmesine neden olur. Tipik bir rüzgar türbininin maliyeti aşağıdaki kısımlardan meydana gelir.

- a) Rotor maliyeti
- b) Transmisyon maliyeti
- c) Fren sistemi maliyeti
- d) Esneme kontrol sistemi maliyeti
- e) Kule ve temel maliyeti
- f) Jeneratör ve güç takımları maliyeti

Elektronik güç konvertörü ilavesi ile değişken hızlarda çalışma sağlanabilir. Sabit hızlı rüzgar türbinleri ile değişken hızlı rüzgar türbinlerinin karşılaştırılmasında USW 56-100 modeli kullanılmıştır. Rotor ve transmisyonda meydana gelen tork değerinin sabit kaldığı farz edilir. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde rotorun çalışma hızı, normal çalışma hızının % 75'i ile % 125'i arasında olabilmektedir. Elektronik güç konvertörlü rüzgar türbinlerinde hızın artmasına rağmen moment oluşmaz ama kondüktörler (iletkenler) daha fazla kapasiteye ihtiyaç duyar. Gerçekte, rotor hızlanırken elektronik güç konvertörünün momentini sınırlama kabiliyeti sayesinde bazı mil yataklarının ve transmisyonun maliyetinde azalma olacağı umulmaktadır.



Bir rüzgar türbininin enerji verimliliği rüzgar kaynağına, işe yararlılık ve kapasite faktörlerine bağımlı olmaktadır. CoE için faydalı karşılaştırmalar yapabilmek için rüzgar kaynağıyla ilgili bazı kabuller yapılabilir. Eğer rüzgar türbini farklı rüzgar hızlarında dolayısıyla da farklı rotor hızlarında, maksimum aerodinamik verimi verebilecek şekilde çalışabiliyorsa, rüzgar türbininin verimliliği artabilir. Değişken hızlarda çalışma esnasında relatif olarak verimlilikteki artışlar rüzgar türbininin kurulduğu yöreye de bağımlı olmaktadır.

Ekonomiklik faktörlerinin bir çoğu CoE'nin ömrü ile ilgilidir. Bu faktörlerin seçilebilmesi için bazı yollar vardır ama nispi amaçlar için istikrarlı kabuller yapılmak şartıyla özellikle yapılan kabullere göre relatif olarak CoE'de çok az artış olur [Sayındı, 1994].

7.5.1. Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Maliyeti

Değişken hızda çalışma esnasına, tasarım amacıyla sisteme bir elektronik güç konvertörü ilave edildiği zaman sabit hızlı rüzgar türbinine (CSWT) göre bazı parçaların maliyetleri değişebilir. Moment yüklerine ait tepe değerlerin zayıflatılmasıyla transmisyon maliyetinde azalma meydana gelir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde (VSWT) kondüktörlerin maliyeti, CSWT'ye göre daha yüksektir, kontrol mekanizmalarının da maliyetleri yüksek olacaktır ama güç faktörü kapasitörü ve kontaktörs gibi bazı güç cihazları çok fazla kullanılmayacaksa PEC'in maliyet hesabına dahil edilebilir. Bir CSWT ile bir VSWT arasındaki diğer maliyetlerin sabit kaldığı kabul edilir. Tablo 7.1'de VSWT komponentlerinin maliyetleri ile CSWT komponentlerinin maliyetleri oranlanmıştır ve elektronik güç konvertörünün maliyeti ile CSWT'nin kuruluş maliyeti karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.1. Relatif VSWT komponent maliyetleri [Sayındı, 1994].

Komponent	VSWT/CSWT Maliyeti
Transmisyon	0.95
Jeneratör, güç cihazları, kontrol sistemleri	0.93
PE Konvertör /CSWT Toplam	0.18

7.5.2. Bir VSWT'de Enerji Verimliliğinin Artırılması



CSWT'ler değişik uç hız oranlarında (λ) çalışabilecek şekilde tasarım edilir ama maksimum güç katsayısı (C_p) yalnızca bir λ için meydana gelir. Bu sınırlamayı yapmak gerekmektedir; çünkü transmisyon iletim oranı ve bölgesel şebekenin frekansı yüzünden CSWT tek bir hız oranında çalışır. Eğer rotor hızı kanat uç hızından farklı ise sabit λ 'ya bakılarak rüzgar hızı izlenebilir. Eğer seçilen λ , maksimum C_p 'yi verebilecek λ 'ya benzer ise rüzgar türbininin enerji verimliliği artacaktır. Pratikte sınırlamalar vardır. Rüzgar türbinlerinin her türlü rotasyonel hızda çalışmasına müsaade edilmez bunun nedeni ise rezonansa girme ihtimalidir. İlaveten bir elektronik güç konvertörünün kaybı, sistem kayıplarına ilave edilmelidir çünkü kayıplar ne kadar azaltılırsa o kadar enerji kazancı sağlanabilir. Bir CSWT'ye göre elektronik güç konvertörüne sahip bir VSWT'de elde edilen enerji kazancı %10'dan daha fazla olmaktadır ama bu kazanç tasarım ve işletme şartlarına olduğu kadar da rüzgar kaynağına da bağlıdır [Sayındı, 1994].

7.5.3. Ekonomiklik

Yatırım maliyeti ile enerji tasarrufu arasındaki farklılıklar temelde tek bir yolla değerlendirilmeli ve mukayese edilmelidir. Değer hesabında kullanılan yöntem rüzgar türbininin enerji maliyetinin, rüzgar türbininin ömrüne bağlı olarak hesaplanmasıdır. Enerji maliyetinde bir kez hesaba katılan yatırım maliyetinin içine, enerji verimliliği nedeniyle elde edilen yıllık gelirinde sokulması gerekir. Bu karşılaştırma için, yıldan yıla mali analizler yapılmalı ve rüzgar türbininin kurulması için harcanan yatırım maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır. İlk yıl için enerjinin maliyetini hesaplarken projenin gerçekleştirilmesi esnasında enflasyon nedeniyle meydana gelecek kayıp yüzünden paranın bugünkü değeri (NPV) hesap edilmelidir. Enerjinin ilk maliyeti ile CoE karşılaştırıldığında ne kar nede zarar elde edilir, yatırımcının yatırımlarını uygun bir şekilde geri kazanmasını sağlar ve rüzgar türbinlerinde iyi bir ekonomik etkileşime neden olur.

Mali (nakit para) analizlerinde yapılan kabuller iki kısma ayrılabilir. Bunlardan ilki rüzgar türbininin kuruluşu esnasındaki spesifik harcamalardır ki bunlar verimlilik ve projenin çalıştırma ile bakım (O&M) masraflarıdır. O&M maliyetinin değişken ve sabit hızlı rüzgar türbinleri için değişmediği kabul edilmiştir, enerji verimliliğindeki artış sayesinde elektronik güç konvertörünün bakım masrafları bertaraf edilmiş olacaktır. İkinci kabulde

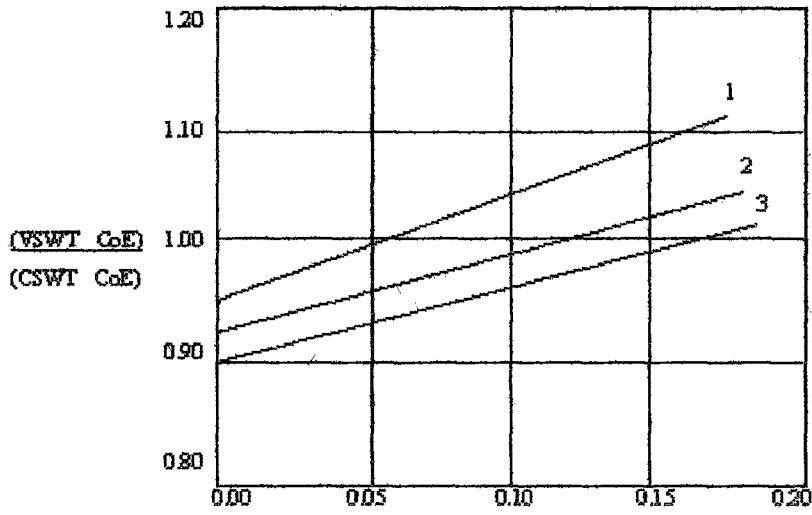
ise mali analizler ekonomik durumlarla direkt ilgili tutulmuştur. Tablo 7.2’de ekonomiklik açısından kabul edilebilir değerler verilmiştir [Sayındı, 1994].

Çizelge 7.2. Mali analizlerde ekonomiklik kabulleri [Sayındı, 1994].

Borçlanma yüzdesi	50 %
İlgilenme oranı	11 %
PV iskonto oranı	12.5 %
Enflasyon	6 %
Federal gelir vergisi	34 %
Eyalet gelir vergisi	6 %
Arazi vergisi	1.5 %
Sigorta	0.5 %
Vergi değerinde düşme	5 Yıl
Borçlanma ömrü	10 Yıl
Proje ömrü	30 Yıl

7.5.4. Enerji Maliyetinin VSWT ile CSWT Arasında Karşılaştırılması

USW 56-100 modelinde kullanılan parçaların maliyetleri, bir VSWT’deki enerji verimliliğini ve parça maliyetleri için parametre olacaktır. Enerji maliyetinin hesaplanmasında çeşitli yöntemler kullanılabilir. Şekil 7.1’de de bunlarla ilgili sonuçlar verilmiştir. Kurulu bir CSWT’nin bir bölümü olan elektronik güç konvertörü maliyetinin fonksiyonu olarak bir VSWT’nin enerji maliyeti grafiği çizilmiştir. Bu eğriler enerji verimliliğinin doğurduğu etkilerin, VSWT ile CSWT üzerindeki artışını göstermektedir [Sayındı, 1994].



(PE Konvertor maliyeti) / (Kurulu CSWT maliyeti)

- 1: Enerji kazanımındaki artış.....5 %
 2: Enerji kazanımındaki artış.....10 %
 3: Enerji kazanımındaki artış.....15 %

Şekil 7.1. Maliyet karşılaştırması [Sayındı, 1994].

8. KONTROL SİSTEMLERİ

8.1. Kontrol Sistemi

Rüzgar hızının artmasıyla, güç oldukça hızlı bir şekilde artar. Rüzgar türbininin maksimum çalışma hızı olarak sınırlandırdığımız (V_k) hızından büyük hızlarda, sistemi ya sabit devirde çalıştıracak yada durduracak mekanizmalara ihtiyaç vardır.

Bu çeşitli şekillerle gerçekleştirilebilir.

- a) Rüzgar türbininin rotorunu, hakim rüzgar yönüne çeviren bir sistem ve bu sisteme bağlanacak bir yayla sağlanabilir.
- b) Kanat açılarını değiştirerek veya döndürerek
- c) Frenleme yöntemi en çok kullanılan yöntemlerden biridir. (Mekanik, hidrolik vs.) [Heirer, 1998].

8.2. Esneme Kontrolü

Çapı 4.5 (m)'e kadar olan rotorlarda esneme kontrolü (rüzgar içinde rotorun otomatik olarak yön bulması) klavuz kuyruk ile sağlanır. Bazı modellerde rotor rüzgarı arkasına alır ve bu durumda yön bulma, döndürme momenti üreten rotorlarda, drag'a (sürüklemeye) bağımlı olmaktadır. Buradaki tasarımda klavuz kuyruk kullanılmalıdır.

4.5 (m)'den daha büyük çaplı rotorlarda esneme kontrolünün sağlanması daha zordur. Klavuz kuyruk yeterli iş görmez. Büyük rüzgar türbinleri yardımcı kontrol cihazlarına yada rüzgarın hız ve yön değişikliğini hissedebilen mekanik bir düzeneğe bağlanmalıdır.

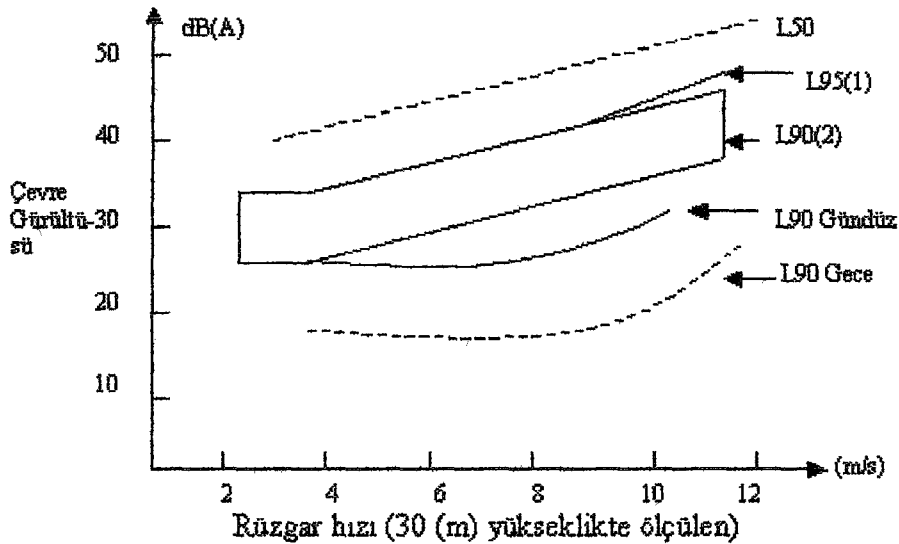
Kanatlar ister yükte, ister boşta çalışsın her zaman esneme kontrolü yapılmalıdır. Rüzgar içindeki rotorda müsaade edilebilir esneklik $\pm 12^\circ$ sınır değerleri arasında olmalıdır [Spera, 1998].

8.3. Rüzgar Türbini Çiftliklerinde Gürültü

Çevremizdeki Gürültü Seviyeleri: Rüzgar ağaçlardan, çalılardan, binaların etrafından, dalga kıranlardan geçerken ve trafik vs. gibi etkenlerden dolayı gürültü oluşur. Her zaman var olan gürültüye neden olan en büyük iki etki bölge topografyası ve rüzgar hızıdır. Kırsal, şehrsel yada endüstriyel bölgelerin her zaman varolan gürültü seviyeleri aynı olmaz. Çevremizde varolan bu gürültülerin seviyelerini daha iyi kavrayabilmek için problemin boyutunu açıklamak gerekir.

Şekil 8.1, değişik rüzgar hızlarında çevremizde meydana gelen gürültüleri göstermektedir. Bir rüzgar türbininin bulunduğu yerde, yarattığı gürültü etkileriyle ilgilenmek için 30 (m) yükseklikteki rüzgar hızının yaratacağı gürültü seviyelerinin etkileri grafik edilmiştir.

Gece vakti, 5 (m/s)'lik değere sahip rüzgar hızında çevrede 20-25 dB(A)'lik (L90S) son derece düşük seviyeli gürültü oluşur. 11 (m/s) rüzgar hızında bu değer 25-35 dB(A)'ya yükselir. Gündüz vakti, 5 (m/s)'lik rüzgar hızında gürültü seviyesinde 25-32 dB(A) yükselme eğilimi görülür. 11 (m/s)'lik rüzgar hızında ise bu değer 29/45 dB(A) arasında olur [Sayındı, 1994].



Şekil 8.1. Her zaman var olan gürültü seviyeleri [Sayındı, 1994].

Gürültü problemine daha fazla açıklık getirmek için farklı rüzgar hızlarında nasıl gürültü oluştuğunu bilmemiz gerekmektedir ve dahası rüzgar türbininin çalışması esnasında ürettiği gürültünün nasıl azaltılabileceği bilinmelidir.

Gerçek bir rüzgar bölgesinde ortalama rüzgar hızının yüksek olması gerekir, rüzgar frekans dağılım eğrisi yüksek bir sonla bitmelidir. Aşağı yukarı zamanının yarısını kırsal bir rüzgar bölgesinde çalışarak geçiren rüzgar türbininin yaydığı gürültü seviyesi düşük olmalıdır.

Rüzgar türbinlerinde gürültü, giderilmesi gereken en önemli problemlerden biridir.

Rüzgar Türbinlerinde Gürültü Emisyonu: Rüzgar çiftlikleri için en önemli rüzgar emisyon parametreleri hız kesiminde, kaynaktaki çıkış gürültüsünde ve redüksiyonda meydana gelir.

Hız kesme değeri bir üreticiden diğerine değişiklik gösterir. Hız kesme değerleri, 2,6 ile 5 (m/s)'lik sınır değerler arasındadır. Rüzgar çiftliği operatörleri türbin gruplarını farklı hız değerlerinde devreden çıkabilecek şekilde programlar. Şebekeyle bağlantı problemleri veya potansiyel gürültü sorunlarından sakınmak için bu şekilde yapılmaktadır.

Rüzgar türbinindeki çıkış gürültüsü temelde mekaniksel parçalardan gelmektedir. Bunların bazıları dişli kutusu, frenler ve jeneratördür. Kanatların dönmesinden dolayı da aerodinamik gürültü meydana gelir.

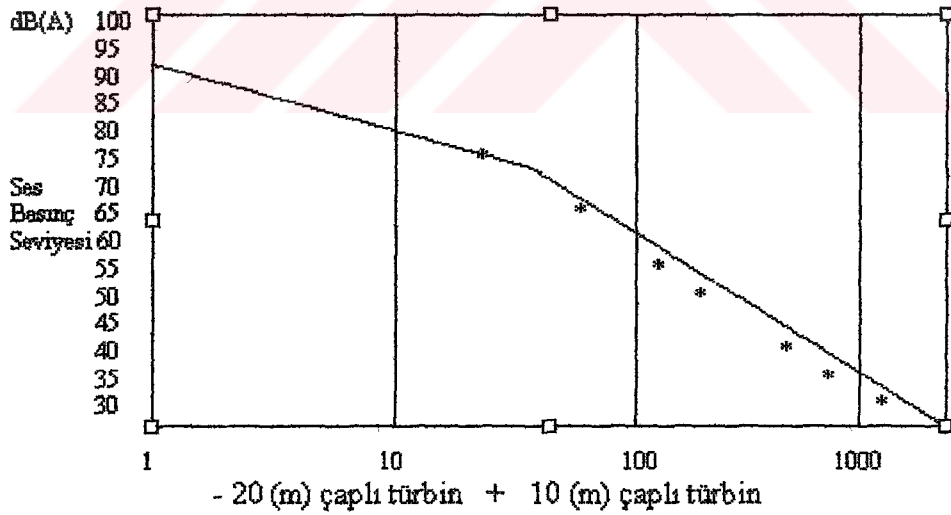
Aerodinamik Gürültü: Rüzgar türbinlerinde aerodinamik gürültülere neden olan unsur vardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- a) Dönel kanatlar ile türbülanslı akış, birbirlerini karşılıklı olarak etkiler.
- b) Kanatların kuyruk kısmında ve airfoil yüzeylerinde sınır tabaka türbülansı oluşur.
- c) Kuyruk kısmındaki körlük yüzünden vortekste bozulma oluşur.

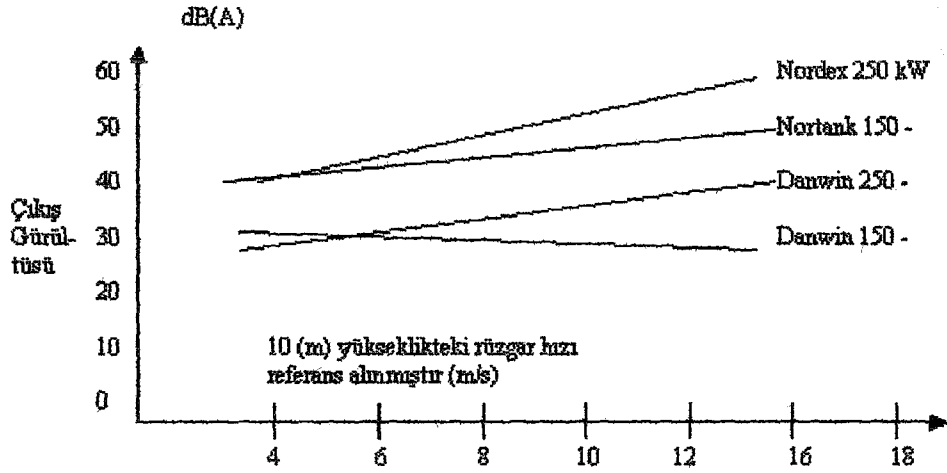
Mekaniksel Gürültü: Dişli kutusundan, elektrikli cihazlardan, hidrolik sistemlerden ve diğer mekanik parçalardan ortaya çıkan gürültü genellikle, 50 (Hz) ile 5000 (Hz)'lik frekanslar arasında meydana gelmektedir. Mekaniksel gürültüleri bir takım özel aletler kullanarak azaltabiliriz. Türbin dairesinde akustik yalıtım ve elastiki (esnek) montaj ile gürültü seviyeleri daha aşağıya çekilebilir.

Mesafe ile zayıflama: Şekil 8.2 ile ses enerjisinin, küresel yayılma sırasında mesafeyle orantılı meydana gelen zayıflama grafiği verilmiştir. Bölgesel zayıflama genellikle iki kanatlı rotor çapının iki katı mesafede, kaynaktan itibaren 3 (dB) civarında olur, altı kanatlı rotor çapının iki katı mesafede ise zayıflama 6 (dB) olur.

Rüzgar hızının 1 (m/s) artmasına karşılık, gürültü seviyesi yaklaşık olarak 1 (dB) artar. 10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı referans alınarak, çeşitli rüzgar türbinlerinden 400 (m) uzakta meydana gelen gürültü seviyeleri Şekil 8.3'te gösterilmiştir. 10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı (6 (m/s)) referans alındığında 400 (m) mesafede gürültü seviyesi yaklaşık 30 (dB) civarında çıkmıştır.

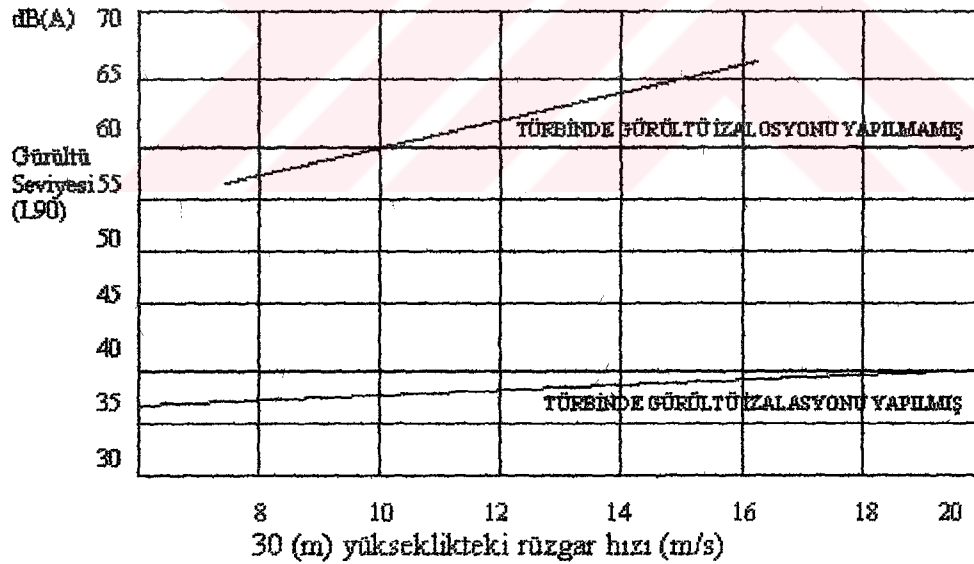


Şekil 8.2. Rüzgar türbininde gürültü



Şekil 8.3. Rüzgar türbini çıkış gürültüleri (400 (m) mesafede) [Spera, 1998].

Şekil 8.4'te gürültü seviyelerinin akustik tedbirlerle ne kadar azaltılabileceği gösterilmiştir. Bu örnekte 20 dB(A)'lık bir zayıflama sağlanabilmektedir. 8 (m/s)'lik rüzgar hızında 50 (m) mesafede 36 dB(A)'nında altında gürültü seviyesi elde edilebilir [Spera, 1998].



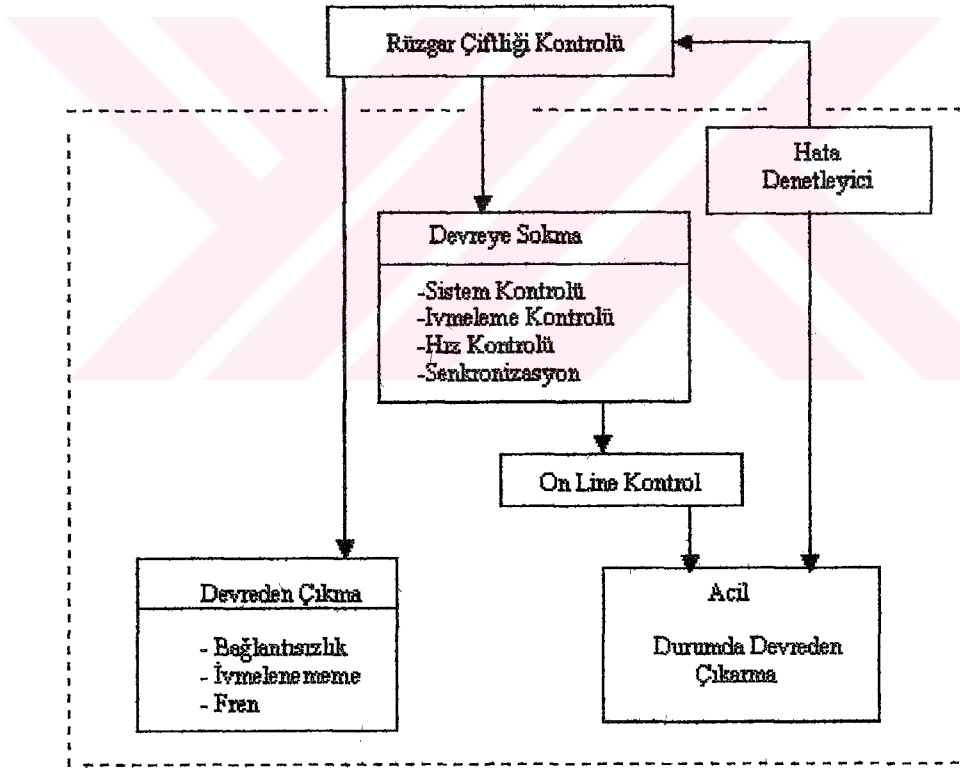
Şekil 8.4. İzole edilmiş ve edilmemiş rüzgar türbini gürültü seviyeleri (46 (m) mesafede) [Spera, 1998].

8.4 Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemleri Ve Bunların Uygulamaları

Bu kontrol sistemlerinin oldukça geniş kullanım alanı vardır, birçok sayıda farklı kontrol fonksiyonlarını içermektedir. Endüstriyel kontrol sistemlerinden, operasyonları otomatik olarak gerçekleştirmesi beklenir.

8.4.1 Kontrol Sistemleri ve Rüzgar Türbinleri

Tipik bir rüzgar türbini birçok sayıda kontrol sisteminin etkisi altında çalışır. Şekil 8.5’de kontrol devresinin şeması gösterilmiştir.



Şekil 8.5. Kontrol devresinin akış şeması [Spera, 1998].

8.4.2. Rüzgar Türbini Çiftliği Kontrol Sistemleri

Rüzgar çiftliklerindeki kontrol işlevinde koordinasyon olmalıdır. Bu, rüzgar türbininin devreye girme ve devreden çıkma işlevini başlatacaktır aynı zamanda uygun rüzgar hızı, güç talebi ve mekaniksel yapılabirlik gibi faktörleri de kontrol etmelidir. Kontrol optimizasyonu için gerekli çalışma sahası da olmalıdır. Bölgesel şartlara göre her bir rüzgar türbinine yeni bir biçim verilebilir, iyi bir performans sağlayabilmek için rüzgar türbini çiftliklerinden maksimum enerji elde edilmelidir ve rüzgar türbinine gelen yükler (kuvvetler) azaltılmalıdır.

8.4.3. Rüzgar Türbini Kontrol Sistemleri

Bir rüzgar türbinindeki kontrol sistemi, bir çok sayıda kontrol işlevini gerçekleştirebilmelidir. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

a) Kapalı Devre TV Sistemiyle Gözlem

Rüzgar türbinleri, çalıştıkları alan içinde sürekli olarak monitörler vasıtasıyla kontrol edilir. Anormal bir çalışma şartında örneğin titreşimler, aşırı hızlanmalar, çok yüksek hızlı rüzgarlar nedeniyle jeneratörde meydana gelen aşırı yüklenmeler, dişli kutusundaki yağ sıcaklığında ve seviyesinde meydana gelen anormalleşmeler ortaya çıkarılmalı ve rüzgar türbini devre dışı edilmelidir [Patel, 1999].

b) Devreye sokma / Devreden çıkarma

Rüzgar türbininin devreye girmesi ve çıkması, kontrol sistemi tarafından otomatik olarak sağlanır. Rüzgar çiftliğinden rüzgar türbinine devreye gir komutu ulaştığında, hız kontrol mekanizması rotoru ivmelendirmeye başlar. Rüzgar türbini şebeke frekansına ulaştığı zaman güç regülasyon devresi sistemi kontrol etmeye başlar.

Rüzgar türbini otomatik olarak ya rüzgar çiftliği kontrol odasından gelen bir sinyalle yada acil anlarda kendi kendine devreden çıkar. Kontrol ünitesi rüzgar türbininin şebekeyle olan bağlantısını keser ve rotoru negatif ivmelenmeye bırakır. Sistem devreden çıktığında rotor kendi ağırlığından dolayı yavaşlamaya başlar [Patel, 1999].

c) Regülasyon

Güç regülasyon ve kontrol devresinin fonksiyonu üretilen gücün regülasyonunu sağlamaktır. Referans değerleri ile spesifik türbin ölçüm değerleri arasında

meydana gelebilecek farklılıklardan doğan hata sinyallerine cevaben çalışma karakteristikleri değiştirilerek regülasyon sağlanabilir. Pitch kontrollü rüzgar türbinlerinde, kanat pitch açısı otomatik olarak ayarlanır böylece efektif rotor verimi değiştirilerek güç üretilir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde muhtemelen pitch açısıyla bağlantılı olarak jeneratör momentinin ve rotor hızının kontrolüne müsaade edilir böylece de rotor gücü üretilmiş olur [Patel, 1999].

8.4.4. Komponent Kontrol Sistemleri

Rüzgar türbinlerindeki kontrol sistemlerinde en son uygulama alanı parça bazında olmaktadır. Bu kontrol sistemlerinin entegrasyonlaşma ihtimali vardır örneğin güç hatları regülasyon algoritması gibi herhangi bir entegrasyonun etkili olabilmesi için türbin dinamiğine dikkat etmek gerekir.

8.4.5. Feedback (Geri Belsenim) Kontrolü

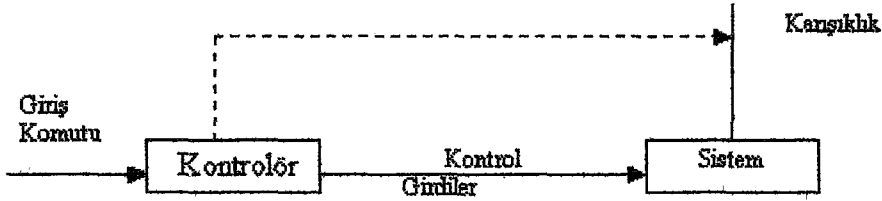
Kontrol kavramındaki gerçek, sistemin dinamiksel doğallığının anlaşılmasıdır. Bir sistem girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkileri düzenler. Karakteristik özellik, bir sistemi alt sistemlerine hiyerarşi içinde ayrıştırabilmektir.

Sistemdeki diğer parametrelerle etkileşimli olarak değişkenlerde zamanla meydana gelecek değişiklikler, dinamiksel olaylar olarak bilinir. Modelleştirme prosesi, bir sistemin dinamiksel davranışlarının özlü bir şekilde ifade edilmesi anlamına gelmektedir. Matematik yardımıyla bir yapı meydana getirilebilir. Model genellikle ya zamana yada frekansa bağımlı olarak ifade edilir.

Kontrol deyimi, bir sistemin davranışlarından arzu edilir etkilerin elde edilmesi anlamına gelir. Bu genellikle sistemin çeşitli koşullara tepki göstermesi olarak tanımlanır, komuta sinyalleriyle girdilerin önceden tayin edilmesi ve/veya diğer etkilerin kabul edilmemesi yada sinyallerde karışıklık oluşması ile tanımlanabilir.

Eğer bir sistemin dinamik davranışlarından meydana getirilen modele, hem sonsuz bir kesinlik elde edilebilse hem de girdilerdeki tüm değerler ölçülebilseydi, sistem davranışları açık devre kontrol sistemleriyle hesaplanabilirdi.

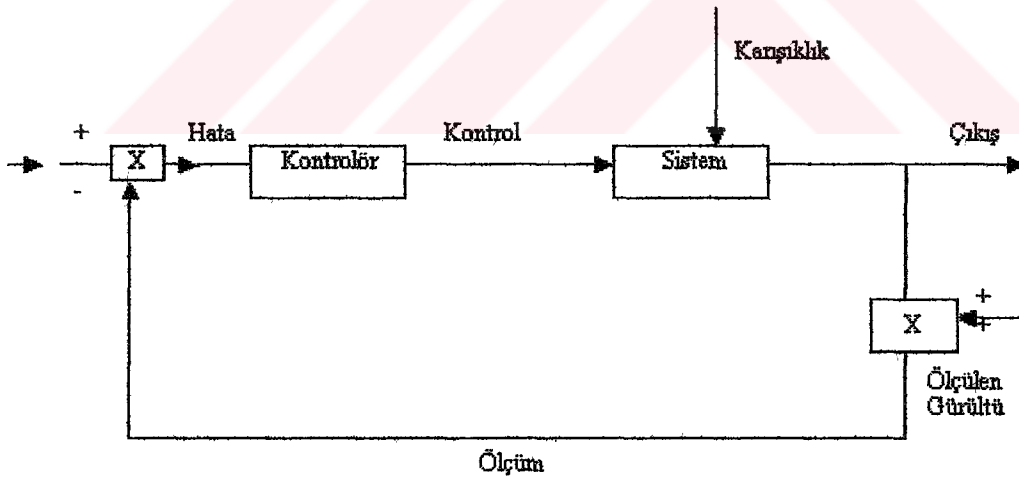
Karışıklık olduğunda ve komuta sinyalleri bilindiği zaman şekil 8.6'daki model kullanılarak proses çıktıları tahmin edilebilir. Bir girdi kontrol sinyali ile bu girdiler telafi edilebilir.



Şekil 8.6. Açık devre kontrol sistemi [Spera, 1998].

Pratikte, mükemmel bir model yoktur. Sistemlerin büyük bir çoğunluğunda çok karmaşık prosesler basitleştirilir. Çok karmaşık sinyaller daima ölçülmez, en pratik kontrol stratejisi, değerler arası farklardan doğan hata sinyallerini kontrol etmektir. Şekil 8.7'de feedback (geri beslenme) kontrolü ile ilgili şema verilmiştir.

Geri beslenme kontrolünde iki önemli husus vardır, bunlardan ilki sistemin dinamiksel etkilerinin tespit edilmesi, ikincisi ise referans girdileri ve dış etkenlerden kaynaklanan tüm etkilerin tespit edilmesidir.



Şekil 8.7. Kapalı devre kontrol sistemi

a) Kontrol yoluyla dinamiksel etkilerin sınırlandırılması

Rotasyonel hareket yapan şaftın modeli yapılırken yay gibi çalıştığı kabul edilmiştir, ilgili ifade aşağıda verilmiştir.

$$I.\varphi + B.\dot{\varphi} + K.\varphi = T_A \quad (8.1)$$

I. şafta meydana gelen atalet; B, viskoz sönümlleme faktörü; K, katılık; T_A , zorlayıcı kuvvet ve φ ise şaftın rotasyonel pozisyonudur. Sisteme kontrol işlevini yerine getiren T_f kuvvetini ilave edersek, 8.1 no'lu denklemde düzeltme yapmak gerekir.

$$I.\varphi + B.\dot{\varphi} + K.\varphi = T_A - T_f \quad (8.2)$$

T_f , şaft hızında integral kontrol işlevi ile orantılı olarak meydana gelen kuvvettir.

$$T_f = K_1.\dot{\varphi} + K_2.\varphi \quad (8.3)$$

8.1 Nolu ifade yeniden düzenlenerek yazılabilir.

$$I.\varphi + (B + K_2).\dot{\varphi} + (K + K_1).\varphi = T_A \quad (8.4)$$

Sistemin sönümlleme faktörü, $(B + K_2)$ değerine yükselmiş olur ve katılıkta $(K + K_1)$ değerine yükselmiş olur. Elbette fiziksel açıdan şaft parametrelerinde değişiklik olmaz ama sistem sanki değişiklik oluyormuş gibi davranır. Bunun rüzgar türbinleri için önemli bir anlamı vardır. Rüzgar türbinlerinin transmisyonlarına çoğunlukla mekanik sönümleyiciler ilave edilir. Kontrol sistemine alternatif olarak sönümleyici ilave edilmesi, transmisyonda gücün ısıya dönüşerek israf olmasına müsaade etmez.

b) Yabancı sinyallerin yarattığı etkilerin kontrolü

Kapalı devre kontrol sistemlerinde, kabul edilmelidir ki komut girdileri ve karışımlar gibi yabancı sinyaller sistemin çıkış sinyallerini değiştirmektedir. Şekil 8.7'e göre kontrol merkeziyle proses girdi-çıkışı arasındaki ilişkiler K ve G ile ifade edilmiştir. Kullanılan vektör sinyalleri r, komut; d, karışım; y, sistem çıkışı ve v ise ölçülen gürültü

için kullanılmaktadır. Açık devre sistemlerde, karışım girdileri aşağıdaki gibi ifade edilir [Spera, 1998].

$$y = G.d + G.K.r \quad (11.5)$$

Kapalı devre sistemlerde çıktı, aşağıda ifade edilmiştir.

$$y = [I + (G.K)]^{-1} . G.d + [I + (G.K)]^{-1} . G.K.(r - v) \quad (11.6)$$

Buradan iki önemli sonuç çıkmaktadır:

- 1) y çıktısı üzerinde d ve r sinyallerinin etkisi $[I + (G.K)]^{-1}$ terimi ile düzeltilmiştir.
- 2) Sistem çıktısı, gürültü etkilerini ölçüp verebilecek bir katkıya sahiptir.

Genelde proses ve kontrol merkezinde meydana gelen ürünler G.K ile ifade edilmektedir. K'nın tasarımı vasıtasıyla alçak frekanslarda yüksek kazanç ve yüksek frekanslarda alçak kazanç oluşur.

Alçak frekanslı iyi bir komut izleme performansını sağlayabilmek için sistem çıkışındaki alçak frekanslı kayıpların etkilerinin azaltılması gerekir. Ticari açıdan önemli olan gürültü ölçümleri vasıtasıyla sistem çıkışındaki alçak frekansların yok edilmesidir. Bu önemli bir problemdir yani tasarımda çok dikkatli olunmazsa performansta kötüleşme olur [Spera, 1998].

8.4.6. İyi Bir Kontrol ve Rüzgar Türbinleri

Orta ve büyük kapasiteli rüzgar türbinlerinde pitch kontrolü vasıtasıyla rüzgar türbininin aşırı hızlanmaması ve rüzgar türbinine gelen yüklerin sınırlandırılabilmesi için otomatik olarak rüzgar türbininin devreye girmesi veya devreden çıkması sağlanır. Bu sayede güçte sınırlama, güç ve yükte denge sağlanabilir.

Rüzgar türbininde güç, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olarak artar. Sürekli çalışma esnasında önceden tayin edilmiş rüzgar hızıyla, rüzgar türbinine güç girdisi istenilen miktarda gerçekleşir. Rüzgar hızı sınır değeri çok aşarsa türbinin aşırı

yüklenmemesi için rüzgardan elde edilen fazla güç rotordan atılmalıdır. Rüzgar türbininin devreden çıkma hızına kadar sistemden güç elde edilebilir. Hassas olmayan bir regülasyonla çıkış gücü sınırlandırılabilir. Kontrol ve ilk hareket düzeneklerinin kullanılmasıyla, zaruri düzenekler basit bir şekilde tamamlanmış olur. Rüzgar hızındaki dalgalanmalar nedeniyle rotorda meydana gelecek yüksek seviyeli bozulmalar, elektronik güç regülasyonu ile başarılı bir şekilde yok edilir.

Güçteki sınırlandırmalar, kararlı elektriksel güç elde etmek için yeterli değildir. Rüzgar kesme kuvveti, kule ve rüzgar hızındaki türbülans rotor diskinde değişik hızlar oluşmasına sonuçta da yükte dalgalanmaya neden olur. Bu çeşit değişken yükler, rüzgar türbininin parçalarında malzeme yorulmasına neden olur. Türbin parçaları için kabul edilebilir yorulma ömürleri, rüzgar türbininin yüklenmesine bağlı olarak değişiklik gösterir.

Yükteki dalgalanmalar tamamen elimine edilememektedir ama genlikleri istenilen düzeyde tutulabilmektedir. Her bir parçanın yüklenme kapasitesi malzemenin yorulma ömrüne dikkat edilmeksizin türbinin tahmini yüklenmesine bağlı olarak belirlenebilir. Ticari amaçlı türbinlerin çoğunda düzgün bir güç elde etmeye çalışılır.

Güçte elde edilen kalitenin sadece iyi bir kontrol ile sağlanabileceğini sanmak çok kaba bir tahmin olur. Güçte meydana gelen belirli kayıpların dışında kabul edilebilir geniş bir strateji vardır. Kontrol stratejisindeki seçim, momentte azalma yada artmaya sebep olur. Kontrol sisteminin seçimindeki gaye sadece düzgün bir yüklenmeyle kaliteli güç elde etmek değildir.

Rüzgar türbinine ait her bir parçanın yorulma ömrüyle bağlantılı olarak kontrol sisteminin seçiminde oluşan yüklere de dikkat etmek gerekir. İyi bir kontrolde amaç kabul edilebilir değerler elde etmektir. Kontrol sisteminin tasarımında yapısal yorulma, dişli kutusu ile jeneratörde meydana gelen yorulma, güç kalitesi ve kontrol aktivitesi gibi faktörlere dikkat edilmelidir ve meydana gelebilecek zararların belirlenmesine çalışılmalıdır. Önemli olan faktörler çoğunlukla türbin konfigürasyonuna bağlıdır.

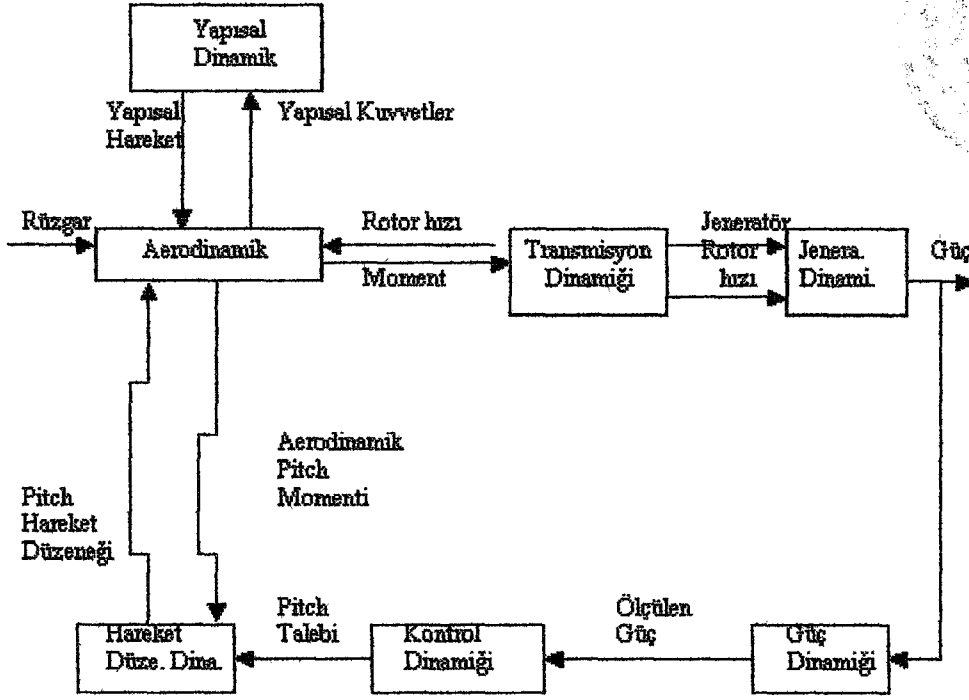
Kontrol sisteminin amaçları aşağıda sıralanmıştır.

- a) Rüzgar türbinine etki eden geçici yükler hafifletilerek gerilmeler azaltılmalıdır.
- b) Regüleli ve dengeli güç üretilmelidir.
- c) Dinamiksel açıdan rotor, uygun bir performans değerini elde edebilecek şekilde olmalıdır.
- d) Enerji kaybı minimuma indirilmelidir [Patel, 1999].

8.4.7. Rüzgar Türbinlerinde Feedback (Geri beslenme) Kontrolü ile İlgili Problemler

Rüzgar türbini birbirleriyle ilgili alt sistemlere ayrılabilir. Alt sistemlerin her biri türbinin çalışma şartları ile ilgili bazı durumları tanımlayabilmelidir. Daha ucuz ve daha hafif rüzgar türbinleri üretilmeye çalışılmaktadır, çok esnek yapı eldesi, rezonans ve dinamiksel etkileşim gibi konulara daha fazla önem gösterilmektedir. Dinamiksel açıdan sistemin modellenmesi yapılmalıdır. En önemli alt sistemler aşağıda sıralanmıştır.

- 1) Rüzgarın yapısı.
- 2) Aerodinamik
- 3) Yapısal dinamik
- 4) Transmisyon dinamiği
- 5) Jeneratör dinamiği
- 6) Ölçme dinamiği
- 7) Kontrol merkezleri
- 8) Hareket düzeneği ile ilgili dinamik.



Şekil 8.8. Rüzgar türbini dinamiği [Spera, 1998].

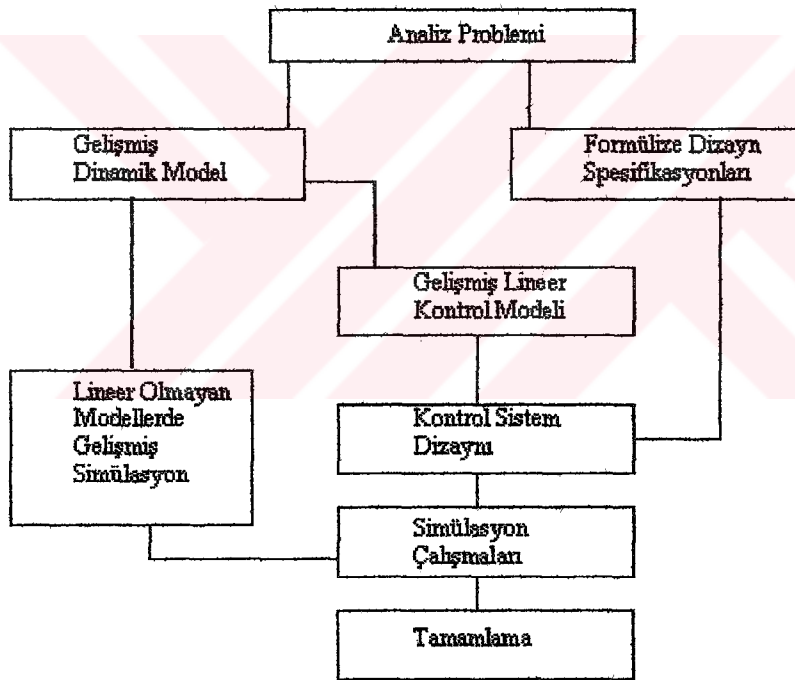
Alt sistemler ve bunların birbirleriyle olan bağlantıları şekil 11.4'te verilmiştir. Şekil 11.3'te verilen standart kontrol sistemiyle karşılaştırıldığında ölçülen gürültü v ve rüzgarın neden olduğu rotor torku ST_i vasıtasıyla rüzgar türbini dinamik bir sistem gibi modellenebilir. Bu konfigürasyonda güç tertibi ve güç iletimi, değişken kontrolü ve aerodinamik tork için bir sensör gibi çalışır. Ölçülen değişkenlerin seçimi için bu kavramı önemli şeyler içermektedir. Örneğin bu şartlar altında shaft hızının ölçülebilmesi bir avantajdır.

Kontrol sisteminin tasarımı, sistem modeline dayandırılır. Bir kontrol merkezinin üretilmesinde tasarım metodolojisinin seçimi, performans özelliklerini garanti altında tutabilecek en basit kontrolörlerin bulundurulmasını zorunlu kılmaktadır buna tasarımcıların deneyimleri de büyük ölçüde kılavuz olmaktadır.

8.4.8. Kontrol Sistemi Tasarımı

Kontrol sistemlerindeki tasarım proseslerinin geliştirilerek ifade edilmesi faydalıdır.

Şekil 8.9'da verilen akış diyagramı ile tasarım prosedürü tanımlanabilir. Tasarım problemleri nedeniyle edinilen deneyimler ve konu ile ilgili yeni bulgulara dayanarak tasarımlar yenileştirilebilir, prosesin tamamı pekçok kere tekrar edilmektedir. İlk adımda problemler belirlenmeli ve analiz edilmelidir. Rüzgar türbinlerinde kontrol sistemlerinin gerçekten ne çeşit gereksinimlere ihtiyaç olduğu belirlenmelidir. İşte yarar kontrol elde etmeye çalışmanın yanında uygun performans regülatörü için özelliklerde hesaba katılmalıdır. Analizler, türbin tasarımında değişikliklerin meydana geleceğini işaret etmektedir ve türbin, kontrol karakteristiklerinin gelişmesine önderlik etmelidir. Problemin anlaşılabilirliğine dayanarak deneme niteliğinde tasarım özellikleri formüle edilebilir. Kontrol probleminin analizinde, sistem dinamiğinin anlaşılması şarttır. Sistem davranışlarının matematiksel modellemesiyle formüle edilebilir. Gerçek bilgilerden faydalanılarak bu modellerden lineer olmayan bir model simülasyonu geliştirilebilir.



Şekil 8.9. Kontrol sistemi tasarım problemi [Spera, 1998].

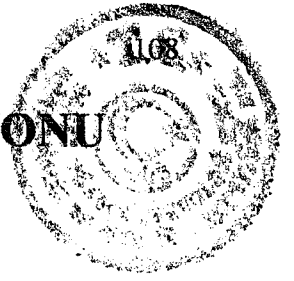
Lineer olmayan modeller basitleştirilebilir yalnız çok nemli olan dinamik, göz ardı edilmemelidir. Burada en önemli nokta model, kompleks sistemle enterkonnekte edildiğinde balans bağlanmalıdır. Modelin herhangi bir anında modeller arasındaki komplekslik relatif olarak mukayese edilebilmelidir. Bir alt sistemi basitleştirilmiş diğer modellerin yanında karmaşık bir modelle tanımlamak gerçekçi olmaz.

Lineer kontrol sistemlerinin tasarımı için çok sayıda metod vardır bunların en popüler olanları ise klasik ve optikmetoddur. Klasik kontrol metodunda, kontrol merkezlerinin ve açık devre kombinasyonla proseslerin çıktılarının frekansları önemlidir. Şekil prosedürü frekans alanı içindeki üç bölgede cisimlerin iyi şartlar altında olmasını sağlar. İlk olarak, alçak frekanslı davranışlar uygun performans seviyelerinin elde edilmesini sağlar. İkinci olarak geçiş frekansı civarlarındaki orta frekans bölgesi faz orjinlerinin gelişmesini ve yeterli kazancın elde edilmesini sağlar. Sonuçta yüksek frekanslı performans, gürültü etkilerinin azaltılmasını ve modelize edilmemiş dinamik kısımlarla ilgili belirsizliklerin ortadan kalkmasını sağlar.

Çıkış sinyallerinin, (örneğin yüklerle ilgili) girişteki kontrol sinyallerine (örneğin pitch işlevi ile ilgili) göre gösterdikleri değişikliklerden yararlanılarak optik kontrol sağlanır. Optik kontrol bölgesinin rol oynadığı bir frekans sahası (aynen klasik kontrolde olduğu gibi) verilebilir. Optik metodun en büyük avantajı çok değişkenli olmasıdır. Çok değişkenli sistemlerde, değişken hızlı rüzgar türbinlerinde olduğu gibi birden fazla girdi ve birden fazla çıktı vardır.

Daha önce lineer olmayan simülasyonda tanımlananlara dayanarak, kapalı devre sistemlerin performansı ve kontrol merkezlerinden de yararlanarak lineer tasarımlar oluşturulabilir.

Tasarımın her bir safhasında önemli olan deneyim yada yeni kavramların ışığı altında bir önceki safhaya yeniden dönülmesi gerekir [Spera, 1998].



9. RÜZGAR TÜRBİNİ KONSTRÜKSİYONU

9.1. Kabuller

GYTE Muallimköy Kampüsü Rakımı, (h_0).....	: 100 (m)
Kule Yüksekliği, (h).....	: 14 (m)
Rüzgar Ortalama Hızı, (V).....	: 7,5 (m/s)
Güç Katsayısı, (C_p) [Optimum Değer].....	: 0,33
Atmosferik Basınç.....	: 1,013 (bar)
Atmosferik Sıcaklık (T_0).....	: 288,5 (K)
Gaz Sabitesi, (R).....	: 0,287 (kJ/kgK)
Rüzgar Türbini Gücü, (P).....	: 5 (kW)

İstenilen güç değeri, GYTE imkanları ile dizaynı ve imalatı yapılabilecek bir rüzgar türbininden elde edilecek güçtür. Diğer değerler ise Muallimköy kampüsü için tahmini değerler olup, pratikteki uygulamalarda göz önünde bulundurularak karar verilmiştir. Yüksek verimi, düşük gürültü seviyeleri ve kolay imal edilebilmesi nedeniyle yatay eksenli, üç kanatlı bir rotor tasarımı tercih edilmiştir.

9.2. Konstriktif Hesaplar

İdeal Gazlar Denklemince Havanın Özgül Kütlesi,

$$P_0 \cdot V = \bar{m} \cdot R \cdot T_0$$

$$\rho = \frac{\bar{m}}{V} = \frac{P_0}{R \cdot T_0} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{0,287 \cdot 288,5 \cdot 10^3}$$

$$\rho = 1,2237 \text{ (kg/m}^3\text{)} \text{ (Standart atmosferik şartlar için geçerlidir.)}$$

100 (m) yükseklikte havanın yoğunluğu,

$$P_{100} = P_{\text{Atm}} - \frac{h}{10,5} = 760 - \left(\frac{100}{10,5}\right)$$

$$P_{100} = 750,476 \text{ (mmHg)}$$

$$1 \text{ (Torr)} = 1 \text{ (mmHg)} = 1,333 \cdot 10^{-3} \text{ (bar)}$$

$$\rho = \frac{P_0}{R \cdot T_0} = \frac{750,476 \cdot 1,333 \cdot 10^{-3} \cdot 10^5}{0,287 \cdot 288,5 \cdot 10^3}$$



$$\rho = 1,208 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Rotor yarıçapı,

$$R = \sqrt{\frac{2.P}{\pi.\rho.C_p.V^3}} = \sqrt{\frac{2.5.1000}{\pi.1,208.0,33.7,5^3}}$$

$$R = 4,350 \text{ (m)}$$

Bulunan yarıçapta bir rotor dizayn etmek mühendislik açısından uygundur. Kullanılması tavsiye edilen imalat yöntemi, küçük çaplı rotor dizaynı imalatçılara kolaylık sağlayacaktır.

$$D = 2.R = 8,70$$

$$D = 8,70 \text{ (m)}$$

Rotor kesit alanı,

$$A = \frac{\pi.D^2}{4} = \frac{\pi.8,70^2}{4}$$

$$A = 59,447 \text{ (m}^2\text{)}$$

Kütlesel debi (rotorsuz durumda),

$$\dot{m} = \rho.A.V = 1,208.59,447.7,5$$

$$\dot{m} = 538,590 \text{ (kg/s)}$$

Üç kanatlı rotorlarda güç katsayısının maksimum değeri için uç hız oranı 4 ile 7 arasındadır [Herier, 1998]. Burada $\lambda=5$ seçilmiştir.

Rotorun açısal hızı,

$$\Omega = \frac{\lambda.V}{R} = \frac{5.7,5}{4,350}$$

$$\Omega = 8,621 \text{ (1/s)}$$

Rotor devri,

$$n = \frac{30.\Omega}{\pi} = \frac{30.8,621}{\pi}$$

$$n = 82,324 \text{ (dev/dak)}$$

Elektriğin frekansı, $f = 50 \text{ (Hz)}$ 'dir. Elektrik frekansının açısal hızı,

$$\omega = 2.\pi.f = \frac{\pi.n_a}{30}$$

Jeneratör devri,

$$n_a = 60.f = 60.50$$

$$n_a = 3000 \text{ (dev/dak)}$$

Dişli kutusundaki çevirim oranı,

$$i = \frac{n_a}{n} = \frac{3000}{82,324}$$

$$i = 36,441$$

Türbin rotorunun gücü (denklem 4.9'dan),

$$N_a = 0,000196.V^3.D^2 = 0,000196.7,5^3.8,70^2$$

$$N_a = 6,259 \text{ (BG)}$$

Türbin rotorunun gücü (denklem 4.10'dan),

$$N_a = 0,000145.V^3.D^2 = 0,000145.7,5^3.8,70^2$$

$$N_a = 4,630 \text{ (kW)}$$

Betz'e göre türbin rotorunun gücü (denklem 4.11'den),

$$N_a = 0,000214.V^3.D^2 = 0,000214.7,5^3.8,70^2$$

$$N_a = 6,830 \text{ (kW)}$$

Noetzilin'e göre türbin rotorunun gücü (denklem 4.12'den),

$$N_a = 0,000185.V^3.D^2 = 0,000185.7,5^3.8,70^2$$

$$N_a = 5,907 \text{ (kW)}$$

Rüzgarın getirdiği güç (denklem 5.1'den),

$$P = \frac{1}{2}.\bar{m}.V^2 = \frac{1}{2}.538,590.7,5^2$$

$$P = 15147,844 \text{ (W)}$$

Faydalı güç,

$$P_{r_{\max}} = \frac{16}{27}.\frac{1}{2}.\rho.A.V^3 = \frac{8}{27}.1,208.59,447.7,5^3$$

$$P_{r_{\max}} = 8976,479 \text{ (W)}$$

Rotorlu durumda kütleli debi,

$$\bar{m} = \rho.A.V_d$$

$$V_v = \frac{V}{3} = \frac{7,5}{3} = 2,5 \text{ (m/s)}$$

$$V_d = \frac{V + V_v}{2} = \frac{7,5 + 2,5}{2} = 5 \text{ (m/s)}$$

$$\bar{m} = 1,208.59,447.5$$

$$\bar{m} = 359,060 \text{ (kg/s)}$$

Yüksek λ 'lı rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan kanat profilleri NACA 23012 ve NACA 4415'tir. Her iki profilinde $(C_L / C_D)_{\max}$ oranları birbirlerine yakın olup 125 civarındadır. İmalat kolaylığı açısından kalınlık oranı daha fazla olan NACA 4415 profili seçilmiştir ($\alpha = 6^\circ$, $C_L = 1$, $C_D = 0,008$).

Rotor ucunda çevresel hız

$$U = \frac{\pi R n}{30} = \Omega R = 8,620.4,350$$

$$U = 37,497 \text{ (m/s)}$$

API' e göre rüzgar kuvveti (denklem 4.20'den),

$$F = 0,0473 \cdot V^2 \cdot C_s \cdot A$$

$C_s = 0,5$ (silindirik bölgeler için)

$$V = V_{10} \cdot \left(\frac{y}{10} \right)^x$$

$$y = h_0 + \frac{h}{2} = 100 + \frac{14}{2} = 57$$

$$\frac{y}{10} = \frac{57}{10} = 5,7$$

yükseklik faktörü $x = 1/8$ için,

$$\left(\frac{y}{10} \right)^x = 5,7^{1/8} = 1,243$$

$$V = V_{10} \cdot \left(\frac{y}{10} \right)^x = 7,5 \cdot 1,243$$

$$V = 9,32 \text{ (m/s)}$$

$$F = 0,0473 \cdot 9,32^2 \cdot 0,5 \cdot 59,447$$

$$F = 122,195 \text{ N}$$

ABS' e göre rüzgar kuvveti (denklem 4.22'den),

$$F = 0,0623 \cdot V_k^2 \cdot C_h \cdot C_s \cdot A$$

$$C_h = 1,43 \quad (\text{Yükseklik katsayısı})$$

$$C_s = 0,5 \quad (\text{Şekil katsayısı})$$

$$F = 0,0623 \cdot 7,5^2 \cdot 1,43 \cdot 0,5 \cdot 59,447$$

$$F = 148,952 \text{ N}$$

İlerleme hız oranı (denklem 3.1'den),

$$J = \frac{V}{n \cdot D} = \frac{7,5}{82,329 \cdot 8,70}$$

$$J = 0,010$$

Daha önce hesaplanan havanın kütleli debisinden faydalanılarak girişim faktörü hesaplanabilir.

Girişim faktörü,

$$\bar{m} = \rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot (1 - a)$$

$$359,060 = 1,208 \cdot \pi \cdot 4,35^2 \cdot 7,5 \cdot (1 - a)$$

$$1 - a = 0,667$$

$$a = 0,333 \quad (a < 1 \text{ olmalıdır.})$$

Trast (Tek bir kanat için) (denklem 3.17'den),

$$T = 2 \cdot \pi R^2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot a \cdot (1 - a)$$

$$T = 2 \cdot \pi \cdot 4,35^2 \cdot 1,208 \cdot 7,5^2 \cdot 0,333 \cdot (1 - 0,333)$$

$$T = 1794,394 \text{ (N)}$$

Moment (Tek bir kanat için),

$$Q = T \cdot R = 1794,394 \cdot 4,35$$

$$Q = 7805,614 \text{ (Nm)}$$

Verim,

$$\eta = \frac{T \cdot V}{Q \cdot \Omega} = \frac{1794,394 \cdot 7,5}{7805,614 \cdot 8,62}$$

$$\eta = 0,2$$

Güç katsayısı,

$$\frac{P}{\rho \cdot V^3 \cdot D^2} = \frac{5.1000}{1,208.7,5^3 \cdot 8,7^2}$$

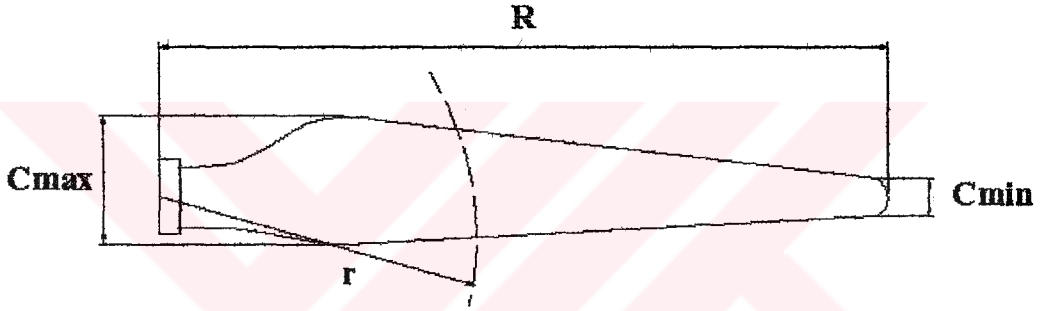
$$C_p = 0,130$$

Grafik 3.1'den faydalanarak teorik verim, güç katsayısının 0,130 değerine karşılık yaklaşık 0,935 civarında bulunur. Hesaplamalar sonucunda rotora ait teorik verim 0,2 civarında çıkmıştır.

Trast katsayısı (Tek bir kanat için),

$$T_c = \frac{T}{\rho \cdot V^2 \cdot D^2} = \frac{1794,394}{1,208.7,5^2 \cdot 8,7^2}$$

$$T_c = 0,349$$



Şekil 9.1. Kanat elemanı

Çizelge 9.1. Kanat açıklığı boyunca burulma açısı, veter değişimi ve kord uzunluğu [Sayındı, 1994]

r/R	$i(^{\circ})$	c/R	$C_{max}, C_{min} (m)$
0,20	17,8	0,211	0,918
0,30	11,1	0,163	0,709
0,40	7,2	0,130	0,566
0,50	4,8	0,106	0,461
0,60	3,1	0,089	0,387
0,70	1,9	0,075	0,326
0,80	1,0	0,061	0,265
0,90	0,4	0,044	0,191
0,99	-0,1	0,014	0,061

Moment katsayısı (Tek bir kanat için),

$$Q_c = \frac{Q}{\rho \cdot V^2 \cdot D^3} = \frac{7805,614}{1,208 \cdot 7,5^2 \cdot 8,7^3}$$

$$Q_c = 0,174$$

$$S = C_{min} \cdot R + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot R \cdot \left(\frac{C_{max} - C_{min}}{2} \right)$$

$$S = C_{min} \cdot R + \frac{1}{2} \cdot R \cdot (C_{max} - C_{min})$$

$r/R = 0,2$ 'den itibaren ki kanat yüzeyi,

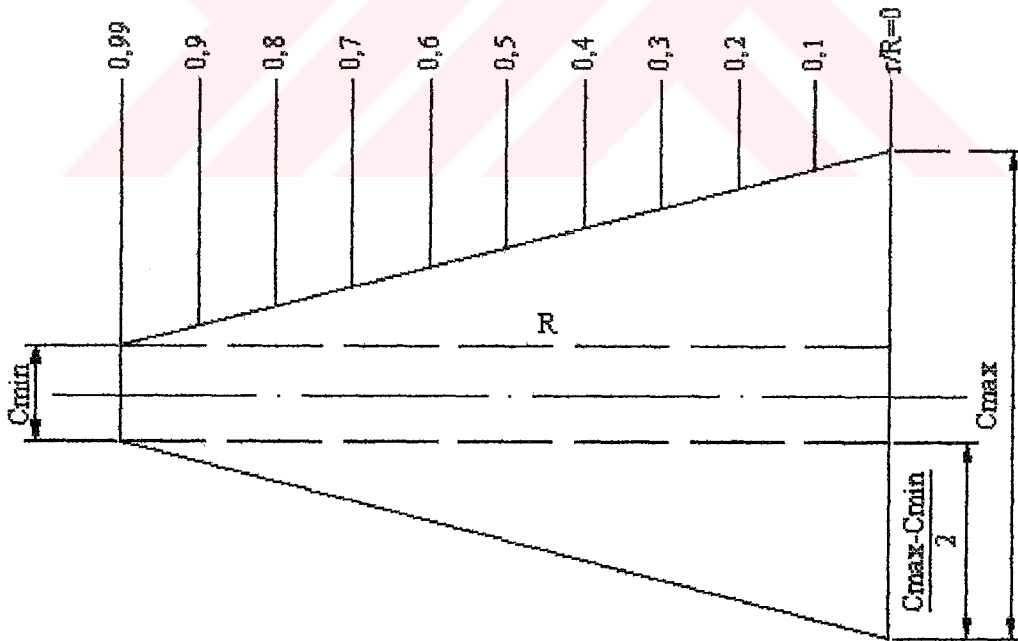
$$S_{0,2} = 0,061 \cdot 4,35 + \frac{1}{2} \cdot 4,35 \cdot (0,918 - 0,061)$$

$$S_{0,2} = 2,129 \text{ (m}^2\text{)}$$

Toplam trast (Rotor için),

$$T_T = N \cdot T = 3.1794,394$$

$$T_T = 5383,182 \text{ (N)}$$



Şekil 9.2. Kanat yüzeyi

Toplam moment (Rotor için),

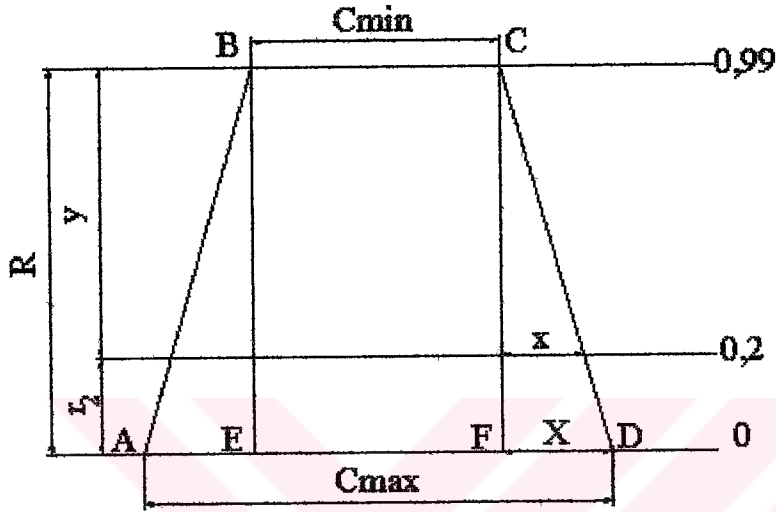
$$Q_T = N.Q = 3.7805,614$$

$$Q_T = 23416,842 \text{ (Nm)}$$

Toplam trast katsayısı,

$$(T_C)_T = N.T_C = 3.0,349$$

$$(T_C)_T = 1,047$$



Şekil 9. 3. Kanat yüzey hesabı

$$r/R = 0,2 \text{ için } C_{\max} = 0,918 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0,99 \text{ için } C_{\min} = 0,061 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0,2 \text{ için,}$$

$$r_2 = 0,2R = 0,2.4,35$$

$$r_2 = 0,87 \text{ (m)}$$

$$y = R - r_2 = 4,35 - 0,87$$

$$y = 3,48 \text{ (m)}$$

$$C_{\max} = C_{\min} + 2x$$

$$x = \frac{(C_{\max} - C_{\min})}{2} = \frac{0,918 - 0,061}{2}$$

$$x = 0,490 \text{ (m)}$$

CDF üçgenindeki benzerlikten yararlanılarak,

$$\frac{y}{R} = \frac{x}{X}$$

$$X = 0,613 \text{ (m)}$$

$r/R = 0$ için $C_{\max}$,

$$C_{\max} = \overline{AD} = C_{\min} + 2x = 0,061 + 2 \cdot 0,613$$

$$C_{\max} = 1,287 \text{ (m)}$$

Kanat yüzeyi,

$$S = C_{\min} \cdot R + \frac{1}{2} \cdot R \cdot (C_{\max} - C_{\min})$$

$$S = 0,061 \cdot 4,35 + \frac{1}{2} \cdot 4,35 \cdot (1,287 - 0,061)$$

$$S = 2,932 \text{ (m}^2\text{)} \quad (9.1)$$

Rotor yüzey alanı,

$$S_T = N \cdot S = 3 \cdot 2,932$$

$$S_T = 8,796 \text{ (m}^2\text{)}$$

Toplam moment katsayısı,

$$(Q_c)_T = N \cdot Q_c = 3 \cdot 0,174$$

$$(Q_c)_T = 0,522$$

Kaldırma kuvveti (denklem 4.17'den),

$$L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_T$$

$$L = \frac{1}{2} \cdot 1,1 \cdot 1,208 \cdot 7,5^2 \cdot 8,796$$

$$L = 298,844 \text{ (N)}$$

Sürüklenme kuvveti (denklem 4.18'den),

$$D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_T$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot 0,008 \cdot 1,208 \cdot 7,5^2 \cdot 8,796$$

$$D = 2,39 \text{ (N)}$$

Dinamik basınç,

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,208 \cdot 7,5^2$$

$$q = 33,975 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Eksenel trast (denklem 5.10'dan),

$$F_x = \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot (1 - a) \cdot b$$

$$b = 2 \cdot a = 2 \cdot 0,333 = 0,666$$

$$F_x = 1,208 \cdot 59,447 \cdot 7,5^2 \cdot (1 - 0,333) \cdot 0,666$$

$$F_x = 1794,401 \text{ (N)}$$

Havanın kinetik enerjisi,

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi R^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 1,208 \cdot 7,5^3 \cdot \pi \cdot 4,35^2$$

$$E_k = 15147,784 \text{ (W)}$$

Kanat yarıçap oranlarına göre eksenel trast ve yüzey gerilmeleri,

$$r/R = 0,2 \text{ için,}$$

$$r_1 = 0,2 \cdot R = 0,2 \cdot 4,35 = 0,87 \text{ (m)}$$

Tek bir kanadın kanat yüzey alanı,

$$A_1 = C_{\min} \cdot r_1 + \frac{1}{2} \cdot r_1 \cdot (C_{\max} - C_{\min})$$

$$C_{\max} = 1,287 \text{ (m)} ; C_{\min} = 0,918 \text{ (m)} \text{ (Değerler çizelge 9.2'den alınmıştır.)}$$

$$A_1 = 0,918 \cdot 0,87 + \frac{1}{2} \cdot 0,87 \cdot (1,287 - 0,918)$$

$$A_1 = 0,959 \text{ (m}^2\text{)}$$

Toplam kanat yüzey alanı,

$$(A_T)_{0,2} = N \cdot A_1 = 3 \cdot 0,959$$

$$(A_T)_{0,2} = 2,878 \text{ (m}^2\text{)}$$

Rotor alanı,

$$A_r = \pi r_n^2 = \pi \cdot 0,87^2$$

$$A_r = 2,378 \text{ (m}^2\text{)}$$

Eksenel trast,

$$(F_x)_1 = \rho \cdot A_r \cdot V^2 \cdot (1 - a) \cdot b = 1,208 \cdot 2,378 \cdot 7,5^2 \cdot (1 - 0,333) \cdot 0,666$$

$$(F_x)_1 = 71,780 \text{ (N)}$$

Yüzey gerilmesi,

$$P_n = \frac{F_x}{A_r} = \frac{71,780}{2,378}$$

$$P_1 = 30,185 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Diğer r/R oranları için işlemler tekrarlandığında aşağıdaki değerler elde edilir.

Çizelge 9.2. r/R değerlerine karşılık gelen hesap sonuçları

r/R	Kanat Yüzey Alanı (m^2)	Toplam Kanat Yüzey Alanı (m^2)	Rotor Alanı (m^2)	Eksenel Trast (N)	Yüzey Gerilmesi (N/m^2)
0,2	0,959	2,878	2,378	71,776	30,185
0,3	1,062	3,185	5,350	161,495	30,185
0,4	1,109	3,328	9,511	287,103	30,185
0,5	1,117	3,351	14,862	448,599	30,185
0,6	1,107	3,320	21,401	645,982	30,185
0,7	1,086	3,257	29,129	879,253	30,185
0,8	1,028	3,085	38,046	1148,412	30,185
0,9	0,893	2,678	48,152	1453,459	30,185
0,99	0,543	1,628	58,264	1758,686	30,185

9.3. Palaların Çizimi

$r/R = 0$ için,

$r/R = 0$ değeri için $C = 1,287 \text{ (m)}$,

	Üst Yüzey	Alt Yüzey
$x = 0.C/100$	$y = 0.C/100$	$y = 0.C/100$
$x = 0.1,287/100$	$y = 0.1,287/100$	$y = 0.1,287/100$
$x = 0 \text{ (m)}$	$y = 0 \text{ (m)}$	$y = 0 \text{ (m)}$
$x = 1,25.C/100$	$y = 3,07 .C/100$	$y = -1,79.C/100$
$x = 1,25.1,287/100$	$y = 3,07.1,287/100$	$y = -1,79.1,287/100$
$x = 0,016 \text{ (m)}$	$y = 0,040 \text{ (m)}$	$y = -0,023 \text{ (m)}$

Yukarıdaki işlemlere devam edilerek $r/R = 0$ değeri için kanat profili çizilebilir. Sonuçlar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 9.3. X ve Y, kord (C) uzunluğuna bağlı, yüzde olarak verilmiştir
[Sayındı, 1994]

NACA 4415			
ÜST YÜZEY		ALT YÜZEY	
X(% C)	Y(% C)	X (%C)	Y(%C)
0	-	0	0
1,25	3,07	1,25	-1,79
2,5	4,17	2,5	-2,48
5,0	5,74	5,0	-3,27
7,5	6,91	7,5	-3,71
10	7,84	10	-3,98
15	9,27	15	-4,18
20	10,25	20	-4,15
25	10,92	25	-3,98
30	11,25	30	-3,75
40	11,25	40	-3,25
50	10,53	50	-2,72
60	9,30	60	-2,14
70	7,63	70	-1,55
80	5,55	80	-1,03
90	3,08	90	-0,57
95	1,67	95	-0,36
100	-	100	-0,16

r/R 'nin diğer değerleri için aynı işlemler yürütüldüğünde, tüm kanat profili koordinatları elde edilmiş olur. Burada dikkat edilmesi gereken tüm r/R değerlerinde, kord (C) değerinin değiştiğidir.

Çizelge 9.4. Farklı r/R ve kord (C) değerleri için X-Y değerleri

$r/R = 0; C = 1,287$		
X (m)	$Y_{üst}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,016	0,040	-0,023
0,032	0,054	-0,032
0,064	0,074	-0,042
0,097	0,089	-0,048
0,129	0,101	-0,051
0,193	0,119	-0,054
0,257	0,132	-0,053
0,322	0,141	-0,051
0,386	0,145	-0,048
0,515	0,145	-0,042
0,644	0,136	-0,035
0,772	0,120	-0,028
0,901	0,098	-0,020
1,030	0,071	-0,013
1,158	0,040	-0,007
1,223	0,021	-0,005
1,287	0,000	-0,002

$r/R = 0,1; C = 1,102$		
X (m)	$Y_{üst}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,014	0,034	-0,020
0,028	0,046	-0,027
0,055	0,063	-0,036
0,083	0,076	-0,041
0,110	0,086	-0,044
0,165	0,102	-0,046
0,220	0,113	-0,046
0,276	0,120	-0,044
0,331	0,124	-0,041
0,441	0,124	-0,036
0,551	0,116	-0,030
0,661	0,102	-0,024
0,771	0,084	-0,017
0,882	0,061	-0,011
0,992	0,034	-0,006
1,047	0,018	-0,004
1,102	0,000	-0,002

$r/R = 0,2; C = 0,918$		
X (m)	$Y_{üst}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,011	0,028	-0,016
0,023	0,038	-0,023
0,046	0,053	-0,030
0,069	0,063	-0,034
0,092	0,072	-0,037
0,138	0,085	-0,038
0,184	0,094	-0,038
0,230	0,100	-0,037
0,275	0,103	-0,034
0,367	0,103	-0,030
0,459	0,097	-0,025
0,551	0,085	-0,020
0,643	0,070	-0,014
0,734	0,051	-0,009
0,826	0,028	-0,005
0,872	0,015	-0,003
0,918	0,000	-0,001

$r/R = 0,3; C = 0,709$		
X (m)	$Y_{üst}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,009	0,022	-0,013
0,018	0,030	-0,018
0,035	0,041	-0,023
0,053	0,049	-0,026
0,071	0,056	-0,028
0,106	0,066	-0,030
0,142	0,073	-0,029
0,177	0,077	-0,028
0,213	0,080	-0,027
0,284	0,080	-0,023
0,355	0,075	-0,019
0,425	0,066	-0,015
0,496	0,054	-0,011
0,567	0,039	-0,007
0,638	0,022	-0,004
0,674	0,012	-0,003
0,709	0,000	-0,001

$r/R = 0,4; C = 0,566$		
X (m)	$Y_{üst}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,007	0,017	-0,010
0,014	0,024	-0,014
0,028	0,032	-0,019
0,042	0,039	-0,021
0,057	0,044	-0,023
0,085	0,052	-0,024
0,113	0,058	-0,023
0,142	0,062	-0,023
0,170	0,064	-0,021
0,226	0,064	-0,018
0,283	0,060	-0,015
0,340	0,053	-0,012
0,396	0,043	-0,009
0,453	0,031	-0,006
0,509	0,017	-0,003
0,538	0,009	-0,002
0,566	0,000	-0,001

$r/R = 0,5; C = 0,461$		
X (m)	$Y_{üst}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,006	0,014	-0,008
0,012	0,019	-0,011
0,023	0,026	-0,015
0,035	0,032	-0,017
0,046	0,036	-0,018
0,069	0,043	-0,019
0,092	0,047	-0,019
0,115	0,050	-0,018
0,138	0,052	-0,017
0,184	0,052	-0,015
0,231	0,049	-0,013
0,277	0,043	-0,010
0,323	0,035	-0,007
0,369	0,026	-0,005
0,415	0,014	-0,003
0,438	0,008	-0,002
0,461	0,000	-0,001

$r/R = 0,6; C = 0,387$		
X (m)	$Y_{üst}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,005	0,012	-0,007
0,010	0,016	-0,010
0,019	0,022	-0,013
0,029	0,027	-0,014
0,039	0,030	-0,015
0,058	0,036	-0,016
0,077	0,040	-0,016
0,097	0,042	-0,015
0,116	0,044	-0,015
0,155	0,044	-0,013
0,194	0,041	-0,011
0,232	0,036	-0,008
0,271	0,030	-0,006
0,310	0,021	-0,004
0,348	0,012	-0,002
0,368	0,006	-0,001
0,387	0,000	-0,001

$r/R = 0,7; C = 0,326$		
X (m)	$Y_{üst}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,004	0,010	-0,006
0,008	0,014	-0,008
0,016	0,019	-0,011
0,024	0,023	-0,012
0,033	0,026	-0,013
0,049	0,030	-0,014
0,065	0,033	-0,014
0,082	0,036	-0,013
0,098	0,037	-0,012
0,130	0,037	-0,011
0,163	0,034	-0,009
0,196	0,030	-0,007
0,228	0,025	-0,005
0,261	0,018	-0,003
0,293	0,010	-0,002
0,310	0,005	-0,001
0,326	0,000	-0,001

$r/R = 0,8; C = 0,265$		
X (m)	$Y_{\text{üst}}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,003	0,008	-0,005
0,007	0,011	-0,007
0,013	0,015	-0,009
0,020	0,018	-0,010
0,027	0,021	-0,011
0,040	0,025	-0,011
0,053	0,027	-0,011
0,066	0,029	-0,011
0,080	0,030	-0,010
0,106	0,030	-0,009
0,133	0,028	-0,007
0,159	0,025	-0,006
0,186	0,020	-0,004
0,212	0,015	-0,003
0,239	0,008	-0,002
0,252	0,004	-0,001
0,265	0,000	0,000

$r/R = 0,9; C = 0,191$		
X (m)	$Y_{\text{üst}}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,002	0,006	-0,003
0,005	0,008	-0,005
0,010	0,011	-0,006
0,014	0,013	-0,007
0,019	0,015	-0,008
0,029	0,018	-0,008
0,038	0,020	-0,008
0,048	0,021	-0,008
0,057	0,021	-0,007
0,076	0,021	-0,006
0,096	0,020	-0,005
0,115	0,018	-0,004
0,134	0,015	-0,003
0,153	0,011	-0,002
0,172	0,006	-0,001
0,181	0,003	-0,001
0,191	0,000	0,000

$r/R = 0,99; C = 0,061$		
X (m)	$Y_{\text{üst}}$ (m)	Y_{alt} (m)
0,000	0,000	0,000
0,001	0,002	-0,001
0,002	0,003	-0,002
0,003	0,004	-0,002
0,005	0,004	-0,002
0,006	0,005	-0,002
0,009	0,006	-0,003
0,012	0,006	-0,003
0,015	0,007	-0,002
0,018	0,007	-0,002
0,024	0,007	-0,002
0,031	0,006	-0,002
0,037	0,006	-0,001
0,043	0,005	-0,001
0,049	0,003	-0,001
0,055	0,002	0,000
0,058	0,001	0,000
0,061	0,000	0,000

9.4. Pitch Açısının Hesabı

Rüzgar türbini rotoru 7,5 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızı değeri için değeri için dizayn edilmiştir. Değişik türbin dizaynları göz önüne alındığında, türbinimizin 4 (m/s)'de devreye girip, 15 (m/s)'de devreden çıkacağını söyleyebiliriz. Rotorun açısal hızını 8,621 (1/s) değerinde sabit tutabilmek için kanat yüzey alanındaki değişiklikleri hesaplamamız gerekir. Bu açısal hız 7,5 (m/s) rüzgar hızında gerçekleşmektedir.

Değişken rüzgar hızlarında, kanada etki eden rüzgar kuvveti sabit olmalıdır ki rotorun açısal hızında değişiklik olmasın. Çeşitli metotlarla rüzgar kuvveti daha önce hesaplanmıştı.

$$F = 122,195 \text{ (N)} \quad (\text{API'ya göre rüzgar kuvveti})$$

$$F = 148,952 \text{ (N)} \quad (\text{ABS'ye göre rüzgar kuvveti})$$

Ortalama rüzgar kuvveti 150 (N) olarak alınmıştır.

Aerodinamik kuvvet,

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot V^2 \text{ (N)}$$

Projeksiyon alanı,

$$A = \frac{F}{1/2 \cdot \rho \cdot C_D \cdot V^2} \text{ (m}^2\text{)}$$

$C_D = C_s = 0,5$ (Şekil katsayısı yada aerodinamik direnç.)

$$A = \frac{150}{1/2 \cdot 1,208 \cdot 0,5 \cdot V^2}$$

$$A = \frac{165,563}{V^2} \text{ (m}^2\text{)}$$

$V = V_{\text{ort}} = 7,5 \text{ (m/s)}$ ortalama hız için pitch açısını hesaplayalım.

$$A = \frac{165,563}{7,5^2}$$

$$A = 2,943 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A = \pi \cdot R^2$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,943}{\pi}}$$

$$R = 0,937 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0 \text{ için } C/R = 0,296$$

$$C_{\max} = 0,296 \cdot 0,937 = 0,277 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0,99 \text{ için } C/R = 0,014$$

$$C_{\min} = 0,014 \cdot 0,937 = 0,013 \text{ (m)}$$

Kanat yüzey alanı,

$$S = C_{\min} R + \frac{1}{2} R (C_{\max} - C_{\min})$$

$$S = 0,013 \cdot 0,937 + \frac{1}{2} \cdot 0,937 (0,277 - 0,013)$$

$$S = 0,136 \text{ (m}^2\text{)}$$

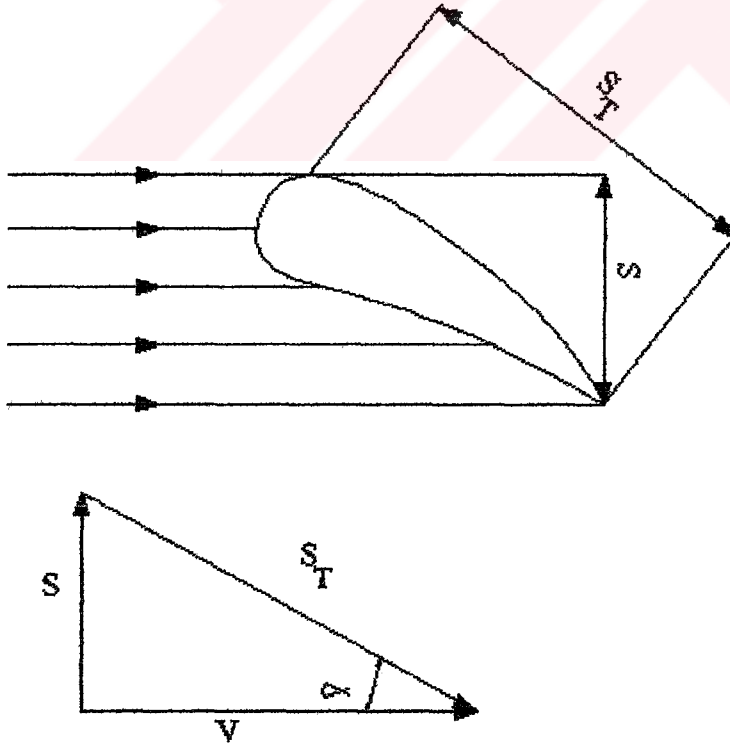
Pitch açısı,

$$\sin \alpha = \frac{S}{S_T}$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{S}{S_T}\right) = \arcsin\left(\frac{0,136}{2,932}\right)$$

$$\alpha = 2,66^\circ$$

(S_T) tek bir kanadın yüzey alanıdır ve daha önceden, denklem 9.1'de hesaplanmıştır.

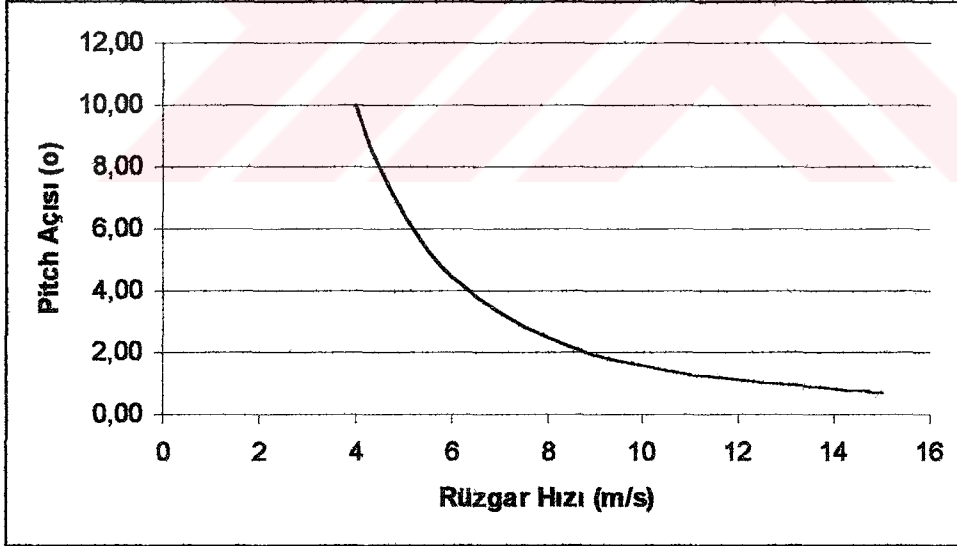


Şekil 9.4. Pitch açısının kanat profili üzerindeki gösterimi

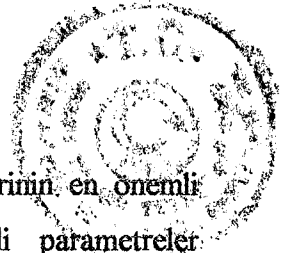
Rüzgar hızının değişimine bağlı olarak pitch açısında meydana gelen değişiklikler aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 9.5. Rüzgar hızı ile pitch açısı değişimi

Rüzgar hızı (m/S)	Pitch açısı (°)
4	10,028
4,5	7,908
5,5	5,284
6,5	3,781
7,5	2,839
8,5	2,210
9,5	1,769
10,5	1,448
11,5	1,207
12,5	1,022
13,5	0,876
14,5	0,759
15	0,709



Şekil 9.5. Rüzgar hızı, pitch açısı değişimi



10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri tanıtılarak rüzgar türbinlerinin en önemli parçası olan rotor tanımlanmıştır. Türbin dizaynı için gerekli parametreler belirlenmiştir. Örnek bir rotor dizayn hesabı yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda türbin dizaynında asıl zorluğun kontrol sistemini tasarlamak ve uygulamak olduğu görülmüştür. Diğer enerji sistemleri ile mukayesesinde göz önünde bulundurulması gereken en önemli husus, bu sistemlerde girdinin tam olarak kontrol edilememesidir. Bu durum kontrol sistemlerinin önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında çeşitli kaynaklardan yararlanılarak, konu ile ilgili bölümler çizelge ve formüllerle birlikte sunulmuştur.

Rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan bölgelerde etütler yapılarak bu konunun üzerinde daha fazla durulmalı ve özellikle kontrol sistemleri üzerinde daha fazla çalışılmalıdır. Bu çalışmanın aynı konu üzerinde yapılacak diğer çalışmalara kaynak olması düşünülmüştür.

KAYNAKLAR



- 1- Thomas Ackermann and Lennart Söder, Wind Energy Technology and Current Status, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2000.
- 2- EİE, www.eie.gov.tr, 2000.
- 3- Zekai Şen, Stochastic Wind Energy Calculation Formulation, Jurnal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999.
- 4- Volkan Ş. Ediger and Elçin Kentel, Renewable Energy Potential as an Alternative to Fossil Fuels in Turkey, Energy Conversion and Management, 1997.
- 5- DPT, 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı, 2000.
- 6- S.M.Habali and I.A.Saleh, Local Design Testing and Manufacturing of Small Mixed Airfoil Wind Turbine Blades of Glass Fiber Reinforced Plastics Part I: Design of the Blade and Root, Energy Conversion and Management, 1999.
- 7- Siegfried Heirer, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, Wiley, New York, 1998.
- 8- Recep Koç, Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretim Mekanizması Tasarım ve İmalatı, Dumlupınar Üniversitesi, 1995.
- 9- Murat Durak, Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması: Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali, İTÜ, 2000.
- 10- L.M.Milne, Theoretical Aerodynamics, C.B.E., New York, 1966.
- 11- Süleyman Tolun v.d., Çanakkale civarında Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesi ve Yöreye Uygun Küçük Güçlü Bir Rüzgar Türbini Dizaynı, İTÜ, 1994.
- 12- S.M.Habali and I.A.Saleh, Local Design Testing and Manufacturing of Small Mixed Airfoil Wind Turbine Blades of Glass Fiber Reinforced Plastics Part II: Manufacturing of the Blade and Root, Energy Conversion and Management, 1999.
- 13- Mehmet Sayandı, Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Türbini Dizaynı, YTÜ, 1994.
- 14- David A.Spera, Wind Turbine Technology, Asme, New York, 1998.
- 15- Mukund R.Patel, Wind and Solar Power Systems, CRS, New York, 1999.
- 16- Osman Yürekli, 3 kVA'lık Bir Rüzgar Enerji Dönüşüm Sistemindeki Jeneratör Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Yörenin Rüzgar Enerjisinin Kullanılabilirliği, ÇÜ, 1991.

ÖZGEÇMİŞ



Fatih Yılmaz 1976 yılında Kars' ta doğmuştur. İlköğrenimine 1983 yılında Erzurum Kültür Kurumu İlkokulu' nda başlamıştır. Lise eğitimini 1994 yılında Erzurum Anadolu Lisesi' nde tamamlamış ve 2000 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümü' nden Makina Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2000 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde başlamış olduğu Yüksek Lisans programını 2003 yılında tamamlamıştır.

