



**DEĐIŐKEN RÜZGAR HIZLARINA UYGUN
BİR TÜRİN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ
OĞuz ÇOLAK**

**Yüksek Lisans Tezi
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİ DALI
ISPARTA 2000**

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN RÜZGAR HIZLARINA UYGUN BİR TÜRBİN MODELİ
GELİŞTİRİLMESİ

Oğuz ÇOLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİ DALI

ISPARTA, 2000

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mehmet ATILGAN

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)

Üye : Prof. Dr. Mustafa BAYHAN (Danışman)

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)

Üye : Prof. Dr. Mustafa ACAR

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)

ONAY

Bu tez .../.../2000 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

.../.../2000

S.D.Ü FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ ve TEŞEKÜRLER.....	vi
SİMGELER LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLGİSİ.....	3
2.1 Rüzgarın Oluşumu.....	3
2.1.1 Rüzgar Enerjisinin Oluşumu.....	3
2.1.1.1 Basınç Gradiyan Kuvveti.....	3
2.1.1.2. Merkezkaç Kuvveti.....	4
2.1.1.3 Sürtünme Kuvveti.....	4
2.1.1.4 Saptırıcı Kuvvet.....	5
2.2 Rüzgar Enerjisine Etki Eden Faktörler.....	7
2.2.1 Rüzgarın İş Yapabilme Yeteneği.....	7
2.2.2 Rüzgarın İş Yapabilme Yeteneğine Etki Eden Faktörler.....	8
2.3 Rüzgar Enerjisinden Yararlanma.....	9
2.4 Rüzgar Hızının Ölçülmesi Ve Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi.....	10
2.4.1 Rüzgar Hızının Ölçülmesi.....	10
2.4.1.1 Rotorlu (döner) Anemometreler.....	10
2.4.1.2 Basınç Anemometreleri.....	12
2.4.1.3. Bilgisayar Konrollü Dijital Sistemler.....	14
2.5 Rüzgar Türbini İle İlgili Formüller.....	15
2.5.1 Kaldırma, Sürüklenme ve Moment Denklemlerinin Çıkarılması.....	15
2.5.2 Kaldırma Katsayısı.....	23
2.5.3 Moment Katsayısı.....	24
2.5.4 Yatay Eksenli Türbinler İçin Momentum Teorisi.....	25
2.5.5 Kutta Joukowsky Kanunu.....	26
2.6 Rüzgar Türbininin Seçimi.....	28

2.6.1 Yöre İncelemesi.....	28
2.6.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	29
2.6.3 Rüzgar Türbini Tasarımı.....	30
2.6.4 Rüzgar Türbini.....	31
2.6.4.1 Düşey Eksenli Türbinler.....	32
2.6.5 Tasarım Problemleri.....	33
2.7 Güç Hakkında Bilgiler.....	34
2.7.1 Faydalı Güç.....	34
2.7.2 Rotorun Faydalı Gücü.....	34
2.7.3 Rüzgar Gücü.....	36
2.7.3.1 API Rüzgar Kuvveti.....	37
2.7.3.2 ABS Rüzgar Kuvveti.....	39
2.7.3.3 DNV Rüzgar Kuvveti.....	40
2.7.4 Rüzgar Gücünde Gelişme.....	42
2.8 Enerji Dönüşümü.....	44
2.8.1 Rüzgar Enerjisi Çevrim Sistemleri.....	44
2.8.2 Rüzgar Enerjisi.....	45
2.9 Rüzgar Enerjisi Sistemlerinin Kullanılması.....	48
2.9.1 Rüzgar Gücü- Elektrik Gücü Dönüşümü.....	50
2.9.2 Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Seçimi.....	51
2.9.3 Rüzgar Türbiniden Elde Edilebilecek Maksimum Elektriksel Akış Gücünün Hesaplanması.....	53
2.9.4 Türbin Fiyatının Hesaplanması.....	53
2.10 Günümüzün Rüzgar Türbinlerindeki Gelişmeler.....	55
2.11 Rüzgar Türbininin Elemanları.....	57
2.11.1 Kılavuz Kuyruk.....	57
2.11.2 Platform Ve Kule.....	58
2.11.3 Yataklar Ve Jeneratör.....	59
2.11.4 Kule Tasarımı.....	59
2.11.5 Mekanizma Odası.....	60
2.12 Kontrol Sistemleri.....	60
2.12.1 Kontrol Sistemi.....	60
2.12.2 Esneme Kontrolü.....	60
2.12.3 Rüzgür Türbini Çiftliklerinde Gürültü Kontrolü.....	61

2.13 Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemleri ve Bunların Uygulamaları.....	67
2.13.1 Kontrol Sistemleri ve Rüzgar Türbinleri.....	68
2.13.2 Rüzgar Türbini Çiftliği Kontrol Sistemleri.....	69
2.13.3 Rüzgar Türbini Kontrol Sistemleri.....	69
2.13.3.1 Regülasyon.....	69
2.13.3.2 Komponent Kontrol Sistemleri.....	70
2.13.3.3 Rüzgar Türbinlerinde Feedback (Geri Bildirim) Kontrolü İle İlgili Problemler.....	74
2.13.4 Kontrol Sistemi Tasarımı.....	75
3.MATERYAL VE METOD.....	78
3.1 Materyal.....	78
3.1.1 Araştırma Yeri ve Araştırmada Kullanılan Rüzgar Türbini Modelinin Teknik Özellikleri.....	78
3.1.1.1 Türbin Modelinin Teknik Özellikleri.....	81
3.1.2 Kanat Geometrisi ve Parametreler.....	81
3.1.2.1 Kanatların İmali ve Kanat Bağlantıları.....	82
3.1.3 Elektrik Bağlantıları.....	85
3.1.4 Lüle.....	85
3.1.5 Rüzgar Kaynağı ve Ölçümü.....	86
3.2 Metod.....	88
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	90
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	94
6.KAYNAK.....	97
7.ÖZGEÇMİŞ.....	99
8.EKLER.....	100

ÖZET

Bu çalışmada model bir rüzgar türbini tasarımı olarak bu türbine ait performans değerleri incelenmiştir. Bu amaçla önce, genel olarak rüzgar türbinlerinin genel aerodinamik ve mekanik karakteristikleri incelenmiş daha sonrada model türbinde bunlar uygulanmıştır.

Rüzgar hızlarının düşük olduğu ülkemizde hızı artıcı bir lüle konfigürasyonu ile bütünleştirilen model rüzgar türbini ile yapılan deneyler sonucunda tasarlanan türbinin karakteristiklerinin makul seviyelerde olduğu tespit edilmiştir.

Düşey eksenli bir yapıya sahip olan model Savonius türbini hem imalatının kolay olması hemde düşük hızlarda dönmeye başlaması çalışmada kullanılması için tercih sebebi olmuştur.

Sonuçta ise bu türbinin kullanılabileceği alanlar ve rüzgar türbinlerinden elektrik elde edilebilmek için türbinlerle ilgili öneriler ve görüşler bildirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Rüzgar Türbini, Yenilenebilir Enerji, Savonius

ABSTRACT

In this study, search the opportunity of using Savonius wind turbine blade and the prediction of performance of turbine rotors after a brief explanation about wind energy conversion systems have been searched. This thesis mentions commercial use of these systems and aerodynamic research and developing studies over them.

Today, one of the fastest growing energy resource is wind power. Worldwide electricity generation capacity from wind has risen 3700 megawatts until 1994 and 7500 megawatts by the end of 1997. The rate of installed capacities' increase has risen 150% from 1990 to the beginning of 1996 and this corresponds to 20%, the annual average increase. This rapid growth in utility and continuous technological development in conversion systems promise a significant alternative to an energy resource for several countries and regions.

Using wind power as a renewable resource is interesting and the environmental impact of the conversion process has been minimum comparing with the other technologies. But, today the main reason for widespread use of this technology, becoming competitive with conventional technologies, is the decrease of capital and the generation cost of conversion systems. Furthermore, the implementation of the full social cost concept by means of CO₂ taxes or supports has led the commercialisation of this clean technology, especially in industrial countries.

KEY WORDS: Wind Turbine, Renewable Energy, Savonius

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Gün geçtikçe azalan yakıt türleri ve artan enerji ihtiyacı karşısında bir alternatif olarak düşünülen rüzgar enerjisinin bir çok avantajları vardır. Mevcut yakıtların çevreye verdiği zararlar ve tükenmekte olması bu alternatifi değerlendirmek gerekliliğini zorunlu kılmıştır. Avrupa ve Afrikadan gelen sistematik hava akımlarının çoğunlukla yurdumuz üzerinden geçerek oluşturduğu rüzgar potansiyelini değerlendirebilmek için bu sistemlerin incelenmesi ve uygulanması gerekmektedir.

Bu çalışmada değerli katkılarını esirgemeyen sayın danışman hocam Prof. Dr. Mustafa BAYHAN'a, tasarımda ve deneylerde bana yardımcı olan sayın Öğr. Gör. Altan DOMBAYCI'ya, ve bugüne kadar maddi, manevi desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma ve eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Oğuz ÇOLAK

ISPARTA-2000

SİMGELER LİSTESİ

A	r/R de pala kesiti (m^2)
Amil	Pala mili kesiti (m^2)
AT	Rotor süperme alanı (m^2)
a	Eksenel indüksiyon katsayısı
a'	Teğetsel indüksiyon katsayısı
B	Kanat sayısı
b	Kanat genişliği (m)
C_L	Profil kaldırma katsayısı
C_D	Profil sürüklenme katsayısı
C_{Ldiz}	Tasarım sürüklenme katsayısı
C_N	Normal kuvvet katsayısı
C_T	İtme katsayısı
C_p	Güç katsayısı
C_{pi}	İdeal güç katsayısı
C_M	Moment katsayısı
c	Rotor kanadı ve Veter/kiriş uzunluğu (m)
D	Sürüklenme kuvveti (N)
d	Rüzgar türbini çapı (m)
d_d	Boru dış çapı (m)
d_i	Boru iç çapı (m)
F	Prandtl' a göre uç düzeltme faktörü
F_c	Santrifüj kuvvet (N)
F_c'	Santrifüj kuvvetin normal doğrultudaki bileşeni (N)
F_{cm}	Kanat milinin santrifüj kuvveti (N)
F_n	Normal/aerodinamik kuvvet (N)
F_t	Teğetsel kuvvet (N)
F_R	$r/R=0.2'$ deki kanat eksenine dik bileşke kuvvet (N)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
H	Yükseklik (m)
I_x	Kanadın r/R' deki kesit atalet momenti (cm^4)
KE	Rüzgarın kinetik enerjisi (Joule)
k	Tecrübeden elde edilmiş yükseklikle ilgili katsayı

L	Kaldırma kuvveti (N)
L	Açıklık boyunca ölçülen toplam kanat uzunluğu (m)
M_a	r/R' deki aerodinamik moment (Ncm)
M_e	r/R' deki eğilme momenti (Ncm)
M_{ep}	Kanadın eğilme momenti (Ncm)
M_{em}	Kanat milinden gelen ek eğilme momenti (Ncm)
M_s	r/R' deki santrifüj kuvvetlerden dolayı meydana gelen moment (Ncm)
m	Akışkanın kütleli debisi (kg/s)
n	Rotor devri (d/d)
ne	Emniyet katsayısı
η	Verim
Q	Rotor momenti (Nm)
P	Türbin gücü (W)
P (V)	Rüzgar hızının olasılık dağılımı
P (E, V)	Rüzgar hızının enerji dağılımı
P_R	Rüzgar gücü (W)
p_r	Çevre basıncı (mmHg)
p_1	Diskin önündeki statik basınç (N/m ²)
p_2	Diskin arkasındaki statik basınç (N/m ²)
p'	Süperpozisyon basıncı (N/m ²)
p''	Depresyon basıncı (N/m ²)
R	Rotor yarıçapı (m)
Re	Reynold sayısı
r	Yerel rotor yarıçapı (m)
r_h	Göbek yarıçapı (m)
S	Kanadın izdüşüm alanı (m ²)
T	Sıcaklık (C°)
TR	Sivrilik oranı
W	Bağıl hız (m/s)
W_x	r/R' deki mukavemet momenti (Nm)
W_{xm}	Kanat milinin mukavemet momenti (Nm)
γ	Akışkanın özgül ağırlığı (N/m ³)
wt	İndüklenmiş bileşke hız (m/s)
λ	Yerel uç hız oranı

V	Rüzgar hızı (m/s)
V_0	H_0 yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
V_1	Rüzgarın lüleye giriş hızı (m/s)
V_2	Rüzgarın lüleden çıkış hızı (m/s)
V_T	Pervaneyi çeviren net rüzgar hızı (m/s)
V_t	Teğetsel hız (m/s)
V_{Ti}	İz bölgesindeki teğetsel hız (m/s)
V_u	Kanat ucunun çevresel hızı (m/s)
V_x	Eksenel hız (m/s)
V_{xi}	İz bölgesindeki aksenal hız (m/s)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_m	Kanat malzemesinin yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_φ	Metal malzemenin yoğunluğu (kg/m^3)
Ω	Rotorun açısal hızı (rad/s)
σ	Katılık oranı
σ_φ	Çekme gerilmesi (N/cm^2)
σ_e	Eğilme gerilmesi (N/cm^2)
Γ_∞	Sonsuz kanat etrafındaki sirkülasyon (m^2/s)
Γ	Sonlu kanat etrafındaki sirkülasyon (m^2/s)
α	Hücum açısı
β	Kanat profili tespit/burulma açısı
Θ	Dönme düzlemi ile bağıl hız arasındaki açı
ε	Aerodinamik kayma açısı
ν	Kinematik vizkozite (m^2/s)
ξ_p	Kaldırma Katsayısı (C_L)
ξ_r	Direnç Katsayısı (C_D)
φ_x	x ölçeği
ϕ	Kesit alan faktörü
γ_r	r uzaklığındaki girdap şiddeti (m/s)
t	Kanat profilinin herhangi bir istasyondaki maksimum kalınlığı

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.1 Enlem daireleri boyunca oluşan hareketler için dünya dönmesinin saptırıcı kuvveti.....	5
Şekil 2.1.2 Ekvator ile kutuplar arasında oluşan hareketler için dünya dönmesinin saptırıcı kuvveti.....	6
Şekil 2.4.1 Robinson el anemometresi.....	11
Şekil 2.4.2 Ailleret-CdC Anemometresi.....	11
Şekil 2.4.3 Jules Richard Anemometresi.....	12
Şekil 2.4.4 Dines Anamotresi.....	12
Şekil 2.4.5 ERA Hamle Anemometresi.....	13
Şekil 2.4.6a-b Best Romani Anemometresi.....	13
Şekil 2.5.1 Jetin yönünü değiştiren türbin palası.....	16
Şekil 2.5.2 Kanat profili ve Veter açısı.....	17
Şekil 2.5.3 Sıfır kaldırma için akış yönü.....	24
Şekil 2.5.4 Akım tüpü.....	25
Şekil 2.5.5 Kutta Teoremi.....	27
Şekil 2.6.3.1 Rotor kanadına etki eden kuvvetler.....	31
Şekil 2.6.4.1 Darrieus rotoru.....	32
Şekil 2.7.3.1 API yükseklik faktörü.....	39
Şekil 2.8.2.1 Rüzgar türbini rotorundan hava akışı.....	45
Şekil 2.9.1 Yüksekliğe bağlı olarak ortalama rüzgar hızındaki değişim.....	50
Şekil 2.9.2 Rotor Alanı ile Güç arasındaki İlişki.....	52

Şekil 2.9.3	Rüzgar Türbinleri.....	52
Şekil 2.9.4	Rüzgar türbini maliyeti –Çıkış gücü ilişkisi.....	54
Şekil 2.9.5	Birim enerji maliyeti.....	54
Şekil 2.11.1	Kuyruk Yüzeyleri.....	58
Şekil 2.11.2.a-b-c	Kule geometrisi.....	58
Şekil 2.9.7	Türbin Jeneratör Kesiti.....	59
Şekil 2.12.1	Her zaman var olan gürültü seviyeleri.....	61
Şekil 2.12.2	Rüzgar türbininde gürültü.....	64
Şekil 2.12.3	Rüzgar türbini çıkış gürültüleri.....	64
Şekil 2.12.4	İzole edilmiş ve edilmemiş rüzgar türbini gürültü seviyeleri.....	65
Şekil 2.13.1	Kontrol devresinin akış şeması.....	68
Şekil 2.13.2	Açık devre kontrol sistemi.....	71
Şekil 2.13.3	Kapalı devre kontrol sistemi.....	71
Şekil 2.13.4	Rüzgar türbini dinamiği.....	75
Şekil 2.13.5	Kontrol sistemi Tasarım problemi.....	76
Şekil 3.1.1	Klasik Savonius Rotor Kesiti.....	79
Şekil 3.1.2	Pratikte En Çok Kullanılan Savonius Rotor Kesiti.....	79
Şekil 3.1.3	Duran Savonius Rotorunun Basınç Dağılımı ve Akış Alanı ($\beta=0^\circ$, $X=0$) (a).....	80
Şekil 3.1.4	Duran Savonius Rotorunun Basınç Dağılımı ve Akış Alanı ($\beta=90^\circ$, $X=0$) (a) basınç dağılımı (b) dış akım filmi (c) rotor iç akış.....	80
Şekil 3.1.5	Savonius Rotor Kanatları.....	82
Şekil 3.1.6	Model Savonius Türbinin Kanatları.....	82

Şekil 3.1.7	Kanatların bağlandığı mil	83
Şekil 3.1.8	Kasnak	83
Şekil 3.1.9a	Model Savonius türbinin yandan görünümü	84
Şekil 3.1.9b	Model Savonius türbinin üstten görünümü	84
Şekil 3.1.10	Model Savonius Rüzgar Türbini	84
Şekil 3.1.11	Elektrik bağlantı şeması	85
Şekil 3.1.12	Lüle Konsrüksiyonu	86
Şekil 3.1.13	Lülenin Yapısı	86
Şekil 3.1.14	Rüzgar Tüneli	87
Şekil 3.1.15	Dijital Anamometre	87
Şekil 4.1	Lülesiz Model Türbinde Güç Faktörü-Uç hız Oranı Değişimi	90
Şekil 4.2	Lüleli Model Türbinde Güç Faktörü-Uç hız Oranı Değişimi	91
Şekil 4.3	Lülesiz Model Türbinde Güç Faktörü-Alternatör Devri	91
Şekil 4.4	Lüleli Model Türbinde Güç Faktörü-Alternatör Devri	91
Şekil 4.5	Lülesiz Model Türbinde Güç (W)-Rüzgar Hızı Değişimi	92
Şekil 4.6	Lüleli Model Türbinde Güç (W)-Rüzgar Hızı Değişimi	92
Şekil 4.7	Lülesiz Model Türbinde Güç Faktörü-Rüzgar Hızı Değişimi	93
Şekil 4.8	Lüleli Model Türbinde Güç Faktörü-Rüzgar Hızı Değişimi	93

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.12.1 Rüzgar türbini gürültü regülasyonu	65
Tablo 2.12.2 Önerilen Gürültü Standartı	66
Tablo 2.12.3 Rüzgar çiftliği kurulabilecek bölgelerin, yerleşim bölgelerine olan uzaklıklarına göre analizi	67
Tablo 5.1 Bölgelere Ait Rüzgar Gücü Yoğunluğu ve Ortalama Hızlar	95
Tablo 5.2 Türkiye de Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü ve Ortalama Üretim Hedefi	95
Tablo 5.3 Tedaşın Rüzgar Elektriği Birim Enerji Alış Tarifesi ve Proje Bilgileri	96

1.GİRİŞ

Yaşadığımız dünyada bizlerin en büyük ihtiyaçlarından biride enerjidir. Günümüzde enerji çeşitli şekillerde elde edilebilmektedir. Mühendislik açısından önemli olan elde edilen bu enerjinin kullanılabilirliği, santral ömrü, çevreyle olan ilişkisi ve enerji maliyetidir. Bugüne kadar bilim adamları bu optimizasyonu sağlamak için çeşitli enerji ve enerji kaynakları alternatifleri üzerinde çalışmalar sürdürdüler. Bu gün de bu çalışmalar gelişerek devam etmektedir. Gelişen dünyanın ve dev sanayi işletmelerinin en önemli ihtiyacı olan enerjiyi en ucuz üretebilmek ve bu kaynakları sürekli kılmak devlet politikalarını bile etkilemektedir.

Günümüzde ülkeler arasındaki gerginliklerin en önemli sebeplerinden biri de enerji kaynaklarının paylaşımı ve kullanımı içindir. Günümüze kadar kullanıla gelen enerji kaynaklarının önümüzdeki yıllarda artan dünya nüfusu ve enerji ihtiyacı karşısında cevap veremeyeceği düşünüldüğünde alternatif enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır.

Alternatif enerji kaynakları, mevcut enerji kaynakları olan termik santraller, hidrolik santraller, nükleer santrallerden elde edilen enerjiden farklı olarak elde edilen rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, hidrojen enerjisi, jeotermal enerji gibi farklı enerji türleridir. Alternatif enerji kaynaklarının üretilmesinin en önemli sebeplerinden biri de çevreyi kirletmeyen enerji cinsi olmasıdır. Günümüzde mevcut santrallerin çevreye verdiği zararlar ortadadır. Alternatif enerjilerin bir çoğunun doğadan elde edilebilmesi ve çevreyi kirletmemesi gittikçe kirlenen çevremiz için bu tür enerji kaynaklarının ileride daha çok tercih edileceğini göstermektedir.

Rüzgar enerjisi alternatif enerjiler arasında düşük maliyetli ve popülaritesi günden güne artan bir enerji türüdür. Tüm dünya ülkeleri bu enerjiden optimum düzeyde faydalanabilmek için bu rüzgar enerjisi üzerinde çalışmalarını teşvik etmektedir. Üniversiteler ve bilim adamları geliştirdikleri yeni projelerle her geçen gün yeni türbin modelleri geliştirmektedirler.

Amerika ve Avrupa'da kurulan birçok şirket bu yeni enerji türünden faydalanabilmek için değişik alternatifler sunmaktadırlar. Önümüzdeki yıllarda bu enerjinin pazar payının gittikçe artması beklenmektedir.

Ülkemizde Enerji Bakanlığı, TEK, D.M.İ gibi kurumlar bu enerjinin ülkemizde de kolaylıkla kullanılabilceğini gösteren çalışmalarda bulunmuşlardır. Türkiye hava akışları açısından çok şanslı bir ülkedir. Çünkü ülkemizin üzerinden Orta Akdeniz, Balkanlar, Karadeniz ve Basra Körfezinden gelen muhtelif hava akışları batıdan doğuya gidecek şekilde dört mevsim geçmektedir. Bu akışlar sayesinde özellikleri kıyı sahillerimizde azımsanmayacak şekilde rüzgar potansiyeli doğmaktadır. Bu potansiyel EWEA (Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği) tarafından 20.000 MW olarak tespit edilmiştir. Ülkemizin mevcut kurulu rüzgar enerjisi gücü Alaçatı/ÇEŞME de 8,2 MW olduğu düşünülürse bu enerjiden ne denli az yararlandığımız ortaya çıkmaktadır. Fakat özel teşebbüsün, ve üniversitelerimizin bu konudaki çalışmaları umut vericidir.

2.KAYNAK BİLGİSİ

2.1 Rüzgarın Oluşumu

Yenilenmeyen enerji kaynaklarının, artan parasal masrafları ve çevre sorunları, rüzgar enerjisinin önemini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca enerji girdi değerlerinin bütün dünyada devamlı artışı ve gelecek yıllarda da artışların devam edeceğinin anlaşılır olması, rüzgar enerjisinin önemini daha da arttırmıştır. Bu nedenle, araştırmacılar yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını, ekonomik ve güvenilir bir biçimde kullanıma sunabilmek için yoğun bir çalışma yapmaktadırlar. İşte bu kaynaklardan bir tanesi de rüzgar enerjisidir.

2.1.1 Rüzgar Enerjisinin Oluşumu

Rüzgar enerjisi, atmosferi gün boyu ısıtan güneş tarafından oluşturulan bir enerji çeşididir. Başka bir deyişle rüzgar, güneşten gelen enerjiye karşılık atmosferin bir reaksiyonudur. Güneşten gelen enerjinin 33.10^{18} kcal/yıl değeri, hava hareketlerine harcanmaktadır. Hava hareketlerine harcanan enerji oldukça fazladır. Bu enerji büyük bir hacim içerisinde oluşmaktadır. Hava hareketlerinin dünya yüzeyinde oluşabilmesi için ona bazı kuvvetlerin etki etmesi gerekir. Rüzgarı oluşturan ve rüzgarın hızına etki eden atmosfer içindeki başlıca kuvvetler; basınç gradyan kuvveti, merkezkaç kuvveti, sürtünme kuvveti ve saptırıcı kuvvettir (Yürekli, 1992).

2.1.1.1 Basınç Gradyan Kuvveti

Bu kuvvetin etkisi ile hava, yüksek basınçtan alçak basınca doğru akar.

Bu kuvvet:

$$G = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{h} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte:

G: Basınç gradyan kuvveti,

ρ : Hava yoğunluğu,

ΔP : İzobarlar arası basınç farkı ve

h : İzobarlar arası uzunluktur.

2.1.1.2. Merkezkaç Kuvveti

Rüzgarlar, genel olarak bir merkez etrafında dolanırlar. Bu hareketin sonucu dönme merkezinden uzaklaştırıcı bir kuvvetin etkisine girerler. Bu kuvvete merkezkaç kuvveti denir. Merkezkaç kuvvetin, hareket eden havanın birim kütesine etki eden ivmesi, aşağıdaki eşitlikle ifade edilir;

$$a = \frac{V^2}{r} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte;

a : Merkezkaç kuvvetin birim kütleye etki eden ivmesi,

V : Rüzgarın hızı ve

r : Rüzgarın döner yarıçapıdır.

2.1.1.3 Sürtünme Kuvveti

Sürtünme kuvveti, rüzgarın oluşumuna etkili değildir. Tersine rüzgar hızını azaltmaya çalışır. Bu kuvvetin etki alanı daha çok yere yakın bölgelerde olur. Bu etki, türbülans anaförler tarafından yukarıya taşınarak, yer üstünden 450-600 metreye kadar rüzgar hızını yavaşlatmaktadır. Aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$S = K \cdot V \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte;

S : Sürtünme kuvveti,

K : Sürtünme katsayısı ve

V : Rüzgarın hızıdır.

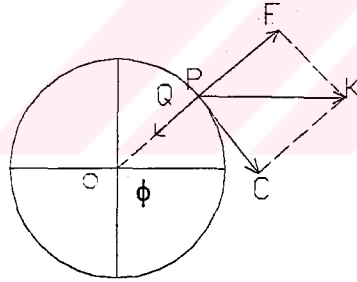
2.1.1.4 Saptırıcı Kuvvet

Bu kuvvet iki şekilde incelenebilir.

i. Enlem Daireleri Boyunca Oluşan Hareketler için Dünya Dönmesinin Saptırıcı Kuvveti

Kutuplar eksenini etrafında dönmekte olan dünyanın herhangi bir enlem derecesindeki bir hava kütlesi, iki kuvvetin etkisi altında kalır. Bu kuvvetlerden birisi, cismi yer merkezine doğru hareket ettiren yerçekimi kuvveti (Q), ikincisi ise, dünyanın dönmesi ile oluşan (K) merkezkaç kuvvetidir.

Merkezkaç kuvveti, iki bileşene ayrılabilir. Bileşenlerden birisi, (Q) yerçekimi kuvvetine zıt yöndeki (F) kuvvetidir. Bu kuvvet, havanın yerçekimi ivmesinin kutuplardan ekvatora doğru gidildikçe küçülmesinin nedenidir. Diğer bileşen kuvvet ise, havayı ekvatora doğru sürüklemek isteyen (C) kuvvetidir ki, buna saptırıcı kuvvet denir (Şekil 2.1.1).



Şekil 2.1.1 Enlem daireleri boyunca oluşan hareketler için dünya dönmesinin saptırıcı kuvveti.

Saptırıcı kuvvetin birim kütleye etki eden ivmesi;

$$C=2\omega \cdot V \cdot \sin\phi \quad (2.4)$$

olmaktadır. Burada;

C: Saptırıcı kuvvetin birim kütleye etki eden ivmesi,

V:Hava kütlelerinin bağıl hareketindeki hızı,

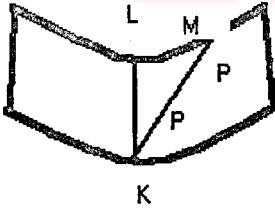
ω :Dünyanın açısal hızı ve

ϕ :Enlem derecesidir.

ii. Ekvatordan Kutuplara Doğru veya Ters Yönde Oluşan Hareketler için Yer Dünya Dönmesinin Saptırıcı Kuvveti

Ekvatordan kutuplara doğru gidildikçe dönme eksenine yaklaşmış olacağından, enlem dairelerinin yarıçapları küçülerek sıfır (0) olmaktadır. Enlem daireleri bir tam dönüşünü 24 saatte tamamlar. Açısal hızları aynı, yönleri farklı olan enlem dairelerinde bulunan cisimlerin, batıdan doğuya alacakları çizgisel hız değerleri de tıpkı enlem dairelerinin çaplarına uygun olarak kutuplara doğru küçülecek ve neticede sıfır (0) olacaktır.

Ekvatordan kutba doğru hareket eden bir cismin gerçekte iki hızı vardır. Bunlardan birisi cismin kendi bağıl hareketinin hızıdır. Diğeri ise yerkürenin batıdan doğuya doğru dönmesi sırasında alınan hızdır. Şekil 2.1.2 de görüldüğü gibi, K noktasından L noktasına doğru hareket eden P hava kütlesi, bu hareket sonunda, K noktasına değil, M noktasına gelir.



Şekil 2.1.2 Ekvator ile kutuplar arasında oluşan hareketler için dünya dönmesinin saptırıcı kuvveti

2.2 Rüzgar Enerjisine Etki Eden Faktörler

2.2.1. Rüzgarın İş Yapabilme Yeteneği

Bir cismin konumu nedeniyle sahip olduğu enerjiye potansiyel, hareketi sebebiyle sahip olduğu enerjiye ise kinetik enerji adı verilir. Hareket halinde bulunan her cismin bir kinetik enerjisi vardır.

V hızı ile hareket eden hava kütlelerinin hacmi Vh , yoğunluğu ρ ile gösterilirse, bu hava için kinetik enerji eşitliği;

$$Ek = \frac{1}{2} \rho VhV^2 \quad (2.5)$$

Hareket halindeki hava kütlesi, rüzgar türbininin A süpürme alanındaki kanat sistemine düşey yönde çarptığı zaman, çarpan havanın içinde bulunan kinetik enerjinin bir kısmı frenlenerek rüzgar türbininin dönüşüne sebep olur. Kanatların süpürme alanına çarpan havanın debisi $A.V$ ise, birim zamanda yapacağı iş yani rüzgar gücü;

$$Po = \frac{\rho}{2} V.AV^2 = \frac{\rho}{2} V^3 .A \quad (2.6)$$

olur.

Süpürme alanına çarpan rüzgar hızının V, birim zamanda yapacağı basınç p ve iş fonksiyonları da dikkate alındığında maksimum teorik rüzgar türbin gücü;

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} V^3 .A$$

elde edilir.

Bu eşitlikte;

P_{\max} : Maksimum teorik rüzgar türbin gücü, ρ :Havanın yoğunluğu,

A: Kanat sisteminin süpürme alanı ve

V:Rüzgar hızıdır.

Teorik rüzgar türbin gücünün maksimum olduğu zaman, sisteme çarpan V rüzgar hızının, sistem tarafından frenlenip arka kısma geçen, V_2 rüzgar hızına olan oranı (rüzgar oranı) $1/3$ 'dür. Aerodinamik faktörlerden dolayı maksimum dinamik güç, türbin gücünden fazla olmaktadır. Rüzgar türbinleri tarafından üretilen güç, havadaki orijinal gücün %59.3 'ü kadardır.

Hava yatay bir ekseninde rüzgar türbinine yaklaşırken, silindirik bir akış olduğu kabul edilmektedir. Dolayısı ile akışkan kayıplar yüzünden, türbin kanatlarıyla dağıtılan gerçek güç, P_{max} 'dan daha azdır. Bu durumda sistemin verimi, rotorun yapısına, tipine, hız oranına ve kanatların tipine bağlıdır. İyi bir hava dinamiği tasarımının iki kanatlı rotor için tahminen dönüşüm verimi %75 olarak kabul edilir. (Hickok, 1975)

2.2.2 Rüzgarın İş Yapabilme Yeteneğine Etki Eden Faktörler

Rüzgarın iş yapabilme yeteneğine rüzgar hızı ve hava yoğunluğu etki etmektedir.

Rüzgar hızı, hareket eden hava kütesinin birim zamanda aldığı yoldur. Rüzgarın hızının iş yapabilme kabiliyetine etkisi, hava yoğunluğunun etkisinden çok fazladır. Örneğin; rüzgarın gücü, kendi hızının küpü ile doğru orantılı olduğu halde, hava yoğunluğunun birinci dereceden kuvvetiyle doğru orantılıdır.

Hava yoğunluğu, dolaylı ve dolaysız olarak, rüzgar hızını etkileyerek, rüzgarın iş yapma yeteneğini engellemektedir. Belli bir yerdeki hava yoğunluğu, teorik olarak ideal (tam) gazların karakteristik denklemleriyle hesaplanır (Yürekli, 1992)

$$\rho = \frac{P}{gRT} \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte;

ρ :Hava yoğunluğu,

p : Hava basıncı,

g Yerçekimi ivmesi,

R : Hava sabitesi

T: Havanın mutlak sıcaklığıdır.

2.3 Rüzgar Enerjisinden Yararlanma

Rüzgar enerjisi, insanın iş gücünü azaltan ilk güç kaynaklarından biridir. Deniz seyahatlerinde rüzgar enerjisi birçok makinanın enerji kaynağı olarak uzun yıllar zorunlu olarak kullanılmıştır. 10.Yüzyılda İran' da tahıl üretiminde düşey milli (düşey mil), Çin' de sulama amacıyla ilk defa yatay milli rüzgar türbinlerinin kullanıldığı bilinmektedir. 12.Yüzyılın sonlarında bu rüzgar türbinleri Kuzey Avrupa'da görülmeye başlamıştır. 1750' lerde örneğin Kopenhag' da bir düzine rüzgar türbini göze çarpmıştır. Danimarka' da 1875 'lerde bu türbinlerin sayısı 7000'e ulaşmıştır. Bu ilk rüzgar değirmenlerinden bazıları halen Danimarka' da kullanılmaktadır. 13.Yüzyılın sonunda İtalya'da da kullanım alanı bulan bu rüzgar türbinleri 200 yüz yıl öncesine kadar, İspanya'da da halen kullanılmaktaydı.

Eski tip kuvvet makinaları ve gerilim kaynağı olarak kullanılan bu sistemler, uygulamada bazı sakıncalar yol açmıştır. Bunların yapılan basit, kontrol ve denetim düzenleri yetersiz, verimleri düşük olduğundan doğrudan rüzgar enerjisi ile çalışan türbinler dışında rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çeviren modern enerji sistemleri de geliştirilmiştir. Buna paralel olarak tarımsal işletmelerde su çıkarma, su iletimi, drenaj, küçük alet ve iş makinalarının çalıştırılması amacıyla kurulmuş tesislerin meteorolojik, teknik ve ekonomik yönden uygun olan yörelerde, sayıları artırılmakta ve diğer yandan bilimsel ve teknik gelişmelerden yararlanılarak, yeni tipler tasarımı edilmiştir.

Doğal enerjilerin en önemlilerinden biri olan rüzgar enerjisinin en büyük olumsuzluğu, güvenilir bir enerji kaynağı olmayışıdır. Bu nedenle, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan rüzgar türbinlerinin bazı sakıncaları vardır. Bunlar; rotorun gürültülü çalışması, TV yayınlarını bozması, pervane ve kulelerin eskimesi, kontrol sistemlerinin sıkça arızalanması ve daha da önemlisi görüntünün bozulması sayılabilir (Gipe, 1995).

Bir rüzgar santralinden elde edilen net güç, rüzgar hızı ve kanatların etki alanı ile ilgilidir. Bu nedenle zamana bağlı olarak elde edilen faydalı güç, her an değişiklik gösterebilir. Rüzgar enerjisinden yararlanmak çeşitli faktörlere bağlı olmakla birlikte,

öncelikle enerji bedeline bağlıdır. Herhangi bir yakıt gideri olmadığı için bu tür enerjinin ekonomisini, ilk yatırım ve işletme giderleri belirler. Elde edilecek güç; kanat çapı ve rüzgar hızına bağlıdır. Bunlardan birincisi, türbin rotor tipleri ve yapısal özelliğe, diğeri ise yöresel iklim koşulları ile ilgilidir.

2.4 Rüzgar Hızının Ölçülmesi Ve Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

2.4.1 Rüzgar Hızının Ölçülmesi

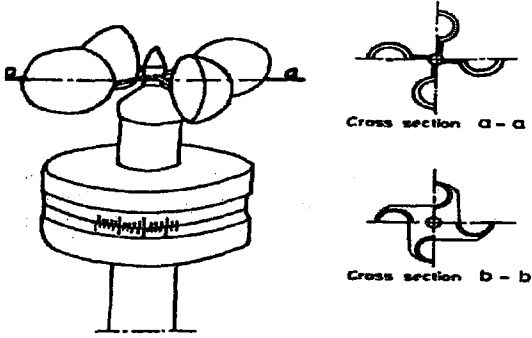
Rüzgar ölçümleri anemometreler yardımıyla yapılmaktadır. Rüzgar enerjisi üretiminde doğru rüzgar değerlerinin elde edilebilmesi çok önemlidir. Çünkü enerji potansiyeli tespit edilecek bölgenin rüzgar karakteristikleri bu bölge için seçilecek türbin elemanlarının seçimini, yerleşimini önemli ölçüde etkiler.

Rüzgar ölçümlerinde kullanılan iki temel anemometre türü mevcuttur. (Le Gourieres, 1992) Bunlar: Dönen tipte olanlar, basınç anemometreleri ve diğerleridir.

2.4.1.1 Rotorlu (döner) Anemometreler

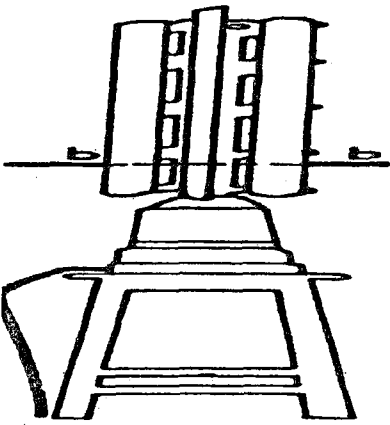
Bunlardan en çok kullanılan cinsleri Robinson-Papillon'nun kepe anemometresi, Fransız Ailleret anemometresi, küçük kanatlı rüzgar türbinleri içinde Jules Richart anemometresidir (Le Gourieres, 1992).

Robinson-Papillon tipi kepe anemometre dünya meteoroloji istasyonlarında en çok kullanılan anemometrelerdir. Bir rulman üzerine oturtulmuş dört tane kolun ucunda dönen küçük kaplardan müteşekkildir. Alt kısmında ise değişken hızları anında takip etmek için statoru kaplayan magnetik bir bölüm vardır. İndikator rüzgar hızına bağlı olarak voltajı ölçer. Örneğin rüzgar 10 m/s den aniden 20 m/s ye aniden çıktığında 1.3 saniyelik bir süre içinde anemometre bu hıza cevap vererek göstergede 19 m/s yi gösterir. Şekil 2.4.1'de gösterilen bu tip anemometre 1 ve 2 m/s hızlarda çalışmaya başlar.



Şekil 2.4.1 Robinson el anemometresi (Le Gourieres, 1992)

Ailleret anemometresi ise esen rüzgarın enerji eşdeğerini bulmak için de tasarlanmıştır. Dönen kepeçden direk olarak rüzgar hızının görülebildiği gibi hesaplanmış kullanılabilir rüzgar enerjiside kaydedilmektedir. Bu alet temelde çalışması düşük hızlarda dönebilen rotoruna bağlı alternatörden elde edilen değişken voltaj ve frekanslarla enerjinin tespit edilmesi esasına bağlıdır. Şekil 2.4.2' deki bu cihaz da 3 m/s hızların da çalışmaya başlamaktadır.

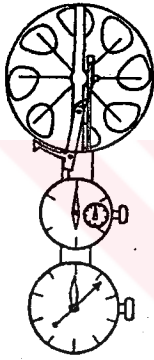


Şekil 2.4.2 Ailleret-CdC Anemometresi (Le Gourieres, 1992)

2.4.1.2 Basınç Anemometreleri

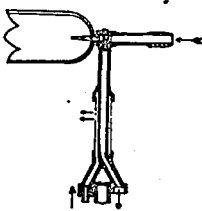
En çok bilinen basınç anemometreleri top ve diyafram tipi, Pitot ve Dines anemometreleri, ERA hamle anemometreleri ile yatay ve düşey rüzgar basınçlarını ölçmek için Best Romani anemometreleridir.

Top ve diyafram tipli anemometreler fazla kullanılmazlar. Rüzgar basıncının bir boru içinde bulunan topu ittirmesi ve borunun arkasında diyaframa gelen gücün tespit edilmesi esasına göre çalışır. (Şekil 2.4.3)



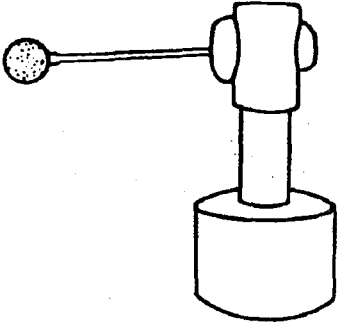
Şekil 2.4.3- Jules Richard Anemometresi (Le Gourneres, 1992)

Pitot ve Dines anemometreleri ise rüzgarın dinamik basıncına duyarlı olarak çalışırlar. Bu cihazda rüzgarın hızını yönünü artı karta işleyen bir sistem mevcuttur. (Şekil 2.4.4)



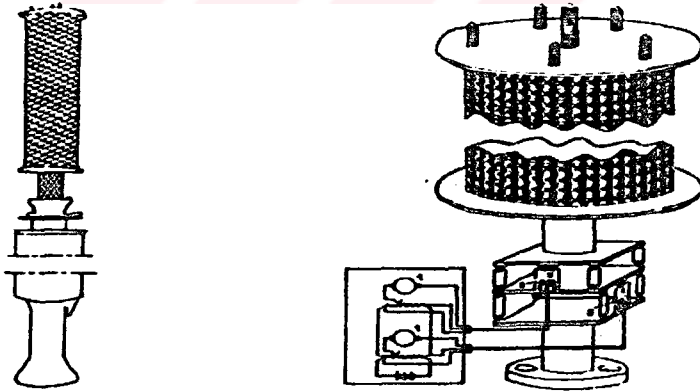
Şekil 2.4.4 Dines Anemometresi (Le Gourneres, 1992)

ERA Hamle anemometresi ise top üzerine gelen yatay ve düşey ani rüzgar hamlelerini tespit ederek ölçen bir sistemdir. (Şekil 2.4.5)



Şekil 2.4.5 ERA Hamle anemometresi (Le Gourieres, 1992)

Best Romani cinsi anemometreler ise yatay bir silindir üzerine gelen aerodinamik kuvvet esasına göre çalışır. Kaydedici bir golvonometre kullanılarak rüzgarın hızı ve yönü tespit edilir. Metalik bir yüzey üzerine baskı yapan rüzgar kuvvetine karşı olan dirençler yardımıyla sistem çalışır. (Şekil 2.4.6a-b)



Şekil 2.4.6a Best Romani Anemometresi

Şekil 2.4.6b Best Romani Kesiti (Le Gourieres, 1992)

2.4.1.3. Bilgisayar Kontrollü Dijital Sistemler

Bu sistemler üç ana bileşenden oluşurlar. Bunlar: rüzgar hız ve yön sensörleri, hafıza modülü ve data-loggerdir.

Rüzgar hızını ve yönünü ölçmek için sensörlerden faydalanılır. Küçük boyutludurlar ve direkt olarak data loggera bağlıdır. Rüzgar hız sensörünün (anemometrenin) dönen keçeleri ile orantılı olarak AC akışı oluşur. AC sinyallerinin sıklığı datalogger tarafından okunarak ölçülmekte ve mühendislik birimlerine çevrilir. (mph, m/s, knots gibi)

Rüzgar yönü potansiyometre yardımıyla hissedilerek dataloggerin potansiyometreye uyguladığı voltaj ile çıktı sinyali bir analog voltaja dönüşür ki bu , rüzgar doğrultusunun azimutu ile doğrudan orantılıdır.

Hafıza modülü datalogger'in data depolama kapasitesine eklenmiş bir data depolama aracıdır. Depolama modülleri, ölçümün yapıldığı yer ile bilgisayarın bulunduğu büro arasında data transportu için kullanılmaktadır.

Bu modüller akü destekli RAM lerden oluşurlar ve bir çok datalogger programını saklayabilme özelliğine sahiptirler.

Hafıza modülü doğrudan aracı kablo vasıtasıyla dataloggera bağlanmıştır. Data transferleri bir monitör yardımıyla görüntülenmektedir.

Dataloggerdan hafıza modülüne data transferi sürekli veya kesikli olabilmektedir.

Sürekli işlemden , kullanıcı , data-loggen dataların hepsini yada bir kısmını depolama modülüne aktarmada bir klavye ile göndermektedir.

Kesikli işlemlerde ise , datalogger, datanın depolanma modülüne otomatik olarak gönderilmesi için programlanır.

Depolama modülünden bilgisayara data transferi, IBM uyumlu bilgisayarda SC532 interface (arayüz) , bölümünden geçerek analog bilgiler CMOS logic seviyelerinden bilgisayarın RS-232 seviyelerine dönüşür ve depolama modülüne güç sağlar. PC 208

datalogger sağlayan yazılım, data transferi, data yönetimi, rapor üretimi, ve datalogger program yazılımı için kullanılır.

Dataloggerlar (CR10 tipleri) ise 12 analog (± 2.5 V girişli), 2 digital kanallı ölçme ve PO kontrol ünitesine sahiptir. Kontrol ünitesi ile çevre arasında bağlantı kuran 9 pin seri giriş çıkış içeren bağlantı paneli bulunmaktadır. Ayrıca 64 kbyte dahili RAM ünitesi, 96 kbyte veri depolama ünitesine sahiptir.

2.5 Rüzgar Türbini İle İlgili Formüller

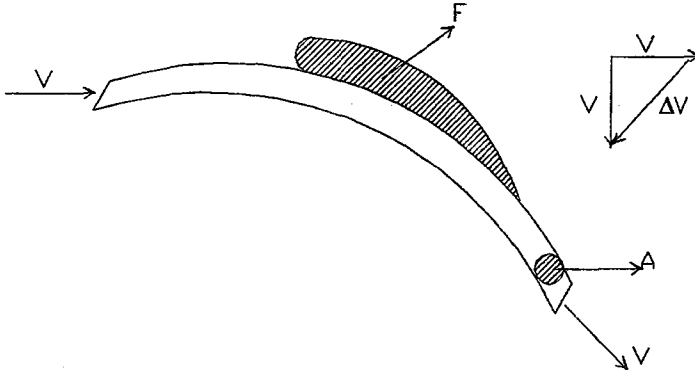
2.5.1 Kaldırma, Sürüklenme ve Moment Denklemlerinin Çıkarılması

Bir akışkan içinde hareket eden cisme tesir eden kuvvetler sürtünme yoluyla ortaya çıkan yada basınç farkları sebebiyle meydana gelen kuvvetlerdir. Sürtünme kuvvetleri, basınç kuvvetlerinin oranında mertebe olarak küçüktür. Kaldırmanın meydana gelmesinde en önemli rolü oynayan basınç kuvvetleridir. Hava içinde hareket eden bir cismin etrafındaki ortam basıncı bir bileşke kuvvet meydana getirmez. Bu durum hareket eden bir cismin etrafında kuvvet oluşturan basınç kaynağının dinamik basınç olduğunu gösterir. Dinamik basınç tesirini belirten en önemli deney hızla giden bir arabadan elimizi çıkardığımızda elimizin hissettiği kuvveti denmektedir. İlk bakışta dinamik basınç tarafından meydana getirilebilecek maksimum kuvvet,

$$F = q \cdot S \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir gibi görünür. Burada F; kuvvet, $q; 1/2 \cdot \rho \cdot v^2$ formülü ile ifade edilen dinamik basınç; S, dinamik basınca maruz kalan alandır. Ancak bu formül ile yapılan kuvvet tahmini doğru değildir. Çünkü bir profilin meydana getirdiği kuvvet bu değerin çok üstündedir.

Bunun neden böyle olduğunun basit bir açıklaması şöyle olabilir. Aşağıdaki Şekil 2.5.1'de görüldüğü gibi bir jetin yönünü değiştiren bir türbin plakasını göz önüne alalım.



Şekil 2.5.1 Jetin yönünü değiştiren türbin kanadı

Eğer kanat civarındaki akışı sürtünmesiz kabul edersek jet hızında hız kaybı olmayacak demektir. O halde Newton'un ikinci kanununa göre,

$$F = m \cdot a = m \cdot dV / dt \quad (2.9)$$

ifadesini yazabiliriz. (Kanat üzerinde meydana gelen kuvvet jetin momentumunda birim zamanda meydana gelen değişikliğe eşit yazılabilir). Eğer A, jetin kesit alanını gösterirse ve ΔV 'de jetin hızındaki net değişiklik ise,

$$F = \rho \cdot A \cdot V \cdot \Delta V \quad (2.10)$$

olacaktır. Şekildeki hız üçgeninin incelenmesinden $\Delta V = 1,414 \cdot V$ sonucu çıkarılır, buna göre oluşan kuvvet,

$$F = 1,414 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (2.11)$$

ifadesi elde edilir. İfadeye dinamik basınç tarifini getirirsek,

$$P = 2,8281/2 \cdot \rho \cdot A V^2 = 2,828 q \cdot A \quad (2.12)$$

ifadesi bulunur. Bu duruma göre sadece jetin yönünü değiştirmekle, $2,828 \cdot q \cdot A$ şiddetinde bir kaldırma kuvveti elde edilecektir.

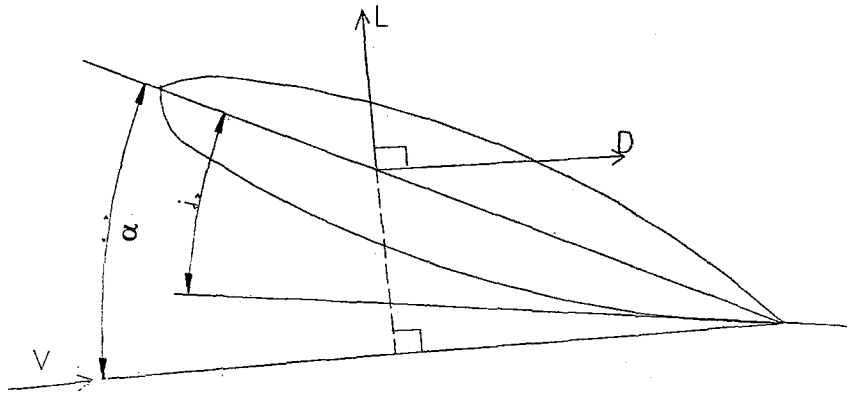
Bir profilin hava akışının yönünü değiştirme kabiliyeti; profilin eğriliğine ve profilin akış içindeki hücum açısına bağlıdır. Bu duruma bağlı olarak profilin eğriliğini

artırarak veya hücum açısının değerini büyüterek büyük kaldırma kuvvetleri elde etmek mümkündür.

Şimdiye kadar profil üzerinde oluşan bileşke kuvveti göz önüne aldık. Oluşan kuvvetin şiddeti ve yönü hakkında herhangi bir fikir ileri sürmedik. Şekil 2.5.2'de görüldüğü gibi toplam kuvvet genel olarak iki doğrultuda bileşenlere ayrılarak bunlardan hız doğrultusundaki bileşenin kuvveti Sürüklenme (drag), hız doğrultusundaki dik bileşene ise kaldırma (İtme) kuvveti denir (Sayındı, 1994).

Yine şekil 2.5.2'de görüldüğü gibi Veter hattı izafi rüzgar doğrultusu ile α gibi bir açı yapmaktadır. Bu açıya hücum açısı denir. İzafi rüzgar yada hava hızı vektörü, profilin gerçek hızının şiddeti ve yön olarak tersine eşit bir hız vektörüdür.

Basınç merkezi, profili etkileyen toplam kuvvetin Veter doğrultusunu kestiği noktadır. Yani bütün kuvvetler basınç merkezine indirildiğinde bu nokta etrafındaki toplam moment sıfırdır. Veter doğrultusunun referans doğrultusu ile yaptığı açıya tespit açısı denir. Genellikle bu açı uçakta uzunlamasına eksen ile Veter doğrultusu arasındaki açı olarak tariflenir. Sürüklenme kuvveti bileşke kuvvetin hareket doğrultusuna zıt yöndeki bileşenidir. Bu sebeple hareketi yavaşlatmaya çalışan bir kuvvettir. Kaldırma kuvveti ise uçağı havada tutan ve yörüngesine dik doğrultuda yararlı bir kuvvettir (Sayındı, 1994).



Şekil 2.5.2 Kanat profili ve Veter açısı

Direnç uçan cisim yavaşlatmaya çalışan yani hareket miktarını azaltan bir kuvvet olduğu için uçağın bu kuvveti yenmesi için belli bir hızla hareketine devam edebilmesi bakımından bir güç üretmesi gereklidir.

Kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı olarak tarif eden iyilik derecesi, profilin verimliliğinin bir ölçüsü olarak kabul edilir.

Deneysel olarak bilinmektedir ki hava içinde hareket eden bir cismin üzerinde meydana gelen kuvvetler aşağıda sıralanan değişkenlerin bir fonksiyonudur.

- Serbest hava akış hızı
- Hava yoğunluğu
- Cismin alanı
- Cismin geometrisi
- Havanın sonik hızı veya ortalama moleküler hızı
- Cismin yüzey pürüzlülüğü
- Havanın vizkozitesi
- Hücüm açısı

Teorik olarak cismin üzerinde oluşan kuvvetleri etkileyen başka parametreler de mevcuttur. Ancak bu parametrelerin etkileri mühendislik problemlerinde ihmal edilebilecek mertebede küçüktür. Bu sebeple kaldırma, sürüklenme ve yunuslama momenti (bileşke) kuvvetlerin indirgendiği nokta etrafında ve iki boyutlu akış düzlemi içindeki moment ifadelerini yukarıda verdiğimiz değişkenler cinsinden hesaplayabiliriz. Kuvvet ve moment ifadelerini çıkartmak için boyut analizi metodunu kullanmak mümkündür.

Boyut analizinde temel ilke herhangi bir fiziksel denklemin her iki tarafındaki boyutların aynı olmasıdır.

Hava içindeki hareket eden bir cismi etkileyen kuvvet (Örnek olarak bir kanadı etkileyen aerodinamik kuvvet) α , V , ρ , S , V_a ile yüzey pürüzlülüğü ve cismin geometrisine bağlıdır. Başlangıçta kanadın geometrisinin ve pürüzlülüğünün etkilerini tayin edecek bir metod mevcut değildir. Bu sebeple bu değişkenleri temsil eden parametreler ilk şartlarda ihmal edilmek durumundadır. Bir kanadı etkileyen kuvvetin α , V , ρ , S , V_a , μ 'ye bağlılığı

$$F=f(\alpha, V, \rho, S, V_a, \mu) \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir.

Eğer boyutsal homojenlik muhafaza edilecekse bu şartlarla toplama ve çıkarma yapmak (boyutlar farklı olacağından) mümkün olmayacaktır. Bu sebeple denklem, muhtelif parametrelerin üslü yada köklü ifadelerinin çarpımlarını veya oranlarını ihtiva etmek zorundadır. Buna dayanarak F ifadesi,

$$F = \phi(V^a \cdot \rho^b \cdot S^d \cdot V_a^e \cdot \mu^f) \quad (2.14)$$

şeklinde yazılır.

Bu ifade de a , b , d , e , ve ϕ bilinmeyen sabitlerdir. α 'nın boyutu olmadığı için etkisi boyutsuz olarak kabul edilen ϕ nın ninde bulunduğu kabul edilmiştir. Yukarıdaki fonksiyonel ifadeyi MLT boyut sistemi cinsinden yazarsak ,

$$(M \cdot L \cdot T^{-2}) = \phi \cdot (L \cdot T^{-1})^a \cdot (M \cdot L^{-3})^b \cdot (L^2)^d \cdot (L \cdot T^{-1})^e \cdot (M^{-1} \cdot L \cdot T^{-1})^f \quad (2.15)$$

elde edilir.

Bu ifadenin her iki tarafının boyutsal özdeşliğinden, bir fiziksel büyüklüğün üstel denkleminin bir tarafındaki toplamı aynı büyüklüğün üstlerinin diğer tarafındaki toplamına eşit olması gerektiğini ifade eder. Bu kuralı uygularsak,

$$M \text{ için, } 1 = b - f$$

$$L \text{ için, } 1 = a - 3b + 2d + e - f$$

$$T \text{ için, } -2 = -a - e - f$$

bulunur.

Beş adet bilinmeyene karşılık elimizde üç adet denklem mevcuttur. Bu sebeple bu bilinmeyenlerden üçünü geri kalan iki cinsinden çözebiliriz.

V_a ve μ 'nın ρ , S ve V 'ye nazaran daha az önemli olduğunu kabul edersek,

2-e-f

1- f

1- (f/2)

bulunur.

Böylece kanadı etkileyen kuvvet denklemi,

$$F = \phi (V)^{2-e-f} \cdot (\rho)^{1-f} \cdot (S)^{1-(f/2)} \cdot (V_a)^e \cdot (\mu)^f \quad (2.16)$$

şekline girer. Benzer üslü büyüklükleri toplarsak,

$$\phi \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot (V_a/V)^e \cdot [\mu / (\rho \cdot V \cdot S^{1/2})^f] \quad (2.17)$$

neticesi bulunur.

Boyutsal olarak $S^{1/2}$ uzunluk boyutuna eşdeğerdir. Bu sebeple $S^{1/2}$ 'yi doğrusal bir boyut olan d ile değiştirmek mümkündür. Bu suretle ,

$$F = \phi \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot (V_a/V)^e \cdot [\mu / (\rho \cdot V \cdot d)]^f \quad (2.18)$$

ifadesi elde edilir. Bilindiği gibi,

$$V_a/V = 1/M = 1/ \text{Mach Sayısı} \quad (2.19)$$

$$(\rho \cdot V \cdot d) = 1/Re = 1/ \text{Reynold Sayısı} \quad (2.20)$$

olduğundan ,

$$\phi \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot (1/M)^e \cdot (1/Re)^f \quad (2.21)$$

sonucu bulunmuş olur.

Bu en son ifadeden de anlaşıldığı üzere hava içinde hareket eden bir profilin meydana getirdiği aerodinamik kuvvet aşağıdaki şekilde ifade edebileceğimiz bir çarpıma eşittir.

Sabit* Dinamik Basınç*Referans Alan

Görüleceği gibi sabit çarpan boyutsuz olup,

$$2.\phi.(1/M)^e.(1/Re)^f \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu sabit sayılar kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri için ayrı varyasyonlarla ifade edilirse genel aerodinamik kuvvet ifadesine benzer olarak,

$$C_l . 1/2 . \rho . V^2 . S \quad (L : \text{Kaldırma Kuvveti})$$

$$L = \phi . (1/M^e) . (1/Re^f) \quad (2.23)$$

bulunur. Benzer şekilde sürüklenme kuvveti için ,

$$c_d . 1/2 . \rho . V^2 . S \quad (D : \text{Sürüklenme Kuvveti})$$

$$D = \phi . (1/M^e) . (1/Re^f) \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. Sonuçta sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvveti için,

$$C_l . q . S$$

$$c_d . q . S$$

denklemleri yazılabilir (Sayındı, 1994).

Yukarıdaki denklemlerin çıkarılış tarzından kaldırma ve sürüklenme katsayılarının yani c_l ve c_d 'nin hız, hücum açısı (α), Mach sayısı (M) ve Rasyonel sayısı (Re) ile değişmesi gerektiği, için bu büyüklüklerin bir fonksiyonu olduğu açıktır.

Dikkat etmek gereklidir ki c_d iki boyutlu akış şartlarında asıl direnç katsayısıdır.

S, kanat alanı ise Veter doğrultusundan geçen profil düzlemine dik bir düzlem üzerindeki projeksiyon alanından ibarettir.

En son bulduğumuz L ve D denklemleri profil üzerine etki eden kuvvetleri tayin eder. Bir Profil'in Veter'i üzerinde basınç merkezinin dışındaki herhangi bir nokta etrafındaki yunuslama kuvvetini bulmak için aşağıdaki şekilde bir analiz yapmak gerekir.

Veter üzerindeki bir nokta etrafındaki yunuslama momenti kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin bir fonksiyonu olmalıdır. Bu halde moment,

$$M = f(\alpha, V, \rho, S, V_a, \mu) \quad (2.25)$$

ve

$$\phi(V^a \cdot \rho^b \cdot S^d \cdot V_a^e \mu^f) \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilebilir.

M.L.T. boyut sistemini kullanırsak

$$(M.L^2.T^{-2}) = \phi(L.T^{-1})^a \cdot (M.L^{-3})^b \cdot (L^2)^d \cdot (L.T^{-1})^e \cdot (M.L^{-1}.T^{-1})^f \quad (2.27)$$

Denklemin her iki tarafında M, L ve T boyutlarının üsleri eşitlenerek

$$M \text{ için,} \quad 1 = b + f$$

$$L \text{ için,} \quad 2 = a - 3b + 2d + e - f$$

$$T \text{ için,} \quad -2 = a - e - f$$

denklemleri elde edilir. a, b, d diğer bilinmeyenler cinsinden çözümlenerek,

$$2 - e - f$$

$$1 - f$$

$$(3 - f) / 2$$

bulunur, bu değerler yardımı ile moment ifadesini yazarsak,

$$M = \phi \cdot (V)^{2-e-f} \cdot (\rho)^{1-f} \cdot (S)^{(3/2)-(f/2)} \cdot (V)^e \cdot (\mu)^f \quad (2.28)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifade de benzer üslü terimleri toplayarak M ifadesi,

$$M = \phi \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S^{3/2} \cdot (1/M)^e \cdot (1/Re)^f \quad (2.29)$$

şeklinde elde edilir.

$S^{3/2}$ yerine kanat alanı S ile Veter uzunluğu c'nin çarpımı yazılabilir. Aynı zamanda,

$$M = \phi \cdot (1/Mach) \cdot (1/Re)^f \quad (2.30)$$

olduğunu söylersek, moment ifadesi için nihayi olarak,

$$M = c_m \cdot q \cdot S \cdot c \quad (2.31)$$

denklemini elde edilir. Eğer moment profilin hücum kenarını yukarı kaldırıyororsa pozitifdir.

Bu en son iki denklemini katsayılar için çözersek, iki boyutlu akış için kuvvet ve moment katsayıları,

$$L / (q \cdot S) \quad (2.32)$$

$$\rho / (q \cdot S) \quad (2.33)$$

$$M / (q \cdot S \cdot c) \quad (2.34)$$

ifadeleri bulunur. Her üç katsayıda α , M, Re ve profil parametresinin bir fonksiyonudur.

2.5.2 Kaldırma Katsayısı

Kutta-Joukowski kanunu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$S = q \cdot c \cdot C_L \quad (2.35)$$

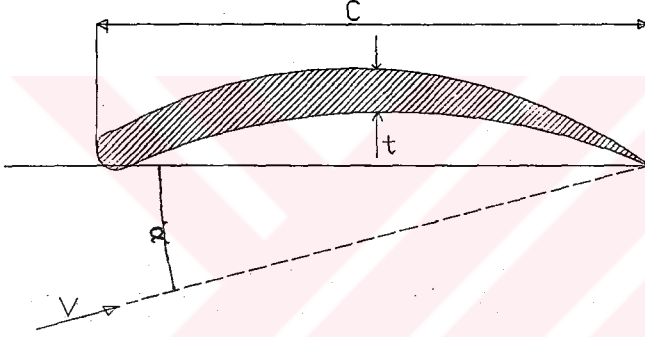
Dinamik basınç, $q = \rho \cdot V^2 / 2$; profilin kirişi, c ve kaldırma katsayısı C_L aşağıdaki gibidir.

$$C_l = 2 \int \left(\frac{\vec{v}}{v} \right) d \left(\frac{\vec{s}}{c} \right) \quad (2.36)$$

Yapışkan olmayan ve sıkıştırılmayan bir ortamda c_l katsayısı boyutsuz ve profilin kiriş uzunluğu (c) ile uçuş hızı, (s) 'den bağımsızdır. Bu şartlar altında kaldırma katsayısı yalnızca α açısının fonksiyonudur, bu açı v hızı ile kanat profil eksenidir. Profil eksenini, kanadın kaldırma yapmayacağı andaki eksenidir.

Düz levha şeklinde bir airfoil için c_l katsayısı aşağıda ifade edilmiştir.

$$C_l = 2 \cdot \pi \cdot \sin \alpha \quad (2.37)$$



Şekil 2.5.3 Sıfır kaldırma için akış yönü

t , airfoil kanat kalınlığıdır. Pratikte konvensiyonel bir airfoil için ölçülen değer $C_l = 2 \cdot \pi \cdot \sin \alpha$ değerine ($t_{max}/c = 0.1$) yakındır.

Pratikte kullanılan değerler rüzgar tünellerinde test edilerek belirlenmiştir, literatürde (özellikle NACA raporlarında) bu değerler verilmiştir.

Viskoz ortamlarda, teorik olarak α ile c_l arasındaki değişim 10 ile 15° arasında olmalıdır (David, 1998).

2.5.3 Moment Katsayısı

Kaldırma esnasında airfoil'in yüzeyinde homojen basınç dağılımı oluşur. Bu basınç dağılımı verilen bir X noktasına göre M momentini oluşturacaktır. Moment

katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Boyutsuz bir değere sahiptir.

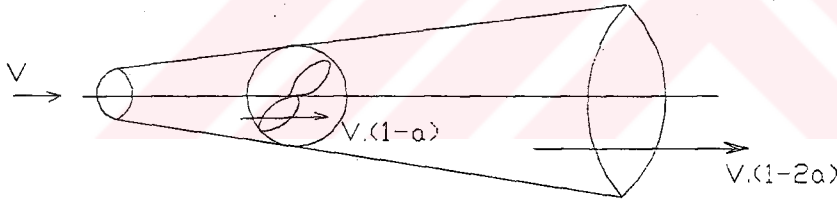
$$C_m = M_x / (q \cdot C^2) \quad (2.38)$$

Moment kolu boyunca etki eden kaldırma kuvveti vasıtasıyla moment üretilir (David, 1998).

2.5.4 Yatay Eksenli Türbinler İçin Momentum Teorisi

Şekil 2.5.4'te gösterilen Rankine'nin kullandığı kontrol düzlemi vasıtasıyla yatay eksenli rüzgar türbinlerinin analizinde aksenal momentumdan faydalanılmıştır.

Gözenekli disk alanı A ile türbin temsil edilmektedir. Hava bu kontrol hacminden geçerken yavaşlayan akış yüzünden basınç, akışın zıttı yönde atmosferik basıncın üzerine çıkar, akış yönünde basınç düşer ve akışın yavaşladığı kısımlarda yeniden atmosferik basınca ulaşır.



Şekil 2.5.4 Akış tüpü

Rüzgar hızı, V ; türbin diskinde bu hız, $V \cdot (1-a)$ ve türbinin ucundaki hız ise $V \cdot (1-2a)$ değerine ulaşır (a , girişim ucudur). Momentum analiziyle R yarıçaplı türbin için aksenal moment ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$M = 2\pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot a \cdot (1-a) \quad (2.39)$$

Formülasyonda ρ , hava yoğunluğudur. Deniz seviyesinde standart atmosferik şartlarda havanın yoğunluğu $1.221 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ tür.

Şekil 2.5.4 'te gösterilen kontrol hacmine mekaniksel enerji denklemini uygulanarak güç hesap edilebilir.

$$P = \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot a \cdot (1-a)^2 \quad (2.40)$$

Bu güç rüzgarla kaplı rotor diskinde meydana gelen E akışıyla boyutsuzlandırılabilir.

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (2.41)$$

Sonuçta güç katsayısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$C_p = P/E = 4 \cdot a \cdot (1-a)^2 \quad (2.42)$$

a'nın maksimum teorik değeri 1/3 için güç katsayısı, 59,28 değerini alır. Bu sonuç ilk defa Betz tarafından tahmin edilmiştir ve türbin rotorunun rüzgarla yüklenen kısmı en fazla güç elde edilebilecek şekilde olmalıdır. Eğer yük çok küçük ise (küçükse), gücün çok büyük bir kısmı türbinin arkasından kaçıp gider ve eğer yük çok büyük ise (a, büyükse), akışı aşırı derecede geriler ve yaklaşan havanın bir kısmı türbinin etrafından akıp gider.

Bu türetim kesinlik ve uygulanabilirlik açısından bazı farklı sonuçları içerir. Özellikle akış çizgisi boyunca oluşan girdaplar nedeniyle kinetik enerjinin kaybolan kısmı ihmal edilmiştir. Akış çizgisi boyunca oluşan rotasyonel hareketlerin ilgili hesabı Glauert'in analiziyle incelenmiş ve sonuçta grafiklerde gösterildiği gibi türbin çeşidine bağlı hız oranının opsiyonu olarak ideal güç katsayısı verilmiştir. Türbin tipine bağlı hız oranı, $X = \Omega \cdot R/V$; Ω , türbin açısal hızıdır. Düşük türbin hızı ile yüksek moment gerektiren ortamlarda meydana gelen girdaplar, işe yaramaz kinetik enerji oluşumuna neden olur. İdeal akış izlerinde sürüklenme etkilerinin ihmal edilmesi yüzünden iki yada üç kanatlı rotorların performansları ideal performanstan daha düşüktür ama yüksek hızlı iki veya üç kanatlı rotorlar, düşük hızlı çok kanatlı rotorlara göre çok önemlidir.

2.5.5 Kutta Joukowsky Kanunu

Atmosfer içinde hareket eden cisimde kaldırma, hareket düzlemine dik olan aerodinamik kuvvet bileşenidir. Birim aralık başına kaldırma, L, sonsuz uzunluktaki

sabit formlu kanat sıkıştırılmaz bir ortamda sabit bir hızla hareket etsin. Kutta-Joukowski kanunu'na göre teori aşağıda ifade edilmiştir.

$$L = \frac{\bar{w}}{\rho} \Gamma V_b$$

Veya

$$\Gamma = \frac{(p' - p'')lg}{V \bar{w}} \quad (2.43)$$

L :Kaldırma Kuvveti

W :v.r açısız hız

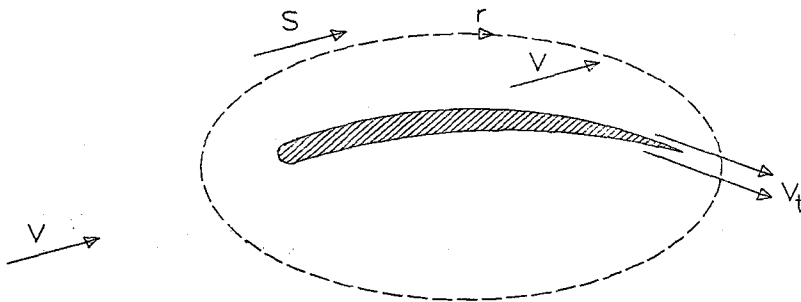
ρ : Yoğunluk

V_b :Akışkana uzak bir noktadaki bağıl hız

Γ :sirkülasyon

Sirkülasyon, kanat profiline yakın bölgede meydana gelmektedir. Kanadın sabit tutulduğunu ve akışkanın sabit bir hızda dağıldığını varsayalım. V hızı akış bölgesinin uzağındadır (Şekil 2.5.5). Rotora yakın bölgede V hızı vardır ama hem etki hem de yön bakımından farklıdır.

Teorik olarak sirkülasyonun sağlanması için kanadın her yüzeyinden V_1 hızı ile düzgün bir akış olması önemlidir. Kutta'nın durum ifadesidir (Cerit, 1999).



Şekil 2.5.5 Kutta teoremi

Akışkan ortam içinde (genellikle hava), kaldırma miktarı teorik değerden %10 daha az çıkmıştır. Sonuçta da Kutta'nın durum ifadesi memnun edici sonuç vermemiştir.

2.6 Rüzgar Türbininin Seçimi

2.6.1 Yöre İncelemesi

Bir yer hakkında bilgi edinmek için pek çok donanım kullanılır. Şerit metreler, fotoğraf makinaları ile veya çeşitli anemometrelerle veriler toplanır. Bir yerin tetkikinden sağlanan veriler bir plan doğrultusunda sistematize edilmelidir.

Rayleigh dağılımı ve ani hamle rüzgar tablosu basit bir istatistik yapılmasına izin verir. Basit istatistiki veriler ile yapılan ölçümler mümkün olabilecek hatanın %10 veya daha az olacağını gösterir. Fakat bu veriler o yerdeki gerçek rüzgar karakteristiklerini tanımlamaz.

Rayleigh dağılımı ortalama rüzgar hızı 5 (m/s) ve daha az olan bölgelerde iyi sonuç vermez. Buna rağmen havanın iyi olduğu durumlarda rüzgar davranışını kestirmemizi sağlar.

Bir mevkinin tetkikinde; rüzgar kaynağı ve rüzgar türbinini ele alarak dikkate alınması gereken hususlardır.

Bunun yanında,

- Yıllık ortalama rüzgar hızı
- Rüzgar hız dağılımı
- Rüzgar yönü
- Rüzgarın kesilmesi
- Yüzey yapısı
- Mevkinin denizden yüksekliğinde irdelenmesi gerekir.

Rüzgar kaynağı ile ilgili bazı karakteristikler ise şunlardır.

Çok kuvvetli fırtına veya kasırga beklenmesi

Buz, sulu sepken yağmur, dolu, kar ve don

Tozlu esmesi

Ağır nesnelere esmesi

Rüzgar türbini tasarımını etkileyen fakat rüzgara ait olmayan diğer

faktörler ise şunlardır.

- Göçebe kuşlar
- Televizyon sinyal parazitleri
- Toprak şartları
- Sismik (depremsel) kararlılık
- Bölgesel, sosyal, kanuni ve çevresel kısıtlamalar'dır.

2.6.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Genelde iki çeşit rüzgar türbini vardır. Bazıları 30 (kW) kadar kapasiteye sahip olsada ufak boyutlu olanları 1 ile 10 (kW) arasında çalıştırılmaktadır ama halen aralarında kesin bir ayrımında bulunmamaktadır. Bu çeşit rüzgar türbinleri genel bir tasarıma sahiptirler ve seri üretimleri de yapılmaktadır. Şu andaki en son uygulamada, enterkonnekte şebekeye çok uzak bulunan evlerde veya küçük çiftliklerde kullanılmaktadır. Diğer sınıf ise 100 (kW) ve daha büyük kapasiteye sahip rüzgar türbinlerini içerir. 100 (W)'tan daha büyük güce sahip iki yada üç rüzgar türbini inşa edilmiştir. NASA Lewis laboratuvarlarında çok büyük güç kapasiteli rüzgar türbinleri araştırmaları yapılmaktadır, 1 (MW) ya da daha büyük kapasiteli rüzgar türbini inşa etmeyi planlamaktadırlar.

Ufak rüzgar türbini tasarım eden kişiler, sistemin kurulacağı yer ve rüzgar hakkında bilgilere ihtiyaç duyar. Çünkü rüzgarın davranışları hakkında genel bir bilgi

gerekmektedir. Bu nedenle rüzgar türbini tasarım edenler yöre analizleri ile ilgili kesin bilgiler bulmak zorundadır.

Rüzgar türbinleri ya kapasitelerine yada tasarım maddelerine göre sınıflandırılabilirler.

Kapasite: Kapasite değerlerine göre sınıflandırma keyfi olmasına rağmen güvenli bir sınıflandırma ufak türbinler için 0-9 (kW), orta büyüklükteki türbinler için 10-99 (kW) ve büyük türbinler için 100-3000 (kW) değerleri arasında olmalıdır (Gipe, 1995).

Ufak türbinler bazı ülkelerde çiftliklerin ve evlerin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla üretilmektedir. Bu ufak rüzgar türbinleri sadece enterkonnekte şebekeye bağlı olmayan bölgelerde elektrik üretmek için kurulmamış aynı zamanda yakılmakta olan fosil yakıtlara ve nükleer santrallere de alternatif oluşturmaktadır. Orta büyüklükteki rüzgar türbinlerinin tasarımında, konstrüksiyonunda ve boyutlarında çok az değişiklik olmuştur. Büyük boyutlu rüzgar türbinleri gelecekteki elektriksel güç ihtiyacının karşılanmasında en büyük potansiyeldir.

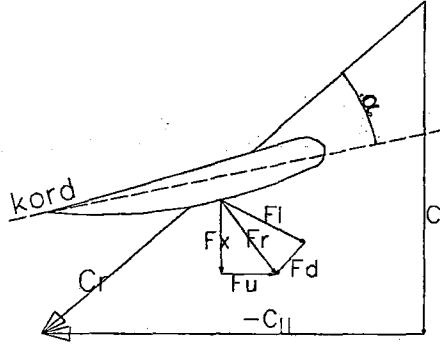
Rüzgar türbinleri şekillerine ve kuruluş sistemlerine göre de sınıflandırılabilir. Genellikle rüzgar türbinleri ya yatay eksenli yada düşey eksenli olarak kategorize edilebilir.

2.6.3 Rüzgar Türbini Tasarımı

Yatay eksenli rüzgar türbininin çalışma prensibi buhar yada gaz türbinlerin çalışma prensibi ile aynıdır. Rüzgar türbininin rotor devir sayısı ve akışkan hızı, buhar ve gaz türbinlerine göre çok düşük olduğundan dolayı bu iki çeşit türbinin kanat profilleri esas itibarıyla rüzgar türbini kanat profillerinden farklıdır. Buhar ve gaz türbinlerinde akışkanı saptırıcı açı çok büyüktür. Rüzgar türbininin kanat profilindeki eğim, her türlü makinada çalışabilecek şekilde tasarım edilmiştir. Buhar ve gaz türbinlerindeki rotasyonel kanatların tersine rüzgar türbinlerindeki rotor kanatlarının giriş açısı, rüzgar hızına bağlı olarak göstereceği değişimle optimum açığı alır. Yatay eksenli rotor eksenin akışlı türbinlerdeki gibi ikili, üçlü yada uzun kanatlı olabilir. Bir C hızıyla hava rotor boyunca hareket ederken kanatların yüzeyinde dinamik bir basınç oluşur.

Şekil 2.6.3.1'de gösterildiği gibi kanadın kiriş merkezinde F_r , basınç kuvveti meydana gelir.

Bu kuvvetin F_L , kaldırma kuvveti ve F_D , sürüklenme kuvveti olarak iki bileşkesi vardır.



Şekil 2.6.3.1 Rotor kanadına etki eden kuvvetler (David, 1998)

Bu iki kuvvet C_r vektörel rüzgar hızına dik ve paralel şekilde olan kuvvetlerdir. F_r kuvveti aynı zamanda radyal kuvvet F_x de aksel kuvvet F_u nun bileşkesidir.

F_u kuvveti, dış dirençlere karşı rotörü döndürmeye yarayan momenti üretir. F_x kuvvetide aksel itmeyi sağlar.

Rüzgar türbini- jeneratör gurubunun tasarımında rüzgar hızı çok önemli faktördür. Çünkü türbinde rüzgar hızının küpü ile orantılı olarak güç üretilir. Yıllık rüzgar eğrisinin seçilen aralığında oluşabilecek şekilde tasarım edilir. Güçlü rüzgarlarla çok fazla güç elde edilebilmesine rağmen ortalama rüzgar hızının standart değerinden daha yüksek olması rüzgar türbini- jeneratör grubu için çok önemli karakteristiklerden biridir. Şiddetli rüzgarlar genellikle arzu edilmez.

2.6.4 Rüzgar Türbini

Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde en önemli eleman rüzgar türbinidir, halk dilinde yel değirmeni olarak da adlandırılmaktadır. Çok yaygın kullanılan çeşidi yatay eksenli

rotora sahip olan türbinlerdir. Bunun yanında Darrieus tip rotorlu türbinler, ufak boyutlu Savonius tip rotorlu türbinler sıkça uygulama alanı olan çeşitlerdir. Rüzgar türbinlerinin performans analizleri yapıldığında ilk sırayı pervaneli tip rotora sahip rüzgar türbinleri almıştır.

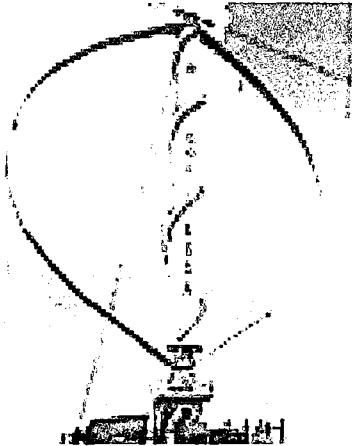
2.6.4.1 Düşey Eksenli Türbinler

Şekil 2.6.4.1'de Darrieus tip rotor görülmektedir. Kanatlar geometrik formu airfoil'e sahip olduğundan yüksek performanslıdır ve kanatlardaki hafif eğim sayesinde kanatlardaki çekme gerilmeleri minimuma iner. Darrieus türbin yüksek hızlarda verimli çalışabilmektedir ve türbinde iki veya üç adet kanat bulunmaktadır.

Cyclogiro rüzgar türbini, düşey eksenli en önemli rüzgar türbinlerinden biridir. Darrieus tip rotora benzemektedir ama iki önemli farkı vardır. İlki, airfoil düzdür ve etkisi ise rotasyonel hareket esnasında rüzgar kuvvetini maksimum alabilmek için sürekli olarak kanatlara adım kontrolü uygulanır. Uç hız oranında güç katsayısının maksimum değeri, Darrieus tip rotora göre daha yüksektir.

Savonius türbinleri de düşey eksenli türbinler arasındadır. Araştırmada düşük hızlarda çalışabilmesi ve imalatı kolay olduğu için Savonius türbin tercih edilmiştir.

Rüzgar türbininin aerodinamik verimi, üzerinde durulması gereken en hassas tasarım problemi değildir. En önemli kriter enerji dönüşüm sisteminde birim maliyet başına ne kadar güç elde edilebileceğidir.



Şekil 2.6.4.1 Darrieus rotoru (Gipe, 1995)

Sürükleme eğilimi: Performans katsayıları düşük ve iri gövdeli olsalar bile eski çağlardan beri rotorun çalışmasında kaldırma kuvvetinden çok sürükleme kuvvetinden yararlanılmaktadır. Darrieus rotoru, bütün makinaların modernleştirilmiş şeklidir ve oldukça ufak boyuttadırlar.

Arttırmalar: Arasına tasarım edilecek yapı kullanımında rüzgar gücü hesaplandıktan sonra türbin önerilir. Rüzgar türbininde rüzgarın akış yönünde gövdeye kısa yayıcılar konarak en büyük etki artırılabilir. Rüzgar türbinlerinde bu tür arttırmaların dezavantajı, statik dengenin sağlanması için harcanan maddiyattır.

2.6.5 Tasarım Problemleri

Tasarım yaparken şiddetli fırtınalara karşı yapılabilecek detaylı bir analiz en önemli unsurlardan biridir. Büyük çaplı rotora sahip sistemlerde, yüksek hızlı rüzgarlar ince kanatlarda ve rotor etrafında kırılmalara sebep olabilir. Sonuçta da sistem çalışamaz duruma gelir ve türbinin zarar görmesine neden olur.

Konuyla doğrudan ilgili olmasa bile önemli bir sorunda verimlilik ihtiyacı düştüğünde türbin hızının nasıl kontrol altında olacağıdır, türbin aşırı hızlanarak sistemin bozulmasına sebep olabilir.

Diğer bir önemli problem ise yüksek genlikli titreşimler, gerilmelerdir. Rotor kanatlarının dip kısımlarında meydana gelebilecek malzeme yorulmalarına da dikkat etmek gerekir.

Zorlayıcı kuvvetlerin frekans ile serbest titreşimlerin frekansı çakıştığında sistemin rezonansa girmesine sebep olur. Baskın frekanslar kanat geçiş frekansı olarak bilinen kanatların bünyedeki dönme sayılarına doğru meylederler. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde en önemli frekanslar kulenin salınım frekanslarıdır. Kule salınım yapmasını diye daima zorlayıcı frekanslar en düşük doğal frekansın daha da altında olmalıdır. İkinci bir yaklaşım ise kuleye bir miktar hareket serbestliği verilebilir ama zorlayıcı frekansların, sistemin doğal frekansıyla da çakışmaması için türbin hızı daima kontrol altında tutulmalıdır. (Cerit, 1999)

2.7 Güç Hakkında Bilgiler

2.7.1. Faydalı Güç

Sistemden elde edilen güç, faydalı güç olarak tarif edilir.

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot AV^3 \cdot \eta_t \quad (2.44)$$

η_t : sistemin toplam verimi

Pratikte ise bir rüzgar enerji sisteminin faydalı gücü aşağıdaki şekilde kabaca tahmin edilebilir.

$$P = (0,1 - 0,3) 1/2 \cdot \rho \cdot AV^3 \cdot \eta_t \quad (2.45)$$

2.7.2. Rotorun Faydalı Gücü

Rüzgar rotorunun gücü

$$P = 8/27 \cdot \rho \cdot AV^3 \quad (F, \text{Rotor kesit alanı; } V, \text{Rüzgar hızı}) \quad (2.46)$$

Eşitliğiyle 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 tesirlik derecesi ve rotorun ϕ ile gösterilen iyilik derecesi göz önüne alınarak, rotorun yararlı gücü (efektif gücü) için,

$$P_{ef} = \eta \cdot \phi \cdot 16/27 \cdot 1/16 \cdot V^3 \cdot F \quad (2.47)$$

eşitliği yazılabilir. 15 (°C)'de ve 760 (mmHg) basıncında yeryüzündeki ortalama hava yoğunluğunun SI birim sistemindeki ρ (kg/m³) olan değeri yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa,

$$P_{ef} = \eta \cdot \phi \cdot 16/27 \cdot 1/16 \cdot V^3 \cdot F \quad (2.48)$$

bulunur.

Buradaki $\phi.16/27$ terimi güç katsayısı olarak adlandırılır. C_1 ile gösterilirse maksimum yararlı güç olarak,

$$P_{\max} = \eta.c_1.1/16.V^3.F \quad (2.49)$$

elde edilir. Maksimum yararlı güç ve maksimum teorik güç değerleri göz önüne alınarak, rotorun toplam tesirlik derecesi η_1 bulunabilir. $\phi=1$ olarak kabul edildiğinde maksimum gücü ifade eden P_{\max} için,

$$8/27 = 0,592592592 = 0,6$$

bulunur.

Uygulamada bazı maksimum güç değerlerine hiçbir zaman aşlamaz. Rüzgar kanalındaki denemeler sırasında en fazla $c_1 = 0,45$ değeri elde edilmiştir. Hesapları emniyetli yapmak için c_1 'in 0,38 değeri, mekanik tesir derecesi olarak $\eta = 0,8$ değeri alınır ve

$$S = \pi.D^2/4 = 0,78.D^2 \quad (2.50)$$

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.

$$P_{et} = 0,8.0,38.1/16.V^3.0,78.D^2 = 0,0147.V^3.D^2 \quad (W) \quad (2.51)$$

$$= 0,0147/75.V^3.D^2 = 0,000198.V^3.D^2 \quad (BG) \quad (2.52)$$

$$= 0,0147/102.V^3.D^2 = 0,000145.V^3.D^2 \quad (kW) \quad (2.53)$$

eşitliklerde,

P = Türbin rotorunun gücü

V = Rüzgar hızı (m/s)

D = Süpürme alanı çapı (m) dir.

Yukarıda eşitliklerin bulunuşu sırasında $c_1 = 0,38$ kabul edilmiştir. Çeşitli kanat profilleriyle rüzgar tüneline yapılacak denemelerden elde edilecek güç emsal değerini 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 yararlı güç eşitlikleri yazılırsa,

$$P = 0,000214V^3D^2 \quad (\text{kW}), \quad \text{Betz} \quad (2.54)$$

$$P = 0,000185V^3D^2 \quad (\text{kW}) \quad \text{Noetzelin} \quad (2.55)$$

bulunur. Bu eşitliklerde de rüzgar hızının (m/s) ve süpürme alanının (m²) olarak alınması gerekmektedir (Koç, 1995).

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

$$D_1^2\pi/4 - (D_1/3)^2\pi/4 = D_2^2\pi/4 \quad (2.56)$$

bulunur.

Bu eşitlikten faydalanarak D_1 çapı, D_2 'ye göre bulunabilir.

$$D_1 = 3/\sqrt{8}D_2 \quad (2.57)$$

2.7.3. Rüzgar Gücü

Hava hareketleri rüzgar olarak tanımlanır. Yer çekimi, dünyanın dönmesinden oluşan saptırıcı kuvvetler ya da rüzgarın izlediği yol yüzünden oluşan merkezkaç kuvvetler hava hareketlerine sebep olabilir. Rüzgar kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar durdurulsun 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 esen 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 cismin üzerine etki eden dinamik kuvvetler tasarım amacıyla statik basınca eşdeğer olarak alınabilir. İdeal akışkanlar için Bernoulli teoremi aşağıda verilmiştir.

$$(V_0^2/2) + P_0 = \rho.(V^2/2) + P \quad (2.58)$$

ρ : Havanın yoğunluğu

P_0 : Statik basınç

V_0 : Serbest akış hızı

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

Formülasyondaki $\rho.V^2/2$ ifadesi gösterilen dinamik basınçtır. Kısacası her bir noktaya etki eden dinamik ve statik basınçların toplamı sabittir. Genellikle kuvvetin şiddetini belirlemede boyutsuz katsayıların kullanılması, rüzgar kuvvetini radyal ve aksel bileşenlere ayırarak hesap etmek daha kullanışlıdır.

$$F_L = C_D . q . A \quad (2.59)$$

$$K_L = C_L . q . A \quad (2.60)$$

F_L : Sürüklenme ve K_L : 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.

2.7.3.1 API Rüzgar Kuvveti

Sahil kıyılarında binalara etki eden rüzgar kuvvetini hesaplayabilmek için Amerikan Petrol Enstitüsünün tavsiye ettiği formül aşağıda verilmiştir.

$$P = 0,00256.V^2.C_2.A \quad (\text{İngiliz birimleri ile}) \quad (2.61)$$

$$P = 0,0473.V^2.C_2.A \quad (\text{metrik birimleri ile}) \quad (2.62)$$

P= Rüzgar kuvveti, lb veya Newton

V= Deniz seviyesinden 10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı , mph yada km/h

C_2 = Şekil katsayısı

A: projeksiyon alanı , ft² veya m²

API 'nın 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.

$$y = V_{10} \cdot (y/10)^x \quad (2.63)$$

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

y : Deniz seviyesine göre yükseklik

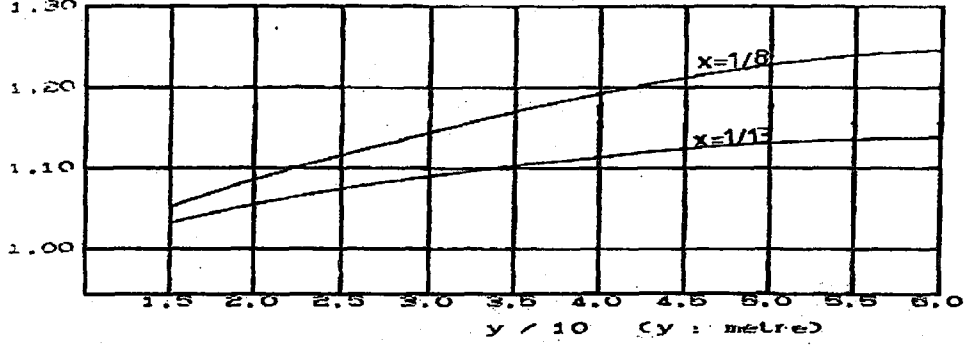
x : Üs, deniz haline, karadan olan mesafeye ve rüzgar tasarım hızının süresine bağlı olarak 1/13 ile 1/7 arasında alınabilir.

API 'ye göre,

1/13 , bora için

1/7 , sürekli rüzgar için

alınmalıdır.



Şekil 2.7.3.1 API yükseklik faktörü (Sayındı, 1994)

Şekil 2.7.3.1 'de yükseklik faktörü diagramı verilmiştir.

2.7.3.2 ABS Rüzgar Kuvveti

Amerikan Denizcilik Dairesinin rüzgar kuvvetinin hesaplanmasında kullandığı formül aşağıda verilmiştir.

$$P = 0,823.V_k^2.C_h.C_a.A \quad (\text{Metrik birimler ile}) \quad (2.64)$$

$$P = 0,00338.V_k^2.C_h.C_a.A \quad (\text{İngiliz birimler ile}) \quad (2.65)$$

P : Rüzgar kuvveti, N

V_k : Rüzgar hızı, m/s yada knot

C_h : Yükseklik katsayısı

C_a : Şekil katsayısı

A : Projeksiyon alanı, m^2

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 - 48 (m)	1.20
47 - 81 (m)	1.30
62 - 78 (m)	1.37
77 - 91 (m)	1.43

ABS'nin tavsiye ettiği şekil katsayıları aşağıda verilmiştir.

Silindirik şekiller	: 0.5
Fındık kabuğu şeklindeki yüzeyler	: 1.0
Tek katlı ev	: 1.0
Bitişik nizamlı binalarda	: 1.5
Deniz seviyesinin altındaki bölgelerde	: 1.0
Gemi vinci	: 1.25

2.7.3.3 DNV Rüzgar Kuvveti

Rüzgar kuvvetinin hesaplanmasında Det Norske Verits'in tavsiye ettiği formül aşağıda verilmiştir.

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot V_{yt}^2 \cdot C \cdot A \cdot \sin \alpha \quad (2.66)$$

ρ : Hava yoğunluğu [standart atmosferde kuru hava için $1.225 \text{ (kg/m}^3\text{)}]$

V_{yt} : Deniz seviyesinden y metre yükseklikte ve t saat süre içindeki ortalama rüzgar hızı

C : Şekil katsayısı

A : Rüzgarın etkilediği cismin projeksiyon alanı

α : Cismin ekseni ile rüzgar yönü arasındaki açı

DNV'nin formülünde V_{yt} zamanın, yüksekliğin ve bora faktörlerinin fonksiyonudur. Aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$V_{yt} = \alpha \cdot V_{10} \cdot (y/10)^\beta \quad (2.67)$$

α : Bora faktörü

β : Yükseklik faktörü üssü

y : Deniz seviyesinden itibaren ki yükseklik

V_{10} : Deniz seviyesinden 10 (m) yükseklikteki ve bir saat süre içindeki ortalama rüzgar hızı

DNV'nin tavsiye ettiği değerler aşağıda verilmiştir.

$$\alpha = 1.00, \beta = 1.50 \quad (1 \text{ saatlik zaman zarfı için})$$

$$\alpha = 1.18, \beta = 0.113 \quad (1 \text{ dakikalık zaman zarfı için})$$

$$\alpha = 1.33, \beta = 0.100 \quad (3 \text{ saniyelik zaman zarfı için})$$

Sonlu uzunluktaki cisimler için şekil katsayısı aşağıda ifade edilmiştir (Sayındı, 1994).

$$C = k \cdot C$$

k = Redüksiyon faktörü

C = Sonsuz uzunluktaki cisimler için şekil katsayısıdır.

Rüzgar en yaygın kullanılan en eski enerji kaynaklarından biridir. Bazı ülkelerde kullanılmasına rağmen, fosil yakıtların çokluğu yüzünden geçen 50 (yıl) içinde, gelişmiş ülkeler için pek önemli olmamıştır. Son zamanlarda fosil yakıtların kaynağındaki sınırlılık, modern teknolojiyi rüzgar gücüne yöneltmiştir. Sonuçta

geçen birkaç yıl içinde rüzgar gücünden yararlanmak için muazzam bir çaba harcanmıştır.

2.7.4 Rüzgar Gücünde Gelişme

Yüzyıllardan beri rüzgar makineleri su pomkanatma ve tahıl öğütme gibi çeşitli işlerde güç sağlamak için kullanılmıştır. Bu alandaki yel değirmenleri rüzgar gücünden yararlanma yönünden en önemli uygulamalardan biridir. Bir zamanlar Amerika'da da yel değirmenleri kurulmuştu. Bu tür yel değirmenleri, elektriğin ulaşmadığı bölgelerde elektrik üretiminde ve su pomkanatma işlerinde kullanılmıştır.

İlk büyük rüzgar gücü makinaları 1941 yılında kurulmuştu. Türbin-jeneratör grubunca elektrik enerjisi lokal şebekeleri beslemekteydi. İlk prototip 1250 (kW) gücünde elektrik üretmek için Smith-Putnam rüzgar türbini tasarımı edilmiştir. En iyi rüzgar gücünün elde edileceği yer ve meteorolojik araştırmalar yapılmalıdır. Yapılan araştırmalar sonucunda 13 m/s'lik rüzgar hızı ile ancak elektrik üretimi sağlanabilir (Hickok, 1975).

37 (m) yüksekliğindeki çelikten kulenin tepesinde bulunan rüzgar türbini içine elektrik jeneratörü, şaft ve kanatlar monte edilmiştir. Yeldeğirmeni rotoru, bir uçtan diğer bir uca kadar 53.3 (m) uzunluğundaydı. İki kanattan herbiri 19.8 (m) uzunlukta ve 3.66 (m) genişlikteydi. Büyük rotor kullanılmasındaki amaç şudur. Rotor, 29(d/d) civarında döner. Sonuçta da kanadın uç noktalarında 80 m/s'lik hızlara ulaşılır. 6.5 m/s'lik minimum rüzgar hızı ile rüzgar makinasında yeterli hıza ulaşabilir. Böylece rüzgar hızı 6.5-13 m/s'lik değerler arasında değişirken kanadın uç tarafındaki hız ile rüzgar hızı arasındaki oran 1/6 ile 1/12 arasında olabilir (Hickok, 1975).

13 m/s'lik rüzgar hızına ulaşıldığında hız kontrol dişlisi sistemi otomatik olarak devreye sokarak elektrik üretilmesini sağlar. 6.5 m/s'lik rüzgar hızı ile güç üretmeye başlayan sistem 13 m/s'lik rüzgar hızına ulaşmaya kadar elektrik üretmeye devam eder ve bu hız değerinin üzerine rüzgar hızı çıktığı zaman rotor otomatik olarak devre dışı kalır ve boşta dönmeye başlar.

Rüzgar türbinindeki temel hareketler şunlardır. Rotasyonel hareketler, otomatik olarak kanat açısının (adım) kontrolü ile dönme ve kontrol işlemleridir. Normal çalışma şartları altında hız kontrol mekanizmasıyla kanatların hızı sabit bir devirde tutulur. Değişken rüzgar hızlarına rağmen kanatlarda sabit bir hız elde edebilmek için her iki kanat adım kontrol mekanizması vasıtasıyla eksenleri etrafında döndürülerek uygun açı elde edilir.

Hız kontrol sisteminin devreye girmesiyle kanatların hızlanmasına, eksenleri etrafında hareket ettirilerek adım kontrolü sağlanır.

Kule içinde rüzgar yönüne paralel bir şekilde monte edilmiş olan türbin mili düşey konumda bulunan şavtı çevirir. Kanatlar kulede düşey konumda bulunmaktadır ve bir hidrolik motor sayesinde kanatların düşey eksen boyunca esnemesi kontrol edilir.

Rotor göbeğine bağlanmış olan türbin kanatlarının her biri eksenleri etrafında serbestçe dönebilir. Kon hareketi, kanatları rüzgarın şiddetine göre yukarı aşağı hareket ettirir. Bu hareket çok şiddetli kasırga veya bora gibi doğal afetlerde kanatları yüksek gerilmelerden korumak içindir. Kanatlara verilen koni açısı gravitasyonel, aerodinamik ve merkezkaç kuvvetleri etki eder.

Smith-Putnam rüzgar türbini 1941'den 1945'e kadar çalıştırıldı ve kanatların birisindeki metal yorulmasından devreden çıkarıldı (Hickok, 1975). Kanadın tamiri yapıldıktan sonra, türbin çalışmaya devam etti fakat diğer enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında ekonomik olmadığına karar verildiği için iptal edildi. Bu nedenden dolayı rüzgar türbini- jeneratör grubunun çalıştırılması sona erdirildi.

1950'li ve 1960'lı yıllar esnasında rüzgar gücü teknolojisi daha fazla araştırıldı. Avrupa'da da bu konuda çalışmalar yapılmaktaydı. Almanya'da 100 (kW) gücünde rüzgar türbinin- jeneratör grubunu kurmuşlardı. On yıl içinde türbinler enterkonnekte şebekeye bağlanmıştır. Rüzgar türbinlerinin Avrupa'da gösterdikleri performans sonucunda bu güç üretim şekline ilgi artmıştır. Bir rüzgar türbini- jeneratör grubu tesisi, fosil yakıt yakan güç santrallerine göre daha ekonomiktir.

Smith – Putnam tasarımı konstrüksiyonu olan rüzgar türbini mühendislik açısından başarılı bir çalışma idi. Bugünlerde ve Grandpa's Knob'un 1940'lı yıllarda kurduğu yatay eksenli rüzgar türbinlerine ilgi daha fazladır. Uçak imalat teknolojisinden faydalanılarak rotor çapları daha büyük ve kanatlar daha hafif imal edilmektedir.

Rüzgar türbini; hava kütlelerinde momentum değişikliğine neden olacak rotasyonel bir makinedir. Güç, rotorun süpürdüğü alan, havanın yoğunluğu ve hızın karesi ile orantılı olarak elde edilir. Kinetik enerji,

$$P_e = \rho \cdot D \cdot V^3 \quad (2.68)$$

ρ : Havanın yoğunluğu;

D : Rotor çapı;

V : Ortalama rüzgar hızıdır.

Modern , yüksek hızlı pervaneli tip rüzgar türbini için performans (güç) katsayısı C_p , 0.48 değerini alır. Performans katsayısı, türbinin aerodinamik özellikleri ile ilgilidir.

2.8 Enerji Dönüşümü

2.8.1 Rüzgar Enerjisi Çevrim Sistemleri

Rüzgarın taşıdığı kinetik enerjiyi toplayan ve diğer enerji türlerine çeviren makinalara rüzgar makinaları yada türbinleri adı verilir. Tipik bir rüzgar türbini aşağıdaki kısımlardan oluşur. Bunlar,

Rotor (kanatlar ve göbek)

Hız yükseltici

Enerji dönüşüm sistemi (Jeneratör)

Kontrol sistemi

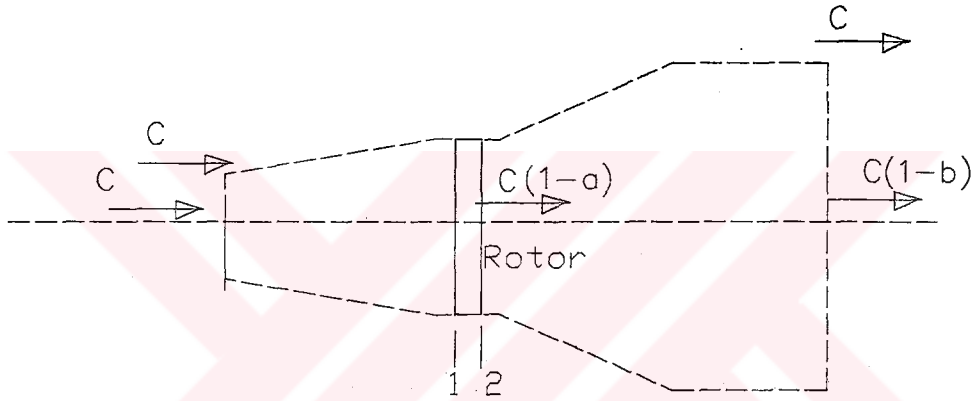
Kule'dir.

2.8.2 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.

$$P = 1/2 \bar{m} C^2 = 1/2 (\rho A_r C) C^2 = 1/2 \pi r^2 \rho C^3 \quad (2.69)$$

Formülasyonda ρ , havanın yoğunluğunu; C , havanın akış hızı ve P ise güçtür.



Şekil 2.8.2.1 Rüzgar türbini rotorundan hava akışı

Aerodinamik faktörler yüzünden teorik güç, \bar{W}_i gücünden daha düşük olacaktır.

Şekil 2.8.2.1'de rotor diski boyunca kontrol hacminde havanın akışı gösterilmektedir.

C bölgesinde hava, kanatlara doğru akarken değişken C hızına sahiptir. Kanat bölgesindeki basınç, p_e ; atmosferik basınç, p_a ; Akışın olduğu alan, A_e , bu alan πr^2 değerinden daha azdır; kanat yarıçapı, r dir.

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

p_1 basıncı, p_e basıncından daha yüksektir. Sıkıştırılmaz akışkınların akışı için enerji denklemini yazabiliriz.

$$(p_e - p_1) / \rho = (C_1^2 - C_e^2) / 2 = [C^2(1-a)^2 - C^2] / 2 \quad (2.70)$$

Hava kanatlardan akarken basıncı düşer . Böylece $p_2 > p_1$ olur. Kanatlardaki akış esnasında hava basıncı düzenli olarak artana kadar hava hızı düşmeye devam eder taki atmosferik basınca eşit oluncaya kadar böylece $p_0 = p_a$ olur. 0 bölgesinde $C_0 = C.(1-b)$ ve $b > a$ olmaktadır. Enerji eşitliğini yeniden yazarsak,

$$(p_2 - p_1) / \rho = (C_1^2 - C_e^2) / 2 = [C^2(1-a)^2 - C^2(1-a)^2] / 2 \quad (2.71)$$

Yukarıdaki eşitlikler birbirleri ile birleştirilebilir ve $p_2 - p_0 = p_0$ alınabilir.

$$P_2 = 1/2 \cdot \rho \cdot C^2 \cdot [1 - (1-b)^2] \quad (2.72)$$

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

$$(P_1 - P_2) \cdot A_{rT} = 1/2 \cdot \rho \cdot C^2 \cdot A_{rT} \cdot [1 - (1-b)^2] \quad (2.73)$$

Eksenel itme, momentum eşitliği ile ifade edilebilir.

$$\overline{m}(C_e - C_0) \quad (2.74)$$

$$\rho \cdot A_r \cdot C \cdot (1-a) \quad (2.75)$$

$$C ; \quad C_0 = C \cdot (1-b) \quad (2.76)$$

Böylece aksenal itme aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$L = \rho \cdot A_r \cdot C \cdot (1-a) \cdot [C - C(1-b)] \quad (2.77)$$

$$L = \rho \cdot A_r \cdot C^2 \cdot (1-a) \cdot b \quad (2.78)$$

yazılabilir.

Eksenel itme ifadelerinin eşitliklerden $b=2a$ yazılabilir.

Rotordan akan hava ile akışın gerçekleştiği bölge arasında bir ilişki vardır. C bölgesinde hava hızı, C; akışın gerçekleştiği bölgenin enine kesiti πr^2 ise kanatların süpürdüğü alandır. Akış yönündeki o bölgesinde hava hızı $C \cdot (1-2a)$ değerine eşittir.

Akışın gerçekleştiği bölgenin enine kesiti $\pi.r^2$ değerinden daha büyüktür. Böylece hava hızı C değerinden $C.(1-a)$ ve daha sonrada $C.(1-2a)$ değerine düşer.

$C.(1-a)$ hız değerinden faydalanılarak kanatlardan akan kütlelesel hava miktarı bulunabilir.

$$\rho \pi r^2 C.(1-a) \quad (2.79)$$

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

$$F_K = 1/2 \rho \pi r^2 C(1-a) [C^2 (1-2a)^2 - C^2] \quad (2.80)$$

Havanın kinetik enerjisindeki değişim miktarı ile teorik miktarı hesap edilebilir.

$$\overline{E}_k = 2 \pi r^2 . \rho . C^3 . a . (1-a)^2 \quad (2.81)$$

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

W_{th} 'nin maksimum değeri önemlidir. $a.(1-a)^2$ ifadesini a'nın değeri için denklemde yok edersek maksimum teorik verim aşağıdaki gibi olur.

$$\eta_t = 8/27 \pi r^3 C^3 \quad (2.82)$$

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 P_{max} değerinden daha düşüktür. Dönüşüm verimi, rotorun konstrüksiyonuna ve hız oranına yani değişken rüzgar hızlarında kanattan elde edilen hıza bağlı bulunmaktadır. İki kanatlı rotorda bir aerodinamik tasarım için hız oranı 6 civarlarında olmalıdır. Bu taktirde dönüşüm oranı 0,75 civarında olur. Böylece $\overline{W}_a = 0,75 \overline{W}_{max}$ hız oranı 6'nın altında olursa, dönüşüm veriminde azalma eğilimi olur.

Üçüncü bir kanat ilavesi ile dönüşüm veriminde belirgin bir artış olur ama üçüncü bir kanat ilavesi maliyeti arttırıcı bulunur. Amerikan çok kanatlı tip rotorda ve Hollanda yapısı dört kanatlı 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 olur.

2.9 Rüzgar Enerjisi Sistemlerinin Kullanılması

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi geçmişte hububat öğütülmesi ve su pompalanması maksatları 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 DC-AC dönüştürücüdür. Enterkonnekte şebekeden elektrik enerjisi ulaştırılmayacak kadar uzak olan bölgelerde, DC jeneratör kullanılarak enerjinin depolanmasının gerektiği yerlerde büyük kullanma alanı bulunmaktadır.

Rüzgar gücü : Rüzgar , hava hareketi olduğundan aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P_w = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (2.83)$$

İfadesinde P_w , güç (W); 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 modellenir. Rüzgar modellemesinde, Weibull dağılımı çok defa kullanılır (Walker, 1997).

$$(w) = 1 - \exp\left[-(v/\alpha)^\beta\right] \quad (2.84)$$

$$= \beta \cdot (v^{\beta-1}/\alpha^\beta) \cdot \exp\left[-(v/\alpha)^\beta\right] \quad (2.85)$$

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

$$(m_v)^2 = \left[\Gamma(1 + 2/\beta) / \Gamma^2(1 + 1/\beta) \right] - 1 \quad (2.86)$$

Ortalama ifadesi, ilgili bölgenin potansiyeli hakkında bilgi verebilir. Bazı durumlarda, rüzgar hızındaki değişiklerin aralığı bilinirse uygun bir β değeri ve α değeri seçilebilir. Rüzgar değişiminde çok fazla değişiklik yoksa β değerinin 4 civarında verilmesi uygun olur.

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

$$\text{Ortalama Rüzgar Hızının Küpü : } \langle v^3 \rangle = \int_0^\infty v^3 \cdot f(v) \cdot dv \quad (2.87)$$

$$\text{Güç Faktörü : } K_0 = \left[\langle v^3 \rangle \right]^{1/3} / m_v = \alpha^3 \Gamma(1 + 3/\beta) \quad (2.88)$$

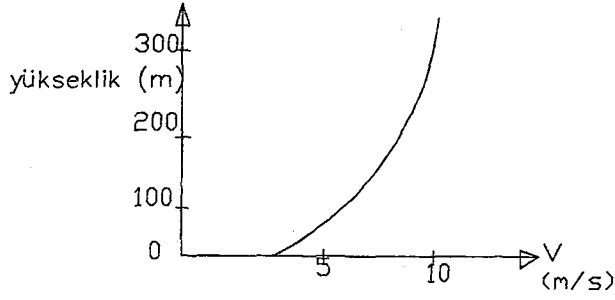
(Weibull modeli için)

$$\text{Ortalama Güç Yoğunluğu : } P_{av} = 1/2 \cdot \rho \cdot \langle v^3 \rangle \quad W/m^2 \quad (2.89)$$

$$\text{Hız Faktörü : } K_{op} = \langle v^3 \rangle / m_v^3 = K_0^3 \quad (2.90)$$

Tipik rüzgar hızlarında, K_{op} 'in değeri 1,5 ile 3 arasında olabilir.

Şekil 2.9.1'de yüksekliğin fonksiyonu olarak rüzgar hız dağılım grafiği verilmiştir. Anemometreler genellikle deniz seviyesinden 10 (m) yükseklikteki seviyede kullanılır.



Şekil 2.9.1 Yüksekliğe bağlı olarak ortalama rüzgar hızındaki değişim (Sayındı, 1994)

h metre yükseklikteki rüzgar hızı, 10 (m) frekans rüzgar hızı ile yüksekliğin $1/7$ 'inci kuvvetini alınması yüzey pürüzlülüğü ve diğer arazi şartları ile bağlı faktörlere bağlı bulunmakta ve değeri 0,1 ile 0,3 arasında değişebilmektedir. Arazi ile ilgili bazı belgelerin eksikliği nedeniyle, $1/7$ değerini almak yeterli olmaktadır. Enerji dönüşüm sistemlerinde güçlü destekleri olan kule kurmak her zaman avantajlıdır.

2.9.1 Rüzgar Gücü- Elektrik Gücü Dönüşümü

Rüzgar gücü kolaylıkla rotasyonel mekanik enerjiye dönüşebilir. Rüzgar-elektrik enerjisi dönüşüm sisteminde güç ilişkisi aşağıdaki ifade ile tarif edilir.

Denklemden P_0 , elektriksel güç η_g ve η_m , sırasıyla jeneratör ve mekanik verim; η_p ise güç iletim verimidir. Bu verimler ile performans katsayısının çarpımı 0,20 ile 0,35 değerleri arasında olmaktadır.

Elektrikli aletler için gerekli olan enerjinin ölçümünden çok rüzgar türbininin sabit hız yada buna yakın bir hızda mı yoksa değişken bir hızda mı çalıştığı daha önemlidir. Sabit hız yada sabit hıza yakın değerler türbin çalıştırıldığında, güç katsayısı C_p yalnızca rüzgar hızının fonksiyonu olmaktadır. Eğer değişken rüzgar hızlarında türbinin çalışması gerekiyorsa türbin minimum 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 etmek isteniyorsa ilave elektronik devrelere ihtiyaç duyulur (Koç, 1995). Rototip olarak üretilenlerin çoğu sabit hızla ve senkronize jeneratörle çalışmaktaydı. Değişken hızlarda çalışması gereken türbin-jeneratör grubunda hiç olmazsa hız aralığı sınırlı olmalıdır.

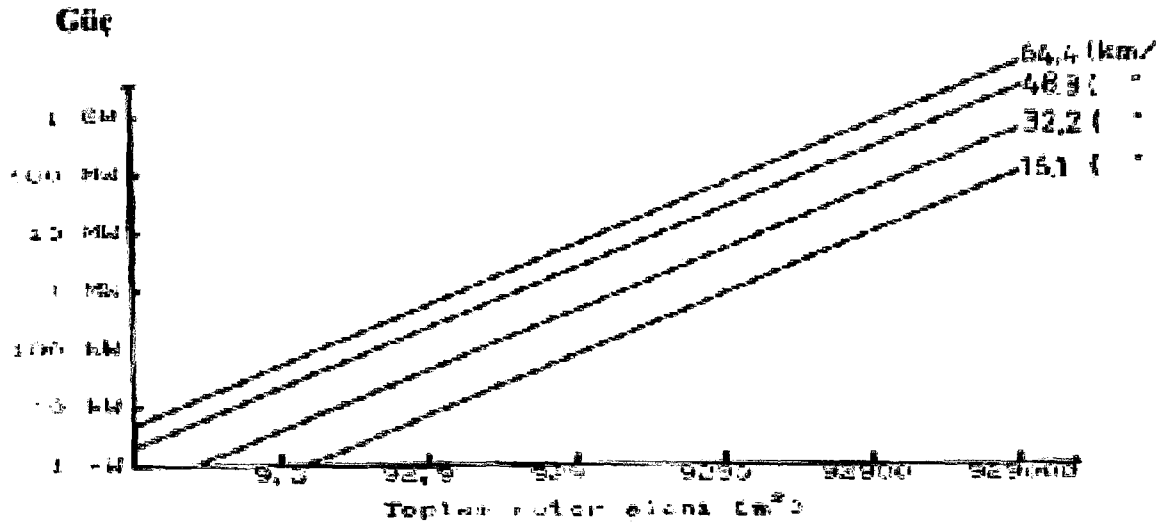
Manyetik alan frekansı geliştirebilen jeneratör sistemleri, mükemmel kalitede çıkış gücüne sahiptirler ama bu cihazların fiyatları da çok yüksektir.

2.9.2 Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Seçimi

Deniz seviyesindeki bir bölgede sabit hızda ve sabit oranda elektrik üretmek için seçilmiş rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi ortalama 8 (m/s)'lik rüzgar hızında, 4 (m/s)'lik hız sınırının altında ve 28 (m/s)'lik hız değerinin üstünde kanatlar kolay dönebilecek şekilde tasarım edilecektir. 67 (m/s)'lik maksimum rüzgar hızına sistem dayanabilmelidir. Müsaade edilebilir minimum rotor çapı 38 (m)'dir

1.) Faydalı Rüzgar Gücünün Hesaplanması:

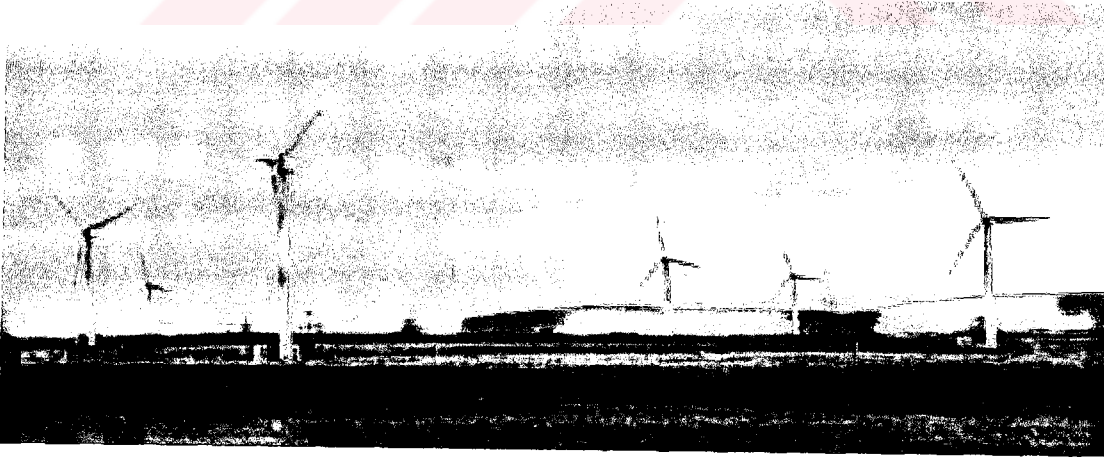
Şekil 2.9.2'de deniz seviyesindeki bir alanda, değişik rüzgar hızlarında, rüzgardan elde edilebilecek faydalı güç değerleri verilmiştir. Maksimum rotor çapının 38 (m) kullanıldığını farz ederek akışın meydana geldiği bölgenin alanı $A = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 38^2 / 4$ 1140,1 (m²) yani rotorun süpürdüğü alandır. Şekil 2.9.2'den faydalanılarak yatay ekseninde 1140,1 (m²) değerini kullanırsak ve düşey ekseninde de 8 (m/s)'lik rüzgar hız değerini kullanarak elde edebileceğimiz gücün 200 (kW) civarında olacağını bulmuş oluruz.



Şekil 2.9.2 Rotor Alanı ile Güç Arasındaki İlişki (Sayındı, 1994)

2.) Uygun Rüzgar Türbinin Seçimi

Şekil 2.9.3'de modern rüzgar türbinlerinin çeşitleri gösterilmiştir. Her bir rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi üç adet alt sisteme sahiptir. Bunlar aerodinamik sistem, mekanik iletim sistemi, dişliler (şaftlar, yataklar, v.s.) ve elektrik üretim sistemidir.



Şekil 2.9.3 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (Gipe, 1995)

Yatay eksenli, çift 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.

- 1.)Güç katsayısı oldukça yüksektir. (0,375)
- 2.)Müsaade edilebilir kanat çapı (38 (m)) çift kanatlı rotor tasarım etmek için uygundur.
- 3.)Çift kanatlı rotor, 28 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızında verimli çalışabilmektedir.
- 4.) Sabit hız ve sabit frekans elde edilmesinde çift kanatlı rotorlar uygundur.

2.9.3 Rüzgar Türbininden Elde Edilebilecek Maksimum Elektriksel Akış Gücünün Hesaplanması

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

$$P_e = P_w \eta_m \eta_g \quad (2.92)$$

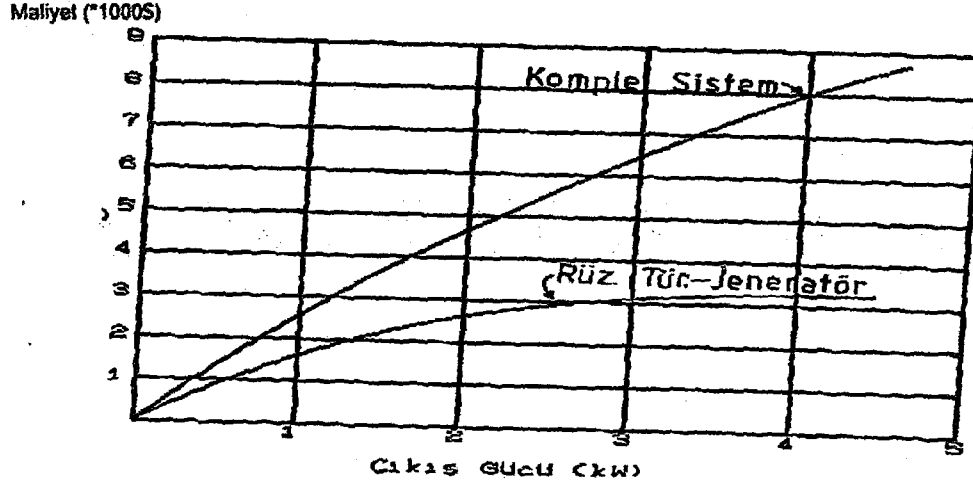
şeklinde ifade edilir.

2.9.4 Türbin Fiyatının hesaplanması

Şekil 2.9.4 ve 2.9.5 'de ufak boyutlarda klasik bir rüzgar türbininin ürettiği elektriksel güce bağlı olarak maliyet eğrileri verilmiştir. 100 (kW) gücünde bir rüzgar türbininin 150 000 (\$) 'a malolacağı tahmin edilmektedir (Sayındı, 1994). Başka bir deyişle her bir kW başına 40 (\$) harcanacağı tahmin edilmektedir. İlk yıl için bu fiyatlar rahatlıkla kullanılabilir. Gerekliyse enflasyon nedeniyle gerekli hesaplamalarda yapılmalıdır.

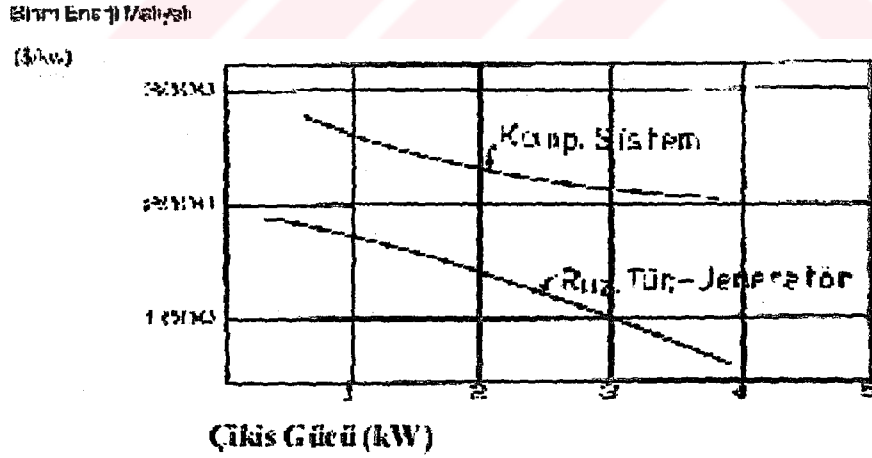
Hesaplamalarla ilgili açıklamalar : Seçilen rüzgar türbini ve pomkanatma, akü şarj etme ve enterkonnekte şebekeyi beslemede de kullanılabilir. Üreticiler hesaplarını

deneylerle kontrol edebilir. Sonuçta da iyi bir karar verilebilir. Yüksek fiyatı rüzgar türbini kulelerinden ve büyük rotor kullanımından sakınılmalıdır.



Ortalama rüzgar hızı 8 ile 12 (m/s) arasında

Şekil 2.9.4 Rüzgar türbini maliyeti - Çıkış gücü ilişkisi (Sayındı, 1994)



Ortalama rüzgar hızı 8 ile 12 (m/s) arasında

Şekil 2.9.5 Birim enerji maliyeti (Sayındı, 1994)

2.10 Günümüzün Rüzgar Türbinlerindeki Gelişmeler

Son zamanlarda Amerika'da alternatif enerji kaynaklarını araştırma ihtiyacı yüzünden, rüzgar gücüne olan rağbet artmıştır. En önemli gelişme ise Ohio, Sandusky'deki NASA istasyonuna 100 (kW) gücünde rüzgar türbini-jeneratör grubunun inşa edilmesiydi. 1976 yılında bölgesel elektrik üretimi rüzgar türbini-jeneratör grubu sayesinde sağlanmıştır (Le Gourieres,1992).

NASA istasyonundaki türbin-jeneratör grubu 30 (m)'lik bir kirişli çelik kule üzerine inşa edilmiştir. Rotor 21,38 (m) ve her bir kanadın kütlesi 910 (kg)'dir. Kule üzerinde kurulan sistemin rotor dahil toplam kütlesi 18 (ton) idi. Amerika'da kurulan rüzgar türbini-jeneratör gruplarında, NASA 'da kurulan liste dışıydı. Amaçlanan türbinler 200 ile 2500 (kW) arasında güce sahipli, rotor çapları da 90 (m) 'nin üzerindediydi (Le Gourieres,1992).

NASA'da kurulan rüzgar türbini-jeneratör grubunun jeneratörü 1800 (d/d)'lik sabit bir hızda çalışmaktadır. Rüzgar hızındaki değişikliklere göre adım kontrol mekanizması yardımıyla kanat açıları otomatik olarak ayarlanarak rotorun 40 (d/d)'lik bir hızda çalışması sağlanmaktadır. Rüzgar hızı 4 (m/s) değerini aştığı andan itibaren güç üretimi gerçekleşmektedir. 7 (m/s) 'lik bir rüzgar hızında 50 (kW) 'lik 8 m/s'lik bir hızda 100 (kW) değerinde güç elde edilebilmektedir (Le Gourieres,1992).Çok yüksek rüzgar hızlarında kanatlara adım kontrolü uygulanarak fazla enerji dışarı atılır. Rüzgar hızı, 27 (m/s) değerini aştığı zaman kanatlar boşa döner böylece de güç üretilmez. Rotor kanatlarının güç katsayısı 0,375 ve güç iletim katsayısı ise 0,75'tir.

1979 yılında kuzey Carolina yakınlarında Boone'da bir rüzgar türbini-jeneratör grubu tesis edilmiş ve çalıştırılmıştır. Rotor çapı, 61 (m) uzunluğundaydı ve sistem yerden 40 (m) yükseklikte kule üzerine tesis edilmişti. Rüzgar hızı 5 ile 16 (m/s) 'lik hız değerleri arasındayken- rotor 35 d/d hızla döner. Ortalama rüzgar hızı yukarıdaki sınırların dışına çıkarsa pervane boşa döner. 11 m/s 'lik bir rüzgar hızında, rüzgar türbininden 2000 (kW) değerinde güç elde edilebilir (Le Gourieres,1992).

1981 yılında Washington'un güney kesimlerindeki Columbia Gorge kıyısında üç kanatlı bir rotora sahip rüzgar türbini-jeneratör grubu inşa edildi. Rotor çapı 91 (m)

uzunluğundaydı ve 2,5 (MW) gücünde elektrik üretebilecek kapasitedir. 16 (m/s)'lik rüzgar hızında elektrik üretmeye başlar, 5 ile 16 (m/s)'lik rüzgar hız değerleri arasında türbinden tam verim elde edilebilmektedir. Bu bölgedeki yıllık ortalama rüzgar hızı 6 m/h değerindedir (9 m yükseklikteki rüzgar hızı referans verilmiştir). İki yıl boyunca bu bölgedeki rüzgar enerjisi potansiyeli, kurulan rüzgar türbini-jeneratör grubu vasıtasıyla gelecekte bir enerji kaynağı olup olmayacağı konusunda test edildi (Gipe, 1995).

Türbin, ticari amaçlı güç üretiminde kullanılan büyük boyutlu ilk tiptir. Eğer bol miktarda üretilirse yani seri üretime geçilirse, tek bir türbinin maliyetinin 2 milyon \$ civarında olacağı umulmaktadır.

Washington, Goldendale'de üçgensel formda 460 ile 910 (m) lik mesafelerle üç adet rüzgar türbini-jeneratör grubu inşa edilmiştir. Bu şekil düzenlemedeki amaç her bir türbinde meydana gelecek hava türbülansından doğan etkinin diğer iki türbini de etkilemesini sağlamaktır. Bu türbinlerin rotorları, rotor yönünden esen rüzgarın akışına mani olmayacak şekilde çalışmaktadır. Her iki kanada uygulanan adım kontrolü ile rotorun sabit bir hızda dönmesi sağlanır. Kanatlar eksenleri etrafında 30°'lik açı altında hareket edebilmektedir.

Yatay eksenli rüzgar türbinlerine ilaveten diğer tip rüzgar türbinleri de özellikle düşey eksenli rüzgar türbinlerinin tasarımı ve konstrüksiyonu da gerçekleştirilmektedir. En basit düşey eksenli türbin , Darrieus tipidir.

Sandia laboratuvarlarında Darrieus tip rotora sahip düşey eksenli rüzgar türbini test edilmiştir. Rotorun yüksekliği 19 (m) ve çapı 17 (m) uzunluğundadır. Türbin-jeneratör grubu 13 m/s 'lik rüzgar hızında 60 kW değerinde güç, 10 m/s 'lik rüzgar hızında 30 (kW) değerinde güç üretebilmektedir. Üretilen elektriğin frekansı 60 (Hz)'lik alternatif akıştır ve enterkonnekte şebekeye bağlantısı yapıldığında, türbin-jeneratör grubunun hızı değiştirilerek frekans kontrolü sağlanır (Gipe, 1995).

Darrieus tip rotorda yön tayinine gerek yoktur. Bu nedenle rotor kendi kendine devreye giremez. Rüzgar hızı ne olursa olsun, bu rotor kendi kendine çalışma devri olan 15 (d/d) 'lık hızdan ideal çalışma hızına yardım edilmeksizin ulaşamaz. Bu

nedenle Darrieus tip rotorun düşey eksenli milinin alt ve üst kısmı ilk hareket düzeneği ile donatılmıştır .

Darrieus tipi rotor döndüğü zaman kanadın simetrik airfoil kısmındaki hücum açısı sürekli olarak değişir. Hücum açısındaki bu değişiklik sonucunda, rotorun her bir turunda kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin şiddetlerinde belirgin bir değişiklik gözlenir. Çünkü kaldırma kuvveti baskındır, rotor dış kuvvetlere karşı dönebilir ve bir dönüşüm veriminde fonksiyonudur. 6 civarında hız oranında, Darrieus tipi rotor için maksimum güç katsayısı 0,35 değerindedir.

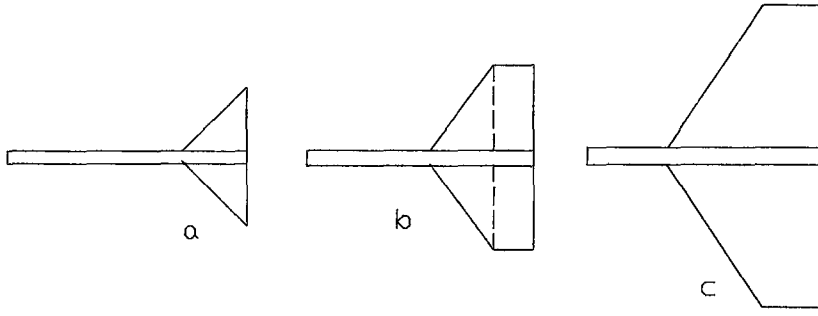
Konutlarda kullanmak amacıyla düşük kapasiteli, küçük yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri inşa edilmiş ve fizibiliteleri yaptırılmıştır. Başarılı olabilmek için rüzgar türbini-jeneratör grubu düşük fiyatlı ve kullanım kolaylığı olmalıdır. En büyük problem enerjinin depolanması problemidir, ufak bir rüzgar türbini-jeneratör grubundan enerji sağlanımı, lokal şebekeden elektrik enerjisinin sağlanmasına benzer şekilde olmalıdır. Bu çeşit modelde, rüzgar hızındaki değişikliklere göre otomatik olarak kontrol dışıysa jeneratör devreye sokulabilmeli ve çıkarılabilmelidir. Aşırı ısınmadan koruyucu termal kesiciyle donatılmış bir elektrikli su ısıtıcısına çok pahalı olmayan bir rüzgar türbini-jeneratör grubu bağlanmıştır.

Ufak bir rüzgar türbini -jeneratör grubunun yerleştirilmesinde bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Deniz seviyesi yakınlarında esen düzensiz rüzgarlar rotorda rahatsızlıklara veya tektük arızalara sebep olur ve sonuçta da türbinin dönüşüm verimi çok bozular.

2.11 Rüzgar Türbininin Elemanları

2.11.1 Kılavuz Kuyruk

Rotorun rüzgara yönelmesi kılavuz (yönlendirici) kuyruk vasıtasıyla sağlanır. Çeşitli tipte kuyruk biçimleri şekil 2.11.1'de gösterilmiştir.



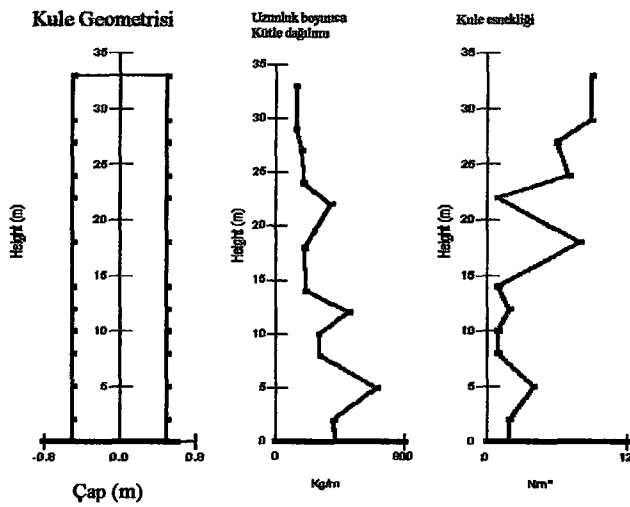
Şekil 2.11.1 : Kuyruk Şekilleri

(c deki kuyruk yüzeyi en kullanışlı olanıdır.)

2.11.2 Platform Ve Kule

Sistemin ve yönlendirici kuyruğun bağlanacağı platform, kule ekseni etrafında dönebilecek şekilde tasarım edilmelidir. 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. Şekil 2.11.2 a-b-c lerde ideal bir kuleye ait kule yüksekliği ile değişen taban alanı, küle ağırlığı ve kule esneme katsayıları verilmiştir (Bossanyi, 1999).

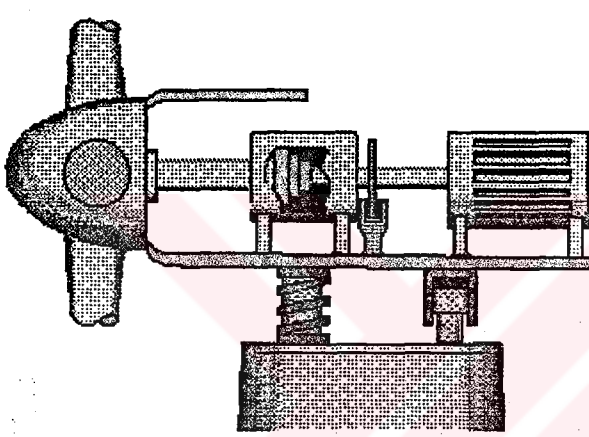


Şekil 2.11.2.a-b-c Kule geometrisi (Bossanyi, 1999)

2.11.3 Yataklar Ve Jeneratör

Çevirici olarak doğru akımı 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. Şekil 2.11.3 de yataklanmış ve titreşimleri sönümlenmiş bir türbin jeneratör kesiti görülmektedir (Bossanyi, 1999).



Şekil 2.11.3 Türbin Jeneratör Kesiti (Bossanyi, 1999)

2.11.4 Kule Tasarımı

Köşebent profilli çelik kuleler en çok kullanılan en yaygın kule tipidir. Çünkü bu tip konstrüksiyon kolaylıkla inşa edilebilmektedir. Silindirik formlu kulelerde 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. Kule maliyeti rüzgar türbini projesinin kuruluş maliyetini etkiler. Böylece kW başına maliyet artar. Kule maliyeti toplam tesis maliyetinin % 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 dirençle kulenin yükselmesi sağlanabilmektedir.

2.11.5 Mekanizma Odası

Büyük rüzgar türbinlerinde değişken adımlı kanatlar vardır. Mekanik dişli ve dişli kutuları mafsallar harekete geçiriciler ve birçokları mekanizma odası içinde bulunur.

Sabit mekanizma odasının düşük hıza sahip şaftlı sistemlerde rijitlik sağlandığı 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 edilemez.

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

Adım kontrolü genellikle hidrolik sistemlerle sağlanmaktadır.

2.12 Kontrol Sistemleri

2.12.1 Kontrol Sistemi

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

Bu çeşitli şekillerde gerçekleştirilir.

a) Rüzgar türbininin rotorunu, hakim rüzgar yönüne çeviren sistemdir. Bu sisteme bağlanacak bir yayla sağlanabilir.

b) Kanat açılarını değiştirmek veya döndürmek

c) Frenleme yöntemi en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Mekanik hidrolik vs.

2.12.2 Esneme Kontrolü

Çapı 4.5 (m)'ye kadar olan rotorlarda esneme kontrolü (rüzgar içinde rotorun otomatik olarak yön bulması) yönlendirici kuyruk ile sağlanır (Cerit, 1999). Bazı

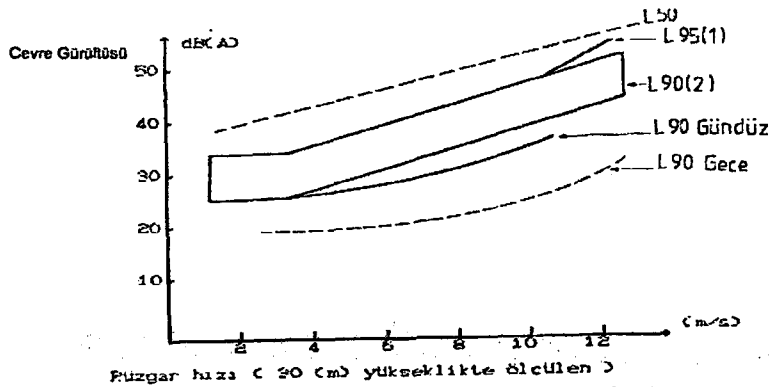
modellerde rotor rüzgarı arkasına alır ve döndürme momenti üreten rotorlarda sürüklemeye bağımlı olmaktadır.

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

Kanatlar ister yükte, ister boşa çalışsın her zaman esneme kontrolü yapılmalıdır. Rüzgar içindeki rotorda müsaade edilebilir esneklik $\pm 12^0$ sınır değerleri arasında olmalıdır (Cerit,1999).

2.12.3 Rüzgar Türbini Çiftliklerinde Gürültü Kontrolü

Çevremizdeki Gürültü Seviyeleri: Rüzgar ağaçlardan, çalıklardan, 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 ya da endüstriyel bölgelerin her zaman var olan gürültü seviyeleri aynı olmaz. Çevremizde var olan bu gürültülerin seviyelerini daha iyi kavrayabilmek için problemin boyutunu açıklamak gerekir. Şehirlerde ya da kasaba gibi daha ufak yerleşim bölgelerinde yaşayan insanlar, kırsal kesimlere has sessizliği genellikle bulamazlar.



Şekil 2.12.1 Her zaman var olan gürültü seviyeleri (Sayındı, 1994)

Şekil 2.12.1 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 şekil edilmiştir.

Gece vakti, 5 (m/s)'lik değere sahip rüzgar hızında çevrede 20-25 dB'lık L90s son derece düşük seviyeli gürültü oluşur. 11 (m/s)'lik rüzgar hızında bu değer 20-35 dB'ya yükselir. Gündüz vakti, 5 (m/s)'lik rüzgar hızında gürültü seviyesinde 20-32 dB yükselme eğilimi görülür. 11(m/s)'lik rüzgar hızında ise bu değer 29-45 dB arasında olur (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 araçlardan gelmektedir. Bunların bazıları dişli kutusu, frenler ve jeneratördür. Kanatların dönmesinden dolayı da aerodinamik gürültü meydana gelir.

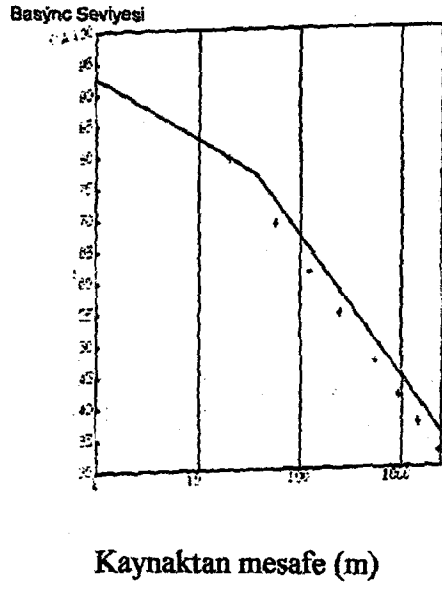
Aerodinamik Gürültü: Rüzgar türbinlerinde aerodinamik gürültülere neden olan unsur vardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- 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.

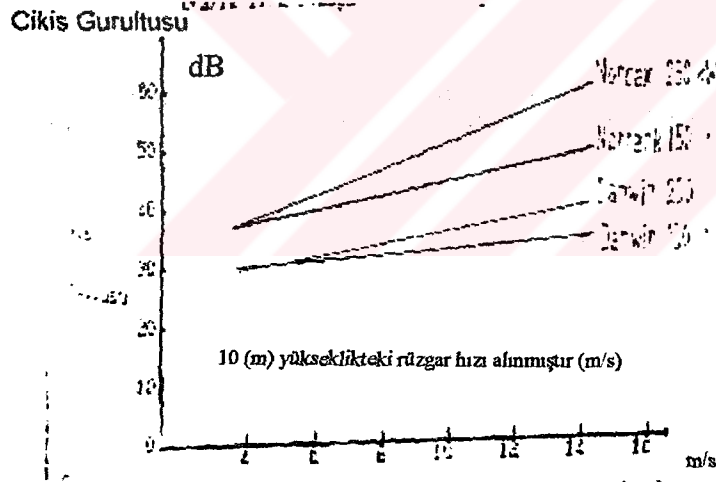
Mekaniksel Gürültü: Dişli kutusundan, elektrikli cihazlardan hidrolik sistemlerden ve diğer mekanik parçalardan ortaya çıkan gürültü genellikle, 50 Hz ile 5000 Hz' lik frekanslar arasında meydana gelmektedir. Mekaniksel gürültüleri bir takış özel aletler kullanarak azaltabiliriz. Türbin dairesinde akustik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

Mesafe ile Zayıflama: Şekil 2.12.2 ile ses enerjisinde, küresel yayılma sırasında mesafe ile orantılı meydana gelen zayıflama grafiği verilmiştir (Sayındı,1994). 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 bir (dB) artar. 10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı referans alınarak, çeşitli rüzgar türbinlerinden 400 (m) uzakta meydana gelen gürültü seviyeleri Şekil 2.12.3'te gösterilmiştir (Sayındı, 1994). Üç araştırmacının tahminine göre Danwin'in rüzgar türbini en sessiz çalışandır. 10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı (6 (m/s)) referans alındığında 400 (m) mesafede gürültü seviyesi yaklaşık 30 (dB) civarında çıkmıştır.

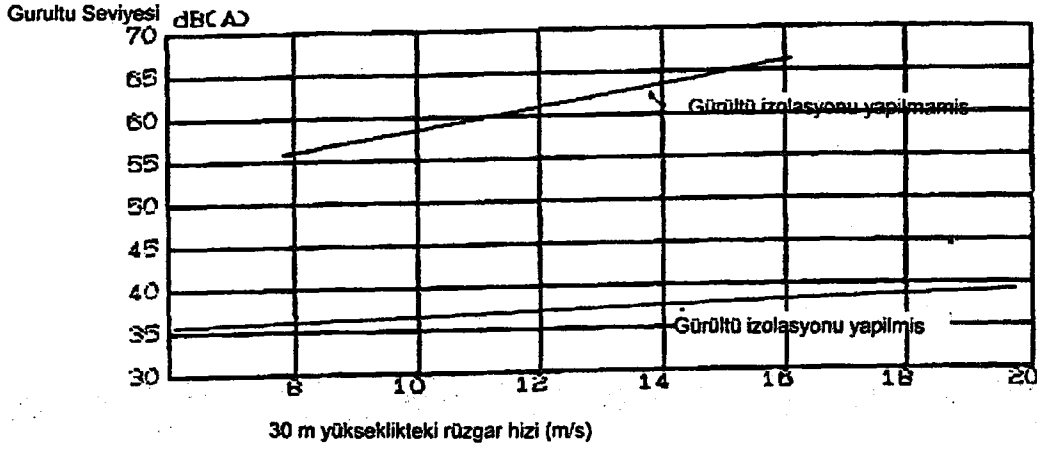


Şekil 2.12.2 Rüzgar türbininde gürültü(Sayındı, 1994)



Şekil 2.12.3 Rüzgar türbinini çıkış gürültüleri (Sayındı, 1994)

Şekil 2.12.4'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.



Şekil 2.12.4 İzole edilmiş ve edilmemiş rüzgar türbini gürültü seviyeleri (Sayındı, 1994)

Kırsal Kesimde Gürültü Regülasyonu Tablo 2.12.1 bazı ülkelerde şu anda faaliyet gösteren spesifik regülasyonlarla ilgili sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2.12.1 Rüzgar türbini gürültü regülasyonu (Gipe, 1995)

Avrupa	Maksimum Gürültü dB (A)
Danimarka	
Kırsal Kesimdeki yerleşim Bölgesi	45
Oturmaya Elverişli yerler	40
Rüzgar Türbininden 400 (m) uzakta	45

Bu tablo, rüzgar türbini çiftliklerinin bulunduğu bölgelerde rüzgar türbinlerinde oluşan müsaade edilebilir gürültü seviyelerinin değerlerindeki değişimleri göstermektedir.

Yukarıda bahsedilen ülkelerin bazılarında var olan çevrelere ait gürültü seviyeleri, İngiliz'lerin daha önce kabul ettikleri değerlerden çok daha yukarı idi. Örneğin California'da 8 (m/s)'lik rüzgar hızında L90'da 43 dB(A)'lık gürültü seviyesi oluşmaktadır. Gipe (1995)' in notlarına göre Hollanda, Almanya ve Amerika Birleşik Devleti'ndeki türbin testlerinde yaydıkları gürültü seviyeleri Panish datalarından 10 dB(A) daha büyüktür.

Burada her bölgedeki toprağın çeşidi ve büyüklüğü önemlidir. Cornwall ve West Wales ufak vadileri ve engebeli araziye sahip tepeleri olan birer bölgedirler. Sonuç olarak rüzgar, vadilerin uç kesimlerine ulaşamaz. Aynı anda tepelerde yüksek, vadilerde de düşük seviyelerde gürültüler çevreye yayılır.

Tablo 2.12.2'de Taylor ve Rand (Taylor, D and Rand. M Planning for wind energy in Dyfed 1990) ile Capel Cynon ve Cold Shartcott (Central Electricity Generating Board, Proposed Capel Whon windpark and environmental statement, 1989) tarafından verilen çevreyle ilgili gürültü standartları verilmiştir.

Tablo 2.12.2 Önerilen Gürültü Standardı (Gipe, 1995)

Taylor ve Rand	Maksimum Gürültü Seviyesi dB(A)
Kırsal kesimlerdeki yerleşim bölgeleri	45
Oturmaya elverişli yerler	40
Rüzgar türbininden 400 (m) uzakta	45
Bunların çok yakınında	50

Konutların yakınlarına (L50 modeli) kurulan türbinlerde çevreye yaydıkları gürültüler 5 (m/s)lik rüzgar hızında 5 dB (A)'yı aşmaması gerekmektedir.

Uygun Mevki Seçimi: Konutlardan yeteri kadar uzak olan bölgelere, rüzgar çiftlikleri kurularak gürültü problemi çözülebilir. Tablo 2.12.3'te Batı Wales ile Güney Wales bölgelerinde uygun rüzgar çiftliği kurulabilecek yerlerin sayısı verilmiştir.

Tablo 2.12.3 Rüzgar çiftliği kurulabilecek bölgelerin, yerleşim bölgelerine olan uzaklıklarına göre analizi (Gipe, 1995)

Yerleşim Bölgesine Olan Uzaklık (m)	Rüzgar Çiftliği Olabilecek yerlerin Sayısı	
	Batı Wales	Cornwall
0-200	Bulunamadı	347
201-300	“	564
301-400	437	324
401-500	21	174
501-600	11	60
701-999	5	1
1000-yukarısı	8	0
Toplam	559	1511

Not: 150-200 (kW) güç kapasitesine sahip rüzgar türbinleri için yöre analizi yapılmıştır.

Bu analiz göstermektedir ki eğer minimum mesafe 400 (m)'den daha fazla ise rüzgar hızının yüksek olduğu yöre sayısında büyük bir kayıp olmaktadır. Dyfed'de, rüzgar çiftliği kurmaya elverişli yörelerin % 95'i rüzgar türbinlerinin yarattığı gürültü yüzünden kullanmaya elverişli değildir, Cornwall'da ise bu değer % 80 civarındadır.

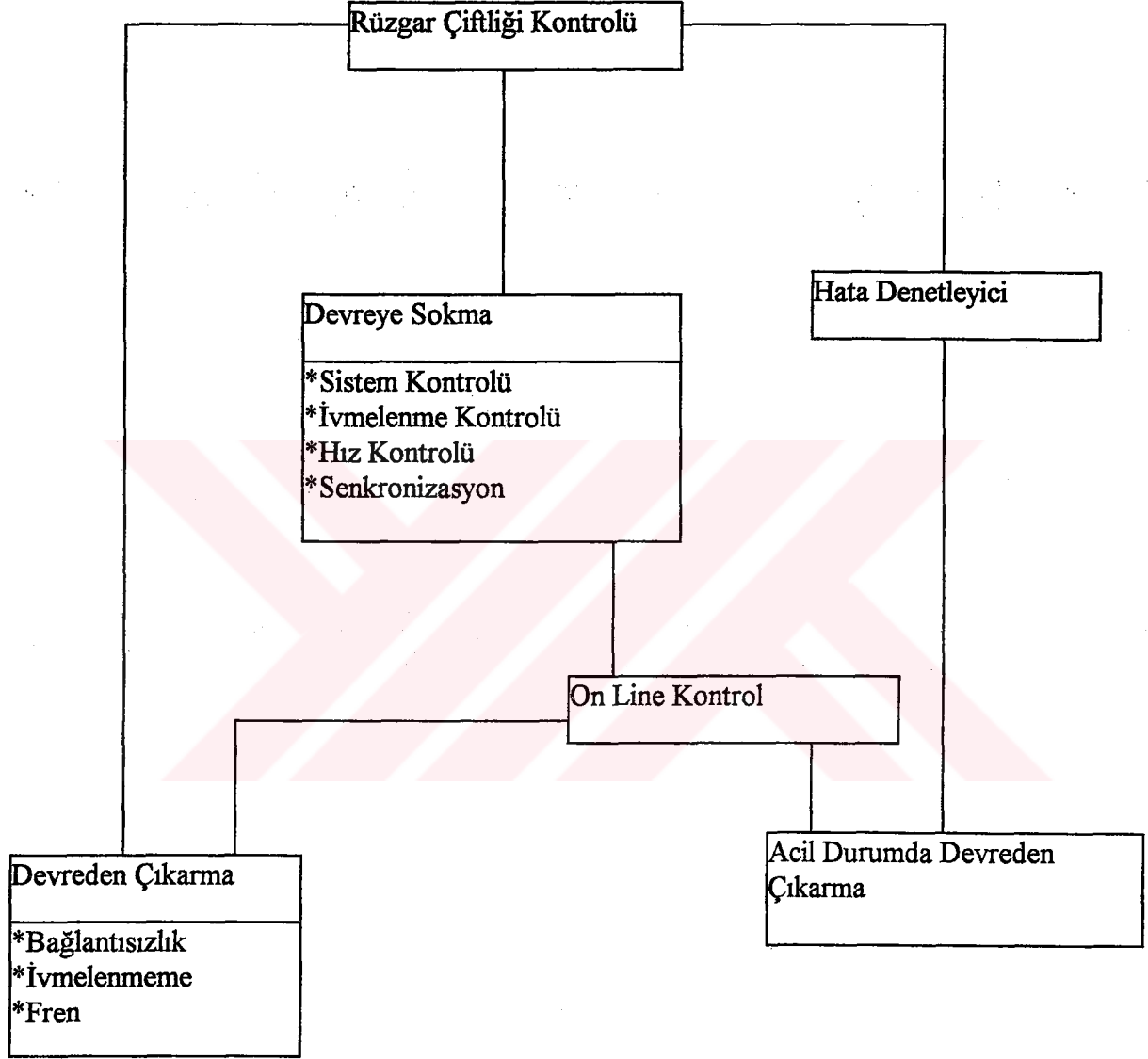
Dyfed'de, rüzgardan elde edilebilecek güç potansiyeli yaklaşık 2 (GW) civarındadır ama rüzgar çiftliği kurmaya elverişli bölgelerin % 95'i gürültü problemi yüzünden kullanmaya elverişli değildir. Bu taktirde ise rüzgardan elde edilebilecek potansiyel güç 100 (m/s) civarında olacaktır.

2.13 Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemleri Ve Bunların Uygulamaları

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

2.13.1 Kontrol Sistemleri ve Rüzgar Türbinleri

Tipik bir rüzgar türbini birçok sayıda kontrol sisteminin girişi altında çalışır. Şekil 2.13.1'de kontrol devresinin şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.13.1 Kontrol devresinin akış şeması (Sayındı, 1994)

2.13.2 Rüzgar Türbini Çiftliği Kontrol Sistemleri

Rüzgar çiftliklerindeki kontrol işleminde 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 sahasında olmalıdır. Bölgesel şartlara göre her bir rüzgar türbinine yeni bir seçim verilebilir. İyi bir performans sağlayabilmek için rüzgar türbini çiftliklerinden maksimum enerji elde edilmelidir. Ve rüzgar türbinine gelen yükler (kuvvetler) azaltılmalıdır.

2.13.3 Rüzgar Türbini Kontrol Sistemleri

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

a)Kapalı Devre TV Sistemi ile 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 görülmelidir.

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 türbinini şebeke frekansına ulaştığı zaman güç regülasyon devresi sistemi kontrol etmeye başlar.

Rüzgar türbini otomatik olarak ya rüzgar çiftliği kontrol sahasından gelen bir sinyalle ya da acil anlarda kendi kendine devreden çıkar. Kontrol ünitesi rüzgar türbininin şebekeyle olan bağlantısını keser ve negatif ivmelenmeye bırakır. Sistem devreden çıktığında rotor kendi ağırlığından dolayı yavaşlamaya başlar.

2.13.3.1 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. Adım kontrollü rüzgar türbinlerinde, kanat Adım açısı otomatik ayarlanır. Böylece efektif rotor verimi değiştirilerek güç üretilir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde muhtemelen Adım açısıyla bağlantılı olarak jeneratör momentinin ve rotor hızının kontrolüne müsaade edilir. Böylece rotor gücü üretilmiş olur.

2.13.3.2 Komponent (Eleman) Kontrol Sistemleri

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

2.13.3.4 Feedback (Geri Bildirim) Kontrolü

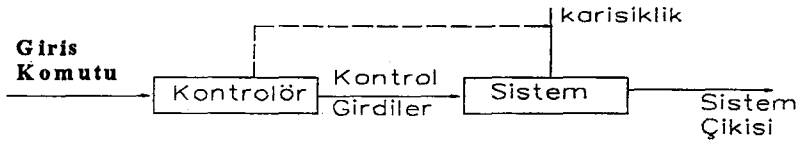
Sayındı (1994)' ya göre kontrol kavramındaki gerçek, sistemin dinamiksel biçiminin anlaşılmasıdır. Bir sistem girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkileri düzenler. Teknik, biyoloji ve sosyoloji ile ilgili spektrumlar arasından örnekler bulunabilir. Ekonomik yöntemler hayvanların biyolojik fonksiyonları ve endüstriyel seslerdeki karmaşıklık birer örnektir. Karakteristik özellik, bir sistemin 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 ya da frekansa bağımlı olarak ifade edilir.

Kontrol değimi, bir sistemin davranışlarından arzu edilir kontrollerin elde edilmesi anlamını gelir. Bu genellikle sistemin çeşitli koşullara tepki göstermesi olarak tanımlanabilir. Komuta sinyalleriyle girdileri önceden tayin edilmesi ve/veya diğer sinyallerin kabul edilmemesi ya da sinyallerde karışıklık oluşması ile yorumlanabilir.

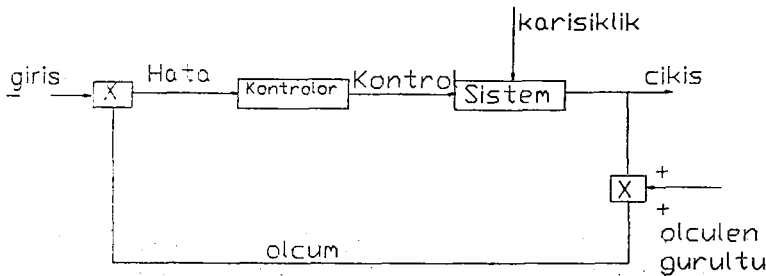
Eğer bir sistemin dinamik davranışlarından meydana getirilen modelde, hem sonsuz bir kesinlik elde edilebilirse hem de girdilerdeki tüm değerler ölçülebilseydi sistem davranışları açık devre kontrol sistemleriyle hesaplanabilirdi.

Karışıklık olduğunda ve komuta sinyalleri bilindiği zaman şekil 2.13.2'deki model kullanılarak proses çıktıları tahmin edilebilir. Bir girdi kontrol sinyali ile bu girdiler telafi edilebilir.



Şekil 2.13.2: Açık devre kontrol sistemi

Pratikte mükemmel bir model yoktur. Sistemlerin büyük bir çoğunluğunda çok karmaşık prosesler basitleştirilebilir. Çok karmaşık sinyaller daima ölçülemez, en pratik kontrol stratejisi, değerler arası farklardan doğan hata sinyallerini kontrol etmektir. Şekil 2.13.3'te Feedback (geri bildirim) kontrolü ile ilgili şema verilmiştir.



Şekil 2.13.3 Kapalı devre kontrol sistemi

i)Geri bildirim kontrolünde iki önemli husus vardır. Bunlardan ilki sistemin dinamiksel etkilerinin tespit edilmesi ikinci ise referans girdileri ve dış etkenlerden kaynaklanan tüm etkilerinin tespit edilmesidir.

a)Kontrol yoluyla dinamiksel etkilerin sınırlandırılması

b)Yabancı Sinyallerin yarattığı etkilerin kontrolü

ii)Sistem çıkışı, gürültü etkilerini ölçüp verebilecek bir yapıya sahiptir.

Genelde proses ve kontrol merkezinde meydana gelen ürünler 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 çeşitlerinin 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.

iii)İyi Bir Kontrol ve Rüzgar Türbinleri

Orta ve büyük kapasiteli rüzgar türbinlerinde Adım 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 alınmalıdır. 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. Rüzgarı 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 edilmemektedir. 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 ya da artmaya sebep olur. Kontrol sisteminin seçimindeki gaye sadece düzgün bir yüklenme ile 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 bağlı olmaktadır.

Kontrol sisteminin amaçları aşağıda sıralanmıştır.

- Rüzgar türbinine etki eden geçici yükler hafifletilerek gerilmeler azaltılmalıdır.
- Ayarlı ve dengeli güç üretilmelidir.

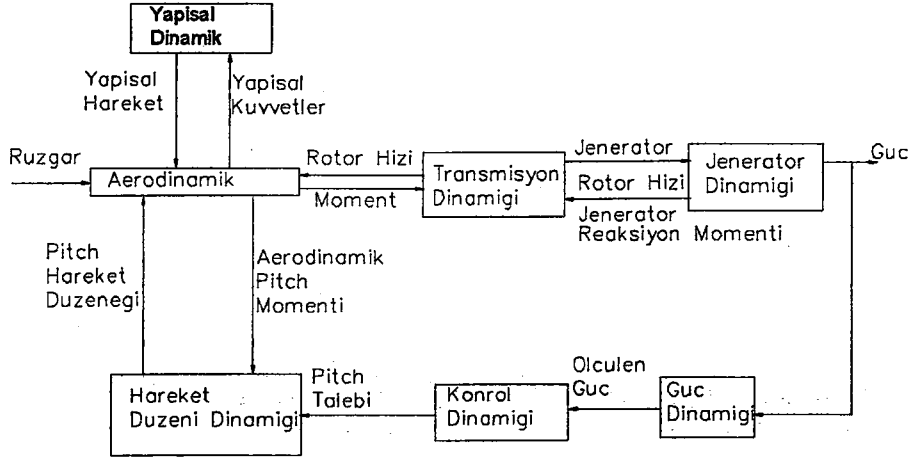
- Dinamiksel açıdan rotor, uygun bir performans değerini elde edebilecek şekilde olmalıdır.
- Enerji kaybı minimuma indirilmelidir.

2.13.3.3 Rüzgar Türbinlerinde Feedback (Geri Bildirim) Kontrolü İle 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 konulara daha fazla önem gösterilmektedir. Dinamiksel açıdan sistemin modellenmesi yapılmalıdır. En önemli alt sistemler aşağıda sıralanmıştır.

- Rüzgarın yapısı
- Aerodinamik
- Yapısal dinamik
- Transmisyon dinamiği
- Jeneratör dinamiği
- Ölçme dinamiği
- Kontrol merkezleri

Hareket düzeneği ile ilgili dinamik



Şekil 2.13.4 Rüzgar türbini dinamiği (Sayındı, 1994)

Alt sistemler ve bunların birbirleriyle olan bağlantıları şekil 2.13.4'te verilmiştir.

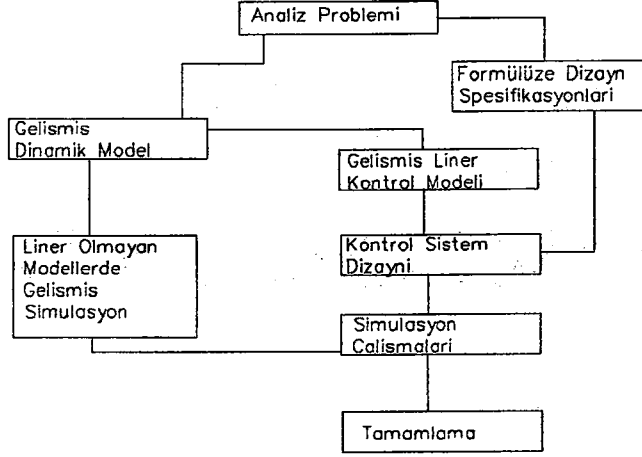
Kontrol sisteminin tasarımı, sistem modeline dayandırılır. Bir kontrol merkezinin üretilmesinde tasarım metodolojisinin seçimi performans özelliklerini garanti altında tutabilecek en basit kontrolörlerin bulundurulmasını zorunlu kılmaktadır. Buna tasarımcıların deneyimleri de büyük ölçüde yol göstermektedir.

2.13.4 Kontrol Sistemi Tasarımı

Kontrol sistemlerindeki tasarım proseslerinin geliştirilerek ifade edilmesi faydalıdır.

Şekil 2.13.5'da verilen akış diagramı ile tasarım prosedürü tanımlanabilir. Tasarım problemleri nedeniyle edinilen deneyimler ve konu ile ilgili yeni bulgulara dayanılarak tasarımlar geliştirilebilir. Prosesin tamamı pek çok kere tekrar edilmektedir. İlk adımda problemler belirlenmeli ve analiz edilmelidir. Rüzgar türbinlerinde kontrol sistemlerinin gerçekten ne çeşit gereksinimlere ihtiyaç olduğu belirlenmelidir. İşe yarar kontrol ile ifade 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 dayanılarak deneme niteliğinde tasarım özellikleri formüle edilebilir. kontrol probleminin analizinde, sistem dinamiğinin anlaşılması şarttır. Sistem davranışlarının matematiksel modellenmesi ile formülize

edilebilir. Gerçek bilgilerden faydalanılarak bu modellerden lineer olmayan bir model simülasyonu geliştirilebilir.



Şekil 2.13.5 Kontrol sistemi tasarım problemi (Sayındı, 1994)

Lineer olmayan modeller basitleştirilebilir. Yalnız çok önemli olan dinamik göz ardı edilmemelidir. Burada en önemli nokta genel kompleks sistemle enterkonnekte edildiğinde balans sağlanmalıdır. Modelin herhangi bir anında modeller arasındaki karışıklık bağıl 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 (Sayındı, 1994). Bunların en popüler olanları ise klasik ve optik metottur. Klasik kontrol metodunda kontrol merkezlerinin ve açık devre kombinasyonlu proseslerin çıktılarının frekansları önemlidir. Şekil prosedürü frekans alanı içindeki üç bölgede cisimlerin iyi şartlar altında olmasını sağlar. İlk olarak alçak frekanslı davranışlar gücün performans seviyelerinin elde edilmesini sağlar. İkinci olarak giriş frekansı civarlarındaki orta frekans bölgesi faz eğrilerinin 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 adım 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 ya da yeni kavramların ışığı altında bir önceki safhaya yeniden dönülmesi gerekir.



3.MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

3.1.1 Araştırma Yeri ve Araştırmada Kullanılan Rüzgar Türbini Modelinin Teknik Özellikleri

Araştırmada S.D.Ü Mühendislik Fakültesi Makina Bölümün'de bulunan model rüzgar tüneline faydalanılarak tasarlanan Savonius rüzgar türbini kullanılmıştır. Polyester katkıli kompozit malzemeden tasarım edilen model tek katlı Savonius türbini deneylerde kullanılmıştır. Savonius türbinleri, rüzgar hızları düşük olan yöreler için küçük güçlerde elektrik elde edebilmek için kullanılan türbinlerdir. Araştırmanın amacı, Savonius rüzgar türbininin rüzgar alan yüzeyinin ön kısmına lüle yerleştirilerek kanatlara çarpan rüzgar hızını artırarak, elde edilebilecek enerji miktarını düşük hızlarda artırmaktır.

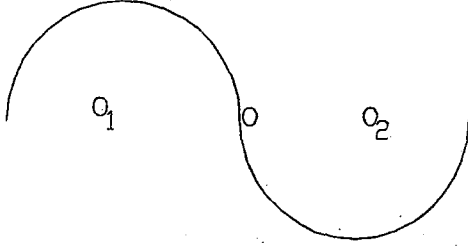
3.1.1.1 Savonius Türbinin Genel Özellikleri

Savonius rüzgar türbini adını keşfeden kişi Sagurd Savonius'dan almaktadır. İki yatay disk arasına disk arasına yerleştirilmiş, kanat adı verilen iki yarım silindirik yüzeyden oluşur. Savonius türbinleri tek yada çok katlı olabilir. Çok katlı türbinlerde kanat bir alttakine göre kaydırılır. İki katlı ise kaydırma oranı 90° ; üç katlı türbinlerde 60° dir.

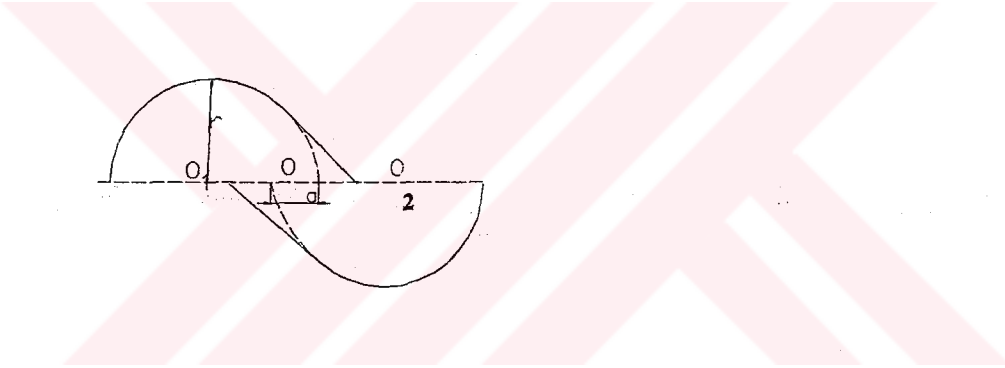
Savonius rotorun aerodinamik verimi yatay eksenler (pervane) ve Darriues rotorlarına göre daha düşüktür, yapımı kolay olduğundan ve başlangıç moment performansı iyi olduğunda düşük hızlarda tercih edilir. Dolayısıyla bu türbinler her zaman güncelliğini korumakta ve yeni kanat tasarımlarıyla performansı artırılmış Savonius türbinleri günümüzde sıkça kullanılmaktadır.

Şekil 3.1.1 de klasik bir Savonius rotoru görülmektedir. Klasik Savonius rotorun '0' noktası civarında oluşan girdaplar, rotorun enerji dönüşümü için bir dezavantaj olmaktadır. Bu yüzden merkezler birbirinden ya uzaklaştırılır, yada yaklaştırılır. Merkezlerin birbirinden uzaklaştırılması bir kanadın dış yüzeyine gelen akış ile diğer kanadın iç yüzeyine gelen akış, diğer girdapların yok edilmesine rağmen sorun yaratır. Girdapları yok edebilmek için merkezleri birbirine yaklaştırarak kanatların merkez

noktası civarında yüzeylerinin doğrusallaştırılmasıdır. Pratikte Savonius kanatları Şekil 3.1.2 deki gibidir.



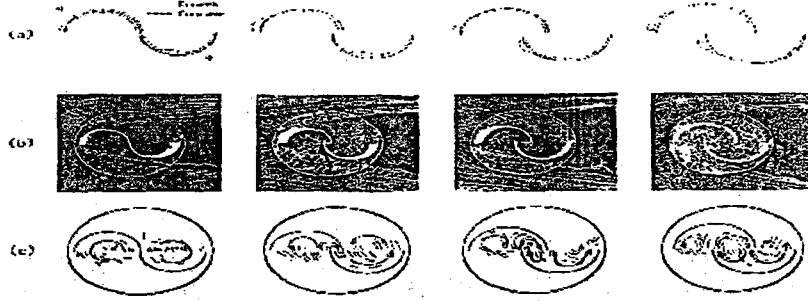
Şekil 3.1.1 Klasik Savonius Rotor Kesiti



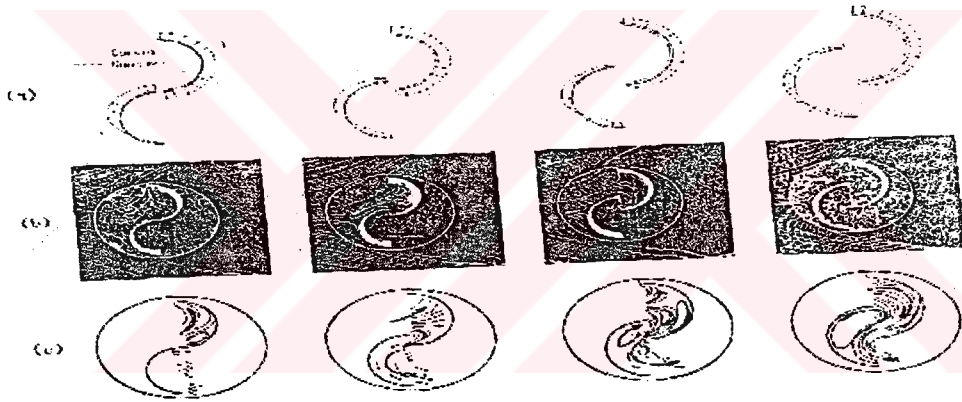
Şekil 3.1.2 Pratikte En Çok Kullanılan Savonius Rotor Kesiti

Kanatların birbirlerine ne kadar yaklaştırılması gerektiğini saptamak için yapılan çalışmalar sonucunda kaydırma oranı $G=a/(2r)$ optimum değer olarak bulunmuştur (Kolaçan, 1995).

Bu amaçla Duman-Tel metodu ile duran bir Savonius rotoru etrafındaki akış farklı kaydırma oranları için ve farklı kaydırma konumlarda saptanmıştır. Şekil 3.1.3 de ve Şekil 3.1.4 de bu resimler görülmektedir.



Şekil 3.1.3 Duran Savonius Rotorunun Basınç Dağılımı ve Akış Alanı ($\beta=0^\circ$, $X=0$) (a) basınç dağılımı (b) dış akış filmi (c) rotor iç akış (Kolaçan, 1995)



Şekil 3.1.4 Duran Savonius Rotorunun Basınç Dağılımı ve Akış Alanı ($\beta=90^\circ$, $X=0$) (a) basınç dağılımı (b) dış akış filmi (c) rotor iç akış (Kolaçan, 1995)

Şekil 3.1.3 ve Şekil 3.1.4' kaydırma oranları sağdan sola doğru; 0, 0.15, 0.3, 0.5'tir.

Her iki Şekilde de uç-hız oranı $X (=0.5 dW/V)$ sıfır olarak alınmıştır.

Sonuç olarak kaydırma oranı;

Rotorun Statik moment performansı merkezlerin kaydırılması sonucu geliştirilmiştir.

Aerodinamik performansın en iyi olduğu kaydırma oranı 0.15'tir (Kolaçan, 1995).

3.1.1.1 Türbin Modelinin Teknik Özellikleri

Savonius türbinlerini dezavantajı verimlerinin düşük olması. Ancak diğer türbinlere nazaran aşağıdaki avantajlara sahiptir.

- Basit ve ucuz konstrüksiyon
- Her yönde rüzgarı kabul edebilme
- Yüksek başlama momenti
- Düşük devir sayısı

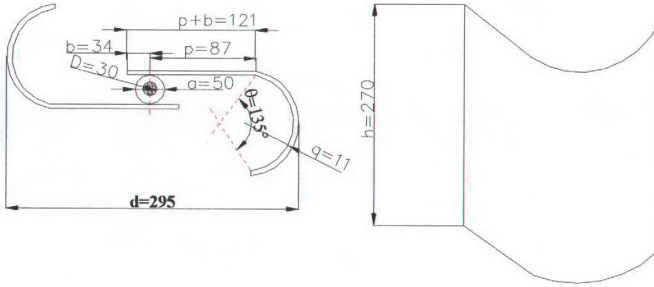
Bu üstünlükler küçük güç gereksinimi bulunan bazı uygulamalar için düşük verim dezavantajının üstesinden gelebilir.

Yurdumuzda ve özellikle ilimizde rüzgar hızı ortalaması 2 m/s civarında olduğu göz önüne alınırsa Savonius türbinlerinin kullanımı uygun görülebilir.

3.1.2 Kanat Geometrisi ve Parametreleri

Şekil 3.1.5 de araştırmada kullanılan kanadın boyutları verilmiştir. Buna göre kanatlarda;

a	: Kanatlar arası boşluk	50 mm
b	:Kanat Fazlalığı	34 mm
D	:Mil çapı	30 mm
d	:Rotor Çapı	295 mm
p+b	:Kanatdaki doğru bölüm uzunluğu	121 mm
q	:Kanatdaki eğri bölüm yarıçapı	11 mm
θ	:Kanatdaki eğri bölüm yay açısı	135°
h	:Kanat Yüksekliği	270 mm



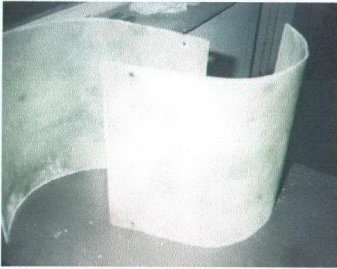
Şekil 3.1.5 Savonius Rotor Kanatları

Şekil 3.1.5 de verilen model Savonius kanatlarının özellikleri;

Rotor süpürme alanı	:0,2576 m ²
Dönme yönü	:Saatin ters yönü
Bağlantı	:Tezgah üstüne

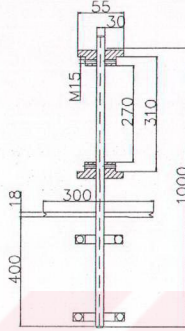
3.1.2.1 Kanatların İmali ve Kanat Bağlantıları

Kanatlar polyster katkılı kompozit malzemeden kalıp üzerine döküm yolu ile elde edilmiştir. Kalıplar tasarlanan ölçülere göre saç malzemeden bükülerek elde edilmiştir. Saç malzeme üzerine polyster katkılı kompozit malzeme dökülerek kanatlar elde edilmiştir. Şekil 3.1.6 da modelde kullanılan kanatlar gösterilmektedir.



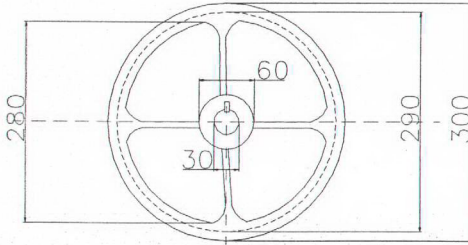
Şekil 3.1.6 Model Savonius Türbinin Kanatları

İmal edilen kanatlar bir mil üzerine monte edilmiştir. Araştırmada kullanılan mil Şekil 3.1.7 de gösterilmiştir. Mil 30 mm çapında çelik malzemeden imal edilmiştir.



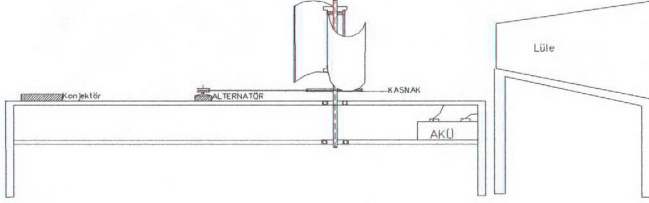
Şekil 3.1.7 Kanatların bağlandığı mil

Kanatlar M15 somunlarla milin alt ve üstündeki flanşlara bağlanmıştır. Kanat arası boşluklar, bağlantı civatalarının üzerinde kanatların ileri geri getirilmesiyle optimum boşluk ayarlanmıştır. Rüzgar hızından tahrik olarak dönen kanatlar flanşların altındaki 300 mm lik kasnağı döndürmekte, kasnakta bağlı olduğu alternatörü tahrik etmektedir. Şekil 3.1.8 de kullanılan kasnak gösterilmiştir.

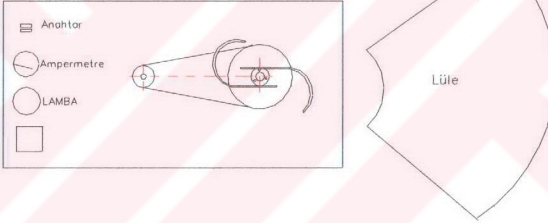


Şekil 3.1.8 Kasnak

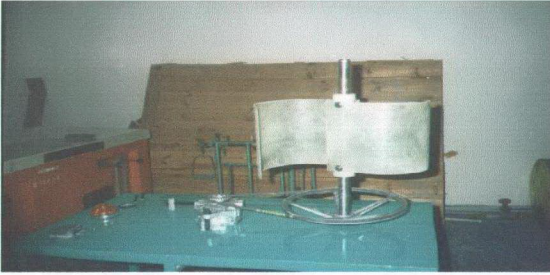
Mil tezgah gövdesine iki ayrı noktadan rulmanla yataklanmıştır. Şekil 3.1.9a-b ve Şekil 3.1.10 daki model türbin komple biçimde gösterilmiştir.



Şekil 3.1.9a Model Savonius türbinin yandan görünümü



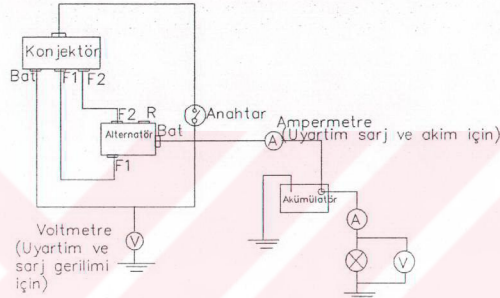
Şekil 3.1.9b Model Savonius türbinin üstten görünümü



Şekil 3.1.10 Model Savonius Rüzgar Türbini

3.1.3 Elektrik Bağlantıları

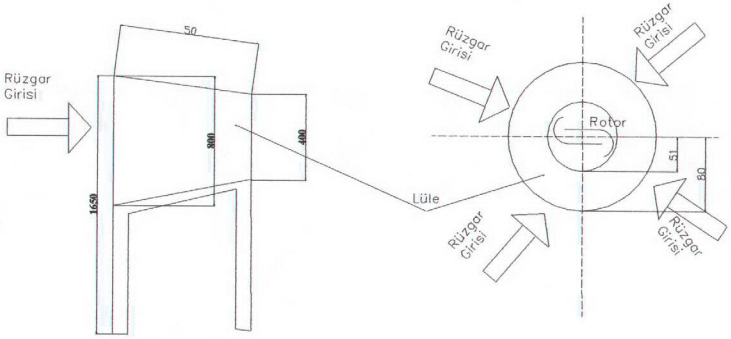
Araştırmada bir oto alternatörü kullanılmıştır. BOSH marka bir otomobil alternatörü tercih edilmiştir. 12 V bir elektrik üreten bu alternatörün avantajı düşük devirlerde (400 d/d) aküyü şarj etmeye başlamasıdır. Sistemde konjektör, 0-100 A ampermetre, 0-30 V voltmetre, 12V 45 Ah akü ve 12 V 20 W lık bir lamba kullanılmıştır. Sistemin elektrik bağlantı şeması Şekil 3.1.11 de verilmiştir.



Şekil 3.1.11 Elektrik bağlantı şeması

3.1.4 Lüle

Araştırmanın diğer çalışmalarından farklılığı rüzgar hızını artırabilmek için lüle kullanılmasıdır. Tasarlanan lüle 0.3 mm kalınlıktaki galvanizli saç malzemeden yapılmış olup, 1 m² giriş yüzey alanı, 0.32 m² çıkış yüzey alanına sahiptir. Lüle girişindeki rüzgar hızı ile çıkışındaki rüzgar hızı arasında yaklaşık 2.5-3 kat fark olduğu ölçülmüştür. Buda rüzgar hızının artmasını sağlamış dolayısıyla düşük hızda daha fazla devir elde edilebilmiştir. Elde edilebilecek gücün rüzgar hızının küpü ile orantılı olduğu göz önüne alınırsa lülenin faydası kaçınılmazdır.



Şekil 3.1.12 Lüle Konstrüksiyonu

Deneylerde tasarlanan lüenin dörtte bir parçası kullanıldı. Arazi şartlarında kullanılacak türbinlerde rüzgarın değişik yönlerden geleceği için lüle komple olarak kullanılmalıdır. Şekil 3.1.12 ve Şekil 3.1.13 de Lülenin şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.1.13 Lüenin Yapısı

3.1.5 Rüzgar Kaynağı ve Ölçümü

Araştırma laboratuvar şartlarında yapıldığı için model türbin Makina Laboratuvarında bulunan bir model rüzgar türbinden alınan rüzgarla test edilmiştir. Rüzgar tünelinin çıkışı önüne konan lüleden hızlanarak çıkan rüzgar kanatlara çarparak rotoru

döndürmektedir. Şekil 3.14 de araştırmada kullanılan rüzgar tüneli ve rotor görölmektedir.



Şekil 3.1.14 Rüzgar Tüneli

Kullanılan rüzgar tünelinin hava çıkış hızları çıkıştaki bir damperle ayarlanabildiği için istenen hızlarda çıkış hızı elde edilebilmektedir.

Lümenin girişinde ve çıkışındaki rüzgar hızları bir dijital anemometre ile ölçülmüştür.

Şekil 3.1.15 de araştırmada kullanılan dijital anemometre görölmektedir.



Şekil 3.1.15 Dijital Anemometre

Deneyleerde kullanılan dijital anemometre 0.3 m/s ile 40 m/s arasında rüzgar hızlarını maksimum %0.3 hata ile ölçebilen 3 saniye, 2-10-30 dakikalık ortalama rüzgar hızları ile anlık rüzgar hamlelerini gösteren bir anemometredir.

3.2 Metod

Araştırmada test edilen rüzgar türbini rüzgar tünelinin çıkışından alınan, ayarlanabilen rüzgar hızı ile tahrik edildi. İlk olarak lüle kullanılmadan kanatlar 2, 4, 6, 8 m/s rüzgar hızlarında rotor döndürüldü. Damper yardımıyla rüzgar tüneline çıkan hava hızları ayarlandı. Yaklaşık 10 dakika istenen sabit rüzgar hızını elde edebilmek için rotor boşta döndürüldü. Gereken sabit hızlar elde edildikten sonra kayış kaynak mekanizması devreye sokularak rotordan elde edilen devirler kayış vasıtasıyla alternatöre iletilti. Bu aşama gereken her rüzgar hızında tekrarlandı. Her hız değeri için kasnak dakikadaki kasnak devri, alternatör devri ve kanat ucunun devri(hızı) bir takometre ile ölçüldü. Kanat ucu hızı kanat devrinden hesaplandıktan sonra kanatlara vuran rüzgar hızına bölümünden kanatların uç hız oranları tespit edildi.

Alternatörün 400 d/d'dan sonra akü şarjına başlamasından dolayı lülesiz durumda 2-4 m/s rüzgar hızlarında ölçülebilecek bir güç çıktısı alınmadı. Ancak her rüzgar hızında ölçülen akış ve voltaj değerlerinden yaklaşık elde edilen güç hesaplanmıştır. Diğer hızlarda ise alternatör şarj etmeye başlamıştır.

Türbinde deneyler yapılmadan önce mekanik testler yapılmıştır. Yataklar, rulmanlar, alternatör ve elektrik devresi kontrol edilmiş ve sistemin rijitliği sağlandıktan sonra kanatlar monte edilerek testler yapılmıştır.

Kayış kasnak düzeneği sayesinde kasnaktan elde edilen devir kasnak kayıpları olduğu halde yaklaşık 3-4 kat aralığında alternatör devrine yansıdığı gözlenmiştir. Böylece alternatör için gerekli olan minimum devire (400d/d) düşük hızlarda ulaşılabilmiştir.

Lüle ile yapılan testlerde ise, rüzgar tüneli çıkışı ile rotor arasına lüle yerleştirilmiştir. Lülesiz olarak yapılan işlemler ve hızlar tekrarlanarak ölçümler alınmıştır. Lüle giriş hızı, lüle çıkış hızı, kanat-kasnak-alternatör devri, voltaj ve akış değerleri her test hızında ölçülerek performans değerlendirmesinde kullanılmıştır.

Araştırma sırasında görülmüştür ki; lülesiz olarak 5-6 m/s' de elde edilen devirler lleli düzenekte 2-3 m/s hızlarında elde edilmiştir.

Deney düzeneğinde bulunan lamba lülesiz halde 6 m/s hızında yanarken, lleli durumda 2 m/s hızında yanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

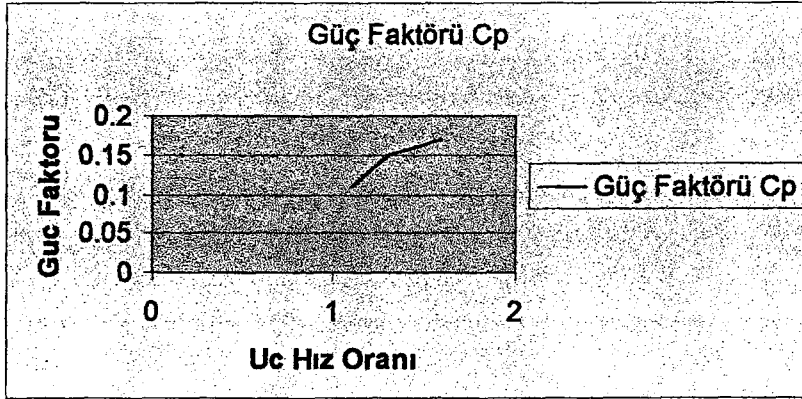
Model Savonius rüzgar türbinin güç faktörü diğer Savonius türbinlerde olduğu gibi maksimum %20 çıkmıştır. Rüzgar türbinlerinde maksimum verimim %59 (Betz Limit) olmasına karşın bu oran diğer tiplerdeki türbinler için oldukça düşük olduğu halde düşük hızlarda yüksek devirlere ulaşılabilmesi bir avantajdır.

Bu türbinlerde güç katsayısı ölçülen gücün teorik olarak elde edilebilecek güce oranından tespit edilir.

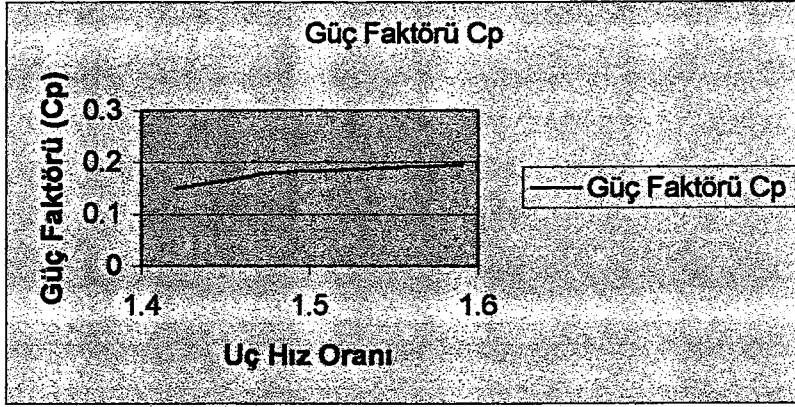
$$\text{GüçKatsayısı} = C_p = \frac{\text{Güç}}{1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A}$$

Deneylerde havanın yoğunluğu $\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmıştır. Gerçekte lüle içinde sıkışan havanın yoğunluğunun bir miktar artması gerekmektedir. Fakat bu değişkenliğin ölçülmesinin güçlüğü ve elde edilen güç üzerinde etkisinin az olmasından dolayı standart hava yoğunluğu kullanıldı. Hava yoğunluğunun artması, rüzgar hızının artması gibi güç eldesine pozitif bir katkısı olduğu bir gerçektir.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 Lülesiz ve lüleli durumlarda güç faktörünün uç hız oranı ile değişimi verilmiştir.

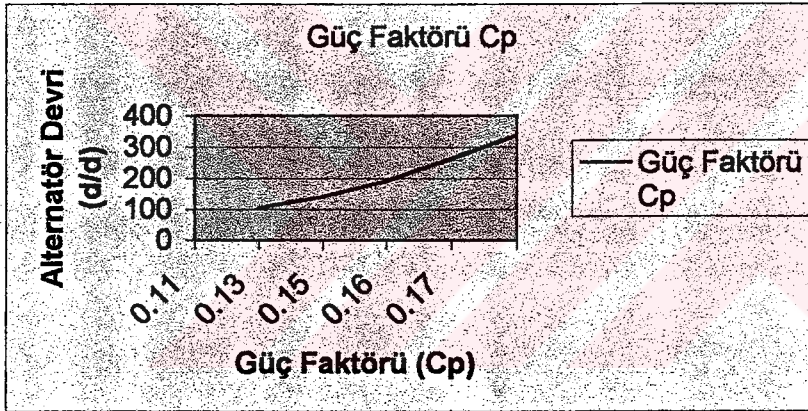


Şekil 4.1 Lülesiz Model Türbinde Güç Faktörü-Uç hız Oranı Değişimi

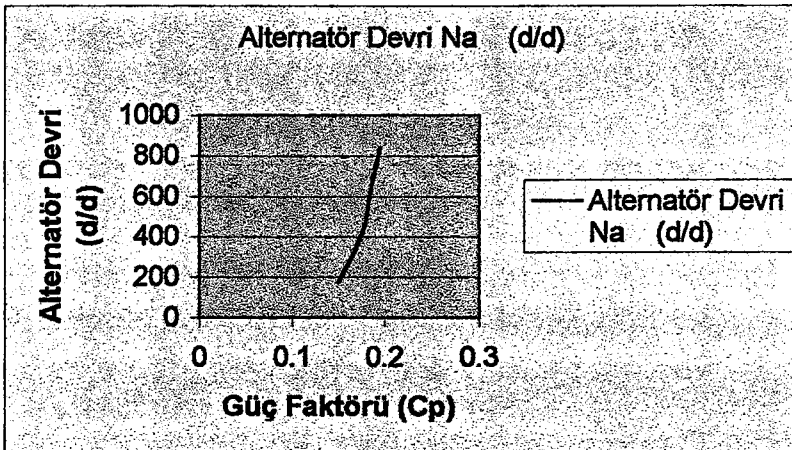


Şekil 4.2 Lüleli Model Türbinde Güç Faktörü-Uç hız Oranı Değişimi

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 Lülesiz ve lüleli durumlarda güç faktörünün alternatör devri ile değişimi verilmiştir.



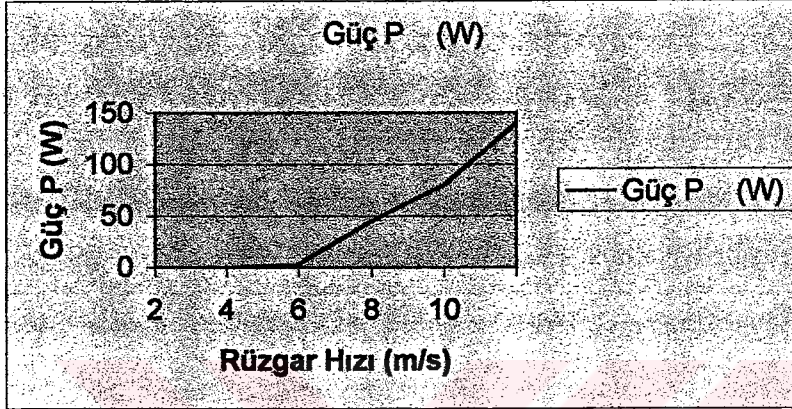
Şekil 4.3 Lülesiz Model Türbinde Güç Faktörü-Alternatör Devri



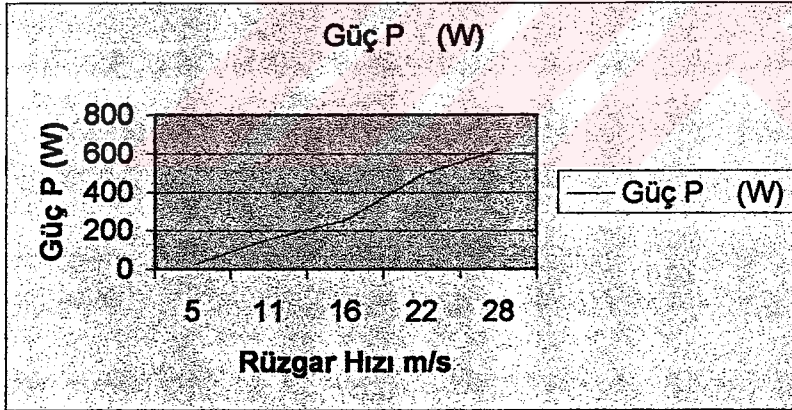
Şekil 4.4 Lüleli Model Türbinde Güç Faktörü-Alternatör Devri

Lüveli modelde alternatör devirleri dolayısıyla elde edilebilecek güç miktarı optimum güç faktörüne yakın çıktığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 Lülesiz ve lüveli durumlarda rüzgar hızı ile gücün değişimi verilmiştir.



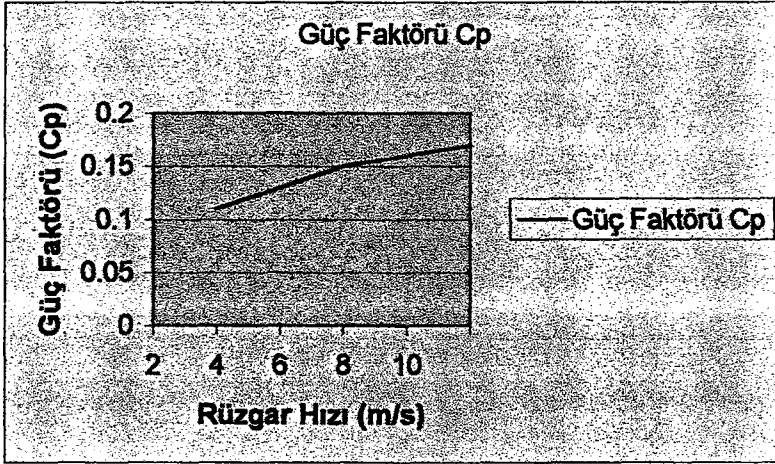
Şekil 4.5 Lülesiz Model Türbinde Güç (W)-Rüzgar Hızı Değişimi



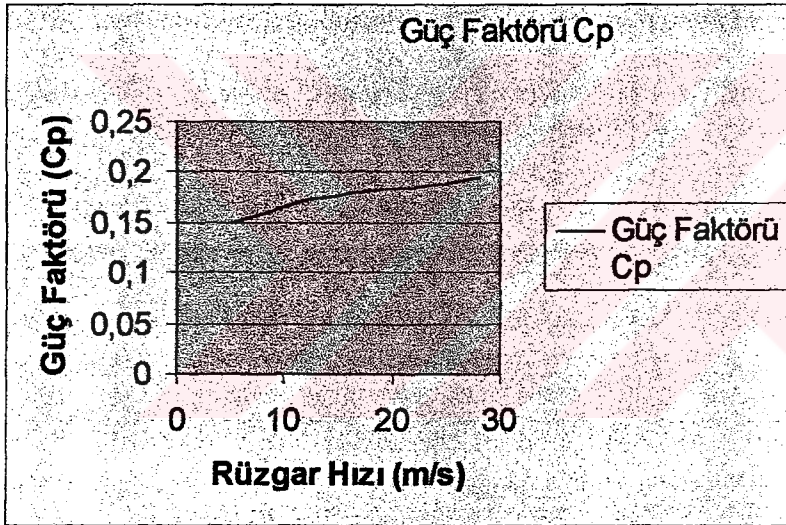
Şekil 4.6 Lüveli Model Türbinde Güç (W)-Rüzgar Hızı Değişimi

Rüzgar tüneline aynı hızlarda rüzgar çıktığı halde lüle kullanılarak hızların artırılması ile gücünde oldukça arttığı Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 karşılaştırıldığında anlaşılmaktadır.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 Lülesiz ve lüveli durumlarda rüzgar hızı ile güç faktörü değişimi verilmiştir.



Şekil 4.7 Lülesiz Model Türbinde Güç Faktörü-Rüzgar Hızı Değişimi



Şekil 4.8 Lüleli Model Türbinde Güç Faktörü-Rüzgar Hızı Değişimi

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'e göre de lüleli modelde artan aynı hızları aldıkları halde lüle sayesinde artan rüzgar hızında türbinin güç faktörünün optimum değerlere yaklaştığı görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yurdumuzda ortalama rüzgar hızlarının çoğunlukla 2 m/s 'nin altında olmasında dolayı yaklaşık 3-4 m/s hızlarında dönmeye başlayan yatay eksenli türbinlerinin çoğu bölgede kullanılabilmesi olanaksızdır. Bu yüzden ya düşük hızlarda çalışan yada rüzgarın artırılarak rotora gönderilmiş sistemlerin önemi artmaktadır. Lüleli Savonius model türbininde hem rüzgar hızları artırılmış hemde düşük hızlarda çalışabilmiş olması bu türbinin düşük enerji ihtiyacı olan ulusal şebeken uzak yerlerde su pompalamak, bir evin elektrik ihtiyacını karşılayabilmek gibi avantajları mevcuttur. Ekler bölümünde Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından ölçülen ve değerlendirilen Isparta ve Türkiye'ye ait ortalama rüzgar değerleri ile potansiyel enerji miktarları verilmiştir.

Deneyler sırasında karşılaşılan en önemli problem seçilen malzemeden ötürü lülelin ağırlığı ve boyutlarının çok yer tutmasıdır. Bu problemde lüle malzemesi olarak kompozit malzeme kullanılması ile çözülebilir.

Ulusal bazda elektrik üretilmesi istendiğinde ise bu sistemin yerine 50-200 m rotor çapına sahip yatay eksenli türbinlerin özellikle rüzgar alan kıyı sahillerimizde tercih edilmesi gerekir.

Türkiye' de son yıllarda yapılan yatırımlarla rüzgar enerjiside artık bir alternatif olarak düşünölmeye başlanmıştır.

Tablo 5.1' de Yurdumuzun bölgelerine ortalama rüzgar gücü yoğunluğu ve ortalama rüzgar hızları verilmiştir (EİEİ, 2000). Bu tabloya bakıldığında ortalama hızın 2-3 m/s aralığında olduğu ve mevcut yüksek kapasiteli rüzgarlara çoğunlukla uygun olmadığı görölmektedir. Ancak bu değerler meteoroloji istasyonlarının verilerine göre tespit edildiği için rüzgar santrali projelerinde bize açık bir fikir veremez. Çünkü bu bölgeler içinde araştırılması gereken kimi yerler vardır ki ortalama hızın bir kaç kat hızında esme hızına ve oldukça yüksek bir esme yüksek hız esme süresine sahiptirler. Bu yüzden türbin sistemleri kurulmadan önce kurulacak bölgenin rüzgar karakteristiğinin çok iyi belirlenmesi gerekir. Bunun için geliştirilen sistemler mevcutlar. Bu sistemler sayesinde yöreye kurulan 50-100-150 m yüksekliğindeki direklere bağlı olan dijital

anemometrelerle çok kısa süre aralıklarında alınan rüzgar karakteristiklerinin bilgisayarlarla değerlendirilmesi sonucunda bölgenin rüzgar karakteristiği tespit edilir. Bu işlem en az 6 ay sürmesi gerekir.

Yurdumuzda bu tür araştırmaya ya müsait bir çok bölge bulunmaktadır. Rüzgar enerjisi sistemlerinin 3-4 yıl gibi kısa sürede kendini amorti edebilmesi ve ömürlerinin bir hidrolik santralle eşdeğer olması bakımından bu araştırmaların yurdumuz enerji politikaları açısından önemi büyüktür.

Tablo 5.1 Bölgelere Ait Rüzgar Gücü Yoğunluğu ve Ortalama Hızlar

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

Türkiye kurulu rüzgar güçleri ve ileriki yıllarda kurulması planlanan rüzgar enerjisi santralleri güçleri Tablo 5.2 de verilmiştir (EİEİ, 2000).

Tablo 5.2 Türkiye de Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü ve Ortalama Üretim Hedefi

Yıl	Kurulu Güç (MW)	Ortalama Üretim (GWh)	Tüm Elektrik Enerjisi Tüketimindeki Payı %
2000	300	675	0.5
2005	1359	3058	1.53
2010	2979	6703	2.31
2015	5142	11570	2.91
2020	7849	17660	3.23
2025	11200	25200	3.55

Tablo 5.2' incelendiğinde önümüzdeki yıllarda rüzgar enerjisinin Türkiye'de yavaş yavaş yaygınlaşacağı görülmektedir.

Tablo 5.3 de ise TEAŞ tarafından hazırlanan Türkiye henüz yeni kurulmuş yada kurulması planlanan sistemler, yıllara göre enerji maliyeti ve elektrik satış maliyeti verilmiştir (EİEİ, 2000). Bu tablodan anlaşılacağı üzere enerji maliyetinin ve satışının her yıl azar azar düştüğü gözlenmektedir.

Tablo 5.3 Tedaş'ın Rüzgar Elektriği Birim Enerji Alış Tarifesi ve Proje Bilgileri

Kuruluş Yeri	1 Türbin Nominal Gücü	Toplam Nominal Gücü	Türbin Adedi	1 Türbin Yatırım Gideri (DM)	Birim Enerji Satış Fiyatı (DM/kWh)
Germiya-Çeşme (Demirer H.)	500 KW (Enerkon 40)	1.5 MW	3	1 226 667	10 YIL:0.169 10 yıl:0.075
Çeşme-Alaçatı (İnterwind)	600 KW (Vestas 44)	7.20MW (D=44m)	12	1 370 833	6 yıl:0.16 6 yıl:0.15 6 yıl:0.056
Koçadağ-Urla (Asmakinsan)	-	50.4 MW	-	-	6 yıl:0.164 6 yıl:0.15 8 yıl:0.056
Çanakkaler (Asmakinsan)	-	30 MW	-	-	12 yıl:0.156 8 yıl:0.063
Bozcaada (Demirer H.)	-	10 MW	-	-	10 yıl:0.173 10 yıl:0.077

Rüzgar enerjisi alanında yapılacak çalışmaların desteklenmesi ve yurdumuzun rüzgar alan bölgelerinin karakteristiklerinin belirlenmesi ile yeni santral alanları bulunabilir. Bu çalışmalar zaman enerji darboğazına düşen ülkemiz için bir alternatif olabileceğinde bu çalışmaları yapan üniversiteler ve diğer kurumları devlet tarafından da desteklenmesi gerekir.

KAYNAKLAR

- Akgün, N., 1996, Rüzgar Analizi Ve Türkiye'de Rüzgar Atlasının Hazırlanması, Meteoroloji Lodos Dergisi, Sayı 14., Ankara, 7-20s.
- Bossanyi, E.A., 1999, Theory Manual of Bladed for Windows, Garrad Hassan and Partners Limited Pres, England, 74p.
- Cerit, B., 1999, Rüzgar Enerjisi Santrallerinde Elektrik Üretimi Üzerine Bir Araştırma, S.D.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Isparta, 114s. (yayımlanmamış).
- David, A.Spera., 1998, Wind Türbine Tecnoloji; Fundamental Concepts Of Wind Türbine Enginnering, New York, Asme Press, ISBN 0791812057, Usa, 638p.
- EİEİ., 2000, Sürdürülebilir Enerji Teknolojilerindeki Gelişmeler ve Türkiye'deki Durum, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Yayını, Antalya, 25-40s. (yayımlanmamış)
- Gipe, P., 1995, Wind Energy Comes Of Age, New York, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-1324-X, Usa, 656p.
- Hickok, F.Y., 1975, Hanbook Of Solar And Wind Energy, Cohners Publishind Company, ISBN 0-8436-0159-0, Usa, 117p.
- Kolaçan, A.F., 1995 Rüzgar Enerjisi Ve Savonius Rüzgar Türbini, İtü Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, İstanbul, 56s.
- Koç, R., 1995, Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretim Mekanizması Tasarım Ve İmalı, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Kütahya, 76s.
- Le Gourieres, O., 1992, Wind Power Plants Theory And Desing, Newyork, Pergemon Pres, ISBN-0-08-029966-0, Usa, 285s.
- Sayındı, M., 1994, Rüzgar Enerjisi Ve Rüzgar Türbini Tasarımı, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, İstanbul, 145s.

Walker, J.F., 1997, Wind Energy Tecnology, Chichester, John Wiley, ISBN 0471960446, Usa, 161p.

Yürekli, O., 1991, 3 Kva'lık Bir Rüzgar Dönüşüm Sisteminde Jeneratör Karakteristiklerinin Belirlenmesi Ve Yörenin Rüzgar Enerjisinin Kullamlabilirliği, Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Konya, 85s.



ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Ispartada doğdum. İlk ve orta öğrenimimi Isparta'da tamamladıktan sonra 1986 yılında Ankara Anadolu Meteoroloji Meslek Lisesinde lise eğitimime başladım. 1990 yılında mezun olduktan sonra Gölcük/İzmit Meteoroloji Müdürlüğünde teknisyen olarak memuriyete başladım. 1991 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü' de üniversite eğitimime başladım. 1993 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi'ne yatay geçiş yaparak 1996 yılında mühendislik eğitimimi tamamladım. 1999 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Tekstil Mühendisliği' nde Uzman olarak göreve başladım. Halen bu göreve devam etmekteyim.





EKLER

EK-1

ISPARTA METEOROLOJİ BÖLGE MÜDÜRLÜĞÜ UZUN YILLAR METEOROLOJİK DEĞERLERİ

İstasyon Adı:ISPARTA	AYLAR												
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Meteorolojik Elemanlar													
Uzun yıllar yağış ort. mm. (52 yıl)	90	76.3	61.9	51	59.7	36	11.9	9.6	19.2	40.4	44.4	100	600.4
Uzun yıllar sıcaklık ort. C (52 yıl)	1.7	2.8	5.8	10.7	15.4	19.7	23.1	23	18.4	13.1	7.9	3.6	12.1
Uzun yıllar nem ort. % (51 yıl)	76	73	66	61	59	52	44	44	51	62	71	77	66
Uzun yıllar rüzgar hızı ort. m/sec (40 yıl)	2	2.2	2.5	2.4	1.8	1.7	1.8	1.7	1.5	1.5	1.6	1.9	1.9
Uzun yıllar hakim yön	W	SE	SE	SE	SE	NW	NE	NE	W	W	SE	SE	SE

Kaynak:İsparta Meteoroloji Müdürlüğü